15. *Das Zeeman'sche Phänomen, die magnetische Circularpolarisation und die magnetische Doppelbrechung; von D. A. Goldhammer.*¹⁾

1. Die von Zeeman entdeckte neue Wirkung des Magnetismus auf die Emission des Lichtes ist man im allgemeinen geneigt als einen Einfluss magnetischer Kräfte auf die bewegten Ionen anzusehen. So gelang es Hrn. Zeeman selbst eine einfache Theorie zu entwickeln, „mittels welcher sich die von ihm entdeckten Erscheinungen erklären und zum Theil vorhersagen lassen²⁾“; so versuchte auch Hr. Lorentz³⁾ die Frage zu beantworten, in welcher Weise die Schwingungszahlen eines leuchtenden Molecüles sich ändern müssen, falls das Molecül sich in einem homogenen Magnetfelde befindet. Es ergab sich dabei, dass die Aenderung der Spectrallinien auch viel complicirter sein kann, als es zunächst von Zeeman beobachtet wurde. Und wirklich fand sich diese Folgerung der Theorie durch die Beobachtungen von Preston, Michelson, H. Becquerel u. a. mehrfach bestätigt. Somit hat das neue magnetooptische Phänomen eine ganz abgesonderte Stelle in der Reihe anderer magnetooptischer Erscheinungen angenommen. Indem die letzteren durch eine Reihe fast gleichwerthiger elektromagnetischer Theorien bis auf die Einzelheiten erklärt worden sind, scheint es, als ob eine Theorie des Zeeman'schen Phänomens nur auf Grund gewisser Betrachtungen von ganz anderer „molecularer“ Natur aufgebaut werden könne. Es entsteht nun die Frage, ob dem wirklich so ist. Wäre es nicht möglich, die neu entdeckten Aenderungen in den Spectrallinien einer in ein magnetisches Feld gestellten Lichtquelle (Gas) in einen Zusammenhang mit den älteren magnetooptischen Erscheinungen zu bringen, ohne die Ionenbewegung zu Hülfe zu nehmen?

1) Vorgetragen auf der X. Versammlung russischer Naturforscher und Aerzte zu Kiew am 10. September 1898; für die Annalen neu bearbeitet.

2) H. A. Lorentz, Wied. Ann. **63**. p. 278. 1897.

3) l. c.

Eine Beantwortung dieser Frage soll im Folgenden gegeben werden.

2. Bedeuten V_0 die Lichtgeschwindigkeit im freien Aether, D die Dielektricitätsconstante, κ den specifischen Widerstand irgend eines Körpers für die Periode T , und V die *complexe* Lichtgeschwindigkeit in demselben, so ist bekanntlich nach der elektromagnetischen Lichttheorie

$$(1) \quad \frac{V_0^2}{V^2} = D + i \frac{2 T}{\kappa}, \quad i = \sqrt{-1}.$$

Führen wir in diese Beziehung den reellen Brechungs-exponenten N und den Absorptionscoefficienten K ein, so folgt

$$D = N^2 - K^2, \quad 2 N K = \frac{2 T}{\kappa}$$

und daraus

$$2 N^2 = \sqrt{D^2 + \frac{4 T^2}{\kappa^2}} + D, \quad 2 K^2 = \sqrt{D^2 + \frac{4 T^2}{\kappa^2}} - D.$$

Dabei sind D, κ gewisse Functionen der Periode T , deren Form man aus einer Dispersionstheorie entnehmen kann.

Nun sehen wir unmittelbar, dass jede Aenderung in den Werthen von D, κ , auf welche Weise auch dieselbe hervorgerufen werden mag, eine Aenderung von N bez. K zur Folge hat. Es seien ferner $T_1, T_2, \dots$ die Perioden der *selectiven* Absorption unseres Körpers. Offenbar sind dieselben nichts Anderes, als reelle und positive Wurzeln der Gleichung $\partial K / \partial T = 0$, da K für diese Werthe von T sein Maximum haben muss. Aendert sich aber durch irgend welche Ursache D, κ in D', κ' , also auch N, K in N', K' , so bekommen wir auch eine andere Bedingung für die maximale Absorption und zwar $\partial K' / \partial T = 0$. Die reellen und positiven Wurzeln dieser Gleichung sind natürlich von den Werthen $T_1, T_2, \dots$ im allgemeinen verschieden; es kann sogar die Zahl derselben verschieden ausfallen.

Wir sind dadurch berechtigt, den folgenden Satz von ganz allgemeiner Bedeutung aufzustellen:

Jede Aenderung in den elektrischen Eigenschaften eines Körpers hat zur Folge eine Aenderung in der Lage bez. auch in der Zahl der Spectrallinien des Absorptionsspectrums des Körpers.

Die Kirchhoff'sche Beziehung zwischen der Absorption und Emission des Lichtes erlaubt uns sofort, denselben Satz auch für die Emissionsspectra zu wiederholen.

Es ist selbstverständlich, dass die oben erwähnte Erscheinung nur dann scharf ausgeprägt sein kann, wenn die Perioden $T_1, T_2, \dots$ untereinander genügend verschieden sind, wenn also der Körper ein Linienspectrum besitzt; in einem Bandenspectrum muss die Erscheinung verwaschen sein, für ein continuirliches Spectrum hat offenbar der Satz keinen Sinn.

Wir sehen daraus, dass der aufgestellte Satz hauptsächlich nur für Gase eine Geltung hat, und in der That ist eine Einwirkung des Druckes, der Temperatur und dgl. auf die Gasspectra allgemein bekannt.

3. Wenden wir uns jetzt zur Erscheinung der Magnetisirung der Gase. Während ein Einfluss des Magnetismus auf den elektrischen Widerstand von festen Körpern (Bi, Sb, Te, Fe, Ni, Co) mehrfach studirt worden ist, sind für Gase nur wenige, meines Wissens von Boltzmann herrührende Versuche angestellt worden; es ergab sich dabei, dass der elektrische Widerstand der Gase beim Magnetisiren unter Umständen verzehnfacht werden kann.¹⁾ Eine so grosse Aenderung des Widerstandes, ohne eine entsprechende, wenn auch nicht so grosse Aenderung in κ , wäre wohl unverständlich. Wir sehen also, dass ein Einfluss des Magnetismus auf N und K der Gase a priori sehr wahrscheinlich ist; ist es aber so, so wäre daraus, nach dem oben angeführten Satze, auch auf die Möglichkeit der Existenz eines dem Zeeman'schen analogen Phänomen zu schliessen.

Nun unterscheidet sich das Zeeman'sche Phänomen von den anderen Einwirkungen auf die Gasspectra durch eine Reihe von ganz eigenthümlichen Polarisationsverhältnissen. Wir wollen untersuchen, in welcher Weise auch diese vom Staltpunkte der üblichen Theorie magnetoptischer Erscheinungen erklärt werden können.

4. Betrachten wir ein Gas zwischen den Polen eines Elektromagneten und benutzten wir zunächst nur die Richtung der Kraftlinien. Vor der Magnetisirung ist die complexe Lichtgeschwindigkeit des Körpers V , gegeben durch die Gleichung (1). In Folge der Magnetisirung wird der Körper aeolotrop und bekommt die Eigenschaft, in der Richtung der

1) L. Boltzmann, Wied. Ann. **31**. p. 789. 1887. Vgl. auch Winkelmann, Physik 2. III. p. 336.

Kraftlinien nur circularpolarisirte Strahlen fortzupflanzen, und zwar mit verschiedener Geschwindigkeit

$$V_r^2 = V^2 + q, \quad \text{bez.} \quad V_l^2 = V^2 - q,$$

je nachdem der Lichtstrahl rechts oder links circularpolarisirt ist. Dabei bedeutet auch q eine complexe Grösse, die der Magnetisirung proportional ist.¹⁾ Setzen wir $q/V^2 = \psi$, so folgt für die beiden Polarisationen

$$\frac{V_o^2}{V_r^2} = \left(D + i \frac{2T}{\kappa}\right) : (1 + \psi), \quad \frac{V_o^2}{V_l^2} = \left(D + i \frac{2T}{\kappa}\right) : (1 - \psi)$$

und für die beiden Absorptionscoefficienten in erster Annäherung

$$2K_r^2 = 2K^2 + \omega, \quad 2K_l^2 = 2K^2 - \omega,$$

worin ω eine Function von T , D , κ und der Magnetisirung bedeutet.

Wir schliessen daraus, dass die Bedingungen für die maximale Absorption des rechten Strahles ($\partial K_r / \partial T = 0$) und des linken ($\partial K_l / \partial T = 0$) zu den reellen und positiven Wurzeln führen werden, die von denjenigen der Gleichung $\partial K / \partial T = 0$ vollkommen verschieden ausfallen; mit anderen Worten: absorbirt ein Gas in natürlichem Zustande die Wellen der Perioden $T_1, T_2, \dots$, so absorbirt es nach dem Magnetisiren die rechts-circularpolarisirten Strahlen von den Perioden $T_1^r, T_2^r, \dots$ und die linkscircularpolarisirten von den Perioden $T_1^l, T_2^l, \dots$. Das ist aber nichts Anderes, als das Zeeman'sche Phänomen, beobachtet durch Absorption, wie es zuerst W. König²⁾ und später Righi³⁾ vorgeschlagen haben.

Eine Anwendung des Satzes von Kirchhoff führt unmittelbar zu einem analogen Schlusse über den Einfluss des Magnetismus auf die Lichtemission der Gase, also zum Phänomen in der Form, wie es zuerst von Zeeman beobachtet wurde.

Man ersieht auch leicht die Möglichkeit, dass in gewissen Fällen die Spectrallinien gar nicht, oder in viel complicirterer Weise geändert werden können, als es z. B. bei Na-Dampf der Fall ist. Nur die Circularpolarisation bleibt für die Erscheinung charakteristisch.

1) D. A. Goldhammer, Wied. Ann. **46**. p. 71. 1892.

2) W. König, Wied. Ann. **62**. p. 240. 1897.

3) A. Righi, Compt. rend. **127**. p. 216. 1898.

5. Damit die Aenderung in den Perioden beim Magnetisiren bemerkbar wird, muss natürlich auch die Differenz in den Werthen V_r und V_i verhältnissmässig bedeutend sein; diese Differenz aber ist die Ursache der magnetischen Drehung der Polarisationssebene des Lichtes für die nicht absorbirten Strahlen. Wir haben also zu erwarten, dass in der Nähe der Absorptionslinien die Gase das Faraday'sche Phänomen in ziemlich starker Weise zeigen. Bekanntlich ist das wirklich der Fall, wie es neuerdings von Macaluso und Corbino¹⁾ gezeigt wurde.

Wir sehen also, dass der Unterschied zwischen dem neuen Zeeman'schen Phänomen und dem seit lange bekannten Faraday'schen kein principieller ist; dieselbe Aenderung in V hat jenes oder dieses Phänomen zur Folge, je nachdem eine selective Absorption, bez. Emission vorhanden ist, oder nicht.

6. Wenden wir uns zu den Erscheinungen, die in der zu den magnetischen Kraftlinien senkrechten Richtung beobachtet werden. Die übliche magneto-optische Theorie lässt in dieser Richtung nichts erwarten. Fällt aber die Widerstandsänderung der Körper beim Magnetisiren in der Richtung der Kraftlinien und senkrecht dazu verschieden aus, so liegt der Gedanke nahe, anzunehmen, dass *die Körper beim Magnetisiren auch doppelbrechend werden* in der Weise, dass die Richtung der Kraftlinien die Rolle der optischen Axe eines einaxigen Krystalles spielt. Eine solche Hypothese habe ich schon im Jahre 1887 ausgesprochen; auch die Ausgangsgleichungen meiner Theorie der magneto-optischen Erscheinungen²⁾ Gleichung (11) sind ganz allgemein aufgestellt; es fehlten aber bisher vollkommen die experimentellen Ergebnisse, welche auf diese Doppelbrechung eine Andeutung geben könnten. Etwa im Jahre 1887 hatte Kundt einige Versuche über solche Doppelbrechung in elektrolytisch niedergeschlagenen, durchsichtigen Eisenschichten angestellt, aber ohne Erfolg.

Nehmen wir also an, dass in einem magnetisirten Gase senkrecht zu den Kraftlinien sich nur Lichtwellen fortpflanzen können, welche in der Einfallsebene, oder senkrecht dazu, pola-

1) D. Macaluso und O. M. Corbino, Rend. della R. Acc. dei Lincei 7. p. 293. 1898.

2) D. A. Goldhammer, l. c. p. 74.

risirt sind; die complexe Lichtgeschwindigkeit derselben sei verschieden.

Dann folgt unmittelbar, dass die beiden Wellen verschiedene Absorptionscoefficienten haben und dass daher auch die Perioden der maximalen Absorption für diese Wellen verschieden ausfallen; nach dem Gesetz von Kirchhoff gilt dasselbe auch für das Emissionsspectrum. Wir haben somit eine ganz allgemeine Erklärung des Zeeman'schen Phänomens in der den Kraftlinien senkrechten Richtung.

Auch hier ist nur charakteristisch die geradlinige Schwingung einiger Strahlen in der Richtung der Kraftlinien, der anderen senkrecht dazu; die Dublets u. dgl. sind eine Nebensache.

Auch hier ist es möglich, dass die Strahlen, deren Perioden nahe an derjenigen der maximalen Absorption liegen, eine relativ grosse Doppelbrechung erleiden, analog wie es früher mit der magnetischen Drehung der Polarisationssebene der Fall war.

In dieser Weise kann man sich denken, dass auch die von Cotton¹⁾ vorgeschlagene Methode der Beobachtung des Zeeman'schen Phänomens nicht das reine Phänomen zeigt, sondern vielleicht auch die von uns vermuthete Doppelbrechung.

Zum Schluss sei bemerkt, dass man auch in der Akustik ein dem Zeeman'schen analoges Phänomen kennt: man denke sich eine eiserne Saite, eine eiserne Platte, eine Stimmgabel. Eine Magnetisirung dieser Schallquellen hat eine Tonänderung des emittirten Schalles zur Folge.

Kasan, Anfang Januar 1899.

1) A. Cotton, Compt. rend. (2) 23. p. 953. 1898.

(Eingegangen 4. Februar 1899.)

Anmerkung bei der Correctur. Die beiden circular polarisirten Strahlen, die sich in der Richtung der Kraftlinien fortpflanzen, werden verschieden absorbirt. Man hat es daher hier streng genommen nicht mit einem Faraday'schen Phänomen zu thun, sondern mit einem complicirteren Fall der Polarisation. Vgl. die vor kurzem publicirte Notiz von Macaluso und Corbino (Rend. della R. Acc. dei Lincei 8. p. 38. 1899).