

bleibt nun ungestört, wenn man das ganze System um die Lothlinie als Axe dreht. Oder aber, wenn man die Fußplatte, welche das System trägt, auf irgend einer ebenen Unterlage umlegt, so beweist das jedesmalige Einspielen der Fadenkreuze die Horizontalität der Unterlage. Die Vorrichtung, welche sich übrigens für gewöhnliche Zwecke sehr vereinfachen läßt, ist also wie eine Libelle zum Verticalstellen von Drehaxen, zum Horizontalstellen von Fernrohren etc. geeignet.

Der Apparat wird zugleich ein feines Winkelmessinstrument, wenn man die Correctionsschrauben mit getheilten Köpfen versieht, oder wenn man eine feine Vertical-Scale seitlich im Sehfelde anbringt, deren Spiegelbild man auf das Fadenkreuz fallen läßt, anstatt dieses auf sich selbst zu spiegeln. Eine Vorrichtung der letzteren Art habe ich geprüft und gefunden, daß damit bei nur fünfmaliger Fernrohrvergrößerung noch auf 3 Sekunden justirt werden kann.

Die beiden mitgetheilten Beispiele dürften genügen, um zu zeigen, wie auch in vielen anderen Fällen die Luftdämpfung als ein gewiß sehr zu empfehlendes Hilfsmittel anzuwenden wäre.

#### **XIV. *Die Reflexion und Brechung des Schalles; von Prof. E. Mach und Studios. A. Fischer.***

(Mitgetheilt von HH. Verf. aus d. Sitzungsber. d. Wien. Akad. Bd. 67.)

**D**ie Ansicht, daß der Schall sich ganz wie das Licht verhalte, daß er durch Prismen abgelenkt, durch Spiegel und Linsen gesammelt werden könne, ist nicht nur sehr verbreitet, sondern es werden sogar Versuche, wie die von Sondhaus und Hajeck für dieses Verhalten angeführt <sup>1)</sup>. Schon der Umstand, daß die Fortpflanzungsrichtung beim

1) Diese Ann. Bd. 85, S. 378 und Bd. 103, S. 163.

Schall nicht jene Rolle spielt, wie beim Licht, läßt diese einfache Uebertragung gewagt erscheinen. Man wird aber dieselbe sehr bedenklich finden, wenn man beachtet, daß selbst bei angenommener Gleichheit der fundamentalen Gesetze für das Licht und für den Schall die Umstände, unter welchen wir Licht und Schall beobachten, sehr verschieden sind. Dieses Bedenken wird noch unterstützt durch die Unsicherheit der Beobachtungsweisen bei den erwähnten Autoren, welche zudem von SONDHAUS offen und ehrlich eingestanden wird.

Betrachtet man die Dimensionen der Prismen und Linsen, mit welchen SONDHAUS, HAJECH, und in neuester Zeit auch KÖNIG experimentirten, so sieht man bei einiger Vertrautheit mit der Wellentheorie sofort, daß diese Apparate durchaus ungeeignet sind, um die erwartete Brechung zu zeigen. Die regelmässige Brechung des Lichtes erklärt sich nach dem HUYGHENS'schen Princip durch das Zusammenwirken einer Unzahl von Elementarwellen, welche von der brechenden Fläche ausgehend, sich im Allgemeinen zerstören und nur an gewissen Orten und in einer gewissen Richtung mit gleichen sich verstärkenden Phasen zusammentreffen. Diese regelmässige Brechung kann aber, wie FRESNEL bemerkt hat, nur an Flächen stattfinden, deren Dimensionen gegen die Wellenlänge des Lichtes sehr groß sind. So wie diese Bedingung nicht erfüllt ist, verwandelt sich die regelmässige Brechung sofort in Zerstreuung durch Beugung.

Ist eine brechende Fläche klein gegen die Wellenlänge, so können die Punkte derselben nur sehr wenig verschiedene Phasen haben, deren Reihenfolge dann auch nur einen kleinen Bruchtheil der Welle vorstellt. Die von diesen Punkten abgeleiteten Elementarwellen werden selbst nach jenen Richtungen hin, welche den Flächenelementen parallel sind, nach welchen sie also mit den größten Gangunterschieden zusammentreffen, wegen des geringen Phasenunterschiedes nicht mehr im Stande seyn, sich zu zerstören, und dies wird in noch höherem Maaße von den

übrigen Richtungen gelten. Die Fortpflanzung wird also nach allen Richtungen desto gleichmäßiger seyn, je kleiner die brechende oder reflectirende Fläche.

Dieses Verhältniß besteht nun bei den erwähnten Schallbrechungsapparaten durchaus, wenn man nicht mit den höchsten überhaupt noch hörbaren Tönen experimentirt. In letzterem Falle allein kann man noch etwas günstigere Resultate erwarten. Störend können bei diesen Apparaten noch die Membranen wirken, durch welche die Gase abgeschlossen sind. Zwar hat die Spannung des Gases keinen Einfluß auf die Schallgeschwindigkeit, allein die gewöhnliche Ableitung der Erscheinungen nach dem Huyghens'schen Princip wird illusorisch, wenn die Membran gespannt genug ist, um die treffende Erregung auch nach ihrer eigenen Richtung mit einer der Schallgeschwindigkeit vergleichbaren Geschwindigkeit fortzupflanzen. Die Membran muß also schlaff seyn und darf überhaupt keine Neigung haben, in stehende Schwingungen zu gerathen. In letzterem Falle fällt die zur Membran parallele Bewegungscomponente bei der Uebertragung auf das neue Medium fast ganz aus und die Erscheinungen ändern sich wesentlich.

Stellt man das König'sche Gasprisma *G* vor die Mündung einer vierfüßigen Orgelpfeife *P*, wie dies in Fig. 11 Taf. III<sup>1)</sup> angezeigt ist, so sieht man die Schwingungsebenen *ff* der transversal schwingenden Flammen<sup>2)</sup> nach allen Richtungen divergiren, wobei die mittlere Flammenebene zur Membran normal steht. Dies Verhältniß besteht, ob man das Prisma mit Leuchtgas, Kohlensäure oder Luft fülle. Die allseitige Divergenz zeigt sich auch mit geringen Modificationen am senkrecht oder schief abgeschnittenen Ende der Pfeife. Von Brechung oder Ablenkung ist unter diesen Umständen keine Spur.

Um mit möglichst kurzen Wellen zu experimentiren, verwendeten wir den elektrischen Funken. Das hohe knisternde Geräusch kleiner Funken läßt auf eine kleine

1) Die dem nächsten Hefte beigelegt wird.

P.

2) Vergl. Mach, Optisch-akustische Versuche. Prag, 1872, S. 49.

Wellenlänge schliessen und die enorm kleine Entladungsdauer einer Flasche beweist, daß die vom Funken ausgehende Erschütterung sich nur auf eine sehr kleine Strecke während der Entladung fortgepflanzt haben kann. Wir untersuchten zunächst die Reflexion. Der Bequemlichkeit des Experimentes wegen wurde die Ausbreitung des Schalles auf zwei Dimensionen beschränkt.

Man bringt zwei congruente elliptische Bretter übereinander an und verbindet die Ränder durch einen Blechreif, so daß zwischen denselben ein Luftcylinder mit elliptischer Basis von sehr geringer Höhe eingeschlossen ist. Läßt man nun in dem einen Brennpunkte *A* Fig. 7 Taf. III den Funken der Holtz'schen Maschine oder eines Rühmkorff'schen Apparates, in welchen eine Flasche eingeschaltet ist, überschlagen, so erhält man im anderen Brennpunkte auf einer bestäubten Platte aus schwarzem Glase eine schöne aus concentrischen Ringen bestehende Staubfigur <sup>1)</sup>. Die Schallbewegung schreitet von *A* bis zu jedem Punkte *M* der Wand fort, und giebt dort Anlaß zum Entstehen einer Elementarwelle. Alle Elementarwellen treffen vermöge der Gleichung der Ellipse  $u + v = \text{const}$  mit gleichen Phasen im anderen Brennpunkte *B* zusammen. Es ist nun bemerkenswerth, daß die Figur zwar desto zarter, aber auch desto schärfer wird, je kleiner und knisternder die angewandten Funken werden. Große Funken geben starke diffuse Figuren, deren Centrum sich nicht gut bestimmen läßt. Knallgasblasen in *A* abgebrannt, geben desto gröbere und desto mehr verschwommene Figuren, je größer sie sind und je tiefer der entsprechende Knall.

Bringt man in eins der elliptischen Bretter bei *A* ein Loch an, durch welches man den Ton einer Pfeife einleitet, während man durch ein Loch der Blechwand ein mit dem Ohre verbundenes Rohr durchsteckt, mit dem man auscultirt, so hört man bei sehr hohen Tönen ein sehr deutliches und starkes Anschwellen des Tones, wenn

1) Vergl. Abria, Pogg. Ann. Bd. 53. — Kundt, Pogg. Ann. Bd. 136.

man mit dem Auscultationsrohr durch den Brennpunkt *B* durchfährt

Offene Pfeifen von 5 bis 10 Centimeter Länge oder ein König'scher Stab bei *A* angeschlagen, zeigen dies in ausgezeichneter Weise, während die Erscheinung desto undeutlicher wird, je tiefere Töne man anwendet. Eine vierfüßige Orgelpfeife zeigt gar keinen Intensitätsunterschied mehr an den verschiedenen Stellen der Ellipse.

Stärkere Funken und Knallgasblasen in dem einen Brennpunkt abgebrannt, so wie der Knall eines daselbst abgefeuerten Zündhütchens vermögen die Flamme eines Gasbrenners im andern Brennpunkt der Ellipse zum Zucken und zum Verlöschen zu bringen. Mit der Stärke der Erregung verschwindet aber wegen der größeren Dauer derselben auch die Schärfe der Erscheinung.

Die Versuche würden unter den gegebenen Umständen natürlich auch im Raume gelingen, wenn man ein vollständiges Ellipsoid als reflectirende Fläche verwenden würde. Es sey gleich hier bemerkt, daß sie merklich weniger gut mit zwei sphärischen Hohlspiegeln von etwa 1 M. Radius, 1 M. Oeffnung gelingen, welche in einer Distanz von 6 M. einander gegenüber aufgestellt werden. Doch zuckt die Flamme in dem Brennpunkte des einen Spiegels, wenn in dem Brennpunkte des anderen Knallgas abgebrannt wird. Man kann durch Knallgas eine Staubfigur auch hier erzeugen, welche jedoch ziemlich diffus ist und kein deutliches Centrum hat.

Man findet bei hohen Pfeifen, die vor dem einen Spiegel angeblasen werden, durch Auscultiren mit dem Rohr eine Verstärkungsstelle vor dem andern. Man findet eine solche Verstärkungsstelle nicht mehr bei tiefen, z. B. vierfüßigen Pfeifen. Bei diesen hört man jedoch das hohe Sausen des Anblasegeräusches und die höchsten Obertöne sehr beträchtlich im Brennpunkte verstärkt. Ein König'scher Stab zeigt eine sehr bedeutende und mächtige Verstärkung. Warum die Verstärkung am Ellipsenapparate und hier nur bei hohen Tönen auffallend ist, ist klar.

Bei grofsen Wellenlängen und tiefen Tönen sind die zusammentreffenden Phasen auch eine beträchtliche Strecke vom Brennpunkt weit noch sehr wenig verschieden.

So gut und so klar die Experimente über die Reflexion ausfielen, so viel Schwierigkeiten boten die auf die Brechung bezüglichen Versuche. Wir wollen jedoch auch die Experimente mit negativen Resultaten kurz erwähnen, damit man sehe, wie sorgfältig man experimentiren kann, ohne Brechung des Schalles mit Sicherheit zu beobachten.

Zunächst wurden die Sondhaus'schen Versuche ohne einen nennenswerthen Erfolg wiederholt. Dann versuchten wir die Schallausbreitung auf zwei Dimensionen zu beschränken. Vier drei Centimeter hohe Klötzchen wurden an die Ecken einer grofsen Tischplatte gelegt und eine zweite gleich grofse Platte daraufgestürzt. Ganz am Rande zwischen diesen Platten *P* Fig. 8 Taf. III befand sich eine stetig von Kohlensäure durchströmte Cylinderlinse von drei Centimeter Höhe, welche aus zwei mit Leim überzogenen Brettchen und einer durch Glycerin erweichten Goldschlägerhaut gebildet war. Zu dieser Linse leitete ein pyramidaler Holztrichter, in dessen Scheitel *f* der Funke übersprang, den Schall, aus dessen kugelförmiger Welle er so zu sagen einen Sector ausschnitt und dessen seitliches Entweichen er verhinderte. Man konnte nach dem Brechungsexponenten der Kohlensäure bei *G* eine Staubfigur erwarten. Die Funken lieferten nun zu wenig Arbeit, um Staubrippen zu zeigen. Knallgasblasen zeigten Rippen *RR*, aus deren Lage man aber auf eine allseitige Divergenz von der Linse aus schliessen mußte. Auscultationsversuche gaben kein sicheres Resultat.

Man denke sich ein Parabelstück *P'*, dessen Axe in Fig. 9 Taf. III bezeichnet ist, in *MM* schief abgeschnitten und daran ein zweites Parabelstück *P* so angesetzt, daß die Neigung beider Axen dem Brechungsverhältnisse des Schalles aus Luft in Kohlensäure für die brechende Fläche *MM* entspricht. Zwei Bretter dieser Form wurden übereinander angebracht; die Ränder durch einen wohlverkit-

teten Blechreif verbunden und bei  $MM$  eine schlaife erweichte Membran durchgezogen. Das Stück  $P'$  ist mit Luft gefüllt,  $P$  wird von Kohlensäure durchstrichen. Schlägt im Brennpunkt  $B$  ein Funke über, so soll er nach der Reflexion ein axenparalleles Schallstrahlenbündel geben, welches gebrochen wieder axenparallel in  $P$  eintritt und im Brennpunkte  $A$  gesammelt wird. Man erhält beim Ueberschlagen von Funken keine Staubfigur. Die Funken haben offenbar zu wenig Arbeit, um zwei Reflexionen und eine Brechung ohne Schaden zu ertragen. Knallgasblasen geben Staubfiguren, aber sehr diffuse und unbrauchbare.

In der Absicht, zwischen dem Ausgangs- und Sammelpunkt des Schalles bloß eine Brechung zu setzen und zugleich eine etwas genauere Construction auszuführen, wurde ein anderer Versuch unternommen. Huyghens lehrt (im *tractatus de lumine*), daß die von einem Punkte  $A$  (Fig. 10 Taf. III) des einen Mediums ausgehenden Strahlen in einem Punkte  $B$  des andern Mediums wirksam gesammelt werden, wenn die beiden Medien durch eine solche Curve  $CC$  getrennt sind, daß die von den Punkten  $A, B$  nach irgend einem Punkte  $M$  derselben gezogenen Leitstrahlen  $u, v$  die Bedingung erfüllen  $u + nv = \text{const.}$ , wobei  $u$  der Brechungsexponent für den Uebergang von  $A$  nach  $B$ . Die hieher gehörigen Curven sind Eicurven. Eine solche Eicurve wurde nun für  $A$  in Luft und  $B$  in Kohlensäure sorgfältig construirt und  $B$  einmal in den Mittelpunkt eines reflectirenden Kreises, dann in den Brennpunkt einer reflectirenden Ellipse gelegt, um die Reciprocität von  $A$  und  $B$  nicht zu stören. Die Entladungen in  $A$  brachten nur sehr diffuse Staubfiguren hervor. Nur einmal schien es beim Beginn des Versuches, als ob sie in  $B$  schon vorhanden wären und anderswo noch fehlten.

Das Mißlingen so sorgfältig angestellter Versuche legte den Gedanken nahe, daß zur Sammlung des Schalles, wie bei der reflectirenden Ellipse, eine geschlossene Wellenfläche nöthig sey. Diese herzustellen, hat aber bei Brechungsversuchen einige Schwierigkeiten. Man kann zwar eine

Eicurve construiren, welche beide Punkte *A* und *B* umschließt und die geometrische Eigenschaft  $u + nv = \text{const.}$  erfüllt; allein dann liegen beide Punkte auch in demselben physikalischen Medium. Folgender Versuch führt nun zum Ziele.

Man construire um die Punkte *A* und *B*, Fig. 6 Taf III die Eicurve

$$u + \frac{5}{4} v = \text{const}$$

und bringe drei solche eiförmige Bretter parallel über einander an. Das mittlere ist etwas kleiner. Der Rand des mittleren und das obere Brett sind durch eine Membran verbunden und ihr Zwischenraum mit Kohlensäure gefüllt. Das untere und obere Brett verbindet ein Blechreif und zwischen dem unteren und mittleren befindet sich Luft. Der Funke überschlägt zwischen dem unteren und mittleren Brett in *A*, die Schallwelle biegt um den Rand des mittleren Brettes durch die Membran in die Kohlensäure ein und erzeugt auf der bestäubten Platte im Punkte *B* eine schöne scharfe Staubfigur mit concentrischen Ringen. Die Figur verschwindet und es erscheinen einige, jedoch nicht mehr concentrische Rippen in *C*, wenn die Kohlensäure entleert und auch durch Luft ersetzt wird. Dieser Versuch ist vollständig analog dem Ellipsenexperiment.

Wir sehen also, daß, obgleich das Huyghens'sche Fundamentalprincip für den Schall ebenso anwendbar ist wie für das Licht, doch die Umstände, unter welchen beide Erscheinungen erfolgen, zu verschieden sind, um gleiche Form anzunehmen. Große Differenzen bringt die Verschiedenheit der Wellenlänge hervor. Eine kleine, das Licht reflectirende Fläche faßt viele tausend Wellenlängen. Um ein analoges Experiment für den Schall anzustellen, müßte man mindestens eine Berglehne als Spiegel aushöhlen. Dann könnte man vielleicht Schallbilder erhalten. Erscheinungen wie die totale Reflexion können beim Schall aus denselben Gründen nicht erwartet werden. Auch bei



unperiodischen Schallbewegungen werden die gewöhnlichen Reflexions- und Brechungsgesetze nicht zutreffen.

Daß geschlossene Schallwellenflächen sich dem Licht ähnlicher verhalten, liegt an einem einfachen Umstande. Beim Licht verschwindet die Wirkung der Ränder des endlichen Bruchstückes einer Wellenfläche, an welchen Rändern die Anwendung des Huyghens'schen Principes nicht mehr so einfach und unbedenklich ist, gegen die Wirkung der centralen Theile. Bei Schallwellen tritt ein solches Verschwinden vermöge der sehr viel größeren Wellenlänge nicht ein. Ein Bruchstück einer Schallwelle zeigt sofort Zerstreuung.

Eine genauere Ableitung der hier besprochenen Erscheinungen aus dem Huyghens'schen Princip, eine Aufzählung der bei solchen Ableitungen zu gebrauchenden Vorsichten, sowie eine Untersuchung der eigentlichen Bedeutung des Huyghens'schen Principes, welches im Wesentlichen in der Zusammensetzung einer Auflösung aus particulären Intregalen beruht, wird Mach geben, sobald es Zeit und Umstände erlauben <sup>1)</sup>).

- 1) Das Huyghens'sche Princip ist ein viel einfacheres und mehr fundamentales Gesetz, als z. B. das Snell'sche Brechungsgesetz. Spricht man dies in der Fermat'schen Form aus „daß das Licht bei der Brechung von einem Punkte zum andern auf einem Wege kürzester Zeit gelange“ (vergl. meine Demonstration in Carl's Repertorium 1872), so ergibt sich die Erklärung sehr einfach: Das Licht kann von jedem Punkt zu jedem Punkt auf jedem Wege gelangen, doch können nur die Lichter, die mit Wegen gleicher Zeit zusammentreffen, sich unterstützen, also nur solche, welche einen Weg kürzester Zeit gegangen sind, weil vermöge der allgemeinen Eigenschaft des Minimums auch die Nachbarwege des Minimumweges gleiche Zeit in Anspruch nehmen.