

**5. Zur Frage  
der Dissymmetrie der Zeemanschen Triplets;  
von W. Voigt.**

---

1. Die von mir aus den Formeln der Theorie gefolgerte Erscheinung der Dissymmetrie der Zeemanschen Triplets<sup>1)</sup> ist wiederholt der Gegenstand experimenteller und theoretischer Überlegung gewesen. Ihr Interesse liegt in erster Linie darin, daß sie aus der elementaren Theorie des *direkten* oder *Emissionseffektes nicht* folgt, sondern nur aus der Theorie des *inversen* oder *Absorptionseffektes*, und nach dem Kirchhoffschen Satz dann auf den direkten Effekt übertragen werden kann. Über die Gründe dieser Abweichung habe ich mich an anderer Stelle<sup>2)</sup> ausführlich geäußert. Wenn die bez. Dissymmetrie nun unter Umständen, wo die Theorie der Beobachtbarkeit vorliegt, durch die Beobachtung nicht realisiert werden könnte, so wäre daraus ein gewisser Einwand gegen die ganze Theorie des inversen Effektes zu entnehmen.

Die früheren Versuche zum Nachweis der Dissymmetrie sind bezüglich der Grundfrage ohne entscheidendes Ergebnis geblieben. Sie haben aber gelehrt, daß es sekundäre Umstände gibt, welche in der Theorie der inversen Effekte ursprünglich nicht vorausgesehen werden konnten, und welche ihrerseits Dissymmetrien anderen Charakters bewirken, deren Unterscheidung von den zuerst signalisierten erst allmählich gelang. Da diese sekundären Wirkungen gelegentlich viel kräftiger sind, als die primären, so erschien die Möglichkeit eines Nachweises der letzteren je mehr und mehr zweifelhaft.

Die primäre Wirkung wird durch die Theorie bei der Existenz *nur einer Art* schwingender Elektronen gefordert als eine Folge der Wechselwirkungen zwischen diesen Elektronen

---

1) W. Voigt, Ann. d. Phys. 1. p. 376. 1900; Magneto- und Elektrooptik, Leipzig 1908. p. 170.

2) Vgl. Magnetooptik p. 171.

innerhalb des absorbierenden und emittierenden Körpers, welche die elementare Theorie nicht berücksichtigt. Sie stellt sich dar als ein verschiedenes Verhalten der beiden Außenkomponenten der Triplets nach Lage und Intensität bei *ruhender* Mittellinie. Ein Teil der beobachteten Dissymmetrien entsteht umgekehrt durch eine Verschiebung der Mittellinie bei (merklich) ruhenden Außenkomponenten und ist nach der Theorie bisher nur zu verstehen als die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Elektronenarten, deren Schwingungen parallel den magnetischen Kraftlinien gekoppelt sind.<sup>1)</sup>

Ein anderer Teil beruht auf Umständen, die der Experimentator bis zu einem gewissen Grade *in der Hand hat*. Untersuchungen im hiesigen Institut, über die an anderer Stelle berichtet werden soll, haben ergeben, daß man gewisse Triplets willkürlich symmetrisch oder dissymmetrisch *machen* kann.

Die Störungen der Beobachtungen durch diese sekundären Effekte bestärken mich in der schon in meiner ersten Mitteilung vertretenen Ansicht, daß die größere Aussicht auf Realisierung der primären Dissymmetrie nicht auf der Seite der *geometrischen Konfiguration*, sondern auf derjenigen der *Intensitätsverhältnisse* der Triplets liegt. Es ist ein merkwürdiges Zusammentreffen, daß zu derselben Zeit, wo wir in Göttingen um die messende Beobachtung der Intensitätsverhältnisse im Innern von Spektrallinien bemüht sind<sup>2)</sup>, in München dasselbe Problem unabhängig in Angriff genommen ist. Ich halte für möglich, daß eine der von Hrn. Koch<sup>3)</sup> mitgeteilten photometrischen Beobachtungen, aus welcher der Autor keinerlei Folgerungen zieht, doch die erstmalige Realisierung der theoretisch geforderten primären Dissymmetrie darstellt. Nicht nur ist der *Sinn* der Erscheinung im Einklang mit der Theorie, auch die Größenverhältnisse erscheinen den zulässigen Voraussetzungen zu entsprechen.

Um dies zu begründen und zugleich Direktiven für weitere Beobachtungen zu geben, will ich hier genauer, als früher geschehen, ausführen, was die Theorie über Beobachtungen von der Art der von Hrn. Koch angestellten aussagt.

1) Vgl. Magnetooptik, p. 258.

2) H. Brothorus, Physik. Zeitschr. 12. p. 193. 1911.

3) P. P. Koch, Ann. d. Phys. 34. p. 414 u. f. 1911.

2. Die (im allgemeinen komplizierten) Formeln der Theorie des inversen Effektes werden einfach in dem Falle isolierter Absorptionsstreifen von mäßiger Stärke. Hier läßt sich das für die Absorption (und Emission) von Schwingungen ( $s$ ) normal zu den Kraftlinien innerhalb des Bereiches eines Streifens, maßgebende Produkt  $n\kappa$  für den transversalen Effekt schreiben

$$(1) \quad n\kappa = \frac{1}{2} n_0 \nu' N \left( \frac{1 + N/Q}{(2\mu - N + Q)^2 + \nu'^2} + \frac{1 - N/Q}{(2\mu - N - Q)^2 + \nu'^2} \right).$$

Daher stellt  $n_0$  den Brechungsindex der Substanz dar, der auf den übrigen Absorptionslinien beruht und ist bei Gasen und Dämpfen merklich gleich Eins;  $\nu'$  ist, in der Skala der Frequenzen gemessen, die Breite des (unzerlegten) Streifens innerhalb deren  $n\kappa$  größer ist, als die Hälfte des Maximalwertes  $\bar{n}\bar{\kappa}$  (Halbwertsbreite).  $N$  steht mit diesen Größen in dem Zusammenhang

$$(2) \quad N = \bar{n}\bar{\kappa} \nu' / n_0.$$

$\mu$  bezeichnet den in der Skala der Frequenzen gemessenen Abstand der Stelle, auf die sich die Formel (1) bezieht, von der Mitte des unzerlegten Streifens, wo  $n\kappa = \bar{n}\bar{\kappa}$ .  $Q$  endlich ist eine Abkürzung für  $\sqrt{4\mu_0^2 + N^2}$ . Dabei mißt  $\mu_0$  die Wirkung des Magnetfeldes  $R_0$ , stellt nämlich bei starkem Felde die Verschiebung der Außenkomponenten aus der ursprünglichen Lage  $\mu = 0$  dar, und ist gegeben durch

$$(3) \quad \mu_0 = -e R_0 / 2 m c,$$

unter  $e$  die Ladung des (negativen) Elektron, unter  $m$  seine träge Masse, unter  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum verstanden.

Zur Vergleichung mit der Formel (1) stellen wir hin den für die Absorption (und Emission) parallel zu den Kraftlinien maßgebenden Ausdruck

$$(4) \quad (n\kappa) = \frac{1}{2} n_0 \nu' N \left( \frac{1}{4(\mu - \mu_0)^2 + \nu'^2} + \frac{1}{4(\mu + \mu_0)^2 + \nu'^2} \right).$$

Die elementare Theorie würde erwarten lassen, daß diese Formel auch für die Absorption (und Emission) der  $s$ -Schwingung (transversal zum Magnetfeld) gültig wäre. Dieselbe stellt die Zerlegung der Absorptionslinie in zwei Teile von der halben

Stärke dar, die symmetrisch zur Anfangslage und proportional der Feldstärke  $R_0$  verschoben werden.

Im Gegensatz hierzu drückt Formel (1) aus, daß die Mitten der beiden Komponenten sich nach den durch

$$(5) \quad 2\mu = N \mp Q$$

gegebenen (hyperbolischen) Gesetzen bewegen und Stärken besitzen, die in Annäherung den Zählern

$$1 \pm N/Q$$

proportional sind.

3. Es ist wiederholt darauf aufmerksam gemacht worden<sup>1)</sup>, daß nach der Theorie die Dissymmetrie der Lage und der Intensität bei den *wirklich getrennten* Triplets nur unter Umständen nachweisbar sein wird, die sich möglicherweise äußerst selten bei Spektrallinien realisiert finden, nämlich bei einem Absorptionsvermögen, das demjenigen der Metalle nahekommt, bzw. einem dementsprechend starken Emissionsvermögen. Die Theorie läßt aber auch erkennen, daß die Verhältnisse sich *günstiger* gestalten, wenn die Intensitätsverhältnisse der *s*-Schwingung innerhalb *der noch nicht zerlegten* Linie der Messung zugänglich gemacht werden.

Da nach den Bemerkungen am Schluß von 2. die Lagen, Gestalten und Stärken der beiden Komponenten sich durch *dieselben* Parameter bestimmen, so ist es keineswegs etwa zugänglich, zur Aufklärung der Verhältnisse oder zur Deutung von Beobachtungen unabhängig und willkürlich über Entfernungen, Gestalten und Stärken der Komponenten zu verfügen. Es ist vielmehr unumgänglich nötig, sich an die Resultate der Theorie zu halten, wenn anders die Auskunft physikalische Bedeutung besitzen soll.

Allerdings ist die Formel (1) einer allgemeinen Diskussion in dieser Richtung wegen ihrer komplizierten Form kaum zugänglich. Aber man kann durch Berechnung spezieller Fälle doch eine Vorstellung davon gewinnen, unter welchen Umständen die Dissymmetrie der Intensitätsverteilung eben wahrnehmbar werden wird, unter welchen sich auch speziell die von Hrn. Koch beobachtete Erscheinung<sup>2)</sup> einstellt.

1) Vgl. Magnetooptik p. 177.

2) P. P. Koch, l. c. p. 417.

Für eine solche Untersuchung ist es vorteilhaft, daß, wenn wir die Stärke des Magnetfeldes verfügbar halten, die Erscheinung in letzter Instanz *nur von einem einzigen Parameter*, nämlich dem Quotienten  $N/\nu'$ , d. h. nach (2), da  $n_0$  als konstant gelten darf, *der Stärke  $\bar{n}\kappa$  der Absorptions- oder Emissionslinie abhängt*. Man kann für diesen Parameter eine untere Grenze erhalten, die derselbe überschritten haben muß, damit die Dissymmetrie der Intensität wahrnehmbar werde, und indem man das Resultat mit den wenigen vorliegenden Messungen von  $\bar{n}\kappa$  vergleicht, kann man einen Schluß über die Wahrscheinlichkeit der Beobachtung dieser Dissymmetrie ziehen.

Die folgenden Kurvensysteme stellen einige der von mir erhaltenen Resultate dar. Sie setzen, wie die Figuren in meiner Magnetooptik, als Abszisse die *Frequenzzahl  $\mu$*  voraus, stehen also zu den Kurven Hrn. Kochs in spiegelbildlichem Verhältnis. Zwischen je zwei vertikalen Geraden der Figuren liegt das Halbwertintervall  $\nu'$  der Spektrallinie, das wir = 100 setzen. Die *mittlere* Gerade entspricht  $\mu = 0$ , d. h. der Mitte der unzerlegten Spektrallinie; die *ursprüngliche* Stärke der Linie wird durch die Gesamthöhe des Liniennetzes gegeben.

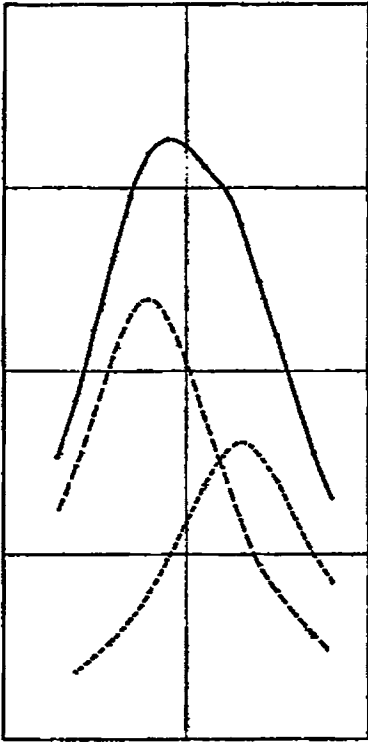
Die *ausgezogenen* Kurven stellen den Verlauf von  $n\kappa$  gemäß (1) dar, die *gestrichelten* denjenigen der einzelnen Glieder derselben Formel; erstere Kurve gibt also (in Annäherung) die gesamte emittierte Intensität als Funktion von  $\mu$ , letztere Kurven zeigen das Verhalten der einzelnen hier noch nicht getrennten Komponenten.

Die ersten drei Kurven setzen den Wert  $N = 10$ , also  $N/\nu' = 0,1$  voraus, und beziehen sich auf  $\mu_0$  bzw. = 25, 35, 40, d. h. Felder, die diesen Zahlen proportional sind. Die beiden Komponenten der Spektrallinie haben hier sehr beträchtlich verschiedene Stärken; auch die Dissymmetrie ihrer Lage ist merklich.

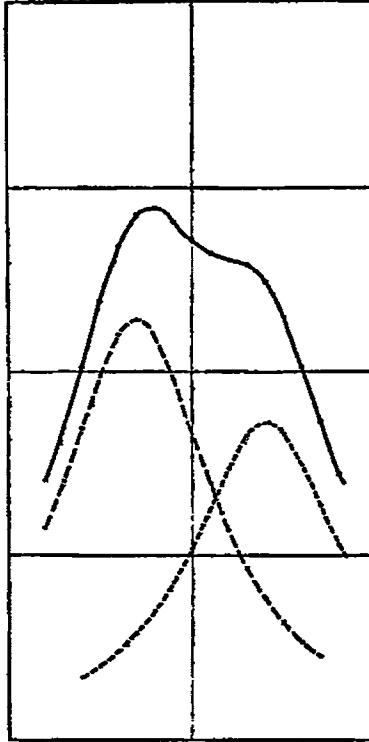
Die letzten drei Kurven setzen  $N = 2$ , also  $N/\nu' = 0,02$  voraus und beziehen sich auf  $\mu_0$  bzw. = 30, 35, 40. Hier ist die Dissymmetrie ganz außerordentlich viel geringer und dürfte sich dem Nachweis auf photometrischen Wege wohl bereits entziehen.

Ich glaube, daß  $N = 5$ ,  $N/\nu' = 0,05$  so ziemlich die Grenze darstellen wird, unterhalb deren die Dissymmetrie den jetzt

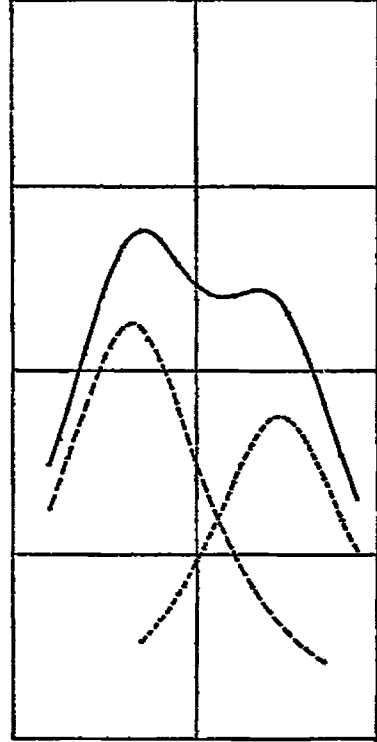
1.

 $N=10, \mu_0=25.$ 

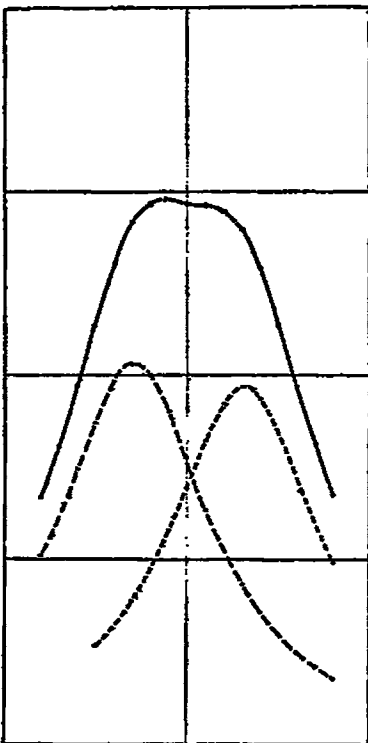
2.

 $N=10, \mu_0=35.$ 

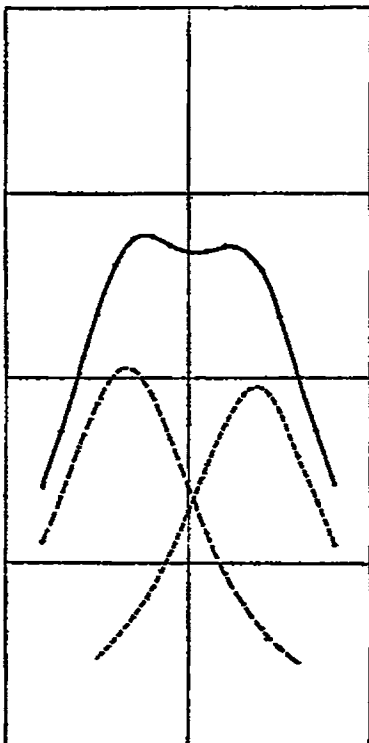
3.

 $N=10, \mu_0=40.$ 

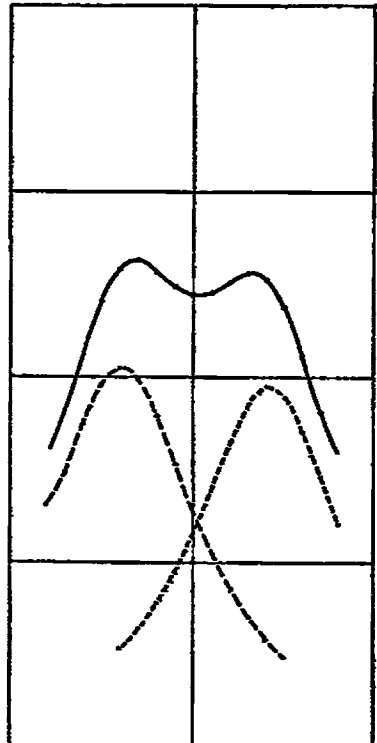
4.

 $N=2, \mu_0=30.$ 

5.

 $N=2, \mu_0=35.$ 

6.

 $N=2, \mu_0=40.$

verfügbaren Mitteln der Beobachtung unzugänglich wird, und es scheint mir, daß man auch der von Hrn. Koch angegebenen Kurve mit einem solchen Wert unter Rücksicht auf die magnetische Konstante der Linie 5790 und die verwendete Feldstärke nahezu gerecht werden kann.

Nun hat Hr. Hallo bei einer ziemlich dichten Na-Flamme für  $\overline{n\kappa}$  den Wert 0,002 erhalten. Es erscheint mir wahrscheinlich, daß für die gelben Hg-Linien der Wert erheblich höher liegt. Die *D*-Na-Linien sind relativ breit, haben also ein großes Halbwertintervall  $\nu'$ ; eine *gleiche Gesamtemission*, ein gleiches *N*, wird also für die Quecksilberlinien ein beträchtlich größeres  $\overline{n\kappa}$  verlangen und es ist nicht unwahrscheinlich, daß die Gesamtemission bei Quecksilber noch *größer* war. Außerdem kommt in Betracht, daß die Halloschen Bestimmungen an die Drehung der Polarisationssebene des Lichtes in der Na-Flamme anknüpfen, und ihre Berechnung die Flamme als *homogen* leuchtend voraussetzt. Ginge die Emission, wie nicht unwahrscheinlich, im wesentlichen nur von einer Oberflächenschicht aus, so würde  $\overline{n\kappa}$  dadurch *zu klein* berechnet werden.

Alles in allem scheint mir eine 25fache Stärke  $\overline{n\kappa}$  bei der Hg-Linie verglichen mit den Na-Linien nicht undenkbar, und man darf hiernach die *Möglichkeit* zugeben, daß die von Hrn. Koch beobachtete Dissymmetrie der Intensität in der Tat die erste zuverlässige Bestätigung der bzw. Aussagen der Theorie darstellt.

Einige Einwände, die sich von anderer Seite her bieten, scheinen mir nicht schwerwiegend. Die Linie 5790 zeigt durch die Verschiebung der Mittelkomponente bei wachsendem Feld, daß sie dem Idealfall einer *isolierten* Linie, den die Theorie voraussetzt, nicht völlig entspricht. Nach der Theorie könnte aber diese Komplikation sich kaum in einer derjenigen Dissymmetrien äußern, die in den obigen Kurven dargestellt sind. Immerhin wäre eine Wiederholung der Beobachtung bei der bisher normal erfundenen Linie 5769 sehr erwünscht.

Ferner erwähnt Hr. Koch eine Verschiebung der ganzen *s*-Komponente mit wachsendem Feld, welche bisher, soweit mir bekannt ist, nicht beobachtet worden ist und welches die obigen Formeln nicht enthalten. Ob das Stufengitter derartige minimale Verschiebungen mit Sicherheit festzustellen vermag, er-

scheint mir zweifelhaft. Von Seite der Theorie würde sie aber Bedenken nicht begegnen und als die Wirkung einer Kopplung der Linie auch bzw. der *s*-Komponente aufzufassen sein.

Was endlich den von Hrn. Koch hervorgehobenen Umstand angeht, daß die Linie 5790 nicht streng einfach ist, sondern einen Satelliten hat, so muß natürlich zugegeben werden, daß *jede* einfach erscheinende Linie in Wahrheit komplex sein kann; schwerlich muß indessen das Auftreten eines *sichtbar* getrennten Satelliten das Vorhandensein *weiterer*, gewöhnlich unsichtbarer Satelliten besonders wahrscheinlich machen. Will man aber bei jeder scheinbar einfachen Linie unsichtbare und doch wirksame Satelliten von vornherein annehmen, so heißt das m. E. auf die Möglichkeit einer Vergleichung der Beobachtung mit der Theorie überhaupt *verzichten*. Und dafür scheint mir nach so vielen bedeutsamen Bestätigungen der Theorie ein Grund nicht vorzuliegen. Im vorliegenden Falle dürfte die Heranziehung eines zuvor unsichtbaren Satelliten um so weniger angezeigt sein, als nicht nur der Sinn der beobachteten Dissymmetrie mit der Forderung der Theorie übereinstimmt, sondern auch die quantitativen Verhältnisse Voraussetzungen entsprechen, die keinerlei Unwahrscheinlichkeiten enthalten. Bis also weitere Beobachtungen Widersprüche aufdecken, scheint mir die Wahrscheinlichkeit vorzuliegen, daß die Kochschen Beobachtungen die als „*primär*“ bezeichnete Dissymmetrie eines Triplets wirklich zum ersten Male nachgewiesen haben.

Göttingen, Anfang März 1911.

(Eingegangen 19. März 1911.)

---