XI. *Bemerkungen zu der Arbeit des Hrn. O. Wiener: „Stehende Lichtwellen und die Schwingungsrichtung polarisirten Lichtes"; von P. Drude.*

In der genannten Arbeit ist es Hrn. Wiener[1]) gelungen, durch Herstellung sehr dünner photographisch wirksamer Häutchen die Interferenz zweier Lichtwellensysteme von verschiedenen Fortpflanzungsrichtungen zu beobachten. Es ist dies in experimenteller Hinsicht jedenfalls ein grosser Fortschritt. Ohne im mindesten das in dieser Hinsicht Hrn. Wiener gebührende Verdienst herabsetzen zu wollen, möchte ich im Folgenden nur darauf hinweisen, dass mir die aus den Resultaten gefolgerten theoretischen Schlüsse etwas zu weit zu gehen scheinen.

Hr. Wiener zieht aus den Beobachtungen einen Schluss hinsichtlich der Schwingungsrichtung polarisirten Lichtes, oder stellt wenigstens die eine Auffassung (die Fresnel'sche) als die bei weitem plausiblere, als die andere (die Neumann'sche) hin. Schon früher sind zahlreiche vergebliche Versuche zur Entscheidung dieser alten Streitfrage gemacht, und die Vergeblichkeit der Bemühungen ist nach der Darlegung des Hrn. Koláček[2]) vom Standpunkte der electromagnetischen Theorie zu erwarten, da nach letzterer electromotorische und magnetische Kräfte immer gleichzeitig vorhanden sind, welche electrische, resp. magnetische Schwingungen erzeugen, die auf einander und auf der Wellennormale senkrecht stehen.

Wenn wir vorläufig an der Auffassung festhalten, dass dasjenige, was wir Licht nennen, nur an eine Art Schwingung geknüpft ist, und dass diese charakterisirt ist durch eine Vectorgrösse, so wollen wir die Componenten derselben nach den (rechtwinkligen) Coordinatenaxen genommen mit u, v, w

1) O. Wiener, Wied. Ann. **40**. p. 203. 1890.

2) F. Koláček, Wied. Ann. **34**. p. 673. 1888.

bezeichnen. u, v, w sind periodische Functionen der Zeit und der Coordinaten x, y, z.

Wenn man u, v, w als einen gewissen Zustand im Medium interpretirt, z. B. als Elongation der Aethertheilchen aus der Ruhelage, oder als dielectrische oder als magnetische Verschiebung, so besitzen wir daher eine periodische Anordnung dieses bestimmten Zustandes. Wir wollen diesen Zustand erster Art nennen. Es existirt also eine Schwingung des Zustandes erster Art.

Ausser dieser existiren aber auch im Medium Schwingungen der Componenten eines Zustandes zweiter Art, welch letzterer dadurch definirt wird, dass seine Componenten irgend welche lineare Functionen der ersten Differentialquotienten der u, v, w sind. Dieser Zustand zweiter Art besitzt mehr als drei Componenten, er ist eine allgemeinere Grösse, als eine Vectorgrösse.

Eine von beiden Schwingungen verschiedene Schwingung von Zuständen dritter oder höherer Art, welche lineare Functionen der zweiten oder höheren Differentialquotienten der u, v, w sind, existirt nicht, da bei den hier auftretenden periodischen Functionen durch zweimalige Differentiation der ursprüngliche Werth bis auf einen constanten Factor erhalten wird.

Der Zustand zweiter Art wird gewöhnlich als die im Medium wirkende Kraft bezeichnet, speciell bei den obigen drei Interpretationen der u, v, w als Druckkraft, electrische oder magnetische Kraft.

Nach der eben angeführten Eigenschaft der periodischen Functionen ist es gleichgültig, ob man die u, v, w, d. h. den Zustand erster Art als ersten Differentialquotienten der Kräfte, d. h. des Zustandes zweiter Art einführt, oder den Zustand zweiter Art als erste Differentialquotienten der u, v, w.

Nach diesen Vorbemerkungen wollen wir zunächst die Reflexion linear polarisirten, senkrecht einfallenden Lichtes behandeln.

Wählt man das Coordinatensystem so, dass die z-Axe in die Spiegelnormale fällt, die x-Axe dagegen senkrecht oder parallel zur Polarisationsebene ist, so ist nur eine Componente des Zustandes erster Art vorhanden; sie möge mit u bezeichnet werden. u setzt sich zusammen aus der Componente des einfallenden Lichtes (u_e) und der des reflectirten (u_r).

Setzt man voraus, dass die reflectirte Amplitude gleich ist der einfallenden, eine Bedingung, ohne die stehende Wellen nicht zu Stande kommen und die bei den Wiener'schen Experimenten sehr nahe erfüllt ist, da Silberspiegel benutzt wurden, so ist zu setzen in durchsichtigen Medien:

$$u_e = E \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda}\right), \qquad u_r = E \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{z+\delta}{\lambda}\right).$$

t bedeutet hierin die Zeit, T die Schwingungsdauer, λ die Wellenlänge, δ die bei der Reflexion stattfindende Phasenänderung. Hieraus folgt:

$$u = u_e + u_r = 2E \cos 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{z+\delta_1}{\lambda}\right),$$

wo δ_1 eine Grösse ist, die in leicht anzugebender Beziehung zu δ und z steht, auf die es hier aber weiter nicht ankommt.

Aus der Formel folgt, dass der Zustand erster Art in einer stehenden Wellenbewegung sich befindet.

In den Componenten der Zustände zweiter Art treten nur die von $\partial u / \partial z$ abhängenden Glieder auf. Es ist:

$$\frac{\partial u_e}{\partial z} = E' \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda}\right), \qquad \frac{\partial u_r}{\partial z} = -E' \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{z+\delta}{\lambda}\right),$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial u_e}{\partial z} + \frac{\partial u_r}{\partial z} = 2E' \sin 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{z+\delta_2}{\lambda}\right).$$

Hieraus folgt, dass auch der Zustand zweiter Art in einer stehenden Wellenbewegung begriffen ist, deren Schwingungsknoten mit den Schwingungsbäuchen der stehenden Wellen des Zustandes erster Art zusammenfallen.

Ich behandele jetzt die Interferenz von unter 45^0 einfallendem geradlinig polarisirtem Lichte mit dem reflectirten.

Wählt man die z-Axe senkrecht zur Einfallsebene und behandelt zunächst diejenige Lichtbewegung, bei der die Vectorgrösse des Zustandes erster Art senkrecht zur Einfallsebene gerichtet ist, so ist von den Componenten u, v, w nur v vorhanden. Es ist zu setzen:

$$v_e = E \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x+z}{\lambda\sqrt{2}}\right), \quad v_r = E \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x-z-\delta}{\lambda\sqrt{2}}\right),$$

$$v = v_e + v_r = 2E \cos 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda \sqrt{2}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z + \delta_3}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

Es existirt also eine stehende Lichtbewegung des Zustandes erster Art.

In den Componenten der Zustände zweiter Art treten nur die von $\partial v / \partial x$ und $\partial v / \partial z$ abhängenden Glieder auf. Es ist:

$$\frac{\partial v_e}{\partial x} = E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z}{\lambda \sqrt{2}}\right), \quad \frac{\partial v_r}{\partial x} = E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x - z - \delta}{\lambda \sqrt{2}}\right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v_e}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial x} = 2E' \cos 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda \sqrt{2}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z + \delta_4}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

$$\frac{\partial v_e}{\partial z} = E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z}{\lambda \sqrt{2}}\right), \quad \frac{\partial v_r}{\partial z} = -E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x - z - \delta}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial v_e}{\partial z} + \frac{\partial v_r}{\partial z} = 2E' \sin 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda \sqrt{2}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z + \delta_5}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

Für den Zustand zweiter Art existirt also keine stehende Wellenbewegung, da $\partial v / \partial x$ und $\partial v / \partial z$ an verschiedenen Stellen des Raumes verschwinden.

Liegt schliesslich die Vectorgrösse des Zustandes erster Art in der Einfallsebene, so ist $v = 0$ und:

$$u_e = -E \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z}{\lambda \sqrt{2}}\right), \quad u_r = E \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x - z - \delta}{\lambda \sqrt{2}}\right),$$

$$w_e = E \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z}{\lambda \sqrt{2}}\right), \quad w_r = E \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x - z - \delta}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

$$u = u_e + u_r = -2E \sin 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda \sqrt{2}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z + \delta_5}{\lambda \sqrt{2}}\right),$$

$$w = w_e + w_r = 2E \cos 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda \sqrt{2}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z + \delta_6}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

Für den Zustand erster Art existirt also keine stehende Wellenbewegung. Es ist ferner:

$$\frac{\partial u_e}{\partial x} = -E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z}{\lambda \sqrt{2}}\right), \quad \frac{\partial u_r}{\partial x} = E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x - z - \delta}{\lambda \sqrt{2}}\right),$$

$$\frac{\partial u_e}{\partial z} = -E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z}{\lambda \sqrt{2}}\right), \quad \frac{\partial u_r}{\partial z} = -E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x - z - \delta}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial x} = E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z}{\lambda \sqrt{2}}\right), \quad \frac{\partial w_r}{\partial x} = E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x - z - \delta}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial z} = E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z}{\lambda \sqrt{2}}\right), \quad \frac{\partial w_r}{\partial z} = -E' \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x - z - \delta}{\lambda \sqrt{2}}\right).$$

Alle anderen ersten Differentialquotienten fehlen.

Macht man nun die Annahme, dass die Componenten des Zustandes zweiter Art die beiden Differentialquotienten $\partial u / \partial z$ und $\partial w / \partial x$ nur in der Verbindung $\partial u / \partial z + \partial w / \partial x$ enthalten, eine Annahme, welche sowohl bei den sogenannten mechanischen Lichttheorieen, wie bei der electromagnetischen erfüllt ist, so treten in diesen Componenten nur auf die Grössen:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_e}{\partial z} + \frac{\partial u_r}{\partial x} = 2E' \sin 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda \sqrt{2}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z + \delta_7}{\lambda \sqrt{2}}\right),$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w_e}{\partial x} + \frac{\partial w_r}{\partial z} = -2E' \sin 2\pi \frac{z + \frac{1}{2}\delta}{\lambda \sqrt{2}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x + z + \delta_8}{\lambda \sqrt{2}}\right),$$

während $\partial u / \partial z + \partial w / \partial x$ nicht auftreten, da ist:

$$\frac{\partial u_e}{\partial z} + \frac{\partial w_e}{\partial x} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial w_r}{\partial x} = 0.$$

Der Zustand zweiter Art ist also in einer stehenden Wellenbewegung begriffen.

Ich habe den Zustand erster Art und den Zustand zweiter Art deshalb nicht genauer physikalisch interpretirt, weil es hier nur darauf ankommt, dass der Zustand erster Art eine Vectorgrösse ist, d. h. durch drei Componenten charakterisirt wird, während die Componenten des Zustandes zweiter Art lediglich als lineare Aggregate der ersten Differentialquotienten der Componenten des Zustandes erster Art definirt sind.

Welcher von beiden Zuständen nun für die photographische Wirksamkeit maassgebend ist, kann man bis jetzt nicht wissen. Falls bei der Lichtbewegung die periodische Aenderung nur eine Vectorgrösse existirt, so ist durch die Wiener'schen Versuche jedenfalls gezeigt, dass die photographische Wirksamkeit entweder nur an die Schwingung des Zustandes erster Art, oder an die des Zustandes zweiter Art geknüpft ist, und zwar das erstere, falls man annimmt, dass der Vector bei geradlinig polarisirtem Licht senkrecht zur Polarisationsebene liege, das letztere, falls man annimmt, dass der Vector in der Polarisationsebene liege.

Geht man dagegen von der Vorstellung aus, dass die Lichtbewegung bestehe in der gleichzeitigen Schwingung zweier zu einander senkrechter Vectorgrössen, wie es in der electromagnetischen Lichttheorie geschieht, so kann man aus den Versuchen nicht einmal folgern, dass die photographische Wirkung entweder nur an einen Zustand erster Art oder an einen zweiter Art geknüpft ist, vielmehr kann sie sowohl an den Zustand erster Art derjenigen Schwingung, deren Vector senkrecht zur Polarisationsebene liegt (der electrischen Schwingung), als an den Zustand zweiter Art derjenigen Schwingung, deren Vector in der Polarisationsebene liegt (der magnetischen Schwingung) geknüpft sein.

Während Hr. Wiener bei der Discussion der Versuchsergebnisse bei senkrecht einfallendem Lichte selbst hervorhebt, dass man darüber in gewissem Zweifel sein könnte, ob das Maximum der photographischen Wirkung in den Schwingungsbäuchen oder in den Schwingungsknoten der stehenden Lichtwellen liege, scheint mir Hr. Wiener bei der Besprechung der Interferenz von zwei sich rechtwinklig kreuzenden Lichtwellen nicht berücksichtigt zu haben, dass sich die von ihm ausgesprochenen Folgerungen nur mit derselben Unsicherheit ziehen lassen, mit der sie bei der Interferenz zweier entgegengesetzter Wellen gezogen werden können, indem p. 237 gesagt wird, dass „aus dem Experiment mit Sicherheit gefolgert werden kann, dass die chemisch wirksamen Schwingungen einer geradlinig polarisirten Lichtwelle auf deren Polarisationsebene senkrecht stehen.“ Dies kann nach dem eben Auseinandergesetzten nicht mit Sicherheit gefolgert werden, da, um im Bilde der gewöhnlichen mechanischen Lichttheorie zu bleiben, man nicht wissen kann, ob photographische Wirkung eintritt dadurch, dass die Aethertheilchen sich aus ihrer Ruhelage entfernen, oder dadurch, dass auf sie gewisse Druckkräfte ausgeübt werden.

Ich möchte zum Schlusse darauf hinweisen, dass nicht einmal aus Plausibilitätsgründen die Wiener'schen Versuche in dem einen oder anderen Sinne entscheiden, indem man etwa chemische Wirkung an die Aenderung des Bewegungszustandes zu knüpfen für plausibler hielte, als an die des Druckzustandes. Der von uns eben genannte Zustand zweiter Art wird nach den gewöhnlichen Auffassungen als Druck oder electromotorische oder magnetische Kraft interpretirt.

Er kann aber ebenso ein Bewegungszustand sein, nur ein solcher, der eventuell eine grössere Anzahl von Componenten zu seiner Bestimmung erfordert, als eine Vectorgrösse, d. h. als drei. Der Zustand zweiter Art könnte z. B. eine Rotation der Theilchen in einer gewissen Curve sein, während der erster Art eine einfache Schwingung der Theilchen darstellen könnte.

Die hier gelieferte Darstellung ist unabhängig von den bisher aufgestellten besonderen Lichttheorieen, die gezogenen Schlüsse sind vielmehr stets statthaft, so lange man annimmt, dass bei der Lichtbewegung überhaupt eine Vectorgrösse in periodischer transversaler Bewegung sich befinde, was jede Theorie thun wird, und falls man ferner die Annahme macht, dass die Componenten des Zustandes zweiter Art die Differentialquotienten der Componenten u, v, w, jenes Vectors nur in den Combinationen:

$$\frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

enthalte, oder doch wenigstens die Terme, welche von:

$$\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$$

abhängen, von keinem Einfluss sind auf das, was wir Lichtbewegung nennen.

Die Versuche des Hrn. Wiener entscheiden also weder im Fresnel'schen Sinne, noch kann man aus ihnen für die electromagnetische Lichttheorie das Resultat gewinnen, „dass die chemische Wirkung der Lichtwelle an das Vorhandensein der Schwingungen der electrischen und nicht der magnetischen Kräfte geknüpft ist.“

Göttingen, 16. Juli 1890.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.