

11. *Über*
die Bewegung der Energie bei Totalreflexion;
von A. Eichenwald.

Vor etwa drei Jahren¹⁾ habe ich eine Untersuchung über die Energiebewegung bei Totalreflexion veröffentlicht. Aus dieser Arbeit haben die Herren Cl. Schaefer und G. Gross in diesen Annalen²⁾ einen gekürzten Auszug gegeben und meine Darstellungsweise der Energiekurven auf den sehr interessanten Fall einer „dünnen Lamelle“ angewandt. In der letzten Zeit erschien ein Aufsatz von Hrn. W. Voigt³⁾, welcher sich eigentlich auf die Arbeit der Herren Cl. Schaefer und G. Gross bezieht, aber auch meine Arbeit berührt, weshalb ich mich zu folgenden Bemerkungen genötigt sehe.

1. Die Herren Cl. Schaefer und G. Gross haben nicht „zusammen mit Hrn. Eichenwald ihre Überlegungen angestellt“, wie es Hr. W. Voigt schreibt, sondern unsere Arbeiten waren zeitlich wie örtlich ziemlich weit getrennt.

2. Nach der Anmerkung des Hrn. W. Voigt (p. 797³⁾) könnte man meinen, daß ich im Resultate meiner Untersuchung „die Schwingungen stets senkrecht zum Strahle finde“. Die Sache liegt aber umgekehrt: ich *finde* es nicht, sondern fange damit an; denn gerade „die Definition des Strahles durch den Poyntingschen Vektor“ bildet den *Ausgangspunkt* meiner ganzen Untersuchung. Das meiner Arbeit beigefügte Selbstreferat (in deutscher Sprache) fängt mit folgenden Worten an: „Definiert man den Lichtstrahl als Strömungslinie der Energie und bedenkt man, daß diese Strömungslinien immer senkrecht zu den elektrischen und magnetischen Kraftlinien stehen, so erhält man einen klaren Einblick in den Vorgang der Totalreflexion.“

1) A. Eichenwald, Ann. d. Moskauer Kais. Ingenieur-Hochschule April 1908. p. 15—41; Journ. d. russ. physik.-chem. Ges. 41. physik. Teil. p. 131—154. 1909.

2) Cl. Schaefer u. G. Gross, Ann. d. Phys. 32. p. 651. 1910.

3) W. Voigt, Ann. d. Phys. 34. p. 797. 1911.

3. An dieser Definition halte ich fest und führe sie konsequent durch. Dabei erhalte ich folgendes. — Bei der gewöhnlichen Reflexion und Brechung an einer Ebene können wir in Übereinstimmung mit dem bekannten Brechungsgesetz der Kraftlinien bleiben, indem wir einen konstanten Austrittswinkel für den gebrochenen Strahl annehmen. Bei zu großem Einfallswinkel wird bekanntlich der Austrittswinkel imaginär. In meiner Darstellung heißt das aber nicht, daß der Strahl im zweiten Medium dadurch *unmöglich* wird, sondern das bedeutet nur, „daß wir die Grenzbedingungen mit einem *konstanten* Austrittswinkel des Strahles nicht befriedigen können, wohl aber mit einem mit der Zeit und dem Orte *veränderlichen* Winkel des Strahles“ (l. c. p. 138).

„In diesem Falle nämlich entsteht im zweiten Medium eine Phasendifferenz der *X*- und *Z*-Komponenten der Feldintensität und wir erhalten in der *ZX*-Ebene *Drehfelder*. Folglich müssen auch die Strömungslinien der Energie mit der Zeit und mit dem Orte ihre Richtung ändern“ (l. c. p. 154).

Im Gegensatz zu der üblichen Darstellung erhalte ich keinen sogenannten „streifenden Strahl“ im zweiten Medium längs der Grenzebene, denn das würde der angenommenen Definition widersprechen: zu diesem Strahle stehen die Kraftlinien *nicht senkrecht*. Allerdings ist dieser Strahl normal zur Wellenebene, d. h. eine *Wellennormale*, wir wissen aber, daß die Wellennormale nicht immer mit dem Strahle zusammenzufallen braucht.

4. Über diesen „streifenden Strahl“ im zweiten Medium ist ja schon so viel geschrieben worden (Cauchy, Poincaré, Voigt, Ketteler, Drude) und W. Voigt¹⁾ hat sogar einen Versuch gemacht, um ihn experimentell nachzuweisen. In Wirklichkeit aber existiert dieser „Strahl“ im zweiten Medium ebensogut wie im ersten, und zwar nicht nur an der Grenzebene, sondern überall da, wo sich die einfallenden und reflektierten Wellen zusammentreffen. Es finden nämlich in beiden Medien ganz analoge Erscheinungen statt, was ich in meiner

1) W. Voigt, Wied. Ann. 67. p. 185. 1899; vgl. dazu E. Ketteler, Wied. Ann. 67. p. 886. 1899; W. Voigt, Wied. Ann. 68. p. 135. 1899; P. Drude, Winkelmanns Handb. d. Physik 6.2. p. 1276 und Lehrbuch d. Optik p. 285. 1906.

Arbeit besonders hervorgehoben habe und was auch aus den ihr beigefügten Zeichnungen leicht zu ersehen ist.

5. Selbstverständlich kann jede Bewegung nach Willkür und auf verschiedene Weise in Komponenten zerlegt werden und man pflegt im ersten Medium die Energiebewegung als aus einem einfallenden und einem reflektierten Strahle bestehend anzusehen, was ja sehr natürlich ist; man könnte aber auch hier von einer parallel zur Grenzebene (streifenden) *fortschreitenden* Welle und einer normal zur Grenzebene *stehenden* Welle sprechen. — Ganz ebenso kann man im zweiten Medium von einem „streifenden Strahle“ sprechen, nur muß man die andere Komponente nicht unberücksichtigt lassen; die andere Komponente ist auch eine stehende Welle, aber von einer besonderen Art, indem an Stelle einer Sinusfunktion des Abstandes eine Exponentialfunktion eintritt. — Zerlegen wir im zweiten Medium die Lichtbewegung auch in einen einfallenden und einen reflektierten Strahl, was auch möglich ist, so kommen wir sehr nahe an die schon von Fresnel geäußerte Ansicht über den Vorgang der Totalreflexion. Hierzu will ich eine Anmerkung von P. Drude¹⁾ zitieren: „Fresnel nahm an, daß bei Totalreflexion ein Teil des Lichtes an der Oberfläche des zweiten Mediums reflektiert würde, ein anderer Teil zunächst in dasselbe zu einer geringen Tiefe eindrange und dann erst reflektiert würde. Zu einer derartigen Reflexion“, sagt P. Drude, „fehlt jede genügend theoretisch begründete Ursache“. — Demgegenüber finde ich, daß die von mir gegebenen und „theoretisch begründeten“ Zeichnungen die Ideen Fresnels sehr schön illustrieren (l. c. p. 151, oder auch Cl. Schaefer und G. Gross, l. c. p. 655).

6. Bekanntlich ist das Brechungsgesetz der Kraftlinien, im Gegensatz zum Gesetz der Strahlenbrechung, von solch einer Form, daß eine Totalreflexion der Kraftlinien ausgeschlossen ist; es müssen also jedenfalls *auch bei Totalreflexion* des Lichtes Kraftlinien in das zweite Medium eindringen.²⁾ „Gleichzeitig tritt in das zweite Medium auch Energie ein, aber an verschiedenen Stellen der Grenzebene zu verschiedenen Zeiten.

1) P. Drude, Winkelmanns Handbuch d. Physik 6. 2. p. 1272.

2) Es folgt ein Zitat aus dem meiner Arbeit beigefügten Selbstreferat.

Die Energie oder der Lichtstrahl, welcher an irgend einer Stelle in das zweite Medium hineintritt, ist nur auf einer unbeträchtlichen Tiefe unter der Grenzebene bemerkbar, denn er beschreibt eine krumme Linie, um sofort, aber an einer anderen Stelle, in das erste Medium wieder zurückzukehren. So erscheint der Strahl im ersten Medium totalreflektiert.“

Ich finde wenigstens, daß auf diese Weise der Vorgang der Totalreflexion *klarer* dargestellt wird, als es gemeinhin geschieht. Und das war eben der Zweck meiner Arbeit.

7. Meine Untersuchung bezieht sich auf eine ebene *unendliche* Grenze und auf eine ebene *unendliche* Welle; sie hat weder mit der von Hrn. W. Voigt¹⁾ hervorgehobenen *Hauptschwierigkeit*, noch mit irgend einer anderen mathematischen Schwierigkeit zu kämpfen. Die von Hrn. W. Voigt mehrmals betonte *Hauptschwierigkeit* — nämlich die Durchführung der Rechnung für einen *begrenzten* Strahl oder eine *begrenzte* Trennungsebene beider Medien — „fällt überhaupt aus den Rahmen meiner Untersuchung“²⁾, wie das auch in meiner Arbeit klar ausgesprochen ist. Diese Schwierigkeit gehört in die Theorie der Beugung, und daß die Beugungsprobleme große mathematische Schwierigkeiten bieten, ist ja bekannt. Warum sollen aber die Beugungserscheinungen gerade bei der Totalreflexion so störend wirken, daß Hr. W. Voigt meint (l. c. p. 798): „Bei *begrenzten* Wellen liegt die Sache aber ganz anders“, das kann ich nicht einsehen. Sagt doch Hr. W. Voigt selbst (l. c. p. 800) über diese Beugungserscheinung: „Sie *erstreckt sich aber jedenfalls nur auf eine schmale Randzone*“. Damit ist ja alles gesagt, was nötig ist.

Zum Schluß will ich noch erwähnen, daß ich dieselbe Darstellungsweise vermitteltst Energiekurven auch auf andere optische Fälle angewandt habe, worüber ich an einer anderen Stelle zu referieren gedenke.

Moskau, Kaiserliche Ingenieur-Hochschule, Juni 1911.

1) W. Voigt, Wied. Ann. 67. p. 187. 1899 und Ann. d. Phys. 34. p. 798. 1911.

2) A. Eichenwald, l. c. p. 146.

(Eingegangen 3. Juli 1911.)