

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

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

Svante Arrhenius

Rohübersetzung, Kommentierung und Bearbeitung
Dipl.-Physiker Jochen Ebel

5. Februar 2020

Inhaltsverzeichnis

0	Vorangestelltes vom Übersetzer	2
0.1	Anmerkung Edward S. Holden	2
0.2	Bemerkungen der Kopieranstalt	2
0.3	Kopfdaten 1896	3
0.4	Kopfdaten 1901	3
0.5	Bemerkungen	3
1	Einleitung: Die Beobachtungen Langley's zur atmosphärischen Absorption	5
2	Die Gesamtaufnahme von Atmosphären unterschiedlicher Zusammensetzung	13
3	Thermischen Gleichgewicht auf der Oberfläche und in der Atmosphäre der Erde	16
4	Berechnung der Temperaturänderung	23

5 Geologische Folgen	26
6 Ergänzung	32
7 1901: Über die Wärmeabsorption durch Kohlensäure	34
8 Verzeichnisse	44
Abbildungsverzeichnis	44
Tabellenverzeichnis	44
Literaturverzeichniss	45

0 Vorangestelltes vom Übersetzer

0.1 Anmerkung Edward S. Holden

Die folgende sehr kurze und unangemessene Ankündigung eines wichtigen Papiers, das im Dezember 1895 an die Königlich-Schwedische Akademie der Wissenschaften geschickt und in der Philosophischen Zeitschrift, Band XLI, Seiten 237-276, abgedruckt wurde, wird hier hauptsächlich deshalb gegeben, um die Aufmerksamkeit auf eine völlig neue und einfache Erklärung der verzweifelten Fragen bezüglich der Erdtemperatur in vergangenen Zeiten und der Ursache der Eiszeit zu lenken. Es ist unmöglich, an dieser Stelle mehr als die kürzeste Zusammenfassung zu geben - E. S. H (Arrhenius [1897])

0.2 Bemerkungen der Kopieranstalt

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

Svante Arrhenius

Philosophische Zeitschrift und Wissenschaftsjournal

Serie 5, Band 41, April 1896, Seiten 237 - 276.

Diese Fotokopie wurde von Robert A. Rohde für Global Warming Art (<http://www.globalwarmingart.com>) aus originalem Druckmaterial erstellt, das jetzt öffentlich zugänglich ist.

Arrhenius' Beitrag ist der erste, der den Beitrag von Kohlendioxid zum Treibhauseffekt quantifiziert (Abschnitt 1 auf Seite 5 - Abschnitt 4 auf Seite 23) und darüber spekuliert, ob Schwankungen der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid zu langfristigen Schwankungen des Klimas beigetragen haben (Abschnitt 5 auf Seite 26). In diesem Papier bezeichnet Arrhenius Kohlendioxid in Übereinstimmung mit der Konvention zur Zeit seiner Entstehung als "Kohlensäure".

Entgegen einigen Missverständnissen schlägt Arrhenius in diesem Papier nicht ausdrücklich vor, dass die Verbrennung fossiler Brennstoffe eine globale Erwärmung verursachen wird, obwohl ihm klar ist, dass fossile Brennstoffe eine potenziell bedeutende Quelle von Kohlendioxid sind (Seite 28), und er schlägt dieses Ergebnis in späteren Arbeiten ausdrücklich vor.

0.3 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]

oder <http://empslocal.ex.ac.uk/people/staff/gv219/classics.d/Arrhenius96.pdf>

0.4 Kopfdaten 1901

Über die Wärmeabsorption durch Kohlensäure

von Svante Arrhenius.

(Bearbeitung einer der schwedischen 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 34ff) entstand.

0.5 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 29):

...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 5 und 13) 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 - infolgedessen 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 - obwohl er das etwa schreibt (»parallel«: siehe Seite 39). Diese findet man möglicherweise das erste Mal (?) bei Schwarzschild [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 18)] 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.
- Dementsprechend erkannte er auch nicht einen Temperaturgradienten durch die laufende Absorption und Emission der Strahlung.
- Eine Trennung in absorbierende und emittierende Schicht (die sogar heute noch 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.
- Es verwundert etwas, daß Arrhenius nichts dazu schreibt, wo die absorbierte Energie geblieben ist.

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

Das von [Arrhenius, 1896] geschriebene Paper wurde von [Ångström, 1900b] kritisiert und diese Kritik wird von einigen Kreisen als Beleg für angebliche Fehler von [Arrhenius, 1896] verwendet. Grund dafür dürfte sein, daß Arrhenius (möglicherweise als erster) gefordert hat, die Verbrennung von Kohle einzuschränken (Seite 29). Das Paper von [Ångström, 1900b] war für [Arrhenius, 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 diese [Ångström, 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 [Arrhenius, 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. Insbesondere hat [Tyndall, 1865, Seite 405] auf 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 ist die Frage, die lange die Aufmerksamkeit der Physiker angezogen hat: Ist die Durchschnittstemperatur der Erde in keiner Weise durch die Anwesenheit von wärmeabsorbierenden Gasen in der Atmosphäre beeinflusst? [Fourier, 1824] nahm an, dass die Atmosphäre wie das Glas eines Treibhauses wirkt, denn sie ermöglicht es, dass die Lichtstrahlen der Sonne durchgehen, aber die dunklen Strahlen (**Infrarot**) aus dem Boden zurück hält. 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 wie jetzt vorhanden wäre, würde wahrscheinlich zu -200°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 besitzt, hat eine »mittlere effektive Temperatur« von etwa 45°C . [Langley, 1890b, S.193]

Die Luft speichert die Wärme (hell (**Sonne**) oder dunkel (**Infrarot**)) auf zwei verschiedene Arten. Zum einen erleidet die Wärme eine selektive Diffusion auf ihrem Durchgang durch die Luft, auf der anderen Seite absorbieren einige der atmosphärischen Gase erhebliche Wärmemengen. **Wo bleibt die absorbierte Wärmemenge?** Diese beiden Vorgänge sind sehr unterschiedlich. Die selektive Diffusion ist für die UV-Strahlen zusätzlich gewöhnlich groß, und nimmt kontinuierlich ab mit steigender Wellenlänge des Lichts, so dass sie unempfindlich ist für die Strahlen, die den Hauptteil der Strahlung von einem Körper von der mittleren Temperatur der Erde bilden (siehe Kasten auf Seite 6).

Die selektive Absorption der Atmosphäre ist, nach den Untersuchungen von Tyndall, Lecher und Pernter, Röntgen, Heine, Langley, Angstrom, Paschen und anderen z. B. [Winkelmann, 1895], von der ganz anderen Art. Es wird nicht durch die Hauptmasse der Luft ausgeübt, 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, deren beide Seiten schnell abnehmen, begrenzt vgl. z. B. [Trabert, 1894, p. 238]. Der Einfluss dieser Absorption ist vergleichsweise klein in der Wärme von der Sonne, muss aber von großer Bedeutung bei der Übertragung der Strahlen von der Erde sein. 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 die wichtigere Rolle spielt. Die Untersuchungen von Paschen zeigen, dass diese beiden Gase sehr effektiv sind, so dass wohl manchmal die eine, manchmal die andere, die größere Wirkung je nach den Umständen haben kann.

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie stark die Strahlung der Erde (oder jedes anderen Körpers mit einer Temperatur von $+15^{\circ}\text{C}$) durch Mengen von Wasserdampf oder Kohlensäure in den Anteilen, in denen diese Gase in unserer Atmosphäre vorhanden sind, absorbiert wird, sollte man streng genommen Versuche zur Absorption von Wärme aus einem Körper bei 15° mittels geeigneter Mengen beider Gase durchführen. Aber solche Experimente sind noch nicht gemacht worden, und da sie sehr teure Apparaturen über

[Langley, 1884, p. 151] Ich habe versucht, eine Formel für den Wert der Absorption aufgrund der selektiven Reflexion, die durch Langley Untersuchungen bestimmt wurden, unter den verschiedenen Formeln zu berechnen, am besten stimmt die folgende mit den experimentellen Ergebnissen überein:

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

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

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

a stellt die austretende Stärke eines Strahls der Wellenlänge λ (ausgedrückt in μm) dar, 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:

λ	$a^{1/(7.6)}$ (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 ultraviolette Strahlen wird die Absorption im Einklang mit den Tatsachen extrem groß.

Wie man an den wahrscheinlichen Fehlern sehen kann, die ich für die am wenigsten übereinstimmenden Werte und auch für einen Wert (1.50μ), bei dem der wahrscheinliche Fehler extrem klein ist, nebeneinander gestellt habe, sind die Unterschiede gerade in der Größenordnung, die man bei einer exakt passenden Formel erwarten könnte. Die Kurven für die Formel und für die experimentellen Werte schneiden sich 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 diejenigen Teile des Spektrums abschätzen, die in der Wärme von Mond und Erde vorherrschen (Brechungswinkel [des Steinsalzprismus als Wellenlängenselektion](#) = $38 - 36^\circ$, $\hat{=}$ $\lambda = 10,4 - 24.4 \mu$). Wir stellen fest, dass die Absorption aus dieser Ursache zwischen 0,5 und 1% für die Luftmasse 1 variiert. Dieser unsinnige Sachverhalt, der durch die experimentellen Fehler vollständig abgedeckt ist, habe ich in den folgenden Berechnungen vernachlässigt.

Bild 1: [Kasten mit Messungen](#)

das mir zur Verfügung stehende Maß hinaus erfordern würden, war ich nicht in der Lage, sie durchzuführen. Glücklicherweise gibt es andere Forschungen von Langley in seiner Arbeit über »Die Temperatur des Mondes«, mit deren Hilfe es nicht unmöglich erscheint, die Aufnahme von Wärme durch Wasserdampf und durch Kohlensäure genau die Bedingungen zu bestimmen, die in unserer Atmosphäre auftreten. Er hat die Strahlung des Vollmondes (wenn der Mond nicht voll war, wurde die notwendige Korrektur relativ zu diesem Punkt vorgenommen) in verschiedenen Höhen und Jahreszeiten gemessen. Diese Strahlung wurde darüber hinaus in einem Spektrum verteilt, so dass wir in seinen Memoiren die Zahlen für die Strahlungswärme von der Mond finden für 21 verschiedene Gruppen von Strahlen, die durch den Brechungswinkel eines Steinsalzprismas mit einem brechenden Winkel von 60° definiert sind. Die Gruppen liegen zwischen den Winkeln 40° und 35° , und jede Gruppe wird von ihren Nachbarn durch einen Abstand von 15 Minuten getrennt. Nun ist die Temperatur

des Mondes fast gleich der der Erde, und die Mondstrahlen sind, wenn sie zu den Messinstrumenten gelangen, durch Schichten von Kohlensäure und Wasserdampf unterschiedlicher Dicke, je nach Höhe des Mondes und der Luftfeuchtigkeit, hindurchgegangen. Wären diese Beobachtungen also völlig vergleichbar, würden drei von ihnen für die Berechnung des Absorptionskoeffizienten relativ zu Wasserdampf und Kohlensäure für jede der 21 verschiedenen Strahlengruppen ausreichen. Aber wie eine Inspektion der 24 verschiedenen Beobachtungsreihen leicht zeigen wird, ist dies sehr wohl der Fall. Die Strahlungsintensität für jede Strahlengruppe sollte immer mit zunehmender Menge des durchflossenen Wasserdampfes oder der Kohlensäure abnehmen. Nun ist die Menge der Kohlensäure proportional zum Weg des Strahls durch die Atmosphäre, d.h. zu der in Langleys Zahlen als »Luftmasse« bezeichneten Menge. Als Einheit für die Kohlensäure nehmen wir daher die Luftmasse = 1, d.h. die Menge an Kohlensäure, die von einem vertikalen Strahl in der Luft durchquert wird. Die Menge des durchströmten Wasserdampfes ist teils proportional zur »Luftmasse«, teils zur Feuchtigkeit, ausgedrückt in Gramm Wasser pro Kubikmeter. Als Einheit für den Wasserdampf habe ich die Menge an Wasserdampf genommen, die von einem vertikalen Strahl durchquert wird, wenn die Luft an der Erdoberfläche 10 Gramm pro Kubikmeter enthält¹⁾. Wenn wir die 24 Beobachtungsreihen tabellarisch auflisten, die Langley in der zitierten Arbeit in Bezug auf die Mengen an Kohlensäure und Wasserdampf veröffentlicht hat, stellen wir sofort fest, dass seine Zahlen sehr unregelmäßig verlaufen, so dass sehr viele Ausnahmen von der Regel gefunden werden, dass die übertragene Wärme kontinuierlich abnehmen sollte, wenn diese beiden Mengen zunehmen. Und es scheint, als ob in seiner Serie periodische Veränderungen mit der Beobachtungszeit aufgetreten sind. Von welchem Umstand diese Veränderungen mit der Zeit abhängen, kann man nur vage Vermutungen anstellen: Wahrscheinlich hat sich die Klarheit des Himmels innerhalb eines langen Beobachtungszeitraums verändert, obwohl dies für das Auge nicht erkennbar war. Um diese unregelmäßige Variation zu eliminieren, habe ich die Beobachtungen in vier Gruppen eingeteilt, für die die mittleren Mengen an Kohlensäure (K) und Wasserdampf (W) betragen: 1,21 und 0,36; 2,21 und 0,86; 1,33 und 1,18 bzw. 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 sich der 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 verschiedenen 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 sehr regelmäßig waren, 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	mittlerer Wert	Reduktionsfaktor
1885. Feb. 21 - Juni 24	4850	1.3
1885. Juli 29 - 1886 Feb. 16	6344	1.00
1886. Sept. 13 - Sept. 18	2748	2.31
1886. Okt. 11 - Nov. 8	5535	1.15
1887. Jan. 8 - Feb. 9	3725	1.70

1) Diese Einheit entspricht nahezu der mittleren Luftfeuchtigkeit (siehe Tabelle 6 auf Seite 24).

Um die Zahlen von Langley zur Vergleichbarkeit untereinander zu verbessern, habe ich die oben tabellarisch aufgeführten Reduktionsfaktoren auf die Beobachtungen in den jeweiligen Perioden angewendet. Ich habe mich davon überzeugt, dass durch diese Arbeitsweise kein systematischer Fehler in die folgenden Berechnungen eingeführt wird.

Nachdem dies geschehen war, ordnete ich die Zahlen von Langley in Gruppen nach den Werten von K und W in der folgenden Tabelle 1 neu an. (Für weitere Einzelheiten siehe meine ursprüngliche Arbeit). Die Werte in der Tabelle können natürlich heute genauer bestimmt werden - sind aber nicht so interessant, da der Absorptionsfaktor (= Emissionsfaktor) im Labor gemessen werden kann. Vor allen Dingen werden Absorption und Emission in Tabelle 1 gemeinsam gemessen und die notwendige Trennung ist 1896 noch nicht erkannt (Strahlungstransportgleichung - siehe Schwarzschild [1906]).

Tabelle 1: Strahlung (i) des Vollmondes für verschiedene Werte von K und W

Die Winkel im Kopf sind die Wellenlängenselektion, ausgedrückt durch den Brechungswinkel des Steinsalzprismas - siehe Umrechnung Seite 12 unten und ff

	40°	39°45'	39°30'	39°15'	39°	38°45'	38°30'	38°15'	38°	37°45'	37°30'
K	1.16	1.12	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16	1.13	1.16
W	0.32	0.269	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32	0.271	0.32
i obs.	28.7	26.6	27.0	26.4	24.8	24.8	12.6	20.1	43.8	65.9	74.4
i calc	27.0	34.5	29.0	25.7	24.4	23.5	12.5	19.4	40.8	58.0	68.8
G	79	27	75	56	69	53	35	43	121	140	206
K	1.28	1.27	1.29	1.29	1.29	1.29	1.27	1.26	1.29	1.27	1.27
W	0.81	1.07	0.86	1.04	0.86	1.04	0.90	0.96	0.86	1.07	1.00
i obs.	22.9	31.2	26.7	21.3	18.2	11.0	5.8	3.7	14.0	32.0	52.3
i calc	23.1	27.9	25.4	21.2	21.8	12.5	8.6	12.8	26.1	42.1	52.7
G	76	135	109	73	74	38	24	13	57	139	261
K	1.46	1.40	1.39	1.49	1.49	1.49	1.50	1.49	1.50	1.49	1.50
W	0.75	0.823	0.78	0.87	0.89	0.89	0.82	0.89	0.82	0.87	0.84
i obs.	11.9	28.2	23.0	18.9	18.0	9.2	9.9	14.4	24.6	34.8	46.6
i calc	23.6	29.4	25.4	20.9	18.6	12.7	7.8	10.8	24.4	43.2	55.2
G	28	28	25	38	37	17	33	28	81	70	151
K	1.48	1.52	1.48	1.51	1.48	1.51	1.48	1.51	1.48	1.52	1.48
W	1.80	2.03	1.78	1.64	1.78	1.95	1.80	1.95	1.80	2.03	1.67
i obs.	25.2	27.6	24.6	18.3	27.6	4.8	3.7	3.6	17.6	45.5	43.9
i calc	16.9	21.4	20.2	17.9	18.5	5.9	4.7	6.6	12.0	28.2	40.2
G	30	22	51	31	37	5	4	3	21	37	119
K	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.27	2.26	2.27
W	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.06	1.08	1.06
i obs.	21.3	23.4	20.8	16.4	11.1	8.2	4.5	3.5	17.3	36.1	47.1
i calc	21.2	25.9	21.3	16.6	10.1	7.7	4.5	5.1	14.7	33.9	48.3
G	44	49	43	34	23	17	9	7	37	75	112
K	2.05	1.92	1.92	1.93	1.92	1.92	1.92	2.45	2.37	1.92	2.05
W	1.93	2.30	2.24	2.16	2.24	2.30	2.24	2.25	2.20	2.30	1.93
i obs.	13.4	12.8	14.8	15.1	10.3	6.6	3.4	3.4	7.9	20.8	31.5
i calc	16.2	19.4	17.3	14.5	13.0	3.8	2.9	2.6	6.1	23.4	35.1
G	55	29	35	47	25	15	8	10	26	47	129

Fortsetzung Tabelle 1 nächste Seite

	37°15'	37°	36°45'	36°30'	36°15'	36°	35°45'	35°30'	35°15'	35°
K	1.16	1.16	1.18	1.18	1.27	1.16	1.27	1.27	1.27	1.16
W	0.32	0.32	0.34	0.34	0.48	0.32	0.48	0.48	0.48	0.32
i obs.	68.6	59	56.2	48.3	43.4	40.7	39.0	32.6	31.5	19.7
i calc	73.7	57.1	50.9	46.0	34.9	36.4	31.3	27.7	27.3	19.3
G	190	163	118	102	28	112	25	21	20	54
K	1.27	1.27	1.31	1.32	1.32	1.28	1.33	1.33	1.33	1.25
W	1.00	1.00	1.05	1.00	1.00	0.81	0.51	0.51	1.07	0.60
i obs.	58.9	50.3	47.9	41.2	31.7	29.7	25.7	18.8	27.5	16.6
i calc	53.0	51.2	47.1	39.2	34.2	31.1	30.3	26.8	21.3	17.2
G	294	251	205	140	108	98	16	12	39	22
K	1.49	1.48	1.48	1.48	1.41	1.45	1.41	1.41	1.41	1.41
W	0.87	0.85	0.85	0.85	0.97	0.89	0.97	0.98	0.98	0.98
i obs.	43.1	36.4	35.4	31.2	28.3	24.9	16.6	15.4	10.3	9.2
i calc	55.2	47.1	42.5	36.3	33.0	29.3	27.3	22.3	22.0	14.7
G	87	149	146	127	54	78	32	29	19	17
K	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
W	1.66	1.58	1.66	1.66	1.83	1.66	1.83	1.58	1.83	1.66
i obs.	47.5	48.7	45.8	34.5	35.0	27.5	28.7	21.4	17.4	15.4
i calc	38.2	43.4	42.5	33.0	32.0	23.6	23.4	17.8	15.4	11.6
G	136	176	131	99	82	79	67	81	41	43
K	2.26	2.12	1.91	1.90	1.91	2.09	1.91	1.90	1.90	2.12
W	1.08	1.15	1.10	1.11	1.10	1.18	1.10	1.11	1.11	1.15
i obs.	44.6	32.0	27.8	24.7	26.6	24.5	19.0	16.0	13.9	10.1
i calc	47.1	33.5	32.8	27.4	26.8	23.6	21.3	17.5	20.4	12.2
G	93	98	66	58	63	72	45	37	32	31
K	1.92	2.05	2.45	2.37	2.45	2.37	1.97	1.97	1.97	1.97
W	2.30	1.93	2.25	2.20	2.25	2.20	2.33	2.33	2.33	2.33
i obs.	24.7	33.2	26.7	19.4	22.6	18.8	16.4	10.9	12.1	7.9
i calc	27.1	31.8	23.7	18.4	21.4	16.8	17.4	11.5	12.2	8.4
G	56	137	77	63	65	61	32	22	24	16

Ende Tabelle 1 auf der vorherigen Seite

In dieser Tabelle wird der Brechungswinkel [des Steinsalzprismas \(als Wellenlänge-
 tion - siehe Umrechnung Seite 12 unten und ff\)](#) als Kopftitel genommen. Nach *K* und *W*
 stehen [im Rest der Zeile](#) die [relativen](#) Mengen an Kohlensäure und Wasserdampf, die der
 Strahl in den oben genannten Einheiten durchquert hat. Darunter kommt nach $i_{beobachtet(obs)}$
 die von Langley auf dem Bolometer beobachtete (reduzierte) Strahlungsintensität, und da-
 nach der entsprechende Wert $i_{berechnet(calc)}$ berechnet mit Hilfe der Absorptionskoeffizienten
[\(ohne Berücksichtigung der Eigenemission\)](#) aus Tabelle 2 auf der nächsten Seite. *G* ist das
 »Gewicht«, das dem entsprechenden $i_{beobachtet(obs)}$ in der Berechnung nach der Methode der
 kleinsten Quadrate gegeben wird.

Die auf diese Weise berechneten Absorptionskoeffizienten gebe ich in Tabelle 2 auf der
 nächsten Seite an. (Die gewöhnlichen Logarithmen der Absorptionskoeffizienten sind tabel-
 larisch dargestellt).

Winkelabweichung = Wellenlängenselektion	log x	log y	A
40°0'	{ +0.0286 0.0000 }	{ -0.1506 -0.1455 }	27.2
39°45'	-0.0296	-0.1105	34.5
39°30'	-0.0559	-0.0952	29.6
39°15'	-0.1070	-0.0862	26.4
39°0'	-0.3412	-0.0068	27.5
36°45'	{ -0.2465 -0.2466 }	{ +0.0008 -0.0000 }	56.4
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°30'	-0.2571	-0.0507	51.4
36°15'	{ -0.1708 -0.1652 }	{ +0.0065 -0.0000 }	39,1
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

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

Die Bedeutung dieser Zahlen kann an einem Beispiel verdeutlicht werden. Wenn ein Wärmestrahle, der dem Brechungswinkel [des Steinsalzprismas \(= Wellenlängenselektion\)](#) 39°45' entspricht, die Einheit der Kohlensäure durchquert, nimmt seine Intensität im Verhältnis 1 : 0,934 (log = -0,02916) ab, der entsprechende Wert für die Einheit Wasserdampf beträgt 1 : 0,775 (log = -0,1105). Diese Zahlen gelten natürlich nur für die Umstände, unter denen die Beobachtungen gemacht wurden, nämlich, dass der Strahl eine Menge Kohlensäure $K = 1,1$ und eine Menge Wasserdampf $W = 0,3$ durchquert haben sollte bevor die Absorption in den nächsten Mengen Kohlensäure und Wasserdampf beobachtet wurde, und diese zweiten Mengen sollten $K = 1,1$ und $W = 1,8$ nicht überschreiten, denn die Erfassungen erstrecken sich nicht über ein größeres Intervall als zwischen $K = 1,1$ und $K = 2,2$ und $W = 0,3$ und $W = 2,1$ (die Zahlen für K und W sind etwas unterschiedlich für Strahlen unterschiedlicher Art). Unterhalb von A ist der relative Wert der Strahlungsintensität für eine bestimmte Strahlungsart im Mondlicht geschrieben, nachdem sie $K = 1$ und $W = 0,3$ durchquert hat. In einigen Fällen liefert die Berechnung positive Werte für log x oder log y. Da dies eine physikalische Absurdität ist (es würde bedeuten, dass der Strahl durch seinen Durchgang durch das absorbierende Gas verstärkt werden sollte), habe ich in diesen Fällen,

die von Beobachtungsfehlern abhängen müssen, die Absorption des entsprechenden Gases gleich Null angenommen und mit diesem Wert den Absorptionskoeffizienten des anderen Gases und danach auch A berechnet. **Es muß sich nicht um eine Absurdität handeln, da die Größen aus der Emission des warmen Atmosphärgases resultieren können.**

Wie aus einer Überprüfung der Tabelle 1 auf Seite 8 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 ist die Übereinstimmung ist nicht so gut, wie man sich wünschen kann. Diese Fälle sind meist durch ein geringes »Gewicht« G gekennzeichnet, d.h. das Beobachtungsmaterial ist in diesen Fällen relativ unzureichend. Diese Fälle treten vor allem auch bei solchen Strahlen auf, die stark vom Wasserdampf absorbiert werden. Dieser Effekt ist wahrscheinlich auf den Umstand zurückzuführen, dass der Wasserdampf in der Atmosphäre, von dem angenommen wird, dass er proportional zur Feuchtigkeit an der Erdoberfläche variiert hat, nicht immer die angenommene ideale und gleichmäßige Verteilung mit der Höhe hatte. Aus Beobachtungen während der Ballonfahrten wissen wir auch, dass die Verteilung des Wasserdampfes sehr unregelmäßig sein kann und von der mittleren idealen Verteilung abweicht. Es ist auch ein ausgeprägtes Merkmal, dass in einigen Gruppen, z. B. der dritten, fast alle beobachteten Zahlen geringer sind als die berechneten, während in anderen Gruppen, z. B. der vierten, das Gegenteil der Fall ist. Dieser Umstand zeigt, dass die Aufteilung des statistischen Materials etwas zu weit geht; und eine Kombination dieser beiden Gruppen hätte eine enge Übereinstimmung zwischen den berechneten und den beobachteten Zahlen gezeigt. Da eine solche Kombination jedoch keinen Einfluss auf die Richtigkeit der berechneten Absorptionskoeffizienten hat, habe ich auf eine Neuordnung der Zahlen in größeren Gruppen mit anschließender Neuberechnung verzichtet.

Ein Umstand, der sehr stark für die Meinung spricht, dass der in Tabelle 2 auf der vorherigen Seite. angegebene Absorptionskoeffizient keine großen Fehler enthalten kann, ist, dass so wenige Logarithmen einen positiven Wert haben. Wären die Beobachtungen von Langley völlig unzureichend gewesen, hätte man erwartet, fast ebenso viele positive wie negative Logarithmen zu finden. Nun gibt es nur noch drei solcher Fälle, nämlich für Kohlensäure im Winkel von 40° und für Wasserdampf im Winkel $36^\circ 45'$ und $36^\circ 15'$. Die Beobachtungen für 40° sind nicht sehr genau, weil sie für Langley wenig interessant waren, da die entsprechenden Strahlen nicht zum Mondspektrum gehören, sondern nur zum diffusen Sonnenlicht vom Mond. Da diese Strahlen auch in die Wärme eines Körpers von 15°C nicht in nennenswertem Maße auftreten. Diese Nichtübereinstimmung ist für unser Problem ohne Bedeutung. Die beiden positiven Werte für die zu Wasserdampf gehörenden Logarithmen sind ganz unbedeutend. Sie entsprechen nur Fehlern von 0,2 und 1.5 Prozent für die Absorption der Größe $W = 1$ und fallen ganz in den Bereich der experimentellen Fehler.

Es ist sicher nicht uninteressant, diese Absorptionskoeffizienten mit den Ergebnissen der direkten Beobachtungen von Paschen²⁾ und Ångström³⁾ zu vergleichen. Bei diesem Vergleich ist zu berücksichtigen, dass eine genaue Übereinstimmung nicht zu erwarten ist, denn die Bedeutung der oben genannten Koeffizienten ist eher unähnlich der Bedeutung der Koeffizienten, die aus den Beobachtungen dieser beiden Autoren berechnet werden oder berechnet werden können. Die obigen Koeffizienten geben die Absorptionsrate eines Strahls an, der Mengen an Kohlensäure ($K = 1,1$) und Wasserdampf ($W = 0,3$) durchquert hat; während die Koeffizienten von Paschen und Ångström die Absorption darstellen, die ein Strahl beim Durchgang durch die ersten Schichten dieser Gase erfährt. In einigen Fällen können wir ei-

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]

ne große Differenz zwischen diesen beiden Größen erwarten, so dass er nur eine allgemeine Zustimmung suchen kann.

Nach Paschens Zahlen scheint es bei Wellenlängen zwischen $0.9\ \mu$ und $1.2\ \mu$ (entsprechend dem Brechungswinkel [des Steinsalzprismas von \$40^\circ\$](#)) keine sinnvolle Emission oder Absorption durch den Wasserdampf zu geben. Andererseits zeigt die Darstellung des Sonnenspektrums durch Langley sehr viele starke Absorptionsstreifen in diesem Intervall, unter denen solche gekennzeichnet ρ , σ , τ und ϕ sind die prominentesten [Langley, 1889, S. 323 und 326], [Langley, 1884, Bildtafel 12], [Lamansky, 1872, p. 200]⁴⁾, 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 eine sehr geringe Intensität für diese kurzwellige Strahlung hatte, berücksichtigt werden. Aber es kann zugestanden werden, dass der Absorptionskoeffizient für Wasserdampf in diesem Winkel in Tabelle 2 auf Seite 10 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 10). Bei Wellenlängen von größerem Wert finden wir nach Paschen starke Absorptionsbanden bei $\lambda = 1.83\ \mu\text{m}$. (Ω 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° , 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 Emissionspektrums von Wasserdampf in der Paschen-Kurve können wir die Details nicht genau verfolgen, aber es scheint, als ob die Emission von Wasser auch erheblich sein würde $\lambda = 8.7\ \mu\text{m}$ ($39^\circ 15'$), 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° , in Übereinstimmung mit den Zahlen von Paschen und Angström⁵⁾ nimmt die Absorption von Kohlensäure zunächst einen sinnvollen Wert bei $\lambda = 1.5\ \mu\text{m}$ an, danach steigt sie schnell auf ein Maximum bei $\lambda = 2.6\ \mu\text{m}$ an und erreicht ein neues außerordentlich starkes Maximum bei $\lambda = 4.6\ \mu\text{m}$ (Langley's Y). Nach Angström ist die Absorption von Kohlensäure bei $\lambda = 0.9\ \mu\text{m}$ gleich Null und bei $\lambda = 1.69\ \mu\text{m}$ sehr schwach, danach steigt sie kontinuierlich bis $\lambda = 4.6\ \mu\text{m}$ an und nimmt wieder bis $\lambda = 6.0\ \mu\text{m}$ ab. Dieses Verhalten stimmt völlig mit den Werten von $\log x$ in Tabelle 2 auf Seite 10 überein. Vom Wert Null bei 40° ($\lambda = 1.0\ \mu\text{m}$) erreicht es bei $39^\circ 45'$ ($\lambda = 1.4\ \mu\text{m}$) einen sinnvollen Wert ($-0,0296$), und danach immer größere Werte ($-0,0559$ bei $39^\circ 30'$, und $-0,1070$ bei $39^\circ 15'$) bis zu einem beträchtlichen Maximum ($-0,3412$ bei 39° , $\lambda = 4.3\ \mu\text{m}$). Nach diesem Punkt nimmt die Absorption ab (bei $38^\circ 15' = \lambda = 5.6\ \mu\text{m}$ $\log x = -0,2035$). Nach Tabelle 2 auf Seite 10 hat die Absorption von Kohlensäure

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 von Paschen sehr schwach ist, so dass das Zusammentreffen mit seinem Bild zufällig sein könnte.

bei $38^{\circ}30'$ und $38^{\circ}15'$ ($\lambda = 7.1 \mu\text{m}$ und $\lambda = 8.7 \mu\text{m}$) sehr große Werte ($\log x = -0.2438$ und -0.3730), während sie nach Ångström unempfindlich sein sollte. Dieses Verhalten kann damit zusammenhängen, dass das Ångström-Spektrum für die größeren Wellenlängen eine sehr kleine Intensität hatte. In der Paschen-Kurve gibt es Spuren einer kontinuierlichen Absorption durch die Kohlensäure in diesem gesamten Bereich 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 Wasserdampfspuren $\lambda = 8.4 \mu\text{m}$ und $\lambda = 8.9 \mu\text{m}$). In Folge der starken Absorption von Wasserdampf ist 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 8). 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 8. K und W nehmen im Allgemeinen gemeinsam zu, weil beide proportional zur »Luftmasse« sind. Es sei darauf hingewiesen, dass dies auch bei den unten behandelten Problemen auftritt, so dass der Fehler aus dieser Ursache nicht so groß ist, wie man auf den ersten Blick denken könnte.

Für Winkel größer als 38° ($\lambda > 5.9 \mu\text{m}$) 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° und $36^{\circ}40'$. Nach meinen Berechnungen der Wasserdampf seine größte Absorptionskraft im Spektrum von 38° bis 35° 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 von sehr wenigen Messungen abhängen) und die Kohlensäure zwischen $36^{\circ}30'$ und $37^{\circ}0'$. Dies scheint darauf hinzuweisen, dass die ersten beiden Absorptionsbänder auf die Wirkung von Wasserdampf zurückzuführen sind, die letzten beiden auf die Wirkung von Kohlensäure. Hervorzuheben ist, dass Langley die größte Sorgfalt bei der Messung der Intensität der Mondstrahlung in Winkeln zwischen 36° und 38° , wo diese Strahlung ihre maximale Intensität besitzt, angewendet hat. 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 Erde⁶⁾, die dort bei weitem die größte Intensität (etwa zwei Drittel, vergl. Seite 14) in diesem Teil des Spektrums hat.

2 Die Gesamtaufnahme von Atmosphären unterschiedlicher Zusammensetzung

Da wir nun in der beschriebenen Weise die Werte der Absorptionskoeffizienten für alle Arten von Strahlen festgestellt haben, wird es mit Hilfe der Bilder Langley's [Langley, 1890b, Bildtafel 5] möglich sein, den Bruchteil der Wärme von einem Körper bei 15°C (wie der Erde) zu berechnen, der von einer Atmosphäre absorbiert wird, die bestimmte Mengen Kohlensäure und Wasserdampf enthält. 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 besten Bestimmungen von Langley gemacht wurden und in der Mitte die wichtigsten Teile der Strahlung liegen (37°). 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°C ([Planck's Formel existierte 1896 noch nicht](#)), und die Berechnung der Intensität für alle anderen Brechungswinkel. Diese Intensitäten werden unten nn den Zeilen mit M gegeben. Danach müssen wir die Werte

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

für $K = 1$ und $W = 0,3$ zu berechnen. Für den Winkel von 37° wissen wir, dass diese Intensität 62,9 ist. Für alle anderen Winkel könnten wir die Werte A aus Tabelle 2 auf Seite 10 nehmen, wenn der Mond ein Körper von 15°C wäre. Aber eine Berechnung der Bilder von [Very, 1891] zeigt, daß der Vollmond eine höhere Temperatur hat, etwa 100°C . Nun ist die spektrale Verteilung fast, aber nicht ganz die gleiche für die Wärme von einem Körper von 15°C und daß von einem mit 100°C . Mit Hilfe der Kurven von 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°	$39^\circ45'$	$39^\circ30'$	$39^\circ15'$	39°	$38^\circ45'$	$38^\circ30'$	$38^\circ15'$	38°	$37^\circ45'$	$37^\circ30'$		
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	$37^\circ15'$	37°	$36^\circ45'$	$36^\circ30'$	$36^\circ15'$	36°	$35^\circ45'$	$35^\circ30'$	$35^\circ15'$	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 sind, die mittels der Absorptionskoeffizienten von Tabelle 2 auf Seite 10 gefunden werden und die Werte von N. Auf diese Weise wird die Summe der M ein wenig größer (6.8 Prozent) als sie nach der obigen Berechnung wäre. Diese Nichtübereinstimmung resultiert wahrscheinlich aus dem Umstand, dass das Spektrum in den Beobachtungen nicht ganz rein war.

Der Wert 37,2 ist möglicherweise mit einem relativ großen Fehler als Folge der Unsicherheit der M -Werte behaftet. In den folgenden Berechnungen spielt nicht so sehr der Wert 37,2 die wichtige Rolle, sondern vielmehr die Verringerung des Wertes durch die Erhöhung der Mengen K und W . Zum Vergleich sei erwähnt, dass Langley den Wert von Kachel geschätzt hat. Die Wärmemenge des Mondes, die bei seinen Forschungen die Atmosphäre (bei mittlerer Zusammensetzung) durchdrang, um bis zu 38 Prozent überschätzt hat [Langley, 1890b, p. 197]. Da die mittlere Atmosphäre in Langleys Beobachtungen mit höheren Werten von K und W als $K = 1$ und $W = 0,3$ korrespondierten, wird man sehen, dass er der Atmosphäre eine größere Transparenz für undurchsichtige Strahlen zuschrieb, als dies bisher der Fall war. Nach Langleys Schätzung sollten wir für $K = 1$ und $W = 0,3$ einen Wert von etwa 44 statt 37,2 erwarten. Wie groß der Einfluss dieses Unterschieds sein kann, wird im Folgenden untersucht.

Die Absorptionskoeffizienten sind in Tabelle 2 auf Seite 10 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 (*in der Übersetzung stattdessen mit einem »*« gekennzeichnet*) werden direkt in der beschriebenen Art und Weise gefunden, die in der gewöhnlichen Schriftart angegeben Werte werden mit Hilfe von Pouillet's Exponentialformel interpoliert. Die Tabelle 3 auf der nächsten Seite 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.

Ganz anders als diese dunkle Wärme ist das Verhalten der Wärme von der Sonne auf,

\rightarrow W (H ₂ O) \downarrow K (CO ₂)	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
1	37.2*	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	3.3*
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*

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

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 I₁ zweite Beobachtung der gleichen Menge.

	Morgen				Mittag				Abend			
	D.	W.	I.	I ₁ .	D.	W.	I.	I ₁ .	D.	W.	I.	I ₁ .
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
	21.1	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		{22.5	0.182	1.904	1.873	{24.5	0.205	1.701	1.641
	23.5	0.153	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 das Absorptionsvermögen des Wasserdampfes einen Einfluss hat, denn die Werte für eine höhere Luftfeuchtigkeit sind (mit einer unbedeutenden Ausnahme) geringer als die für eine geringere Luftfeuchtigkeit. Aber für die Beobachtungen von Lone Pine scheint das Gegenteil der Fall zu sein. Es ist nicht zulässig, anzunehmen, dass die Strahlung durch den Durchgang durch Wasserdampf verstärkt werden kann ([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 muss durch einen sekundären Umstand verursacht werden. Wahrscheinlich ist die Luft im Allgemeinen reiner, wenn sie mehr Wasserdampf enthält, als wenn sie weniger enthält. Die selektive Diffusion nimmt in Folge dieser größeren Reinheit ab, und dieser Nebeneffekt gleicht die unbedeutende Absorption, die die Strahlung durch die Erhöhung des Wasserdampfes erleidet, mehr als aus. Es ist bemerkenswert, dass Elster und Geitel¹⁵ bewiesen haben, dass unsichtbare aktinische Strahlen mit sehr hoher Brechbarkeit die Luft viel leichter durchqueren, wenn sie feucht ist, als wenn sie trocken ist. Die Zahlen von Langley zeigen inzwischen, dass der Einfluss von Wasserdampf auf die Sonneneinstrahlung unempfindlich ist, sobald er einen Wert von etwa

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° 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 aufgefordert 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 ₂ O) \downarrow K (CO ₂)	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	

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.

Bei unseren Schlussfolgerungen gehen wir davon aus, dass die Wärme, die aus dem Erdinneren an die Erdoberfläche geleitet wird, völlig vernachlässigt werden kann. Tritt eine Temperaturänderung der Erdoberfläche ein, so ändern natürlich auch die oberen Schichten

der Erdkruste ihre Temperatur; dieser spätere Prozess vergeht jedoch in sehr kurzer Zeit im Vergleich zu der Zeit, die für die Änderung der Oberflächentemperatur notwendig ist, so dass die Wärme, die aus dem Inneren an die Oberfläche transportiert wird (positiv im Winter, negativ im Sommer), zu jedem Zeitpunkt unabhängig von den kleinen säkularen Schwankungen der Oberflächentemperatur bleiben muss und im Laufe eines Jahres sehr nahe bei Null liegen muss.

Ebenso nehmen wir an, dass die Wärme, die infolge atmosphärischer oder ozeanischer Strömungen, horizontal oder vertikal, an einen bestimmten Ort auf der Erdoberfläche oder in der Atmosphäre geleitet wird, im Laufe der betrachteten Zeit gleich bleibt, und wir nehmen auch an, dass der bewölkte Teil des Himmels unverändert bleibt. Es ist nur die Veränderung der Temperatur mit der Transparenz der Luft, die wir untersuchen werden.

Alle Autoren sind sich einig in der Auffassung, dass ein Gleichgewicht herrscht, in der Temperatur der Erde und ihrer Atmosphäre. Die Atmosphäre muss also so viel Wärme in den Weltraum abstrahlen, wie sie teils durch die Absorption der Sonnenstrahlen, teils durch die Strahlung von der heißeren Erdoberfläche und durch aufsteigende Luftströme, die durch den Kontakt mit der Kugel erwärmt werden, gewinnt. Andererseits verliert die Erde durch die Strahlung in den Weltraum und in die Atmosphäre ebenso viel Wärme, wie sie durch die Absorption der Sonnenstrahlen gewinnt. Wenn wir einen bestimmten Ort in der Atmosphäre oder auf dem Boden betrachten, müssen wir auch die Wärmemengen berücksichtigen, die durch ozeanische oder atmosphärische Strömungen an diesen Ort transportiert werden. Für die Strahlung nehmen wir an, dass das heute allgemein akzeptierte Stefan-Boltzmann-Strahlungsgesetz gilt, oder anders gesagt, dass die Wärmemenge (W), die von einem Körper der Albedo $(1 - \nu)$ und der Absoluttemperatur T zu einem anderen Körper des Absorptionskoeffizienten β und der absoluten Temperatur θ abgestrahlt wird

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

wobei γ die sogenannte Strahlungskonstante (1.21×10^{-12} pro Sekunde und cm^2 - heutiger Wert $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$) ist. Ein leerer Raum kann als ein Raum mit der absoluten Temperatur 0 [Langley, 1884, p. 122], [Langley, 1890b, p. 206] betrachtet werden.

Vorläufig betrachten wir die Luft als eine gleichmäßige Hülle der Temperatur θ und des Absorptionskoeffizienten α für Sonnenwärme, so dass, wenn A Kalorien von der Sonne in einer Säule von 1 cm^2 Querschnitt ankommen, αA von der Atmosphäre absorbiert werden und $(1 - \alpha)A$ die Erdoberfläche erreicht, in den A Kalorien ist also nicht der Teil der Sonnenwärme enthalten, der durch selektive Reflexion in der Atmosphäre in Richtung Raum hinausgeworfen wird. Ferner bezeichnen wir mit β den Absorptionskoeffizienten der Luft für die von der Erdoberfläche abgestrahlte Wärme; β ist auch der Emissionskoeffizient der Luft für Strahlung mit niedriger Temperatur - streng 15° ; aber da die spektrale Verteilung der Wärme mit der Temperatur eher langsam variiert, kann β auch bei der Temperatur der Luft als Emissionskoeffizient betrachtet werden. Bezeichnen wir die Albedo der Erdkruste mit $(1 - \nu)$, und die Wärmemenge, die an dem betrachteten Punkt in die Luft und an die Erdoberfläche abgegeben werden mit M bzw. N . Als Zeiteinheit können wir jede beliebige Periode nehmen: die beste Wahl in der folgenden Berechnung ist vielleicht, sich dafür drei Monate Zeit zu nehmen. Als Einheit der Oberfläche können wir 1 cm^2 nehmen, und für die Wärme in der Luft, die in einer Säule von 1 cm^2 Querschnitt und der Höhe der Atmosphäre enthalten ist. Die vom Boden reflektierte Wärme wird von der Luft nicht merklich absorbiert (siehe Seite 15), da sie zuvor große Mengen Wasserdampf und Kohlensäure durchquert hat, aber ein Teil davon kann durch diffuse Reflexion an den Boden zurückgegeben werden⁸⁾.

8) Heutiges Wissen als Gegenstrahlung.

Lassen Sie diesen Teil nicht er in der Albedo $(1 - \nu)$ enthalten, γ , A , ν , M , N und α sind als Konstanten zu betrachteten β als unabhängige und θ und T als abhängige Variable.

Dann finden wir für die Luftsäule

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

Der erste Term dieser Gleichung stellt die von der Luft (Emissionskoeffizient β , Temperatur θ) in den Raum (Temperatur 0) abgestrahlte Wärme dar. Die zweite Term gibt die vom Boden abgestrahlte Wärme (1 cm^2 , Temperatur T , Albedo $1 - \nu$) an die Luft ab; die dritte und vierte Term geben die Menge der von der Luft absorbierten Sonnenstrahlung und die Wärmemenge an, die durch Leitung (Luftströmungen) von anderen Teilen der Luft oder vom Boden erhalten wird: Auf die gleiche 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 betrachtet 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 θ , für das kein bedeutendes Interesse besteht, so das 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 einen merklichen Fehler, ν gleich 1 zugrunde legen, mit Ausnahme von Schneefeldern, für die wir ν gleich 0.5 zugrunde legen. Für die wasser-bedeckten Teile der Erde habe ich einen Wert ν 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 Schnee, die Zöllner festgestellt hat, auf 0,78, d.h. $\nu = 0,22$. Für Altschnee ist die Albedo viel weniger oder ν viel größer, daher haben wir 0,5 als Mittelwert angenommen.

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

β	$\nu = 0.925$	$\nu = 0.5$	$\nu = 0.22$
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 β zu verändern, sondern auch ν . In diesem Fall müssen wir uns daran erinnern, daß α ist sehr klein ist im Vergleich zu β . Für α wir werden den Wert 0,40 nach [Langley, 1890b,

S.189)⁹⁾ 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 α ein wenig größer, so dass diese Umstände können einander kompensieren. Für β 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 16) entspricht. In diesem Fall finden wir für die Beziehung zwischen T (unbedeckt) und T_1 (Schnee bedeckte Oberfläche)

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

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°C ¹⁰⁾ 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. Der Haupteffekt, den wir untersuchen, ist der direkte Einfluss einer Änderung von β bezüglich der Temperatur T der Erdoberfläche. Wenn wir von einem Wert $T = 273$ K und $\beta = 0,70$ ausgehen, finden wir die Änderung (t) der Temperatur, die durch die Variation von β zu den folgenden Werten verursacht wird

$\beta = 0,60$	$t = -5^\circ\text{C}$
0.80	+ 5.6
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 angegeben 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°S und 60°N finden wir ein Thema Wert 0,525, d.h. 52.5 Prozent des Himmel ist wolkenbedeckt. Der Wärmeeffekt dieser Wolken kann auf folgen-

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°C auf 4.0°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°C sinken.

de 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 strahlen sich gegenseitig an und die Wolke wird auch in die obere Luft und in den Weltraum abstrahlen, und die Strahlung zwischen Wolke und Erde kann aufgrund des geringen Temperaturunterschieds als proportional zu diesem Unterschied angesehen werden. Andere Wärmeaustausche 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 Nachbarteilen 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 24). 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 18). Da nun im Durchschnitt fast $K = 1$ und $W = 1$ ist, wird in diesem Fall β etwa 0,79 sein und die Wirkung wird auf den bewölkten Teil nur 0.25 des Effekts auf den Teil mit $\nu = 1$ haben. Wenn eine ähnliche Korrektur für den Ozean (= 0,925) unter der Annahme eingeführt wird, dass der unbewölkte Teil der Erde aus ebenso viel Wasser wie aus festem Boden besteht (was ungefähr stimmt, denn die Wolken werden bevorzugt über dem Ozean gespeichert), finden wir einen mittleren Effekt von, in runden Zahlen, 60% von dem, was existieren würde, wenn die gesamte Erdoberfläche $\nu = 1$ hätte. Die schneebedeckten Teile werden nicht berücksichtigt, da zum einen diese Teile meist bis etwa 65% bewölkt sind, zum anderen machen sie nur einen sehr kleinen Teil der Erde aus (im Jahresdurchschnitt nur etwa 4%), so dass die Korrektur für diesen Fall in der letzten Zahl 60 nicht mehr als 0,5% betragen würde. Und weiter kommen in den Grenzen zwischen Schneefeldern und freiem Boden Sekundäreffekte ins Spiel (siehe Seite 19), die die mildernde Wirkung des Schnees kompensieren und vielleicht sogar übertreffen.

Im Vorstehenden haben wir angenommen, dass die Luft als eine Hülle mit vollkommen gleichmäßiger Temperatur zu betrachten ist. Das ist natürlich nicht wahr, und wir gehen jetzt zu einer Prüfung der wahrscheinlichen Korrekturen über, die zur Beseitigung der durch diese Ungenauigkeit verursachten Fehler eingeführt werden müssen. Es ist offensichtlich, dass die Teile der Luft, die in den Weltraum strahlen, hauptsächlich die äußeren sind und dass andererseits die Luftschichten, die den größten Teil der Erdstrahlung absorbieren, nicht sehr hoch liegen. Daraus resultieren sowohl die Strahlung aus der Luft in den Weltraum ($\beta\gamma\theta^4$ in Gleichung (1 auf Seite 18)) als auch die Strahlung der Erde in die Luft ($\beta\gamma\nu(T^4 - \theta^4)$ in Gleichung (2 auf Seite 18)), sind stark reduziert, und die Luft hat eine viel größere Wirkung als in diesen Gleichungen und damit auch in Gleichung (3 auf Seite 18) angenommen wird, da sie vor dem Wärmeverlust an den Raum schützt. Wenn wir den Temperaturunterschied zwischen den beiden Luftschichten kennen würden, die in den Weltraum strahlen und die Strahlung der Erde absorbieren, wäre es einfach, die notwendige Korrektur in die Formeln Gleichung (1 auf Seite 18), Gleichung (2 auf Seite 18) und Gleichung (3 auf Seite 18) einzuführen. Zu diesem Zweck habe ich die folgende Überlegung angestellt.

Da bei der mittleren Zusammensetzung der Atmosphäre ($K = 1$, $W = 1$) etwa 80% der Erdstrahlung in der Luft absorbiert werden, können wir als mittlere Temperatur der absor-

bierenden Schicht die Temperatur in der Höhe wählen, in der 40% der Wärme absorbiert werden. Da Emission und Absorption den gleichen quantitativen Gesetzen folgen, können wir als mittlere Temperatur der emittierenden Schicht die Temperatur in der Höhe wählen, in der die aus dem Weltraum in entgegengesetzter Richtung zur tatsächlichen Emission eintretende Strahlung bis zu 40% absorbiert wird.

Langley hat vier Messungen des Absorptionsvermögens von Wasserdampf für Strahlung aus einem 100 °C [Langley, 1890b, p. 186] heißen Leslie-Würfel durchgeführt. Diese ergeben nahezu den gleichen Absorptionskoeffizienten, wenn die Pouillet-Formel für die Berechnung verwendet wird. Aus diesen Zahlen errechnen wir, dass für die Absorption von 40% der Strahlung so viel Wasserdampf zwischen Heizkörper und Bolometer eingelagert werden müsste, dass er bei der Kondensation eine 3.05 Millimeter dicke Wasserschicht bildet. Wenn wir nun als Mittelwert für die ganze Erde $\nu = 1$ und $W = 1$ annehmen (siehe Tabelle 6 auf Seite 24), so finden wir, dass die senkrechten Strahlen von der Erde, wenn sie bei 100° wären, 305 Meter Luft durchqueren müssen, um 40% zu verlieren. Jetzt liegt die Erde nur noch bei 15 °C, aber das kann keinen großen Unterschied machen. Da die Strahlung in alle Richtungen ausstrahlt, müssen wir 305 durch 1,61 teilen und kommen auf diese Weise auf 209 Meter. Als Folge der Senkung der Wasserdampfmenge mit der Höhe [Hann, 1894] müssen wir eine leichte Korrektur vornehmen, so dass das Endergebnis 233 Meter beträgt. Natürlich ist diese Zahl ein Mittelwert, und höhere Werte gelten für kältere, niedrigere für wärmere Teile der Erde. In einem so geringen Abstand von der Erde sollten also 40% der Erdstrahlung gestoppt werden. Nun ist es nicht ganz richtig, mit der Formel von Pouillet zu rechnen (es ist ziemlich merkwürdig, dass die Zahlen von Langley so gut mit ihr übereinstimmen), was zwangsläufig zu niedrige Werte ergibt. Aber andererseits haben wir die Absorption durch die Kohlensäure in diesem Teil überhaupt nicht berücksichtigt, und dies kann den erwähnten Fehler ausgleichen. In den höchsten Schichten der Atmosphäre gibt es sehr wenig Wasserdampf, so dass wir mit Kohlensäure als Hauptabsorptionsmittel rechnen müssen. Aus einer Messung von Ångström [Vetenskaps-Akademiens, 1889a, Ångström, S. 11 und 18] erfahren wir, dass die Absorptionskoeffizienten von Wasserdampf und Kohlensäure in gleichen Mengen (gleiche Anzahl von Molekülen) im Verhältnis 81 : 62 liegen. Dieses Verhältnis gilt für den am wenigsten heißen Körper, den Ångström verwendet hat, und es besteht kein Zweifel, dass die Strahlung der Erde viel weniger brechbar ist. Aber in Ermangelung einer geeigneteren Bestimmung können wir diese für unseren Zweck verwenden; es ist wahrscheinlich, dass bei einem weniger heißen Heizkörper die Absorptionskraft der Kohlensäure etwas größer ausfallen würde als die des Wasserdampfes, denn die Absorptionsbanden von CO₂ sind insgesamt weniger brechbar als die von H₂O (siehe Seiten 11 - 13). Wenn man die Zahl 0.03 vol.-% für die Menge an Kohlensäure in der Atmosphäre verwendet, stellt man fest, dass Strahlen, die aus dem oberen Teil der Luft austreten, im Ausmaß von 40% aus einer Schicht abgeleitet werden, die 0.145 Teile der Atmosphäre ausmacht. Dies entspricht einer Höhe von etwa 15 000 Metern. Zu diesem Wert können wir die gleiche Bemerkung machen wie zu dem oben genannten Wert. In diesem Fall haben wir die Absorption durch die kleinen Wasserdampfmengen in der höheren Atmosphäre vernachlässigt. Die Temperaturdifferenz dieser beiden Schichten - die eine absorbierende, die andere strahlende - beträgt nach der Messung von Glaisher [Müller und Peters, 1894, p. 539] (mit ein wenig Extrapolation), etwa 42 °C.

Für die 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 gewählt, die auf einer durchschnittlichen Höhe von 1855 Metern liegen, mit einer maximalen Höhe von 3611 Metern und einem Minimum von 900 m¹¹⁾. 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 unsere Formeln Gleichung (1 auf Seite 18) bis Gleichung (3 auf Seite 18) einstellen wollen, haben wir in Gleichung (1 auf Seite 18) und Gleichung (2 auf Seite 18) θ als die mittlere Temperatur der strahlenden Schicht und $(\theta + 42)$, $(\theta + 30)$ oder $(\theta + 20)$ jeweils für die Durchschnittstemperatur der absorbierenden Schicht einzuführen. 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 18) 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 den Werten 1.88, 1.58 bzw. 1.37 für die drei Fälle¹²⁾ ist. Auf diese Weise finden wir die folgenden korrigierten Werte, die die Temperaturschwankung darstellen, wenn der feste Boden seine Temperatur um 1°C ändert, als Folge einer Änderung des β wie mit Hilfe der Gleichung (3 auf Seite 18) 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 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 18) berechnen können. Aus diesem Grunde habe ich die einfachere Formel verwendet.

Im Vorstehenden habe ich bemerkt, dass die Luft nach meiner Einschätzung weniger transparent für dunkle Wärme (Infrarot) ist als nach Langley's Schätzung und fast im Verhältnis

11) Nach den Messungen der Ekholm und Hagström [Vetenskaps-Akademiens, 1889a, Bd. xii, Afd. 1, No. 10, p. 11]

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

37.2:44. Wie groß der Einfluss dieser Differenz sein kann, lässt sich mit Hilfe von Gleichung (3 auf Seite 18) oder Gleichung (4 auf der vorherigen Seite) sehr leicht berechnen. Nach Langleys Einschätzung dürfte der Effekt fast 15% größer sein als nach meiner Einschätzung. Nun denke ich, dass meine Schätzung besser mit der großen Absorption übereinstimmt, die Langley für die Strahlung von irdischen Strahlungskörpern gefunden hat (siehe Seite 21), und ich habe es unter allen Umständen vorgezogen, den fraglichen Effekt etwas zu unterschätzen, als ihn überzubewerten.

4 Berechnung der Temperaturänderung, die sich infolge einer bestimmten Änderung der Kohlensäure in der Luft ergeben würde

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 15 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 16. Wir bestimmen zunächst die Faktor ρ , 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 β , die entspricht ρK und ρW . Nehmen wir nun an, dass die Kohlensäure eine andere Konzentration hätte. (z. B. $K_1 = 1.5$). Dann werden wir zunächst annehmen, dass W unverändert ist und suchen den neuen Wert von ρ , sagen wir ρ_1 , der unter dieser Voraussetzung gilt. Als nächstes haben wir β zu suchen, die $\rho_1 K_1$ ($1.5\rho_1$) entspricht und $\rho_1 W$. Aus Gleichung (3 auf Seite 18) können wir dann leicht die Veränderung von (t) berechnen (hier zu erhöhen) in der Temperatur, an einem gegebenen Ort, begleiten von der Variation des β von β auf β_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 β_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.

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 jeder Region berechnet, die sich um zwei Breitengraden, d.h. um 10° unterscheiden und zwei Meridianen, die sich um 20° unterscheiden, eingeschlossen ist (z. B. zwischen 0° und 10°N und 160° und 180°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 markierte diese in Karten der Welt und habe danach die Mittelwerte für jeden Bezirk geschätzt. Diese Größen habe ich für die vier Jahreszeiten tabellarisch angegeben: 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 der nächsten Seite).

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																

Tabelle 6: Mittlere Temperatur, relative und absolute Feuchtigkeit
Von den Bildern für Temperatur und relative Feuchtigkeit habe ich die absolute Feuchtigkeit in g/m^3 berechnet.

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	3.52	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	9.3
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	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	9.5	9.3
50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	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	9.17
40	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3	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	8.8	8.82
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.1	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	7.9	8.1
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.1	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	7.5	7.52
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	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	7.3	7.3
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.0	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	7.4	7.4	7.35
-10	-3.1	-3.1	-3.2	-3.1	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	7.6	7.62
-20	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	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	8.3	8.22
-30	-3.3	-3.3	-3.4	-3.4	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	8.8	8.8
-40	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	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	9.3	9.25
-50	-3.2	-3.3			3.8	6.0	6.1			7.9	8.0				9.4	9.5				

Tabelle 7: Änderung der Temperatur, verursacht durch eine Änderung der Kohlensäure

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 Änderung ist in Tabelle 7 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 $K = 0,67$ liegt die maximale Wirkung 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 ν 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 19), und dieser Nebeneffekt erzeugt wahrscheinlich, daß sich der maximale Effekt aus den unteren Breitengrad zur Nachbarschaft der Pole¹³⁾ 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 7 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°) 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 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 diese mühsamen Berechnungen sicherlich nicht angestellt, wenn nicht ein außerordentliches Interesse damit verbunden gewesen wäre. In der Physikalischen Gesellschaft von Stockholm gab es gelegentlich sehr lebhaft Diskussionen über die wahrscheinlichen Ursachen der Eiszeit; und diese Diskussionen haben meiner Meinung nach zu der Schlussfolgerung geführt, dass es noch keine zufriedenstellende Hypothese gibt, die erklären könnte, wie die klimatischen Bedingungen für eine Eiszeit in so kurzer Zeit wie die der vergangenen Eiszeit realisiert werden konnten. Bisher war man der Ansicht, dass die Erde im Laufe der Zeit ab-

13) Siehe Ergänzung, Seite 32.

gekühlt ist; und wenn man nicht wüsste, dass das Gegenteil der Fall war, würde man sicherlich behaupten, dass diese Abkühlung kontinuierlich weitergehen muss. Gespräche mit meinem Freund und Kollegen Professor Högbom sowie die oben erwähnten Diskussionen führten mich zu einer vorläufigen Einschätzung der wahrscheinlichen Auswirkungen einer Variation der atmosphärischen Kohlensäure auf die Temperatur der Erde. Da diese Abschätzung zu der Annahme führte, dass man auf diese Weise wahrscheinlich eine Erklärung für Temperaturschwankungen von 5°C - 10°C bekommt, habe ich die Berechnung genauer ausgearbeitet, und lege sie nun der Öffentlichkeit und den Kritikern vor.

Aus den geologischen Untersuchungen ist die Tatsache bekannt, dass es im Tertiär in den gemäßigten und arktischen Zonen eine Vegetation und eine Tierwelt gab, die durch eine viel höhere Temperatur als die heutige in den gleichen Regionen¹⁴⁾ bedingt gewesen sein muss. Die Temperatur in den arktischen Zonen scheint die gegenwärtige Temperatur um etwa 8 oder 9 Grad überschritten zu haben. Zu dieser freundlichen Zeit gelang die Eiszeit, die ein- oder mehrmals durch Zwischeneiszeiten mit einem Klima ab aus dem gleichen Charakter wie heute, manchmal sogar milder, unterbrochen wurde. Als die Eiszeit ihre größte Ausdehnung hatte, waren die Länder, die heute die höchste Zivilisation genießen, mit Eis bedeckt. Dies war der Fall in Irland, Großbritannien (mit Ausnahme eines kleinen Teils im Süden), Holland, Dänemark, Schweden und Norwegen, Russland (bis Kiew, Orel und Nijni Novgorod), Deutschland und Österreich (bis zum Harz, Erz-Gebirge, Dresden und Krakau). Zur gleichen Zeit bedeckte eine Eiskappe aus den Alpen die Schweiz, Teile Frankreichs, Bayerns südlich der Donau, Tirol, die Steiermark und andere österreichische Länder und stieg in den nördlichen Teil Italiens ab. Gleichzeitig war auch Nordamerika an der Westküste bis zum 47. Breitengrad, an der Ostküste bis zum 40. Breitengrad und im mittleren Teil bis zum 37. Breitengrad (Zusammenfluss von Mississippi und Ohio) mit Eis bedeckt. Auch in den verschiedensten Teilen der Welt haben wir Spuren einer großen Eiszeit gefunden, so im Kaukasus, in Kleinasien, in Syrien, im Himalaya, in Indien, in Thian Shan Altai, im Atlas, auf dem Berg Kenia und dem Kilimandscharo (beide sehr nahe am Äquator), in Südafrika, Australien, Neuseeland, Kerguelen, auf den Falklandinseln, in Patagonien und anderen Teilen Südamerikas. Die Geologen neigen im Allgemeinen zu der Annahme, dass diese Vergletscherungen auf der ganzen Erde gleichzeitig stattgefunden haben [Neumayr und Uhlig, 1887, S. 648], [Nathorst, 1894, Seite 992]; und diese natürlichste Ansicht wäre wahrscheinlich allgemein akzeptiert worden, wenn die Theorie von Croll, die ein freundliches Alter auf der Südhalbkugel zur gleichen Zeit wie eine Eiszeit auf der Nordhalbkugel und umgekehrt fordert, nicht die Meinung beeinflusst hätte. Durch Messungen der Verschiebung der Schneegrenze erhalten wir das Ergebnis, -und das ist für verschiedene Orte sehr übereinstimmend - dass die Temperatur, die die Zeitangabe enthält, um 4°C - 5°C niedriger als heute war. Die letzte Vergletscherung muss geologisch gesehen in eher jüngerer Zeit stattgefunden haben, so dass die Menschheit zu dieser Zeit sicherlich erschienen ist. Einige amerikanische Geologen sind der Meinung, dass seit dem Ende der Eiszeit nur etwa 7000 bis 10 000 Jahren vergangen sind, was aber höchstwahrscheinlich stark unterschätzt wird.

Man kann sich nun fragen: Wie stark muss die Kohlensäure nach unseren Zahlen variieren, damit die Temperatur die gleichen Werte wie in der Tertiär- bzw. Eiszeit erreichen sollte? Eine einfache Berechnung zeigt, dass die Temperatur in den arktischen Regionen um 8°C bis 9°C steigen würde, wenn die Kohlensäure auf das 2,5- oder 3-fache ihres heutigen Wertes ansteigt. Um die Temperatur der Eiszeit zwischen dem 40. und 50. Breitengrad zu erhalten, sollte die Kohlensäure in der Luft auf 0,62 - 0,55 ihres heutigen Wertes sinken (Temperaturabsenkung 4°C - 5°C). Die Forderung der Geologen, dass in den freundlichen Epochen das Klima einheitlicher sein sollte als heute, stimmt mit unserer Theorie sehr gut überein.

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

Die geographischen Jahres- und Tagestemperaturbereiche würden teilweise geglättet, wenn die Menge an Kohlensäure erhöht würde. Das Gegenteil wäre der Fall (zumindest bis zu einem Breitengrad von 50° vom Äquator), wenn die Kohlensäure in der Menge abnehmen würde. Aber in beiden Fällen neige ich zu der Annahme, dass die Nebenklage (siehe Seite 32) aufgrund des Rückschritts oder des Fortschritts der Schneebedeckung die wichtigste Rolle spielen würde. Die Theorie verlangt auch, dass grob gesagt die ganze Erde etwa die gleichen Temperaturschwankungen durchgemacht haben sollte, so dass demnach freundliche oder eiszeitliche Epochen auf der ganzen Erde gleichzeitig stattgefunden haben müssen. Wegen der größeren Wolkenbedeckung auf der Südhalbkugel müssen die Abweichungen etwas geringer gewesen sein (etwa 15 Prozent) als auf der Nordhalbkugel. Auch dort müssen die Meeresströmungen wie derzeit die Temperaturunterschiede in verschiedenen Breitengraden stärker als auf der Nordhalbkugel ausgeglichen haben. Dieser Effekt resultiert auch aus der größeren Wolkenbedeckung in den arktischen Zonen als in der Nähe des Äquators.

Es gibt nun eine wichtige Frage, die beantwortet werden sollte, nämlich: Ist es wahrscheinlich, dass in relativ kurzen geologischen Zeiten so große Schwankungen in der Menge der Kohlensäure, wie unsere Theorie erfordert, aufgetreten sind? Die Antwort auf diese Frage wird von Prof. Högbom gegeben. Da seine Memoiren zu dieser Frage den meisten Lesern dieser Seiten nicht zugänglich sein dürften, habe ich seine Äußerungen, die für unser Thema von größter Bedeutung sind, zusammengefasst und übersetzt [Högbom, 1894, Seite 169]:

»Obwohl es nicht möglich ist, genaue quantitative Ausdrücke für die Reaktionen in der Natur zu erhalten, durch die Kohlensäure freigesetzt oder verbraucht wird, gibt es dennoch einige Faktoren, von denen man eine annähernd wahre Schätzung erhalten kann und aus denen bestimmte Schlussfolgerungen gezogen werden können, die Licht auf die Frage werfen. Erstens scheint es wichtig zu sein, die Menge der Kohlensäure, die jetzt in der Luft vorhanden ist, mit den Mengen zu vergleichen, die umgewandelt werden. Wenn die erstere im Vergleich zu der letzteren unbedeutend ist, dann ist die Wahrscheinlichkeit für Abweichungen ganz anders als im umgekehrten Fall.

»Unter der Annahme, dass die mittlere Menge an Kohlensäure in der Luft 0.03 vol. Prozent, diese Zahl entspricht 0.045 Gewichtsprozent¹⁵⁾ oder 0.342 mm Hg Partialdruck oder 0.466 Gramm Kohlensäure pro cm² der Erdoberfläche. Zu Kohlenstoff reduziert, würde diese Menge eine Schicht von etwa 1 mm Dicke über der Erdoberfläche ergeben. Die Menge des Kohlenstoffs, die in der lebenden organischen Welt fixiert ist, kann sicher nicht mit derselben Genauigkeit geschätzt werden; es ist jedoch offensichtlich, dass die Zahlen, die diese Menge ausdrücken könnten, in derselben Größenordnung liegen müssten, so dass der Kohlenstoff in der Luft im Vergleich zu der in Organismen vorkommenden Menge an Kohlenstoff weder als sehr groß noch als sehr klein zu betrachten ist. Im Hinblick auf die große Geschwindigkeit, mit der die Umwandlung in der organischen Natur voranschreitet, ist die verfügbare Menge an Kohlensäure nicht so übermäßig groß, dass Änderungen, die durch klimatologische oder andere Gründe in der Geschwindigkeit und im Wert dieser Umwandlung verursacht werden, keine Verschiebungen des Gleichgewichts verursachen könnten.

»Die folgende Berechnung ist auch sehr lehrreich für die Wertschätzung der Beziehung zwischen der Menge der Kohlensäure in der Luft und den Mengen, die

15) Das Molekulargewicht der Luft ist etwa 29, das Molekulargewicht des CO₂ etwa 44. Daraus folgt $0.03 \cdot \frac{44}{29} = 0.045$.

umgewandelt werden. Weltweit erreicht die gegenwärtige Produktion von Kohle in runden Zahlen 500 Millionen Tonnen pro Jahr oder 1 Tonne pro km^2 von der Erdoberfläche. In Kohlensäure umgewandelt, entspräche diese Menge etwa einem Tausendstel Teil der Kohlensäure in der Atmosphäre. Es stellt eine Schicht aus Kalkstein von 0.003 mm Dicke über den ganzen Globus, oder 1.5 km^3 als Volumen. Diese Menge an Kohlensäure, die der Atmosphäre hauptsächlich von der modernen Industrie zugeführt wird, könnte diese Menge an Kohlensäure vollständig zur Bildung von Kalk (oder anderen Mineralkarbonaten) verbraucht werden durch Verwitterung oder Zersetzung der Silikate. Aus der Bestimmung der Mengen der gelösten Stoffe, vor allem Karbonate, die in einer Reihe von Flüssen in verschiedenen Ländern und Klimazonen fließt und der Menge an Wasser in diesen Flüssen aus ihren Entwässerungsflächen, wird im Vergleich mit dem Land-Oberfläche des Globus geschätzt, dass die Menge gelöster Karbonate, die das Meer im Laufe eines Jahres erreichen, höchstens ein Großteil der 3 km^3 ist. Weil es auch bewiesen ist, dass die Flüsse aus Entwässerungsflächen, aus denen Silikate in Karbonate verwandelt werden, sehr unbedeutend sind im Vergleich zu den Mengen, die aus Kalkstein Regionen fließen, lässt deshalb der Schluß zu (der auch aus anderen Gründen verstärkt wird), dass nur ein unbedeutenden Teil dieser 3 km^3 an Karbonaten direkt durch Zersetzung von Silikaten gebildet wird. Mit anderen Worten, es kann nur ein unwichtiger Teil dieser Menge an kohlensaurem Kalk aus dem Prozess der Verwitterung in einem Jahr gewonnen werden. Auch wenn der angegebene Wert wegen der ungenauen oder fehlerhaften Annahmen in dem Umfang von 50 Prozent oder mehr unsicher ist, ist er von sehr großem Interesse für den Vergleich, da er zeigt, dass die wichtigste aller Prozesse, durch die Kohlensäure sich aus der Atmosphäre entfernt in allen Zeiten, nämlich durch die chemische Verwitterung aus kieselsäurehaltigen Mineralien, von der gleichen Größenordnung wie ein Prozess mit gegenteiligen Effekt ist, der durch die industrielle Entwicklung unserer Zeit hervorgerufen 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 in 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 vergangenen 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 Wahr-

scheinlichkeit, 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. Diese ganze Argumentationsmethode über eine kontinuierliche Verminderung der Kohlensäure in der Luft verliert in der Tat jede Grundlage, obwohl im Laufe der Zeit enorme Mengen an Kohlensäure in Karbonaten gebunden wurden, wenn man die Prozesse genauer betrachtet, durch die der Atmosphäre zu allen Zeiten Kohlensäure zugeführt wurde. Daraus können wir wohl schließen, dass enorme Schwankungen aufgetreten sind, aber nicht, dass die Variation immer in die gleiche Richtung gegangen ist.

»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 weggelassen werden, so dass auch die Verfahren (3) und (7) für die Zirkulation von Materie in der organischen Welt geht so schnell, dass ihre Variationen nicht sinnvoll Einfluss haben können. Davon ausgenommen sind Perioden, in denen große Mengen von Organismen in Sedimentformationen eingelagert und damit dem Kreislauf entzogen wurden, oder in denen solche eingelagerten Produkte, wie jetzt, erneut in den Kreislauf eingebracht wurden. Die in (2) genannte Kohlensäurequelle ist völlig unberechenbar.

»So bleiben die Prozesse (1), (2) und (6) vor allem gegenseitig ausgleichend. Da die enormen Mengen an Kohlensäure (die einen Druck von vielen Atmosphären repräsentieren), die heute im Kalkstein der Erdkruste fixiert sind, nicht in der Luft, sondern nur als ein unbedeutender Bruchteil des Ganzen zu irgendeinem Zeitpunkt seit dem Auftreten organischen Lebens auf dem Globus gedacht werden können, und da daher der Verbrauch durch Verwitterung und Karbonatbildung durch kontinuierliche Zufuhr kompensiert worden sein muss, müssen wir die vulkanischen Ausdünstungen als die Hauptquelle von Kohlensäure für die

Atmosphäre betrachten.

»Aber diese Quelle ist nicht regelmäßig und gleichförmig geflossen. So wie einzelne Vulkane ihre Schwankungsphasen mit abwechselnder relativer Ruhe und intensiver Aktivität haben, so scheint der Globus als Ganzes in bestimmten geologischen Epochen eine heftigere und allgemeinere vulkanische Aktivität gezeigt zu haben, während andere Epochen durch eine vergleichbare Ruhe der vulkanischen Kräfte gekennzeichnet waren. Es scheint daher wahrscheinlich, dass die Menge der Kohlensäure in der Luft fast gleichzeitig variiert oder zumindest einen wichtigen Einfluss auf diesen Faktor gehabt hat.

»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 wurde während des Fortschreitens der vorstehenden Berechnungen, eine Abhandlung von dem bekannten italienischen Meteorologe L. De Marchi veröffentlicht, die mich von der Beantwortung der letzten Frage [de Marchi, 1895] befreit. Er untersuchte die verschiedenen bisher vorgeschlagenen Theorien im Detail - ob sie astronomisch, physisch oder geographisch sind, und von diesen gebe ich hier einen kurzen Überblick. Diese Theorien besagen, dass das Auftreten von freundlichen oder eiszeitlicher Epochen von der einen oder anderen Veränderung der folgenden Umstände abhängen sollte:

- (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 all diese Hypothesen abgelehnt werden müssen. Andererseits ist er der Meinung, dass eine Veränderung der Transparenz der Atmosphäre möglicherweise den gewünschten Effekt bringen würde. Seinen Berechnungen zufolge würde »eine Verringerung dieser Transparenz eine Senkung der Temperatur auf der gesamten Erde bewirken, die in den äquatorialen Regionen geringfügig ist und mit dem Breitengrad bis zum 70. Breitengrad zunimmt, näher an den Polen wieder etwas weniger. Außerdem würde diese Senkung in nicht-tropischen Regionen weniger auf den Kontinenten als auf dem Ozean stattfinden und die jährlichen Temperaturschwankungen verringern. Diese Verminderung der Transparenz der Luft ist vor allem auf eine größere Menge an Was-

serdampf in der Luft zurückzuführen, die nicht nur eine direkte Abkühlung, sondern auch reichlich Wasser- und Schneeniederschläge auf den Kontinenten verursachen würde. Der Ursprung dieser größeren Wasserdampfmenge ist nicht leicht zu erklären.« De Marchi ist zu ganz anderen Ergebnissen gekommen als ich, weil er die wichtige Eigenschaft der selektiven Absorption, die der Wasserdampf besitzt, nicht ausreichend berücksichtigt hat. Und weiter hat er vergessen, dass bei der Zufuhr von Wasserdampf in die Atmosphäre dieser kondensiert wird, bis der frühere Zustand erreicht ist, wenn keine andere Veränderung stattgefunden hat. Wie wir gesehen haben, beträgt die mittlere relative Luftfeuchtigkeit zwischen dem 40. und 60. Breitengrad auf der Nordhalbkugel 76 Prozent. Wenn also die mittlere Temperatur von ihrem tatsächlichen Wert um 5.3°C auf 4°C bis 5°C gesunken ist. d.h. auf + 1,3 oder + 0,3, und der Wasserdampf in der Luft bliebe, würde die relative Luftfeuchtigkeit auf 101 oder 105 Prozent steigen. Das ist natürlich unmöglich, denn die relative Luftfeuchtigkeit kann in der freien Luft nicht mehr als 100 Prozent betragen. Erst recht ist es unmöglich anzunehmen, dass die absolute Luftfeuchtigkeit in der Eiszeit größer gewesen sein könnte als jetzt.

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 von 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's 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 vertraue darauf, dass sich die auf den vorhergehenden Seiten vorgeschlagene Theorie nach dem Gesagten als nützlich erweisen wird, um einige Punkte der geologischen Klimatologie zu erklären, die sich bisher als am schwierigsten zu interpretieren erwiesen haben.

6 Ergänzung¹⁶⁾

Da die Bewölkung in verschiedenen Breitengraden und auch über dem Meer und über den Kontinenten sehr unterschiedlich ist, ist es offensichtlich, dass der Einfluss einer Variation der Kohlensäure der Luft etwas anders sein wird als der oben berechnete, bei dem angenommen wird, dass der Nebel über den gesamten Globus gleich ist. Ich hab daher die Bewölkung in verschiedenen Breitengraden mit Hilfe der von [Teisserenc de Bort, 1884] veröffentlichten Tabelle geschätzt und die Tabelle auf der nächsten Seite für den Wert der Temperaturschwankung berechnet, wenn die Kohlensäure auf das 0,67- oder 1,5-fache der gegenwärtigen Menge sinkt oder steigt. In der ersten Spalte ist der Breitengrad, in der zweiten und dritten Spalte die Bewölkung über dem Kontinent und über dem Ozean, in der vierten Spalte die Ausdehnung des Kontinents in Hundertsteln des gesamten Gebietes angegeben. Danach folgt in der fünften und sechsten Spalte der Reduktionsfaktor, mit dem die Zahlen in der Tabelle zu multiplizieren sind, um die tatsächliche Temperaturschwankung über Kontinente und Ozeane zu erhalten, und in der siebten Spalte der Mittelwert dieser beiden Korrekturfaktoren. In

16) Vergl. Tabelle 6 auf Seite 24

der achten und neunten Spalte sind die Temperaturschwankungen für $K = 0,67$ und in der zehnten und elften Spalte die entsprechenden Werte für $K = 1,5$ tabellarisch dargestellt.

Der Mittelwert des Reduktionsfaktors N , des Äquators beträgt für den Kontinent (bis 70°N) 1,098 und für den Ozean 0,927, im Mittel 0,996. Für die Südhalbkugel (bis 60°S) ergibt sich für den Kontinent 1,095, für den Ozean 0,871, im Mittel 0,907. Der Einfluss auf der Südhalbkugel wird daher etwa 9 Prozent geringer sein als auf der Nordhalbkugel. Als Folge der minimalen Bewölkung zwischen 20° und 30° Breite in beiden Hemisphären verschiebt sich die maximale Wirkung der Kohlensäurevariation in Richtung Äquator, so dass sie in den beiden Fällen $K = 0,67$ und $K = 1,5$ bei etwa 25° Breite fällt.

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, 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 °C) oder einem Hohlkörper aus berußtem Kupferblech, der in einen Kohlensäure-Ätherbrei (−80 °C) tauchte, sandte Strahlen aus, welche - im letzten Falle durch einen um 45° 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 waren 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 waren, vermittelt 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 waren 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 °C).

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 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 (ℓ) 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:

Es fällt auf, dass die unter A_2 stehenden Ziffern durchgängig größer sind als die unter A_1 stehenden, für ungefähr gleich große ℓ -Werte gültigen.

Die Auswertung von Ångström ist prinzipiell nicht zutreffend, da die Eigenstrahlung des Gases im eisernen Rohre nicht berücksichtigt ist. Deswegen nachfolgend eine Auswertung unter Berücksichtigung der Eigenstrahlung.

Gemessen wurde mit der Rubens'schen Thermosäule die Intensität a der Wärmestrahlung und daraus A von Ångström berechnet. Die Intensität der Wärmestrahlung setzt sich zusammen aus dem nicht absorbierten Teil der einfallenden Strahlung und der Eigenstrahlung des Rohrinhalts. Das Lambert-Beer'sches Gesetz lautet (I Intensitäten, κ Absorptionslänge der Anfangskonzentration, P zusammengefaßte Größe):

$$I(\ell) = I_0 e^{-\ell/\kappa} = I_0 e^{-\ell_0/\kappa * \ell/\ell_0} = I_0 P^{\ell/\ell_0}$$

Mit zunehmender Absorption (= Emission) nimmt die Eigenstrahlung (hier vom Rohr R) zu (und nähert sich dem Endwert) und nimmt infolge der Absorption die Strahlung der Quelle (Q) ab (und nähert sich 0). Dieser Zusammenhang führt zu folgendem Ansatz (Die Temperaturen von R und Q sind implizit in diesen Größen enthalten):

$$a(\ell)_{\text{berechnet}} = R * (1 - P^{\ell/\ell_0}) + Q * P^{\ell/\ell_0}$$

Diese Gleichung enthält 3 Konstanten (R , Q , P) bei 7 bzw. 5 Meßwerten. Damit können analog Ångström diese Konstanten (siehe Seite 6) »mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate« für $a(\ell) - a(\ell)_{\text{berechnet}}$ bestimmt werden (siehe Tabelle auf der nächsten Seite).

Obwohl nicht alle Werte der Versuchsanordnung angegeben sind (die aus heutiger Sicht sinnvoll wären), sind die Ergebnisse bemerkenswert, die aus dieser Gleichung folgen (einschließlich Eigenstrahlung). Bei Intensitäten (a) zwischen 0.7 und 0.9 sind die durchschnittlichen Abweichungen nur ca. 0.0026 (ca. $\cong 0,32\%$). Sogar bezüglich der Änderung der Intensität von 0,084 ($\cong 0.896 - 0.812$) bzw. 0,118 ($\cong 0.850 - 0.732$) sind die Unsicherheiten 3.1% ($\cong 0.002596/0.084$) bzw. 1.9% ($\cong 0.002226/0.118$) klein. Obwohl zwischen beiden Meßreihen (I. und II.) sicher umfangreiche Umbauarbeiten mit großem Zeitaufwand notwendig waren, sind die Ergebnisse trotzdem bemerkenswert nahe, z. B. der Absorptionsfaktor (0,79161387 zu 0,7423927 $\cong 6,6\%$) und die Eigenstrahlung des Rohres (0,77711525 zu 0,73047697 $\cong 6,4\%$). Die Quelle (Q) ist bei Reihe II. erheblich kühler als bei Reihe I (0,92644896 zu 0,89222819 $\cong 3,8\%$). Allerdings wäre entsprechend den Temperaturen ein größerer Unterschied zu erwarten - allerdings kann auch z. B. die Strahlung des Spiegels bei Reihe II. die Anfangsintensität beeinflussen. Die Eigenstrahlung des Rohrs ist auch nicht sehr unterschiedlich: 6.4% ($\cong 0,77711525/0,73047697$). Insgesamt läßt sich aber feststellen, daß mit großer Sorgfalt gearbeitet wurde, aber die Auswertung von Ångström auf Grund des damaligen Wissenstandes fehlerhaft war.

Da die Temperaturen im Meßaufbau von Ångström alle nahe beieinander lagen, war der Einfluß der Eigenstrahlung des Gases im Rohr nachträglich leicht abzuschätzen. Allerdings sind neuere Arbeiten (z. B. Hug [1998]) für atmosphärische Fragen absolut unbrauchbar, wenn diese die Eigenstrahlung vernachlässigen - z. B. wenn die Quelle so intensiv ist, daß bei einer solchen Meßanordnung die Eigenstrahlung unter dem Stichwort »Meßunsicherheit« vernachlässigt wird.

I. Lesliwürfel						
				Potenz	0.79161387	Absorption
				P	0.92644896	Quelle
					0.77711525	Rohr
$\ell(\text{cm})$	A_1	$1 - A/100 = a$			Abweichung	Quadrat
50	10,4	0,896	0,7916	-0.00067011	4,4905E-07	
140	14,8	0,852	0,5198	0.00273913	7,5028E-06	
155	15	0,850	0,4846	-0.00051628	2,6655E-07	
170	15,8	0,842	0,4518	0.00258411	6,6776E-06	
200	15,9	0,841	0,3927	-0.00524239	2,7483E-05	
275	18,1	0,819	0,2766	-0.00058176	3,3844E-07	
300	18,8	0,812	0,2461	0.00186363	3,4731E-06	
Σ					6,5986E-06	
Wurzel					0,00256878	
II. kühle Quelle						
					0.7423927	Absorption
				P	0.89222819	Quelle
					0.73047697	Rohr
$\ell(\text{cm})$	A_2	$1 - A/100 = a$			Abweichung	Quadrat
50	15	0,850	0,7424	0.00055989	3,1348E-07	
130	19,4	0,806	0,4609	-0.00096488	9,3098E-07	
220	22,3	0,777	0,2696	-0.00290804	8,4567E-06	
260	23,9	0,761	0,2125	0.00384406	1,4777E-05	
855	26,8	0,732	0,0061	-0.00053064	2,8158E-07	
Σ					4,9519E-06	
Wurzel					0,00222529	

Das die Eigenemission nicht berücksichtigt wurde hat Folgen:

- Da die Eigenemission nicht richtig berücksichtigt wird, existiert keine rechnerische Beziehung für die Längenabhängigkeit von Emission und Absorption. Deswegen Hilfe von Tabelle 3 auf Seite 15 oder eine empirische Formel auf Seite 37. Verblüffend ist also die Bemerkung auf Seite 39: »Absorption und Emission einander parallel gehen«.
- Allerdings existierte das Lambert-Beer'sches Gesetz schon, vielleicht beinhaltet die Interpolation nach Pouillet (siehe Seite 14) das Lambert-Beer'sche Gesetz.
- Sogar heute geistert die Sättigung (Vernachlässigung der Eigenstrahlung) noch in der Leugner-Literatur.
- Die Gasdichte hängt nicht nur vom Druck, sondern auch von der Temperatur ab.
- Die Strahlungstransportgleichung (Schuster-Schwarzschild-Gleichung) ist erst 1905/1906 aufgestellt worden (Schuster [1905], Schwarzschild [1906]).
- Die Konvektion spielt bei Ångström keine Rolle bzw. ist sogar verkehrt (siehe Seite 44), da oben der adiabatische Temperaturverlauf sein soll statt in der Troposphäre. Wie zieht sich nun Ångström aus dem nicht erkannten Fehler?

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 ℓ -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 ℓ -Werte (über 50 cm) kennen zu lernen. Aus Tyndall's Daten [Tyndall, 1872, p. 37] kann man Werte der Absorption für andere ℓ -Werte erhalten. Sie beziehen sich auf die Strahlung eines 100° 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 ℓ -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 ([auf der nächsten Seite](#)) 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.

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

		$\ell(\text{cm})$	$\log a$	$A_{ber.}$	$A_{beob.}$	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	± 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

des Gebietes $A_1 = 5$ bis $A_1 = 18,5$ oder $A_2 = 7$ bis $A_2 = 27$, ℓ -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 ℓ -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 ℓ_1 und ℓ_2 angeführt, welche den beiden oben erwähnten Wärmequellen entsprechen. Folgender Auszug möge genügen:

A	ℓ_1	ℓ_2	A	ℓ_1	ℓ_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 konstatieren 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° nach den Tabellen von v. Bezold etwa 0.8° für je 100 m ab. Für größere Höhen wird diese letztere Zahl unzweifelhaft die richtigere sein und zwar, wie v. Bezold hervorhebt, wahrscheinlicher Weise 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 wahrscheinlicher Weise 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°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 Messungen¹⁷⁾, 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 hauptsächlichlichen Sitz hat, außerordentlich geringe Wasserdampfmenge 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°C . entsprechen. Von diesen 5.3° entspringt ein Viertel der Wasserdampfabnahme und 4.0° der direkten Kohlensäurewirkung, während jetzt 3.2° berechnet wurden. Ebenso würde nach der alten Berechnung dem dreifachen Kohlensäuregehalt der jetzigen eine Temperatursteigerung von etwa 8.2°C entsprechen, wovon 7° auf die direkte Kohlensäurewirkung kämen, was dem Neuberechneten Wert (7.1°) 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 Schlüsse Hrn. 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 Hrn. Planck [1900] 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 er-

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

scheinen 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° $16,7$ 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 $355\ \text{cm}$ 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 Hrn. Ångström's Methode berechnete Maximalwert, der erst bei unendlich großer Dicke der absorbierenden Schicht (nach Hrn. Ångström) erreicht werden sollte.

Da eine so große Differenz nicht gern Versuchsfehlern zugeschrieben werden kann, erübrigt nur ein Schluss, dass die Berechnungsweise des Hrn. 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 Stickstoffsuroxyd 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 $500\ \text{m}$ - 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 Kohlensäureschicht, 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 $250\ \text{cm}$ 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° absorbiert, und dass, wenn der Druck auf 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 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° 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° erhöhen könnte. Da nun die Eiszeit eine um 4.5° 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 ℓ -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 Annahmen¹⁸⁾. 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 ℓ -Wert von etwa 10 000 cm entspricht (also die ℓ -Werte der Kohlensäure, mit welchen oben gerechnet wurde, um das 10 fache übertreffen). Warum die Kohlensäure sich

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

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 Temperaturänderung 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

1	Kasten mit Messungen	6
---	--	---

Tabellenverzeichnis

1	Vollmond	8
2	Absorptionskoeffizienten von Kohlensäure (x) und Wasserdampf (y)	10
3	Transparenz	15
4	Der mittlere Weg der Erdstrahlen	16
5	V. Korrekturfaktoren für die Strahlung.	22
6	Mittlere Temperatur, relative und absolute Feuchtigkeit	24
7	Änderung der Temperatur, verursacht durch eine Änderung der Kohlensäure	25

Literaturverzeichnis

Die Zahlen am Ende einer Referenz sind die Seitennummern, wo die Referenz verwendet wird.

- [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. 3
- [Arrhenius 1896] ARRHENIUS, Svante: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Earth [Über den Einfluß von Kohlensäure 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 3, 4, 34
- [Arrhenius 1897] ARRHENIUS, Svante: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Earth [Über den Einfluß von Kohlensäure 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
- [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 23
- [Fourier 1824] FOURIER, J.: Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires [Erinnerungen an die Erdtemperaturen und die Raumtemperaturen]. In: *Mémoires de l'Academie Royale des Sciences* 7 (1824), S. 569 – 604 5
- [Geikie 1894] GEIKIE, James: *The Great Ice Age and its relation to the Antiquity of Man [Die große Eiszeit und ihre Beziehung zum Alter des Menschen]*. 3. Auflage. London : E. Stanford, 1894 27
- [Gouy 1879] GOUY: In: *Ann. d. chim. et de phys. (5) 18* (1879), 23 S 42
- [Handlingar 1896] HANDLINGAR, Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens: *Bihang till [Nachtrag zu]*. Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar Bd. 22. Afd. 1, 1896 34, 43, 44
- [Hann 1894] HANN: In: *Meteorologischen Zeitschrift* XI (1894), S. 196 21
- [Hug 1998] HUG, H.: *Die Klimakatastrophe - ein spektroskopisches Artefakt. Chem. Rundschau* 4, S. 9. 1998 35
- [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 28

- [Lamansky 1872] LAMANSKY: In: *Pogg. Ann. cxlvi* (1872), S. 200 12
- [Langley 1890a] LANGLEY, S. P.: Memoirs of the nat. Ac. of Se. 4. 91 mem. (1890) 34
- [Langley 1894] LANGLEY, S. P.: In: *Rep. Brit. Ass. 64* (1894), 473 – 474 S 41, 42
- [Langley 1884] LANGLEY, Samuel P.: Researches on Solar Heat [Forschungen zur Solarwärme]. In: *Professionelle Papiere des Signal Service No. 15* (1884). – Washington 5, 6, 12, 15, 17
- [Langley 1889] LANGLEY, Samuel P.: In: *Annales de chimie et de physique ser. 6, t, XVII* (1889) 12, 15
- [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 5, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 21
- [Lexikon 2014] LEXIKON: *Pyrgeometer*. 2014. – URL <http://www.wissen.de/lexikon/pyrgeometer> 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 31, 32
- [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 21
- [Nathorst 1894] NATHORST, Alfred G.: *Jordens historia [Geschichte der Erde]*. Stockholm, 1894 27
- [Neumayr und Uhlig 1887] NEUMAYR, M. ; UHLIG, V.: *Erdgeschichte*. Bd. 2. Leipzig : Bibliographisches Institut, 1887 27
- [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 11
- [Paschen 1894a] PASCHEN, F.: Die genauen Wellenlängen der Banden des ultrarotheren 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 11
- [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 11
- [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 11

- [Planck 1900] PLANCK, M.: Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung. In: *Verh. Dtsch. Phys. Ges.* 2 No. 5/6 (1900), S. 519 – 525 41
- [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 5, 16
- [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 4
- [Ångström 1900a] ÅNGSTRÖM, K.: In: *Ann d. Phys.* 3 (1900), 720 S 41
- [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 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. Anne* 64 (1898), 598 S 40
- [Rubens und Trowbridge 1897] RUBENS, H. ; TROWBRIDGE, J.: In: *Wied. Ann. Annalen der Physik* 60 (1897), 724 S 40
- [Schuster 1905] SCHUSTER, Arthur: Radiation Through a Foggy Atmosphere. In: *Astrophysical Journal* 21 (1905), Jan, S. 1 36
- [Schwarzschild 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 4, 8, 36
- [Stefan 1879] STEFAN, J.: über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. In: *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften* 79 (1879), S. 391 – 428. – Faksimile auf <http://www.ing-buero-ebel.de/strahlung/Original/Stefan1879.pdf> 4
- [Teisserenc de Bort 1884] TEISSERENC DE BORT, Léon: 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) 19, 32
- [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 34, 37
- [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 5
- [Very 1891] VERY: The Distribution of the Moon's Heat [Die Verteilung der Mondwärme]. In: *Utrecht Society of Arts and Sc. The Hague* (1891) 14
- [Vetenskaps-Akademiens 1889a] VETENSKAPS-AKADEMIENS, Svenska: *Bihang till [Nachtrag zu]*. Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar Bd. xv. Afd. 1, Nr. 9, 1889 11, 21, 22
- [Vetenskaps-Akademiens 1889b] VETENSKAPS-AKADEMIENS, Svenska: *Öfversigt af kongl. Vet.-Akad. Förhandl. Öfversigt af kongl. Vet.-Akad. Förhandl.* Nr. 9, 1889 11
- [Winkelman 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 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> 18