

VIII. *Beobachtungen über die Durchstrahlung von Wärme verschiedener Wellenlänge durch trübe Medien; von Knut Ångström.*

(Vorgelegt d. k. Akad. d. Wiss. zu Stockholm am 6. Juni 1888.)

Einleitung.

Wenn Wärmestrahlen¹⁾ durch ein vollkommen homogenes Medium gehen, wird im allgemeinen ein Theil davon absorbiert und diese Absorption folgt für eine gewisse Wellenlänge dem einfachen Gesetz, dass jede Schicht des Mediums denselben Bruchtheil der an sie gelangten Strahlung absorbiert, oder also dass die Intensität I der durch die Schicht l durchgehenden Strahlung durch die Gleichung $I = I_0 e^{-kl}$ ausgedrückt werden kann, wobei I_0 die einfallende Strahlung, e die Basis der natürlichen Logarithmen und k eine für jedes Medium und für jede Wellenlänge bestimmte Constante bezeichnet.

Enthält dagegen das Medium discrete Theilchen, deren optische Eigenschaften verschieden von denen seiner Umgebung sind, so entsteht dabei im allgemeinen eine Diffusion der Strahlung nach allen Richtungen. Wenn aber die Masse der diffundirenden Theilchen klein genug ist, geht auch in diesem Falle ein grösserer Theil der Strahlung in der Richtung des einfallenden Strahles hindurch, was sich auch dadurch zeigt, dass man durch ein solches Medium ganz scharfe Bilder sehen kann. Die Intensität der direct durchgelassenen Strahlung nimmt mit wachsender Dicke der diffundirenden Schicht immer ab. Diese Abnahme kann in zwei Ursachen begründet sein: die wirkliche Absorption und die schon erwähnte Diffusion. Die Frage ist dann: Folgt auch hier das Abnehmen der Intensität oder mit anderen Worten die scheinbare Absorption bei der direct durchgehenden Strahlung demselben Gesetze wie bei vollkommen durchsichtigen Medien, und steht die Durchsichtigkeit des Mediums etwa in einem einfachen Verhältniss zur Wellenlänge der Strahlung?

Für die sichtbaren Strahlen ist diese letztere Frage schon von Goethe in seiner Farbenlehre bei der Betrachtung der

1) Unter diesem Namen verstehen wir in dem Folgenden Strahlung beliebiger Wellenlängen, hell oder dunkel.

trüben Medien im durchgehenden und reflectirten Licht, dann von Clausius¹⁾ und Lord Rayleigh²⁾ für die Erklärung der Farbenerscheinungen der Atmosphäre behandelt worden. Der erstere geht von Reflexion und Brechung als Grund der Diffusion aus, der letztere aber zeigt, dass, wenn die Theilchen klein im Verhältniss zur Wellenlänge sind, die gewöhnlichen Gesetze der Reflexion und Brechung nicht gelten, und betrachtet darum die diffundirenden Partikeln als Störungscentra der einfallenden Wellenbewegung. Die beiden Theorien leiten indess zu ähnlichen Beziehungen für die directe durchgehende Strahlung. Während aber die erstere³⁾ die Formel:

$$I = I_0 e^{-\kappa \lambda^{-2} t}$$

ergibt, wobei λ die zu untersuchende Wellenlänge, κ eine Constante repräsentirt, und die übrigen Bezeichnungen dieselben wie in der vorigen Formel sind, ist dagegen nach der letzten Theorie:

$$I = I_0 e^{-\kappa \lambda^{-4} t}.$$

Experimentelle Untersuchungen über diese Fragen sind in der letzten Zeit von Dr. E. L. Nichols⁴⁾ und Dr. Mänz⁵⁾ auf spectrophotometrischem Wege ausgeführt, wobei ersterer hauptsächlich das zurückgeworfene diffuse Licht, letzterer das durchgehende Licht bei einer grossen Zahl von trüben Medien, besonders bei Flüssigkeiten untersucht hat.

Diese Untersuchungen umfassen jedoch nur Wellenlängen von 0,4 bis zu $0,7 \cdot 10^{-3}$ mm.⁶⁾

Eine von Abney und Festing⁷⁾ mit Hülfe eines empfindlichen Thermostaten ausgeführte Untersuchung über in Alkohol aufgelösten Mastix ist bis zu $\lambda = 1,17$ ausgedehnt

1) Clausius, Pogg. Ann. **72**. p. 188 u. 294. 1847; **76**. p. 161. 1849; **88**. p. 543. 1853.

2) Lord Rayleigh, Strutt, Phil. Mag. **41**. p. 107. 274 u. 447. 1871.

3) Lord Rayleigh, l. c. p. 107 u. f.

4) Nichols, Trans. Kansas Acad. of Science **10**. 1886.

5) Mänz, Spectrophotometrische Untersuchungen an trüben Medien. Inaug.-Diss. Marburg, 1885.

6) Hier wie überall in dem Folgenden ist die Wellenlänge in 0,001 mm angegeben.

7) Abney u. Festing, Proc. Roy. Soc. Lond. **40**. p. 378. 1886.

und scheint die von Lord Rayleigh aufgestellte Theorie zu bestätigen.

Ich habe unter Hinzunahme der umfassenden Bestimmungen des Hrn. Langley über den Brechungsindex des Steinsalzes diese Untersuchungen mit Anwendung des Spectrobolometers wieder aufgenommen und dabei Medien benutzt, welche ohne die etwa zweifelhafte Methode der Vertheilung kleiner Partikeln in einer Flüssigkeit hergestellt werden können.

2. Instrument und Methode.

Die Wärme absorbirende Fläche in dem Spectrobolometer besteht aus einem einzigen Platinstreifen von ungefähr 0,1 mm Breite, 0,02 mm Dicke und 12 mm Länge, der galvanisch platinirt und danach mit Stearinruss überzogen ist. Derselbe bildet den verticalen Theil des Fadenkreuzes des auf einem gewöhnlichen, mit einem Prisma versehenen Spectroskopes befindlichen Fernrohres. Alle optischen Theile dieses Spectroskopes, das Ocular ausgenommen, sind aus Steinsalz von Steeg und Reuter in Homburg. Das zum grössten Theil dem bisher von mir angewandten ähnliche Bolometer¹⁾ selbst ist fest mit der Theodolitenaxe verbunden; auf dem um die Axe herum beweglichen Arm ist die Collimatorlinse mit der Spaltöffnung befestigt und vor derselben eine mit Rundbrenner versehene Gaslampe, umgeben zuerst von einem Thoncylinder mit einem kreisförmigen Loch vor der Spaltöffnung und danach von einem ebenso mit kreisförmigen Löchern vor der Spaltöffnung versehenen Doppelschirm von Messing. Zwischen den beiden Wänden dieses Schirms befindet sich ein kleinerer beweglicher Schirm, bestehend aus einem kleinen Kästchen von Zinkblech, durch welches während der Versuche mittelst feiner Kautschukschläuche ein ununterbrochener Wasserstrom geleitet wird, und vermittelt dessen man die Strahlen der Lampe beliebig durchlassen oder abblenden kann. Zwischen der Spaltöffnung und dem beweglichen Schirm wird das Beobachtungsobject, eine plangeschliffene und polirte Steinsalzplatte, befestigt, auf welcher die zu untersuchende Substanz angebracht ist.

1) Ångström, Upsala Univ. Årsskrift 1885 und Wied. Ann. **26**, p. 253. 1885; Bihang till K. Vet.-Akad. Handl. **13**. 1887.

Bei der Einstellung des Apparates wird die Gaslampe durch eine Natriumflamme ersetzt, das Prisma von $60^{\circ} 2'$ brechendem Winkel wird auf das Minimum der Ablenkung eingestellt, sodass die Natriumlinie auf den verticalen Faden des Fernrohres, d. h. auf den Messfaden des Bolometers fällt, was sehr genau mit Hülfe des Oculars ausgeführt werden kann. Danach entfernt man das Ocular des Fernrohres, ersetzt es durch einen Ebonitpfropfen und beobachtet die Stellung des Collimators auf dem graduirten Theilkreise. Die Einstellung auf die aus der Wellenlänge zu berechnenden Ablenkungen der Strahlen von anderen Wellenlängen kann von diesem Ausgangspunkte aus mit Hülfe von Spiegel und Scala mit einer Genauigkeit von $10''$ bewirkt werden. Eine graphisch construirte Tabelle diene hierbei zur Feststellung der jeder Wellenlänge entsprechenden Einstellung. Für das sichtbare Spectrum sind die Brechungsindices der Prismas hierzu in gewöhnlicher Weise bestimmt worden. Für die ultraroth Strahlen habe ich mich der von Langley in seinen Untersuchungen hierüber gefundenen Werthe des Brechungsindex bedient.¹⁾ Da indess die direct bestimmten Werthe des Brechungsindex sämmtlich ca. $0,0_{34}$ höher als die entsprechenden von Langley angegebenen sind, habe ich für das nun angewendete Prisma auch die Brechungsindices der ultraroth Strahlen um diese Grösse $0,0_{34}$ erhöht. Die etwa hieraus resultirenden Fehler sind für die vorliegende Untersuchung ganz ohne Bedeutung. Die Untersuchung Langley's über Brechungsindices geht indess nur bis zu $\lambda = 5,3$; die Curve aber, die das Verhältniss zwischen Ablenkung und Wellenlänge darstellt, geht schon bei $\lambda = 3,0$ in eine gerade Linie über und läuft in dieser Weise zwischen $\lambda = 3$ und $\lambda = 5$ fort. Prof. Langley hat bei Bestimmungen von grösseren Wellenlängen als wahrscheinlich angenommen, dass diese gerade Linie weitergezogen werden kann, und so habe ich mich auch dieser Extrapolation bedient, indess die Unsicherheit der Bestimmung der Wellenlängen mit einem * bezeichnet. Die folgende Tabelle enthält die nach der graphischen Construction erhaltenen Bestimmungen der Wellenlängen λ für eine Ablenkung D von 30 zu 30 Minuten von der D -Linie nach Roth fortschreitend.

1) Langley, Phil. Mag. 9., p. 433. 1886.

Tabelle I.

D	0°	0°,5	1°,0	1°,5	2°,0	2°,5	3°,0	4°,0
λ	0,59	0,69	0,90	1,70	4,10	6,50 ¹⁾	*8,90	*13,65
I_0	2,2	7,1	53,3	224,0	64,4	20,2	10,2	3,8

Die von mir untersuchten Medien sind: Russ, Magnesiumoxyd und Zinkoxyd. Von diesen Medien kann man ohne allzugrosse Schwierigkeiten homogene und so ziemlich gleichförmige Schichten herstellen, indem man sie als Rauch auf eine plangeschliffene und polirte Steinsalzplatte niederschlagen lässt. Vor und nachdem die Schicht auf die Platte angebracht ist, beobachtet man dieselbe durch ein grosses Mikroskop. Die Differenz der beiden Einstellungen wird auf der Mikrometerschraube des Mikroskopes abgelesen und gibt nach einiger Uebung die Dicke der Schicht bis auf 0,002 mm an. Nur Schichten, welche an drei verschiedenen Stellen eine möglichst gleiche Dicke haben, werden zu den Versuchen verwendet. Selbstverständlich ist damit die Dicke der Schicht nicht ganz bis zu obiger Grenze sicher.

Hierauf wurde der Ausschlag des Bolometers für verschiedene Wellenlängen bestimmt, theils mit der präparirten Platte vor der Spaltöffnung, theils ohne diese Platte. Da in einer vorläufigen Untersuchung die Absorption der Steinsalzplatte für verschiedene Wellenlängen bestimmt war, konnte man den Einfluss der diffundirenden Schicht bestimmen.

Die dritte Columnne der obigen Tabelle enthält den Ausschlag des Galvanometers bei directer Strahlung und mit der gewöhnlich von mir angewendeten Empfindlichkeit des Messinstrumentes. Hieraus sieht man, dass die Genauigkeit der Bestimmungen entsprechend der Kleinheit des Ausschlages am kleinsten für die grössten und kleinsten Wellenlängen ist.

3. Resultate.

Die folgenden Tabellen enthalten eine Uebersicht der Beobachtungsergebnisse. In der obersten Horizontalcolumnne ist die Dicke der Schicht l , in der ersten Verticalcolumnne die

1) Diese Wellenlänge liegt freilich ein wenig ausser dem von Langley bestimmten Gebiete, aber so wenig, dass ich den extrapolierten Werth als ziemlich sicher annehmen darf.

Wellenlänge der Strahlung λ angegeben. Ausserdem enthalten die Tabellen die durchgelassene Strahlung p in Procenten der einfallenden Strahlung, und die Quantität k , berechnet nach der Formel: $p = 100e^{-kl}$, also unter Annahme der Gültigkeit des gewöhnlichen Absorptionsgesetzes.

Russ. — Die Schicht wurde durch Berussen mit einer Stearinflamme hergestellt. Eine ganz dünne Schicht dieser Art besteht nach Beobachtung unter einem stark vergrössernden Mikroskope aus ganz kleinen Partikeln von ungefähr gleicher Grösse. Die wahrscheinliche Grösse dieser Partikeln schätzte ich mit dem Ocularmikrometer im Mittel zu ungefähr 0,0₃ mm.

Tabelle II.

λ	$l = 0,009$		$l = 0,023$		$l = 0,038$		k Med.
	p	k	p	k	p	k	
0,69	11,7	238,0	—	—	—	—	238,0
0,90	19,1	184,0	3,1	151,0	—	—	167,5
1,70	44,3	90,5	16,8	77,6	3,9	85,4	84,5
4,00	64,4	48,9	34,5	46,3	17,4	46,0	47,1
6,50	68,8	41,6	42,5	37,2	26,2	35,2	38,0
*8,90	67,9	43,0	44,0	35,7	32,0	30,0	36,3

Eine grosse Schwierigkeit bietet hier die Berechnung der Dicke der Schicht, welche wegen der Absorption äusserst dünn sein muss und naturgemäss nie von ganz gleicher Dicke erhalten werden kann. Deshalb ist ohne Zweifel die erste der in der Tabelle enthaltenen Schichten ($l = 0,009$) etwas dicker als angegeben ist. In Anbetracht dieser Fehlerquellen darf ich indess das Resultat als ziemlich befriedigend ansehen. Die Quantität k ist innerhalb der Fehlergrenzen für jede verschiedene Wellenlänge constant. Also auch hier ist das Absorptionsgesetz anzuwenden. Ausserdem nimmt k mit wachsender Wellenlänge stetig ab, also ist die Russchicht um so durchsichtiger, je grösser die Wellenlänge ist.

Magnesiumoxyd. — Durch das Hin und Herführen einer Steinsalzplatte über einem brennenden Magnesiumbände wurde die Schicht hergestellt. Unter dem Mikroskope zeigten sich die Partikelchen von ziemlich verschiedener Grösse, etwa 0,0₂16—0,0₃4 mm im Durchmesser. Mit wachsender Schicht wird hier der Werth von k immer kleiner, das Medium scheint

immer durchsichtiger für eine gewisse Wellenlänge zu werden, sodass das Absorptionsgesetz nicht ohne weiteres anzuwenden ist. Der Grund dafür ist nicht schwer zu finden. Was wir als direct durchgehende Strahlung schätzen, ist eine Summe von zwei Termen: die direct durchgehende Strahlung und die in derselben Richtung diffundirte Strahlung. Mit wachsender Dicke der wirksamen Schicht wächst auch die letztere und erreicht bei einer für jede Wellenlänge bestimmten Dicke der Schicht ein Maximum, um danach wieder abzunehmen. Da nun das erste Glied der Summe stetig abnehmen muss, kann die Summe selbst dem gewöhnlichen Absorptionsgesetze nur in dem Falle folgen, dass das andere im Vergleich zu dem ersten vernachlässigt werden kann. So verhält es sich beim Russ, wo die Diffusion für jede Wellenlänge unbedeutend ist. Bei Magnesiumoxyd ist dies nicht der Fall, und das Absorptionsgesetz gilt nicht mehr. Mit dem Zuwachs der Dicke der Schicht macht sich die Diffusion im Vergleich mit der direct durchgelassenen Strahlung mehr geltend, und folglich muss auch die Schicht mehr durchsichtig scheinen.

Tabelle III.

λ	$l = 0,05$		$l = 0,127$		$l = 0,264$	
	p	k	p	k	p	k
0,90	3,4	67,6	—	—	—	—
1,70	6,2	55,7	3,2	27,1	1,04	17,3
4,00	52,0	13,1	31,9	9,0	9,6	8,9
6,50	81,4	4,1	64,8	3,4	41,6	3,3
* 8,90	81,2	4,1	75,7	2,2	62,0	1,8
* 13,65	80,9	4,2	71,9	2,6	61,3	1,9

Auch hier nimmt die Durchsichtigkeit mit wachsender Wellenlänge stetig zu.

Zinkoxyd. — Ein schmales Band von Zinkblech wurde in eine starke Gebläseflamme gehalten und die Steinsalzplatte dem dadurch entstandenen Rauch ausgesetzt. Nach der mikroskopischen Untersuchung sind die Zinkoxydkörnchen äusserst klein, die grössten ungefähr 0,0₃4 mm dick, die kleineren schwer zu fixiren. Diese Schichten sind übrigens von sehr gleichmässiger und guter Beschaffenheit gewesen.

Tabelle IV.

λ	$l = 0,0028$		$l = 0,093$		$l = 0,213$		$l = 0,318$	
	p	k	p	k	p	k	p	k
0,59	59,1	18,8	—	—	—	—	—	—
0,67	67,1	14,2	33,8	11,7	—	—	—	—
0,90	—	—	52,9	8,6	18,1	6,3	12,6	6,3
1,70	—	—	92,9	0,8	79,0	1,1	69,8	1,1
4,00	—	—	96,0	0,4	94,1	0,3	87,9	0,4
6,50	—	—	92,1	0,9	86,9	0,6	83,7	0,6
* 8,90	—	—	94,1	0,7	80,9	1,0	71,0	1,1

Hier zeigt sich das eigenthümliche Verhältniss, dass k für grosse Wellenlängen beinahe constant ist, für kleinere aber mit wachsender Dicke der Schicht wie in dem obigen Falle abnimmt. Dies erklärt sich leicht aus dem oben Erwähnten. Das Zinkoxyd hat für grosse Wellenlängen dieselbe Eigenschaft wie Russ, es besitzt keine eigentliche Diffusion, für kürzere Wellenlängen dagegen ist die Diffusion stärker, und die Umstände werden identisch mit denen beim Magnesiumoxyd. Die Durchsichtigkeit nimmt auch hier mit wachsender Wellenlänge zu bis zu $\lambda = 4$, scheint danach aber wieder ein wenig abzunehmen.

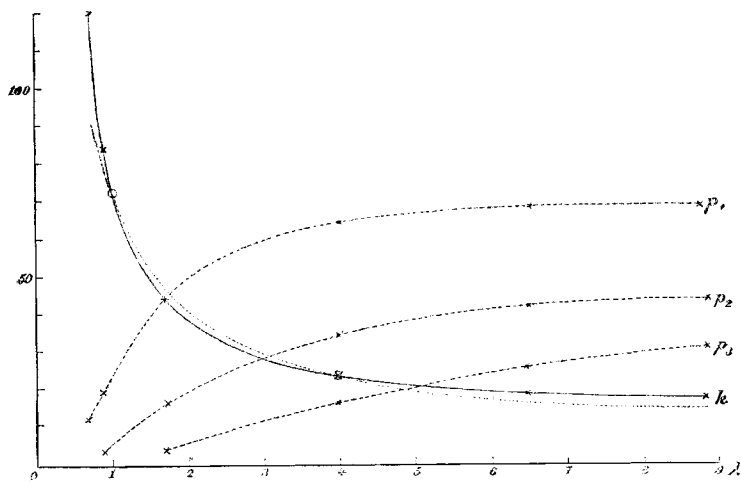
Aus dem oben Mitgetheilten darf ich den Schluss ziehen, dass bei einem diffundirenden Medium, wo die durchgelassene Strahlung in zwei, die directe und die diffus durchgelassene zerfällt, die erste dem gewöhnlichen Absorptionsgesetz folgt, die Summe derselben oder die ganze beobachtete Strahlung nur in dem Falle diesem Gesetze annäherungsweise folgt, wenn die diffuse Strahlung im Vergleich mit der durchgelassenen vernachlässigt werden kann.

Dies gilt ohne Zweifel für die Absorption an der Atmosphäre. Dass man hier nicht das Absorptionsgesetz auf die Sonnenstrahlung im ganzen anwenden kann, ist mehrmals bemerkt und in der letzten Zeit ausführlich von Langley behandelt worden.¹⁾ Dieses Gesetz findet, wie bekannt, nur auf eine homogene Strahlung von einer bestimmten Wellenlänge Anwendung. Aus dem hier Mitgetheilten geht aber hervor, dass wir es auch mit dieser Einschränkung nicht ohne

1) Langley, Phil. Mag. 18. p. 289. 1884.

weiteres anwenden können, wenn eine merkliche Diffusion hinzutritt. Dies dürfte bei hellem Himmel und reiner Atmosphäre für den grössten Theil des Spectrums der Fall sein, darf aber doch nicht a priori auch für die brechbarsten Theile desselben angenommen werden. Weitere Untersuchungen müssen dies entscheiden.

Die Grösse der Quantität k nimmt nach den Tabellen bei den hier untersuchten Medien im allgemeinen mit wachsender Wellenlänge ab, oder mit anderen Worten, das Medium ist mehr durchsichtig, je grösser die Wellenlänge ist. Um die Uebersicht der gefundenen Werthe zu erleichtern, habe ich die Curven, die den Zusammenhang zwischen λ und k zeigen, ausgezogen. Die Werthe von k für Russ in ihrer Abhängigkeit von λ sind in beistehenden Curven p_1 p_2 p_3 für die drei Schichten von $l = 0,009$; $0,023$ und $0,038$ mm Dicke in der Weise angegeben, dass λ als Abscisse, die Procente der durchgelassenen Wärme als Ordinaten verzeichnet sind. In der mit k bezeichneten ununterbrochenen Curve ist $\frac{1}{2}k$ als Ordinate genommen. Die vier Curven zeigen einen ganz regelmässigen Verlauf.



Ich habe untersucht, ob die mit k bezeichnete Curve durch eine Gleichung der Form $k = x\lambda^{-x}$ sich darstellen lasse. Die nach dieser Formel für die Punkte $\lambda = 1$, $k = 140$ und $\lambda = 4$, $k = 48$ berechnete Curve, für welche $x = 0,77$ wird,

ist in der Figur punktirt gezeichnet.¹⁾ Die Uebereinstimmung zwischen den beiden Curven könnte ohne Zweifel besser sein. Jedenfalls hat x den von der Theorie verlangten Werth nicht.

Für die Berechnung des Verhältnisses von λ und k für die anderen Medien ist das Beobachtungsmaterial zu klein. Indess ist nach einem Versuch in dieser Richtung x ganz gewiss auch in diesen Fällen kleiner als 2.

Eine völlige Uebereinstimmung mit einer der angeführten Theorien hätten wir auch wohl nicht erwarten können, und zwar aus mehreren Gründen. Die Grössen der Partikeln des trüben Mediums sind ohne Zweifel von grosser Bedeutung bei diesem Phänomen. Bei Magnesiumoxyd nimmt die Durchsichtigkeit mit wachsender Wellenlänge bis zu $\lambda = 8,9$ schnell zu, wonach das Verhältniss ziemlich unverändert bleibt. Diese Grenze tritt für Russ bei $\lambda = 6,5$ und für Zinkoxyd schon bei $\lambda = 1,7$ ein. Die mikroskopische Untersuchung der Grössen der Partikeln der drei Medien zeigt auch, dass dieselben die gleiche Reihenfolge haben. So lange die Partikeln von derselben Grösseordnung wie die Wellenlänge der Strahlung sind, scheint die Aenderung der Durchsichtigkeit mit zunehmender Wellenlänge gross und stetig zuzunehmen. Sind die Partikeln dagegen klein im Vergleich zu der Wellenlänge, wie es der Fall bei den hier untersuchten Medien für die grössten Wellenlängen ist, so hat das Medium die Eigenschaft eines homogenen Mediums mit wirklicher Absorption gewonnen. Für diese Betrachtung sprechen auch die sehr interessanten Untersuchungen des Herrn Prof. C. Christiansen über die optischen Eigenschaften der weissen Medien.

Stockholms Högskolas Fysiska Institut, Juni 1888.

1) Ich habe es als nutzlos angesehen, die Berechnung dieser Curve mit grösserer Genauigkeit auszuführen, besonders da die Punkte der beobachteten Curve nicht alle mit derselben Genauigkeit bestimmt sind. Die für die Bestimmung der Constanten gewählten Punkte halte ich für sehr sicher.

2) K. Danske Vidensk. Selsk. Forh. 1882, und Wied. Ann. **23**, p. 298. 1884.
