8. *Einige Bemerkungen anlässlich der bolometrischen Arbeiten von Fr. Paschen; von Knut Ångström.*

1. In diesen Annalen hat Hr. Fr. Paschen einige Untersuchungen über die Strahlung und Absorption der Gase veröffentlicht, welche in mehrfacher Hinsicht beachtenswerth scheinen.¹⁾ Obschon die Resultate, zu welchen Hr. Paschen gekommen ist, soweit uns der Untersuchungsgegenstand gemeinsam ist, in den Hauptpunkten gut zu denjenigen meiner früheren Arbeiten stimmen, sehe ich mich doch, um hinsichtlich einiger Fragen Missverständnisse zu vermeiden, zu einer Erklärung genöthigt, der ich bei dieser Gelegenheit einige Bemerkungen über die oben erwähnte Arbeit beifüge.

2. Die Luftschicht, welche die Strahlung in dem von Hrn. Paschen benutzten Spectrobolometer durchdringen muss, bevor sie den Bolometerstreif trifft, ist ca. 83 cm. Durch die Kohlensäure und den Wasserdampf der Zimmerluft wird die Strahlung absorbirt, und zwar beträgt diese Absorption in dem Absorptionsgebiete der Kohlensäure — nach der Angabe des Hrn. Paschen — 30 Proc. Die Vernachlässigung dieser Absorption ist, wie Hrn. Paschen meint, eine Quelle von Fehlern in früheren Arbeiten gewesen, und speciell in seinen Beobachtungen über die Kohlensäureabsorption würde der Rechenfehler 6 Proc. betragen.²⁾

Um dies zu erweisen, schreibt Hr. Paschen Folgendes: (p. 9—10) „Wir berechnen dazu zunächst in der Ångströmschen Weise die Absorption. Der Ausschlag des Galvanometers betrug für $\delta = 29^{\circ}28'$ Fig. 2 Curve 2 mit CO_2 im Rohr 14,5 mm. Der Ausschlag für die Intensität der continuirlichen Energiecurve würde an dieser Stelle ca. 134 mm betragen haben, wenn die Luft im Spectralapparat und der Röhre kohlen säurefrei gewesen wäre. Der Kohlensäuregehalt der Luft bedingt an dieser Stelle eine Absorption von ca. 30 Proc. (mittlerer Werth)

1) F. Paschen, Wied. Ann. **50**. p. 409. 1893 und **51**. p. 1. 1894.

2) F. Paschen, Wied. Ann. **51**. p. 2. 9. 10 und 38.

d. h. der Galvanometerausschlag, den Ångström als Intensität der Lichtquelle vor der Absorption nach seiner Methode erhalten hätte, beträgt nicht 134 mm, sondern $134 - 134 \cdot 30 / 100 \text{ mm} = 93,8 \text{ mm}$. Als absorbirter Bruchtheil ergibt sich dann nach Ångström $(93,8 - 14,5) / 93,8 = 79,3 / 93,8$ oder 84,5 Proc. Als Intensität des einfallenden Lichtes ist aber offenbar diejenige der Energiecurve ohne die Absorption der CO_2 in der Luft zu nehmen. Denn die Absorption ändert sich im betrachteten Falle nicht mehr merklich, ob die CO_2 der Luft zu der 7 cm dicken CO_2 -Schicht noch hinzukommt oder nicht. Der Ansatz zur Berechnung der Absorption muss lauten:

$$\frac{134 - 14,5}{134} \cdot 100 \text{ Proc.} = 89,2 \text{ Proc.},$$

d. h. die Ångström'sche Berechnungsweise bringt für diesen Fall einen Fehler von 6 Proc. mit sich.“

Wie wir sehen, hat Hr. Paschen Schlüsse betreffs *meiner* Berechnungen mit Anwendung der durch *seinen* Apparat bedingten Verhältnisse gezogen. Aus den Angaben über meinen Apparat ersieht man aber, dass die Zimmerluft hier nicht 83 cm betragen kann, und dieselbe beträgt auch hier in der That nur ca. 50 cm. *Wäre* also im übrigen die Anschauung des Hrn. Paschen *richtig*, würde doch bei meinen Versuchen der Berechnungsfehler nur ca. 3,5 Proc. betragen.

Die ganze Anschauung Paschen's ist aber nicht richtig, wie das Folgende zeigt. Bezeichnen wir nämlich mit J_0 die Strahlung, welche vom Bolometerstreifen aufgenommen wird, wenn das Absorptionsrohr und der Spectrobolometer luftleer wären, so ist

$$J_1 = J_0 e^{-kl}$$

die Strahlung, welche wir bei leerem Absorptionsrohre und zwar nach Absorption durch die Zimmerluft in den Spectrobolometer beobachten können (wenn nämlich k und l den Absorptionscoefficienten und die Schichtdicke bezeichnen.) Wird aber ein absorbirendes Gas in das Rohr eingeführt, so erhält der Bolometer (mit denselben Bezeichnungen wie oben) die Strahlung

$$J_2 = J_0 e^{-kl} \times e^{-k_1 l_1} = J_1 e^{k_1 l_1},$$

woraus hervorgeht, dass in diesem Falle J_1 als die auf das

Gas einfallende Strahlung zu betrachten ist. Das Verhältniss des absorbirten zu dem einfallenden Theil der Strahlung ist also hier:

$$\frac{J_1 - J_2}{J_1},$$

und nach diesen Formeln habe ich und, wie ich glaube, alle Anderen, welche sich früher mit solchen Fragen beschäftigten, die Absorption berechnet.¹⁾ Wie Hr. Paschen zur Anwendung des Ausdruckes

$$\frac{J_0 - J_2}{J_0}$$

kommt, ist ziemlich schwer verständlich. Will er aber J_0 in seiner Formel einführen, so muss er auch J_2 für die Absorption der Zimmerluft corrigiren und dann werden die beiden Ausdrücke völlig identisch. In dem von Hrn. Paschen angeführten Beispiel findet man also, mit Zugrundelegung seiner eigenen Angaben

$$\frac{134 - 14,5 \times \frac{10}{7}}{134} \cdot 100 \text{ Proc.} = 84,5 \text{ Proc.},$$

das ist dieselbe Absorption wie oben nach meiner Berechnung. Ist die Strahlung homogen, so ist natürlich jene die einzig richtige, und nur unter dieser Voraussetzung kann überhaupt eine solche Berechnung ausgeführt werden. Meint aber Hr. Paschen, dass die Strahlung nicht homogen sei, und dass durch die 7 cm CO₂ die Absorption in diesem Spectralgebiete wirklich abgeschlossen sei, so repräsentirt oben 14,5 falsches Licht und die Absorption würde 100 Proc. betragen.

3. Hr. Paschen findet bei seiner Versuchsanordnung die Absorptionsmaxima bedeutend tiefer und schärfer als ich. Dies sucht er durch die Unreinheit meines Spectrums zu erklären, und er schliesst hieraus, dass es unzweckmässig sei, das ultra-rothe Spectrum durch Linsen herzustellen. Es ist sehr möglich, dass Paschen's Spectrum reiner war als das meinige, die Hauptursache der Differenzen dürfte jedoch die sein, dass er mit bedeutend grösserer Dispersion gearbeitet hat und dass

1) Eine ausführliche Darstellung dieser Frage mit Berücksichtigung der Reflexion findet man in der schönen Arbeit „*Bolometrisch Onderzoek van Absorptiespectra*“ von W. H. Julius, Verh. der K. Akad. van Wet. te Amsterdam 1892, auch deutsch in den „*Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbeleisses*“, 1893.

demzufolge sein Bolometerstreif ein engeres Gebiet des Spectrums eingenommen hat. Dass unter solchen Umständen die Absorptionsstreifen schärfer werden, ist ja natürlich. Es mag jedoch hervorgehoben werden, dass keiner von den Schlüssen, welche ich über die Lage der Absorptionsstreifen, das Verhältniss der Absorption der Dämpfe zu der der Flüssigkeiten etc., gezogen habe, von diesen Umständen berührt werden.

4. Obschon wir es als einen Vorzug der Arbeiten von Hrn. Paschen bezeichnen können, dass er nicht die Absorption nach seiner oben erwähnten Methode berechnet hat, müssen wir doch bedauern, dass er so wenig von dem Beobachtungsmaterial publicirt hat, dass die Möglichkeit einer weiteren Anwendung und Controlle desselben sehr verringert wird. Hr. Paschen gibt nämlich im allgemeinen nur graphische Darstellungen seiner Beobachtungen, und in diese werden oft nicht einmal die beobachteten Punkte eingetragen. Es scheint mir auch, dass einige dieser Curven nicht ganz genau die wahren Verhältnisse darstellen. So hat z. B. Hr. Paschen niemals das Energiespectrum seiner Wärmequelle ohne die Absorption der Kohlensäure und des Wasserdampfes der Zimmerluft beobachtet. Wie findet nun Hr. Paschen dieses Spectrum *ohne Absorption*, welches seiner Ansicht nach, wie wir oben gesehen haben, als Grundlage für die Berechnung der Absorption dienen soll? Er zieht eine Curve durch die Punkte der beobachteten Curve, bei denen seiner Meinung nach keine Absorption stattfindet. In dieser Weise wird er genöthigt, die Curve zwischen den Deviationen 26° — 29° (über ein Viertel seines ultrarothern Spectrums; vgl. seine Zeichnung Fig. 2, Curve 1 der letzten Abhandlung) zu interpoliren, wobei er zweifellos diese Curve zu niedrig zieht, indem diese bei $27^{\circ}25'$ so gezogen ist, als wäre die Absorption hier $= 0$. Wie kann man übrigens wissen, ob nicht gerade in diesem Punkte, wo eine Absorption vorhanden ist, das Spectrum der Wärmequelle Abweichungen von der continuirlichen Curve zeigt? Ein nicht absolut schwarzer Körper, von einem Gase mit Absorptionsmaxima umgeben, dürfte nämlich infolge des Gases primär eine verstärkte Strahlung in den Gasmaxima zeigen.

Aus dem Gesagten geht wohl zur Genüge hervor, dass man auf der von Hrn. Paschen vorgeschlagenen Grundlage keine genaue Berechnung der Absorption ausführen kann.

5. Unter den vielen Schlussfolgerungen, welche Hr. Paschen gezogen hat, erscheinen mir einige nicht neu, andere verfrüht. So ist z. B. die Schlussfolgerung über die Möglichkeit, „die Temperatur der Sonne aus Versuchen über die Gesamtstrahlung zu extrapoliren“ (p. 30 der letzten Abhandlung), offenbar nicht richtig. Denn schon ein Blick auf das wohl bekannte sichtbare Spectrum der Sonne lehrt uns, dass es nicht ohne weiteres erlaubt ist, „die Strahlungsgesetze, die für feste Körper aufgestellt sind, auf ihre Strahlung anzuwenden“.

Die Anschauungen von Zöllner und Wüllner, dass Gase von hinreichend grosser Schichtdicke ein continuirliches Spectrum ergeben, glaubt Hr. Paschen durch Versuche mit Kohlensäure in einem 33 cm langen Absorptionsrohre widerlegt zu haben (p. 31—33 und 39 der letzten Abhandlung). Es zeigt sich nämlich an einer Stelle ausserhalb des Absorptionsgebietes keine merkbare Absorption. Dass aber Gase von bedeutend grösserer Schichtdicke Stellen von einer nicht wahrnehmbaren Absorption hätten, war schon längst bekannt, und die, welche den oben erwähnten Satz vertheidigen, werden wohl kaum von ihrem Irrthum durch die angeführten Versuche überzeugt werden.

Das Resultat, dass Gase nicht „durch eine einzige Schwingungsperiode charakterisirt sind“ (p. 23) ist nicht neu.¹⁾ Dass die CO_2 „ausser dem starken Maximum noch ein schwächeres hat“, ist auch unwiderlegbar erwiesen. Hr. Paschen sagt wohl (p. 11 der letzten Abhandlung): „Da die Gewissheit aus Ångström's Versuchen nicht hervorgeht, dass jeglicher Wasserdampf aus der CO_2 beseitigt war etc.“ Die von mir beobachtete Absorption war jedoch im Verhältniss zu den Beobachtungsfehlern sehr beträchtlich, und ich habe ausdrücklich gesagt, dass die CO_2 mittels Durchleitens durch Schwefelsäure und Phosphorsäureanhydrid getrocknet war.²⁾

6. Zu den bemerkenswerthesten Resultaten der Arbeiten von Hrn. Paschen gehört zweifellos die Verschiebung der Strahlungsmaxima eines Gases mit Veränderung der Temperatur. Eine Erklärung dieses Verhältnisses hat Hr. Paschen nicht ge-

1) K. Ångström, Öfversigt af K. Vet. Akad. Förh. No. 9. p. 556. 1889 und Physikalische Revue I. p. 609. 1892.

2) K. Ångström, l. c. p. 555 und 606 resp.

geben. Meines Erachtens dürfte jedoch diese Verschiebung nur scheinbar und eine Folge der unsymmetrischen Verhältnisse in der Umgebung des Maximums sein. Bei den Versuchen von Hr. Paschen ist das erwärmte Gas immer von kälteren absorbirenden Hüllen umgeben, welche mithin eine beträchtliche Absorption ausüben müssen. Je höher die Temperatur der strahlenden Gasmasse ist, desto grösser wird relativ die Schichtendicke der absorbirenden Gasmasse, und wenn die beobachteten Strahlungsmaxima nicht als homogene Linien, sondern, was wohl zweifellos das Richtige ist, als unsymmetrische Bänder oder vielleicht Liniengruppen zu betrachten sind, so kann die beobachtete Verschiebung nur einfach eine Folge der Absorption sein. Die bolometrischen Beobachtungen haben uns sehr vieles über die allgemeinen Verhältnisse in Spectralgebieten, welche uns früher vollständig unbekannt waren, gelehrt und werden uns wohl auch noch fernerhin viel neues lehren; was aber die Einzelheiten im ultrarothern Spectrum betrifft, müssen wir uns noch durch die im sichtbaren Spectrum gewonnenen Erfahrungen leiten lassen. Gerade diese lehren uns, dass die Lage der Linien sehr beständig ist und dass auch die sehr scharfen Spectrallinien selten vollständig homogenes Licht enthalten.¹⁾ Die von Hrn. Paschen beobachtete Thatsache dürfte, glauben wir, hierdurch erklärt werden und die ganze Erscheinung erinnert auch sehr stark an einige von Cornu beschriebenen Umkehrungen der Spectrallinien (*raies spontanément renversables*).²⁾

Mit dem Obigen habe ich natürlich keine vollständige Kritik der bezüglichen Arbeit beabsichtigt.³⁾ Ich habe nur ein paar Bemerkungen in einigen mich besonders angehenden Fragen gemacht, und ebenso wenig es meine Absicht ist, alles, was hier nicht berührt wird, zu vertheidigen, ebenso wenig will ich die grossen Verdienste der Arbeit in Abrede stellen. Schon das zum ersten Male dargestellte ultrarother Wasserdampfspectrum macht Paschen's Arbeit besonders wichtig.

Upsala, Februar 1894.

1) A. Michelson, *Phil. Mag.* V, **34**. p. 280. 1892.

2) A. Cornu, *Journ. de Phys.* II. **5**. p. 93. 1886.

3) Vgl. andere Bemerkungen von: H. Rubens, *Wied. Ann.* **51**. p. 392. 1894; E. Pringsheim, *Wied. Ann.* **51**. p. 441. 1894.