

3. Ueber die Gesammtemission glühenden Platins; von F. Paschen.

(Hierzu Taf. I Fig. 1 u. 2.)

Die Abhängigkeit der Strahlung fester Körper von der Temperatur ist seit geraumer Zeit Gegenstand vieler experimenteller und theoretischer Arbeiten gewesen, ohne dass irgend eine Beziehung sicher nachgewiesen ist. Die Versuche, welche vorliegen, haben keine übereinstimmenden Resultate ergeben. Theils waren die Versuchsbedingungen sehr complicirt, wie bei den Messungen der Abkühlungsgeschwindigkeit (Dulong und Petit¹⁾, de la Provostaye und Desains²⁾, Narr³⁾, Grätz⁴⁾) und bei den Messungen der in Strahlung umgesetzten Stromenergie (Schleiermacher⁵⁾, Bottomley⁶⁾), theils mangelte es an einer genügenden Temperaturbestimmung, wie bei den Draper'schen⁷⁾ und Tyndall'schen Versuchen. Die neuesten Messungen von den Hrn. Schleiermacher und Bottomley einerseits und andererseits von Hrn. Schneebeil⁸⁾ stimmen nicht überein.

Als Formeln, welche den Zusammenhang zwischen der Strahlung und der Temperatur darstellen sollen, sind zu nennen: 1) die empirische Formel von Rossetti⁹⁾

$$S = (a T_2^2 - b)(T_2 - T_1),$$

in welcher bedeuten S die durch eine Thermosäule gemessene Strahlung, T_2 die absolute Temperatur des strahlenden Körpers (eines mit Wasser oder Quecksilber gefüllten Leslie'schen Würfels), T_1 die absolute Temperatur der Thermosäule; a und b

1) Dulong u. Petit, Ann. de chim. et de phys. 7. 1817.

2) de la Provostaye u. Desains, Pogg. Ann. 68 u. 69.

3) Narr, Pogg. Ann. 142.

4) Grätz, Wied. Ann. 11.

5) Schleiermacher, Wied. Ann. 26. p. 287. 1885; 34. p. 623. 1888.

6) Bottomley, Phil. Trans. Roy. Soc. London. 42. p. 357—359. 1887.

7) Draper, Phil. Mag. (3) 30.

8) Schneebeil, Wied. Ann. 22. p. 403. 1884.

9) Rossetti, Reale Acc. dei Lincei (3) 2. p. 64. 1878.

sind zwei Constanten, $a = 3,351 \cdot 10^{-6}$, $b = 0,0637$ sind ihre Werthe, welche aus den Versuchen abgeleitet wurden. Die Versuche erstrecken sich auf Temperaturen zwischen 0° und 300° C. Die Formel soll auch für höhere Temperaturen gelten. Doch können die hierzu von Rossetti angestellten Versuche wohl nur als sehr unvollkommen bezeichnet werden.

Zweitens stellte Hr. Stefan¹⁾ eine andere Formel auf, welche mit allen damals vorliegenden Messungen im Einklange stand:

$$S = c (T_2^4 - T_1^4).$$

c ist eine Constante, die anderen Bezeichnungen sind die gleichen, wie in der erwähnten Rossetti'schen Formel. Obwohl die Stefan'sche Formel ihrer Form nach vor der Rossetti'schen den Vorzug verdient, so ist sie von Stefan zunächst nur als eine empirische Beziehung aufgestellt, die vielen Messungen gerecht wird. Aber Boltzmann²⁾ hat diese Formel dann auch aus der electromagnetischen Lichttheorie abgeleitet. Schneebeli's Messungen bestätigten diese Formel. Schleiermacher fand sie nicht gültig.

Die dritte Formel schliesslich ist von Hrn. H. F. Weber³⁾ aufgestellt. Sie soll alle bisherigen Messungen innerhalb der Fehlergrenzen wiedergeben. Die Formel lautet für den Fall, dass die Umgebung des strahlenden Körpers die absolute Temperatur T_1 hat:

$$S = C \cdot F (e^{a T_2} T_2 - e^{a T_1} T_1).$$

C ist eine Constante, F die Grösse der strahlenden Fläche und e die Basis der natürlichen Logarithmen, a eine Constante.

Besonders mit den Messungen von Schleiermacher stimmt diese Formel gut.⁴⁾ Mit Schneebeli's Resultaten ist sie nicht verglichen. Da diese aber das Stefan'sche Gesetz befolgen und von den Schleiermacher'schen Werthen abweichen, kann die Weber'sche Formel Schneebeli's Messungen

1) Stefan, Wien. Ber. (1) **79**. p. 391. 1879.

2) Boltzmann, Wied. Ann. **32**. p. 31 u. 291. 1884.

3) H. F. Weber, Berl. Ak. Ber. **2**. p. 933. 1888.

4) Auch Hr. W. Leconte Stevens (Am. Journ. of Sc. (3) **44**. p. 431. 1892) findet mit der Thermosäule für die Strahlung von Eisen zwischen 15° C. und 110° C. eine bessere Uebereinstimmung mit der Weber'schen Formel, als mit einer anderen.

nicht wiedergeben. Schneebeli's Versuchsanordnung (die Strahlung einer Luftthermometerbirne auf ein Bolometer) war einfacher, als diejenige Schleiermacher's. Welche Messungen indess als richtiger anzusehen sind, dürfte schwer zu entscheiden sein, weil Schneebeli eine Fehlerquelle hatte, die er auch nennt, deren Wirkung aber unübersehbar ist. Auch Weber's Formel ist eine empirische, da ihre Begründung nur durch den Nachweis ihrer Uebereinstimmung mit gewissen Versuchen geschieht.

Um die Sache experimentell zu behandeln, ist es offenbar nöthig, die Temperatur zu kennen, welche die strahlende Oberfläche hat. Dies ist nun überhaupt zur Zeit unmöglich; aber man kann Verfahren anwenden, bei welchen man sehr nahe diese Temperatur misst. Versuche mit thermometerartigen Gefässen sind offenbar sehr ungünstig. Infolge ihrer Strahlung und durch Luftströmung wird die Oberfläche, zumal bei schlechten Wärmeleitern, eine niedere Temperatur haben, als die Füllung, auf deren Temperatur sich die Messung erstreckt. Bei den Abkühlungsversuchen wird z. B. sicher die Temperatur zu hoch gemessen. Dies ist der Einwand, dem auch Schneebeli's Messungen unterliegen, besonders, da er selbst schreibt, dass durch Aufziehen der Klappe zwischen dem Porzellangefäss des Luftthermometers und dem Bolometer der Druck im Manometer etwas sank. Gerade die strahlende Fläche wurde hierbei kälter. Wieviel, entzieht sich der Beurtheilung; aber man muss schliessen, dass Schneebeli zu kleine Strahlungen erhalten hat. Einwandfrei scheint dagegen Schleiermacher's Temperaturmessung. Der strahlende Körper ist hier ein im Vacuum glühender Platindraht. Seine Temperatur wird aus dem electrischen Widerstande gefolgert. Dies wird auch die Temperatur der strahlenden Oberfläche sein.

Eine Anordnung, welche gerade in dieser Beziehung ebenso wie die Schleiermacher'sche günstig ist, habe ich kürzlich beschrieben.¹⁾ Zwei übereinandergelegte Platinbleche werden

1) F. Paschen, Wied. Ann. 48. p. 272. 1893. In dieser Abhandlung sind folgende Druckfehler zu verbessern: p. 277 Z. 5 v. o. lies „überragten“ statt „überragte“; p. 281 Z. 4 v. u. lies „dicke“ statt „Dicke“; p. 285 Z. 1 v. u. lies „empfindlichen“ statt „empfindlicheren“; p. 286 Z. 6 v. u. lies „0,04 Amp.“ statt „0,004 Amp.“

durch den electrischen Strom erhitzt. Sie stehen vertical in freier Luft und sind nur vor unregelmässigen Luftströmungen geschützt. Es stellt sich eine völlig stationäre Temperatur her. Zwischen den Blechen befindet sich die Löthstelle eines geeigneten Thermoelementes. Da alles gut Wärme leitendes Metall ist, und da die strahlende Oberfläche in gleicher Weise, wie das Innere, vom Erhitzungsstrome durchflossen wird, so muss die Oberfläche nahe dieselbe Temperatur wie das Innere haben. Nach einer Rechnung Edlund's¹⁾ kann der Temperaturunterschied zwischen der Oberfläche und dem Inneren höchstens hundertstel Celsiusgrade betragen.

Das vertical gestellte 4 cm lange Platinblech erscheint beim Glühen in seinen mittleren Theilen auf einer Strecke von etwa 2 cm gleich hell. In der Mitte dieser gleichmässig temperirten Strecke ist das Thermoelement eingeführt. Durch geeignete Blenden kann nur die nächste Umgebung der Einführungsstelle des Thermoelementes auf ein Bolometer strahlen.

Ist die Temperaturermittelung eine richtige, so lässt der Versuch in dieser Anordnung weiter keinen Einwand zu, als dass der Bolometerstreif ein selectives Absorptionsvermögen besitzen kann. Hierüber lässt sich allerdings zur Zeit nichts sagen. Diese Unsicherheit haftet an allen bolometrischen Messungen, welche Strahlungen miteinander vergleichen, die aus verschiedenen Wellenlängen in verschiedener Weise zusammengesetzt sind.²⁾ Es schien mir aber trotzdem wichtig, den Versuch zu machen.

Als Bolometer diente das in meinem citirten Aufsatze eingehend beschriebene. Es bestand aus 0,001 mm dickem, mit Petroleumruss geschwärztem Platinblech. Das Galvanometer ist das ebenfalls l. c. eingehend beschriebene. Bei einer Scalenentfernung von 2 m wurden zehntel Millimeter geschätzt. Die gewöhnlich benutzte ganze Schwingungsdauer betrug 5'', für die niedersten Temperaturen 7''. Der erste Ausschlag, der nach 3'' resp. 4'' beendet war, galt als Maass der Strahlung. Die Temperaturempfindlichkeit des Bolometers war etwa 0,041

1) Edlund, Pogg. Ann. 158. p. 153. 1876.

2) Es wäre schliesslich noch an ein selectives Absorptionsvermögen der von der Strahlung durchsetzten Luftschicht zu erinnern, obwohl dies wohl kaum für meine Messungen von Belang ist.

resp. $0,05^{\circ}$ C. pro 1 mm Ausschlag. Trotzdem die strahlende Fläche meistens nur wenige Quadratmillimeter gross war und vom Bolometer 70 cm entfernt stand, reichte diese Empfindlichkeit vollkommen aus. Für die höchsten Temperaturen musste sie durch Schwächung des Hauptstromes noch vermindert werden.

Die ersten Ausschläge des Galvanometers sind bei der beschriebenen Anordnung bis zu Ausschlägen von 400 mm proportional den Stromstärken, wie aus der folgenden Tabelle hervorgeht.

Ein Accumulator wurde durch einen grossen veränderlichen Widerstand R geschlossen. Von einem sehr kleinen Widerstande dieses Stromkreises zweigte man zum Galvanometer ab. Die Ströme, welche die Galvanometerrollen durchflossen, sind dann umgekehrt proportional mit R . Eine Wippe liess den Ausschlag nach links (l) oder rechts (r) erfolgen.

R		10 000		5000		2500		1000		500		250	
Ausschläge		l	r	l	r	l	r	l	r	l	r	l	r
	einzel.	9,0	9,1	18,7	18,2	37,2	36,3	92,4	91,4	183,2	183,4	367,2	365,9
	beob.	9,0	8,8	18,4	18,1	37,1	36,6	92,3	91,6	183,5	183,0	367,1	366,2
	M.	9,0	9,0	18,6	18,2	37,2	36,5	92,4	91,5	183,4	183,2	367,2	366,1

Die Empfindlichkeit des bolometrischen Apparates wurde während jeder Versuchsreihe beständig controllirt. Dafür befand sich vor einem Bolometerzweige ein Nebenschluss von 10 000 Ohm, der sich entweder um 10, oder 20 oder 40 Ohm verändern liess.¹⁾

In einer Entfernung von 60 cm vor dem Streif des Bolometers befanden sich: 1. ein Spalt mit variirbarer Breite, und 2. je nach Bedürfniss Blenden verschiedener Oeffnung aus stark glänzendem Eisen-Zink-Blech; 3. unmittelbar vor diesen ein vom Fernrohr aus aufziehbares Fallbrett aus dickem blanken Metall. 8 cm vor diesem Schieber war der Platinstreif ausgespannt. Bei heruntergelassenem Schieber strahlten die blanken Blenden, deren Temperatur sich ausserordentlich wenig änderte, auf das Bolometer. Durch Aufziehen der Klappe

1) Vgl. K. Ångström, Oefversigt af K. Vet. Akad. Förhandl. p. 379. 1888 und H. Rubens u. R. Ritter, Wied. Ann. 40. p. 62. 1890

gelangte je nach Grösse der Blenden von einer 1—40 qmm grossen Fläche des Platinstreifs die Strahlung zum Bolometer.

Die Temperaturmessung ist durch weitere Aichungen mit siedendem Anilin, schmelzendem Blei und siedendem Schwefel für niedere und durch Berücksichtigung der von Holborn und Wien¹⁾ für Gold (1072° C.) und Silber (968°) gefundenen Schmelzpunkte für höhere Temperaturen verbessert. Ein weiterer Anschluss an die Arbeiten von Holborn und Wien war nicht möglich, da ich nicht chemisch reines Platin im Thermoelement hatte. Alles für die Temperaturmessung Wichtige findet sich in der folgenden Zusammenstellung. Es bedeuten: T_1 die Temperatur des Terpentinbades, in dem die zwei anderen Löthstellen liegen; T_2 die Aichungstemperatur in Celsiusgraden; n den Ausschlag des Galvanometers, welcher der Temperaturdifferenz ΔT entspricht. x bedeutet den Ausschlag in Millimetern pro 1° C. Temperaturdifferenz zwischen T_1 und T_2 , wenn zwischen T_1 und 100° pro 1° C. Temperaturdifferenz 1 mm Ausschlag erfolgt: Beidemale vorausgesetzt, dass die Ausschläge proportional den Temperaturen sind. Die letzte Spalte stellt den Quotienten $n^{3/4} / \Delta T$ dar, der sich zwischen 400° und 1500° als constant erweist.²⁾ Der unsichere Punkt für schmelzendes Platin fällt wieder heraus. Die Werthe dieser Quotienten wurden graphisch aufgetragen und durch einen im Anfange sich den Punkten anschmiegenden Curvenzug, von 427° an aber geradlinig verbunden. Diese Curve diente zur Ermittlung der Zwischenpunkte.

	T_1	T_2	ΔT	n	x	$n^{3/4} / \Delta T$
H ₂ O Sp.	25	100	75	17,58	1	0,11 447
Anilin Sp.	20	183	163	45,45	1,190	0,10 738
Pb Sm	22,2	326	303,8	99,42	1,396	0,10 363
S Sp.	19,9	447,5	427,6	154,5	1,542	0,10 249
Ag Sm	22	968	946	442,4	1,995	0,10 198
Au Sm	22	1072	1050	509,1	2,069	0,10 207
Pd. Sm	27	1500	1473	803,5	2,327	0,10 247
Pt. Sm	25	1775	1750	975,0	2,377	0,09 973

1) Holborn u. Wien, Wied. Ann. 47. p. 107. 1892.

2) Diese empirische Beziehung, die natürlich nur für die von mir verwendete Platinsorte gültig ist, ist durch die von Holborn und Wien gefundenen Schmelzpunkte für Gold und Silber besser geworden (vgl. die ähnliche Zusammenstellung l. c. p. 289).

Bei der Messung der Temperatur des vom Strom durchflossenen Platinbleches trat die Schwierigkeit ein, dass immer ein Theil des Erhitzungsstromes durch den Kreis des Thermoelementes fließt. Man kann dies durch Commutiren des Erhitzungsstromes zwar leicht eliminiren; aber wenn die in die Spalte zwischen den Blechen eintretenden Drähte nicht sehr nahe beisammenliegen, erhält man derartige Galvanometerablenkungen, dass eine Scala von 1 m Länge nicht ausreicht. Um mit einer solchen arbeiten zu können, habe ich früher viel Mühe auf das passende Einführen der Drähte in die Spalte verwenden müssen. Sie sollen so nahe wie möglich beisammenliegen, sich aber ausserhalb der Spalte nicht mehr berühren. Dies ist jetzt durch folgendes Verfahren sehr einfach geworden. Ehe die Drähte zusammengeschmolzen werden, klopft man jeden für sich am Ende in ein breites Bändchen aus: etwas bis zu einer Dicke von $\frac{1}{100}$ mm. Dann werden die zwei Bändchen aufeinandergelegt und am Ende zusammengeschmolzen. Die Schmelzstelle wird nochmals plattgeschlagen und durch geeignetes Beschneiden recht klein gemacht. Führt man sie nun in die Spalte zwischen den zwei Blechen ein, so ist es ein Leichtes, den vom Erhitzungsstrom herrührenden Zweigstrom durch geringes Verschieben eines der Drähte fast völlig zu vermeiden. Hat man solche Stellung des Thermoelementes gefunden, so steigert man die Temperatur des Platinbleches auf 1500° C. Dann schweisst die eingeführte Lötstelle an den Innenwänden so fest, dass sie sich nicht mehr, ohne zu zerreißen, herausziehen lässt. Darauf presst man die Blechwände noch gehörig an und achtet darauf, dass die Drähte sich bei ihrem Austritt aus der Spalte nicht berühren. Schliesslich vernichtet man durch Glühen der Drähte ihre Spannungen, damit sich die eingeführten Theile des Thermoelementes bei den Temperaturen, bei denen die an ihnen liegenden Plattenwände weicher werden, nicht verschieben.

Es ist mir der Einwand gemacht, dass die eingeführte Schmelzstelle des Thermoelementes die Temperatur der sie umgebenden Blechwände nicht ganz annehmen könnte. Die Schmelzstelle ist etwa $\frac{1}{50}$ bis $\frac{1}{100}$ mm dick und 0,2 mm breit. Zu beiden Seiten fest angepresst liegen zwei Platinwände von je $\frac{1}{10}$ mm Dicke und 4 mm Breite. Die eingeführte Platin-

masse wird mit vom Strom durchflossen. Es ist an dieser Stelle kein Helligkeitsunterschied zu sehen. Auch glühen die heraustretenden Drähte noch etwa $\frac{1}{4}$ mm weit mit derselben Helligkeit, wie das Blech.

Die Schmelzstelle kann aus zwei Gründen eine niedrigere Temperatur haben; 1. infolge der durch sie auf einer Länge von 0,2 mm herbeigeführten Querschnittsvergrößerung um etwa 10 Proc.; 2. infolge der Wärmeableitung durch die zwei herausragenden Drähte. Ich habe früher, soweit es die Genauigkeit meiner Messungen gestattete, gefunden, dass man für einen gleichen Erhitzungsstrom immer dieselbe Temperaturangabe des Thermoelementes erhält, ob man die Drähte mehr oder weniger platt schlägt, ob man sie tiefer (bis 3 mm) einführt, oder nur $\frac{1}{2}$ mm tief.

Ich habe nunmehr noch den folgenden Versuch gemacht: Statt zweier übereinandergespresster Platinstreifen habe ich deren vier genommen und zwischen die zwei mittleren das Thermoelement eingeführt, sodass also jetzt beiderseits eine Platinwand von doppelter Dicke an der Löthstelle lag. Es war vorher bei dem zweifachen Blech der einer bestimmten Temperatur entsprechende Ausschlag gemessen. Nun wurde das vierfache Blech möglichst an die gleiche Stelle gesetzt, wo vorher das Doppelte stand, zur selben Temperatur erhitzt, und seine Strahlung gemessen. Es war dafür gesorgt, dass die gleiche Oberfläche, welche vorher strahlte, auch jetzt wieder vorne war. Es liess sich aber nicht vermeiden, dass sie sich beim Andrücken und Plattstreichen änderte. Ich erhielt so grosse Abweichungen. Bei einer Temperatur von 1170° C. gab das Blech von doppelter Dicke den Ausschlag 229 mm, darauf ein Blech von vierfacher bei gleicher Temperatur den Ausschlag 199 mm. Zu einem Ausschlage von 229 mm würde die Temperatur von 1206° C. nöthig gewesen sein. Doch ist dies sicher eine obere Grenze; denn bei einer nachherigen Berücksichtigung stellte sich heraus, dass gerade an der Stelle, wo das Thermoelement sass, das Blech infolge ungleichmässigen Querschnittes eine höhere Temperatur gehabt haben musste. Bevor ich die richtige Temperatur traf, hatte ich eine höhere genommen. Es zeigten sich nun im Innern, dort, wo das Thermoelement sass, die Blechwände aneinandergeschweisst,

sodass das Thermoelement beim Herausschaben zerriss. Die übrigen Theile des Bleches waren noch nicht aneinandergeschweisst. Ein neues Blech von vierfacher Dicke und von gleichmässigerem Querschnitt ergab für die Temperatur 1170°C . den Ausschlag 239,3 mm. Hier würde das Thermoelement bei dem Ausschlage 229 mm die Temperatur 1155°C . angezeigt haben: also sogar eine zu niedrige.

Der Versuch ist in dieser Weise bei meiner Anordnung nicht exacter zu machen. Denn erstens kann die Oberflächenbeschaffenheit des Platins bei dem zum Einsetzen des Thermoelementes nöthigen Verfahren geändert sein. Zweitens ist es nicht möglich, das Blech wieder so vor die Blenden zu setzen, wie es vorher stand. Ganz ähnliche Differenzen traten schon auf, wenn man das Blech fortnahm und wieder hinsetzte. Als nach den beschriebenen Versuchen ein Blech von doppelter Platindicke wieder eingesetzt war, ergab sich für die Temperatur 1170°C ., der Ausschlag 217,2 mm. Dem Ausschlage 229 mm würde dann eine Temperatur 1184°C . entsprechen.

Der folgende Weg scheint besser, die Sache zu prüfen: Wenn das Thermoelement infolge der localen Querschnittsvermehrung nicht völlig die Temperatur annimmt, welche die Bleche haben, so muss dies bei dem Blech doppelter Dicke unvollkommener geschehen, als bei demjenigen vierfacher Dicke. Die Curve, welche für das letztere Blech die Abhängigkeit der Strahlung von der Temperatur darstellt, muss der Wirklichkeit näher kommen, als bei demjenigen doppelter Dicke. Es zeigte sich nun, und wird weiter unten ausführlich belegt, dass beide Curven durchaus das gleiche Gesetz befolgen. Hiermit ist bewiesen, dass die locale Querschnittsvermehrung keine für meine Messungen merkbare Temperaturdifferenz erzeugt.

Es ist nun noch ein merkwürdiger Umstand zu erwähnen. Der Strahlungsausschlag zeigte sich abhängig von der Richtung des Erhitzungsstromes. Das Commutiren geschah in der Weise, dass dieselben zwei Kupferbügel in verschiedener Weise je zwei von vier Quecksilbernäpfen verbanden. Weiter wurde dabei nichts geändert. Der Widerstand des Stromkreises war also in beiden Fällen genau der gleiche. Bei einer Temperatur von 1150°C . ergab sich z. B. ein Ausschlag von 380 mm, wenn der positive Strom das Blech von unten nach

oben durchfloss, ein solcher von 370 mm für die umgekehrte Stromrichtung. Bei einer Temperatur von 810° waren diese Ausschläge 47,8 und 45,6 mm. Ich vermute, dass Thermoströme dies verursachen, die einmal den Accumulatorenstrom verstärken und ihn in der anderen Anordnung vermindern. Solche Thermoströme konnten z. B. durch folgenden Umstand eintreten: Die obere Klemme des Platinbleches befand sich in der heissen Luft, die vom Blech aus sie umströmte. Bei den ersten Versuchen kam es vor, dass sie rothglühend wurde, während man die untere Klemme noch anfassen konnte. Das obere Blech wurde deshalb nach hinten abwärts gebogen und durch einen Schirm vor der heissen Luft geschützt. Ferner umgab man die den Klemmen zunächst befindlichen Theile des Platinstreifs mit dickem Platinblech, sodass diese Theile sich durch den Strom weniger erhitzen. Auf diese Weise vermeidet man auch die Störungen, die durch Oxydation der mit *glühendem* Platin in Berührung stehenden Kleinmentheile eintreten.

Die Verschiedenheit der Ausschläge wurde hierdurch wohl geringer, blieb aber immer noch bemerklich. Diese Verschiedenheit war ferner im Anfang einer Versuchsreihe geringer, sogar oft unmerklich, und trat erst nach längerem Glühen hervor. Man muss bedenken, dass die Strahlung mit einer hohen (> 8 .) Potenz der Stromstärke proportional ist. Aus diesem Grunde war die Accumulatorenatterie von grossem Werthe.

Ich habe nun nichts anderes thun können, als abwechselnd bei den verschiedenen Stromrichtungen die Strahlungen messen und das Mittel nehmen. Eine Beobachtung verlief dann z. B. folgendermaassen:

Lage der Kupferbügel	×	=	×
Ausschlag des Thermoelements	576,0	565,6	577,0
Strahlungs-Ausschläge {	225,0	227,5	225,5
	225,3	228,8	225,3
Mittel	225,2	228,2	225,4
Ausschlag des Thermoelements	577,5	566,5	577,0
Temp. d. Terpentins $^{\circ}$ C.	19,5		19,8

Mittel: Thermoelement = 571,5 mm. Bolometer = 226,7 mm.

Die Ausschläge des Thermoelementes müssen natürlich auch, wenn auch weit weniger, durch die Verschiedenheit beeinflusst sein; dies entgeht aber infolge des vom Erhitzungsstromes herrührenden Zweigstromes, der überwiegt.

Das ganze durchmessene Temperaturintervall von 100°C. bis 1450°C. lässt sich nicht mit der gleichen Galvanometerempfindlichkeit durchmessen, wenn die Ausschläge 400 mm nicht übersteigen sollen. Demgemäss habe ich drei Gruppen von Messungen gemacht. Die eine Gruppe umfasst niedere Temperaturen von $100\text{--}600^{\circ}\text{C.}$, die zweite mittlere von $350\text{--}950^{\circ}$, die dritte die höchsten Temperaturen von $600\text{--}1450^{\circ}\text{C.}$ Aus einer Gruppe theile ich ausführliches Beobachtungsmaterial mit, aus den beiden anderen je die Resultate einer Messungsreihe.

Es bedeuten T' die Temperatur des Terpentins, n den reducirten Ausschlag des Thermoelementes. Die geringen Aenderungen im Kreise des Thermoelementes wurden mit einem zweiten Thermoelement mit Hülfe der Temperatur 100° ermittelt. Die Ausschläge wurden dann so reducirt, dass aus den oben p. 55 gegebenen Daten die Temperatur ermittelt werden konnte. ΔT ist die n entsprechende Temperaturdifferenz. T_2 ist die Temperatur des Platinbleches, T_1 die der Umgebung des Bolometers. S ist der Strahlungsausschlag. Die letzte Columnne enthält den Ausdruck, der nach Stefan's Formel constant sein sollte.

Niedere Temperatur. Blech doppelter Dicke. Blendenöffnung horizontal = 2 mm, vertical = 2 cm.

$T' \text{ }^{\circ}\text{C.}$	n	ΔT $^{\circ}\text{C.}$	T_2		T_1 absol. = 273 +	S corr.	$(S / (T_2^4 - T_1^4))^{10^6}$
			$^{\circ}\text{C.}$	absol.			
17,2	23,0	92,9	110,1	383,1	16,0	2,63	1,809
17,3	32,4	122,5	139,8	412,8	16,3	4,63	2,099
17,5	43,3	156,4	173,9	446,9	16,4	8,06	2,452
17,7	72,8	237,1	254,8	527,8	16,4	21,14	2,998
17,8	110,9	330,8	348,6	621,6	16,5	55,65	3,911
18,0	147,3	412,2	430,2	703,2	16,6	114,2	4,810
18,2	174,2	468,2	486,4	759,4	16,7	181,1	5,566
18,3	193,4	506,5	524,8	797,8	16,9	246,7	6,200
18,5	230,2	577,4	595,9	868,9	16,6	399,7	7,105

Mittlere Temperatur. Blech vierfacher Dicke. Blendenöffnung
horizontal = 2 mm, vertical = 9 mm.

T_1 absol.	T_2 absol.	S corr.	$[S/(T_2^4 - T_1^4)] 10^{11}$
291,3	499,1	3,33	6,06
291,4	634,6	12,22	7,887
291,3	753,7	34,50	10,93
291,3	878,0	83,88	14,29
291,6	984,1	165,0	17,73
291,6	1058	244,4	19,61
291,6	1146	390,9	22,76
291,7	1054	239,6	19,53
291,8	908,1	101,3	15,05
291,8	797,0	47,27	11,93
291,9	618,3	10,75	7,745

Höchste Temperatur. Blech zweifacher Dicke. Blendenöffnung
horizontal 2 mm, vertical 3 mm.

T_1 absol.	T_2 absol.	S corr.	$[S/(T_2^4 - T_1^4)] 10^{11}$
288,9	871,4	8,83	1,55
289,0	986,5	18,27	1,94
289,2	1076	29,69	2,23
289,3	1227	61,22	2,710
289,3	1349	102,2	3,094
289,3	1493	173,2	3,487
289,3	1602	256,3	3,896
289,4	1066	28,80	2,243
289,7	1722	374,7	4,266
289,8	1072	29,43	2,240

Die verschiedenen Messungsreihen wurden nun zunächst innerhalb jeder Gruppe zur Berechnung einer mittleren Curve verwerthet. Alle Curven gehen durch Multiplication je mit einem gewissen Factor, in einander über. Dieser, für jede Reihe constante Factor ist graphisch ermittelt. Mit ihm sind die beobachteten Strahlungen jeder Reihe multiplicirt. Aus einer graphischen Darstellung entnahm man dann für gleiche Temperaturen die Ordinaten aus den verschiedenen Curven. Diese finden sich in der folgenden Zusammenstellung, in der also jede Verticalspalte eine Curve darstellt, die durch Multiplication mit einem constanten Zahlenfactor aus der beobachteten hervorgegangen ist. Dieser Zahlenfactor findet sich unter der Nummer der Reihe. Ebenso die mittlere Temperatur T_1 in ° C.

Niedere Temperaturen.

Reihe Nr. 1	2	3	4	5	I	IV	V	VII	VIII	IX		
Factor T_1 ° C.	0,7167 16,5	1,000 16,5	1,067 17,0	2,478 16,3	5,705 15,5	2,78 17,3	5,286 17,0	32,99 17,5	1,329 17,7	5,115 18,6	2,727 17,8	Mittel
T_2 ° C.												
100	4,3	2,2	—	—	—	—	—	—	3,1	—	—	2,65
150	6,7	5,8	5,0	—	—	—	—	—	6,5	—	—	5,77
200	11,3	11,8	10,3	—	—	25,8	—	—	12,2	—	12,3	11,65
250	17,8	20,0	19,4	21,7	—	35,0	18,8	—	20,8	21,7	20,7	20,62
300	29,7	34,2	34,7	36,0	—	46,5	36,2	—	33,8	35,2	34,5	34,94
350	46	56,2	57,2	58,0	—	60	63,5	—	54,0	56,7	56,0	57,34
400	—	89,5	91,2	86,0	91,0	85	101,5	—	88,2	92,5	88,0	90,99
450	—	134	140,6	135,0	138	120	150,0	140,5	132	135,5	136	137,6
500	—	202	209,0	197,3	206	176	217	197	193,5	200	203	202,8
550	—	299	306,0	298,5	285	251	313	293	290	299	297	297,4
600	—	408	424	410,5	400	—	412	445	462	413,5	413	420,8

Mittlere Temperaturen.

Reihe Nr. 2	3	4	5	6	III	IV	VII	VIII	IX		
Factor T_1 ° C.	0,1925 16,5	0,2015 17,0	0,4864 16,3	1,095 15,5	2,101 16,4	0,9729 15,9	0,9834 17,0	0,2603 17,7	1,000 18,6	0,5343 17,8	Mittel
T_2 ° C.											
350	10,9	10,8	11,4	—	—	—	12,3	10,8	10,8	11,0	11,14
400	17,1	17,2	17,5	17,7	—	—	19,3	17,2	17,4	17,3	17,59
450	26,0	26,0	26,4	25,8	—	—	28,3	26,0	27,0	26,6	26,51
500	38,9	38,9	39,3	37,6	—	—	40,0	38,2	39,7	39,5	39,01
550	56,7	56,7	56,5	54,5	—	—	57,0	55,0	56,0	57,3	56,21
600	79,8	79,7	80,0	76,3	80,5	80,3	79,8	78,1	78,2	81,4	79,41
650	—	—	110,8	107,5	111	110,5	108,8	—	113	113	110,66
700	—	—	154,5	144	151	149	148	—	154	152	150,36
750	—	—	202	194,5	204	206	197	—	204	202	201,4
800	—	—	—	260	270	274	257	—	267	—	265,6
850	—	—	—	335	353	349	328	—	347	—	342,4
900	—	—	—	416	445	—	—	—	—	—	430,5
950	—	—	—	520	559	—	—	—	—	—	539,5

Hohe Temperaturen.

Reihe Nr. 8	5	4	6	7	III	IV	V	VIII	VI	II		
Factor T_1 °C.	1,000 16,3	0,1224 15,5	0,05378 16,3	0,2314 16,4	2,188 17,3	0,1067 15,9	0,1111 17,0	0,6985 17,5	0,1096 18,6	1,042 17,3	0,5663 16,5	Mittel
T_2 °C.												
600	9,0	8,7	8,6	9,0	—	9,0	9,0	9,2	8,4	—	10,9	8,86
650	12,2	12,0	12,2	12,3	—	12,0	12,3	12,3	12,0	—	14	12,16
700	17,0	16,2	16,8	17,0	—	16,4	16,4	16,6	16,4	—	18,4	16,6
750	22,0	21,2	22,5	22,6	—	22,0	22,1	22,3	21,7	—	23,8	22,05
800	29,0	28,2		29,6	—	29,2	29,3	28,9	28,5	29,6	30,3	29,04

Reihe Nr. 8	5	4	6	7	III	IV	V	VIII	VI	II		
Factor T_1 ° C.	1,000 16,3	0,1224 15,5	0,05378 16,3	0,2314 16,4	2,188 17,3	0,1067 15,9	0,1111 17,0	0,6985 17,5	0,1096 18,6	1,042 17,3	0,5663 16,5	Mittel
850	38,5	36,3	—	38,0	—	37,8	37,6	36,7	36,6	36,8	37,6	37,26
900	48,5	46,1	—	48,2	—	—	—	47	—	47,5	46,4	47,46
950	59,5	56,8	—	60,0	—	—	—	58,3	—	60,0	57,3	58,92
1000	74,5	—	—	74,5	77,8	—	—	73	—	74,8	71,2	74,92
1050	91,5	—	—	—	95,4	—	—	89,7	—	92,4	87	92,25
1100	111,8	—	—	—	115,5	—	—	111,8	—	113,5	105,3	113,15
1150	135	—	—	—	136,5	—	—	136,8	—	137,0	126	136,3
1200	162,5	—	—	—	161,4	—	—	163,5	—	165,5	150,7	163,2
1250	195	—	—	—	191,3	—	—	192,5	—	198,5	178,7	194,3
1300	234	—	—	—	227,2	—	—	228,5	—	236,5	210	231,6
1350	273,5	—	—	—	273,2	—	—	277	—	282,0	—	276,4
1400	322	—	—	—	323,2	—	—	327	—	332	—	326,1
1450	375	—	—	—	372,6	—	—	377,8	—	391	—	379,1

In den Tabellen für niedere und hohe Temperaturen finden sich drei Reihen, welche etwas mehr von den anderen abweichen, als diese unter sich: die Reihen 1, I und II. Reihe 1 ist die erste mit doppeltem Blech beobachtete; bei der übrigens noch eine andere Störung vorhanden war. Reihe I und II stellen die zwei ersten Beobachtungen dar, die mit dem Blech vierfacher Dicke angestellt sind. Ich muss es unentschieden lassen, ob das Abweichen dieser Reihen daher rührt, dass die Oberfläche erst nach längerem Glühen bei hoher Temperatur eine constante Emissionsbeschaffenheit annimmt, obwohl es sehr plausibel scheint (nach längerem Glühen bei 1400° C. wird eine blanke Platinoberfläche matt). Alle anderen Reihen stimmen gut untereinander überein, und zwar war in den mit 1, 2, 3 . . . 8 bezeichneten Reihen das Blech von doppelter, in den mit I, II . . . IX bezeichneten Reihen von vierfacher Dicke. Beide Arten Reihen unterscheiden sich nicht (vgl. p. 58).

Mit Ausschluss der drei bezeichneten und in der Zusammenstellung mit *schrägliegenden Zahlen gedruckten* Reihen, über deren Abweichung ich keine sichere Rechenschaft geben kann, die aber doch ihrem Verhalten nach mit den anderen nicht vergleichbar scheinen, habe ich die übrigen zu mittleren Reihen vereinigt.¹⁾ Aus den drei mittleren Curven, welche

1) Diese mittleren Reihen beziehen sich also auf Platin, welches bereits vorher längere Zeit bei mindestens 1400° C. geglüht hat.

so für die drei Gruppen entstehen, lässt sich dann eine einzige Curve bilden, welche zwischen 100 und 1450° C. die Abhängigkeit der Strahlung S von der Temperatur T_2 darstellt. Diese Curve gebe ich hierunter. Die Temperatur des Bolometers schwankte bei den verschiedenen Messungen zwischen 15,5 und 18,6° C. Mit dem Mittel 17° C. oder 290° abs. Temp. habe ich die Constante der Stefan'schen Formel berechnet und mit angeführt. Man sieht, dass diese Grösse von $4 \cdot 10^{-11}$ bis $39 \cdot 10^{-11}$ in dem von mir untersuchten Temperaturintervall zunimmt.

Mittlere Curve der Strahlung von Platin als Function der Temperatur
($T_1 = 290^\circ$ abs.).

$T_2 \begin{cases} ^\circ \text{C.} \\ \text{abs. T.} \end{cases}$	100 373	150 423	200 473	250 523	300 573	350 623	400 673
S	0,508	1,106	2,234	3,954	6,696	11,07	17,52
$[S/(T_2^4 - T_1^4) \cdot 10^{11}]$	4,15	4,43	5,21	5,84	6,65	7,67	8,85

$T_2 \begin{cases} ^\circ \text{C.} \\ \text{abs. T.} \end{cases}$	450 723	500 773	550 823	600 873	650 923	700 973	750 1023
S	26,45	38,95	56,62	80,25	110,7	150,8	201,1
$[S/(T_2^4 - T_1^4) \cdot 10^{11}]$	9,94	11,11	12,53	13,99	15,40	16,96	18,48

$T_2 \begin{cases} ^\circ \text{C.} \\ \text{abs. T.} \end{cases}$	800 1073	850 1123	900 1173	950 1223	1000 1273	1050 1323	1100 1373
S	265,0	340,8	431,3	538,0	682,0	839,8	1031
$[S/(T_2^4 - T_1^4) \cdot 10^{11}]$	20,10	21,53	22,87	24,10	26,05	27,47	29,05

$T_2 \begin{cases} ^\circ \text{C.} \\ \text{abs. T.} \end{cases}$	1150 1423	1200 1473	1250 1523	1300 1573	1350 1623	1400 1673	1450 1723
S	1241	1485	1769	2108	2516	2968	3451
$[S/(T_2^4 - T_1^4) \cdot 10^{11}]$	30,18	31,56	32,92	34,49	36,31	37,92	39,17

Besser, als Stefan's Formel, schliesst sich die Weber'sche meinen Werthen an, aber sie ist doch nicht geeignet, meine Beobachtungen genau darzustellen. Bis zu einer Temperatur von 1050° wächst die Strahlung des Platins nach meinen Messungen schneller, von hier an aber langsamer, als Weber's Formel erfordert. Diese Formel lässt sich für meine Versuche passend so schreiben:

$$S = C \cdot F \cdot e^{a \cdot T_1} \cdot T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} e^{a(T_2 - T_1)} - 1 \right).$$

a soll nach Weber für alle festen Körper den Werth 0,0043 haben. Da $T_1 = 290^\circ$ abs. ist, so kann man schreiben:

$$S = \mathfrak{C} \left(\frac{T_2}{290} e^{0,0043 (T_2 - 290)} - 1 \right),$$

wo \mathfrak{C} eine neue Constante ist. In dieser Form habe ich sie benutzt und \mathfrak{C} berechnet. Schliesslich habe ich noch die Constante a der Rossetti'schen Formel aus meinen Beobachtungen berechnet. Zum Vergleiche stelle ich die Resultate dieser Berechnungen in der folgenden Tabelle zusammen.

Berechnung der Constanten \mathfrak{C} der Weber'schen und a der Rossetti'schen Formel.

T_1	$T_1 - 290$	S	$\frac{T}{290} e^{0,0043 (T - 290)} - 1$	\mathfrak{C}	$a \cdot 10^7$
423	133	1,106	1,590	0,6958	1,023
573	283	6,696	5,674	1,181	
723	433	26,45	15,05	1,757	
873	583	80,25	35,95	2,233	3,662
1023	733	201,1	81,50	2,467	
1173	883	431,3	179,3	2,406	
1323	1033	839,8	386,5	2,172	6,50
1473	1183	1485	822,8	1,805	
1573	1283	2108	1349	1,563	
1723	1433	3451	2817	1,222	15,48

Auf Fig. 1, Taf. I, finden sich: 1. die beobachtete Curve, 2. eine nach Stefans, 3. eine nach Weber's und 4. eine nach Rossetti's Formel berechnete Curve. Die Curven sind nach zwei verschiedenen Maassstäben aufgetragen, um das Verhalten bei niederen Temperaturen hervortreten zu lassen.

Mit den Resultaten Schleiermacher's und Bottomley's stimmen meine Werthe nicht. Die Methode dieser Beobachter ergab ein langsames Wachsen der Strahlung innerhalb des von ihnen untersuchten Temperaturintervalles etwa der Weber'schen Formel entsprechend. Den Grund hierfür weiss ich nicht.

Trägt man die Constante der Stefan'schen Formel als Function der Temperatur auf (Fig. 2, Taf. I, Curve 1), so erscheint diese Curve zwischen 400° C. und 1450° C. als gerade Linie; unterhalb 400° fällt diese Linie langsamer. In Curve 2 ist derselbe Ausdruck aufgetragen, wie er sich nach Schleiermacher's Messungen ergibt. Curve 3 stellt die Constante \mathfrak{C} der Weber'schen Formel als Function der Temperatur dar.

Es wäre wichtig, diese Messungen mit einem schwarzen Körper anzustellen, da es möglich ist, dass sich das Emissionsvermögen der Metalloberfläche mit der Temperatur so stark ändert, dass infolgedessen die Abweichung von einem der Strahlungsgesetze entsteht.

Ich habe daher den Platinstreif auf der zum Bolometer strahlenden Fläche über der Petroleumlampe berusst, und zwar nur so stark, dass eben jeglicher metallischer Glanz verschwand, und die Fläche tief schwarz erschien. In dieser Anordnung konnte man das Platin über 500° C. erhitzen, ohne dass der Russ verbrannte. Die Messungen, welche mit ihm angestellt sind (2), sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die letzten beiden Horizontalspalten derselben enthalten die aus den Beobachtungen berechneten Constanten der Formeln von Stefan und Weber.

Die Strahlung des Russes. $T_1 = 288,3$ abs. Blenden von 2×9 mm.

$T_2 \begin{cases} ^\circ \text{C.} \\ \text{abs. T.} \end{cases}$	78,3	100	150	200	250	300	350	400	450	492,4
S	351,3	373	423	473	523	573	623	673	723	765,4
$\{S/(T_2^4 - T_1^4)\}^{1/10}$	8,23	12,7	26,9	48,4	81,3	126	186	269	389	506,2
C	9,82	10,23	10,72	11,21	11,97	12,49	12,94	13,58	14,61	15,06
	13,76	14,73	16,64	18,39	20,44	21,88	22,93	24,00	25,50	25,78

Es ergibt sich auch hier ein schnelleres Steigen (für niedere Temperaturen), als nach einer der beiden Formeln zu erwarten ist. Aber die Zunahme der Strahlungsintensität mit der Temperatur ist langsamer, als beim Platin, liegt also dem Stefan'schen oder Weber'schen Gesetz näher. In Fig. 2, Curve 4 und 5 ist die Stefan'sche, bez. Weber'sche Constante als Function der Temperatur gezeichnet. Das Gesagte geht aus dieser Zeichnung hervor.

Bei dieser Anordnung ist nun Folgendes zu bemerken. Da die strahlende Russschicht nicht selber mit vom Strome durchflossen wird und dazu ein schlechter Wärmeleiter ist, aber ein etwa zehnmal grösseres Emissionsvermögen als Platin hat (wenigstens bei den untersuchten Temperaturen), so ist zu schliessen, dass die Temperatur der strahlenden Fläche sicher niedriger ist, als die des Platins: um welchen Betrag, ist schwer zu sagen. Die Differenz wird aber mit steigender Temperatur grösser werden; folglich muss ein zu langsames Wachsen der Strahlung beobachtet werden. Ich schliesse

hieraus, dass auch Petroleumruss weder dem Stefan'schen, noch dem Weber'schen Gesetze folgen kann, sondern ein ähnliches Gesetz befolgt, wie Platin.

Bemerkenswerth ist noch folgende Erscheinung. Die Temperatur des einseitig berussten Platinstreifs war bis etwa 650°C . gesteigert, und der Strahlungsaussschlag betrug über 300 mm Scalentheile. Da trat ein Schwanken und eine schnelle Abnahme in der Strahlung ein, bis der Ausschlag nur mehr 125 mm betrug. Zugleich stieg aber die Temperatur des Bleches auf ca. 700°C . Es zeigte sich, dass der Russ vom Platinblech fortgebrannt war. Trotz höherer Temperatur gab die Platinoberfläche dreimal kleinere Platinausschläge. Bei gleicher Temperatur und gleichen Blenden gab Russ ca. zehnmal grössere Ausschläge, als Platin. Wenn aber die Strahlung des Platins schneller mit der Temperatur zunimmt, als die des Russes, wie es nach meinen Versuchen immerhin wahrscheinlich ist, so müssen diese Unterschiede bei höherer Temperatur kleiner werden.

Ich füge noch eine Zusammenstellung über die Zunahme der Intensität homogener, vom Platin ausgesandter Strahlungen hinzu, die ich in meiner früheren Arbeit nur graphisch wiedergegeben habe. Diese Messungen sind mit Rücksicht auf die verbesserte Aichung des Thermoelementes p. 55 neu berechnet. Die Gestalt der früher gegebenen Curven ist dadurch nicht erheblich geändert. An diesen Curven (Fig. 9, Taf. I l. c.) kann man sehen, dass die Intensität derjenigen Wellenlängen, bei denen das Maximum der Energie liegt, noch schneller zunimmt, als die für die Gesammtemission, also für höhere Temperaturen mehr dem Weber'schen Gesetz entsprechend. Die Intensität der Wellenlängen 6083, 29 316 und 19 206 A. E. andererseits nimmt langsamer zu und entspricht mehr dem Stefan'schen Gesetz. Ich muss aber ausdrücklich hervorheben, dass die Genauigkeit dieser Messungen geringer war, als bei denjenigen der vorliegenden Arbeit. Ich sehe daher von einer Berechnung dieser Spectralmessungen nach einer der Formeln ab, zumal ich beabsichtige, sie bald mit grösserer Genauigkeit und besserer Spectralanordnung zu wiederholen.

Die Intensität der Wellenlänge λ eines Gitterspectrum als Function der Temperatur. $T_1 = 20$ bis 21°C .

$T_2^\circ \text{C.}$ $= \lambda \text{ A. E.}$	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1450
6 083	—	3	6	10	16	24	43	76	135	182
8 409	1	2,5	4	11	27	61	183	300	566	748
12 730	3	6	17	44	95	189	407	730	1142	1380
14 562	1,5	6	12	27	52	95	148	228	353	444
15 629	4	12	28	61	114	198	311	494	731	923
19 206	3	6	12	27	46	77	121	203	322	—
29 316	1	3	6	11	20	35	55	88	132	161

Nur die Zahlen jeder Horizontalreihe stehen zu einander in den richtigen Grössenverhältnissen.

An die Beziehung zwischen Wärmestrahlung und Temperatur haben sich vielfach Schlussfolgerungen über die Temperatur der Sonne geknüpft. So extrapolierte Rossetti eine Sonnentemperatur von $10\,000^\circ$, Stefan aus seinem Gesetze eine solche von 5300 bis 5600°C . Diese Zahlen stellen untere Grenzwerte dar, da die Absorption in der Sonnenatmosphäre nicht berücksichtigt werden kann. Man kann wohl annehmen, dass sich alle festen Körper ähnlich wie Platin verhalten werden. Dann würde unter der Voraussetzung, dass die Strahlung auch über 1450°C . ähnlich zunimmt, wie unter dieser Temperatur, der Schluss zu ziehen sein, dass die Temperatur der Sonne sogar noch unter 5000°C . liegen muss, wenn die Sonne ein fester Körper ist und ein ähnliches Gesetz der Emission befolgt, wie ein solcher.

Hannover, März 1893.

Fig. 1.

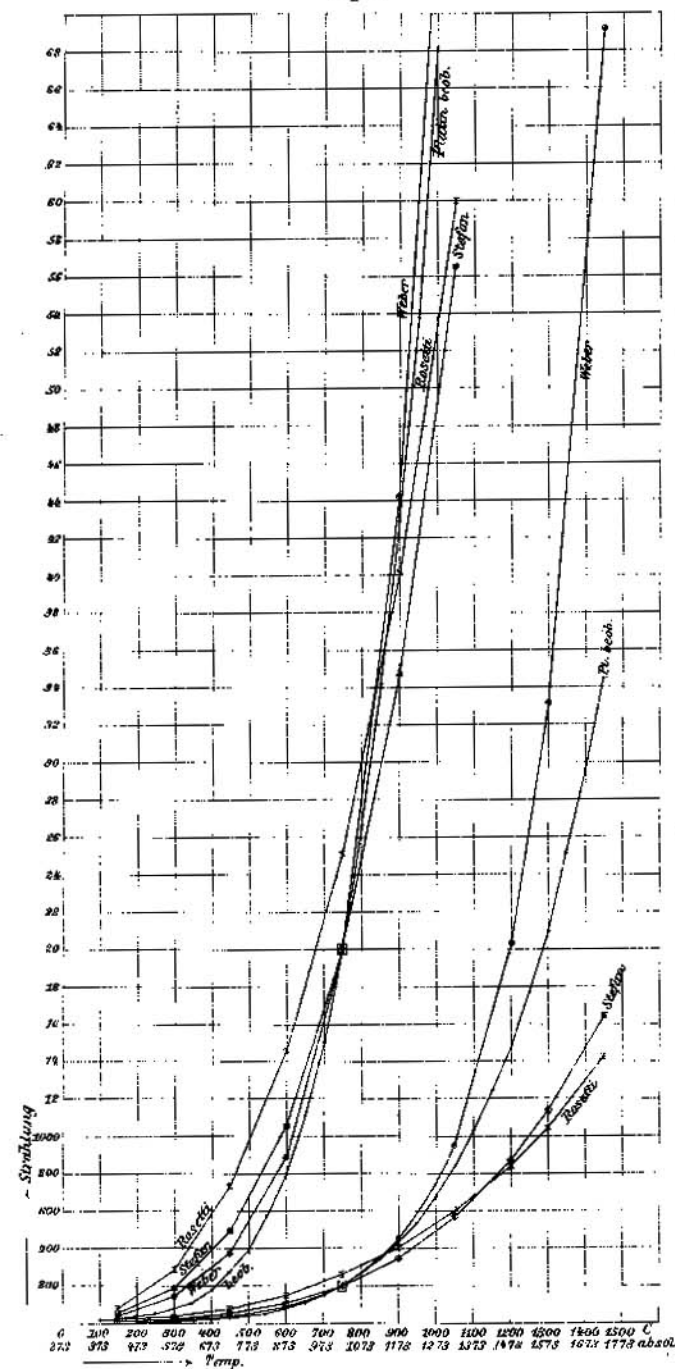


Fig. 2.

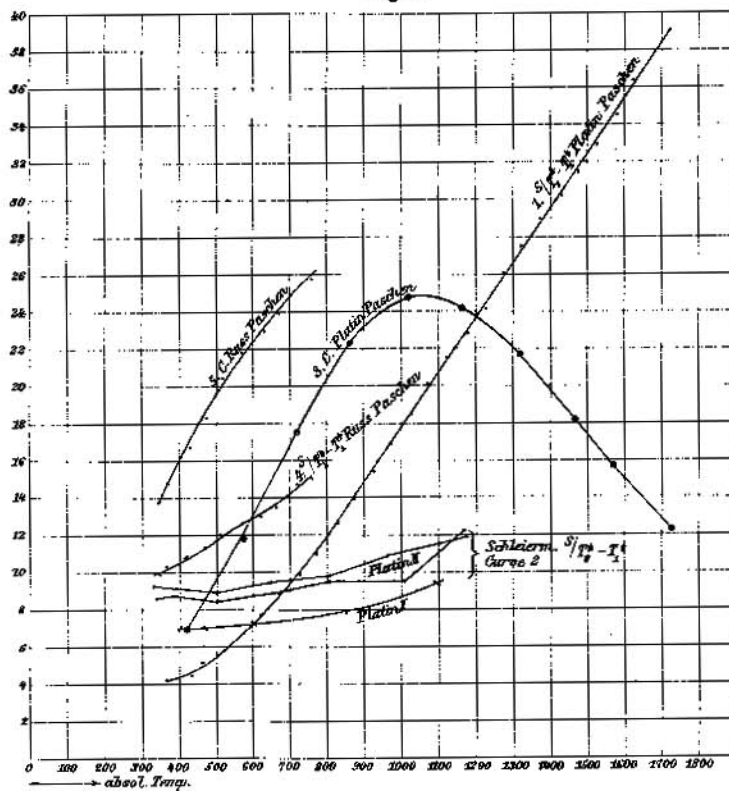


Fig. 3.

Vertikalkomponente.

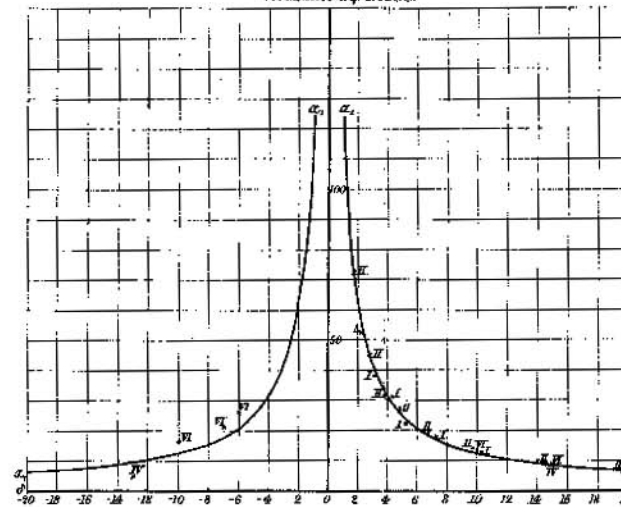


Fig. 4.

Vertikalkomponente.

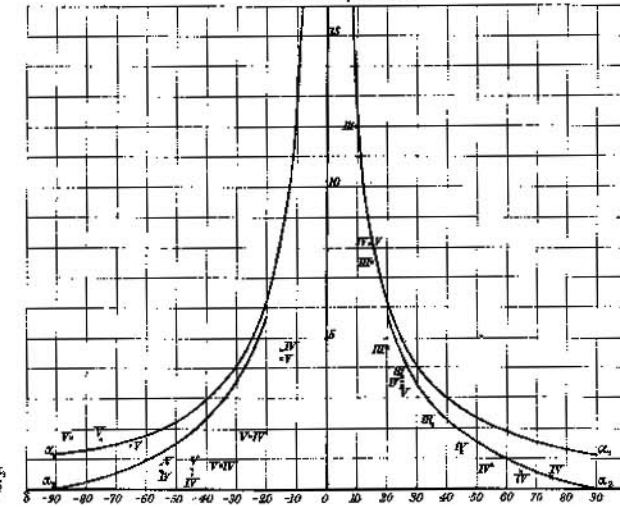


Fig. 5.

Horizontalkomponente.

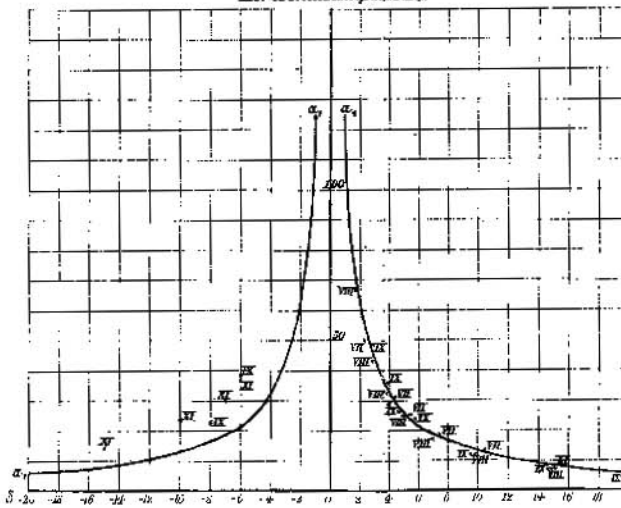


Fig. 6.

Horizontalkomponente.

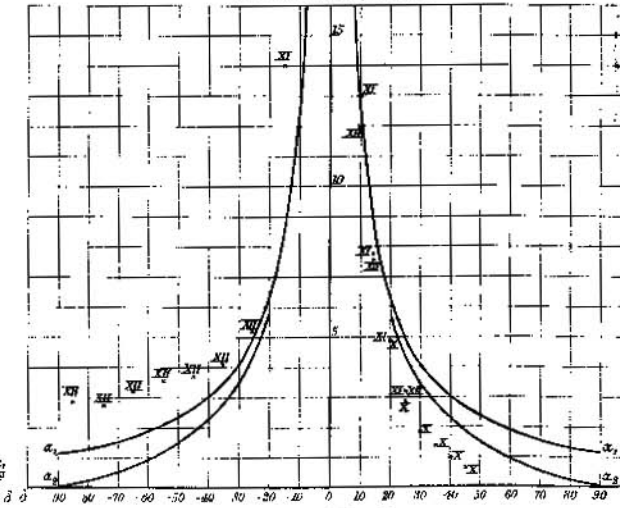


Fig. 15.

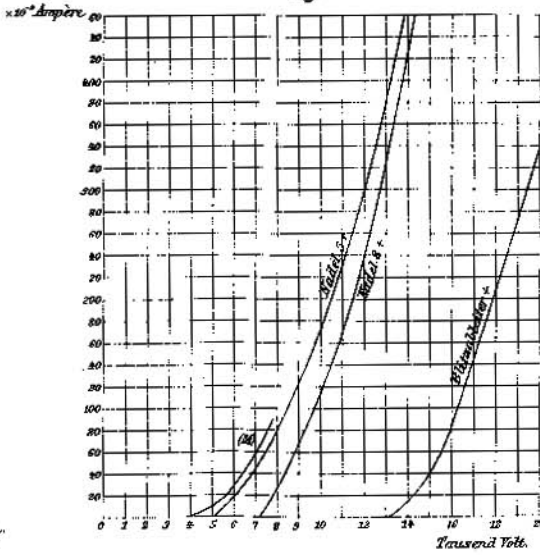


Fig. 7.

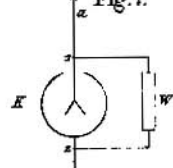


Fig. 13.



Fig. 9.



Fig. 10.



Fig. 12.

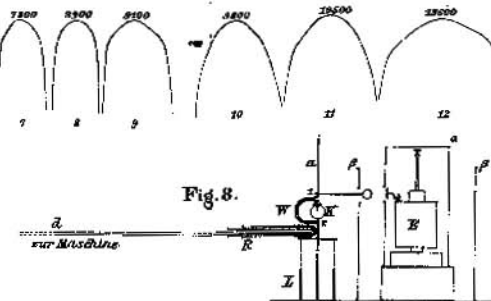


Fig. 8.

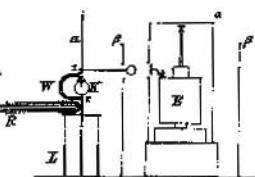


Fig. 14.

