VII. *Beobachtungen über die Strahlung der Sonne; von Knut Ångström.*

(Aus Bihang Till K. Svenska Vet.-Akad. Handl. Bd. 15. Afd. I. Nr. 10.
mitgetheilt vom Hrn. Verf.)

1. Instrumente für Bestimmungen der Sonnenstrahlung.

In einer früheren Arbeit: „Sur une nouvelle méthode de faire des mesures“ etc.¹⁾ habe ich eine neue Methode für calorimetrische Bestimmungen der Wärmestrahlung und für die Construction eines neuen Instrumentes zur Selbstregistrierung der Sonnenstrahlung beschrieben. Nachdem ich eine Unterstützung der königl. schwedischen Academie der Wissenschaften erhalten, habe ich neue Instrumente ausführen lassen und mit diesen während der Sommer 1887 und 1888 Messungen und Registrirungen der Sonnenstrahlen ausgeführt. Obschon ich hierbei eigentlich nur bezweckte, die besten instrumentalen Anordnungen für Messungen dieser Art zu finden, und obschon die Zeit, während welcher ich Gelegenheit hatte mit diesen Instrumenten zu arbeiten, sehr beschränkt war, so dürften doch vielleicht einige Folgerungen, die ich aus dem Beobachtungsmaterial gezogen habe, von allgemeinerem Interesse sein.

Indem ich den Leser betreffs der ausführlichen Beschreibung der Instrumente auf meine oben erwähnte Abhandlung verweise, will ich hier nur an die Grundprincipien derselben erinnern und einen sehr einfachen Beweis für dieselben geben.

Zwei einander ganz ähnliche, kleine, kreisförmige Scheiben von massivem Kupfer (von ca. 30 mm Durchmesser, 5 bis 7 mm Dicke) sind an der der Strahlung zugewendeten Seite sorgfältig geschwärzt. In jeder Platte befindet sich je ein Thermoelement, und diese Thermoelemente sind mit einem empfindlichen aperiodischen Spiegelgalvanometer in eine und dieselbe Leitung eingeschaltet. Die Kupferplatten dienen als Calorimeter, ihre Temperaturdifferenz kann durch das Galvanometer bestimmt werden. Die unter

1) K. Ångström, Nova Acta Reg. Soc. Sc. Ups. (3) März 1886.

sich verbundenen Platten sind an einem Stative, welches horizontale und verticale Bewegung gestattet, befestigt, und können durch einen, gleichfalls vom Stativ getragenen, beweglichen Schirm abwechselnd beschattet werden.

Um die Stärke einer Wärmestrahlung zu bestimmen, lässt man dieselbe senkrecht gegen die eine Plattenfläche fallen, während man die andere durch den Schirm beschattet. Nachdem jene einen genügend grossen Temperaturüberschuss bekommen hat, legt man den Schirm herum, sodass die andere Platte bestrahlt und die vorher bestrahlte beschattet wird und bestimmt genau die Zeiten für den Durchgang des Fadenkreuzes durch vorher bestimmte Punkte der Scala, z. B. die Zeiten, bei welchen das Fadenkreuz durch die Theilstriche 100, 50, 0, —50, —100 der Scala geht (Ruhelage des Galvanometers gleich 0 gesetzt). Nachdem die zuletzt bestrahlte Platte noch einen kleinen Temperaturüberschuss bekommen hat, dreht man den Schirm wieder zurück und bestimmt wieder die Zeiten für den Durchgang des Fadenkreuzes durch dieselben Punkte der Scala. Wenn wir die Zeitdifferenzen zwischen zwei gleichen, aber entgegengesetzten Ausschlägen des Galvanometers, also die Zeit, welche nöthig ist, um die Temperaturdifferenz δ der Calorimeterplatten zu vertauschen, mit t bezeichnen und mit W den Wasserwerth der Calorimeterplatten, so lässt sich beweisen, dass die Strahlung Q durch die Formel:

$$Q = \frac{2W\delta}{t}$$

ausgedrückt werden kann, und dass also durch diese Beobachtungsmethode die Wärmeabgabe der Platten durch Strahlung und Convection eliminirt wird.

Wenn nämlich θ die Temperatur des einen Calorimeters in dem Augenblicke, in welchem das Fadenkreuz durch einen der Ablesepunkte geht, bezeichnet, so ist $\theta + \delta$ die Temperatur der anderen Platte. Nach der Zeit t ist die Temperatur der ersten θ_1 und die der zweiten $\theta_1 - \delta$. Wenn W den Wasserwerth jeder Platte bedeutet, und wenn wir die Temperaturdifferenz δ immer klein genug nehmen, um die Wärmeabgabe der Platten durch Convection und Strahlung dem mittleren Temperaturüberschusse der Um-

gebung proportional setzen zu können, also für die erste Platte während der Zeit t :

$$= a W \frac{\Theta + \Theta_1}{2} t,$$

so finden wir, dass diese Platte während der Zeit t durch Strahlung die Wärmezufuhr:

$$Qt = W(\Theta_1 - \Theta) + a W \frac{\Theta + \Theta_1}{2} t$$

bekommen hat. Wir haben aber:

$$a W \frac{\Theta + \Theta_1}{2} t = a W \frac{\Theta + \delta + \Theta_1 - \delta}{2} t,$$

also ist die Abkühlung der beiden Calorimeter während der Zeit t von derselben Grösse. Weil die Temperaturabnahme des zweiten aber $= (\Theta + \delta) - (\Theta_1 - \delta)$ ist, so ist seine Wärmeabgabe:

$$a W \frac{\Theta + \delta + \Theta_1 - \delta}{2} t = W(\Theta - \Theta_1 + 2\delta),$$

und also:

$$Qt = W(\Theta_1 - \Theta) + W(\Theta - \Theta_1 + 2\delta) = 2W\delta,$$

und:

$$Q = \frac{2W\delta}{t}.$$

Wenn der Absorptionscoefficient der Calorimeterfläche nicht 1, sondern ε ist, so wird:

$$Q = \frac{2W\delta}{\varepsilon t}.$$

Diese Beobachtungsmethode ist für sogenannte absolute Messungen der Wärmestrahlung sehr zweckmässig, theils weil alle Constanten des Apparates leicht zu bestimmen sind, theils weil durch die Versuchsanordnung die Abkühlung des beschatteten Calorimeters die des bestrahlten corrigirt, so dass man keine weitere Correction in dieser Hinsicht anzu bringen braucht.

Desselben Principes habe ich mich auch zur Construction des selbstregistrirenden Apparates bedient. Die nachstehende Fig. 1 zeigt die Anordnung des zuletzt ausgeführten Instrumentes in ca. $\frac{1}{13}$ der natürlichen Grösse.¹⁾ 1 ist das Pyrheliometer. Die oben erwähnten Platten sind hier durch hohle, geschwärzte Kugeln von Kupfer ersetzt, welche durch

1) Von dem Hrn. Mechaniker H. Sandström in Lund angefertigt.

ein Glasrohr miteinander verbunden sind. In diesem Rohre befindet sich ein kleiner Quecksilberindex, welcher durch einen Platindraht mit dem einen Pole eines galvanischen Elementes verbunden ist. 2 ist ein grosser kreisförmiger Schirm, welcher längs zweier in die Richtung der Erdaxe gestellter, eiserner Stangen verschiebbar ist und dadurch an jedem Tage so eingestellt werden kann, dass er den ganzen

Fig. 1.

Tag die eine der Calorimeterkugeln beschattet. Sobald die andere Kugel durch die Sonnenstrahlen einen bestimmten Temperaturüberschuss (δ) bekommen hat, gelangt der Quecksilberindex in Contact mit einer Platinspitze; infolge dessen wird ein electrischer Strom geschlossen, eine Sperrvorrichtung wird ausgelöst, und durch Vermittelung eines Uhrwerkes

werden die Kugeln um eine verticale Axe gedreht. Der Strom wird dann unterbrochen, die Sperrklinke fällt wieder zurück, und nachdem die Axe eine halbe Umdrehung gemacht hat, wird die Bewegung gehemmt. Jede Umdrehung wird durch das Registrirwerk 3 in gewöhnlicher Weise registrirt. Der Cylinder wird durch ein Räderwerk um seine Axe gedreht; ein an einem Gewicht befestigter Stift schreibt auf denselben. Bei jeder halben Umdrehung der Calorimeterkugeln wird das Gewicht ungefähr 0,5 mm gesenkt. Wenn wir mit t die horizontale, mit g die verticale Bewegung bezeichnen, so wird die Wärmestrahlung:

$$Q = C \frac{\partial g}{\partial t}$$

und also proportional der Tangente der aufgezeichneten Curve. Die ganze, während einer gegebenen Zeit zugeführte Wärmemenge wird:

$$\Sigma Q = C_1(g - g_1).$$

Die Constanten C und C_1 können durch Vergleichung mit dem oben erwähnten Instrument für absolute Bestimmungen festgestellt werden.

Um nicht genöthigt zu sein, den für die Electromagnete des Apparates erforderlichen starken Strom durch die Platinspitze und den Quecksilberindex des Pyrheliometers zu leiten, habe ich mich eines schwachen Hilfsstromes bedient.

Die schematische Fig. 2 gibt eine leicht verständliche Darstellung der Anordnung an. A und A_1 sind die Pyrheliometerkugeln. Bei Erwärmung von A_1 wird der Hilfs-

strom $BCEFG$ geschlossen, der Electromagnet D zieht dabei den kleinen Anker K an. Der Hauptstrom wird in dieser Weise bei I geschlossen, geht von der kleinen

Batterie O durch K zu den Electromagneten L und N . Durch L wird bei jedem Stromschluss ein Zahn des Zahnrades R ausgelöst und dadurch die Senkung des mit einem

Bleistifte versehenen Gewichtes *P* bewirkt; durch *N* wird der Sperrhaken des Pyrheliometers gehoben, wodurch die Umdrehung desselben erfolgt.

2. Einige Beobachtungsergebnisse.

Während des Sommers 1887 führte ich an der Westküste Schwedens, während des Sommers 1888 auf einer kleinen Insel Yxelö (58° 56' Breite, 35° 40' Ost von Ferro) an der Ostküste Schwedens Bestimmungen der Sonnenstrahlung aus. Wegen gewisser Fehler, die ich erst zu spät entdeckte, glaube ich, das Beobachtungsmaterial von 1887, welches auch nur Vorversuche enthielt, ausser Rechnung lassen zu müssen. Das Material vom Sommer 1888 habe ich dagegen einer genaueren Untersuchung unterworfen, um die Beziehung zwischen atmosphärischer Schichtendicke und Stärke der Sonnenstrahlung in unserer Gegend unter normalen Verhältnissen zu bestimmen. Das Registririnstrument war an dem höchsten Punkte der Insel (ca. 35 m über dem Meerespiegel) aufgestellt. Die Tage, an welchen die Atmosphäre so rein und unveränderlich ist, dass man die Beobachtungen der Sonnenstrahlung zu einer genaueren Berechnung benutzen kann, sind, wie bekannt, sehr selten. Hr. Crova in Montpellier, der gleichfalls in der letzten Zeit mit der Registrirung der Sonnenstrahlung vermittelt eines von ihm construirten thermo electrischen Apparates beschäftigt war, findet, dass nur ca. 1,9 Proc. von allen Tagen von dieser Beschaffenheit ist.¹⁾

Für den oben erwähnten Zweck dürfen nur solche Tage in Betracht kommen, während welcher die Registrirung Vor- und Nachmittag ziemlich ununterbrochen erfolgte und an welchen die Strahlung für dieselbe Sonnenhöhe wenigstens annäherungsweise gleich war. Dies ist nämlich eine nothwendige, wenn auch nicht hinreichende Bedingung der Unveränderlichkeit der Atmosphäre. Unter solchen Umständen darf es nicht auffallen, dass ich nur an zwei Tagen, nämlich am 18. und 19. Juli, brauchbares Beobachtungsmaterial gefunden habe. Für die an diesen Tagen registrirten Curven habe ich mehreremal die jeder Stunde entsprechenden Tan-

1) Crova, Ann. de chim. et de phys. 14. p. 541. 1888.

genten bestimmt. Am 19. Juli wurde eine Bestimmung der Constante C des Registrirapparates ausgeführt und aus dem Mittel der Bestimmungen der Tangenten sind dann die Werthe der Strahlungsintensität für jede Stunde berechnet. Die folgende Tabelle enthält die Resultate dieser Berechnung. Die Sonnenhöhe ist aus der gewöhnlichen Formel:

$$\sin h = \sin \lambda \sin \delta + \cos \lambda \cos \delta \cos t$$

berechnet. Die Schichtendicke ist nach Lambert gegeben.

Tabelle 1.

Stunde		Schichten- dicke	18. Juli		19. Juli		Mittel. Vor- und Nachm. 19. Juli
Vorm.	Nachm.		Vorm.	Nachm.	Vorm.	Nachm.	
5	7	4,75	0,54	0,47	0,51	0,48	0,495
6	6	3,09	0,72	0,72	0,73	0,77	0,750
7	5	2,26	0,89	0,89	0,89	0,98	0,935
8	4	1,80	—	1,07	1,02	1,09	1,055
9	3	1,53	—	1,16	1,20	1,20	1,200
10	2	1,38	—	1,25	1,28	1,30	1,290
			1,27 ¹⁾				
11	1	1,29	—	1,31	1,36	1,34	1,350
12	—	1,26	1,35	—	1,36	—	1,360

Fig. 3.

Am 18. Juli zwischen 8—10 Uhr war der Himmel nicht ganz frei von Wolken, in der übrigen Zeit erfolgte jedoch die Registrirung ohne Störung. Die Uebereinstimmung zwischen den beiden Tagen, sowie auch die Uebereinstimmung zwischen Vor- und Nachmittag

1) Um 10¹/₂ Uhr vorm.

ist sehr gut. Daher habe ich die Bestimmungen vom 18. Juli nur als eine Controle betrachtet und werde im Folgenden nur die Bestimmungen vom 19. Juli als die vollständigsten näher behandeln. Auf Fig. 1, 4 findet man eine kleine Reproduction der am 19. Juli registrirten Curve¹⁾, auf Fig. 3 (die ununterbrochene Curve) ist der entsprechende Verlauf der Strahlung dargestellt; als Abscissen sind die Schichtendicken der Atmosphäre, als Ordinaten die Stärke der Strahlung aufgezeichnet. Die meteorologischen Verhältnisse während dieses Tages sind aus der folgenden Zusammenstellung ersichtlich.

Tabelle 2.

Stunde	Wind	Luftdruck mm	Spannung des Wasserdampfes mm
10 vorm.	N. Frisch	751,0	9,5
1 nachm.	N. Frisch	751,0	8,0
5 nachm.	N. Frisch	750,5	8,4
8 nachm.	Stille	750,0	8,6

3. Beziehung zwischen Schichtendicke und Strahlung der Sonne.

1. Wie längst bekannt, hat das einfache Absorptionsgesetz:

$$i = Ap^a$$

keine vollständige Gültigkeit für die Sonnenstrahlung, weil die Absorption der Atmosphäre eine auswählende ist. Dem entsprechend müssen wir die durchgehende Wärme:

$$i = \Sigma Ap^a$$

setzen. Trotzdem dürfte es von besonderem Interesse sein, zu untersuchen, in wie weit die Absorption der Sonnenstrahlung in der Atmosphäre durch die erste einfache Gleichung ausgedrückt werden kann. Um die Vertheilung der Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche beurtheilen zu können, ist es nämlich wichtig, eine allgemein gültige, wenn auch empirische Formel zu finden, nach welcher sich diese Vertheilung unter verschiedenen Umständen berechnen lässt. Von den vielen Relationen, die man in dieser Hinsicht aufgestellt hat, ist wohl die oben erwähnte eine der einfachsten

1) Fig. 1 ist nach einer Photographie des Instrumentes und der Originalcurve reproducirt.

und, so viel ich weiss, die einzige, welche bis jetzt als Grundlage für eine Berechnung der Vertheilung der Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche in verschiedenen Jahreszeiten angewandt ist. Diese für viele Fragen wichtige, übrigens sehr mühsame Berechnung ist neulich von Hrn. A. Angot¹⁾ ausgeführt, und zwar für verschiedene Werthe der Constante p . Die Beobachtungen an den verschiedenen Orten müssen jetzt entscheiden, welchen Werth man p am Besten zu geben hat, und mit welcher Genauigkeit die Rechnung und die Erfahrung miteinander übereinstimmen.

Dass die vorliegenden Bestimmungen nicht in vollständiger Uebereinstimmung mit dem einfachen Absorptionsgesetze sind, ist leicht einzusehen. Wenn wir nämlich die Constanten A und p aus dem unteren Theil der Curve berechnen, so geben diese Constanten für kleinere Schichtendicke einen Werth der Intensität der Sonnenstrahlung, der viel zu klein ist. So ist z. B. die in der Fig. 3 mit — . . . — bezeichnete Curve aus den Werthen $m = 3$, $i = 0,76$ und $m = 5$, $i = 0,47$ berechnet, woraus sich ergibt $A = 1,56$ und $p = 0,786$. Dieses Resultat stimmt mit den meisten älteren Bestimmungen überein und folgt unmittelbar aus der That-
sache, dass die atmosphärische Absorption eine auswählende ist. Die mit bezeichnete Curve ist mit Hülfe der Methode der kleinsten Quadrate berechnet, wodurch ich $A = 1,78$, $p = 0,76$ gefunden habe. Der grösste Unterschied zwischen Beobachtung und Berechnung ist hier ungefähr 6 Proc. In manchen Fällen, besonders für gewisse meteorologische Fragen, dürfte diese Uebereinstimmung wohl genügend sein; es ist jedoch dabei zu bemerken, dass wir hier die beiden Grössen A und p durch Beobachtungen bestimmt haben. Wenn wir dagegen A als eine für alle Bestimmungen gemeinsame Constante annehmen, so wird natürlich die Uebereinstimmung viel schlechter.

2. Wie schon gesagt, müssen die Variationen der Sonnenstrahlung durch eine Reihe von Termen ausgedrückt werden. In seiner grossen Arbeit „Researches on solar heat“ hat Hr. Langley den Durchlässigkeitscoëfficienten p für ver-

1) A. Angot, Ann. du Bureau central météorologique de France: (1) p. 120. 1883 u. Journ. de Phys. (2) 5. p. 1. 1886 (Auszug).

schiedene Wellenlängen des Sonnenspectrums bestimmt.¹⁾ Die Werthe von p wachsen stetig mit zunehmender Wellenlänge von 0,4, bis 0,9, und die Durchlässigkeit der Atmosphäre scheint also mit der Wellenlänge zuzunehmen. Hr. Langley hat auch die spectrale Vertheilung der Energie ausserhalb der Atmosphäre bestimmt und (l. c. p. 144) durch drei Curven dargestellt, von welchen die eine den grössten, die andere den kleinsten möglichen Werth der Sonnenenergie darstellt, und die dritte das Mittel aus den beiden ersten, also den wahrscheinlichsten Werth repräsentirt (in der Tafel von Langley mit III bezeichnet). Durch diese Daten ist es jetzt möglich, beliebig viele Glieder in der allgemeinen Formel der Sonnenstrahlung anzugeben.

Für diesen Zweck habe ich die ganze Sonnenenergie in zwölf gleiche Theile getheilt und für jeden von diesen den mittleren Durchlässigkeitscoëfficienten aus der Tabelle 6, p. 25 und aus der Tabelle 123, p. 151 der oben angeführten Arbeit von Langley durch graphische Interpolation ermittelt. Unter Benutzung dieser Werthe habe ich die Strahlung i bei verschiedener Schichtendicke nach der Formel:

$$i = \frac{A}{12} \sum_{n=1}^{n=12} p_n^d$$

berechnet. Wenn wir $A^2)$ aus dieser Formel für einen bestimmten, dem unteren Theil der beobachteten Curve entnommenen Werth der Strahlung i berechnen, so stimmen für niedrige Sonnenhöhen die berechneten und beobachteten Werthe der Strahlung ganz gut überein, für grössere Sonnenhöhen dagegen steigt die beobachtete Curve viel steiler aufwärts als die berechnete.

Eine gute Uebereinstimmung meiner Beobachtungen mit denjenigen von Langley war natürlich nicht zu erwarten, da sie unter ganz verschiedenen atmosphärischen Verhältnissen

1) Langley, Professional papers of the signal service Nr. 15, 1884.

2) Die Werthe von A , welche wir in dieser Weise erhalten haben, sind nicht besonders gross. Dass Langley einen so hohen Werth, nämlich 3 Calorien, für die Solarconstante bekommen hat, beruht nicht so sehr auf einer abweichenden Form der Absorptioncurve, als vielmehr auf dem sehr hohen Werth der Gesamtstrahlung, den er unter den günstigsten atmosphärischen Verhältnissen, unter welchen er arbeitete, bekommen hat. So findet er z. B. bei einer Schichtendicke = 1 für Mt. Whitney $i = 1,9$ und für Lone Pine $i = 1,75$ (l. c. p. 120).

ausgeführt sind. Was aber besondere Aufmerksamkeit verdient, ist, dass die beiden Curven Langley's keine Rechen-schaft von der starken Zunahme der Sonnenstrahlung bei kleinerer Schichtendicke geben. Dies scheint deutlich darauf hinzuweisen, dass es einen sehr weiten Spectralbezirk von starker und umfassender Absorption gibt, für welchen die Durchlässigkeitscoëfficienten p von Langley nicht gelten.

Dass dies Gebiet nicht in dem Spectralbezirk liegt, für welchen Langley genauere Bestimmungen der Coëfficienten ausgeführt hat, ist leicht einzusehen. Bekanntlich geht aus spectralanalytischen Beobachtungen hervor, dass es schon in den sichtbaren Theilen des Spectrums Linien von atmosphärischem Ursprunge gibt; für diese gelten natürlich die Coëfficienten Langley's nicht, welche eine continuirliche Abnahme der Absorption gegen Roth zeigen. Die Breite dieser Linien ist aber so unbedeutend, dass sie im Verhältniss zu der Gesamtstrahlung hier vernachlässigt werden können. Die Linien im Ultraroth, welche Langley gefunden hat, sind von viel grösserer Breite, und einige von diesen dürften wahrscheinlich, wenn sie atmosphärischen Ursprungs sind, zu den starken Variationen der Sonnenstrahlung bedeutend beitragen.

Um die wahre Ursache dieser Variationen zu finden, müssen wir jedoch, glaube ich, zur äussersten Grenze des Sonnenspectrums gehen; es lässt sich nämlich zeigen, dass das steile Ansteigen der Intensität, welches ich beobachtet habe, und das man auch in vielen anderen Beobachtungen wiederfindet, durch die Absorption der Kohlensäure erklärt werden kann. Einerseits habe ich nämlich in einer früheren Arbeit¹⁾ gezeigt, dass gerade in den äussersten Theilen des Sonnenspectrums die Kohlensäure eine sehr kräftige Absorption ausübt, andererseits hat Hr. Lecher schon gezeigt, dass eine Schicht von 1,05 m Kohlensäure 13 Proc. der Sonnenstrahlung bei einer atmosphärischen Schichtendicke von 1.2 noch absorhirt²⁾. Es ist diesen Thatsachen zufolge

1) K. Ångström, Bihang till K. Svenska Vet.-Akad. Handlingar 15. Nr. 9. 1889 u. Wied. Ann. 39. p. 267. 1890.

2) Lecher, Sitzungsber. der Akad. d. Wissensch. 82. 2. Abth. p. 851. 1881; (in Auszug) Wied. Ann. 12. p. 467. 1881.

und mit Hülfe meiner Bestimmungen über die Absorption der Kohlensäure bei verschiedener Dicke auch möglich, innerhalb gewisser Grenzen die Wärmemenge der Sonnenstrahlung, die in das Absorptionsgebiet der Kohlensäure fällt, anzugeben.

In meiner oben erwähnten Arbeit findet man in den Tabellen 1—3 die soeben erwähnte Absorption der Kohlensäure bei verschiedener Dicke und für verschiedene spectrale Vertheilung der ursprünglichen Wärmeintensität. Die Curven, welche diesen Beobachtungen entsprechen, befolgen im allgemeinen nicht das einfache Absorptionsgesetz; die Absorption innerhalb des Absorptionsbandes der Kohlensäure ist also eine auswählende. Wenn man aber die Verhältnisse, nachdem die Strahlung durch eine Kohlensäureschicht von 0,5 m Dicke gegangen ist, also nur die oberen Theile der Curven in Betracht zieht, so wird die Uebereinstimmung zwischen den Beobachtungen und dem einfachen Absorptionsgesetze sehr gut. Man kann also wenigstens als erste Annäherung das Absorptionsgesetz hier anwenden, jedoch nicht, wie es gewöhnlich bei solchen Rechnungen geschieht, auf die Gesamtstrahlung, sondern nur auf denjenigen Theil, welcher der Hauptabsorption unterworfen ist. Ich habe also die Durchlässigkeitscoefficienten für die oberen Theile der Curven L_1 , M_1 und M_2 (siehe meine frühere Arbeit p. 12 der schwedischen, p. 277 der deutschen Ausgabe) nach der Formel:

$$i - c = (I - c)p^d$$

berechnet, wo i die ganze durchgehende Strahlung, I die ganze einfallende und c die Strahlung, welche nicht innerhalb des Absorptionsgebietes der Kohlensäure fällt, bezeichnet; p ist der Durchlässigkeitscoefficient und d die Schichtendicke der Kohlensäure in Metern bei einem Drucke von 760 mm. Aus diesen Curven habe ich Werthe von p , die zwischen 0,2 und 0,4 liegen, bekommen. Der Unterschied beruht natürlich grösstentheils auf dem Unterschied der ursprünglichen Wärmestrahlung, die in den verschiedenen Curven ganz verschieden ist.

Da ich gefunden habe, dass die Kohlensäureabsorption, nachdem die Strahlen zuerst durch eine Schicht von Kohlen-

säure von 0,5 m Dicke gegangen sind, annäherungsweise dem Absorptionsgesetze folgt, und dass der Coëfficient p zwischen 0,2 und 0,4 liegt, habe ich die Beobachtungen von Hrn. Lecher benutzt, um die Absorption der Kohlensäure in der Atmosphäre zu berechnen.

Die Versuche von Hrn. Lecher wurden so ange stellt, dass er die Absorption der Sonnenstrahlung bei ver-
schiedener Sonnenhöhe durch eine Schicht Kohlensäure von 1,05 m Länge und 760 mm Druck bestimmte. Er hat die Resultate in einer Tabelle¹⁾ zusammengestellt, indem er die Absorption der Kohlensäureschicht bei verschiedener Sonnen-
höhe in Procenten der ganzen Strahlung angegeben hat. Bei grösserer Sonnenhöhe zeigt sich eine ganz bedeutende Ab-
sorption; diese nimmt mit sinkender Sonne stark ab und ist schon bei einer Schichtendicke = 3 kaum noch messbar. Obschon die Bestimmungen grosse Schwankungen zeigen, habe ich doch versucht, die Beziehung zwischen der Schichten-
dicke und der procentischen Absorption durch eine Curve darzustellen. Durch graphische Interpolation wurden die folgenden Zahlen gefunden:

Tabelle 3.

Schichten- dicke d	Absorption durch 1 m Kohlensäure c	Intensität der Sonnenstrahlung i
1,2	13 Proc.	1,40
1,7	6 „	1,11
2,2	3 „	0,95

Die in der Tabelle eingeführten Werthe der Intensität i der Sonnenstrahlung sind aus der Curve, Fig. 3, hergeleitet. Hieraus können wir unter der Annahme, dass wir den Durchlässigkeitscoëfficienten der Kohlensäure kennen, die Wärmemenge B berechnen, welche bei verschiedener Schich-
tendicke innerhalb des Absorptionsgebietes der Kohlensäure fällt. Es ist nämlich:

$$B - ci = Bp^{1,05}.$$

In der folgenden Tabelle gebe ich nach dieser Gleichung die Werthe von B für verschiedene Sonnenhöhen und für verschiedene Werthe von p .

1) Lecher, Sitzungsber. d. Wien. Akad. 82. 2. Abth. p. 860. 1881.

Tabelle 4.

p	Schichtendicke		
	1,2	1,7	2,2
0,2	0,22	0,08	0,08
0,3	0,26	0,09	0,04
0,4	0,30	0,10	0,05

Die Resultate dieser Berechnung sind in der Fig. 3 durch die Curven a , b und c graphisch dargestellt. Wie oben bemerkt, müssen diese Curven wenigstens annäherungsweise dem Absorptionsgesetze folgen. Dies ist auch der Fall mit denjenigen Curven, welche aus den Werthen $p = 0,2$ und $p = 0,3$ berechnet sind, nicht aber mit der aus $p = 0,4$ berechneten. Wir schliessen hieraus, dass 0,4 ein zu hoher Werth für p ist.

Diese Resultate können wir auch in einer anderen Weise bestätigen. Wir können nämlich für verschiedene Werthe von p berechnen, wie viel von der ursprünglichen Wärme eine Kohlensäureschicht von 1 m Dicke durchlässt. Danach können wir nach den gegebenen Curven a , b und c die Dicke einer atmosphärischen Schicht von gleicher Wirkung suchen und so auf den durchschnittlichen Kohlensäuregehalt der Atmosphäre schliessen. Diese Resultate können wir endlich mit den durch directe Messungen des Kohlensäuregehaltes gefundenen Resultaten vergleichen.

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Werthe von p und die entsprechenden Werthe von B für die Schichtendicke 1,2 zusammengestellt; ferner ist in der dritten Columne die durch 1 m Kohlensäure durchgelassene Wärme i angegeben, in der vierten die Dicke einer atmosphärischen Schicht d , welche eine gleiche Wirkung ausübt, in der fünften die Kohlensäuremenge L der Atmosphäre in Metern bei 760 mm Druck, in der sechsten endlich der durchschnittliche procentische Kohlensäuregehalt k , auf normalen Barometerstand bezogen.

Tabelle 5.

p	B	i	d	L	k
0,2	0,22	0,044	0,8	1,25	0,0156
0,3	0,26	0,078	0,6	1,67	0,0208
0,4	0,30	0,12	0,4	2,50	0,0312
					20*

Was nun den Kohlensäuregehalt der Atmosphäre betrifft, so sind zwar zahlreiche Bestimmungen hierüber an der Erdoberfläche von verschiedenen Forschern ausgeführt, die Beobachtungsfehler bei diesen Bestimmungen sind indess im allgemeinen gross. Wenn wir nur die letzten Untersuchungen, in welchen genauere Methoden angewandt sind, in Betracht ziehen, so finden wir Werthe des Kohlensäuregehaltes, welche im allgemeinen zwischen 0,02 und 0,04 Proc. liegen. Die neuesten Bestimmungen von Muntz und Aubin¹⁾ geben im allgemeinen niedrige Werthe, nämlich für Vincennes 0,0284, für Cap Horn 0,0256, für das Atlantische Meer 0,0270. Für die schwedische Ostküste (Waxholm) hat Hr. Dr. Selander²⁾ als Mittel aus 263 Bestimmungen 0,0303 gefunden (mit Anwendung der Methode von Pettenkofer).

Wenn wir also den ungefähren Kohlensäuregehalt an der Erdoberfläche ziemlich gut kennen, so wissen wir dagegen sehr wenig von der Ausbreitung der Kohlensäure in den oberen Luftschichten. Hierüber gibt es nur wenig zuverlässige Beobachtungen. Muntz und Aubin haben den Kohlensäuregehalt auf dem Pic du Midi (Pyrenäen, Höhe 2877 m) gleich 0,0286 gefunden; bei der Expedition nach Mount Whitney (Californien, Höhe 3530 m) wurden auch einige Bestimmungen des Kohlensäuregehaltes gemacht, welche als Mittel 0,0194 Proc., also einen sehr niedrigen Werth ergaben.³⁾ Durch diese letzten Bestimmungen wird es sehr wahrscheinlich, dass der procentische Kohlensäuregehalt der Atmosphäre mit der Höhe abnimmt. Wenn dieser Gehalt schon im ersten Drittel der Atmosphäre von 0,030 bis 0,025 auf 0,02 abnimmt, so ist es wohl wahrscheinlich, dass der durchschnittliche Werth des Kohlensäuregehaltes der Atmosphäre unter 0,02 Proc. liegt, also den Werth 0,03 nicht erreichen wird.

1) Muntz u. Aubin, *Compt. rend.* **92**. p. 1229. 1881; **93**. p. 797. 1881; **96**. p. 1793. 1883 und **98**. p. 487. 1884.

2) „Luftundersökningar vid Vaxholms fästning 1885—1886“, Inaug.-Diss. Stockholm 1887.

3) Muntz u. Aubin, *Professional papers of the signal service* Nr. 15, p. 208. 1884.

Hieraus folgt, dass wir die möglichen Werthe des Durchlässigkeitscoefficienten der Kohlensäure für die Sonnenstrahlung, die zu uns gelangt, auf 0,2—0,3 beschränken müssen. Dies ist der Durchlässigkeitscoefficient, wenn die Schichtendicke in Metern ausgedrückt ist; wenn wir aber die Kohensäureschicht, die in einer Atmosphäre enthalten ist, als Einheit nehmen, finden wir den entsprechenden Coefficienten p_1 für $L = 1,25$:

$$(p)^{1,25} = (0,2)^{1,25} = p_1 = 0,134,$$

und für $L = 1,67$: $(0,3)^{1,67} = p_1 = 0,134.$

Als Resultat dieser Betrachtung folgt also, dass ein beträchtlicher Theil der Sonnenstrahlung bei grosser Sonnenhöhe in den Spectralbezirk der Kohlensäureabsorption fällt, dass ferner bei einer Schichtendicke von 1,2 zwischen 0,22 und 0,26 Calorien oder 15,8—18,6 Proc. der ganzen Strahlung diesem Gebiete angehören kann, und dass dieser Theil der Strahlung besonders stark absorbirt wird, indem der Durchlässigkeitscoefficient um 0,134 liegt, also bedeutend kleiner ist als der kleinste von Langley angegebene.

Es ist jetzt zu zeigen, wie weit die oben gefundenen Resultate mit unseren Beobachtungen über die Sonnenstrahlung übereinstimmen. Wir können dann die Strahlung i bei einer Schichtendicke d durch:

$$i = A_1 p_1^d + A_2 p_2^d,$$

ausdrücken, in welcher Formel A_1 und p_1 der schwachen Absorption, A_2 und p_2 der starken Kohlensäureabsorption entsprechen; dabei kann p_1 als ein Mittelwerth der Coefficienten Langley's betrachtet werden. Weil diese Kohlensäureabsorption schon bei einer Schichtendicke von 3 beinahe vollständig vollendet ist, so können wir A_1 und p_1 aus dem unteren Theil der Sonnenstrahlungscurve bestimmen und also die früher angewandten Werthe (s. p. 302) von A_1 und p_1 benutzen. Wenn wir jetzt die oben gefundenen Werthe von p_2 einsetzen, so finden wir:

$$i = 1,56 \times 0,786^d + 2,45 \times 0,134^d.$$

Folgende Tabelle dient zur Vergleichung der Beobachtungen und der nach obiger Gleichung berechneten Werthe.

Tabelle 6.

<i>d</i>	<i>i</i> Ber.	<i>i</i> Beob.	Diff.
1,5	1,207	1,21	+0,003
2,0	1,008	1,00	—0,008
2,5	0,870	0,87	—0,000
3,0	0,763	0,76	—0,003
4,0	0,596	0,60	+0,004
5,0	0,468	0,47	+0,002

Die Uebereinstimmung kann wohl als eine vollständige angesehen werden. Es ist also gezeigt, dass das steile Ansteigen der Strahlungsintensität bei grosser Sonnenhöhe, für welches die Durchlässigkeitscoefficienten Langley's keine Auskunft geben, durch die Kohlensäureabsorption erklärt werden kann.

Wenn wir uns jetzt von dem hier angeführten, leider nur sehr beschränkten Beobachtungsmaterial zu den Bestimmungen der Sonnenstrahlung durch verschiedene andere Forscher wenden, so zeigen sich ganz bedeutende Abweichungen, indem theils die Intensität für dieselbe Sonnenhöhe bedeutende Schwankungen unterworfen ist, theils auch die Krümmung der Intensitätscurve für verschiedene Tage verschieden ist. Das letztere lässt sich auch durch die Kohlensäureabsorption gut erklären. Sobald nämlich der Kohlensäuregehalt, wenn auch nur sehr unbedeutend, wächst, muss die Absorption durch Kohlensäure früher vollendet sein und die von uns beobachtete Strahlungscurve sich besser dem einfachen Absorptionsgesetz anschliessen.¹⁾

Hiermit will ich jedoch nicht behaupten, dass die Kohlensäureabsorption die einzige Ursache der oben erwähnten Variationen der Sonnenstrahlung ist. In der Atmosphäre gibt es gewiss noch andere veränderliche Bestandtheile, die eine Absorption des ultrarothern Theiles des Sonnenspectrums hervorbringen, z. B. Wasserdampf. Auch die schwache Absorption muss beträchtlichen Veränderungen unterworfen

1) Hr. O. Frölich hält dafür, dass das einfache Absorptionsgesetz für die Sonnenstrahlung vollständig exact ist (Wied. Ann. 30. p. 582. 1887). Wenn es in Berlin so ist, so könnte dies vielleicht erklärt werden durch den grösseren Kohlensäuregehalt, der eine Folge des continentalen Klimas und der Nähe der grossen Stadt ist.

sein. Diese Absorption, welche der von Langley nachgewiesenen entspricht, beruht nämlich wahrscheinlich grösstentheils auf den festen Partikelchen der Atmosphäre. Dies scheint schon aus den Beobachtungen von Langley selbst hervorzugehen und gewinnt an Wahrscheinlichkeit durch die fast ganz vollständige Uebereinstimmung dieser Absorption mit der von mir bei trüben Medien gefundenen.¹⁾ Auch die Coëfficienten p von Langley lassen sich nämlich ziemlich gut als Functionen der Wellenlänge ausdrücken in der Form:

$$p = e^{-\kappa\lambda - x},$$

wo λ die Wellenlänge, κ und x Constanten sind.

Ein wichtiger Zweck, welchen man bei Bestimmungen der Veränderungen der Gesamtstrahlung der Sonne verfolgt, ist die Berechnung der sogenannten Solarconstanten oder der Strahlung ausserhalb der Atmosphäre. Eine solche Berechnung der Solarconstanten ist jedoch namentlich aus dem Grunde nicht berechtigt, weil es ohne Zweifel Wärmestrahlen gibt, welche schon in den obersten Schichten der Atmosphäre absorbirt werden. Wenn wir daher die aufgestellte Formel auch nicht benutzen dürfen, um den wahren Werth der Solarconstante zu ermitteln, so können wir doch mit Hülfe derselben den kleinsten Betrag angeben, welchen die zwei Theile — diejenige Strahlung, welche schwach und diejenige, welche von der Kohlensäure stark absorbirt wird — ausserhalb der Atmosphäre haben. Wenn wir $d=0$ setzen, finden wir $i=4$.

Obschon dieser Werth der Strahlung ausserhalb der Atmosphäre grösser ist, als man bis jetzt für die Solarconstante angegeben hat,²⁾ so zweifle ich doch nicht daran, dass der Werth dieser Constanten bedeutend grösser ist, weil es, wie oben gesagt, möglich, ja sogar wahrscheinlich ist, dass es Sonnenstrahlen von bedeutender Stärke gibt, welche niemals zu uns gelangen.³⁾

Stockholms Högskolas Fysiska Inst., Juni 1889.

1) K. Ångström, Öfversigt af K. Vet.-Akad. Förhandlingar Nr. 6. p. 385. 1888 und Wied. Ann. 36. p. 715. 1889.

2) Pouillet hat 1,8, Violle 2,5, Langley 3 gegeben.

3) S. meine vorige Abhandlung p. 27 der schwedischen, p. 292 der deutschen Ausgabe.