

Kommentierter Neusatz von  
**Über die Bedeutung des Wasserdampfes  
und der Kohlensäure bei der Absorption  
der Erdatmosphäre**

Knut Ångström

Kommentierung und Bearbeitung  
Dipl.-Physiker Jochen Ebel

10. Februar 2014

## Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Vorangestelltes</b>	<b>2</b>
0.1	Kopfdaten . . . . .	2
0.2	Bemerkungen . . . . .	2
<b>1</b>	<b>Wasserdampf</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Kohlensäure</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Absorption der Erdstrahlung</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Absorption der Sonnenstrahlung</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Arrhenius</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>12</b>
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	12
	Tabellenverzeichnis . . . . .	12
	Literaturverzeichniss . . . . .	12

# 0 Vorangestelltes

## 0.1 Kopfdaten

Über die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre;

von Knut Ångström.

Kopie z. B. bei <http://www.realclimate.org/images/Angstrom.pdf> oder [http://zfbf.thulb.uni-jena.de/servlets/MCRFileNodeServlet/jportal\\_derivate\\_00149071/19003081208\\_ftp.pdf](http://zfbf.thulb.uni-jena.de/servlets/MCRFileNodeServlet/jportal_derivate_00149071/19003081208_ftp.pdf)

## 0.2 Bemerkungen

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

Hinweise auf Fehler oder anderes bitte an <mailto:JEbel@t-online.de>.

Ergänzungen unterscheiden sich vom Text Ångström's durch die [blaue Schriftfarbe](#).

Das Paper von [Ångström, 1900] wird von einigen Kreisen als Beleg für angebliche Fehler von [Arrhenius, 1897] verwendet - und dabei werden die weiteren Geschehnisse unberücksichtigt gelassen. Grund dafür dürfe sein, daß Arrhenius (möglicherweise als erster) gefordert hat, die Verbrennung von Kohle einzuschränken. Das Paper von [Ångström, 1900] 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. Möglicherweise war wiederum diese Richtigstellung durch [Arrhenius, 1901] 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 Wasserdampf

Die Bedeutung des Wasserdampfes für die Absorption der Sonnen- und der Erdstrahlung ist schon durch die Arbeiten von Tyndall wohl bekannt. Dagegen sind die Ansichten über die Größe und die Intensität dieser Absorption noch widersprechend. Auch betreffs der Kohlensäure sind die Meinungen in dieser Hinsicht sehr verschieden. Im Folgenden beabsichtige ich einige Beiträge zur Aufklärung dieser Frage zu geben.

# 2 Kohlensäure

Was die Kohlensäure betrifft, so wurde die Bedeutung dieses Gases für die atmosphärische Absorption zuerst von Lecher und Pernter, von Keeler und vom Verfasser hervorgehoben. Zufolge seiner Untersuchungen auf dem Altenberg behauptete [Lecher, 1881, p. 851], dass

die Sonnenstrahlung in günstigen Fällen noch beträchtliche Energiemengen, die in das Absorptionsgebiet der Kohlensäure fallen, enthalten kann. Die Bedeutung dieser Beobachtung ist zweifach: erstens, dass die Sonnenstrahlung, die unsere Erdatmosphäre erreicht, wirklich Strahlen von den bezüglichen Wellenlängen enthält, zweitens, dass ein beträchtlicher Teil dieser Strahlung in unserer Atmosphäre zurückgehalten wird. Der Verfasser [Ångström, 1890, p. 267 und 294] hat dies schon früher gezeigt, und wenn auch bei dieser Gelegenheit infolge mangelnder Kenntnis der wahrscheinlichen Verteilung der Energie in dem ultraroten Sonnenspektrum außerhalb der Atmosphäre die Größe dieser von der Kohlensäure zurückgehaltenen Strahlung von mir sehr überschätzt wurde, steht es doch immer fest, dass die Kohlensäureabsorption eine ganz beträchtliche sein muss, vorausgesetzt, dass die Sonnenstrahlung außerhalb der Atmosphäre die Kohlensäurestrahlung wirklich enthält<sup>1)</sup>.

In der letzten Zeit wurde jedoch von verschiedenen Seiten Zweifel an der Richtigkeit der Lecher'schen Beobachtungen erhoben.<sup>2)</sup> Demzufolge beschloss ich, die Versuche von Lecher zu erneuern, und eine vorzügliche Gelegenheit dazu bot sich während einer Reise nach Teneriffa 1896 zwecks Studiums der Sonnenstrahlung auf verschiedenen Höhen über dem Meere.<sup>3)</sup>



Diagr. 1:

Der von mir benutzte Apparat ist aus der Bild 1 ersichtlich. Zwei Glasröhren von ca. 40 cm Länge waren nebeneinander in einer Holzröhre befestigt. Diese war an einem Stativ angebracht und konnte durch zwei Mikrometerschrauben genau in der Richtung der Sonnenstrahlung eingestellt werden. Die Glasröhren waren durch schöne Platten von Flusspat luftdicht geschlossen, die eine war mit reiner Luft, die andere mit Kohlensäure gefüllt. Das eine Ende der Holzröhre war durch zwei bewegliche Schirme S mit doppelten Wänden geschlossen, in dem anderen Ende war ein Thermoelementenpaar T so befestigt, dass die Lötstellen sich in der Verlängerung der Glasröhrenaxe befanden. Besondere Sorgfalt war auf die Lötstellen des Thermoelementes verwendet, um dieselben einander so ähnlich wie möglich herzustellen.

Das Thermoelementenpaar war an einer Axe befestigt in der Weise, dass man durch Drehung derselben die Stellung der Lötstellen vor der Rohraxe wechseln konnte.

Zuerst wurde der Apparat geprüft, indem die beiden Röhren mit reiner Luft gefüllt wurden. Wenn die Thermoelemente sich in Verbindung mit einem Galvanometer von mässiger Empfindlichkeit befanden und nur die eine Lötstelle beleuchtet wurde, ergab sich eine Ablenkung von ca. 400 Skalenteilen. Wenn dagegen die beiden Lötstellen gleichzeitig beleuchtet

1) In der angeführten Arbeit kam ich auf Grund der Untersuchung von Lecher [Lecher, 1881] und der hier erwähnten Überschätzung der ausseratmosphärischen Sonnenenergie in dem Spektralbezirk um  $4\ \mu\text{m}$  herum zu dem Schlusse, dass die Solarkonstante wahrscheinlich den Wert  $4\ \text{g/Cal}\cdot\text{pro Min}\cdot\text{und cm}^2$  erreicht. Nach dem, was ich im Folgenden anführen will, kann ich diese Meinung nicht weiter aufrecht erhalten.

Umrechnung  $1\ \text{g/Cal}\cdot\text{pro Min}\cdot\text{und cm}^2 = 697.8\ \text{W/m}^2$ . Also sind  $4\ \text{g/Cal}\cdot\text{pro Min}\cdot\text{und cm}^2 = 2791\ \text{W/m}^2$ . Heutiger Wert der Solarkonstante etwa  $1370\ \text{W/m}^2$ .

2) So z. B. [Rizzo, 1897, p. 25]

3) Ein vollständiger Bericht über diese Untersuchung ist in [Acta, 1900] veröffentlicht.

wurden, betrug die Ablenkung nur 1 - 3 Skalenteile von wechselnder Richtung. Die Symmetrie des Apparates war also genügend groß.

Mit diesem Apparate wurden mehrere Versuche angestellt am 23., 24. und am 27. Juni 1896. Der Beobachtungsort war die Schutzhütte bei Alta Vista auf dem Pico de Teyde in einer Höhe von 3252 m über dem Meere. Die Feuchtigkeit war ca. 2.5 mm, die Temperatur ca. 10°, die Sonnenstrahlung im Mittel 1.60 g/Cal· pro Minute und cm<sup>2</sup> (= 1116.5 W/m<sup>2</sup>). Die Versuche ergaben aber kein positives Resultat. Nie wurde eine größere Absorption durch die Kohlensäureröhre beobachtet. In Anbetracht der Genauigkeit dieser Versuche kann ich mit Bestimmtheit sagen, dass unter diesen Umständen nicht 1.5 Proz. von der Strahlung in der Kohlensäureröhre absorbiert wurde. Dieses Resultat stimmt aber offenbar nicht mit den Versuchen von Lecher, bei welchen eine Absorption von 13 Proz. durch eine Röhre von 105 cm Länge beobachtet wurde. Da bei meinen Beobachtungen sowohl die Sonnenhöhe wie auch die Höhe über dem Meere bedeutend größer war, hatte man nach den Lecher'schen Bestimmungen eine Absorption von bedeutend mehr als 6 Proz. erwarten können. Nach dieser Untersuchung scheint es also hervorzugehen, dass das Absorptionsvermögen der Kohlensäure in dem Bande Y so kräftig ist, dass die bezügliche Absorption schon vollendet ist, bevor die Strahlung zu uns anlangt, und was das schwächere Band X betrifft, so ist die Wirkung desselben infolge überlagernder Absorptionsstreifen des Wasserdampfes nicht merkbar.

Wie groß die Kohlensäureabsorption in den höheren Teilen der Erdatmosphäre ist, lässt sich noch nicht beurteilen.

### 3 Absorption der Erdstrahlung

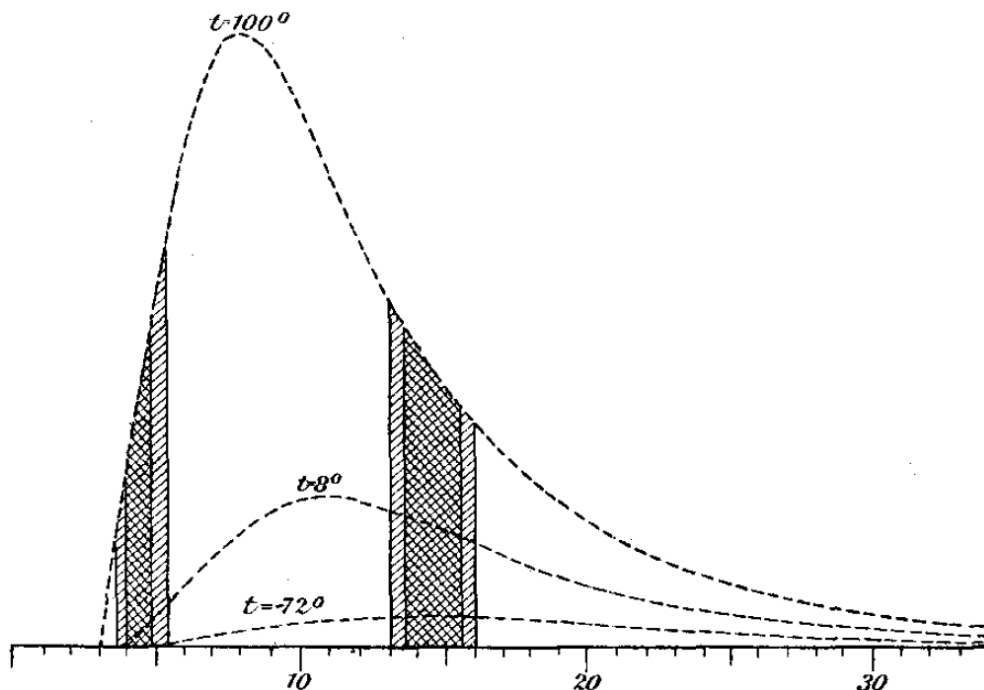
3. Viel leichter ist es, den Einfluss der Kohlensäure bei der Absorption der Erdstrahlung zu beurteilen. Außer den zwei schon erwähnten, von mir zuerst nachgewiesenen Bändern X und Y [Ångström, 1892] enthält nämlich das Kohlensäurespektrum, wie die Herren [Rubens und Aschkinass, 1898] gezeigt haben, ein sehr kräftiges Band von den Wellenlängen 14.0 - 15.5 μm. Dieses ist für die Erdstrahlung von größter Bedeutung. Wir kennen nämlich durch die Arbeiten von Langley, besonders aber durch diejenigen von Paschen, Lummer und Pringsheim ziemlich genau die Energieverteilung in dem Spektrum eines festen Körpers. Eine Schätzung der Absorption, die von einer hinreichenden längen Kohlensäureschicht ausgeübt wird, lässt sich deswegen leicht graphisch ausführen. Ich habe diese Berechnung für einige verschiedene Temperaturen ausgeführt, indem ich teils die Breite der Absorptionsstreifen so groß wie möglich, teils so klein wie möglich angenommen habe. Die Energiekurven sind mit Hilfe der Gleichung

$$E = C\lambda^{-5}e^{-\frac{c}{\lambda T}} \quad C\lambda^{-5}e^{-\frac{c}{\lambda T}} * \underbrace{\frac{1}{1 - e^{-\frac{c}{\lambda T}}}}_{\text{Korrektur gemäß Planck}}$$

berechnet, indem nach den Bestimmungen von [Lummer und Pringsheim, 1899] für die Strahlung eines schwarzen Körpers die Konstante  $c = 14700$  angenommen wurde. In Bild 2 auf der nächsten Seite sind diese Energiekurven für  $t = 100^\circ$ ,  $t = 8^\circ$  und  $t = -72^\circ$  nebst den Absorptionsbändern der Kohlensäure gezeichnet. Für Strahlung der Wärmequellen von sehr niedrigen Temperaturen wird natürlich die Absorption am größten, wenn das Energiemaximum in dem Spektrum der Wärmequelle mit der erwähnten Absorptionsbande zusammenfällt. Dies geschieht bei einer absoluten Temperatur der Wärmequelle von ca.  $196^\circ$ , wo die Absorption

10 - 16 Proz. beträgt. Für eine Wärmequelle von  $100^\circ$  wird die Absorption 12.5 - 19 Proz. betragen, ein wenig mehr als die ersterwähnte, da hier auch das Absorptionsband  $\lambda = 4.18 \mu\text{m}$  zur Wirkung kommt.

Weil verschiedene Teile dieser breiten Absorptionsbänder zweifellos nicht von derselben Intensität sind, und weil wir das Spektrum bei den spektrobolometrischen Untersuchungen nicht als vollständig rein voraussetzen können, lässt sich die von einer Kohlendäureschicht von beliebiger Dicke ausgeübte Absorption nicht scharf ermitteln. Um die Abhängigkeit der Absorption von der Schichtdicke zu bestimmen, sind deswegen direkte Versuche mit Wärmequellen von verschiedenen Temperaturen wünschenswert, und ist Hr. J. Koch im hiesigen physikalischen Institut mit derartigen Versuchen beschäftigt. Von den Resultaten dieser Untersuchung, über die Hr. Koch selbst Bericht erstatten wird, soll nur hervorgehoben werden, dass von der Strahlung eines schwarzen Körpers von  $100^\circ$  ca. 10 Proz. von einer Kohlendäureschicht von 30 cm Länge bei 780 mm Druck absorbiert wird, und daß, wenn der Druck auf  $2/3$  reduziert wird, die Absorption sich nur unbedeutend höchstens mit 0.4 Proz. der Gesamtstrahlung ändert. Eine Schicht von 30 cm Länge hat also die Absorption der Strahlung einer Wärmequelle von  $100^\circ$  beinahe vollständig bewirkt und durch die Eigenstrahlung bei der Röhrentemperatur ersetzt. Da die Temperaturen der Röhren leider nicht angegeben sind, wird mal von Zimmertemperatur  $20^\circ\text{C}$  ausgegangen. Bei  $15 \mu\text{m}$  beträgt der Intensitätsunterschied nach Planck für 373 K und 293 K nur etwa 2. Aus diesen Untersuchungen und Berechnungen geht klar hervor: erstens, dass höchstens ca. 16 Proz. von der Erdstrahlung durch die atmosphärische Kohlendäure absorbiert werden, und zweitens, dass die Gesamtabsorption sehr wenig von den Veränderungen in dem atmosphärischen Kohlendäuregehalt abhängig ist, solange nämlich dieser nicht kleiner als 0.2 des jetzt vorhandenen ist - aber für die Wirkung muß berücksichtigt werden, daß deswegen nicht die Strahlung verschwindet, sondern durch die Eigenstrahlung ersetzt wird.



Diagr. 2:

## 4 Absorption der Sonnenstrahlung

Um die Absorption der Sonnenstrahlung durch den atmosphärischen Wasserdampf zu berechnen, habe ich die von mir während des Sommers 1896 ausgeführten Beobachtungen auf Teneriffa über die Sonnenstrahlung in verschiedenen Höhen über dem Meere benutzt<sup>4)</sup>. Die kleine Tabelle 1 enthält die Hauptresultate dieser Beobachtungen, wobei die Sonnenstrahlung in g/Cal· pro Minute und cm<sup>2</sup> (= W/m<sup>2</sup>) und die atmosphärische Schichtendicke in vertikaler Richtung bei 760 mm Druck als Einheit genommen ist.

Tabelle 1:

Beobachtungsorte	Guimar	Cañada	Pico de Teide
Höhe über dem Meere	360 m	2125 m	3683 m
Barometerdruck	734 mm	597 mm	493 mm
Wasserschicht	2.6 cm	1.2 cm	0.7 cm
Schichtendicke 1	1,39 (969,9)	1,51(1053,7)	1,54(1074,6)
Schichtendicke 2	1,17 (816,4)	1,33 (928,1)	1,37 (956,0)
Schichtendicke 3	1,03 (718,7)	1,20 (837,4)	1,24 (865,3)
Schichtendicke 4	0,92 (642,0)	1,09 (760,6)	1,14 (795,5)
Schichtendicke 5	0,82 (572,2)	1,00 (697,8)	1,05 (732,7)
Schichtendicke 6	0,73 (509,4)		0,97 (676,9)

Wir sehen aus Tabelle 1 - was übrigens schon früher bekannt war -, dass die Sonnenstrahlung, die durch ein und dieselbe Schichtendicke gegangen ist, nicht von derselben Stärke ist, indem die Strahlung von den niederen Schichten der Atmosphäre, die reicher an Staub und Wasserdampf sind, stärker absorbiert wird. Über die Verteilung des atmosphärischen Staubes in verschiedenen Höhen über dem Meere wissen wir sehr wenig, gewiss nimmt aber der Staubgehalt stark mit der Höhe ab, und gleichzeitig werden die Partikelchen kleiner. Die Annahme scheint deswegen nicht allzu kühn, dass die Einwirkung des Staubes auf den zwei höchsten Stationen. der Cañada und dem Pic, bei derselben Schichtendicke annähernd gleich sei, und dass der Unterschied in der Absorption hauptsächlich durch den Wasserdampf bedingt sei. Wenn wir unter dieser Annahme die von dem Wasserdampf herrührende Absorption der Sonnenstrahlung berechnen, werden wir wenigstens eine obere Grenze dieser Größe finden.

Der Wasserdampfgehalt über dem Pic und über der Cañada lässt sich leider nur approximativ mit Hilfe der Gleichung von [Hann, 1894] berechnen. Ich habe dabei gefunden, dass der kondensierte Wasserdampf über dem Pic eine Wasserschicht von 0.7 cm Dicke bilden würde und über der Cañada eine Schicht von 1.2 cm Dicke (vgl. Tabelle 1). Aus diesen Beobachtungen und Berechnungen ergibt sich kleine Tabelle 2 auf der nächsten Seite. Die totale, von der Strahlung durchgangaene Wasserschicht  $(l_1 + l_2)/2$  in cm, die Absorption  $J_2 - J_1$ , die durch die Wasserschicht  $l_2 - l_1$  bewirkt wird, und der Transmissionskoeffizient p, berechnet durch die Gleichung

$$J_2 = J_1 p^{l_2 - l_1}$$

4) Die Beobachtungsergebnisse findet der Leser vollständig in [Acta, 1895/96]

sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2:

Absorbierende Wasserschicht $l_2 - l_1$	Durchgedrungene Wasserschicht $\frac{l_1 - l_2}{2}$	Absorption $J_2 - J_1$	Transmissions- koeffizient p
1,1 - 1,5 = 0,4	1,3	1,54 - 1,51 = 0,03	0,952
2,2 - 3,0 = 0,8	2,6	1,37 - 1,33 = 0,04	0,964
3,3 - 4,5 = 1,2	3,9	1,24 - 1,20 = 0,04	0,973
4,4 - 6,0 = 1,6	5,2	1,14 - 1,09 = 0,05	0,972
5,5 - 7,5 = 2,0	6,5	1,05 - 1,00 = 0,05	0,976

Die Gleichung auf Seite 6 ist unvollständig, da die Eigenstrahlung nicht berücksichtigt ist (siehe Zitat der WMO auf Seite 2). Eine einfache Berücksichtigung der Eigenstrahlung ist möglich, wenn die Temperatur konstant ist. Dann kann die Eigenstrahlung durch eine konstante, temperaturabhängige Intensität  $J_T$  beschrieben werden und damit wird aus der Gleichung auf Seite 6:

$$J_2 = J_1 p^{l_2 - l_1} + (1 - p^{l_2 - l_1}) J_T$$

Durch Umsortieren wird daraus:

$$J_2 = J_T + (J_1 - J_T) p^{l_2 - l_1}$$

Durch die Absorption wird also nicht  $J_1$  verändert, sondern nur die Differenz  $J_1 - J_T$ . Dieser Sachverhalt ist auch bei sorgfältiger Messung nicht automatisch zu erkennen - sondern erfordert Wissen, daß 1900 noch nicht vorhanden war, das aber einen Teil Erscheinungen erklären kann, die sowohl für Arrhenius als auch Ångström noch unverständlich waren und wozu sie irgendwelche mehr oder weniger zutreffende Vermutungen aussprachen.

Es tritt also keine Sättigung ein, sondern nach der Absorptionslänge machen sich zwar Änderungen nicht sofort bemerkbar, aber die Temperaturen ändern sich: bei Absorption wird Strahlung in Wärme umgewandelt und führt zur Steigerung der Temperatur; bei Emission wird Wärme in Strahlung umgewandelt und führt zur Senkung der Temperatur. Die Emission ist stark temperaturabhängig, die Absorption ist fast temperaturunabhängig. Es stellt sich eine solche Temperatur ein, bei der weder Absorption noch Emission überwiegen. Da Wärme weder hinzukommt noch verlustig geht, muß der Nettowärmestrom konstant bleiben.

Den Weg zur Berechnung des Temperaturverlaufs, bei dem weder Absorption noch Emission überwiegen, hat z. B. [Schwarzschild, K., 1906] gefunden, indem er den Nettowärmestrom in zwei entgegengesetzte Wärmeströme zerlegte und so der Berechnung zugänglich machte. Dabei erhielt der Wärmestrom nach unten die Bezeichnung »Gegenstrahlung«. Bei der mathematischen Untersuchung ist nichts von einer Sättigung zu erkennen.

Diese Resultate lassen sich jetzt einigermaßen durch die Beobachtungen in Pawlowsk durch [Schukewitsch, 1894] kontrollieren. Hr. Schukewitsch hat in einer Tabelle Mittelwerte seiner Beobachtungen bei verschiedener Feuchtigkeit zusammengestellt. Aus dieser Tabelle erlaube ich mir folgenden kleinen Auszug anzuführen, der die zuverlässigsten Resultate enthält, indem ich Beobachtungen bei Sonnenhöhen von niedriger als  $15^\circ$  und bei einem Feuchtigkeitsdruck von größer als 13 mm ausgeschlossen habe.

Tabelle 3:

Sonnen- höhe	Schichten- dicke	Feuchtigkeit in mm Druck						
		1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13
15°	3,81	1,06	1,00	1,00	0,97	0,95	0,98	
18°	3,20	1,15	1,11	1,07	0,09	1,04	0,98	
24°	2,50	1,30	1,23	1,20	1,19	1,17	1,13	1,03
30°	2,00	1,37	1,32	1,27	1,29	1,21	1,24	1,19
40°	1,56		1,40	1,32	1,29	1,28	1,33	1,26
45°	1,42		1,40	1,36	1,34	1,33	1,29	1,27

Mittels der Gleichung von [Hann, 1894] habe ich auch hier den bei den verschiedenen Beobachtungen vorhanden gefundenen Gehalt des Wasserdampfes berechnet und danach den Transmissionskoeffizienten  $p$  aus je zwei aufeinander folgenden Beobachtungen,  $J_1$  und  $J_2$ , bei derselben Sonnenhöhe ermittelt. Dabei ist also angenommen, dass verschiedener Staubgehalt nicht wesentlich die Zusammensetzung der Sonnenstrahlung ändert. Die auf diese Weise erhaltenen 32 Werte der Transmissionskoeffizienten habe ich in sechs Gruppen verteilt und Mittelwerte berechnet. Die kleine Tabelle 4 enthält die so erhaltenen Werte der Transmissionskoeffizienten  $p$  für die entsprechenden Werte der totalen durchstrahlten Wasserschicht  $\omega$  (in mm):

		Tabelle 4:					
$\omega$	1,5	2,5	3,8	5,3	7,1	9,7	
$p$	0,961	0,978	0,989	0,991	0,981	0,973	
		Med. 0,984					

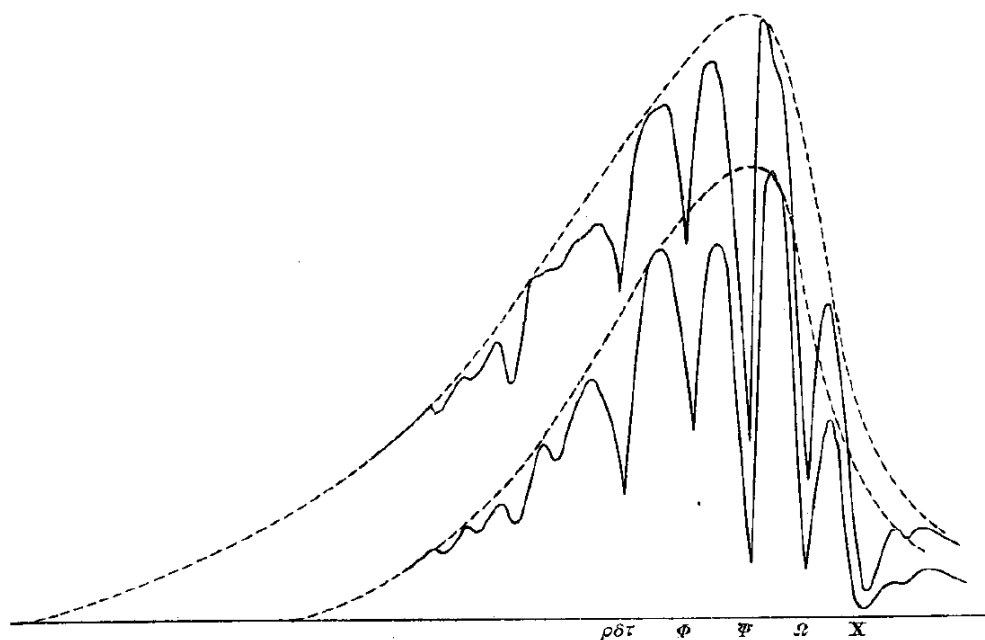
Wenn wir durch die ersterwähnten Berechnungen eine obere Grenze für die Absorption des Wasserdampfes erhalten, finden wir dagegen durch diese eine untere Grenze dieser Größe, denn in der Regel kommt nach Regen der größte Feuchtigkeitsgehalt vor und der Staubgehalt ist dann am kleinsten (die Temperaturen sind nicht angegeben).

Man sieht auch, dass die perturbierenden Einflüsse (von atmosphärischem Staub etc. herrührend) trotz der großen Anzahl Werte, aus denen  $p$  hier ermittelt ist, sich doch geltend machen, denn  $p$  muss notwendig mit wachsendem  $\omega$  zunehmen. Übrigens ist die Übereinstimmung zwischen Tabelle 2 auf der vorherigen Seite und Tabelle 4 ziemlich gut.

Über die Absorption in der ersten Wasserdampfschicht lässt sich aber auf Grund dieser Untersuchungen kein Urteil bilden. Eine Schätzung dieser Absorption ist jedoch möglich und zwar durch spektrobolometrische Untersuchungen des ultraroten Spektrums.

Während des Winters 1899/1900 hatte ich Gelegenheit, mehrmals das ultrarote Spektrum bei verschiedenen niedrigen Temperaturen durchzumustern. Ich benutzte dazu ein Prisma von Steinsalz und den Apparat für kontinuierliche photographische Registrierung des ultraroten Spektrums, den ich schon an anderer Stelle beschrieben habe [Ångström, 1895, p. 137]. Die niedrigste Temperatur,  $-15^\circ$ , wurde am 10. Februar beobachtet. Der Feuchtigkeitsdruck war 1.3 mm. Die meisten von den großen Absorptionsstreifen in dem ultraroten Spektrum, besonders diejenigen, welche Langley mit  $\rho$   $\sigma$   $\tau$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ , X und Y bezeichnet hat, waren damals bedeutend reduziert, was also zeigt, dass dieselben wirklich von dem Wasserdampf herrühren. Am 24. März wurden mehrere vollständige Aufzeichnungen des Spektrums erhalten. Die Diagramm 3 auf der nächsten Seite gibt eine treue Kopie derselben, die von 11 Uhr 40 Min. bis 21 Uhr 55 Min. Vormittags und von 5 Uhr 17 Min. bis 5 Uhr 25 Min. Nachmittags aufge-





Diagr. 3:

nommen wurden. Gleichzeitig wurden auch Bestimmungen der absoluten Wärmestrahlung mit dem elektrischen Compensationspyrheliometer [Ångström, 1899] ausgeführt.

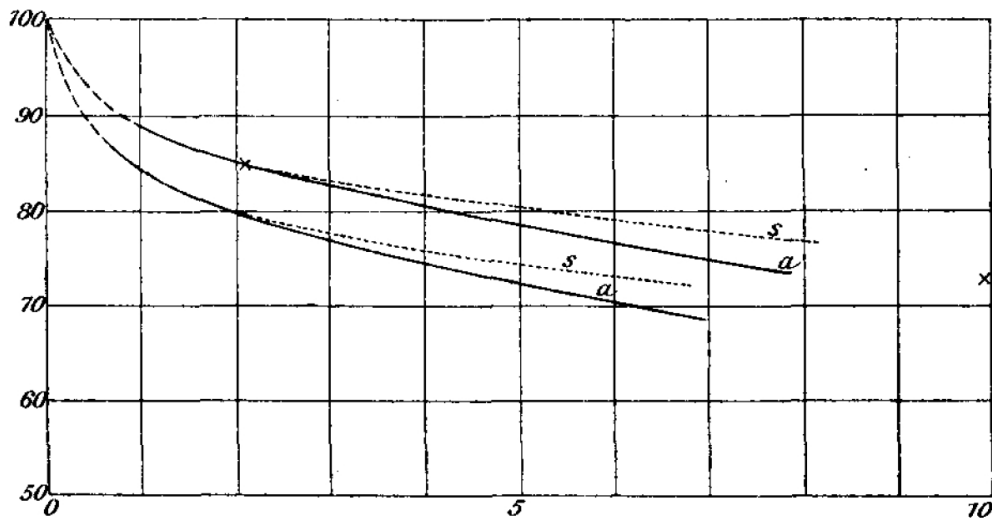
Diese Bestimmungen, sowie diejenigen der Temperatur etc., die mir Hr. Prof. Hildebrandson gütigst aus dem Journal des Meteorol. Observatoriums zur Verfügung gestellt hat, findet man nachstehend zusammengestellt:

	12 <sup>h</sup> Mittags	5 <sup>h</sup> Nachm.
Luftdruck	762,8	758,7
Temperatur	+ 0,40	+ 1,20
Feuchtigkeit	3.3 mm (70 %)	3.7 mm (73 %)
Wind	S.S.W.	S.W.
	11 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> Vorm.	5 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup> Nachm.
Wärmestrahlung	1,320 (921.1)	0.627 g/Cal. pro Min. u. cm <sup>2</sup> (437.5 W/m <sup>2</sup> )

Das Verhältnis der Wärmestrahlung um 11 Uhr 50 Min. zu der um 5 Uhr 20 Min. ist 2.12 nach den absoluten Bestimmungen, 2.05 nach der Registrierung; die Übereinstimmung also sehr gut. Die unberücksichtigte Eigenstrahlung wird wegen ihrer Temperaturabhängigkeit auch durch die ebenfalls nicht genannte Konvektion beeinflusst.

Aus diesen zwei Kurven wurde die Energiekurve für die Strahlung außerhalb der Atmosphäre berechnet, und aus dieser wieder die Kurve für die Sonnenhöhen 32° und 5°40' unter Annahme einer gleichmäßigen Absorption. diese zwei Kurven sind durch punktierte Linien in Diagramm 3 angegeben. Der Unterschied zwischen den zwei Kurven für dieselbe Sonnenhöhe rührt wohl hauptsächlich von der Absorption des Wasserdampfes her und beträgt ca. 15 bez. 21 Proz. der Gesamtstrahlung, zwischen den Wellenlängen 0.3 und 4 μm. Diese müssen als Minimalwerte der Absorption des atmosphärischen Wasserdampfes betrachtet werden, denn die Teile des Sonnenspektrums von größeren Wellenlängen als  $\lambda = 4 \mu\text{m}$  sind dabei nicht berücksichtigt worden. Wenn wir annehmen dürfen, dass diese Teile des Spektrums in der Strahlung außerhalb der Atmosphäre nicht fehlen, muss die Absorption der Sonnenstrahlung durch Wasserdampf noch um ca. 5 Proz. vermehrt werden.

Diagramm 4 gibt eine Darstellung der Absorption der Sonnenstrahlung durch Wasserdampf, wie wir dieselbe jetzt gefunden haben. Die Strahlung außerhalb der Atmosphäre ist gleich 100 angenommen, die Ordinaten sind der Stärke der Strahlung, die Abszissen den durchstrahlten Wasserdampfschichten (in Zentimetern Wasser) proportional. Die punktierten Linien ( $s$ ) beziehen sich auf die Bestimmungen von Schukewitsch, die voll ausgezogenen Linien ( $a$ ) auf die vom Verfasser ausgeführten, die mit  $\times$  bezeichneten Punkte sind durch die spektrobolometrischen Bestimmungen erhalten. Die zwei oberen Kurven sind bei Annahme der kleinsten möglichen Absorption in den ersten Wasserdampfschichten, die zwei unteren bei Annahme der größten möglichen Absorption in diesen Schichten erhalten.



Diagr. 4:

Dass die Erdstrahlung von dem atmosphärischen Wasserdampf kräftig absorbiert wird, ist schon bekannt. Dass diese Absorption sich auch auf die größten Wellenlängen erstreckt, geht aus den Arbeiten von [Rubens und Aschkinass, 1899b] hervor. Quantitative Bestimmungen der Absorption von Wasserdampfschichten verschiedener Dicke, bez. Wärmequellen von niedriger Temperatur, liegen, soviel ich weiß, noch nicht vor.

## 5 Arrhenius

Hr. Arrhenius hat in einigen Arbeiten [Arrhenius, 1896b], [Arrhenius, 1896a] den Einfluss des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes auf die Absorption der Erdstrahlung behandelt, indem er auf Grund der bekannten Arbeiten von Langley über die Absorption der Mondstrahlung [Langley, 1890] die Absorptionskoeffizienten der Kohlendioxid in verschiedenen Spektralgebieten berechnet hat. Im allgemeinen kann eine solche Berechnung, wie ich schon gesagt (vgl. Seite 4 - 5), der Unreinheit des Spektrums wegen nur ziemlich unsichere Resultate geben, und die Schwierigkeiten vermehren sich noch bedeutend, wenn Absorptionsbänder von zwei verschiedenen Elementen, hier Wasserdampf und Kohlendioxid, sich übereinander lagern und es also auf die Trennung der beiden ankommt. In diesem Falle ist aber eine Behandlung des Beobachtungsmateriales, wie es Hr. Arrhenius versucht hat, nicht erlaubt. Hr. Langley war nämlich der Schwäche der Mondstrahlung zufolge genötigt, mit größer Breite der Spaltöffnung und des Bolometerbandes zu arbeiten und deswegen war zweifellos sein Spektrum sehr unrein. Man kann daher nicht erwarten, dass die Resultate, die Hr. Arrhenius erhalten hat,

mit den zuverlässigen direkten Bestimmungen übereinstimmen werden. Während durch diese nur drei Streifen, von denen zwei von größer Schärfe, gefunden worden sind, findet Hr. Arrhenius für die Kohlensäure eine Absorption, die über den größten Teil des ultraroten Spektrums verbreitet ist. Dass unter diesen Umständen die Berechnung der quantitativen Werte der Absorption sehr fehlerhaft ausfallen muss, ist ziemlich klar. Die Erdatmosphäre würde nach Hrn. Arrhenius, auch wenn sie möglichst trocken ist, ca. 60 Proz. der Erdstrahlung zurückhalten und zwar infolge der Kohlensäureabsorption, die Veränderungen in der Absorption würden kolossal mit dem Kohlensäuregehalt variieren und eine genügend große Kohlensäureschicht würde sogar die Erdstrahlung vollständig absorbieren.<sup>5)</sup> Hr. Arrhenius glaubt auch in diesen Variationen eine Ursache der Eiszeit gefunden zu haben. Näher auf diese Theorie, die weiter von Hrn. [Eckholm, 1899] entwickelt wurde, einzugehen, scheint uns nach dem Angeführten nicht nötig.

Unter keinen Umständen dürfte die durch die Kohlensäure bewirkte Absorption der Erdstrahlung 16 Proz. übersteigen, und die Größe dieser Absorption ändert sich quantitativ mit dem Kohlensäuregehalt sehr wenig, solange nämlich derselbe nicht weniger als 20 Proz. des vorhandenen beträgt. Die hauptsächlichliche Veränderung, die durch eine Verminderung des atmosphärischen Kohlensäuregehaltes bewirkt wird, ist die, dass die von der Kohlensäure ausgeübte Absorption (ca. 16 Proz. der Erdstrahlung) erst durch eine dickere atmosphärische Schicht vollendet wird, und dass so die Wärme ein wenig mehr in der Atmosphäre verteilt wird.

Erst nachdem diese kleine Abhandlung schon fertig geschrieben war, habe ich die große Arbeit: »Atmospheric Radiation« von Frank W. Very erhalten [Very, 1900]. Trotzdem in dieser wertvollen Arbeit in ausführlicher Weise dieselben Fragen wie hier behandelt werden, hoffe ich doch, dass auch diese Beiträge zur Kenntnis der atmosphärischen Absorption nicht ganz ohne Interesse sein werden.

Upsala, Physik. Inst. d. Univ., October 1900.

---

5) Vergl. [Langley, 1890, Tab. 1, p. 26 bez. p. 251]

## 6 Verzeichnisse

### Abbildungsverzeichnis

1	.....	3
2	.....	5
3	.....	9
4	.....	10

### Tabellenverzeichnis

1	.....	6
2	.....	7
3	.....	8
4	.....	8

### Literaturverzeichnis

[Acta 1895/96] ACTA: *Acta Reg. Soc. Upsal. 1900: Intensite de la radiation solaire A differentes altitudes, recherches faites a Teneriffe.* 1895/96 6

[Acta 1900] ACTA: *Acta Reg. Soc. Ups.* 1900 3

[Arrhenius 1896a] ARRHENIUS, Svante: *Bihang till [Nachtrag zu].* Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar Bd. 22. Afd. 1, 1896 10

[Arrhenius 1896b] ARRHENIUS, Svante: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Earth []. 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 10

[Arrhenius 1897] ARRHENIUS, Svante: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Earth []. In: *The London, Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science* 9 (1897), feb, S. 14. – URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/1897PASP....9...14A>. – Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System 2

[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.]* 309 (1901), S. 690 – 705. – URL <http://books.google.de/books?id=JQQAAAAAMAAJ>. – ISSN 0003-3804 2

[Eckholm 1899] ECKHOLM, N.: *Die Zeitschrift Ymer.* 1899 11

[Hann 1894] HANN: .... In: *Meteorologischen Zeitschrift* XI (1894), S. 196 6, 8

[Schwarzschild, K. 1906] SCHWARZSCHILD, K.: Ueber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre. In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse* 1906 (1906), S. 41 – 53. – URL [http://gdz-srv1.sub.uni-goettingen.de/gcs/gcs?&action=pdf&metsFile=PPN252457811\\_1906&divID=LOG\\_0009&pagesize=A4&pdf](http://gdz-srv1.sub.uni-goettingen.de/gcs/gcs?&action=pdf&metsFile=PPN252457811_1906&divID=LOG_0009&pagesize=A4&pdf) 7

- [Langley 1890] LANGLEY, S. P.: *Mem. of the Nat. Academy 4. 9th mem.* 1890 10, 11
- [Lecher 1881] LECHER, E.: *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Wien (2)* 82. p. 851. 1881 ; *Wied. Ann.* 12. p. 467. 1881 2, 3
- [Lexikon 2014] LEXIKON: *Pyrgeometer*. 2014. – URL <http://www.wissen.de/lexikon/pyrgeometer> 2
- [Lummer und Pringsheim 1899] LUMMER, O. ; PRINGSHEIM, E.: *Verhandl. d. Deutsch. Physikal. Gesellsch.* 1. p. 221. 1899 4
- [Ångström 1916] ÅNGSTRÖM, Anders: *A study of the radiation of the atmosphere*, Dissertation, 1916. – 159 S. – URL [https://openlibrary.org/books/OL18016447M/A\\_study\\_of\\_the\\_radiation\\_of\\_the\\_atmosphere](https://openlibrary.org/books/OL18016447M/A_study_of_the_radiation_of_the_atmosphere) 2
- [Ångström 1890] ÅNGSTRÖM, K.: *Bihang till K. S. Vet. Akad. Handlingar* 15. Afd. 1. Nr. 9 u. 10; *Wied. Ann.* 36 p. 267 u. 294. 1890 3
- [Ångström 1892] ÅNGSTRÖM, K.: *Öfversigt af K. Vet. Akad. förhandl.* p. 549. 1889; *Physikalische Revue* 1. p. 606. 1892 4
- [Ångström 1895] ÅNGSTRÖM, K.: *Acta Reg. Soc. Upsal.* 1895; *Physical Review* 3. p. 137. 1895 8
- [Ångström 1899] ÅNGSTRÖM, K.: *Wied. Ann.* 67. p. 633. 1899 9
- [Ångström 1900] 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 2
- [Rizzo 1897] RIZZO, G. B.: *Mem. della Soc. Spettroscopisti Italiani '26.* p. 25. 1897 3
- [Rubens und Aschkinass 1898] RUBENS, H. ; ASCHKINASS, E.: Beobachtungen ber Absorption und Emission von Wasserdampf und Kohlensäure im ultrarothem Spectrum. In: *Annalen der Physik* 300 (1898), Nr. 3, S. 584 – 601. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18983000309>. – ISSN 1521-3889 4, 13
- [Rubens und Aschkinass 1899a] RUBENS, H. ; ASCHKINASS, E.: Isolirung langwelliger Wärmestrahlen durch Quarzprismen. In: *Annalen der Physik* 303 (1899), Nr. 2, S. 459–466. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/andp.18993030216>. – ISSN 1521-3889
- [Rubens und Aschkinass 1899b] RUBENS, H. ; ASCHKINASS, E.: *Wied. Ann.* 67. p. 598. 1899. – Die Literaturstelle hat einen anderen Autor, die Seite gibt es aber in [Rubens und Aschkinass, 1898], Jahrgang ist in [Rubens und Aschkinass, 1899a] 10
- [Schukewitsch 1894] SCHUKEWITSCH, J.: *Rep. für Meteorol.* 17. Nr. 5. 1894 7
- [Very 1900] VERY, W.: *U. S. Departement of Agriculture, Bulletin G.* 1900. Eingegangen 26. October 1900 11
- [WMO 1980] WMO: *Interview With Dr. Anders K. Ångström [Interview mit Dr. Anders K. Ångström]*. 1980. – URL [http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin\\_en/interviews/angstrom\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/publications/bulletin_en/interviews/angstrom_en.html) 2