

II. *Die selective Reflexion der Metalle; von Heinrich Rubens.*

(Inauguraldissertation, für die Annalen bearbeitet vom Herrn Verfasser.)

(Hierzu Taf. IV.)

Das Reflexionsvermögen der Metalle ist bereits öfters Gegenstand theoretischer und experimenteller Untersuchungen gewesen. Von ersteren sind hauptsächlich die metall-optischen Arbeiten von Cauchy¹⁾, Beer²⁾, Eisenlohr³⁾, Ketteler⁴⁾ und in neuester Zeit die Untersuchungen von Voigt⁵⁾ zu nennen. Die Annahmen, die diese Forscher ihren Theorien zu Grunde legen, sind theilweise verschieden, indessen ergeben ihre Entwicklungen Resultate, welche in allen experimentell wichtigen Fällen untereinander in Uebereinstimmung sind. Die optischen Eigenschaften der Metalle erweisen sich darin als vollkommen bestimmbar aus zwei Constanten, dem Hauptazimuth und Haupteinfallswinkel.

Durch experimentelle Ermittlung dieser beiden Grössen hat zuerst Jamin⁶⁾ unter Zugrundelegung der Cauchy'schen Theorie das Reflexionsvermögen der Metalle bei normaler Incidenz für die verschiedenen Farben des Spectrums bestimmt und hieraus mit Hülfe der Newton'schen Farbenspecter die Farbe der Metalle berechnet, welche mit der thatsächlich beobachteten in Uebereinstimmung gefunden wurde.

Directe Messungen des Reflexionsvermögens wurden später von De la Provostaye und P. Desains⁷⁾ angestellt und dasselbe vorzüglich nach zwei Seiten hin, nämlich in seiner Abhängigkeit vom Incidenzwinkel und der Wellenlänge der auffallenden Strahlung geprüft. Die Untersuchung, welche für strahlende Wärme, also mit dem Melloni'schen

1) Cauchy, Compt. rend. 8. p. 961. 1839.

2) Beer, Pogg. Ann. 92. p. 402. 1854.

3) Eisenlohr, Pogg. Ann. 104. p. 368. 1858.

4) Ketteler, Wied. Ann. 1. 1877 u. 3. 1878.

5) Voigt, Wied. Ann. 23. p. 104. 1884.

6) Jamin, Ann. de chim. et de phys. (3) 22. p. 311. 1848.

7) De la Provostaye et P. Desains, Ann. de chim. et de phys. (3) 30. p. 276. 1850.

Thermomultiplicator ausgeführt wurde, ergab Resultate, welche mit der Theorie von Cauchy in Uebereinstimmung waren.

Aber während der eine Theil dieser Arbeit, welcher sich damit beschäftigt, das Reflexionsvermögen als Function des Einfallswinkels festzustellen, als eine befriedigende Antwort auf die gestellte Frage zu betrachten ist, leidet der zweite Theil unter den damals fast unüberwindlichen Schwierigkeiten einer thermoskopischen Untersuchung bei spectraler Zerlegung, welche den Verfassern die Nothwendigkeit auferlegten, ihre diesbezüglichen Untersuchungen auf zwei oder drei Stellen im Spectrum (grün, roth, ultraroth) zu beschränken.

Es ist in dem Folgenden der Versuch gemacht worden, mit Hülfe der modernen Hilfsmittel und neuer Methoden den Verlauf des Reflexionsvermögens als Function der Wellenlänge in genauerer Weise festzustellen.

I. Beschreibung der Methode.

(S. Fig. 1.)

Die gesammte von einem Linnemann'schen Brenner *L* ausgesandte Strahlung wurde durch Linsen auf den zu untersuchenden Spiegel *S* concentrirt und von da auf den Spalt eines Spectroskops reflectirt, dessen drehbarer Arm statt des Beobachtungsfernrohrs ein Bolometer *B* trug, welches auf die verschiedenen Wellenlängen λ eingestellt werden konnte. Die an dieser Stelle des Spectrums hervorgebrachte Erwärmung konnte also in Form eines Galvanometerausschlags gemessen werden.

Durch eine automatische Vorrichtung wurde alsdann die Lampe an die Stelle ihres virtuellen Spiegelbildes gebracht, der Spiegel entfernt und wiederum die Erwärmung gemessen. Das Verhältniss der beiden Ausschläge gibt dann das Reflexionsvermögen des betreffenden Spiegels für die Wellenlänge λ .

II. Beschreibung der Apparate.

1. Die automatische Verschiebung geschah mittelst der folgenden Vorrichtung (siehe Fig. 2):

Auf einem mit drei Stellschrauben versehenen Fuss war ein horizontaler, um eine verticale Axe drehbarer Arm *AA*

befestigt, welcher an seinem freien Ende den in eine Camera eingeschlossenen Linnemann'schen Brenner L und genau über der Axe ein horizontales Tischchen T trug, welches die Drehung des Armes mitmachte, aber beim Lösen der Schraube C auch selbständige Drehungen um seine verticale Axe ausführen konnte. Auf diesem Tischchen war in genau senkrechter Lage eine ebene, mit einem rechteckigen Diaphragma D versehene Platte F derart befestigt, dass die verticale Mittellinie des Diaphragmas mit der verlängerten Drehungsaxe des Apparats coincidirte. Der zu untersuchende Spiegel wurde mittels zweier Federn gegen das Diaphragma gepresst und konnte in einer Führung zur Seite geschoben werden. Die von dem Brenner ausgehenden Strahlen wurden durch ein auf dem drehbaren Arm bewegliches System P von zwei Sammellinsen vereinigt auf den Spiegel, bez. durch das Diaphragma hindurch gesandt. Eine genaue Regulirung der Bewegung des drehbaren Armes wurde durch einen in horizontaler Lage am Fusse des Apparats befestigten Metallspiegel M bewirkt, welcher an seinen Enden zwei grosse Schrauben E und E^1 trug, durch deren Drehung der Spielraum für den beweglichen Arm in beliebiger Weise begrenzt werden konnte.

Die Wirkungsweise des Apparats ist hiernach leicht verständlich. Wird der bewegliche Arm nach Entfernen des Spiegels gegen die Schraube E gelegt, so entsteht bei geeigneter Stellung des Linsensystems ein reelles Bild des weissglühenden Zirkonblättchens kurz hinter dem Diaphragma. Dreht man andererseits den Arm bis zu seiner Berührung mit der Schraube E^1 , so kann nach Einsetzen des Spiegels durch passende Drehung der Schraube E oder des Tischchens an der gleichen Stelle des Raumes das reelle Bild des Zirkonblättchens im reflectirten Licht entworfen werden. Die Lage, die das Zirkonblättchen im ersten Falle einnahm, ist dann thatsächlich mit derjenigen identisch, an welcher sich nunmehr sein virtuelles Spiegelbild befindet.

Die Aufstellung des Apparats geschah in der Weise, dass das Diaphragma in etwa 5 cm Entfernung vom Spalt des Spectroskops und in gleiche Höhe mit diesem gebracht wurde. Die Stellung der Schrauben E und E^1 , sowie des

Linsensystems L wurde dann so lange regulirt, bis in beiden Stellungen des Armes ein deutliches kreisförmiges Bild des Zirkonblättchens in der Spaltebene des Spectroskops entworfen wurde.

Die Einstellungen wurden als genügend erachtet, wenn in beiden Lagen des Armes der Spalt des Spectroskops mit dem verticalen Durchmesser des Bildes coincidirte. Nach je acht Wechselbeobachtungen, d. h. Messungen der directen und reflectirten Strahlung wurde die Einstellung erneuert, und es ergab sich, dass die hierbei vorkommenden Fehler nur in den seltensten Fällen eine Schwankung des Resultates um mehr als 2 Proc. zur Folge hatten.

2. Das Spectroskop war ein grosses Instrument der gewöhnlichen Construction. An Stelle des Collimators befand sich ein 0,85 mm breiter Spalt und eine Sammellinse von ca. 140 mm Brennweite. Das Prisma war aus schwerem Silicat-Flintglas ($d = 1,58$; $n_D = 1,71$) gearbeitet, ein Material, das für spectrobolometrische Zwecke die Vorzüge einer ziemlich weitgehenden Durchlässigkeit für ultraroth Strahlen und einer äusserst starken Dispersion verbindet. Die Breite des reellen Spaltbildes im Spectrum betrug 2 mm, diejenige des sichtbaren Spectrums (B bis F) 37 mm, diejenige des unsichtbaren etwa 39 mm. Die Calibrirung des Prismas auf Wellenlängen wurde im sichtbaren Gebiet optisch, im unsichtbaren nach der Methode von Langley¹⁾ mit Hülfe eines Rowland'schen Gitters ausgeführt. Die nachfolgende Tabelle liefert die so gewonnenen Relationen zwischen den Wellenlängen λ und den Drehungen C des Bolometerarmes. Die angeführten Werthe von C sind Mittel aus je drei Einzelbeobachtungen, deren Abweichungen im Maximum 12 Minuten betragen.

Tabelle I.

λ	Hervorgebracht durch	C	λ	Hervorgebracht durch	C	λ	Hervorgebracht durch	C
0,461 μ ²⁾	Sr	255,8°	0,671 μ	Li	252,5°	1,382 μ	(Sr'')	250,5°
0,535	Ta	254,05	0,921	(Sr')	251,45	1,767	(Na'')	250,0
0,598	Na	253,3	1,178	(Na')	250,85	2,012	(Li'')	249,8

1) Langley, Wied. Ann. 22. p. 598. 1884, auch Phil. Mag. (5) 21. p. 402. 1886.

2) 1 μ = 0,001 mm.

Es ist wegen der Kleinheit der Ausschläge nicht möglich gewesen, die Calibrirung für längere Wellen fortzusetzen. Es ist daher der weitere Verlauf der Dispersionscurve (siehe Figur 3) durch Extrapolation unter Voraussetzung einer linearen Fortsetzung angenommen und kann somit nur als Schätzung gelten. Diese hat allerdings in Anbetracht der von Langley für Flintglas und Steinsalz aufgestellten Curven einige Wahrscheinlichkeit für sich.

Mit Hülfe der so erhaltenen Dispersionscurve wurde mittelst Interpolation die folgende Tabelle zusammengestellt.

Tabelle II.

λ	C	λ	C	λ	C
0,45 μ	256 ⁰	0,70 μ	252 ^{1/3} ₉	1,40 μ	250 ^{1/2} ₀
0,50	254 ^{3/4} ₀	0,80	251 ^{3/8} ₆	1,65	250 ^{1/8} ₆
0,55	253 ^{3/4} ₄	0,90	251 ^{1/2} ₂	2,00	249 ^{5/6} ₀
0,60	253 ^{1/2} ₆	1,00	251 ^{1/4} ₄	2,50	249 ^{1/3} ₃
0,65	252 ^{2/3} ₃	1,15	250 ^{11/12} ₁₂	3,00	248 ^{11/12} ₁₂

Durch nochmalige spectrale Zerlegung einiger Streifen im sichtbaren Gebiet des Spectrums wurde die Reinheit desselben geprüft und als befriedigend erwiesen. Indessen ist in Anbetracht der mit abnehmender Dispersion zunehmenden Unreinheit des Spectrums und der immerhin beträchtlichen Oeffnung des Bolometers von 3,5 mm im äussersten Ultraroth von einer genauen Angabe der Wellenlänge Abstand genommen und in den folgenden Tabellen die Angaben:

$\lambda = 2,5 \mu$ ersetzt durch: λ zwischen 2,3 μ und 2,7 μ

$\lambda = 3,0 \mu$ ersetzt durch: λ zwischen 2,7 μ und 3,2 μ .

3. Als Wärmequelle wurde nach vielfachen Versuchen der Linnemann'sche Zirkonbrenner gewählt, welcher bei geeigneter Behandlung neben einer bedeutenden Leuchtkraft den Vorzug vollkommen befriedigender Constanz besitzt. Dabei kann innerhalb ziemlich beträchtlicher Grenzen die Leuchtkraft variirt werden, ohne dass die Constanz darunter leidet. Es wurde deswegen nur für die brechbarsten Gebiete des sichtbaren Spectrums die volle, für das übrige eine etwas verminderte Leuchtkraft in Anspruch genommen.

In der nächsten Tabelle ist die Intensitätsvertheilung innerhalb des durch den Linnemann'schen Brenner und

das Prisma entworfenen Spectrums dargestellt. Es bedeutet darin λ die Wellenlänge, a den direct abgelesenen Ausschlag in Scalentheilen, $\operatorname{tg} \alpha$ die Tangente des Neigungswinkels der Dispersionscurve gegen die x -Axe an der betreffenden Stelle. Es ist somit $b = a \cdot \operatorname{tg} \alpha$ die Energie der Strahlung im Normalspectrum und würde die wahre Energievertheilung im Zirkonbrenner wiedergeben, wenn nicht Absorptionen innerhalb des Apparates erfolgten. Dieser Umstand beschränkt die diesbezügliche Gültigkeit jener Zahlen bis etwa $\lambda = 2,5 \mu$. Ihr Verlauf ist indessen für die vorliegende Untersuchung nur von nebensächlichem Interesse.

Tabelle III.

λ	a	$\operatorname{tg} \alpha$	b	λ	a	$\operatorname{tg} \alpha$	b
0,45 μ	21	8,6	190	1,00 μ	2300	0,65	1500
0,50	43	5,4	230	1,15	3400	0,5	1700
0,55	140	3,9	560	1,40	5400	0,32	1780
0,60	270	2,8	770	1,65	6300	0,26	1640
0,65	400	2,1	820	2,00	5900	0,23	1360
0,70	630	1,5	950	2,3 bis 2,7	3400	0,22	680
0,80	1120	1,0	1120	2,7 „ 3,2	1500	0,22	270
0,90	1580	0,8	1260	3,2 „ 3,8	280	0,21	59

Ein besseres Bild vom Verlauf der Grössen a und b als Functionen von λ gewähren die in Fig. IV entworfenen Curven. In Bezug auf die Lage der Maxima ergibt sich naturgemäss hierbei Aehnliches, wie es bereits von Langley im Normal- und Dispersionsspectrum der Sonne und anderer Lichtquellen beobachtet wurde. Die Stelle grösster Intensität erscheint im Dispersionsspectrum bei etwa 1,7 bis 1,8 μ , im Normalspectrum bei etwa 1,3 bis 1,4 μ , also wesentlich verschoben nach Seite der kürzeren Wellen. Die Lage der Maxima ist übrigens, je nach der Leuchtkraft, welche man dem Brenner zumuthet, beträchtlichen Schwankungen ausgesetzt (etwa $\pm 0,1 \mu$).

Durch Einschalten gefärbter Glasplatten in den Gang der Lichtstrahlen wurden die Ausschläge in allen Gebieten des Spectrums auf etwa 300 Scalentheile reducirt.

4. Das Bolometer war im wesentlichen nach den Angaben von Angström¹⁾ construirt. In ein doppelwandiges

1) Ångström, Wied. Ann. 26. p. 256. 1885.

Blechkästchen (*A*, Fig. 5) von schmaler, parallelepipedischer Gestalt wurde ein vorn mit einer spaltförmigen Oeffnung *B* versehenes Holzgestell *C* eingepasst, welches ein Brettchen *D* mit den beiden Vergleichswiderständen *E* und *E*¹ trug. Die Oeffnung *B* befand sich genau vor einem der beiden Widerstände (*E*) und war gegen den anderen durch eine Längswand *F* abgesperrt, die sich durch das ganze Kästchen in verticaler Lage hinstreckte. Als Material für die Bolognawiderstände bewährte sich ein ca. 0,01 mm dickes Stanniol vortrefflich. Bei einiger Uebung gelang es, zwei vollkommen gleiche Widerstandsgitter von 5,2 Ohm herzustellen, deren jedes auf einer Fläche von 35 mm Länge und 3,5 mm Breite sieben etwa $\frac{1}{3}$ mm breite, seitlich voneinander isolirte Stanniolstreifen enthielt. Die Widerstände wurden mittelst Schellack auf das Holzrähmchen aufgeklebt und auf beiden Seiten mit einer Terpentinölflamme stark berusst. Um auch die zwischen den Streifen durchfallenden Strahlen an der Erwärmung theilnehmen zu lassen, wurde in etwa 4 mm Entfernung hinter den Widerständen ein stark reflectirender Planspiegel¹⁾ angebracht.

5. Als Stromquelle wurden 2 Daniell'sche Elemente benutzt und die Stromintensität durch einen Rheostaten auf etwa 0,2 Amp. normirt.

6. Das Galvanometer (von Siemens und Halske) besass zwei astatische Glockenmagnete und war auf eine Schwingungsdauer von 4 bis 5 Secunden astasirt. Seine vier Rollen von je 20 Einheiten waren nebeneinander geschaltet, sodass sein Gesamtwiderstand 5 Einheiten betrug. Die Wheatstone'sche Brücke war somit in ihrer maximalen Empfindlichkeit, wenn zu beiden Seiten des Messdrahtes²⁾ Widerstände von 5 Einheiten eingeschaltet wurden. Bei dieser Schaltung entsprach 1 Scalenthail Ausschlag einer Temperaturerhöhung des belichteten Widerstandes von ca. 0,032 Centigrad. Dass diese Empfindlichkeit von

1) Bei der Herstellung der in Fig. 4 gegebenen Intensitätscurven wurde der Spiegel seiner Selectivreflexion wegen entfernt.

2) Es ist für feinere Messungen unbedingt erforderlich, einen solchen mit Quecksilbercontact zu nehmen.

Langley¹⁾ um das Zwanzigfache übertroffen wurde, ist auf Rechnung seines über 30 mal empfindlicheren Galvanometers zu setzen. Als Maass der Empfindlichkeit des angewandten Thermoskops mag der Umstand angesehen werden, dass ein Argandbrenner mittlerer Grösse in 1 m Entfernung einen Ausschlag von ca. 60 Scalentheilen hervorbrachte.

Wurde der Bolometerwiderstand belichtet, was durch Aufziehen einer in den Strahlengang eingeschalteten Klappvorrichtung mit Schnurlauf geschah, so setzte sich der Spiegel sofort in rasche Bewegung, erreichte bald ein Maximum der Elongation, beschrieb eine rückläufige Bewegung um etwa 5 Proc. des Gesamtbetrags und näherte sich dann langsam und stetig dem endgültigen Ausschlag. Beim Herablassen der Klappe kehrte der Spiegel nach einer einzigen Schwankung in die Ruhelage zurück. Es wurde bei allen folgenden Messungen nur das erste Maximum der Elongation abgelesen und sofort die Klappe herabgelassen. Es wurde hierdurch ermöglicht, eine symmetrische Versuchsreihe von acht Wechselbeobachtungen in 5 Minuten herzustellen, einem Zeitraum, innerhalb dessen sich die Intensität der Wärmequelle kaum um einen messbaren Betrag änderte.

III. Prüfung der Methode.

1. Da die bei den Beobachtungen abgelesenen Galvanometerausschläge theoretisch in sehr complicirter Weise von der Energie der Strahlung abhängen, erschien es nothwendig, den experimentellen Beweis ihrer Proportionalität mit dieser zu erbringen.

Der Beweis lässt sich in drei Gruppen gliedern.

a) Es ist erstens nachzuweisen, dass die Ausschläge proportional der Stromintensität sind, d. h. dass der k fachen Stromintensität, unabhängig von ihrer absoluten Grösse, auch der k fache Ausschlag entspricht.

Zu diesem Zwecke wurde in den Gang der Lichtstrahlen eine absorbirende Platte eingeschaltet. Es sei nun die Potentialdifferenz, die durch directe Belichtung des Bolometerwiderstandes an den Enden des Brückendrahtes hervor-

1) Langley, Phil. Mag. (1) 21. p. 402. 1886.

gebracht wird gleich E , diejenige nach Einschalten der absorbirenden Platte gleich $\kappa \cdot E$, so muss sich unabhängig von der absoluten Grösse der Ausschläge, wenn diese durch Einschalten von Widerstand in die Galvanometerleitung variiert werden, ein bestimmtes Ausschlagsverhältniss κ ergeben. Die folgende Tabelle enthält eine solche Versuchsreihe. ν bedeutet darin die Ordnungsnummer; α_ν und β_ν die Ausschläge bei directer Belichtung und nach Einschalten der Platte, sind Mittel aus vier Beobachtungen.

Tabelle IV.

ν	α_ν	β_ν	κ_ν
1	579	290	0,501
2	293	145,7	0,498
3	144,5	72,2	0,500
4	46,2	23,5	0,508

Die Schwankungen von κ liegen innerhalb der Fehlergrenze.

b) Es ist ferner leicht einzusehen, dass die Stromintensitäten im Brückenweig den Temperaturerhöhungen des Bolometerwiderstandes proportional sein müssen. Eine einfache Rechnung ergibt nämlich für den vorliegenden Fall, in welchem die vier Vergleichswiderstände und der Widerstand des Galvanometers fast gleiche Grösse (W) besitzen:

$$\delta i = \kappa \cdot \frac{J}{8} \cdot \delta t.$$

Hierin bedeutet J die Stromintensität im Hauptstromkreis, κ den Temperaturcoefficienten des Bolometerwiderstandes, δt die Temperaturerhöhung, δi den erzeugten Strom in der Brücke:

$$\delta i = \text{const. } \delta t,$$

denn J ist bei der Kleinheit der vorkommenden Temperaturerhöhungen gegen δi und δt als constant zu betrachten.

c) Es bleibt schliesslich der Nachweis zu führen, dass die Temperaturerhöhung des Bolometerwiderstandes proportional ist der Energie der Strahlung, durch welche sie hervorgebracht wird.

Es kann dies folgendermassen geschehen: Es sei die Energie einer homogenen Scheibe gleich a , diejenige nach

Einschalten einer Platte I gleich b , diejenige nach Einschalten einer Platte II gleich c , so ist sie nach Einschalten der beiden Platten¹⁾ I und II hintereinander gleich:

$$d = \frac{b \cdot c}{a}, \text{ oder } \frac{b \cdot c}{a \cdot d} = 1.$$

Ist nun die Erwärmung thatsächlich proportional der Energie, so muss sich die analoge Relation zwischen den Temperaturerhöhungen, also auch zwischen den abgelesenen Ausschlägen auffinden lassen.

Eine diesbezügliche Versuchsreihe ergab im Mittel aus vier Beobachtungen:

$$a = 398 \quad b = 227 \quad c = 204 \quad d = 117$$

und hieraus: $b \cdot c / a \cdot d = 1,005.$

Eine zweite mit anderen Platten ausgeführte Reihe ergab:

$$b \cdot c / a \cdot d = 1,007.$$

In beiden Fällen liegen die Abweichungen innerhalb der Fehlergrenze, und man ist somit zu der Annahme berechtigt, dass die Temperaturerhöhung proportional der Energie der Strahlung wächst.

Fasst man Anfangs- und Endglied der Schlusskette zusammen, so erhellt, dass, zum mindesten für homogenes Licht, die abgelesenen Ausschläge thatsächlich ein Maass für die Intensität der Strahlung sind.

Dass das Bolometer auch für Strahlen verschiedener Wellenlänge die gleiche Aufnahmefähigkeit besitzt, bedarf hier keines Beweises, da es sich in der vorliegenden Arbeit vorzüglich um relative Messungen, d. h. Vergleiche von Strahlungen gleicher Wellenlänge handelt. Uebrigens liegt diese Voraussetzung, welche sich auf die Annahme gründet, dass Russ ein vollkommen schwarzer Körper ist, allen absoluten Messungen zu Grunde, die bisher auf thermoskopischem Gebiet vorgenommen wurden.

2. Die in dem Folgenden gegebenen Zahlenwerthe für das Reflexionsvermögen der Metalle sind beobachtet und gelten daher, streng genommen, für eine Incidenz von 12

1) Um die durch wiederholte Reflexion an den Platten hervorgebrachten Fehler zu vermeiden, wurde hierbei die eine Platte vor, die andere hinter dem Spalt eingeschaltet.

bis 15°. Es lässt sich indessen leicht zeigen, dass die erhaltenen Resultate mit sehr geringer Abweichung (weniger als 2 Proc.) auch für normale Incidenz Geltung besitzen.

Es ist nämlich klar, dass bei schiefer Incidenz das Reflexionsvermögen für natürliches Licht der Grösse nach zwischen demjenigen für normal und demjenigen für parallel der Einfallsebene polarisirtes Licht liegen muss. Es ist ferner bekannt, dass, vom Haupteinfallswinkel an gerechnet, bei abnehmendem Incidenzwinkel das Reflexionsvermögen des normal zur Einfallsebene polarisirten Strahles wächst, dasjenige des parallel polarisirten abnimmt. Sind daher diese beiden Werthe bei einer gewissen Kleinheit der Incidenz einander nahezu gleich, d. h. ihr Verhältniss Q mit geringer Abweichung gleich Eins geworden, so ist der Fehler, den man bei Uebertragung des bei dieser Incidenz beobachteten Reflexionsvermögens auf den Fall der normalen Incidenz begeht, jedenfalls procentisch kleiner, als diese Abweichung in Bezug auf die Einheit. Die folgende Tabelle enthält eine Beobachtungsreihe von Jamin¹⁾, in welcher die Grösse Q für eine Stahlplatte als Function des Incidenzwinkels experimentell festgestellt wird.

Incidenz	Quadratwurzel aus Intens. des		\sqrt{Q}	Q
	senkr. z. Einfallsebene pol. Lichts	parall. z. Einfallsebene pol. Lichts		
85°	0,719	0,951	0,756	0,571
80	0,547	0,945	0,578	0,334
75	0,566	0,946	0,598	0,357
70	0,545	0,919	0,595	0,354
60	0,630	0,897	0,703	0,494
40	0,688	0,780	0,880	0,774
20	0,770	0,780	0,988	0,977

Es ist hiernach mit Sicherheit anzunehmen, dass zum mindesten für Stahl bei einer Incidenz von 15° der Fehler nicht 2 Proc. des Gesamtbetrages übersteigt, wahrscheinlich aber bedeutend kleiner ist.

Dass sich die übrigen Metalle ganz analog verhalten, geht aus der bereits citirten Arbeit von de la Provostaye und P. Desains deutlich hervor. Es können also auch für

1) Jamin, Ann. de chim. et de phys. (3) 19. p. 304. 1847.

jene die gewonnenen Resultate auf den Fall der normalen Incidenz übertragen werden.

3. Zur weiteren Prüfung der Methode wurde das Reflexionsvermögen einer Glasplatte von bekanntem Brechungsvermögen untersucht und dasselbe mit den aus der Fresnel'schen Formel:

$$R = J \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

berechneten Werthen verglichen.

Es wurde hierzu die nämliche Glassorte gewählt, aus welcher das Prisma gearbeitet war, und daraus eine planparallele Platte gefertigt, deren eine Fläche hoch polirt und deren andere matt geschliffen und geschwärzt wurde, sodass nur die Reflexion von einer einzigen Fläche in Betracht kam.¹⁾

In der folgenden Tabelle sind die hierbei erhaltenen Zahlen zusammengestellt. Die unter Einzelbeobachtungen aufgeführten Werthe sind wiederum Mittel aus fünf Wechselbeobachtungen.

Tabelle V.

λ	Reflexionsvermög. beob.		Reflexionsverm. ber.	Differenz
	Einzelbeob.	Mittel		
0,60 μ	0,074	0,071	0,069	+ 0,002
	0,068			
	0,078			
	0,067			
	0,068			
1,00 μ	0,068	0,068	0,067	+ 0,001
	0,070			
	0,068			
	0,068			
	0,066			
2,00 μ	0,063	0,067	0,065	+ 0,002
	0,068			
	0,070			
	0,067			
	0,067			
3,2 μ bis 3,8 μ	0,062	0,062	0,063	- 0,001
	0,064			
	0,067			
	0,057			
	0,060			

1) Es ist hierbei zu bemerken, dass die Platte an den beiden folgenden Tagen nach ihrer Anfertigung untersucht wurde. Wie Lord Rayleigh nachgewiesen hat (Nat. 35. p. 64. 1886), ist dies auf die Anwendbarkeit der Fresnel'schen Formel von sehr erheblichem Einfluss.

Die Uebereinstimmung der Zahlen ist im ganzen befriedigend. Sie wäre eine bessere, wenn nicht die Ausschläge im reflectirten Licht im Gegensatz zu denen bei directer Belichtung sehr klein wären (30 bis 40 Scalentheile gegen 400 bis 600). Dieser Missstand fällt bei den an Metallspiegeln angestellten Messungen weg, wodurch dort eine bei weitem grössere Genauigkeit erzielt wird. Es kann aber schon aus den obigen Versuchen auf den ungefähren Betrag der Dispersion geschlossen werden.

IV. Beobachtungen und Ergebnisse.

Es wurde im ganzen das Reflexionsvermögen von fünf Metallen, nämlich Silber, Gold, Kupfer, Eisen und Nickel untersucht und wenn möglich den verschiedenen Modificationen derselben Sorge getragen. Die hierbei sich ergebenden Abweichungen waren indessen bei allen Metallen, vielleicht mit Ausnahme des Goldes, so gering, dass sie wohl mehr auf Rechnung verschiedenartiger und verschieden hoher Politur zu setzen sind. Es ist daher bei der schliesslichen Zusammenstellung aus den für verschiedene Spiegel desselben Metalls erhaltenen Werthe das Mittel genommen worden.

Diese Messungen erfolgten an den fünfzehn in Tab. II aufgeführten Stellen des Spectrums.

Je acht Wechselbeobachtungen wurden zu einem Mittel vereinigt und nach jeder solchen Reihe die Einstellung des Apparates erneuert. Das Hauptmittel aus fünf bis sechs solchen Versuchsreihen wurde schliesslich als Reflexionsvermögen des Spiegels für die betreffende Wellenlänge angegeben.

Um die Grösse der vorkommenden Beobachtungsfehler hervortreten zu lassen, sind für die beiden untersuchten Nickelspiegel die Mittel erster Art mit angegeben worden. Sie sind in den folgenden Tabellen als Einzelbeobachtungen bezeichnet.

Nickelspiegel Nr. 1 (electrolytisch vernickelte Messingplatte).

λ	Reflexionsverm.		λ	Reflexionsverm.		λ	Reflexionsverm.	
	Einzelbeob.	Mittel		Einzelbeob.	Mittel		Einzelbeob.	Mittel
0,45 μ	63,0	62,0	0,70 μ	68,0	67,6	1,40 μ	80,6	81,0
	61,3			66,9			79,7	
	62,7			67,6			79,4	
	61,8			67,3			83,7	
	60,9			68,0			81,8	
0,50 μ	61,2	61,0	0,80 μ	68,9	70,1	1,65 μ	84,1	83,6
	60,0			71,2			82,2	
	61,9			71,0			82,8	
	61,4			68,6			85,3	
	61,0			70,6			83,3	
0,55 μ	62,0	61,8	0,90 μ	73,4	73,0	2,00 μ	84,2	84,2
	62,1			72,6			83,7	
	60,9			74,5			84,0	
	61,6			71,3			85,0	
	62,6			73,0			83,9	
0,60 μ	62,7	62,9	1,00 μ	77,3	77,3	2,3 bis 2,7 μ	87,8	88,4
	62,0			78,9			87,5	
	62,8			76,4			89,3	
	63,7			76,5			89,6	
	63,2			77,3			88,0	
0,65 μ	67,7	65,5	1,15 μ	79,5	79,3	2,7 bis 3,2 μ	91,0	91,3
	63,7			77,5			92,0	
	66,1			78,9			91,6	
	64,2			80,9			91,1	
	65,8			80,0			90,9	

Nickelspiegel Nr. 2 (Platte aus reinem Nickel).

0,45 μ	62,8	61,4	0,70 μ	67,5	68,1	1,40 μ	82,4	82,5
	58,1			68,9			82,2	
	62,5			68,8			81,4	
	60,2			67,4			82,7	
	63,2			67,7			83,3	
0,50 μ	62,0	61,0	0,80 μ	69,6	70,8	1,65 μ	84,9	84,3
	60,9			71,2			84,7	
	59,3			70,5			84,7	
	60,9			71,6			83,8	
	61,6			71,3			83,3	
0,55 μ	63,3	62,5	0,90 μ	72,0	73,3	2,00 μ	85,3	84,9
	61,4			75,8			85,1	
	62,6			72,8			85,0	
	62,7			73,0			83,8	
	62,6			72,8			85,3	
0,60 μ	64,5	64,0	1,00 μ	77,2	77,5	2,3 bis 2,7 μ	88,7	88,7
	65,0			77,6			88,9	
	63,1			75,5			88,8	
	64,5			78,7			88,1	
	62,3			78,3			89,0	
0,65 μ	66,5	66,1	1,15 μ	80,3	81,6	2,7 bis 3,2 μ	91,9	92,2
	65,8			79,5			91,0	
	67,3			83,2			91,0	
	66,5			82,7			90,3	
	64,3			82,6			90,7	

Silberspiegel

Nr. 1.

(Feinsilberplatte, auf eine Kupferplatte aufgelöthet.)

λ	Refl.-Verm. R
0,45 μ	86,0
0,50 "	87,9
0,55 "	88,9
0,60 "	91,4
0,65 "	92,9
0,70 "	93,3
0,80 "	94,2
0,90 "	95,1
1,00 "	96,3
1,15 "	96,8
1,40 "	97,1
1,65 "	97,6
2,00 "	97,2
2,3 bis 2,7 μ	96,3
2,7 " 3,2 "	98,0

Silberspiegel

Nr. 2.

(Versilberte Kupferplatte.)

λ	Refl.-Verm. R
0,45 μ	88,0
0,50 "	89,3
0,55 "	91,7
0,60 "	94,0
0,65 "	93,8
0,70 "	96,0
0,80 "	96,3
0,90 "	96,5
1,00 "	96,8
1,15 "	97,2
1,40 "	97,7
1,65 "	97,9
2,00 "	97,4
2,3 bis 2,7 μ	97,8
2,7 " 3,2 "	98,6

Goldspiegel

Nr. 1.

(Nach dem Rössler'schen Verfahren auf Spiegelglas gebrannt.)

λ	Refl.-Verm. R
0,45 μ	42,4
0,50 "	54,0
0,55 "	69,5
0,60 "	79,0
0,65 "	84,3
0,70 "	89,7
0,80 "	91,8
0,90 "	95,0
1,00 "	97,1
1,15 "	97,8
1,40 "	98,3
1,65 "	97,6
2,00 "	95,8
2,3 bis 2,7 μ	90,1
2,7 " 3,2 "	84,8

Goldspiegel

Nr. 2.

(Feingoldplatte auf eine Kupferplatte aufgelöthet.)

λ	Refl.-Verm. R
0,45 μ	44,5
0,50 "	56,3
0,55 "	72,7
0,60 "	82,0
0,65 "	86,2
0,70 "	90,8
0,80 "	93,1
0,90 "	95,4
1,00 "	96,6
1,15 "	96,9
1,40 "	96,0
1,65 "	96,4
2,00 "	95,0
2,3 bis 2,7 μ	89,8
2,7 " 3,2 "	86,0

Kupferspiegel Nr. 1.
(Platte aus gewalztem Kupfer)

λ	Reflex.-Verm. R
0,45 μ	52,0
0,50 "	54,5
0,55 "	69,3
0,60 "	78,1
0,65 "	81,4
0,70 "	84,2
0,80 "	86,3
0,90 "	88,1
1,00 "	89,1
1,15 "	89,7
1,40 "	91,1
1,65 "	93,0
2,00 "	94,3
2,3 bis 2,7 μ	95,1
2,7 " 3,2 "	95,1

Kupferspiegel Nr. 2.
(Platte aus electrolytischem Kupfer.)

λ	Reflex.-Verm. R
0,45 μ	54,0
0,50 "	55,2
0,55 "	70,7
0,60 "	77,2
0,65 "	79,9
0,70 "	82,5
0,80 "	84,6
0,90 "	87,6
1,00 "	88,8
1,15 "	89,3
1,40 "	91,6
1,65 "	93,1
2,00 "	93,5
2,3 bis 2,7 μ	95,0
2,7 " 3,2 "	97,0

Eisenspiegel Nr. 1.
(Platte aus gewöhnlichem Eisen.)

λ	Reflex.-Verm. R
0,45 μ	58,8
0,50 "	57,8
0,55 "	56,2
0,60 "	57,6
0,65 "	60,0
0,70 "	61,8
0,80 "	63,8
0,90 "	65,1
1,00 "	68,8
1,15 "	72,3
1,40 "	74,4
1,65 "	77,7
2,00 "	80,5
2,3 bis 2,7 μ	86,5
2,7 " 3,2 "	89,1

Eisenspiegel Nr. 2.
(Magnetischer Stahlspiegel aus einem
Wiedemann'schen Galvanometer.)

λ	Reflex.-Verm. R
0,45 μ	58,5
0,50 "	57,6
0,55 "	56,0
0,60 "	57,4
0,65 "	59,1
0,70 "	61,0
0,80 "	63,4
0,90 "	64,3
1,00 "	69,3
1,15 "	72,2
1,40 "	74,2
1,65 "	79,1
2,00 "	80,5
2,3 bis 2,7 μ	86,8
2,7 " 3,2 "	90,2

Die in der nachstehenden Tabelle enthaltenen Ergebnisse werden in übersichtlicherer Form in Fig. 6 wiedergegeben. Von allgemeinen Sätzen lässt sich trotz der Unregelmässigkeit der Curven das Folgende erkennen:

1. Im allgemeinen ist das Reflexionsvermögen im ultra-rothen grösser als im sichtbaren Gebiet des Spectrums.

2. Von den untersuchten Metallen zeigen die guten Leiter für Wärme und Electricität (Silber, Kupfer, Gold)

ein stärkeres Reflexionsvermögen als die schlechten (Nickel und Eisen).¹⁾

Zusammenstellung der für sämtliche Metalle erhaltenen Mittelwerthe.

λ	Silber	Gold	Kupfer	Eisen	Nickel
0,45 μ	87,0	43,4	53,0	58,7	61,7
0,50 "	88,3	56,1	54,8	57,7	61,0
0,55 "	90,3	71,1	70,0	56,1	62,1
0,60 "	92,7	80,5	77,7	57,6	63,4
0,65 "	93,3	85,3	80,7	59,6	65,8
0,70 "	94,5	90,3	83,3	61,4	67,8
0,80 "	95,2	92,4	85,4	63,6	70,4
0,90 "	95,8	95,2	87,3	64,7	73,1
1,00 "	96,5	96,8	88,9	69,0	77,4
1,15 "	97,0	97,3	89,5	72,3	80,4
1,40 "	97,4	97,0	91,3	74,3	81,7
1,65 "	97,7	97,0	93,0	78,4	83,9
2,00 "	97,3	95,4	93,9	80,5	84,5
2,3 bis 2,7 μ	97,0	89,0	95,0	86,6	88,0
2,7 " 3,2 "	98,3	84,2	96,4	89,6	91,7

3. Die Metalle mit normaler optischer Dispersion¹⁾ (Gold und Kupfer) zeigen im sichtbaren Gebiet auch starke Aenderungen des Reflexionsvermögens mit der Wellenlänge.

Bemerkenswerth ist noch die Aehnlichkeit im Verlaufe der Reflexionscurven von Nickel und Eisen. Beide Curven zeigen im sichtbaren Gebiet ein Minimum und steigen bis 1,2 μ ziemlich steil an, während von da ab ein sanfteres Ansteigen bemerkbar ist.

V. Vergleich der Ergebnisse mit den bereits bestimmten optischen Constanten der Metalle unter Zugrundelegung der Cauchy'schen Theorie.

Wie bereits erwähnt wurde, hat Jamin das Reflexionsvermögen einiger Metalle aus dem experimentell gefundenen Haupteinfallswinkel H und Hauptazimuth B nach der Cau-

1) Auch Platin bestätigt diese Regel. Es ist zwar nicht gelungen, vollkommen ebene und diffusionsfreie Platinspiegel herzustellen, indessen ergeben die an dicken, nach dem Rössler'schen Verfahren auf Glas niedergeschlagenen Platinspiegeln ausgeführten Versuche in Uebereinstimmung mit den Angaben von de la Provostaye und Desains ein Reflexionsvermögen von etwa 60 bis 70 Proc. im sichtbaren Spectrum und 70 bis 80 Proc. im äussersten Ultraroth. Das mittlere Reflexionsvermögen von Platin ist also gleich dem des Eisens.

2) Kundt, Wied. Ann. 34. p. 482. 1888.

chy'schen Theorie berechnet. Auch Quincke¹⁾ hat für eine grössere Reihe von Metallen diese beiden optischen Constanten festgestellt.

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der Werthe, welche die Cauchy'sche Theorie²⁾ unter Zugrundelegung der von Jamin und Quincke bestimmten Constanten B und H für das Reflexionsvermögen liefert, mit den Ergebnissen dieser Untersuchung. Eine Berechnung des Reflexionsvermögens nach der Theorie von Voigt ist unterblieben, da diese Theorie in der Berechnung erheblich unbequemer ist und nahezu die gleichen Zahlenwerthe liefert.

Metall	Farbe	Reflexions- vermögen beob.	Reflexionsvermögen	
			berechn. aus H und B v. Jamin	berechn. aus H und B v. Quincke
Silber	roth (C)	93,3	92,9	87,3
	grün (E)	89,3	90,2	80,9
	blau ($\frac{F+G}{2}$)	87,0	87,5	73,5
Gold	roth (C)	85,3	—	91,4
	grün (E)	63,6	—	70,7
	blau ($\frac{F+G}{2}$)	43,4	—	34,8
Kupfer	roth (C)	80,7	68,2	76,7
	grün (E)	61,7	47,0	64,4
	blau ($\frac{F+G}{2}$)	53,0	42,3	38,9
Eisen	roth (C)	59,6	60,9	52,8
	grün (E)	56,9	59,3	54,0
	blau ($\frac{F+G}{2}$)	58,7	60,4	56,5
Nickel	roth (C)	65,8	—	66,4
	grün (E)	61,6	—	60,4
	blau ($\frac{F+G}{2}$)	61,7	—	56,3

Die Uebereinstimmung ist keine sehr befriedigende. Die Gründe dafür sind ausser in der Verschiedenheit des unter-

1) Quincke, Pogg. Ann. Jubelbd. p. 336. 1874.

2) Die bei der numerischen Ausrechnung verwendeten Formeln sind dem Lehrbuch von Wüllner (Experimentalphysik 2. p. 551) entlehnt, welches den Beer'schen Entwicklungsgang in sehr übersichtlicher Weise wiedergibt.

suchten Materials hauptsächlich in einer grossen Unsicherheit in der Bestimmung des Hauptazimuths B zu suchen.¹⁾ Die Angaben der beiden Beobachter bezüglich dieser Constanten differiren erheblich, während ihre Werthe von H in besserer Uebereinstimmung sind.

Dieser Umstand legt es nahe, eine Bestimmung der Extinctionscoefficienten und Brechungsexponenten der Metalle aus dem Reflexionsvermögen einerseits und dem Haupteinfallswinkel andererseits vorzunehmen und die Resultate dieser Rechnung mit den von Kundt auf directem Wege gefundenen Werthen zu vergleichen. Die hierbei auftretenden transcendenten Gleichungen können mittelst graphischer Methoden hinreichend genau gelöst werden. Die Ergebnisse dieser nicht schwierigen, aber etwas mühevollen Arbeit sind in der nächsten Tabelle zusammengestellt.

Metall	Farbe	Re- flexions- verm. R	Haupt- einfallswinkel H	Extinc- tions- coëff. k	Brechungs- exp. n	n von Kundt beob.
Silber	roth	93,3	75° —'	3,46	0,24 ²⁾	0,27
	grün	89,3	71 30	2,67	0,23	—
	blau	87,0	68 11	2,12	0,20	—
Gold	roth	85,3	72° 47'	2,91	0,38	0,38
	grün	63,6	66 32	1,86	0,53	—
	blau	43,4	64 15	1,52	0,79	1,00
Kupfer	roth	80,7	71° 21'	2,61	0,45	0,45
	grün	61,7	68 44	2,13	0,69	—
	blau	53,0	67 44	1,94	0,85	0,95
Eisen	roth	59,6	76° 20'	3,35	2,10	1,81
	grün	56,9	74 46	2,97	1,80	—
	blau	58,7	73 12	2,72	1,32	1,52
Nickel	roth	65,8	77° 22'	3,79	2,08	2,17
	grün	61,6	74 55	3,12	1,62	—
	blau	61,7	73 5	2,77	1,21	1,85

1) Vgl. Voigt, Wied. Ann. 23. p. 143. 1884.

2) Haughton (Phil. Trans. 1. p. 122. 1863) erhält für rothes Licht und verschiedene Silbersorten Werthe von H zwischen $H = 72^{\circ} 7'$ und $H = 78^{\circ} 22'$; im Mittel $H = 76^{\circ} 12'$, was unter Voraussetzung der Zahl $R = 93,3$ einem Extinctionscoefficienten $k = 3,82$ und einem Brechungsexponenten $n = 0,29$ entspricht.

Die Haupteinfallswinkel H sind für Silber und Kupfer den Beobachtungen von Jamin entlehnt, diejenigen für Gold, Eisen und Nickel denen von Quincke. Die Uebereinstimmung mit den von Kundt beobachteten Brechungsexponenten ist durchaus zufriedenstellend, namentlich im Roth. Die Abweichungen im Blau sind jedenfalls zum Theil Folge des Umstandes, dass nicht in beiden Fällen das Blau der gleichen Wellenlänge benutzt wurde.

Wernicke¹⁾ hat den Extinctionscoëfficienten des Silbers experimentell ermittelt. Er findet als Mittel aus fünf an verschiedenem Material gemachten Beobachtungen:

$$\begin{array}{ll} \text{für roth (C):} & k = 3,57, \\ \text{für grün (E):} & k = 2,95, \\ \text{für blau } \left(\frac{F+G}{2}\right): & k = 2,55. \end{array}$$

Auch hier lassen sich die Abweichungen von den oben erhaltenen Zahlen in ungezwungener Weise aus den Beobachtungsfehlern erklären. Es scheint somit aus der Summe des vorgelegten Beobachtungsmaterials hervorzugehen, dass die metalloptischen Theorien auch in Bezug auf die Intensität des reflectirten Lichtes den wahren Sachverhalt in treffender Weise wiederzugeben geeignet sind.

Die vorstehende Untersuchung wurde auf Veranlassen des Hrn. Prof. Kundt im physikalischen Laboratorium zu Strassburg begonnen und in Berlin vollendet. Es sei mir gestattet, an dieser Stelle diesem meinem verehrten Lehrer für seine werthvollen und bereitwilligen Rathschläge meinen wärmsten Dank auszusprechen.

1) Wernicke, Pogg. Ann. Ergbd. 8. p. 65. 1878.

