

Kommentierte Rohübersetzung von  
**Über den Einfluß von Kohlensäure in der  
Luft auf die Temperatur des Bodens  
(1896)**

Kommentierte Kopie von  
**Über die Wärmeabsorption durch  
Kohlensäure (1901)**

Svante Arrhenius

Rohübersetzung, Kommentierung und Bearbeitung  
Dipl.-Physiker Jochen Ebel

11. Februar 2014

## Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Vorangestelltes</b>	<b>2</b>
0.1	Kopfdaten 1896 . . . . .	2
0.2	Kopfdaten 1901 . . . . .	2
0.3	Bemerkungen . . . . .	3
<b>1</b>	<b>Einleitung: Die Beobachtungen Langley's zur atmosphärischen Absorption</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Die Gesamtaufnahme von Atmosphären unterschiedlicher Zusammensetzung</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Thermischen Gleichgewicht auf der Oberfläche und in der Atmosphäre der Erde</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Berechnung der Variation der Temperatur, die in Folge einer bestimmten Variation der Kohlensäure in der Luft ergeben würden</b>	<b>21</b>

<b>5 Geologische Folgen</b>	<b>25</b>
<b>6 Ergänzung</b>	<b>30</b>
<b>7 1901 Über die Wärmeabsorption durch Kohlensäure</b>	<b>32</b>
<b>8 Verzeichnisse</b>	<b>40</b>
Abbildungsverzeichnis . . . . .	40
Tabellenverzeichnis . . . . .	40
Literaturverzeichniss . . . . .	41

## 0 Vorangestelltes

### 0.1 Kopfdaten 1896

Über den Einfluß von Kohlensäure in der Luft auf die Temperatur des Bodens.

Von Prof. Svante Arrhenius

The London Edinburgh und Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science [Fifth Series], Volume 41, April 1896, pages 237 - 276.

XXXI. Über den Einfluß von Kohlensäure in der Luft auf die Temperatur des Bodens.

Von Prof. Svante Arrhenius [Arrhenius, 1895]

Weitere Kopien [Arrhenius, 1896], [Arrhenius, 1897]

### 0.2 Kopfdaten 1901

Über die Wärmeabsorption durch Kohlensäure

von Svante Arrhenius.

(Bearbeitung einer der sehwedischen Akademie der Wissenschaften am 9. Januar 1901 vorgelegten Abhandlung.)

(Eingegangen 19. Januar 1901.)

Von diesem Paper sind Kopien im Netz vorhanden [z. B. <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15314w.langDE>, Seite 690 - 705], woraus die nachfolgende Kopie (Seite 32ff) entstand.

### 0.3 Bemerkungen

Übersetzung erfolgte auf Basis der Kopie in <http://www.globalwarmingart.com/images/1/18/Arrhenius.pdf>

Hauptpunkt der Bearbeitung ist die Änderung der Formate der Quellenangaben näherungsweise auf den heutigen Stil.

Hinweise auf Fehler, übertrieben freie Übersetzung, bessere Übersetzung oder anderes bitte an <mailto:JEbel@t-online.de>.

Ergänzungen unterscheiden sich vom übersetzten Text durch die [blaue Schriftfarbe](#).

Das Paper wird von einigen Kreisen vielfach geschmäht und entstellt wiedergegeben. Grund dafür dürfte sein, daß Arrhenius (möglicherweise als erster) gefordert hat, die Verbrennung von Kohle einzuschränken (Seite 27):

...durch welche Kohlensäure aus der Atmosphäre zu jeder Zeit entfernt wurde, nämlich die chemische Verwitterung silikatischer Mineralien, von der gleichen Größenordnung ist wie Vorgänge mit gegenteiliger Wirkung, die durch die industrielle Entwicklung unserer Zeit verursacht wird, und welche als **vorübergehend** konzipiert werden muss.

Ansonsten erscheint es für die Kommentierung als nützlich, auf folgendes hinzuweisen:

Die ersten beiden Kapitel (Seiten 4 und 11) sind nur von historischem Interesse, weil diese die Bestimmung der Absorptionskoeffizienten auf Basis der damaligen Meßmöglichkeiten wiedergeben. Heute hat man genauere Meßverfahren.

Das Paper scheint den Stand des Wissens von 1896 ohne Fehler widerzuspiegeln. Verschiedene andere Autoren hatten schon wesentliches zum Treibhauseffekt zusammengetragen - daraus treffen Angriffe nicht zu, er habe als erster den Treibhauseffekt genannt. Arrhenius hat dieses Wissen auf den damaligen Wissensstand aktualisiert.

Aus heutiger Sicht sind folgende Mängel erkennbar:

- Da die Bedeutung der Eigenstrahlung noch nicht richtig erkannt war, wurde die Überlagerung von Absorption und gleichzeitiger Emission (Strahlungstransportgleichung) noch nicht richtig erkannt. Diese findet man möglicherweise das erste Mal (?) bei [[Schwarzschild, K.](#), 1906]. Insofern ist die Absorption zu gering gemessen, da ein Teil der absorbierten Strahlung durch die Eigenstrahlung ersetzt wurde - und dieser Ersatz ist temperaturabhängig. Da die Temperatur im Laufe des Tages schwankt, ist die Beobachtung, daß *»aber wenn die Beobachtungen zu sehr unterschiedlichen Zeiten genommen, unterscheiden sich die Werte im allgemeinen auch sehr.«* ganz erklärlich - aber von Arrhenius noch nicht erkannt. Das ist etwas verwunderlich, da Arrhenius teilweise auch die Gasstrahlung behandelt.
- Die Nettowärmestrahlung [Gleichung (1 auf Seite 16)] hat die richtige Größe, die Trennung in Aufwärtsstrahlung und Gegenstrahlung hat Arrhenius nicht gemacht. Diese Auftrennung war damals nur von theoretischen Interesse (Stefan 1879), für den Zweck seines Papers mußte deshalb Arrhenius diese Aufteilung nicht nennen.
- Eine Trennung in absorbierende und emittierende Schicht (die sogar heute von Laien gemacht wird) ist unzulässig, da - wie Arrhenius sogar richtig schreibt - Absorption und Emission immer zusammenhängen.
- Die Vertikalkonvektion, die zum troposphärischen Temperaturgradienten führt ist nicht explizit angegeben.

Trotzdem ist es verblüffend, wie nahe Arrhenius Klimasensitivität an die heutigen Werte herankommt.

Das von [Arrhenius, 1897] geschriebene Paper wurde von [Ångström, 1900b] kritisiert und diese Kritik wird von einigen Kreisen als Beleg für angebliche Fehler von [Arrhenius, 1897]

verwendet. Grund dafür dürfte sein, daß Arrhenius (möglicherweise als erster) gefordert hat, die Verbrennung von Kohle einzuschränken (Seite 27). Das Paper von [Ångström, 1900b] war für [Ångström, 1901] Anlaß, sich noch gründlicher mit dem Sachverhalt zu befassen und dabei sowohl Fehler von Ångström richtig zu stellen als auch seine eigenen Daten zu aktualisieren. Diese Widerlegung ließ offensichtlich Ångström keine Ruhe und er erwiderte Sie [Arrhenius, 1901]. Dabei bestätigte er die wichtigsten Punkte von Arrhenius, aber äußerte Vermutungen für Unterschiede, die er aber mangels Meßgenauigkeit nicht überprüfen könne.

Möglicherweise war wiederum diese Richtigstellung durch [Ångström, 1901] auch für Ångström Anlaß sich gründlicher mit dem Sachverhalt zu beschäftigen und einiges zu verstehen. Dabei erkannte Ångström die Bedeutung der Gegenstrahlung und erfand 1905 das entsprechende Meßgerät dafür - [Ångström, 1916], [WMO, 1980], [Lexikon, 2014].

Grund für die Datenunterschiede in den verschiedenen Papern könnte neben fortschreitender Meßgenauigkeit auch sein, daß die Paper der beiden vor 1905 die Tatsache der Abwärtsstrahlung (Gegenstrahlung) noch nicht berücksichtigt haben. »*Er [Anders Ångström] begründete und berechnete die Wirkung von Kohlendioxid auf die Strahlung in der Atmosphäre, die alle früheren Forscher vernachlässigt hatten.* {*He [Anders Ångström] established and calculated the effect of carbon dioxide on radiation in the atmosphere which had been neglected by previous research workers.*}« [WMO, 1980].

## 1 Einleitung: Die Beobachtungen Langley's zur atmosphärischen Absorption

Es wurde viel über den Einfluss der Absorption in der Atmosphäre auf das Klima geschrieben. [Tyndall, 1865, Seite 405] insbesondere hat die enorme Bedeutung dieser Frage hingewiesen. Für ihn war es vor allem die Tages- und Jahresschwankungen der Temperatur, die durch diesen Umstand verringert wurden. Eine andere Seite der Frage, die lange angezogen hat die Aufmerksamkeit der Physiker, ist: Ist die Durchschnittstemperatur der Erde in keiner Weise durch die Anwesenheit von wärmeabsorbierenden Gasen in der Atmosphäre beeinflusst? [Fourier, 1824] gehalten, dass die Atmosphäre wirkt wie das Glas eines Treibhauses, denn sie ermöglicht es, durch die Lichtstrahlen der Sonne, behält aber die dunklen Strahlen aus dem Boden. Diese Idee wurde von [Pouillet, 1838, p. 41] ausgearbeitet und Langley wurde von einigen seiner Forschungen zu der Ansicht geführt, dass »die Temperatur der Erde unter direkter Sonneneinstrahlung, auch wenn unsere Atmosphäre als jetzt vorhanden wäre, würde wahrscheinlich zu  $-200^{\circ}\text{C}$  fallen, wenn das Ambiente nicht die Qualität der selektiven Absorption besitzen« [Langley, 1884, p. 123]. Diese Ansicht, die auf eine zu große Verwendung von Newtons Gesetz der Abkühlung gegründet wurde, aufgegeben werden muss, als Langley selbst in einer späteren Abhandlung zeigte, dass der Vollmond, die sicherlich keinerlei sensible Wärme absorbierenden Atmosphäre nicht besitzt, hat eine »mittlere effektive Temperatur« von etwa  $45^{\circ}\text{C}$ . [Langley, 1890b, S.193]

Die Luft speichert die Wärme (hell oder dunkel) auf zwei verschiedene Arten. Zum einen leidet die Wärme eine selektive Diffusion auf seinem Durchgang durch die Luft auf der anderen Seite einige der atmosphärischen Gase absorbieren erhebliche Wärmemengen. Diese beiden Maßnahmen sind sehr unterschiedlich. Die selektive Diffusion ist für die UV-Strahlen zusätzlichen gewöhnlich groß, und nimmt kontinuierlich mit steigender Wellenlänge des Lichts, so dass sie unempfindlich für die Strahlen, die den Hauptteil der Strahlung von einem Körper von der mittleren Temperatur der Erde bilden (siehe Kasten nächste Seite).

Die selektive Absorption der - Atmosphäre ist, nach den Untersuchungen von Tyndall, Lecher und Pernter, Röntgen, Heine, Langley, Angstrom, Paschen und andere

[Langley, 1884, p. 151] Ich habe versucht, eine Formel für den Wert des Absorptions aufgrund der selektiven Reflexion durch Langley Unter den verschiedenen Formeln untersucht bestimmt berechnen, stimmt die folgenden am besten mit den experimentellen Ergebnissen:

$$\ln a = b(1/\lambda) + c(1/\lambda)^3.$$

Ich habe die Koeffizienten dieser Formel mit Hilfe von der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und gefunden,

$$b = -0,0463, \quad c = -,008204$$

a die austretende Stärke eines Strahls der Wellenlänge  $\lambda$  (ausgedrückt in  $\mu m$ ), nachdem er mit der Stärke 1 einfällt und die Luft der Masse 1 passiert hat. Die gute Übereinstimmung mit dem Experiment ist aus der folgenden Tabelle zu entnehmen:

$\lambda$	$a^{1/(7.6)}$ (beob.)	$a^{1/(7.6)}$ (bere.).	Prob. Fehler
0,358	0,904	0,911	
0,383	0,920	0,923	0.0047
0.416	0,935	0,934	
0.440	0.942	0.941	
0.468	0.950	0.947	0.0028
0.550	0.960	0.960	
0.615	0.968	0.967	
0,781	0,978	0,977	
0.870	0.982	0.980	0.0017
1.01	0.985	0.984	
1.20	0.987	0.987	
1.50	0.989	0,990	0.0011
2.50	0.990	0.993	0.0018

Für ultra-violette Strahlen wird die Absorption im Einklang mit den Tatsachen extrem groß.

Als einer von den wahrscheinlichen Fehler, die ich neben der übereinstimmenden Werte für mindestens einen Wert (1,50), wobei der wahrscheinliche Fehler ist extrem klein platziert und auch sehen kann, sind nur von der Größe, die man vielleicht in einer genau pass erwarten, dass die Unterschiede Formel. Die Kurven für die Formel und für die experimentellen Werte einander schneiden an vier Punkten ( $1/\lambda = 2,43, 1,88, 1,28$  bzw.  $0,82$ ). Aus der Formel können wir den Wert der selektiven Reflexion für die Teile des Spektrums, die in der Wärme aus dem Mond und der Erde herrschen schätzen (Abweichungswinkel =  $38 - 36^\circ$ ,  $\lambda = 10.4 - 24.4 \mu m$ ). Wir finden, dass die Absorption aus diesem Grunde zwischen 0.5 und 1 p. c. für die Luftmassen schwankt. Diese unempfindlich Aktion, die ganz von den Versuchsfehlern abgedeckt ist, habe ich in den folgenden Berechnungen vernachlässigt.

z. B. [Winkelmann, 1895], von der ganz anderen Art. Es wird nicht durch die Hauptmasse der Luft ausgeübt wird, aber in einem hohen Grad von Wasserdampf und Kohlensäure, die in der Luft in kleinen Mengen vorhanden sind. Weiterhin ist diese Absorption nicht kontinuierlich über das gesamte Spektrum, aber im Licht Teil davon fast unempfindlich, und vor allem auf die langwelligen Teil, in dem es sich in sehr gut definierten Absorptionsstreifen, die schnell ab greifen begrenzt beide Seiten vgl. z. B. [Trabert, 1894, p. 238]. Der Einfluss dieser Absorption ist vergleichsweise klein in der Wärme von der Sonne, sondern muss von großer Bedeutung bei der Übertragung der Strahlen von der Erde. Tyndall war der Meinung, dass die Wasserdampf den größten Einfluss hat, während andere Autoren, zum Beispiel Lecher und Pernter, sind geneigt zu denken, dass die Kohlensäure spielt die wichtigere Rolle. Die Untersuchungen von Paschen zeigen, dass diese Gase sind beide sehr effektiv, so dass wohl manchmal die eine, manchmal die andere, die größere Wirkung kann je nach den Umständen haben.

Um eine Vorstellung davon, wie stark die Strahlung der Erde (oder jeder anderen Stelle der Temperatur  $15^\circ C$ ) wird durch Mengen von Wasserdampf oder Kohlensäure in den Pro-

portionen, in denen diese Gase vorhanden sind in absorbiert bekommen unsere Atmosphäre sollte streng genommen ordnen Experimente zur Absorption von Wärme von einem Körper bei 15°C durch entsprechende Mengen der beiden Gase. Aber solche Experimente sind noch nicht gemacht worden, und da sie sehr teuer Gerät darüber hinaus zu meiner Verfügung erfordern würde, habe ich nicht in der Lage, sie auszuführen gewesen Glücklicherweise gibt es andere Untersuchungen von Langley in seiner Arbeit über »Die Temperatur des Mondes«, mit Hilfe von dem es scheint nicht unmöglich, die Absorption von Wärme durch Wasserdampf und durch Kohlensäure genau die Bedingungen, die in der Atmosphäre auftreten, zu bestimmen. Er hat die Strahlung der Vollmond in verschiedenen Höhen und Zeiten des Jahres (wenn der Mond nicht voll war, wurde die notwendige Korrektur relativ zu diesem Punkt angewendet) gemessen. Diese Strahlung wurde darüber hinaus in einem Spektrum verteilt sind, so dass in seinen Memoiren finden wir die Zahlen für die Strahlungswärme von der Mond für 21 verschiedene Gruppen von Strahlen, die durch den Winkel der Abweichung mit einer Steinsalz Prisma mit einer brechenden Winkel von 60° definiert sind. Die Gruppen liegen zwischen den Winkeln 40° und 35°, und jede Gruppe wird von seinen Nachbarn durch einen Abstand von 15 Minuten getrennt. Nun wird die Temperatur des Mondes ist nahezu die gleiche wie die der Erde und der Mond - Strahlen, wie sie ankommen an den Messinstrumenten, durch Schichten von Kohlensäure geleitet und von Wasserdampf mit unterschiedlicher Dicke entsprechend der Höhe der der Mond und die Feuchtigkeit der Luft. Wenn, dann wurden diese Beobachtungen vollständig miteinander vergleichbar, drei davon für die Berechnung des Absorptionskoeffizienten relativ zu Wasserdampf und Kohlensäure zu einem der 21 verschiedenen Strahlengruppen ausreichen würde. Aber, wie bei einer Überprüfung des 24 verschiedene Reihe von Beobachtungen ohne weiteres zeigen, ist dies viel der Fall ist. Die Strahlungsintensität für jede Gruppe von Strahlen stets mit zunehmender Menge an Wasserdampf oder Kohlensäure durchlaufen zu verringern. Nun ist die Kohlensäuremenge ist proportional zu dem Weg des Strahls durch die Atmosphäre, das heißt, um die Menge der »Luft-Masse« in Langley's Bildern. Als Einheit für die Kohlensäure nehmen wir daher für die Luftmassen = 1, das heißt der Menge an Kohlensäure in der Luft, die durch einen vertikalen Strahl durchquert wird. Die Menge an Wasserdampf durchquert teilweise proportional zu den »Luftmassen« teilweise der Feuchte, ausgedrückt in Gramm Wasser pro Kubikmeter. Als Einheit für die Wasserdampfmenge habe ich die Menge des Wasserdampfes genommen, der durch einen vertikalen Strahl durchlaufen wird, wenn die Luft 10 Gramm pro Kubikmeter an der Oberfläche der Erde hat<sup>1)</sup> gemacht. Wenn wir tabellarisch die 24-Reihe von Beobachtungen von Langley in der Arbeit mit Bezug auf die Mengen von Kohlensäure und Wasserdampf zitiert veröffentlicht, haben wir sofort erkennen, dass seine Figuren laufen sehr unregelmäßig, so dass sehr viele Ausnahmen von der Regel, dass das übertragene gefunden Wärme sollte kontinuierlich verringern, wenn diese beiden Mengen zu erhöhen.

Und es scheint, als ob periodische Veränderungen mit der Zeit der Beobachtung in seiner Serie aufgetreten ist, auf welchen Umständen diese Veränderungen mit der Zeit abhängen, man kann nur vage Vermutungen: wahrscheinlich die Klarheit des Himmels kann innerhalb einer langen Beobachtungszeitraum verändert haben, obwohl dies mit dem Auge nicht erkannt werden könnte. Um diese unregelmäßige Variation zu beseitigen, habe ich die Beobachtungen in vier Gruppen eingeteilt, für die die Durchschnittsmengen von Kohlensäure (K) und der Wasserdampf (W) waren angesetzt 1,21 und 0,36; 2,21 und 0,86; 1,33 und 1,18 und 2,22 und 2,34. Mit Hilfe der Mittelwerte der Wärmestrahlung für jede Gruppe von Strahlen in vier Gruppen von Beobachtungen, habe ich ungefähr für beide Gase die Absorptionskoeffizienten (x und y) berechnet und durch diese verringert den Wert für jede Beobachtung auf den Wert, den er besessen hätte, wenn K = 1,5 und W = 0,88 wären. Die 21 Werte für die verschiede-

1) Das Gerät entspricht nahezu dem Mittelwert Feuchtigkeit der Luft (siehe Tabelle 6 auf Seite 22).

nen Strahlen wurden dann aufsummiert, so dass ich die gesamte Wärmestrahlung für jede Reihe von Beobachtungen, um  $K = 1,5$  und  $W = 0,88$  reduziert erhalten. Wenn die Materialien der Beobachtung waren sehr regelmäßige, sollten die Werte für diese Gesamtstrahlung nicht sehr stark voneinander unterscheiden. In der Tat sieht man, dass die Beobachtungen mit fast der gleichen Zeit hergestellt werden geben auch fast gleich Werte, aber wenn die Beobachtungen zu sehr unterschiedlichen Zeiten genommen, unterscheiden sich die Werte im allgemeinen auch sehr. Für die folgenden Zeiträume habe ich die entsprechenden Mittelwerte der Gesamtstrahlung gefunden:

Zeitraum	mittlere Wert	Reduktionsfaktor
Jahr 1885. 21. FEBRUAR - 24. Juni	4850	1.3
Jahr 1885. Juli von 29 bis 1886 Feb.16.	6344	1.00
Jahr 1886. Sept.13 - September 18	2748	2.31
Jahr 1886. 11. Oktober - November 8	5535	1.15
Jahr 1887. 8. Januar - Februar 9	3725	1.70

Um die Zahlen der Langley, um die Vergleichbarkeit untereinander zu reduzieren, habe ich die Reduktionsfaktoren oben, um den Bemerkungen in den jeweiligen Perioden tabellarisch angelegt. Ich habe mich davon überzeugt, dass durch diese Arbeitsweise keine systematischen Fehler in den folgenden Berechnungen eingebracht werden.

Nachdem dies geschehen ist, ordnete ich die Zahlen von Langley's Gruppen entsprechend den Werten von  $K$  und  $W$  in der folgenden Tabelle. (Für weitere Details siehe meine ursprüngliche Abhandlung.)

Tabelle 1: Strahlung (i) des Vollmondes für verschiedene Werte von  $K$  und  $W$   
 Tabelle nicht kopiert, die Werte können heute genauer bestimmt werden

In dieser Tabelle ist der Winkel der Abweichung als Kopf-Zeile gemacht. Nach  $K$  und  $W$  stehen die Mengen Kohlensäure und Wasserdampf die der Strahl in den oben erwähnten Einheiten durchquert. Unter diesem kommt, nachdem  $i_{beobachtet(obs)}$ , die Intensität der Strahlung (verringert) von Langley von der Bolometer beobachtet und danach der entsprechende Wert  $i_{berechnet(calc)}$  durch den Absorptionskoeffizienten in Tabelle 2 angegeben unten berechnet.  $G$  ist das »Gewicht« des entsprechenden  $i_{beobachtet(obs)}$  bei der Berechnung angegeben, nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Mit den Absorptionskoeffizienten, die auf diese Weise berechnet wurden, erstelle ich die folgende Tabelle. (Es sind die gewöhnlichen Logarithmen der Absorptionskoeffizienten aufgeführt.)

Tabelle 2: Absorptionskoeffizienten von Kohlensäure (x) und Wasserdampf (y)

Winkelabweichung	log x	log y	A
40.0°	{ +0.0286 0.0000	{ -0.1506 -0.1455	27.2
39.45	-0.0296	-0.1105	

Tabelle 2: (Fortsetzung)

Winkelabweichung	log x	log y	A
39.30	-0.0559	-0.0952	29.6
39.15	-0.1070	-0.0862	26.4
39.0	-0.3412	-0.0068	27.5
38.45	-0.2035	-0.3114	24.5
38.30	-0.2438	-0.2362	13.5
38.15	-0.3760	-0.1933	21.4
38.0	-0.1877	0.3198	44.4
37.45	-0.0931	-0.1576	59.0
37.30	-0.0280	-0.1661	70.0
37.15	-0.0416	-0.2036	75.5
37.0	-0.2067	-0.0484	62.9
36.45	{ -0.2465	{ +0.0008	} 56.4
	{ -0.2466	{ -0.0000	
36.30	-0.2571	-0.0507	51.4
36.15	{ -0.1708	{ +0.0065	} 39,1
	{ -0.1652	{ -0.0000	
36.0	-0.0940	-0.1184	37.9
35.45	-0.1992	-0.0628	36.3
35.30	-0.1742	-0.1408	32.7
35.15	0.0188	-0.1817	29.8
35.0	-0.0891	-0.1444	21.9

Die Bedeutung dieser Zahlen kann an einem Beispiel verdeutlicht werden. Wenn ein Strahl von Wärme, entsprechend dem Winkel der Abweichung  $39^{\circ}45'$  durchläuft die Einheit der Kohlensäure, in der Intensität vermindert ist im Verhältnis 1: 0,934 ( $\log = -0,02916$ ), der entsprechende Wert für die Einheit des Wasserdampfes 1: 0.775 ( $\log = -0,1105$ ). Diese Zahlen sind natürlich nur für die Fälle, in denen die Beobachtungen gemacht, nämlich gültig., Dass der Strahl sollte einen Kohlensäuremenge  $K = 1,1$  und einer Menge an Wasserdampf  $W = 0,3$  vor der Absorption in der nächsten durchlaufenen Mengen von Kohlensäure und Wasser - Dampf wurde beobachtet, und diese zweite Menge sollte  $K = 1,1$  und  $W = 1,8$  nicht überschreitet, für die Beobachtungen nicht über einen größeren Abstand als zwischen  $K = 1,1$  und  $K = 2,2$  erweitert,  $S = 0,3$  und  $W = 2,1$  (die Zahlen für  $K$  und  $W$  sind ein wenig anders für Strahlen unterschiedlicher Hinter). Unter A ist der relative Wert der Intensität der Strahlung, geschrieben für eine bestimmte Art von Strahlen im Mondlicht, nachdem es durchquert  $K = 1$  und  $W = 0,3$ . In einigen Fällen ist die Berechnung ergibt positive Werte für  $\log x$   $y$  oder einloggen. Da es sich um eine physikalische Absurdität (es würde bedeuten, dass der Strahl sollte von seiner Passage durch die Absorption von Gas gestärkt werden), habe ich in diesen Fällen, die auf der Beobachtungsfehler hängen muss, übernahm die Absorption gleich Null für das entsprechende Gas, und mittels dieses Wertes berechnet den Absorptionskoeffizienten des anderen Gases und danach auch A.



Wie aus einer Überprüfung der Tabelle 1 auf Seite 7 sind die Werte von  $i_{obs}$  (*obs* = Abkürzung von beobachtet) sehen. stimmen in den meisten Fällen recht gut mit den berechneten Werten  $i_{calc}$  (*calc* = Abkürzung von calculate - berechnet). Aber in einigen Fällen die Vereinbarung ist nicht so gut, wie man sich wünschen kann. Diese Fälle werden meist von einem kleinen »Gewicht« $G$ , die in anderen Worten ist, ist das Material der Beobachtung in diesen Fällen relativ unzureichend. Diese Fälle treten auch in erster Linie für solche Strahlen sind stark von Wasserdampf absorbiert. Dieser Effekt ist vermutlich auf den Umstand, dass der Wasserdampf in der Atmosphäre, der angenommen wird, proportional zu der Feuchtigkeit an der Erdoberfläche variiert werden können, nicht immer den angenommenen idealen und gleichmäßige Verteilung der Höhe. Aus Beobachtungen während der Ballonfahrt gemacht, wissen wir auch, dass die Verteilung des Wasserdampfes kann sehr unregelmäßig, und unterscheidet sich von der mittleren ideale Verteilung sein. Es ist auch ein Merkmal gekennzeichnet, dass in einigen Gruppen, beispielsweise die dritte, die fast alle gemessenen Zahlen sind kleiner als diejenigen, die berechnet, während in anderen Gruppen, beispielsweise der vierten, ist das Gegenteil der Fall. Dieser Umstand zeigt, dass die Teilung der Statistik Material zu weit ein wenig durchgeführt und eine Kombination dieser beiden Gruppen würde eine enge Übereinstimmung zwischen den berechneten und den beobachteten Zahlen gezeigt haben. Da jedoch. Eine solche Kombination ist ohne Einfluß auf die Korrektheit der berechneten Absorptionskoeffizienten, habe ich eine Umlagerung der Figuren näher Gruppen weggelassen, mit der Folge Neuberechnung.

Ein Umstand, der sehr stark zu Gunsten der Meinung, dass die Absorptionskoeffizienten in Tabelle 2 auf Seite 7 angegeben argumentiert. nicht große Fehler enthalten, ist, dass so wenige Logarithmen haben einen positiven Wert. Wenn die Beobachtungen von Langley war völlig unzureichend gewesen wäre, hätte man erwartet, dass fast so viele positive als negative Logarithmen zu finden sind. Jetzt gibt es nämlich nur drei solche Fälle. Für Kohlensäure in einem Winkel von  $40^\circ$ , und für Wasserdampf in den Winkeln  $36^\circ 45'$  und  $36^\circ 15'$ . Die Beobachtungen für  $40^\circ$  sind nicht sehr genau, denn sie waren von geringem Interesse für Langley, die entsprechenden Strahlen nicht auf die Mond Spektrum gehören aber nur in dem diffusen Sonnenlicht vom Mond. Da diese Strahlen auch nicht zu einer sinnvollen Grad in der Wärme von einem Körper von  $15^\circ\text{C}$  auftreten, ist diese Vereinbarung nicht ohne Bedeutung für unser Problem. Die beiden positiven Werte für die Logarithmen zu Wasserdampf gehören, sind ziemlich unbedeutend. Sie entsprechen nur auf Fehler von 0,2 und 1.5 Prozent. für die Absorption von der Menge  $W = 1$ , und ganz in den Bereich der experimentellen Fehler.

Es ist sicherlich nicht ohne Interesse, diese Absorptionskoeffizienten mit den Ergebnissen der direkten Beobachtungen von Paschen<sup>2)</sup> und Ångström<sup>3)</sup> zu vergleichen. In diesem Vergleich, müssen wir bedenken, dass eine exakte Übereinstimmung kann nicht erwartet werden, denn die Bedeutung der obigen Koeffizienten ist ziemlich anders als die von den Koeffizienten, die sind oder können aus den Beobachtungen dieser beiden Autoren berechnet werden. Die obigen Koeffizienten geben die Absorptionsrate von einem Strahl, der Mengen von Kohlensäure ( $K = 1,1$ ) und Wasser-Dampf ( $W = 0,3$ ) durchlaufen hat, während die Koeffizienten der Paschen und Ångström stellen die Absorption durch einen Strahl auf dem Durchgang erlebt durch die ersten Schichten aus diesen Gasen. In einigen Fällen können wir einen großen Unterschied zwischen diesen beiden Größen zu erwarten, so dass nur eine allgemeine Vereinbarung kann er suchte.

Nach Angaben von Paschen scheint es sinnvoll, keine Emission oder Absorption durch den Wasserdampf bei Wellenlängen zwischen  $0.9\ \mu\text{m}$  und  $1.2\ \mu\text{m}$  existieren (entsprechend

2) [Paschen, 1893], [Paschen, 1894c], [Paschen, 1894d], [Paschen, 1894a]; vor allem [Paschen, 1893, tab. ix. Abb. 6] Kurve 1 für Kohlensäure, Kurve 2 für Wasserdampf

3) [Vetenskaps-Akademiens, 1889a, Ångström, p. 15], [Vetenskaps-Akademiens, 1889b, Ångström, p. 553]

dem Abweichungswinkel  $40^\circ$ ). Auf der anderen Seite zeigt die Darstellung des Sonnenspektrums durch Langley sehr viele starke Absorptionsstreifen in diesem Intervall, unter denen solche gekennzeichnet  $\rho$ ,  $\sigma$ ,  $\tau$  und  $\phi$  sind die prominentesten [Langley, 1889, S. 323 und 326], [Langley, 1884, Bildtafel 12], [Lamansky, 1872, p. 200]<sup>4)</sup>, und diese Absorptionsstreifen meisten gehören wahrscheinlich mit dem Wasserdampf, das Paschen hat keine Emission von Wasserdampf in diesem Intervall beobachtet kann sehr gut durch die Tatsache, dass seine Wärme - Spektrum hatte eine sehr geringe Intensität für diese kurzwellige Strahlung berücksichtigt werden. Aber es kann zugestanden werden, dass der Absorptionskoeffizient für Wasserdampf in diesem Winkel in Tabelle 2 auf Seite 7 ist nicht sehr genau (wahrscheinlich zu groß), in Folge der wenig Bedeutung, dass Langley mit den entsprechenden Beobachtungen angebracht. Nachdem dies in Langley Spektrum das große Absorptions-Band. in dem Winkel,  $39^\circ 45'$  ( $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$ ), wo in Paschen-Kurve der Emission erst sinnvoll wird ( $\log y = -0.1105$  in Tabelle 2 auf Seite 7). Bei Wellenlängen von größerem Wert finden wir nach Paschen starke Absorptionsbanden bei  $\lambda = 1.83 \mu\text{m}$ . ( $\Omega$  in Langley's Spektrum), also in der Nähe von  $39^\circ 30'$  und  $\lambda = 2.64 \mu\text{m}$  (Langley's X) ein wenig über Winkel  $39^\circ 15'$ . In Übereinstimmung mit diesem habe ich ziemlich große Absorptionskoeffizienten für Wasserdampf fanden unsere auf, diese Winkel ( $\log y = -0,0952$  bzw.  $-0,0862$ ). Danach ist von  $3.0 \mu\text{m}$  bis  $4.7 \mu\text{m}$  ist die die Absorption sehr klein und Paschen's Messung ist in Übereinstimmung mit meiner Berechnung ( $\log y = -0,0068$  bei  $39^\circ$ , entsprechend  $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$ ). Ab diesem Zeitpunkt erhöht sich die Absorption wieder und präsentiert neue Maxima bei  $\lambda = 5.5 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 6.6 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 7.7 \mu\text{m}$ , d.h. in der Nähe der Winkel  $38^\circ 45'$  ( $\lambda = 5.6 \mu\text{m}$ ) und  $38^\circ 30'$  ( $\lambda = 7.1 \mu\text{m}$ ). In diesem Bereich ist die Absorption durch Wasser-Dampf kontinuierlich über das ganze Intervall, in Folge dessen die große Absorptionskoeffizienten in diesem Teil ( $\log y = -0,3114$  und  $-0,2362$ ) verständlich werden. In Folge der abnehmenden Intensität des Emissionsspektrums von Wasserdampf in der Paschen-Kurve können wir die Details nicht genau zu verfolgen, aber es scheint, als ob die Emission von Wasser würde auch erheblich ist  $\lambda = 8.7 \mu\text{m}$  ( $39^\circ 15'$ ), mit der Konsequenz eines großen Absorptionskoeffizient in diesem Intervall ( $\log y = -0.1933$ ). Die Beobachtungen von Paschen gehen nicht weiter als  $\lambda = 9.5 \mu\text{m}$ , was einem Winkel von  $39^\circ 08'$  entspricht.

Für Kohlensäure finden wir zunächst den Wert Null bei  $40^\circ$ , im Einvernehmen mit den Figuren von Paschen und Angstrom<sup>5)</sup> die Absorption der Kohlensäure übernimmt zunächst ein sinnvoller Wert bei  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ , nach dem es schnell zu, auf ein Maximum bei  $\lambda = 2.6 \mu\text{m}$  und erreicht ein neues außergewöhnlich starkes Maximum bei  $\lambda = 4.6 \mu\text{m}$  (Langley's Y). Nach Angstrom ist die Absorption von Kohlensäure Null bei  $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$  und sehr schwach  $\lambda = 1.69 \mu\text{m}$ , wonach es kontinuierlich zunimmt bis  $\lambda = 4.6 \mu\text{m}$  und fällt wieder bis  $\lambda = 6.0 \mu\text{m}$ . Dieses Verhalten ist völlig in Übereinstimmung mit den Werten von  $\log x$  in Tabelle 2 auf Seite 7. Von dem Wert Null bei  $40^\circ$  ( $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$ ) ist es ein sinnvoller Wert ( $-0,0296$ ) erreicht bei  $39^\circ 45'$  ( $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$ ), und danach kommen größere und größere Werte ( $-0,0559$  bei  $39^\circ 30'$  und  $-0,1070$  bei  $39^\circ 15'$ ), bis es eine beträchtliche Maximum erreicht wird ( $-0,3412$  bei  $39^\circ$ , ( $\lambda = 4.3 \mu\text{m}$ . Nach diesem Punkt sinkt die Absorption ab (bei  $38^\circ 15' = \lambda = 5.6 \mu\text{m}$   $\log x = -0,2035$ ). Nach Tabelle 2 auf Seite 7 die Absorption der Kohlensäure bei  $38^\circ 30'$  und  $38^\circ 15'$  ( $\lambda = 7.1 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 8.7 \mu\text{m}$ ) hat sehr große Werte ( $\log x = -0,2438$  und  $-0,3730$ ), während es nach Angstrom unempfindlich sein sollte. Dieses Verhalten kann mit der Tatsache, dass Angstrom Spektrum hatte eine sehr geringe Intensität für große Wellenlängen verbunden ist. In Paschen-Kurve gibt es Spuren eines kontinuierlichen Absorption durch die

4) Lamansky schrieb seine Absorptionsstreifen, die wahrscheinlich hatte diesen Ort, zu dem Absorptionsleistung von Wasserdampf.

5) Es muss daran erinnert werden, dass an dieser Stelle das Spektrum der Paschen war sehr schwach, so dass das Zusammentreffen mit seiner Figur so zufällig sein

Kohlensäure in dieser gesamten Region mit schwachen Maxima bei  $\lambda = 5.2 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 5.6 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 6.6 \mu\text{m}$ , (möglicherweise aufgrund von Spuren des Wasser-Dampfes),  $\lambda = 8.4 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 8.9 \mu\text{m}$ . In Folge der starken Absorption von Wasserdampf in diesem Bereich des Spektrums, die Strahlungsintensität sehr klein in Langley's Beobachtung, so dass sich die berechneten Absorptionskoeffizienten nicht sehr genau ergeben (vgl. oben, Tabelle 1 auf Seite 7). Möglicherweise kann die berechnete Absorption der Kohlensäure zu groß sein, und deshalb der Wasserdampf zu klein in diesem Intervall (zwischen  $38^\circ 30'$  und  $38^\circ 0'$ ). Dies kann umso leichter geschehen, wie in Tabelle 1 auf Seite 7. K und W in allgemeinen Anstieg zusammen, weil sie beide proportional zu der »Luftmasse«. Es ist vielleicht darauf hinzuweisen, dass dies geschieht auch mit den Problemen, die unten behandelt werden, so daß der Fehler aus dieser Ursache nicht von so großer Bedeutung ist, wie man auf den ersten Blick denkt.

Für Winkel größer als  $38^\circ$  ( $\lambda > 5.9 \mu\text{m}$ ) verfügen wir über keine direkten Beobachtungen der Emission oder Absorption der beiden Gase. Das Sonnenspektrum nach Langley, weist sehr große Absorptionsbanden bei etwa  $37^\circ 50'$ ,  $37^\circ 25'$ ,  $37^\circ$  und  $36^\circ 40'$ . Nach meinen Berechnungen der Wasserdampf seine größte Absorptionskraft im Spektrum von  $38^\circ$  bis  $35^\circ$  bei Winkeln zwischen  $37^\circ 15'$  und  $37^\circ 45'$  (die Zahlen für  $35^\circ 45'$ ,  $35^\circ 30'$  und  $35^\circ 15'$  sind sehr unsicher, da sie auf sehr wenige Messungen abhängen) und die Kohlensäure zwischen  $36^\circ 30'$  und  $37^\circ 0'$ . Dies scheint zu zeigen, dass die ersten beiden Absorptionsbanden aufgrund der Wirkung von Wasserdampf in den letzten zwei zu der Kohlensäure. Es sollte betont werden, dass Langley größte Sorgfalt bei der Messung oder der Intensität der Mond-Strahlung in Winkeln zwischen  $36^\circ$  und  $38^\circ$  aufgebracht wird, wobei diese Strahlung seine maximale Intensität besitzt. Es kann daher angenommen werden, dass die berechneten Absorptionskoeffizienten für diesen Teil des Spektrums am genauesten sind. Dies ist von großer Bedeutung für die folgenden Berechnungen für die Strahlung von der Erde<sup>6)</sup> hat bei weitem die größte Intensität (etwa zwei Drittel, vergl. 12) in diesem Teil des Spektrums.

## 2 Die Gesamtaufnahme von Atmosphären unterschiedlicher Zusammensetzung

Da wir nun festgestellt, in der beschriebenen Weise die Werte der Absorptionskoeffizienten für alle Arten von Strahlen, wird es mit Hilfe der Figuren Langley [Langley, 1890b, Bildtafel 5] möglich sein, den Bruchteil der Wärme von einem Körper bei  $15^\circ\text{C}$  (wie der Erde) zu berechnen, die von einer Atmosphäre, die bestimmte Mengen Kohlensäure und Wasserdampf enthält, absorbiert wird. Um damit zu beginnen, werden wir diese Berechnung mit den Werten  $K = 1$  und  $W = 0,3$  führen. Wir nehmen diese Art von Strahlen, für die die besten Bestimmungen wurden von Langley gemacht worden und liegt in der Mitte der wichtigste Teil der Strahlung ( $37^\circ$ ). Wir finden für die Intensität der Strahlung bei  $K = 1$  und  $W = 0,3$  gleich 62,9 und mit Hilfe der Absorptionskoeffizienten berechnen wir die Intensität für  $K = 0$  und  $W = 0$  und sie ist gleich 105. Dann verwenden wir Langley's Experimente auf die spektrale Verteilung der Strahlung von einem Körper von  $15^\circ\text{C}$ , und die Berechnung der Intensität für alle anderen Abweichungswinkel. Diese Intensitäten werden unter der Überschrift gegeben M. Danach müssen wir die Werte für  $K = 1$  und  $W = 0,3$  zu berechnen. Für den Winkel von  $37^\circ$  wissen wir, dass diese Intensität 62,9 ist. Für alle anderen Winkel könnten wir die Werte A aus Tabelle 2 auf Seite 7 nehmen, wenn der Mond ein Körper von  $15^\circ\text{C}$  wäre. Aber eine Berechnung der Figuren Very [Very, 1891] zeigt, daß der Vollmond eine höhere Temperatur hat, etwa  $100^\circ\text{C}$ . Nun ist die spektrale Verteilung fast, aber nicht ganz die gleiche für die Wärme von einem Körper von  $15^\circ\text{C}$  und daß von einem mit  $100^\circ\text{C}$ . Mit Hilfe der Kurven von

6) Nachdem durch eine Atmosphäre von  $K = 1.1$  und  $W = 0,3$  wurde gesiebt.

Langley ist es jedoch einfach, die Intensitäten bei einem heißen Körper von 100°C (Mond) zu reduzieren auf einen Körper von 15°C. Die auf dieser Weise reduzierten Werte sind in der Zeile mit N in der nachfolgenden Tabelle.

Winkel	40°	39°45′	39°30′	39°15′	39°	38°45′	38°30′	38°15′	38°	37°45′	37°30′	
M	3.4	11.6	24.8	45.9	84.0	121.7	161	189	210	210	188	
N	3.1	10.1	11.3	13.7	18.0	18.1	11.2	19.6	44.4	59	70	
Winkel	37°15′	37°	36°45′	36°30′	36°15′	36°	35°45′	35°30′	35°15′	35°	Sum.	p
M	147	105	103	99	60	51	65	62	43	39	2023	100
N	75.5	62.9	56.4	51.4	39.1	37.9	39.2	37.6	36.0	28.7	743.2	37.2

Bei Winkeln kleiner als 37° findet man in der oben beschriebenen Weise, Zahlen, die ein wenig schlechter als die tabellarisch diejenigen, die mittels der Absorptionskoeffizienten von Tabelle 2 auf Seite 7 gefunden werden, sind und die Werte von N. Auf diese Weise wird die Summe der M ein wenig größer (6.8 Prozent) als wäre nach der obigen Berechnung. Diese Nichtübereinstimmung resultiert wahrscheinlich aus dem Umstand, dass das Spektrum in den Beobachtungen nicht ganz rein war.

Der Wert 37,2 hat möglicherweise einen relativ großen, Fehler in deren Folge die Unsicherheit der M Werte betroffen ist. In den folgenden Berechnungen ist es nicht so sehr der Wert 37,2, der eine wichtige Rolle spielt, sondern die Verringerung des Wertes durch eine Erhöhung der Mengen K und W. Zum Vergleich sei erwähnt, daß Langley die Wärmemenge, die vom Mond aus durch die Atmosphäre (der mittlere Zusammensetzung) in seine Forschungen eingeht, um bis zu 38 Prozent überschätzt hat. [Langley, 1890b, p. 197] der mittleren Atmosphäre in Langley Beobachtungen entsprachen höheren Werten von K und W als  $K = 1$  und  $W = 0,3$ , wird es gesehen werden, dass er in die Atmosphäre eine größere Transparenz für Strahlung undurchsichtigen als ich getan zurückzuführen. In Übereinstimmung mit Langley Einschätzung, sollten wir für  $K = 1$  und  $W = 0.3$  ein Wert von etwa 44 statt 37,2 erwarten. Wie groß der Einfluss, den dieser Unterschied ausübt, wird im Folgenden untersucht.

Die Absorptionskoeffizienten sind in Tabelle 2 auf Seite 7 angegeben für ein Intervall von K zwischen 1,1 und 2,25, und für W zwischen 0,3 und 2,22 in diesem Intervall kann man mit Hilfe dieser Koeffizienten und den Werten gültig oben angegeben, ist der Wert von N für einen anderen Wert von K und W, und so auf diese Weise erhalten durch Summierung die Gesamtwärme, die durch eine Atmosphäre von bestimmten Zustand durchläuft. Für weitere Berechnungen habe ich auch Werte von N für Atmosphären berechnet, die größere Mengen an Kohlendioxid und Wasserdampf enthalten. Diese Werte müssen in Betracht gezogen, wie extrapoliert werden. In der folgenden Tabelle 3 auf der nächsten Seite habe ich diese Werte von N angegeben. Die kursiv gedruckten Zahlen werden direkt in der beschriebenen Art und Weise gefunden, die in der gewöhnlichen Schriftart angegeben Werte werden mit Hilfe von Pouillet's Eponentialformel interpoliert (in der Übersetzung wurde eine einheitliche Schriftform benutzt). Die Tabelle hat zwei Positionen ein, die horizontal verläuft und stellt die Menge von Wasserdampf (W) und die andere, die vertikal verläuft stellt die Menge der Kohlendioxid (K) in der Atmosphäre dar.

Tabelle 3: Die Transparenz einer gegebenen Atmosphäre für Wärme von einem Körper von 15°C

→ W (H <sub>2</sub> O) ↓ K (CO <sub>2</sub> )	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
1	37.3	35.0	30.7	26.9	23.9	19.3	16.0	10.7	8.9
1.2	34.7	32.7	28.6	25.1	22.2	17.8	14.7	9.7	8.0
1.5	31.5	29.6	25.9	22.6	19.9	15.9	13.0	8.4	6.9
2	27.0	25.3	21.9	19.1	16.7	13.1	10.5	6.6	5.3
2.5	23.5	22.0	19.0	16.6	14.4	11.0	8.7	5.3	4.2
3	20.1	18.8	16.3	14.2	12.3	9.3	7.4	4.2	3.9
4	15.8	14.7	12.7	10.8	9.3	7.1	5.6	3.1	2.0
6	10.9	10.2	8.7	7.3	6.3	4.8	3.7	1.9	0.93
10	6.6	6.1	5.2	4.3	3.5	2.4	1.8	1.0	0.26
20	2.9	2.5	2.2	1.8	1.5	1.0	0.75	0.39	0.07
40	0.88	0.81	0.67	0.56	0.46	0.32	0.24	0.12	0.02

Ganz anders als diese dunkle Wärme ist das Verhalten der Wärme von der Sonne auf, die durch neue Teile in die Erdatmosphäre. Die ersten Teile der Atmosphäre ausüben, ohne Zweifel eine selektive Absorption einiger ultra-roter Strahlen, aber sobald diese ausgelöscht werden die Wärme scheint nicht verringern, weil es neue Mengen der Gase in der Diskussion durchquert. Dies kann leicht für Wasserdampf mit Hilfe von Langley aktinometrische Beobachtungen aus Mountain Camp und Lone Pine in Colorado [Langley, 1884, pp. 94, 98 und 177] gezeigt werden. Diese Beobachtungen wurden bei Lone Pine aus dem 18. August bis September 1882 um 07:15, 07:45, 11:45, 12:15, 16:15 und um 16:45 Uhr ausgeführt. Bei Mountain Camp wurden die Beobachtungen vom 22. bis 25. August zu den gleichen Tageszeiten durchgeführt, jedoch nur eine Beobachtung wurde in der Frühe durchgeführt (um 08:00). Ich habe diese Beobachtungen nach der Feuchtigkeit der Luft in zwei Gruppen unterteilt für jede Station. In der folgenden Tabelle sind wenig zitiert, der Ort der ersten Beobachtung, nachdem diese unter D der mittlere Zeitpunkt der Beobachtungen (August 1882), W unter der Wassermenge, unter I durch die Aktinometer Strahlung beobachtet, die unter I<sub>1</sub> zweite Beobachtung der gleichen Menge.

	Morgen				Mittag				Abend			
	D	W	I	I <sub>1</sub>	D	W	I	I <sub>1</sub>	D	W	I	I <sub>1</sub>
Lone Pine	{ 29.3	{ 0.61	{ 1.421	{ 1.554	{ 23.6	{ 0.46	{ 1.692	{ 1.715	{ 26.6	{ 0.51	{ 1.417	{ 1.351
	{ 121.1	{ 0.84	{ 1.458	{ 1.583	{ 26.9	{ 0.59	{ 1.699	{ 1.721	{ 23.2	{ 0.74	{ 1.428	{ 1.359
Mountain Camp	{ 23.5	{ 0.088	{ 1.790	{ 1.790	{ 22.5	{ 0.182	{ 1.904	{ 1.873	{ 24.5	{ 0.205	{ 1.701	{ 1.641
	{ 23.5	{ 0.153	{ 1.749	{ 1.749	{ 24.5	{ 0.215	{ 1.890	{ 1.917	{ 22.5	{ 0.32	{ 1.601	{ 1.527

Bei einer sehr niedrigen Luftfeuchtigkeit (Mountain Camp) ist es offensichtlich, dass die Absorptionskraft des Wasserdampfes einen Einfluss hat, denn die Zahlen für höhere Luftfeuchtigkeit sind (mit einer unbedeutenden Ausnahme) schlechter als die für weniger Feuchtigkeit. Aber für die Beobachtungen von Lone Pine im Gegenteil scheint wahr zu sein. Es ist nicht zulässig, anzunehmen, dass die Strahlung nach dem Durchgang durch Wasserdampf verstärkt wird (die Strahlung nach dem Durchgang kann stärker sein, weil zwar die Strahlung absorbiert wird, aber gleichzeitig Strahlung emittiert wird, deren Intensität entsprechend der Temperatur ist.), aber der beobachtete Effekt ist von einigen sekundären Umstand verursacht werden. Wahrscheinlich ist die Luft im allgemeinen reiner wenn mehr Wasserdampf in das als wenn weniger. Die selektive Diffusion verringert in Folge dieser größeren Reinheit und diese Nebenwirkung mehr als einen Ausgleich für die unbedeutende Absorption, die der Strahlung hat den Anstieg des Wasserdampf. Es ist bemerkenswert, dass Elster und Geitel

haben bewiesen, dass unsichtbare aktinischen Strahlen von sehr hoher Brechbarkeit durchziehen die Luft viel leichter, wenn es feucht, als wenn es trocken ist. Figuren Langley zeigen inzwischen, dass der Einfluss von Wasserdampf auf der Sonnenstrahlung unempfindlich ist, sobald er einen Wert von 0,4 überschritten hat.

Wahrscheinlich die gleiche Argumentation wird gut für Kohlensäure, für das Absorptionsspektrum) der beiden Gase zu halten ist von der gleichen allgemeinen Charakter. Außerdem ist die Absorption von Kohlensäure erfolgt bei wesentlich größeren Wellenlängen und somit für weniger wichtige Teile des Sonnenspektrums als die Absorption von Wasserdampf <sup>7)</sup>. Es ist daher gerechtfertigt, anzunehmen, dass die Strahlung von der Sonne erleidet keinen nennenswerten Verminderung wenn K und W Zunahme von einem eher unbedeutenden Wert ( $K = 1, W = 0,4$ ) zu einem höheren.

Bevor wir weiter gehen, müssen wir eine andere Frage zu untersuchen. Lassen die Kohlensäure in der Luft, beispielsweise die gleichen wie jetzt ( $K = 1$  für vertikale Strahlen), und die Menge des Wasserdampfs 10 Gramm pro Kubikmeter ( $W = 1$  für vertikale Strahlen) sein. Dann werden die vertikalen Strahlen von der Erde zu durchqueren die Mengen  $K = 1$  und  $W = 1$ ; Strahlen, die unter einem Winkel von  $30^\circ$  mit dem Horizont zu entkommen (Luftmassen = 2) durchqueren die Mengen  $K = 2, W = 2$ , und so her. Die unterschiedlichen Strahlen, die von einem Punkt der Erdoberfläche ausgehen leiden daher eine unterschiedliche Absorption um so größer, je mehr die Bahn von der vertikalen Linie abweicht. Es kann dann aufgefördert werden, wie lange ein Pfad muss die Gesamtstrahlung zu machen, dass die absorbierte Fraktion davon ist der gleiche wie der absorbierte Anteil an der Gesamtmasse von Strahlen, die in unterschiedliche Raumrichtungen ausstrahlen. Für die emittierten Strahlen werden wir annehmen, dass das Cosinus-Gesetz von Lambert gilt. Mit Hilfe von Tabelle 3 auf der vorherigen Seite ist der absorbierte Anteil jedem Strahl zu berechnen, und dann wird die insgesamt aufgenommene Wärme zusammengefasst und es wird festgestellt, wie groß der Anteil an der Gesamtstrahlung ist. Auf diese Weise finden wir für unser Beispiel der Weg (Luftmassen) 1.61. In anderen Worten, absorbiert die Gesamt Teil der ganzen Strahlung ist nur so groß, wie ob die gesamte Strahlung durch das Mengen 1.61 von wässrigen Dampf und der Kohlensäure **vertikal gegangen wäre**. Diese Zahl hängt von der Zusammensetzung der Atmosphäre ab, so dass es weniger desto größer ist die Menge an Wasserdampf und Kohlensäure in der Luft wird. In der Tabelle 4 finden wir diese Größen für verschiedene Mengen der beiden Gase.

Tabelle 4: Der mittlere Weg der Erdstrahlen

$\rightarrow$ W (H <sub>2</sub> O) $\downarrow$ K (CO <sub>2</sub> )	0.3	0.5	1.0	2.	3.
0.67	1.69	1.68	1.64	1.57	1.53
1	1.66	1.65	1.61	1.55	1.51
1.5	1.62	1.61	1.57	1.51	1.47
2	1.58	1.57	1.52	1.46	1.43
2.5	1.56	1.54	1.50	1.45	1.41
3	1.52	1.51	1.47	1.44	1.40
3.5	1.48	1.48	1.45	1.42	

7) Vgl. die oben genannten Seiten 9 - 11 mit [Langley, 1884, S. 122] die Kurve Langley's [Langley, 1889, Seiten 323 und 326] für das Sonnenspektrum und [Langley, 1890b, Bildtafel 12]

Wenn sich die Absorption der Atmosphäre Null nähert, nähert sich diese Größe dem Wert 2.

### 3 Thermischen Gleichgewicht auf der Oberfläche und in der Atmosphäre der Erde

Da wir nun eine ausreichende Kenntnis der Absorption von Wärme von der Atmosphäre haben, bleibt zu prüfen, wie die Temperatur des Bodens von der Absorption in der Luft abhängig. Eine solche Untersuchung wurde bereits von Pouillet [Pouillet, 1838, Seite 41] durchgeführt, aber sie muss neu gemacht werden, denn Pouillet verwendete Hypothesen, die nicht im Einvernehmen mit unseren derzeitigen Kenntnissen sind.

Wir in unserer Abhandlung davon aus, dass die Wärme, die aus dem Inneren der Erde an deren Oberfläche strömt, vollständig vernachlässigt werden kann. Wenn eine Änderung der Temperatur der Erdoberfläche auftritt, dann werden die oberen Schichten der Erdkruste wird offenbar auch ihre Temperatur ändern, aber dazu später Prozess wird in einer sehr kurzen Zeit im Vergleich mit der Zeit, die für die Änderung notwendig ist, vergehen die Oberflächentemperatur, so dass zu jeder Zeit die Wärme, die aus dem Inneren an die Oberfläche transportiert wird (positiv im Winter, negativ im Sommer) muss unabhängig von den kleinen säkularen Veränderungen der Oberflächentemperatur bleibt, und ist im Verlauf von eines ganzen Jahres nahezu gleich Null.

Ebenso werden wir annehmen, dass die Wärme, die an einem bestimmten Ort auf der Erdoberfläche oder in der Atmosphäre infolge der atmosphärischen oder Meeresströmungen, horizontal oder vertikal durchgeführt wird, wird als gleichbleibend im Laufe der Zeit betrachtet, und wir werden auch annehmen, dass der bewölkte Teil des Himmels unverändert bleibt. Es ist nur die Änderung der Temperatur mit der Transparenz der Luft, die wir untersuchen.

Alle Autoren sind sich einig in der Ansicht, dass in der Temperatur der Erde und ihrer Atmosphäre ein Gleichgewicht herrscht. Die Atmosphäre muß daher so viel Wärme in den Raum strahlt, wie sie teilweise durch die Absorption von Sonnenstrahlen erhält, als auch durch die Strahlung von der warmen Oberfläche der Erde und durch aufsteigenden Luftströme durch den Kontakt mit der erwärmten Oberfläche. Auf der anderen Seite, verliert die Erde genauso viel Wärme durch Strahlung in den Raum und in die Atmosphäre, wie sie durch die Absorption der Sonnenstrahlen gewinnt. Wenn wir einen bestimmten Ort in der Atmosphäre oder auf dem Boden, wir müssen auch Berücksichtigung der Wärmemengen, die an dieser Stelle mit Hilfe der ozeanischen oder atmosphärischen Strömungen durchgeführt werden, zu nehmen. Für die Strahlung werden wir annehmen, dass das Stefan-Boltzmann-Strahlungsgesetz, das heute allgemein anerkannt ist, gilt, oder in anderen Worten, dass die Wärmemenge ( $W$ ), die von einem Körper mit der Albedo  $(1 - \nu)$  und der Temperatur  $T$  (absolut) auf einen anderen Körper, der den Absorptionskoeffizienten  $\beta$  und die Absoluttemperatur  $\theta$  hat, hat folgenden Wert hat:

$$W = \nu\beta\gamma(T^4 - \theta^4) = \nu\beta\gamma T^4 - \nu\beta\gamma\theta^4$$

wobei  $\gamma$  die sogenannte Strahlungskonstante ( $1.21 \times 10^{-12}$  pro Sekunde und  $\text{cm}^2$ ) ist. <sup>8)</sup> Der leere Raum kann als mit der absoluten Temperatur 0 [Langley, 1884, p. 122], [Langley, 1890b, p. 206] betrachtet werden.

---

8) Heute wird die Strahlungskonstante (oder Stefan-Boltzmann-Konstante meistens mit  $\sigma$  bezeichnet und hat den Wert  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ . Die beiden Summanden können getrennt betrachtet werden - ein Summand wird oft als Gegenstrahlung bezeichnet.

Vorläufig halten wir die Luft, als eine einheitliche Schicht mit der Temperatur  $\theta$  und dem Absorptionskoeffizient  $\alpha$  für Solarwärme, so dass, wenn  $\Lambda$  Kalorien von der Sonne kommen, werden in einer Säule von  $1 \text{ cm}^2$  Querschnitt  $\alpha A$  von der Atmosphäre absorbiert und  $(1 - \alpha) A$  erreichen die Erdoberfläche. In den  $\Lambda$  Kalorien ist daher ein Teil der Sonnenwärme nicht enthalten, der mittels selektiver Reflexion in die Atmosphäre in Richtung Raum geworfen ist. Ferner bezeichne  $\beta$  den Absorptionskoeffizienten der Luft für die Wärme, die von der Erdoberfläche abstrahlt wird;  $\beta$  ist auch der Emissionskoeffizient der Luft für Strahlung niedriger Temperatur, die genau  $15^\circ\text{C}$  beträgt, aber die spektrale Verteilung der Wärme ändert sich relativ langsam mit der Temperatur,  $\beta$  kann auch als Emissionskoeffizienten bei dieser Temperatur von Luft betrachtet werden. Lassen die Albedo der Erdkruste durch  $(1 - \nu)$  bestimmt werden, und die Menge der Wärme, die in die Luft und auf der Erdoberfläche an der Stelle betrachtet befördert werden können  $M$  bzw.  $N$ . Als Zeiteinheit können wir eine beliebige wählen: die beste Wahl ist es in der folgenden Berechnung vielleicht drei Monaten für diesen Zweck zu nehmen. Als Oberflächeneinheit können wir  $1 \text{ cm}^2$  zu nehmen, und die Wärme in der Luft, die in einer Säule von  $1 \text{ cm}^2$  Querschnitt und der Höhe der Atmosphäre enthalten ist. Die Wärme, die von der Erde reflektiert wird, wird nicht nennenswert von der Luft aufgenommen (siehe Seite 13), denn diese hat zuvor große Mengen an Wasserdampf und Kohlensäure durchquert, aber ein Teil davon kann auf dem Boden zurückgegeben werden mittels der diffusen Reflexion. Dieser Teil ist nicht in die Albedo  $(1 - \nu)$  enthalten,  $\gamma$ ,  $A$ ,  $\nu$ ,  $M$ ,  $N$  und  $\alpha$  sind als Konstanten zu betrachten  $\beta$  als unabhängige und  $\theta$  und  $T$  als abhängige Variable.

Dann finden wir für die Luftsäule

$$\beta\gamma\theta^4 = \beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4) + \alpha A + M \dots \quad (1)$$

Das erste Element dieser Gleichung stellt die Wärme dar, die aus der Luft (Emissionskoeffizient  $\beta$ , Temperatur  $\theta$ ) in den Raum (Temperatur 0) abgestrahlt wird. Das zweite gibt die ausgestrahlte Wärme aus dem Boden ( $1 \text{ cm}^2$ , Temperatur  $T$ , Albedo  $1 - \nu$ ) in die Luft, das dritte und vierte Element geben die Menge der Sonnenstrahlung an, die von der Luft absorbiert wird und die Wärmemenge erhalten durch Leitung (Luftströme) aus anderen Teilen der Luft oder vom Boden aus: In der gleichen Weise finden wir für die Erdoberfläche

$$\beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4) + (1 - \beta)\gamma\nu^4 = (1 - \alpha)\nu A + N \quad (2)$$

Das erste und zweite Element repräsentieren die abgestrahlte Mengen dessen, was in die Luft bzw. in den Raum gehen,  $(1 - \alpha)\nu A$  ist der absorbiert Teil der Sonnenstrahlung und  $N$  die Wärme von dem betrachteten Punkt zu anderen Teilen des Bodens oder der Luft mit Hilfe von Wasser- oder Luftströmen geführt werden.

Die Kombination dieser beiden Gleichungen führt zur Beseitigung von  $\theta$ , für das kein bedeutendes Interesse besteht, so dass wir für  $T^4$  finden

$$T^4 = \frac{\alpha A + M + (1 - \alpha)A(1 + \nu) + N(1 + 1/\nu)}{\gamma(1 + \nu - \beta\nu)} = \frac{K}{1 + \nu(1 - \beta)} \quad (3)$$

Für feste Erdkruste können wir, ohne merklichen Fehler,  $\nu$  gleich 1 zugrunde legen, mit Ausnahme von Schneefeldern, für die wir  $\nu$  gleich 0.5 zugrunde legen. Für die wasserbedeckten Teile der Erde habe ich einen Wert  $\nu$  von 0,925 berechnet, mit Hilfe der Diagramme von Zenker [Zenker, 1888, p. 54]. Wir haben auch im folgenden die Albedo der Wolken zu verwenden. Ich weiß nicht, ob diese schon einmal gemessen wurde, aber diese ist wahrscheinlich nicht sehr unterschiedlich von der des frisch gefallenen Schnees, die Zöllner festgestellt hat, auf 0,78, d.h.  $\nu = 0,22$ . Für Altschnee ist die Albedo viel weniger oder  $\nu$  viel größer, daher haben wir 0,5 als Mittelwert angenommen.



Die letzte Formel zeigt, daß die Temperatur der Erde von  $\beta$  zunehmen und zwar um so schneller je größer  $\nu$  wird. Für eine Erhöhung von  $1^\circ$ , wenn  $\nu = 1$  finden wir die folgenden Erhöhungen für die Werte von  $\nu$  von jeweils 0.925, 0.5 und 0.22:

$\beta$	$\nu = 0.925$	$\nu = 0.5$	$\nu = 0.22$
0.65	0.944	0.575	0.275
0.75	0.940	0.556	0.261
0.85	0.934	0.535	0.245
0.95	0.928	0.512	0.228
1.00	0.925	0.500	0.220

Diese Argumentation gilt, wenn sich für den betrachteten Teil der Erdoberfläche die Albedo als Folge der veränderten Temperatur nicht ändert. In diesem Fall gibt es ganz andere Umstände. Wenn, zum Beispiel ein Element der Oberfläche, das jetzt nicht verschneit ist, als Folge der sinkenden Temperatur mit Schnee bedeckt wird, müssen wir in der letzten Formel nicht nur  $\beta$  zu verändern, sondern auch  $\nu$ . In diesem Fall müssen wir uns daran erinnern, daß  $\alpha$  ist sehr klein ist im Vergleich zu  $\beta$ . Für  $\alpha$  wir werden den Wert 0,40 nach [Langley, 1890b, S.189]<sup>9)</sup> schätzen. Sicher hängt ein großer Teil dieses Wertes von dem diffus reflektierten Teil der Sonnenwärme ab, die von der Erdatmosphäre absorbiert wird und sollte daher nicht in enthalten sein, wie wir sie oben definiert haben. Auf der anderen Seite kann die Sonne im Allgemeinen ein wenig niedriger stehen als in Langley's Messungen, die mit einem relativ hohen Sonnenstand ausgeführt wurden, und in Folge davon kann  $\alpha$  ein wenig größer, so dass diese Umstände können einander kompensieren. Für  $\beta$  werden wir den Wert 0,70 wählen, der bei  $K = 1$  und  $W = 0,3$  (ein wenig unter dem Gefrierpunkt) dem Faktor 1,66 (siehe Tabelle 4 auf Seite 14) entspricht. In diesem Fall finden wir für die Beziehung zwischen  $T$  (unbedeckt) und  $T_1$  (Schnee bedeckte Oberfläche) sein

$$\frac{T^4}{T_1^4} = \frac{\frac{A(1 + 1 - 0.40) + M}{\gamma(1 + 1 - 0.70)}}{\frac{A(1 + 0.50 - 0.20) + M}{\gamma(1 + 0.50 - 0.35)}} = \frac{\frac{1.60 + \phi}{1.30}}{\frac{1.30 + \phi}{1.15}}$$

wenn  $M = \phi A$ . Wir müssen bedenken, das mittlere  $M$  zu verwenden, das für die ganze Erde gleich Null ist, für die äquatorialen Regionen negativ und für die polaren Regionen positiv. Für eine mittlere Breite  $M = 0$ , und in diesem Fall wird  $T_1$  gleich 267.3 K wenn  $T = 273$  K ist, dass die Temperatur infolge der Schnee-Abdeckung um  $5.7^\circ\text{C}$ <sup>10)</sup> sinkt. Die Abnahme der Temperatur aus dieser Ursache gilt bis  $\phi = 1$ , d.h. bei der durch Konvektion an die Luft abgegebenen Wärme die gesamte Strahlung der Sonne übersteigt. Dies kann nur im Winter und in den Polarregionen auftreten.

Aber das ist ein sekundäres Phänomen. Die Hauptwirkung, die wir untersuchen, ist der direkte Einfluss einer Änderung  $\beta$  von der Temperatur  $T$  der Oberfläche der Erde. Wenn wir von einem Wert  $T = 273$  K und  $\beta = 0,70$ , finden wir die Veränderung ( $t$ ) in der Temperatur, die durch die Variation des  $\beta$  auf die folgenden Werte verursacht wird, zu sein

$$\begin{array}{ll} \beta = 0,60 & t = -5^\circ\text{C} \\ & 0.80 \quad 5.6 \end{array}$$

9) Auf [Langley, 1890b, S.197] ist die Schätzung nur 0,33.

10) Entsprechend der für die verschiedenen Höhen der Absorptions- und Strahlungsschichten der Atmosphäre eingeführt Korrektur wird die Zahl  $5.7^\circ\text{C}$  auf  $4.0^\circ\text{C}$  reduziert. Aber da etwa die Hälfte des Himmels mit Wolken bedeckt ist, wird der Effekt nur halb so groß wie für einen wolkenlosen Himmel sein, dh, die mittlere Wirkung wird auf etwa  $2^\circ\text{C}$  sinken.

0.90	11.7
1.00	18.6

Diese Werte werden für  $\nu = 1$  berechnet, d.h. für die feste Kruste der Oberfläche der Erde, außer den Schneefeldern. Für Oberflächen mit einem anderen Wert, wie zum Beispiel das Meer oder die Schnee, haben wir diesen Wert von  $t$  mit dem oben angegebenen Bruch zu multiplizieren.

Wir betrachten nun kurz den Einfluss der Wolken. Ein großer Teil der Erdoberfläche erhält keine Wärme direkt von der Sonne, weil die Strahlen der Sonne durch Wolken gestoppt werden. Wie groß ein Teil der Erdoberfläche ist, der von Wolken bedeckt ist, finden wir in der Arbeit von [Teisserenc de Bort, 1884, S. 27] Bewölkung. Von Tab. 17 dieser Veröffentlichung habe ich die mittlere Bewölkung für verschiedene Breiten bestimmt und gefunden:

Breite	60	45	30	15	0	-15	-30	-45	-60
Bewölkung	0.603	0.48	0.402	0.511	0.581	0.463	0.53	0.701	

Für den Teil der Erde zwischen  $60^\circ\text{S}$  und  $60^\circ\text{N}$  finden wir ein Thema Wert 0,525, d.h. 52.5 Prozent des Himmel ist wolkenbedeckt. Der Wärmeeffekt dieser Wolken kann auf folgende Weise geschätzt werden. Angenommen, eine Wolke liegt über einen Teil der Erdoberfläche und dass kein Zusammenhang zwischen diesem Teil beschatteten und den angrenzenden Teilen vorhanden ist, wird ein thermisches Gleichgewicht zwischen der Temperatur der Wolke und der Untergrund vorhanden sind. Sie werden miteinander und mit der Wolke auch dem oberen Luft und All abstrahlen und die Strahlung zwischen Wolke und Oberfläche kann aufgrund der geringen Temperaturdifferenz als proportional zu dieser Differenz angenommen werden. Anderen Wärmeaustausch mittels Luftströmungen sind, in erster Näherung proportional zu dieser Differenz. Wenn wir also annehmen, die Temperatur der Wolken zu verändern (andere Umstände wie seine Höhe und Zusammensetzung bleibt unverändert), ist die Temperatur der Masse darunter auch in der gleichen Weise zu ändern, wenn die gleiche Wärmezufuhr zu beiden besteht - wenn es kein Angebot auf den Boden aus den Nachbarteile gab, die Wolke und der Boden endlich nehmen die gleiche mittlere Temperatur an. Wenn also die Temperatur der Wolken variiert in einer bestimmten Art und Weise (ohne Veränderung ihrer anderen Eigenschaften, wie Größe, Kompaktheit, usw.), wird sich der Boden den gleichen Temperaturschwankungen unterziehen. Jetzt wird es in der Folge gezeigt werden, dass eine Variation der Kohlensäure der Atmosphäre in dem Verhältnis erzeugt nahezu die gleiche thermische Wirkung unabhängig von ihrer absoluten Größe (siehe Tabelle 6 auf Seite 22). Daher können wir die Temperaturvariation in diesem Fall so berechnen, als ob die Wolken den Boden bedeckten mit einer dünnen Schicht mit der Albedo 0,78 ( $\nu = 0,22$ , siehe Seite 17). Wie nun im Durchschnitt fast  $K = 1$  und  $W = 1$  ist, wird in diesem Fall  $\beta$  etwa 0,79 ist, wird die Wirkung auf den bewölkten Teil nur 0.25 der Effekt auf den Teil mit  $\nu = 1$  haben. Wenn wir für die Korrektur für den Ozean die Annahme machen, dass der wolkenfreie Teil der Erd aus so viel Wasser wie der feste Bodene besteht (was etwa der Fall ist die Wolken sind vorzugsweise bis über den Ozean gespeichert) eingeführt ( $= 0,925$ ), finden wir einen mittleren Effekt, in runden Zahlen, 60% von dem  $\nu$ , wenn die ganze Oberfläche der Erde  $\nu = 1$  hatte. Die schneebedeckten Teile sind nicht berücksichtigt worden, einerseits sind diese Teile meist bewölkt auf etwa 65%, weiter, nur einen sehr kleinen Teil der Erde (für das ganze Jahr im Durchschnitt bilden sie nur etwa 4%), so daß die Korrektur für diesen Fall nicht 0.5% überschreitet in der letzten Größe 60. Und weiter, an der Grenze zwischen den Ländern, Schneefelder und freien Boden Sekundäreffekte ins Spiel kommen (siehe Seite 17), das zu kompensieren, und vielleicht zu überwinden, die dämpfende Wirkung des Schnees.

Im Vorstehenden haben wir angenommen, dass die Luft wie eine Hülle vollkommen gleichförmiger Temperatur zu betrachten ist. Das ist natürlich nicht wahr, und wir kom-

men nun zu einer Untersuchung der voraussichtlichen Korrekturen, die zur Beseitigung des durch die Ungenauigkeit verursacht Fehlers eingeführt werden müssen. Es ist offensichtlich, dass die Teile der Luft, die ins All abstrahlen sind vor allem die externe, und auf der anderen Seite die Schichten der Luft, die den größten Teil der Strahlung der Erde absorbieren liegen nicht sehr hoch. Aus diesem Grunde wird sowohl die Strahlung von Luft ins All ( $\beta\gamma\theta^4$  in Gleichung (1 auf Seite 16)) als auch die Strahlung von der Erde in die Luft ( $\beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4)$  in Gleichung (2 auf Seite 16)), stark reduziert, und die Luft hat eine viel stärkere Wirkung als Schutz gegen den Verlust von Wärme an Platz als in diesen Gleichungen angenommen, und folglich auch in Gleichung (3 auf Seite 16). Wenn wir die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Schichten der Luft wüssten, die den Weltraum abstrahlen und die die Strahlung der Erde absorbieren, wäre es einfach, die notwendige Korrektur in Gleichung (1 auf Seite 16), Gleichung (2 auf Seite 16) und Gleichung (3 auf Seite 16) einzuführen. Zu diesem Zweck habe ich die folgende Überlegung ausgeführt.

Wie bei der mittleren Zusammensetzung der Atmosphäre ( $K = 1$ ,  $W = 1$ ) um 80 % der Strahlung der Erde, in der Luft absorbiert wird, können wir als mittlere Temperatur der absorbierenden Schicht wählen die Temperatur auf der Höhe, 40 % der Wärme absorbiert. Da Emission und Absorption gelten die gleichen quantitativen Bestimmungen darf man als mittlere Temperatur der emittierenden Schicht wählen die Temperatur auf der Höhe, wo Strahlung, die aus dem Raum in die entgegengesetzte Richtung, um die tatsächliche Emission in Höhe von 40 % absorbiert.

Langley hat vier Messungen der Absorptionskraft des Wasserdampfs für die Strahlung von einem heißen Leslie Würfel von 100 °C [Langley, 1890b, p. 186] gemacht. Diese geben nahezu die gleiche Absorptionskoeffizienten, wenn man Pouillet's Formel für die Berechnung verwendet. Aus diesen Zahlen berechnen wir, daß für die Aufnahme von 40 % der Strahlung wäre es notwendig, so viel Wasserdampf zwischen Kühler und Bolometer einlagern, dass dann, wenn es kondensiert wäre, würde es eine Wasserschicht von 3.05 Millimeter Dicke bilden. Wenn wir nun annehmen, als Mittelwert für die ganze Erde  $\nu = 1$  und  $W = 1$  (siehe Tabelle 6 auf Seite 22) finden wir, dass die vertikale Strahlen von der Erde, wenn er bei 100 °C waren, dann müssen die Strahlen 305 Meter Luft durchqueren, um 40 % zu verlieren. Nun hat die Erde nur etwa 15 °C, aber dies kann keinen großen Unterschied machen. Da die Strahlung in alle Richtungen ausstrahlt, müssen wir die 305 Meter durch 1,61 teilen und erhalten auf diese Weise 209 Meter. In Folge der Senkung der Menge an Wasserdampf mit der Höhe [Hann, 1894] müssen wir eine leichte Korrektur anzuwenden, so dass das Endergebnis 233 Meter ist. Natürlich ist diese Zahl ist ein Mittelwert und wir halten höhere Werte für die kälteren, weniger für die wärmeren Teilen der Erde für gut. In einer so kleinen Entfernung von der Erde, wo 40 % der Strahlung der Erde gestoppt werden sollte ist es nicht ganz richtig mit der Pouillet-Formel zu rechnen (es ist schon merkwürdig, dass diese Zahlen so gut mit Langley'S Zahlen übereinstimmen), was zwangsläufig zu niedrige Werte ergibt. Aber auf der anderen Seite haben wir nicht berücksichtigt die Absorption durch die Kohlensäure in diesem Teil, und die genannte Fehler kompensieren kann. In den höchsten Schichten der Atmosphäre gibt es sehr wenig Wasserdampf, so dass müssen wir mit Kohlensäure als Hauptabsorption berechnen. Aus einer Messung von Ångström [Vetenskaps-Akademiens, 1889a, Ångström, S. 11 und 18] erfahren wir, dass die Absorptionskoeffizienten von Wasser-Dampf- und der Kohlensäure in gleichen Mengen (gleiche Anzahl von Molekülen) im Verhältnis 81:62 auf. Dieses Verhältnis gilt für die mindestens heiße Kühler Ångstrom, die verwendet werden, und es besteht kein Zweifel, dass die Strahlung der Erde viel weniger brechbaren. Für die Aufnahme wahrscheinlich ist, dass für eine weniger heißen Heizkörper die Absorptionskraft der Kohlensäure herauskommen würde ein wenig größer im Vergleich zu der Wasserdampf, aber in Ermangelung eines geeigneteren Entschlossenheit können wir das für unsere Zwecke zu nutzen CO<sub>2</sub> -

Bands sind, die insgesamt weniger brechbar ist als die von 20 (siehe Seite 9 - 11). Mit der Zahl 0.03 vol.% für die Kohlensäuremenge in der Atmosphäre, so finden wir, daß Strahlen, die von dem oberen Teil der Luft ausströmen sind im Ausmaß von 40 % einer Schicht, die 0,145 Teil der Atmosphäre bildet. Dies entspricht einer Höhe von ungefähr 15 000 Metern. Was diesem Wert können wir die gleiche Bemerkung wie auf der vorangehenden Wert. In diesem Fall haben wir die Absorption durch die geringen Mengen an Wasserdampf in der Atmosphäre höher vernachlässigt. Der Temperaturunterschied zwischen beiden Schichten - die eine absorbierend, die andere strahlend - ist nach der Messung von Glaisher [Müller und Peters, 1894, p, 539] (mit einem kleinen Extrapolation), etwa 42 °C.

Für den Wolken bekommen wir natürlich leicht modifiziert Zahlen. Wir sollten die mittlere Höhe der Wolken, die von der Sonne beschienen werden nehmen. Als solche habe ich die Gipfel der Haufenwolken, die auf einer durchschnittlichen Höhe von 1855 Metern liegen gewählt, mit einer maximalen Höhe von 3611 Metern und einem Minimum von 900 m<sup>11)</sup>. Ich habe Berechnungen für Mittelwerte von 2000 m bis 4000 m (entsprechend Temperaturunterschiede von 30 °C und 20 °C anstelle von 42 °C der Erdoberfläche) hergestellt.

Wenn wir nun wollen unsere Formeln Gleichung (1 auf Seite 16) bis Gleichung (3 auf Seite 16) einstellen, haben wir in Gleichung (1 auf Seite 16) und Gleichung (2 auf Seite 16)  $\theta$  als die mittlere Temperatur des strahlenden Schicht einführen und  $(\theta + 42)$   $(\theta + 30)$  oder  $(\theta + 20)$ , die jeweils für die Durchschnittstemperatur der absorbierenden Schicht. Im ersten Fall sollten wir  $\nu = 1$  bzw.  $\nu = 0,925$  bzw. verwenden, im zweiten und dritten Fall  $\nu = 0,22$ .

Wir haben dann statt der Gleichung (3 auf Seite 16) zu finden

$$T^4 = \frac{K}{1 + \nu(1 - \beta)}$$

eine weitere sehr ähnliche Formel

$$T^4 = \frac{K}{1 + c\nu(1 - \beta)} \quad \dots \quad (4)$$

wobei c eine Konstante mit ist den Werten 1.88, 1.58 und 1.37 jeweils für die drei Fälle<sup>12)</sup>. Auf diese Weise befinden sich die folgenden korrigierten Werte, die die Änderung der Temperatur darstellen, wenn die feste Masse ändert seine Temperatur 1 °C, in Folge einer Änderung des  $\beta$  - wie durch Gleichung (3 auf Seite 16) berechnet.

Tabelle 5: V. Korrekturfaktoren für die Strahlung.

$\beta =$	fester Grund $\nu = 1$	Wasser $\nu = 0.925$	Schnee $\nu = 0.5$	Wolken ( $\nu = 0.22$ ) bei einer Höhe von		
				0 m	2000 m	4000 m
0.65	1.53	1.46	0.95	0.49	0.42	0.37
0.75	1.60	1.52	0.95	0.47	0.40	0.35
0.85	1.69	1.59	0.95	0.46	0.38	0.33
0.95	1.81	1.68	0.94	0.43	0.36	0.31
1.00	1.88	1.74	0.94	0.41	0.35	0.30

Wenn wir nun als Mittelwert für die ganze Erde  $K = 1$  und  $W = 1$  annehmen, erhalten wir  $\beta = 0,785$  und unter dem bewölkten Teil auf 52.5 % und die Wolken sind bis zu einer Höhe

11) Nach den Messungen der Ekholm und Hagström

12)  $1.88 = \left(\frac{288}{246}\right)^4$ ,  $1.58 = \left(\frac{276}{246}\right)^4$  und  $1.37 = \left(\frac{266}{246}\right)^4$  240 °C ist die mittlere absolute Temperatur des strahlenden höheren Luftschicht.

von 2000 Metern, die weitere Annahme ist der wolkenfreie Rest der Oberfläche der Erde, der zu gleichen Teilen aus Land und Wasser besteht, so finden wir als Durchschnittsänderung der Temperatur

$$1,63 \times 1,54 \times 0,23850,2385 + 0,39 \times 0,525 = 0,979$$

oder fast die gleiche Wirkung wie wir diese direkt aus der Gleichung (3 auf Seite 16) berechnen können. Aus diesem Grunde habe ich die einfachere Formel verwendet.

In der vorangehenden Ich habe bemerkt, dass nach meiner Einschätzung die Luft für dunkle Wärme weniger transparent ist als nach Langley's Schätzung und fast im Verhältnis 37,2:44. Wie großen Einfluss dieser Unterschied ausüben kann, ist sehr leicht mit Hilfe der Gleichung (3 auf Seite 16) oder Gleichung (4 auf der vorherigen Seite). Nach Langley's Bewertung sollte der Effekt fast 15% größer als nach mir. Jetzt denke ich, dass meine Schätzung besser übereinstimmt mit der großen Absorption, die Langley für terrestrischen Wärmestrahlung gefunden hat (siehe Seite 19), und unter allen Umständen habe ich lieber etwas unterschätzt, als Wirkungen in dieser Frage zu überschätzen.

## **4 Berechnung der Variation der Temperatur, die in Folge einer bestimmten Variation der Kohlensäure in der Luft ergeben würden**

Wir haben nun alle notwendigen Daten für die Abschätzung der Wirkung auf die Temperatur der Erde, die das Ergebnis einer gegebenen Variation der Kohlensäure in der Luft wäre. Wir müssen nur die Absorptionskoeffizienten für einen bestimmten Ort mit Hilfe der Tabelle 3 auf Seite 13 zu bestimmen, wenn wir die Menge der Kohlensäure ( $K = 1$  jetzt) und des Wasserdampf ( $W$ ) von diesem Ort kennen. Mit Hilfe der Tabelle 4 auf Seite 14. Wir bestimmen zunächst die Faktor  $\rho$ , der den mittleren Weg der Strahlung von der Erde verursacht durch die Luft und multiplizieren die angegebene  $K$ - und  $W$ -Werte mit diesem Faktor. Dann bestimmen wir den Wert von  $\beta$ , die entspricht  $\rho K$  und  $\rho W$ . Nehmen wir nun an, dass die Kohlensäure eine andere Konzentration hätte. (z. B.  $K_1 = 1.5$ ). Dann werden wir zunächst annehmen, das  $W$  unverändert ist und suchen den neuen Wert von  $\rho$ , sagen wir  $\rho_1$ , das gilt unter dieser Voraussetzung. Als nächstes haben wir  $\beta$  zu suchen, die  $\rho_1 K_1$  ( $1.5\rho_1$ ) entspricht und  $\rho_1 W$ . Aus Gleichung (3 auf Seite 16) können wir dann leicht die Veränderung von  $(t)$  berechnen (hier zu erhöhen) in der Temperatur, an einem gegebenen Ort, begleiten von der Variation des  $\beta$  von  $\beta$  auf  $\beta_1$ . In Folge der Variation  $(t)$  der Temperatur muß auch  $W$  eine Variation erfahren. Da die relative Luftfeuchtigkeit nicht stark variiert, wenn sich die Verteilung von Land und Wasser ändert (siehe Tabelle 8 in meiner ursprünglichen Abhandlung), habe ich angenommen, dass diese Größe konstant bleibt, und damit den neuen Wert  $W_1$  von  $W$  bestimmt. Eine erste Annäherung ergibt in den meisten Fällen Werte von  $W_1$  und  $\beta_1$  die als endgültig angesehen werden können. Auf diese Weise erhalten wir daher die Variation der Temperatur, sobald wir die tatsächliche Temperatur und Feuchtigkeit an der gegebenen Stelle ermitteln.

0)

Tabelle 6: Mittlere Temperatur, relative und absolute Feuchtigkeit

Breite	mittlere Temperatur				mittl. relative Feuchte				mittlere absolute Feuchte						
	Dez - Feb	Mär - Mai	Jun - Aug	Sep - Nov	Jahresmittel	Dez - Feb	Mär - Mai	Jun - Aug	Sep - Nov	Jahresmittel	Dez - Feb	Mär - Mai	Jun - Aug	Sep - Nov	Jahresmittel
70	-21.1	-8.3	+7.5	-6.0	-7.0	86	81	77	84	82	1.15	2.14	6.22	2.84	3.09
60	-11.2	+0.2	+13.5	+2.2	+1.2	83	74	76	80	78.2	2.22	3.82	8.82	4.7	4.9
50	-1.4	+7.8	+18.7	+9.7	+8.7	78	73	69	76	74	3.86	5.98	10.8	7.16	6.95
40	+8.4	+14.5	+21.8	+16.6	+15.3	73	68	67	71	69.7	6.53	8.63	13.4	10.13	9.7
30	+17.0	+21.5	+26.0	+23.0	+21.9	71	68	70	73	70.5	10.36	12.63	17.1	15.0	13.8
20	+23.2	+25.5	+26.8	+25.9	+25.4	74	73	78	77	75.5	15.3	17.0	19.6	16.8	17.2
10	+25.5	+25.8	+25.4	+25.5	+25.5	77	78	82	81	79.5	17.7	18.9	19.9	19.3	18.9
0	+25.7	+25.5	+24.0	+25.0	+25.1	81	81	82	80	81	19.4	19.4	17.9	18.3	18.7
-10	+24.9	+24.0	+20.8	+23.1	+23.2	79	78	80	77	78.5	18.0	17.1	14.6	16.0	16.4
-20	+22.4	+20.5	+16.4	+19.8	+19.7	75	79	80	75	77.2	14.8	14.0	11.1	13.0	13.2
-30	+17.5	+15.2	+11.3	+14.2	+14.5	75	80	80	79	78.5	11.1	10.4	8.1	9.6	9.8
-40	+11.6	+9.5	+5.9	+8.2	+8.7	81	81	83	79	81	8.34	7.08	5.94	6.63	6.99
-50	+5.3	+2.0	-0.4	+1.6	+2.1	83	79				5.74	4.46			
-60															

0) Von den Bildern für Temperatur und relative Feuchtigkeit habe ich die absolute Feuchtigkeit in  $g/m^3$  berechnet.

Tabelle 6: Änderung der Temperatur, verursacht durch eine Änderung der Kohlensäure

Breite	Kohlensäure = 0.67				Kohlensäure = 1.5				Kohlensäure = 2.0				Kohlensäure = 2.5				Kohlensäure = 3.0												
	Dez - Feb	Mär - Mai	Jun - Aug	Sep - Nov	Jahresmittel	Dez - Feb	Mär - Mai	Jun - Aug	Sep - Nov	Jahresmittel	Dez - Feb	Mär - Mai	Jun - Aug	Sep - Nov	Jahresmittel	Dez - Feb	Mär - Mai	Jun - Aug	Sep - Nov	Jahresmittel									
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.52	6.0	6.1	6.0	6.1	6.05	7.9	8.0	7.9	8.0	7.95	9.1	9.3	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.3	
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	6.1	6.1	5.8	6.1	6.02	8.0	8.0	7.6	7.9	7.87	9.3	9.5	8.9	8.9	9.5	9.5	9.3	9.3	
50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	3.3	3.7	3.8	3.4	3.7	3.65	6.1	6.1	5.5	6.0	5.92	8.0	7.9	7.0	7.9	7.7	9.5	9.4	8.6	9.2	9.2	9.2	9.17	9.17	
40	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3	3.32	3.7	3.6	3.3	3.5	3.52	6.0	5.8	5.4	5.6	5.7	7.9	7.6	6.9	7.3	7.42	9.3	9.0	8.2	8.2	8.8	8.8	8.8	8.82	8.82
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.1	3.17	3.5	3.3	3.2	3.5	3.47	5.6	5.4	5.0	5.2	5.3	7.2	7.0	6.6	6.7	6.87	8.7	8.3	7.5	7.5	7.9	7.9	8.1	8.1	8.1
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.1	3.07	3.5	3.2	3.1	3.2	3.25	5.2	5.0	4.9	5.0	5.02	6.7	6.6	6.3	6.6	6.52	7.9	7.5	7.2	7.2	7.5	7.5	7.5	7.52	7.52
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	3.02	3.2	3.2	3.1	3.1	3.15	5.0	5.0	4.9	4.9	4.95	6.6	6.4	6.3	6.4	6.42	7.4	7.3	7.2	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.0	3.02	3.1	3.1	3.2	3.2	3.15	4.9	4.9	5.0	5.0	4.95	6.4	6.4	6.6	6.6	6.5	7.3	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4	7.35	7.35
-10	-3.1	-3.1	-3.2	-3.1	3.12	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	5.0	5.0	5.2	5.1	5.07	6.6	6.6	6.7	6.7	6.65	7.4	7.5	8.0	8.0	7.6	7.6	7.6	7.62	7.62
-20	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	3.2	3.2	3.2	3.4	3.3	3.27	5.2	5.3	5.5	5.4	5.35	6.7	6.8	7.0	7.0	6.87	7.9	8.1	8.6	8.6	8.3	8.3	8.22	8.22	8.22
-30	-3.3	-3.3	-3.4	-3.4	3.35	3.4	3.5	3.7	3.5	3.52	5.5	5.6	5.8	5.6	5.62	7.0	7.2	7.7	7.4	7.32	8.6	8.7	9.1	9.1	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
-40	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	3.37	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7	5.8	6.0	6.0	6.0	5.95	7.7	7.9	8.0	7.9	7.86	9.1	9.2	9.4	9.4	9.3	9.3	9.3	9.25	9.25
-50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	3.3	3.8	3.7	3.8	3.7	3.7	6.0	6.1	6.1	6.0	6.0	7.9	8.0	8.0	7.9	7.86	9.4	9.5	9.5	9.5	9.3	9.3	9.3	9.25	9.25
-60	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	3.3	3.8	3.7	3.8	3.7	3.7	6.0	6.1	6.1	6.0	6.0	7.9	8.0	8.0	7.9	7.86	9.4	9.5	9.5	9.5	9.3	9.3	9.3	9.25	9.25

Um die Werte der Temperaturen für die gesamten Erde zu erhalten, habe ich die mittleren Temperatur aus den Diagramme von Dr. [Buchan, 1889] an verschiedenen Stellen in jedem Monat [Buchan, 1889] entnommen - und habe die Durchschnittstemperatur in jedem Bezirk berechnet, der von zwei Breitengraden, die sich um  $10^\circ$  unterscheiden und zwei Meridianen, die sich um  $20$  Grad unterscheiden, eingeschlossen ist (z. B. zwischen  $0^\circ$  und  $10^\circ\text{N}$  und  $160^\circ$  und  $180^\circ\text{W}$ ). Die Luftfeuchtigkeit ist bisher noch nicht ausreichend für die ganze Erde untersucht, und ich habe daher sehr viele Messungen der relativen Feuchte an verschiedenen Orten (etwa 780) auf der Erde gesammelt und markiert sie in Karten der Welt, und danach die Mittelwerte für jeden Bezirk geschätzt. Diese Größen habe ich für die vier Jahreszeiten tabellarisch angegeben für Dezember bis Februar, März bis Mai, Juni bis Aug und September bis November. Die detaillierte Tabelle und die verwendeten Beobachtungen sind in meiner ursprünglichen Abhandlung zu finden: hier reproduziere ich nur die Mittelwerte für je Zehn Breitengrade (Tabelle 6 auf Seite 22).

Mit Hilfe dieser Werte habe ich die mittlere Veränderung der Temperatur berechnet, die folgen würde, wenn sich die Menge der Kohlensäure vom derzeitigen Mittelwert ( $K = 1$ ) auf einen anderen Wert ändert nämlich auf  $K = 0,67, 1,5, 2, 2,5$  und  $3$ . Diese Berechnung wird für jeden zehnten Breitenkreis für die vier Jahreszeiten des Jahres gemacht, und getrennt. Die Variation ist in Tabelle 6 auf der vorherigen Seite angegeben.

Ein Blick auf diese Tabelle zeigt, dass der Einfluss fast gleich ist über die ganze Erde. Der Einfluss hat ein Minimum in der Nähe des Äquators, und nimmt von dieser zu einem flachen Maximum, das die weitere vom Äquator desto höher ist die Menge der Kohlensäure in der Luft liegt. Für  $K = 0,67$  die maximale Wirkung liegt über den  $40$ . Breitengrad, für  $K = 1,5$  zum  $50$ . Breitengrad, für  $K = 2$  am  $60$ . Breitengrad und für höhere  $K$ -Werte oberhalb des  $70$ . Breitengrades. Der Einfluß ist im allgemeinen im Winter größer als im Sommer außer bei den Teilen, die zwischen dem Breitengrad des Maximums und den Polen liegen. Der Einfluss wird also um größer sein je höher der Wert von  $\nu$  ist, der in der Regel etwas größer für Land als für den Ozean. Aufgrund der Bewölkung der südlichen Hemisphäre, wird der Effekt weniger als in der nördlichen Hemisphäre sein. Eine Erhöhung der Menge an Kohlensäure wird die Temperaturdifferenz zwischen Tag und Nacht natürlich verringern. Eine sehr wichtige sekundäre Erhebung dieses Effekt wird in jenen Orten, die ihr Albedo verändern durch die Verlängerung oder Verkürzung der Schnee-Abdeckung (siehe Seite 17), und dieser Nebeneffekt erzeugt wahrscheinlich, daß sich der maximale Effekt aus den unteren Breitengrad zur Nachbarschaft der Pole<sup>13)</sup> entfernt.

Es ist zu beachten, dass die obigen Berechnungen auf Langley Zahlen für die Werte  $K = 0,67$  und  $K = 1,5$  beruhen, die anderen Werte werden durch von der Interpolation extrapoliert. Die Verwendung der Pouillet-Formel macht die Werte für  $K = 0,67$  wahrscheinlich ein wenig zu klein für  $K = 1,5$  ein wenig zu groß. Dies ist zweifellos auch der Fall für die extrapolierten Werte, die zu höheren Werten von  $K$  entsprechen.

Wir können nun untersuchen, wie größer muss die Variation der Kohlensäure in der Atmosphäre sein, die eine gegebene Änderung der Temperatur verursacht. Die Antwort kann durch Interpolation in Tabelle 6 auf der vorherigen Seite gefunden werden. Um eine solche Anfrage zu erleichtern, können wir eine einfache Beobachtung machen. Wenn die Menge der Kohlensäure von  $K = 1$  auf  $K = 0,67$  abnimmt ist der Abfall der Temperatur fast der gleiche wie die Erhöhung der Temperatur, wenn diese Größe auf  $K = 1,5$  zunimmt. Und einen neuen Anstieg dieser Größenordnung ( $3,4^\circ$ ) zu erhalten, wird es notwendig sein, die Menge an Kohlensäure zu ändern, bis er einen Wert erreicht, fast auf halbem Weg zwischen  $K = 2$  und  $2,5$ .

Wenn sich also die Menge der Kohlensäure in geometrischer Progression erhöht steigt die

---

13) Siehe Ergänzung, Seite 30.



Temperatur nahezu in arithmetischen Progression. Diese Regel - die natürlich nur in dem untersuchten Teil gilt - ist nützlich für die nachfolgenden zusammenfassenden Schätzungen.

## 5 Geologische Folgen

Ich hätte sicherlich nicht diese mühsame Berechnungen durchgeführt, wenn nicht ein außergewöhnliches Interesse mit ihnen verbunden war. In der Physikalischen Gesellschaft in Stockholm gab es gelegentlich sehr lebhaft diskutierte Diskussionen über die möglichen Ursachen der Eiszeit, und diese Gespräche haben, meiner Meinung nach, zu dem Schluß geführt, daß es noch keine befriedigende Hypothese gibt, die die klimatischen Bedingungen erklären könnte für eine Eiszeit konnte in so kurzer Zeit wie das, was ab der Tage der Eiszeit Ablauf realisiert werden. Der gemeinsame Blick hierher zu hat, dass die Erde im Laufe der Zeit abkühlt, und wenn man nicht wüsste, dass der umgekehrte der Fall gewesen ist, würde man mit Sicherheit behaupten, dass diese Abkühlung kontinuierlich weitergehen muss. Gespräche mit meinem Freund und Kollegen Professor Högbom, zusammen mit den oben genannten Diskussionen, führte mich dazu einer vorläufigen Schätzung der wahrscheinlichen Auswirkungen einer Variation der atmosphärischen Kohlensäure auf die Temperatur der Erde zu machen. Diese Schätzung führte zu der Überzeugung, dass man in der Weise wahrscheinlich eine Erklärung für Temperaturschwankungen von  $5^{\circ}\text{C}$  -  $10^{\circ}\text{C}$  machen kann. Ich erarbeitete die Berechnung im einzelnen und lege diese jetzt der Öffentlichkeit und den Kritikern vor.

Aus geologischen Untersuchungen ist die Tatsache bekannt, dass es im Tertiär eine Vegetation und ein Tierleben in den gemäßigten und arktischen Zonen gab, die durch eine viel höhere Temperatur als die Gegenwart in den gleichen Regionen<sup>14)</sup> konditioniert worden sein muss. Die Temperatur in den arktischen Zonen scheint die aktuelle Temperatur von ab aus 8 oder 9 Grad überschritten. Zu diesem Zeitpunkt genial die Eiszeit gelungen, und das ein oder mehrere Male durch Warmzeiten mit einem Klima von ab aus dem gleichen Charakter wie die vorliegende, manchmal sogar milder unterbrochen war. Als die Eiszeit seine größte Ausdehnung hatte, waren die Länder mit Eis bedeckt, die jetzt die höchste Zivilisation haben. Dies war mit Irland, Großbritannien der Fall ist (außer einem kleinen Teil im Süden), Holland, Dänemark, Schweden und Norwegen, Russland (Kiew, Orel und Nischni Nowgorod), Deutschland und Österreich (in den Harz, Erz-Gebirge, Dresden und Krakau). Zur gleichen Zeit bedeckt eine Eisdecke in den Alpen die Schweiz, Teile von Frankreich, Bayern südlich der Donau, Tirol, der Steiermark und anderen Bundesländern, und stieg in den nördlichen Teil von Italien. Gleichzeitig war auch Nordamerika mit Eis an der Westküste bis zum 47. Breitenkreis bedeckt, an der Ostküste zum 40. Breitenkreis und im zentralen Teil an der 37. Breitenkreis (Zusammenfluss der Flüsse Mississippi und Ohio). In den verschiedenen Teilen der Welt auch, haben wir Spuren einer großen Eiszeit gefunden, wie im Kaukasus, Kleinasien, Syrien, dem Himalaya, Indien, Thian Shan, Altai, Atlas, auf dem Mount Kenia und Kilimandscharo (beide ganz in der Nähe zum Äquator), in Südafrika, Australien, Neuseeland, Kerguelen, Falklandinseln, Patagonien und anderen Teilen Südamerikas. Die Geologen sind im allgemeinen geneigt zu denken, dass diese Eiszeiten gleichzeitige auf der ganzen Erde waren [Neumayr und Uhlig, 1887, S. 648], [Nathorst, 1894, Seite 992], und das am meisten natürliche Ansicht wäre wohl allgemein angenommen, wenn die Theorie von Croll, der eine freundliche Zeit auf der südlichen Halbkugel in der gleichen verlangt Zeit als eine Eiszeit auf der nördlichen und umgekehrt, nicht die Meinung beeinflusst hätte. Durch Messungen der Verschiebung der Schneegrenze kommen wir zu dem Ergebnis - und das ist sehr übereinstimmend für verschiedene Orte -, dass die Temperatur in dieser Zeit muß  $4^{\circ}\text{C}$  -  $5^{\circ}\text{C}$  niedriger als

14) Zu Einzelheiten vgl.. [Neumayr und Uhlig, 1887], und [Geikie, 1894] ; [Nathorst, 1894, p. 989].

heute war. Die letzte Eiszeit muss in der letzten Zeit eher genommen, geologisch gesehen, so dass die menschliche Rasse zu jener Zeit sicherlich erschienen war. Bestimmte amerikanische Geologen sind der Meinung, dass seit dem Ende der Eiszeit nur einige 7000 bis 10 000 Jahren abgelaufen sind, aber dies wird wahrscheinlich stark unterschätzt.

Man kann sich nun fragen, wie viel muss der Kohlensäure variieren je nach unseren Zahlen, damit die Temperatur sollte die gleichen Werte wie im Tertiär und Eiszeiten bzw. zu erreichen? Eine einfache Rechnung zeigt, dass die Temperatur in den arktischen Regionen würden etwa 8°C bis 9°C steigen, wenn die Kohlensäure stieg auf 2,5 oder 3 mal dem Barwert. Um die Temperatur der Eiszeit zwischen den 40. und 50. Breitengrad zu erhalten, sollten die Kohlensäure in der Luft auf 0,62 - 0,55 der Barwert sinken (Senkung der Temperatur 4°C - 5°C). Die Forderungen der Geologen, dass in den freundlichen Epochen das Klima gleichmäßiger als jetzt sein sollte, ist sehr gut in Einklang mit unserer Theorie. Die geographischen Jahres- und Tagestemperaturbereiche würde teilweise geglättet werden, wenn die Menge der Kohlensäure verstärkt würde. Der umgekehrte Fall (mindestens bis zu einem Breitengrad von 50° von dem Äquator), wenn sich die Menge Kohlensäure vermindert. Aber in beiden Fällen. Neigung zu denken, dass die sekundäre Aktion (siehe Seite 30) aufgrund der Rückzug oder Fortschritt des Schneebelages würde die wichtigste Rolle zu spielen. Die Theorie verlangt auch, dass, grob gesprochen, die ganze Erde sollte etwa den gleichen Temperaturschwankungen unterzogen haben, so dass es nach genial oder Gletscher Epochen müssen gleichzeitig auf der ganzen Erde stattgefunden haben. Wegen der größeren Bewölkung der südlichen Hemisphäre, die Variationen muss es haben, etwas weniger (ca. 15 Prozent). Als in der nördlichen Hemisphäre gewesen. Die Meeresströmungen auch, muss es wie in der heutigen Zeit haben sich die Unterschiede in der Temperatur an verschiedenen Breiten in einem größeren Ausmaß als in der nördlichen Hemisphäre ausgelöscht. Dieser Effekt ergibt sich auch aus der größeren Bewölkung in den arktischen Zonen als in der Nähe des Äquators.

Es gibt jetzt eine wichtige Frage, die beantwortet werden sollten, und zwar: Ist es wahrscheinlich, dass solche großen Schwankungen in der Menge der Kohlensäure als unsere Theorie erfordert in relativ kurzen geologischen mal aufgetreten? Die Antwort auf diese Frage wird von Prof. Högbom gegeben. Da seine Memoiren zu dieser Frage möglicherweise den meisten Lesern dieser Seiten unbekannt sind, habe ich seine Äußerungen, die von größter Bedeutung für unser Thema [Högbom, 1894, Seite 169] sind, zusammengefasst und übersetzt:

»Es ist zwar nicht möglich, genaue quantitative Ausdrücke für die Reaktionen in der Natur, durch die Kohlensäure freigesetzt oder verbraucht wird, zu erhalten, dennoch gibt es einige Faktoren, mit denen man eine etwa wahre Schätzung bekommt und aus denen bestimmte Schlussfolgerungen gezogen werden, die Licht auf die Frage werfen. Zunächst scheint es von Bedeutung sein, um die Menge der Kohlensäure nun in der Luft mit den Mengen, die transformiert werden, zu vergleichen. Wenn das erstere unbedeutend ist im Vergleich mit dem letzteren, dann ist die Wahrscheinlichkeit für Variationen ganz anders als im umgekehrten Fall.

»Unter der Voraussetzung, dass die mittlere Menge der Kohlensäure in der Luft 0.03 vol. Prozent erreicht, stellt diese Größe nach Gewicht 0.045 Prozent<sup>15)</sup>, oder 0.342 mm Hg Partialdruck oder 0.466 Gramm Kohlensäure für jeden cm<sup>2</sup> der Erdoberfläche. Reduziert auf Kohlenstoff würde diese Menge eine Schicht von etwa 1 mm Dicke über der Erdoberfläche geben. Die Kohlenstoffmenge, die in der lebenden organischen Welt fixiert ist, kann sicherlich nicht mit dem gleichen Grad der Genauigkeit geschätzt werden;

aber es ist ersichtlich, dass die Größen, die diese Menge abgeben können in der gleichen

---

15) Das Molekulargewicht der Luft ist etwa 29, das Molekulargewicht des CO<sub>2</sub> etwa 44. Daraus folgt  $0.03 * 44/29 = 0.045$ .

Größenordnung liegen sollte, so daß der Kohlenstoff in der Luft nahezu verstanden werden kann als weder so groß noch so gering im Vergleich zur Menge an Kohlenstoff, die in den Organismen vorkommt. im Hinblick auf die große Geschwindigkeit, mit der die Transformation in der organischen Natur fortgesetzt wird, ist das verfügbare Menge an Kohlensäure nicht so übermäßig ist, dass Änderungen aus klimatischen oder anderen Gründen nicht die Geschwindigkeit und den Wert dieser Transformation hervorrufen, möglicherweise nicht in der Lage sind, Veränderungen im Gleichgewicht zu verursachen.

»Die folgende Berechnung ist auch sehr lehrreich für die Wertschätzung der Beziehung zwischen der Menge der Kohlensäure in der Luft und die Mengen, die umgewandelt werden. Weltweit erreicht die gegenwärtige Produktion von Kohle in runden Zahlen 500 Millionen Tonnen pro Jahr oder 1 Tonne pro km<sup>2</sup> der Oberfläche der Erde. In Kohlensäure verwandelt, würde diese Menge auf etwa einem tausendstel Teil der Kohlensäure in der Atmosphäre entsprechen. Es stellt eine Schicht aus Kalkstein von 0.003mm Dicke über die ganze Welt dar, oder 1.5 km<sup>3</sup> bei Raummaßen. Diese Menge von an Kohlensäure, die der Atmosphäre hauptsächlich durch die moderne Industrie zugeführt wird, kann als abgeschlossener Ausgleich der Menge von Kohlensäure betrachtet werden, die zur Bildung von Kalkstein (oder andere Mineralkarbonate) durch die Verwitterung oder Zersetzung des Silikats verbraucht wurde. Aus der Bestimmung der Mengen an gelösten Stoffen, insbesondere Karbonaten, in einer Reihe von Flüssen in verschiedenen Ländern und Klimazonen, und der Menge an Wasser in diesen Flüsse und von ihren Entwässerungsflächen fließt, verglichen mit der Landfläche der Erde, es wird geschätzt, dass die Mengen der gelösten Karbonate, die der Ozean im Laufe eines Jahres zu erreichen, höchstens den Großteil der 3 km<sup>3</sup> geliefert werden, wie es auch bewiesen, dass die Flüsse die Entwässerungs Regionen die aus Silikaten bestehen vermitteln sehr unbedeutende Mengen an Karbonaten, verglichen mit denen, die durch Kalkstein Regionen fließen, ist es zulässig, den Abschluss, die auch aus anderen Gründen verstärkt wird, daß nur ein unbedeutender Teil dieser 3 km<sup>3</sup> Karbonate gebildet wird, ziehen direkt durch Zersetzung von Silikaten. In anderen Worten, nur ein unbedeutender Teil dieser Menge von kohlensaurem Kalk aus dem Prozess der Verwitterung wird in einem Jahr abgeleitet. Auch wenn die angegebene Größe wegen der ungenauen oder unsicheren Annahmen um 50 Prozent oder mehr falsch ist, ist sie von sehr großem Interesse zum eingeleitet Vergleich, da sie zeigt, dass die wichtigste aller Prozesse, durch welche Kohlensäure aus der Atmosphäre zu jeder Zeit entfernt wurde, nämlich die chemische Verwitterung silikatischer Mineralien, von der gleichen Größenordnung ist wie Vorgänge mit gegenteiliger Wirkung, die durch die industrielle Entwicklung unserer Zeit verursacht wird, und welche als vorübergehend konzipiert werden muss.

»Im Vergleich mit der Menge der Kohlensäure, die in Kalkstein (und andere Karbonate) gebunden ist, ist die Kohlensäuremenge in der Luft verschwindend klein. Hinsichtlich der Dicke der Sedimentformationen und der Großteil von ihnen, die von Kalkstein und anderen Karbonate gebildet wird, scheint es nicht unwahrscheinlich, dass die Gesamtmenge der Karbonate würde die Oberfläche der ganzen Erde in einer Höhe von hundert Metern abdecken. Wenn wir annehmen, 100 Meter, - eine Zahl, die in einem hohen Grad ungenau sein kann, aber wahrscheinlich wird sie unterschätzt - stellen wir fest, dass etwa 25 000 mal so viel Kohlensäure in Kalk sedimentärer Formationen gebunden ist als freie Kohlensäure in der Luft vorhanden ist. Jedes Molekül von Kohlensäure in dieser Masse von Kalkstein jedoch gab es in und durch die Atmosphäre in der vergangen Zeit. Obwohl wir alle anderen Faktoren, die die Menge der Kohlensäure in der Luft beeinflusst haben könnten, vernachlässigen, verleiht diese Zahl aber eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit für die Hypothese, dass diese Menge [an Kohlensäure](#) sich in früheren geologischen Epochen in Grenzen hielt, die sich nicht viel unterscheiden von vorhandene Menge. da der Prozess der Verwitterung Mengen Kohlensäure

viele tausend Male größer als die Menge sich in der Luft wegwerfbar und wie dieses Verfahren aus verschiedenen geographischen, klimatischen und anderen Ursachen verbraucht hat aller Wahrscheinlichkeit fort mit sehr unterschiedlicher Intensität an unterschiedlichen Epochen, scheint die Wahrscheinlichkeit, wichtige Unterschiede in der Menge der Kohlensäure sehr groß zu sein, auch wenn wir berücksichtigen, die Veredelungsprozesse, die, wie wir im Folgenden sehen werden, sobald her genannt wird, für einen oder anderen Grund, die Produktion oder den Verbrauch von Kohlensäure neigt dazu, das Gleichgewicht in erheblichem Maß zu verdrängen. Man hört oft die Meinung geäußert, dass die Menge der Kohlensäure in der Luft, um sehr viel größer als jetzt früher hätte sein sollen, und dass die Verminderung sollte ergeben sich aus dem Umstand, dass die Kohlensäure aus der Luft genommen und in der Erdkruste in Form von Kohle und Karbonate gespeichert. in vielen Fällen ist diese hypothetische Verringerung nur auf die Bildung von Kohle zugeschrieben, während die viel wichtiger Bildung von Karbonaten vollständig übersehen. Dieses ganze Verfahren der Argumentation auf einer kontinuierlichen Verminderung der Kohlensäure in der Luft verliert alle Fundament in der Tat, ungeachtet dessen, dass enorme Mengen von Kohlensäure im Laufe der Zeit wurden in Karbonaten fest, wenn wir genauer betrachten die Verfahren, mittels dessen Kohlensäure in all Zeiten zur Atmosphäre zugeführt wurde. Daraus können wir schließen, daß auch enorme Veränderungen aufgetreten sind, jedoch nicht, dass die Variation immer in der gleichen Richtung fort.

»Die Kohlensäure wird in die Atmosphäre durch die folgenden Verfahren geliefert:

- (1) vulkanischen Ausdünstungen und damit verbundene geologische Phänomene
- (2) die Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Meteoriten in den höheren Regionen der Atmosphäre
- (3) die Verbrennung und Zerfall von organischen Körpern
- (4) die Zersetzung von Karbonaten
- (5) die Freisetzung der Kohlensäure mechanisch Mineralien auf ihren Bruch oder Zerfall eingeschlossen Kohlensäure der Luft wird hauptsächlich durch die folgenden Verfahren verbraucht:
- (6) Bildung von Karbonaten aus Silikaten bei der Verwitterung und
- (7) der Verbrauch von Kohlensäure durch vegetative Prozesse. Das Meer spielt auch eine wichtige Rolle als Regulator der Menge an Kohlensäure in der Luft durch die Absorption des Wassers, welches Kohlensäure abgibt, wenn seine Temperatur steigt bzw. absorbiert, wenn es sich abkühlt.

Die unter (4) genannten Verfahren und (5) sind von geringer Bedeutung, so daß sie weglassen werden, so dass auch die Verfahren (3) und (7) für die Zirkulation von Materie in der organischen Welt geht so schnell, dass ihre Variationen kann nicht sinnvoll Einfluss haben. Daraus müssen wir Zeiten, in denen große Mengen von Organismen wurden in Sedimentformationen gespeichert und somit aus dem Kreislauf abgezogen wird, oder in denen solche gespeichert Produkte ausnehmen wurden, wie jetzt, erneut in den Kreislauf eingebracht. die Quelle der Kohlensäure in (2) genannt wird, ist völlig unberechenbar.

»So werden sich die Prozesse (1), (2) und (6) vor allem sich gegenseitig ausgleichen. Da die enorme Mengen von Kohlensäure (die einen Druck von vielen Atmosphären), die jetzt in den Kalkstein der Kruste der Erde befestigt sind, kann nicht konzipiert, um in der Luft, aber als unbedeutender Bruchteil des Ganzen zu einem beliebigen Zeitpunkt, da organische Leben auf der Welt erschienen bestanden haben, und da daher der Verbrauch durch Verwitterung und die Bildung von Karbonaten muss durch kontinuierliche Zufuhr wir müssen kompensiert worden ist betrachten vulkanischen Ausdünstungen als Hauptquelle der Kohlensäure für die Atmosphäre.

»Aber diese Quelle nicht regelmäßig und gleichmäßig geflossen. Genau wie einzelne Vulkane haben ihre Zeiten der Veränderung mit wechselnden relativen Ruhe und intensive Tätigkeit, in der gleichen Art und Weise die Welt als Ganzes scheint in bestimmten geologischen Epochen ausgestellt haben ein gewalttätiger und allgemeine vulkanische Aktivität, während andere Epochen durch eine vergleichende Ruhe der vulkanischen Kräfte geprägt sind. Es scheint daher wahrscheinlich, dass die Menge der Kohlensäure in der Luft gleichzeitige Variationen unterworfen war, oder zumindest, dass dieser Faktor hat einen wichtigen Einfluss hatte.

»Wenn wir an die oben genannten Verfahren zur Verbraucher- und Erzeuger Kohlensäure im Berichts, finden wir, dass sie offensichtlich nicht in einer solchen Beziehung zu stehen oder Abhängigkeit voneinander, dass jede Wahrscheinlichkeit für die Dauer von einem Gleichgewicht der Kohlensäure existiert in der Atmosphäre. Eine Erhöhung oder Verminderung der Versorgung während geologischen Zeiten müssen fortgesetzt, auch wenn es nicht wichtig ist, förderlich sein, um bemerkenswerte Veränderungen der Menge an Kohlensäure in der Luft, und es besteht kein Hindernis denkbar vorstellen, dass dies in einem bestimmten geologischen Zeit wurden mehrere Male größer sein, oder andererseits wesentlich weniger, als jetzt.«

Da die Frage der Wahrscheinlichkeit quantitative Veränderung der Kohlensäure in der Atmosphäre ist in entschiedenster Weise durch Prof. Högbom beantwortet, es bleibt nur ein weiterer Punkt auf den ich die Aufmerksamkeit in wenigen Worten nämlich zu zeichnen: keine der bisher vorgeschlagenen Erklärungen sind annehmbar für das Auftreten von freundlichen und Eis-Zeiten? Glücklicherweise während des Fortschreitens der vorstehenden Berechnungen, eine Abhandlung wurde vom bekannten italienischen Meteorologe L. De Marchi, die mich von der Beantwortung der letzten Frage [de Marchi, 1895] entlastet veröffentlicht. Er untersuchte im Detail die verschiedenen dazu vorgeschlagene Theorien ob - astronomische, physikalische oder geographische und von diesen ist hier eine kurze Zusammenfassung. Diese Theorien behaupten, dass das Auftreten von freundlichen oder Gletscher-Epochen sollte sich auf die eine oder andere Veränderung in den folgenden Umständen ab:

- (1) Die Temperatur der Ort der Erde im Raum.
- (2) Die Sonnenstrahlung auf die Erde (Solarkonstante)
- (3) Der Schiefe der Erdachse zur Ekliptik.
- (4) Die Position der Pole auf der Erdoberfläche.
- (5) Die Form der Umlaufbahn der Erde, vor allem seine Exzentrizität (Croll).
- (6) Die Form und Ausdehnung der Kontinente und Ozeane.
- (7) Die Bedeckung der Erdoberfläche (Vegetation).
- (8) Die Richtung der ozeanischen und Luftströmungen.
- (9) Die Position der Tagundnachtgleichen.

[de Marchi, 1895, S. 207] kommt zu dem Schluss, dass diese Hypothesen alle zurückzuweisen sind. Auf der anderen Seite ist er der Meinung, dass eine Änderung in der Transparenz der Atmosphäre den gewünschten Effekt vielleicht geben würde. Nach seinen Berechnungen, »würde eine Senkung dieser Transparenz bewirken eine Absenkung der Temperatur auf der ganzen Erde, leicht in den äquatorialen Regionen und steigt mit der Breite in der 70. parallel, näher den Polen wieder ein bisschen weniger. Ferner dieses Senkung würde, in nicht-tropischen Regionen, weniger auf den Kontinenten als auf dem Meer die jährlichen Schwankungen der Temperatur zu verringern sollten. Diese Verminderung der Transparenz der Luft damit vor allem auf eine größere Menge an Wasserdampf in der Luft zurückgeführt wird, die nicht nur eine direkte Kühlung, sondern auch reichlich Niederschlag von Wasser und Schnee auf den Kontinenten verursachen würde. Die Herkunft dieses größere Menge an

Wasserdampf ist nicht leicht zu erklären.« De Marchi hat bei ganz anderen Ergebnissen als ich selbst, weil er die wichtige Qualität der selektiven Absorption nicht ausreichend berücksichtigt hat, weil er vom Wasserdampf besessen ist. Und ferner, daß er vergessen hat, wenn Wasserdampf in die Atmosphäre zugeführt wird, wird er kondensiert werden, bis der früheren Zustand erreicht ist, wenn keine andere Änderung stattgefunden hat. Wie wir gesehen haben, ist die mittlere relative Luftfeuchte zwischen der 40. und 60. Breitengrad auf der Nordhalbkugel 76 Prozent. Wenn, dann sank die mittlere Temperatur von aktuellen Wert  $5.3^{\circ}\text{C}$  um  $4^{\circ}\text{C}$  bis  $5^{\circ}\text{C}$ , d.h. um  $+1,3$  bzw.  $+0,3$ , und wenn der Wasserdampf in der Luft bleiben, würde sich die relative Luftfeuchtigkeit auf 101 oder 105 Prozent erhöhen. Das ist natürlich unmöglich, denn in der freien Luft kann die relative Luftfeuchtigkeit 100 Prozent nicht überschreiten. Erst recht ist es unmöglich anzunehmen, dass die absolute Feuchtigkeit in der Eiszeit könnte größer gewesen sein als heute.

Die Hypothese von Croll scheint immer noch einen gewissen Gefallen bei englischen Geologen genießen, es kann nicht ohne Interesse sein, die Äußerung von De Marchi zu dieser Theorie, die er im Einklang mit seiner Bedeutung, hat mehr im Detail als die anderen untersuchten zitieren. Er sagt, und ich stimme ihm in diesem Punkt zu: »Jetzt denke ich, dass es scheint, daß aus der Sicht der Klimatologie oder Meteorologie - nach dem gegenwärtigen Stand dieser Wissenschaften - geschlossen werden kann, daß die Hypothese der Croll ganz unhaltbar ist sowohl in ihren Grundsätzen als auch in ihren Folgen« [de Marchi, 1895, Seite 166].

Es scheint, dass der große Vorteil, den Croll Hypothese den Geologen versprochen hat, nämlich von ihr eine natürliche Chronologie, prädisponiert sie zugunsten ihrer Akzeptanz. Aber dieser Umstand, der auf den ersten Blick vorteilhaft erschien, scheint mit dem Fortschritt der Untersuchung eher gegen die Theorie sprechen, denn es wird mehr und mehr unmöglich, die Chronologie von Croll zu versöhnen mit den Tatsachen, die die Beobachtung erfordert.

Ich hoffe, dass nach dem, was gesagt worden ist, die in den vorangehenden Seiten vorgeschlagenen Theorie bei der Erklärung einige Punkte in geologischen Klimatologie, die bisher bewiesen, die meisten schwer zu interpretieren haben, beweisen.

## 6 Ergänzung<sup>16)</sup>

Da die Bewölkung in den verschiedenen Breitengraden sehr unterschiedlich ist und auch über dem Meer und in den verschiedenen Kontinenten, ist es offensichtlich, daß der Einfluß einer Variation der Kohlensäure der Luft etwas anders als die oben berechnet, wobei angenommen wird, dass die Bewölkung die gleiche über den gesamten Globus ist. Ich schätzte daher die Bewölkung an verschiedenen Breitengraden mit Hilfe des von [Teisserenc de Bort, 1884] veröffentlichten Diagramms und berechnete die folgende Tabelle für den Wert der Veränderung der Temperatur, wenn die Kohlensäure auf 0,67 sinkt oder auf das 1,5-fache steigt, die Gegenwart Quantität. In der ersten Spalte wird die Breite gedruckt, in der zweiten und dritten der Bewölkung über den Kontinent und über dem Meer, in der vierten die Erweiterung des Kontinents in Hundertstel der ganzen Gegend. Danach folgt in der fünften und der sechsten Spalte, der Verkleinerungsfaktor, mit dem die Zahlen in der Tabelle sind für das Erhalten des wahren Temperaturänderung über Kontinente und über Ozeane multipliziert werden, und in der siebten Spalte, der bedeutet hier diese beiden Korrekturfaktoren. In der achten und neunten Spalten die Temperaturschwankungen für  $K = 0,67$  und in der zehnten und elften die entsprechenden Werte für  $K = 1,5$  werden in Tabellenform. Der Mittelwert der

---

16) Vergl. Tabelle 6 auf Seite 22

Reduktionsfaktor, der Äquator ist für den Kontinent (bis 70° nördlicher Breite.) 1,098 und 0,927 für den Ozean, im Mittel 0,996. Für die südliche Hemisphäre (bis 60° südlicher Breite.) wird festgestellt, dass für den Kontinent 1.095 sein, für den Ozean 0.871 ist, im Mittel 0,907. Der Einfluss in der südlichen Hemisphäre ist daher etwa 9 Prozent weniger als im Norden. Infolge der minimalen Bewölkung zwischen 20° und 30° Breite in beiden Hemisphären ist die maximale Wirkung der Variation der Kohlensäure Richtung Äquator verschoben, so dass es bei etwa 25° Breite in beiden Fällen  $K = 0,67$  und fällt  $K = 1,5$ .

Breite	Bewölkung		% Kontinent in	Reduktionsfaktor			K = 0.67		K = 1.5	
	Kontinent	Ozean		Kontinent	Ozean	Mittel	Kontinent	Ozean	Kontinent	Ozean
70	58.1	66.7	72.1	0.899	0.775	0.864	-2.8	-2.4	3.1	2.7
60	56.3	67.6	55.8	0.924	0.763	0.853	-3.0	-2.4	3.3	2.7
50	45.7	63.3	52.9	1.057	0.813	0.942	-3.5	-2.7	3.8	2.9
40	36.5	52.5	42.9	1.177	0.939	1.041	-3.9	-3.1	4.4	3.3
30	28.5	47.2	38.8	1.296	1.009	1.120	-4.1	-3.2	4.5	3.5
20	28.5	47.0	24.2	1.308	1.017	1.087	-4.1	-3.2	4.3	3.4
10	50.1	56.7	23.3	1.031	0.903	0.933	-3.1	-2.7	3.3	2.9
0	54.8	59.7	24.2	0.97	0.867	0.892	-2.9	-2.6	3.1	2.8
-10	47.8	54.0	22.5	1.056	0.932	0.96	-3.3	-2.9	3.4	3.0
-20	29.6	49.6	23.3	1.279	0.979	0.972	-4.1	-3.1	4.2	3.2
-30	38.9	51.0	12.5	1.152	0.958	0.982	-3.8	-3.2	4.0	3.4
-40	62.0	61.1	2.5	0.86	0.837	0.838	-2.9	-2.8	3.2	3.1
-50	71.0	71.5	0.9	0.749	0.719	0.719				
-60										

## 7 1901 Über die Wärmeabsorption durch Kohlensäure

In einer Abhandlung vom Jahre 1896 versuchte ich den Einfluss des Kohlensäuregehaltes der Atmosphäre auf die Erdtemperatur zu berechnen {[Handlingar, 1896, Arrhenius, p.1-101], [Arrhenius, 1896]}. Dazu benutzte ich die Beobachtungen von Langley [Langley, 1890a] über die Strahlung des Mondes, woraus die Absorption der Kohlensäure und des Wasserdampfes berechnet wurde. Inzwischen zeigte es sich, dass die so erhaltenen Zahlen der Absorption nicht mit neueren Erfahrungen zu vereinigen wären, weshalb eine Neubestimmung der Absorption der Kohlensäure erwünscht erschien. Dieselbe habe ich im Institut von Prof. H. Rubens in Charlottenburg ausgeführt und erlaube ich mir hier meinen besonderen Dank Hrn. Rubens für seine liebenswürdigen Ratschläge und seine Hilfe bei der Arbeit auszusprechen.

Die Versuchsanordnung war folgende. Eine Wärmequelle, bestehend aus einem Leslie'schen Würfel ( $100^{\circ}\text{C}$ ) oder einem Hohlkörper aus berußtem Kupferblech, der in einen Kohlensäure-Ätherbrei ( $-80^{\circ}\text{C}$ ) tauchte, sandte Strahlen aus, welche - im letzten Falle durch einen um  $45^{\circ}$  gegen die Horizontalebene geneigten Silberspiegel längs der Axe eines Rohres von 33 mm innerem und 50 mm äußerem Durchmesser gerichtet wurden. Die Innenwände des eisernen Rohres wären mit einer stark absorbierenden Schicht von Eisenoxyd bedeckt und die Enden desselben wurden durch Ringe von Messing, in deren Mitte 1 cm dicke und 3 cm im Durchmesser haltende Steinsalzplatten eingekittet wären, vermitteltst Schraubenkappen zugeschlossen. Die Wärmestrahlung ging durch diese Röhre zu einer Rubens'schen Thermosäule, welche mit einem Du Bois-Rubens'schen Panzergalvanometer in Verbindung stand. Der Weg der Wärmestrahlen betrug von der Wärmequelle bis zur Röhre 17 bez. 26.5 cm, in der Röhre 50 cm (außer dem Wege durch die Steinsalzplatten), und von der Röhre bis zur Thermosäule 26.3 cm. Zwischen Wärmequelle und Rohr waren mehrere feste Schirme mit Diaphragmen und ein beweglicher zum Abschluss von fremden Strahlen aufgestellt, zwischen Rohr und Thermosäule und um die letztere wären röhrenförmige Vorrichtungen aus Papier und ein hölzernes Gehäuse zur Verhinderung von Luftströmungen aufgebaut.

Die Anordnung ähnelt in vielen Beziehungen derjenigen, welche Tyndall bei seinen bekannten Versuchen über Wärmeabsorption in Gasen benutzt hat. [Tyndall, 1872, p. 15] In das Rohr konnte von einer Kohlensäurebombe Kohlensäure eingefüllt werden, wobei Drucke von 1 - 8 Atmosphären, die auf einem Metallmanometer abgelesen werden konnten, zur Verwendung kamen. Wenn nötig konnte die Kohlensäure durch eine Luftpumpe aus dem Rohr entfernt und durch Luft ersetzt werden. Die Wärmestrahlung, welche bei diesen Versuchen auf dem Galvanometer abgelesen wurde, war die Differenz zwischen der Strahlung der Wärmequelle und der Thermosäule ( $15^{\circ}\text{C}$ ).

Es ist wohl nicht nötig, die Bestimmung der Absorption näher zu beschreiben, sondern ich kann, indem ich betreffs näherer Details auf die in der Stockholmer Akademie publizierte Abhandlung verweise, zur Wiedergabe der Beobachtungen übergehen. Dabei wird unter Länge ( $\ell$ ) der absorbierenden Schicht das Produkt aus der Länge der Röhre und dem Druck in Atmosphären der Kohlensäure in demselben verstanden. Unter A ist die Absorption in Prozenten tabelliert.  $1 - A/100$  wird der Kürze halber a genannt Die direkten Beobachtungen gaben folgende Werte, wobei die Versuche mit dem Leslie'schen Würfel mit I, diejenigen mit der Kohlensäure-Ätherkühlung mit II bezeichnet sind:

I.		II.	
$\ell(\text{cm})$	$A_1$	$\ell(\text{cm})$	$A_2$
50	10,4	50	15,0
140	14,8	130	19,4
155	15,0	220	22,3



170	15,8	260	23,9
200	15,9	855	26,8
275	18,1		
300	18,8		

Es fällt auf, dass die unter  $A_2$  stehenden Ziffern durchgängig größer sind als die unter  $A_1$  stehenden, für ungefähr gleich große  $\ell$ -Werte gültigen. Um dies näher zu erforschen, habe ich durch Interpolation folgende Werte berechnet:

$\ell(\text{cm})$	$A_2$	$A_1$	$A_2 : A_1$	$\log a_2$	$\log a_1$	$\log a_2 : \log a_1$
50	15,0	10,4	1,44	-0,0706	-0,0477	1,48
130	19,4	13,9	1,40	-0,0937	-0,0650	1,44
220	22,3	16,4	1,36	-0,1096	-0,0778	1,41
260	23,9	17,6	1,36	-0,1186	-0,0841	1,41
(355)	26,8	18,8	1,43	-0,1355	-0,0904	1,50)

Der letzte Wert, der durch eine mäßige Extrapolation gewonnen ist, scheint anzudeuten, dass die in den ersten Ziffern ausgesprochene Tendenz des Quotienten, mit steigendem  $\ell$ -Werte zu sinken, wahrscheinlich nur auf Zufall beruht. Da eine Einheit in der letzten Dezimale einem Fehler von etwa 0,1 Proz. im A-Wert entspricht, und wohl Fehler von 0,5 Proz. in diesen Werten vorkommen können, so ist es wohl erlaubt einen konstanten Mittelwert 1,44 für das Verhältnis  $\log a_2 : \log a_1$  anzunehmen. Von diesem Wert werden wir unten bei den Berechnungen Gebrauch machen.

Mein Hauptzweck war die Absorption der Kohlensäure für relativ hohe  $\ell$ -Werte (über 50 cm) kennen zu lernen. Aus Tyndall's Daten [Tyndall, 1872, p. 37] kann man Werte der Absorption für andere  $\ell$ -Werte erhalten. Sie beziehen sich auf die Strahlung eines  $100^\circ$  warmen schwarzen Körpers gegen eine Thermosäule von Zimmertemperatur. Seine Werte sind folgende:

$\ell(\text{cm})$	$A_1$	$\log a_1$	$\ell(\text{cm})$	$A_1$	$\log a_1$
2,03	1,4	-0,0061	12,18	6,1	-0,0273
4,06	2,1	-0,0092	14,2	6,7	-0,0301
6,09	3,0	-0,0132	20,3	6,9	-0,0311
8,12	4,0	-0,0177	40,6	10,0	-0,0458
10,15	5,1	-0,0227	60,9	11,8	-0,0545

Sie stimmen, wie man sieht, sehr gut mit meinen Versuchen überein, welche unter nahezu denselben Versuchsbedingungen ausgeführt sind. Für  $\ell = 50$  erhält man aus Tyndall's Daten  $A_1 = 10,9$ , während von mir  $A_1 = 10,4$  beobachtet wurde.

Im Folgenden ist es für die Berechnungen von Wichtigkeit, eine empirische Formel darzustellen, welche das Beobachtungsmaterial innerhalb der Versuchsfehler wiedergibt. Eine solche Formel, welche für unendliche  $\ell$ -Werte einen A-Wert gleich 100 aus theoretischen Gründen (vgl. weiter unten) geben soll, ist folgende:

$$\log a = -D\{(1 + B\ell)^c - 1\}$$

Durch Ausprobieren findet man folgende Werte der Konstanten:

$$D_1 = 0,0028 \text{ bez. } D_2 = 0,0040, B = 1 \quad c = 0,25$$

Die folgende Tabelle erlaubt einen Vergleich der beobachteten Zahlen mit den berechneten.

Die Versuche von Tyndall sind durch ein T, die von mir durch ein A gekennzeichnet. log a ist ein berechneter Wert.

		$\ell(\text{cm})$	log a	$A_{ber.}$	$A_{beob.}$	Diff.
I.	T.	2.03	-0.0088	2.0	1.4	+0.6
I.	T.	4.06	-0.0140	3.2	2.0	+1.2
I.	T.	6.09	-0.0176	4.0	3.0	+1.0
I.	T.	8.12	-0.0206	4.6	4.0	+0.6
I.	T.	10.15	-0.0232	5.2	5.1	+0.1
I.	T.	12.18	-0.0253	5.7	6.1	-0.4
I.	T.	14.2	-0.0273	6.1	6.7	-0.6
I.	T.	20.3	-0.0320	7.1	6.9	+0.2
I.	T.	40.6	-0.0430	9.4	10.0	-0.6
I.	T.	50.0	-0.0466	10.2	10.4	-0.2
II.	A.	50.0	-0.0669	14.3	15.0	-0.7
I.	T.	60.7	-0.0503	10.9	11.8	-0.9
II.	A.	130	-0.0953	19.7	19.4	+0.3
I.	A.	140	-0.0681	14.5	14.3	+0.2
I.	A.	155	-0.0707	15.0	15.0	$\pm 0.0$
I.	A.	170	-0.0730	15.5	15.8	-0.3
I.	A.	200	-0.0771	16.3	15.9	+0.4
II.	A.	220	-0.1141	23.1	22.3	+0.8
II.	A.	260	-0.1208	24.3	23.9	+0.4
I.	A.	275	-0.0858	17.9	18.1	-0.2
I.	A.	300	-0.0883	18.4	18.3	+0.1
II.	A.	355	-0.1338	26.5	26.8	-0.3

Eine Abweichung scheint bei den niedrigsten Werten zwischen der Rechnung und der Beobachtung zu bestehen, sicher ist aber diese Abweichung nicht, denn es wäre wohl denkbar, dass auch diese Differenzen innerhalb der Versuchsfehler fallen, wie wohl für die übrigen der Fall ist. Es scheint demnach als ob man die gefundene Formel zu Berechnungen innerhalb des Gebietes  $A_1 = 5$  bis  $A_1 = 18,5$  oder  $A_2 = 7$  bis  $A_2 = 27$ ,  $\ell$ -Werten von 10 bis 350 entsprechend, benutzen könnte. Und nach der guten Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Berechnung scheint es wohl möglich bis zu Werten von  $A_1$  und  $A_2$ , die 25 bez. 35 erreichen, die Formel zur Extrapolation zu verwenden, ohne allzu große Fehler (von mehr als 1 Proz. in A) zu machen. Diese Extrapolation ist für einen (geringen) Teil der Rechnungen betreffs der Kohlensäureabsorption in der Atmosphäre nötig, man kommt dabei zu  $\ell$ -Werten, die 1000 erreichen, also 20 Atmosphären Druck in dem benutzten Apparat entsprechen, einem Druck, bei dem es mir leider wegen Undichtigkeiten nicht gelang, Beobachtungen auszuführen.

Mit Hilfe der oben gegebenen Formel habe ich eine Tabelle berechnet über die Länge der Kohlensäureschichten, welche genügen, um einen bestimmten Prozentsatz der Wärmestrahlung zu absorbieren. In dieser Tabelle sind zwei Werte  $\ell_1$  und  $\ell_2$  angeführt, welche den beiden oben erwähnten Wärmequellen entsprechen. Folgender Auszug möge genügen:

A	$\ell_1$	$\ell_2$	A	$\ell_1$	$\ell_2$
5	9.7	5.0	25	900	300
10	49	20.7	30	(1840)	580
15	155	60	35	(3350)	1080
20	400	142	(40	5860	1920)

Es gilt jetzt die Einwirkung einer gegebenen Kohlensäure-Atmosphäre (in welche andere, nicht merklich absorbierende Gase, wie Sauerstoff und Stickstoff, eingemischt sein können) auf die Temperatur einer davon eingehüllten schwarzen Kugel, die wie die Erde eine konstante Wärmezufuhr erhält, zu berechnen. Die Wirkung dieser Atmosphäre, die wir uns genau so wie die Erdatmosphäre konstatiert denken können, vorausgesetzt dass die anderen wärmeabsorbierenden Gase, hauptsächlich Wasserdampf, entfernt sind, beruht darauf, dass Teile derselben eine (viel) niedrigere Temperatur als die Kugeloberfläche besitzen. Denn wenn die Kohlensäure durchgängig dieselbe Temperatur besäße wie die Kugeloberfläche, so würde die Strahlung nach außen sich so verhalten, wie wenn die Kugel von einem partiell durchsichtigen Glas von derselben Temperatur umgeben wäre. Von den Spektralgebieten, von welchen dieses Glas etwas von der Strahlung des unterliegenden schwarzen Körpers absorbierte, würde sie genau ebenso viel ausstrahlen. Wenn nun die Kohlensäure der Kugelatmosphäre von der Strahlung der Kugel im Ganzen z. B. 20 Proz. absorbierte und gleich viel emittierte, so könnte man sich dieselbe in 20 Schichten zerlegt denken, wovon jede je ein Prozent emittierte. Da nun Absorption und Emission einander parallel gehen, so wird die Verteilung und Dicke der Schichten genau dieselbe sein, wie die Verteilung und Dicke von 20 Schichten, welche zusammen 20 Proz. und jede für sich 1 Proz. einer von außen kommenden Strahlung absorbierten. Es ist also leicht, mit Hilfe der letzten Tabelle für eine senkrecht gegen die Kugeloberfläche ausgehende Strahlung die betreffende Verteilung der Schichten zu berechnen. Nun gehen aber die Strahlen nicht nur senkrecht gegen die Kugeloberfläche, sondern auch in alle anderen Richtungen. Demzufolge wird die durchstrahlte Schicht im Mittel größer, als wenn die Strahlung nur senkrecht zur Oberfläche hinausginge, und dadurch wächst auch die Absorption der Atmosphäre. Wenn die Absorption proportional der Weglänge wäre, so würde der anzubringende Reduktionsfaktor gleich 2 sein. Dies trifft für außerordentlich geringe Kohlensäuremengen zu. Wegen der starken Abweichung von dieser Proportionalität fällt aber dieser Reduktionsfaktor geringer aus, und zwar habe ich mich durch mechanische Quadratur überzeugt, dass die Wirkung so groß ist, wie wenn die durchstrahlte Schicht 1,70 bis 1,75 mal so dick wäre wie die Schicht, welche bei Strahlung senkrecht zur Kugeloberfläche durchlaufen wird.

Wir können also jetzt die Lage und die Dicke der Schichten in der genannten Atmosphäre berechnen, welche je ein Prozent der totalen Strahlung von der Kugel absorbieren und emittieren. Denken wir uns jetzt die Temperatur nicht gleichmäßig, sondern etwa wie in der Atmosphäre verteilt, sodass die äußeren Schichten bedeutend niedriger temperiert sind, wie die inneren. Die Absorption wird dadurch nicht nennenswert verändert, sondern wir können die Schichtenverteilung unverändert behalten ohne merkliche Fehler zu begehen. Dagegen sinkt die Emission ganz enorm und zwar besonders in den äußersten Schichten. Dieses Sinken ist für verschiedene Wellenlängen verschieden und kann nach der Wien'schen Formel, mit der Planck'schen Korrektur, berechnet werden. Da nun bei dieser Strahlung die Verhältnisse so ähnlich wie möglich mit denjenigen der Erde angenommen werden, so spielt die Strahlung der Kohlensäure von der Wellenlänge  $14.5 \mu\text{m}$  die ganz überwiegende Hauptrolle, sodass diejenige bei  $2.6 \mu\text{m}$  bez.  $4.2 \mu\text{m}$  vernachlässigt werden kann. (Dadurch wird die Abnahme der Strahlung mit sinkender Temperatur etwas geringer angenommen als sie in Wirklichkeit ist.) Um einen Begriff von dieser Abnahme zu gehen, mögen folgende relative Werte der Emission (E) eines schwarzen Körpers in Bezug auf die Wellenlänge  $14.5 \mu\text{m}$  angeführt werden:

T =	+23.2	-15.4	-54.0	92.7	-131.4	-170.0	-182.9°C
E =	1.68	1.00	0.50	0.19	0.043	0.0031	0.0001

Die Strahlung der niedrigst temperierten äußersten Schichten ist so gut wie Null, d.h. sie halten die betreffende Strahlung vollkommen zurück.

Die Strahlung dieser Kugel verhält sich also ungefähr wie diejenige der Sonne. Wenn dieser Himmelskörper keine absorbierende Dunsthülle besäße, so würde er aussehen wie eine gleichmässig leuchtende Scheibe mit einem kontinuierlichen Spektrum. Anstatt dessen sehen seine Ränder dunkler aus als die Mitte, weil die absorbierende Schicht da dicker ist, und auch die Emission der mittleren Teile ist bedeutend herabgesetzt, wie die Absorptionslinien im Spektrum andeuten. Man schätzt, dass auf diese Weise die halbe Wärmestrahlung der Sonne erspart wird. Ebenso wird der Wärmeverlust der betrachteten schwarzen Kugel vermindert und ihre Temperatur steigt demgemäß, bis wieder Gleichgewicht mit der konstanten Wärmezufuhr eintritt. Die dazu nötige Temperaturerhöhung kann leicht mit Hilfe des Stefan-Boltzmann'schen Gesetzes berechnet werden.

Um nun weiter zu kommen, muss man sich eine Vorstellung bilden, wie die Temperatur mit der Höhe abnimmt. Wir wollen da annehmen, dass die Temperaturverteilung ebendieselbe ist wie in unserer Atmosphäre. Diese ist bis zu Höhen von etwa 5500 m (einem Druck von 380 mm entsprechend) recht genau bekannt. Für größere Höhen muss man sie berechnen. Nach Hann nimmt die Temperatur um etwa  $0.57^\circ$  nach den Tabellen von v. Bezold etwa  $0.8^\circ$  für je 100 m ab. Für größere Höhen wird diese letztere Zahl unzweifelhaft die richtigere sein und zwar, wie v. Bezold hervorhebt, wahrscheinlicherweise überschritten werden. Indessen unterscheiden sich die Rechnungsergebnisse nach der einen oder anderen Annahme recht wenig, weshalb ich mit dem Mittelwert gerechnet habe, obgleich der schützende Effekt der Kohlensäure dadurch wahrscheinlicherweise etwas unterschätzt wird.

Nun ist weiter zu bemerken, dass die oben gefundenen Absorptionsdaten für Kohlensäure zwischen Steinsalzplatten von 1 cm Dicke gültig sind. Diese Steinsalzplatten besitzen aber, wie [Rubens und Trowbridge, 1897] gezeigt haben, eine stark ausgeprägte selektive Absorption, welche übrigens derjenigen des Wasserdampfes für Wellenlängen von  $13\ \mu\text{m}$  ab nicht unähnlich ist. Wegen dieser Wirkung der Steinsalzplatten ist eine Korrektur einzuführen, wodurch die Absorption der Kohlensäure in den beiden untersuchten Fällen auf 93 bez. 79 Proz. reduziert wird.

Die wärmehaltende Eigenschaft der Kohlensäure wird am leichtesten ersichtlich, wenn man die Temperaturänderung der schwarzen Kugel berechnet, welche erfolgen würde, wenn die Kohlensäure, deren Menge gleich derjenigen in unserer Atmosphäre angenommen wird, aus ihrer Atmosphäre entfernt oder auf das Viertel oder die Hälfte dieses Betrages reduziert bez. auf das Doppelte oder Vierfache vergrößert werden würde. Diese Änderung ist in folgender Tabelle aufgeführt, und zwar sind zwei Werte eingetragen: einer, der gilt, wenn die oben angeführte Reduktion nicht angebracht wird, ein anderer nach erfolgter Reduktion. Die Temperatur bei der Menge 1,0 (der jetzigen Kohlensäuremenge in der Atmosphäre entsprechend) wird gleich  $15^\circ\text{C}$  angenommen.

Kohlensäuremenge	0	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0
Temperaturänderung (unred.)	-14.5	-6.0	-3.2	0	+4.0	+9.9
Temperaturänderung (red.)	-12.2	-5.0	-2.8	0	+3.3	+7.6

Wenn man nun diese Berechnungen auf die irdischen Verhältnisse anwenden will, so tritt eine Komplikation dadurch ein, dass in unserer Atmosphäre sich ein anderer stark wärmeabsorbierender Stoff, der Wasserdampf, befindet. Wenn nun der Wasserdampf keine gemeinsamen Absorptionslinien mit der Kohlensäure besäße, so würde dadurch nur die Absorption der Kohlensäure in Prozenten von der nach der Wasserdampfabsorption übrigen Strahlung vergrößert werden. Der Wasserdampf besitzt nun mehrere starke Absorptionsbänder bei niedriger Wellenlänge und außerdem, nach den Untersuchungen von [Rubens und Aschkinass, 1898], eine beinahe vollkommene Absorption der Strahlung von Wellenlängen über  $16\ \mu\text{m}$ . In dieser letzten Beziehung ähnelt der Wasserdampf sehr dem Steinsalz, welches auch Strahlen

von Wellenlängen über  $16\ \mu\text{m}$  beinahe vollkommen zurückhält. Es scheint deshalb natürlich, die in der Atmosphäre vorwaltenden Verhältnisse eher nach den oben gegebenen unkorrigierten Ziffern als nach den für die Absorption durch das Steinsalz korrigierten zu beurteilen. Die an anderen Stellen des Wärmespektrums vorkommende Absorption des Wasserdampfes, welche mehrere ausgeprägte Maxima besitzt, dürfte eher weniger von der Kohlensäurestrahlung als von den übrigen Strahlen absorbieren. Zwar fällt das Kohlensäuremaximum bei  $2.6\ \mu\text{m}$  in der Nähe des Wassermaximums bei  $2.64\ \mu\text{m}$  und ein Teil der Strahlen von Wellenlängen um  $2.6\ \mu\text{m}$  dürfte sowohl durch Kohlensäure, als auch durch Wasserdampf Absorption erleiden. Ebenso absorbiert der Wasserdampf merklich in der Nähe von  $14.5\ \mu\text{m}$ . Aber die Koinzidenz dürfte bei einer näheren Untersuchung sich mehr als scheinbar wie als wirklich herausstellen, da die Absorptionsbänder nach Langley's Messungen<sup>17)</sup>, worüber weiter unten gesprochen wird, nicht kontinuierlich sind, sondern aus diskreten Linien mit schnell nach den Seiten abnehmender Stärke bestehen. Dazu kommt, dass in den höheren Luftschichten, wo der eigentliche wärmeschützende Effekt seinen hauptsächlichsten Sitz hat, außerordentlich geringe Wasserdampfmengen vorkommen, sodass nur die allerkräftigsten Absorptionsbänder, wie dasjenige bei Wellenlängen über  $16\ \mu\text{m}$ , eine merkliche Wirkung ausüben. So z. B. dürfte nach v. Bezold's Tabellen die Wasserdampfmenge über 8000 m Höhe nicht so groß sein wie die absorbierende Menge bei den Versuchen von Rubens und Aschkinass.

Die Ab- oder Zufuhr einer bestimmten Kohlensäuremenge zu der übrigens unveränderten jetzigen Erdatmosphäre bringt deshalb wahrscheinlich eher eine größere als eine geringere Einwirkung auf die Temperatur der Erde mit sich, als die oben stehenden unreduzierten Ziffern angeben. Die Erde kann nämlich sehr nahe als ein schwarzer Körper behandelt werden.

Dagegen spielt der Wasserdampf eine andere Rolle, wodurch der Effekt der Kohlensäuregehaltsänderung verschärft wird, was ich schon in meiner vorigen Arbeit über dieses Thema hervorgehoben habe. Wenn nämlich zufolge der Kohlensäurezunahme die Temperatur der Erdoberfläche steigt, so wächst dadurch der Wasserdampfgehalt der Luft. Dadurch wird die Absorption in der Atmosphäre vergrößert und der Wärmeschutz effektiver. Da keine Daten jetzt vorliegen, woraus dieser Wärmeschutz berechnet werden kann, so benutze ich das alte Resultat, wozu ich in meiner vorigen Untersuchung, gestützt auf Langley's mangelhafte Daten gelangte. Danach sollte der vom Verdampfen des Wassers hervorgebrachte Zuschuss in dem Effekt bei niederem Kohlensäuregehalt etwa ein Drittel, bei hohem ein Sechstel des direkten Effektes der Kohlensäure ausmachen. Nach den damals ausgeführten Berechnungen sollte einem Sinken des Kohlensäuregehaltes der Luft auf 0,5 eine Temperaturerniedrigung von  $5.3^\circ\text{C}$ . entsprechen. Von diesen  $5.3^\circ$  entspringt ein Viertel der Wasserdampfabnahme und  $4.0^\circ$  der direkten Kohlensäurewirkung, während jetzt  $3.2^\circ$  berechnet wurden. Ebenso würde nach der alten Berechnung dem dreifachen Kohlensäuregehalt der jetzigen eine Temperatursteigerung von etwa  $8.2^\circ\text{C}$  entsprechen, wovon  $7^\circ$  auf die direkte Kohlensäurewirkung kämen, was dem Neuberechneten Wert ( $7.1^\circ$ ) sehr wohl entspricht. Die neue Berechnung führt demnach zu Ergebnissen, die mit denjenigen der alten entweder gänzlich übereinstimmen, oder jedenfalls annähernd gleich sind. Da die ganze Berechnung nur darauf abgesehen ist, einen Annäherungswert für den betreffenden Effekt zu geben, so kann man wohl behaupten, dass die neue Berechnung in der Hauptsache zu demselben Ziel führt wie die alte.

Ebenso erscheint es mir immer noch plausibel, die genannte Wirkung des Wasserdampfes ungefähr ebenso groß zu schätzen, wie ich 1896 getan habe. Da diese Wirkung in Gegenden mit geringer Wasserdampfmenge größer ausfällt, wie in solchen mit hoher, trägt dieser Effekt wesentlich dazu bei, die Temperaturungleichheiten auf der Erde auszugleichen.

In einer neuerdings erschienenen Abhandlung hat Hr. Ångström Resultate erhalten, welche mit den oben angeführten in grellem Widerspruche stehen [Ångström, 1900a]. Da die

17) Vgl. die Zeichnungen von [Langley, 1894]

Schlüsse Hr. Ångström's auf theoretischen Betrachtungen beruhen, die durch die oben angeführten Versuche als unhaltbar erwiesen sind, so will ich kurz auf seine Ansichten eingehen.

Hr. Ångström berechnet die Energieverteilung im Wärmespektrum nach dem inzwischen von Hr. Planck korrigierten Gesetz von Wien. Dabei scheint er auch nicht die Rückstrahlung des kälteren Körpers in Betracht zu ziehen. Diese Vernachlässigungen, von welchen der letzterwähnte jedenfalls bei einigermaßen genauen Rechnungen wohl recht bedenklich erscheinen könnte, sind in dem vorliegenden Falle ohne nennenswerten Belang. Hr. Ångström nimmt weiter eine Maximalabsorption an, welche er so bestimmt, dass er den Absorptionsbändern der Kohlensäure eine bestimmte Breite erteilt und wohl annimmt, dass die Absorption innerhalb dieses Gebietes vollständig ist. Wie er näher dies ausgeführt hat, darüber gibt er keine Nachricht; nach der in seinem Aufsatz gedruckten Figur scheint er für das Band bei  $14,5 \mu\text{m}$  zwei Breiten anzunehmen, nämlich  $3 \mu\text{m}$  ( $13 - 16 \mu\text{m}$ ) und  $2 \mu\text{m}$  ( $13,5 - 15,5 \mu\text{m}$ ). Nach dieser Schätzungsweise würde die maximale Absorption der Kohlensäure für eine Strahlung eines  $15$  gradigen schwarzen Körpers gegen einen schwarzen Körper von  $-80^\circ$   $16,7$  bez.  $10,9$  Proz. betragen. Diese Ziffern stimmen, soweit man verlangen kann, mit den von Ångström gegebenen, etwa  $10 - 16$  Proz. (für die Strahlung eines  $-77$  gradigen Körpers gegen den leeren Raum).

Nun zeigen aber die oben angeführten Versuche, dass bei einer Länge der absorbierenden Kohlensäureschicht von  $355$  ccm die betreffende Absorption  $20,8$  Proz. erreicht. Und der Gang der Ziffern in der Nähe dieses Punktes ist so regelmässig, dass man sicher voraussehen kann, dass die Absorption bei steigender Länge der absorbierenden Schicht weit über  $30$  Proz. gehen wird. Um nun aber sicher die Fehler der Extrapolation zu vermeiden, bleiben wir bei den beobachteten  $26,8$  Proz. Korrigiert man nun wegen der Absorption des Steinsalzes, so erhält man einen  $0,79$  mal so großen Wert, d. h.  $21$  Proz. Dieser Wert liegt nun bedeutend höher ( $4,3$  Proz.) als der nach Hr. Ångström's Methode berechnete Maximalwert, der erst bei unendlich großer Dicke der absorbierenden Schicht (nach Hr. Ångström) erreicht werden sollte.

Da eine so große Differenz nicht gern Versuchsfehlern zugeschrieben werden kann, erübrigt nur ein Schluss, dass die Berechnungsweise des Hr. Ångström auf unrichtigen Prinzipien begründet ist. Dies ist auch von vornherein wahrscheinlich. Bei stetig zunehmender Schichtdicke nimmt die Absorption, stetig zu und nähert sich allmählich dem Wert  $100$  Proz. Darauf deuten alle unsere bisherigen Kenntnisse. So z. B. zeichnet sich ja die Natriumflamme durch zwei feine charakteristische Linien aus, die jedenfalls viel schärfer sind als die Kohlensäurebänder. Bei zunehmendem Natriumgehalt der Flamme steigt die Emission immer mehr und zwar anfangs proportional der Natriumsalzmenge, später innerhalb eines sehr großen Intervalls proportional der Quadratwurzel daraus. Ein niedriger Grenzwert der Emission, welche den beiden scharfen Natriumlinien entsprechen würde, ist gar nicht aufzufinden. Allmählich erscheint dagegen ein schwacher Hintergrund des Spektrums von kontinuierlichem Licht, der mit steigendem Salzgehalt an Stärke zunimmt. [Gouy, 1879] Es muss also die Natriumflamme in genügend dicker Schicht sich sehr nahe wie ein schwarzer Körper verhalten. Wasserstoff gibt schon in ziemlich dünner Schicht ein kontinuierliches Spektrum.

Ebenso verhält sich die Absorption der Gase. Jodgas oder Stickstoffsuperoxyd geben in dünner Schicht sehr scharfe Spektrallinien, in mäßig dicker Schicht erscheinen sie ganz undurchsichtig. Noch auffallender ist das Verhalten des Wassers. In dünner Schicht ist flüssiges Wasser für sichtbare Strahlen vollkommen durchsichtig. Eine genügend dicke Schicht - man schätzt sie auf etwa  $500$  m - vermag aber Sonnenlicht vollkommen auszulöschen. Ebenso verhält sich aller Wahrscheinlichkeit nach die Kohlensäure, wenn die durchstrahlte Schicht dick genug wird, sie möge gasförmig oder flüssig sein.

Es ist demnach zu erwarten, dass, bei zunehmender Dicke der absorbierenden Kohlensäure-

schicht, immer neue Absorptionsstreifen auftreten, die bei dünner Schicht zu schwach ausgeprägt sind, um sich bemerkbar zu machen. In dieser Hinsicht sind die Zeichnungen von [Langley, 1894] über die atmosphärischen Absorptionsbänder sehr instruktiv. Die erste dieser Zeichnungen endet rechts am Bande, wo sowohl Wasserdampf als auch Kohlensäure eine starke Absorption besitzt. Obgleich dieses Band einer durchstrahlten Schicht von mehr als 250 cm Kohlensäure und einer Wasserdampfmenge von gleicher Größenordnung entspricht, besteht es aus mehreren diskreten Linien und nicht aus einem breiten dunklen Band, wie man nach Hrn. Ångström's Schlussweise vermuten sollte. Bei immer mehr zunehmender Dicke werden sich diese Linien offenbar verbreitern und auch neue Streifen an ihren Seiten zum Vorschein kommen. Dieser letzte Umstand wird durch die abnehmende Stärke der Linien zur Seite des Bandes angedeutet. Durch diese beiden Umstände steigt die Absorption immer weiter mit zunehmender Dicke der absorbierenden Schicht. Zwar geschieht diese Zunahme sehr langsam, nach den oben angeführten Daten nahezu wie die vierte Wurzel aus der Schichtdicke, wenn diese 100 cm übersteigt; später geht die Zunahme noch langsamer vor sich.

Nachdem Hr. Ångström von den oben angedeuteten Prämissen ausgegangen ist, werden die späteren Schlüsse denselben entsprechend. Er erwähnt, dass Hr. Cand. J. Koch im physikalischen Institut von Hrn. Ångström gefunden hat, dass eine »Kohlensäureschicht von 30 cm Länge und 780 mm Druck ca. 10 Proz. von der Strahlung eines schwarzen Körpers von  $100^\circ$  absorbiert, und dass, wenn der Druck auf  $\frac{2}{3}$  reduziert wird, die Absorption sich nur unbedeutend - höchstens mit 0,4 Proz. der Gesamtstrahlung ändert«. Die Daten von Tyndall und die obenstehende Berechnung verlangen anstatt »ca. 10 Proz.« etwa 8,6, was, da die Versuchsbedingungen von Hrn. Koch noch unbekannt sind, als eine genügende Übereinstimmung angesehen werden möge. Dagegen verlangen die Daten von Tyndall bei Abnahme des Druckes auf  $\frac{2}{3}$  eine Abnahme der Absorption von etwa 1,6 Proz. (die Absorptionsformel verlangt etwa 1,2 Proz.), was nicht ohne weiteres mit Hrn. Koch's Befund als übereinstimmend angesehen werden kann. Vermutlich wird sich Hr. Koch bemühen, in seiner in Aussicht gestellten Abhandlung diese Diskrepanz aufzuklären. Hr. Ångström bemerkt zu den Daten von Hrn. Koch: »Eine Schicht von 30 cm Länge hat also die Absorption der Strahlung einer Wärmequelle von  $100^\circ$  beinahe vollständig bewirkt. Aus diesen Untersuchungen« (von Hrn. Koch?) »und Berechnungen« (von Hrn. Ångström?) »geht klar hervor, erstens dass höchstens ca. 16 Proz. von der Erdstrahlung durch die atmosphärische Kohlensäure absorbiert werden, und zweitens dass die Gesamtabsorption sehr wenig von den Veränderungen in dem atmosphärischen Kohlensäuregehalt abhängig ist, solange nämlich dieser nicht kleiner als 0,2 Proz. der jetzt vorhandenen ist.« In diese Worte hat Hr. Ångström seine Ansichten betreffs der Absorption der Kohlensäure zusammengefasst.

Es verdient vielleicht noch erwähnt zu werden, dass, wenn die Erdatmosphäre nach Hrn. Ångström's Schätzung 10 - 16 Proz. der Erdstrahlung absorbierte, sie die Erdtemperatur um etwa,  $7.4 - 12.3^\circ$  erhöhen könnte. Da nun die Eiszeit eine um  $4.5^\circ$  niedrigere Temperatur als die jetzige besaß, so könnte man wohl erwarten, dass auch Hr. Ångström in dem partiellen Verschwinden der Kohlensäure aus der Atmosphäre eine mögliche Ursache der Eiszeit erblicken würde. Dem scheint aber nicht so zu sein.

Die Stellung Hrn. Ångström's zu dieser Frage ist umso bemerkenswerter, als er früher die Wirkung der Kohlensäure stark überschätzte, indem er der Ansicht war, dass die atmosphärische Kohlensäure etwa 60 Proz. der Sonnenstrahlung absorbiert. Aus seinen neuen Beobachtungen hat er aber erfahren, dass ein Zusatz von Kohlensäure zu einer Menge, die in dem oben verwendeten Maßstabe einen  $\ell$ -Wert von etwa 125 cm besitzt, keinen merklichen Einfluss (1,5 Proz.) auf die Sonnenstrahlung ausübt. Dieses Resultat steht dagegen in bester

Übereinstimmung mit den bei der oben ausgeführten Rechnung gemachten Annahmen<sup>18)</sup>. Jetzt ist Hr. Ångström zu dem entgegengesetzten Extrem gelangt, hat aber dabei das richtige Verhalten nicht getroffen. Bemerkenswert scheint auch, dass Hr. Ångström für Wasserdampf eine mit der Menge kontinuierlich steigende Absorption findet, obgleich die durchstrahlte Schicht einem  $\ell$ -Wert von etwa 10 000 cm entspricht (also die  $\ell$ -Werte der Kohlensäure, mit welchen oben gerechnet wurde, um das 10 fache übertreffen). Warum die Kohlensäure sich so ganz anders als Wasserdampf verhalten sollte, könnte wohl einer Aufklärung bedürfen.

Betreffs der sekundären Einflüsse, welche die Kohlensäurewirkung begleiten, verweise ich auf die ausführliche Abhandlung. Nur soviel will ich hier erwähnen, dass wenn die Kohlensäure nicht in den höchsten Schichten eine merkliche Absorption ausübte, so würde der Temperaturfall daselbst nach dem Gesetz für die adiabatische Ausdehnung erfolgen, wie v. Bezold so deutlich in folgenden Worten hervorhebt: »In den größten Höhen, wo Absorption und Emission verschwinden und beinahe kein Wasserdampf mehr vorhanden ist, bildet adiabatisches Aufsteigen und Niedersinken trockener Luft die einzige Ursache der Temperaturenderung mit der Höhe.« [Handlingar, 1896, W. v. Bezold, p. 18] Nun ist nach den von ihm angeführten Ziffern diese Grenze auch in 10 000 m Höhe bei weitem nicht erreicht, sondern der Temperaturfall ist nur 0,81 mal so groß, wie man nach Hrn. v. Bezold's Äußerung vermuten sollte. Dieses Plus in der Lufttemperatur rührt ohne Zweifel von der Absorption der Sonnen- und Erd-Strahlung durch die Kohlensäure her. Wenn nun noch mehr Kohlensäure in der Luft vorhanden wäre, so würde der Temperaturfall noch mehr von den adiabatischen Verhältnissen abweichen. Wie groß diese Änderung sein kann, hängt von der Lebhaftigkeit der auf- und niedersteigenden Luftströme ab, welche den adiabatischen Zustand hervorzubringen streben, verglichen mit der Strahlung der Kohlensäure, welche einen geringeren Temperaturfall begünstigt. Durch die stärkere Erwärmung der Luft am Tag und Abkühlung in der Nacht, welche als Folge der erhöhten Absorption eintreten würde, würden wiederum die Luftbewegungen, welche zum Herstellen des adiabatischen Zustandes streben, verstärkt werden. Es ist offenbar sehr schwer, diesen komplizierten Einfluss zu schätzen. Wahrscheinlicherweise wird die betreffende Änderung recht gering sein. Außerdem bewirkt eine recht bedeutende Änderung im Temperaturfall (sobald dieser nur die Hälfte des adiabatischen Temperaturfalles überschreitet) einen relativ sehr geringen Einfluss auf den schützenden Effekt der Kohlensäure, weshalb ich die Rechnungen so ausgeführt habe, als ob der Temperaturfall konstant so verbliebe wie er jetzt ist.

Dagegen würden die verstärkten Luftströmungen dazu beitragen, die Temperaturunterschiede zwischen den polaren und den äquatorialen Gegenden der Erde auszugleichen, wozu im allgemeinen eine Erhöhung der atmosphärischen Absorption hinführt.

## 8 Verzeichnisse

### Abbildungsverzeichnis

### Tabellenverzeichnis

1	Strahlung (i) des Vollmondes für verschiedene Werte von K und W . . . . .	7
2	Absorptionskoeffizienten von Kohlensäure (x) und Wasserdampf (y) . . . . .	7

18) Vgl. die ausführliche Abhandlung [Handlingar, 1896, Arrhenius, p. 29]



3	Die Transparenz einer gegebenen Atmosphäre für Wärme von einem Körper von 15°C . . . . .	13
4	Der mittlere Weg der Erdstrahlen . . . . .	14
5	V. Korrekturfaktoren für die Strahlung. . . . .	20
6	Mittlere Temperatur, relative und absolute Feuchtigkeit . . . . .	22
6	Änderung der Temperatur, verursacht durch eine Änderung der Kohlensäure	23

## Literaturverzeichnis

- [Arrhenius 1895] ARRHENIUS, Svante: *Auszug aus einem Papier an die Königlich-Schwedische Akademie der Wissenschaften, vorgestellt. Vom Autor mitgeteilt.* 11. Dezember 1895. – Extract from a paper presented to the Royal Swedish Academy of Sciences, 11th December, 1895. Communicated by the Author. 2
- [Arrhenius 1896] ARRHENIUS, Svante: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Earth [ber den Einflu von Kohlensure in der Luft auf die Temperatur des Bodens]. In: *The London, Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science* 9 (1896), April, S. 237 – 276. – URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1897PASP...9...14A>. – Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System 2, 32
- [Arrhenius 1897] ARRHENIUS, Svante: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Earth [ber den Einflu von Kohlensure in der Luft auf die Temperatur des Bodens]. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 9 (1897), Feb, S. 14 – 24. – URL <http://www.jstor.org/stable/i40029242>. – Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System 2, 3
- [Arrhenius 1901] ARRHENIUS, Svante: Ueber die Wärmeabsorption durch Kohlensäure. In: *Annalen Der Physik [Drude, P. and Wien, W. and Planck, M. and Deutsche Physikalische Gesellschaft (1899-1945) and Grüneisen, E.A.]* 310, Vierte Folge, Band 6 (1901), S. 690 – 705. – URL <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15314w.langDE> 4
- [Teisserenc de Bort 1884] BORT, Léon Teisserenc de: Étud. sur la distribution moyenne de la nébulosité á la surface du globe [Studie über die durchschnittliche Verteilung der Bewölkung in der Welt]. In: *Annales du Bureau Central Météorologique de France* Année t.iv. 2de partie (1884) 18, 30
- [Buchan 1889] BUCHAN: *Report on the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. 'Challenger' [Bericht über die wissenschaftlichen Ergebnisse der Reise von HMS 'Challenger']*. Kap. Physics and Chemistry [Physik und Chemie], vol. II, 1889 24
- [Fourier 1824] FOURIER, J.: Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. In: *Mémoires de l'Academie Royale des Sciences* 7 (1824), S. 569 – 604 4
- [Geikie 1894] GEIKIE, James: *The Great Ice Age and its relation to the Antiquity of Man [Die groe Eiszeit und ihre Beziehung zum Alter des Menschen]*. 3. Auflage. London : E. Stanford, 1894 25
- [Gouy 1879] GOUY: In: *Ann. d. chim. et de phys.* (5) 18 (1879), 23 S 38

- [Handlingar 1896] HANDLINGAR, Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens: *Bihang till [Nachtrag zu]*. Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar Bd. 22. Afd. 1, 1896 32, 40
- [Hann 1894] HANN: .... In: *Meteorologischen Zeitschrift* XI (1894), S. 196 19
- [Högbom 1894] HÖGBOM, Arvid G.: Om Sannolikheten För Sekulära Förändringar I Atmosfärens Kolsyrehalt [Wahrscheinlichkeiten, wenn sich die atmosphärischen Kohlensäure weltlich ändert]. In: *Svensk kemisk Tidskrift* 6 (1894), S. 169 – 177 26
- [Schwarzschild, K. 1906] SCHWARZSCHILD, K.: Ueber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre. In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse* 1906 (1906), S. 41 – 53. – URL [http://gdz-srv1.sub.uni-goettingen.de/gcs/gcs?&action=pdf&metsFile=PPN252457811\\_1906&divID=LOG\\_0009&pagesize=A4&pdf](http://gdz-srv1.sub.uni-goettingen.de/gcs/gcs?&action=pdf&metsFile=PPN252457811_1906&divID=LOG_0009&pagesize=A4&pdf) 3
- [Lamansky 1872] LAMANSKY: .... In: *Pogg. Ann. cxlvi* (1872), S. 200 10
- [Langley 1890a] LANGLEY, S. P.: Memoirs of the nat. Ac. of Se. 4. 91 mem. (1890) 32
- [Langley 1894] LANGLEY, S. P.: In: *Rep. Brit. Ass.* 64 (1894), 473 – 474 S 37, 39
- [Langley 1884] LANGLEY, Samuel P.: Researches on Solar Heat [Forschungen zur Solarwärme]. In: *Professionelle Papiere des Signal Service No. 15* (1884). – Washington 4, 5, 10, 13, 14, 15
- [Langley 1889] LANGLEY, Samuel P.: In: *Annales de chimie et de physique ser. 6, t, XVII* (1889) 10, 14
- [Langley 1890b] LANGLEY, Samuel P.: The Temperature of the Moon [Die Temperatur des Mondes]. In: *Mem. of the National Academy of Sciences* vol. iv. 9th mem (1890), S. 193 4, 11, 12, 14, 15, 17, 19
- [Lexikon 2014] LEXIKON: *Pyrgometer*. 2014. – URL <http://www.wissen.de/lexikon/pyrgometer> 4
- [de Marchi 1895] MARCHI, Luigi de: *Le cause dell'era glaciale [Die Ursachen der Eiszeit]*. URL <http://books.google.de/books?id=phEiQQAACAAJ>, 1895 29, 30
- [Müller und Peters 1894] MÜLLER, Johann Heinrich J. ; PETERS, Karl Friedrich W.: *Joh. Müller's Lehrbuch der kosmischen Physik*,. 5. Aufl. Braunschweig : F. Vieweg, 1894. – URL <http://catalog.hathitrust.org/Record/006685179>. – 907 p 20
- [Nathorst 1894] NATHORST, Alfred G.: *Jordens historia [Geschichte der Erde]*. Stockholm, 1894 25
- [Neumayr und Uhlig 1887] NEUMAYR, M. ; UHLIG, V.: *Erdgeschichte*. Bd. 2. Leipzig : Bibliographisches Institut, 1887 25
- [Paschen 1893] PASCHEN, F.: Ueber die Emission erhitzter Gase. In: *Wiedemanns Annalen der Physik* 286 (1893), Nr. 11, S. 409 – 443. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18932861103>. – ISSN 1521-3889 9

- [Paschen 1894a] PASCHEN, F.: Die genauen Wellenlängen der Banden des ultrarothem Kohlensäure- und Wasserspectrums. In: *Wiedemanns Annalen der Physik* 289 (1894), Nr. 10, S. 334–336. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18942891007>. – ISSN 1521-3889 9
- [Paschen 1894b] PASCHEN, F.: Notiz über die Gültigkeit des Kirchhoff'schen Gesetzes von der Emission. In: *Wiedemanns Annalen der Physik* 287 (1894), Nr. 1, S. 40 – 46. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18942870103>. – ISSN 1521-3889
- [Paschen 1894c] PASCHEN, F.: Ueber die Emission der Gase. In: *Wiedemanns Annalen der Physik* 287 (1894), Nr. 1, S. 1–39. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18942870102>. – ISSN 1521-3889 9
- [Paschen 1894d] PASCHEN, F.: Ueber die Emission der Gase. In: *Wiedemanns Annalen der Physik* 288 (1894), Nr. 6, S. 209–237. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18942880602>. – ISSN 1521-3889 9
- [Pouillet 1838] POUILLET, Claude S. M.: Mémoire sur la chaleur solaire, sur les pouvoirs rayonnants et absorbants de l'air atmosphérique, et sur les températures de l'espace []. In: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 7, no. 2 (1838), S. 24 – 65. – URL [http://nsdl.org/archives/onramp/classic\\_articles/issue1\\_global\\_warming/n2-Pouillet\\_1837corrected.pdf](http://nsdl.org/archives/onramp/classic_articles/issue1_global_warming/n2-Pouillet_1837corrected.pdf) 4, 15
- [Ångström 1916] ÅNGSTRÖM, Anders: *A study of the radiation of the atmosphere*, Dissertation, 1916. – 159 S. – URL [https://openlibrary.org/books/OL18016447M/A\\_study\\_of\\_the\\_radiation\\_of\\_the\\_atmosphere](https://openlibrary.org/books/OL18016447M/A_study_of_the_radiation_of_the_atmosphere) 4
- [Ångström 1900a] ÅNGSTRÖM, K.: In: *Ann d. Phys.* 3 (1900), 720 S 37
- [Ångström 1900b] ÅNGSTRÖM, Knut: Ueber die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre. In: *Annalen der Physik* 308 (1900), Nr. 12, S. 720–732. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.19003081208>. – ISSN 1521-3889 3, 4
- [Ångström 1901] ÅNGSTRÖM, Knut: Ueber die Abhängigkeit der Absorption der Gase, besonders der Kohlensäure, von der Dichte. In: *Annalen Der Physik [Drude, P. and Wien, W. and Planck, M. and Deutsche Physikalische Gesellschaft (1899-1945) and Grüneisen, E.A.]* 309, Vierte Folge, Band 4 (1901), S. 163 – 173. – URL <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k15316k/f804.image.langDE> 4
- [Rubens und Aschkinass 1898] RUBENS, H. ; ASCHKINASS, E.: In: *Wied. Ann.* 64 (1898), 598 S 36
- [Rubens und Trowbridge 1897] RUBENS, H. ; TROWBRIDGE, J.: In: *Wied. Ann. Annalen der Physik* 60 (1897), 724 S 36
- [Trabert 1894] TRABERT, W.: Absorption und diffuse Reflexion in der Atmosphäre. In: *Meteorologische Zeitschrift* (1894), S. 297 – 299, 236 – 238. – URL <https://archive.org/stream/meteorologische02gesegoog#page/n296/mode/2up>. – Bd. II 5
- [Tyndall 1872] TYNDALL, J.: In: *Contributions to mol. physics* (1872), 1 S 32, 33
- [Tyndall 1865] TYNDALL, Johnl ; ED 2nd (Hrsg.): *Heat considered as a mode of motion [Wärme betrachtet als eine Art der Bewegung]*. London : Longman, 1865. – 405 S 4

- [Very 1891] VERY: The Distribution of the Moon's Heat [Die Verteilung der Mondwärme].  
In: *Utrecht Society of Arts and Sc. The Hague* (1891) 11
- [Vetenskaps-Akademiens 1889a] VETENSKAPS-AKADEMIENS, Svenska: *Bihang till [Nachtrag zu]*. Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar Bd. xv. Afd. 1, Nr. 9, 1889  
9, 19
- [Vetenskaps-Akademiens 1889b] VETENSKAPS-AKADEMIENS, Svenska: *Öfversigt af kongl. Vet.-Akad. Förhandl.* Öfversigt af kongl. Vet.-Akad. Förhandl. Nr. 9, 1889 9
- [Winkelmann 1895] WINKELMANN, Adolph A.: *Handbuch der Physik.* (1895). – Leipzig,  
J. A. Barth 5
- [WMO 1980] WMO: *Interview With Dr. Anders K. Ångström [Interview mit Dr. Anders K. Ångström]*. 1980. – URL [http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin\\_en/interviews/angstrom\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin_en/interviews/angstrom_en.html) 4
- [Zenker 1888] ZENKER, W.: *Die Vertheilung der Wärme auf der Erdoberfläche: nach seiner von der Académie des Sciences zu Paris gekrönten Preisschrift.* Verlag von Julius Springer, 1888. – URL <http://books.google.de/books?id=aMsxAAAAMAAJ> 16