

3) Dafs der Unterschied, welchen man zwischen destillirtem und käuflichem Zink in Bezug auf ihre Angreifbarkeit von verdünnter Schwefelsäure bemerkt, wahrscheinlich von den Beimengungen des käuflichen Zinks herrührt, besonders vom Eisen, welches sich immer in einer mehr oder weniger beträchtlichen Menge darin befindet.

4) Dafs der Einfluß dieser beigemengten Stoffe wahrscheinlich Folge ist einer elektrischen Action zwischen ihnen und den Theilchen des leichter oxydirbaren Zinks.

---

## VI. *Andeutungen zur Begründung einer Theorie der Aeolsharfe;*

*von Carl Emil Pellisov in München.*

---

Es kommen im Gebiete der Physik tausend so alltägliche Erscheinungen vor, dafs sie der Physiker kaum einiger Aufmerksamkeit werth hält, oder gar mit Stillschweigen übergeht, während diese Erscheinungen noch gar sehr im Dunkeln liegen, und manchen in Verlegenheit setzen könnten, von welchem eine Erklärung derselben gefordert würde. Ich erinnere hier nur an die bekannte Glastbränen, und an die Aeolsharfe, die den Gegenstand unserer Andeutungen ausmachen soll.

Man findet in manchem Lehrbuch der Physik bei Gelegenheit der sogenannten Flageoletttöne der Saiten, manchmal auch der Aeolsharfe erwähnt, und bemerkt, dafs ihre Töne auf den Schwingungen aliquoter Saitentheile beruhen; gerade die Hauptsache aber: wie ein allseitig auf die Saite wirkender Luftstrom diese Saite unter den nämlichen Umständen in die verschiedenartigsten aliquoten Theile theilen könne, darüber sucht man vergebens

eine genügende Erklärung, und nur Gilbert in seinem Grundriß der Experimental-Naturlehre, so wie Muncke im Handbuche der Naturlehre, Heidelberg 1829, p. 275., haben eine Theorie der Aeolsharfe versucht. Beider Theorien aber gründen sich auf die schon von Matthew Young in seinem bekannten musikalischen Werke 1784 gegebene Erklärung, welche in einer deutschen Uebersetzung in Gilbert's Annalen, 10ten Bds. 1stes St. Jahrg. 1802, zu finden ist. Diefs ist auch der einzige mir bekannte, etwas umständlichere Versuch zur Erklärung der allerdings sehr räthselhaften Aeolstöne; er enträthelt aber die eigenthümliche Natur dieser Flötentöne, wie auch Muncke sehr wohl bemerkt, ebenso wenig als jeder andere. Ja Young's Theorie beruht, wie wir uns darzuthun bemühen werden, auf ganz irrigen Ansichten, und es ist ihr auch in allen ihren Theilen kein anderer Physiker gefolgt als Gilbert.

Eh' wir zu unsern Versuchen schreiten, betrachten wir die Worte Young's, der nach einer kurzen Einleitung sich folgendermaßen ausdrückt:

„Doch ehe wir dieses Phänomen (die Schwingungen der Saiten in aliquoten Theilen) näher untersuchen, wollen wir die Wirkung eines Luftzugs, der auf eine elastische gespannte Saite stößt, betrachten. Der Theil des Zuges, der auf die Mitte der Saite stößt, bringt die ganze Saite aus ihrer geradlinigen Lage. Da aber ein gewöhnlicher Luftstrom nicht lange anhält, so wird der Luftzug in der Regel die Saite nicht in der gekrümmten Lage erhalten können, da sie dann vermöge ihrer Elasticität in Schwingungen geräth. Ist der Luftstrom zu stark, als daß sie zurückschnellen könnte u. s. f.“

Aus diesen Worten scheint sich mir zu ergeben: daß Young die Saite durch den Druck des Windes auf dieselbe aus ihrer geradlinigen Lage bringen läßt, und daß also auch die Gröfse der Curve, in welcher durch den Druck des Windes die Saite sich krümmt, der Kraft

des Windes proportional seyn müsse. Ferner aus den Worten: „Da aber ein Luftstrom selten so lange anhält u. s. f.“ ergibt sich eben so klar, daß Young auch die Dauer der Krümmung der Dauer der erregenden Kraft für gleich annehme.

Es ist aber klar, daß ein Luftstrom, bis er als erregende Kraft von seinem höchsten Grade der Spannung auf Null \*) herabsinkt, immer einer mit unsern Uhren noch wohl meßbaren Zeit bedarf, daß also auch die Zeit, in welcher die Saite von ihrem größten Grade der Ausbeugung wieder in ihre geradlinige Lage zurückkehrt, der Zeit gleich seyn müsse, in welcher der Luftstrom vom höchsten Grade seiner Spannung auf Null herabsinkt.

Wenn ich eine gespannte Saite aber durch irgend einen Körper aus ihrer geradlinigen Lage bringe und dann durch möglichst schnelles Zurückführen dieses Körpers in der Richtung seiner Bahn die Saite wieder in ihre alte Richtung zurückschnellen lasse, so erfolgt, wenn diefs Zurückschnellen nicht in einem unmeßbaren kleinen Zeitraume geschieht (in einem Zeitraume, der der Schwingung der Saite gleich ist) durchaus kein Ton; denn die Saite muß wenigstens mit der ihrer Spannung und Elasticität proportionalen Kraft zurückschnellen, wenn sie in Schwingung gerathen soll. Nach Young's Theorie kann aber die Saite nicht zurückschnellen, sondern sie wird sich in dem Verhältnisse des immer mehr und mehr abnehmenden Windstosses zurückbewegen, und da die Dauer eines auch plötzlich verschwindenden Luftstosses immer länger ist als  $\frac{1}{15}$  einer Secunde, so wird auf diese Weise nie eine Saite in tönende Schwingungen versetzt werden können. Aber auch die Kraft eines gewöhnlichen, die Saite treffenden Luftstromes wird nie in Stande seyn,

\*) Daß der Nullpunkt hier bloß relativ angenommen worden sey, nämlich von dem Zeitpunkte an, in welchem der Luftstrom die Saite auf irgend eine bemerkbare Weise zum Tönen bringt, bedarf wohl keiner Erwähnung.

durch ihren unmittelbaren permanenten Druck eine gespannte Saite durch Krümmung zum Tönen zu bringen. Nehmen wir die Geschwindigkeit des Windes  $= 17$  Fufs in einer Secunde, welche Geschwindigkeit, wie ich später zeigen werde, nahe der größten kömmt, die noch auf meine Aeolsharfe mit Vortheil anwendbar ist; ferner die Länge einer Saite  $= 2$  Baier'schen Fussen und ihre Dicke  $= 0,02$  Zoll, so ist der Flächeninhalt des Längendurchschnittes der Saite nahe gleich einem halben Quadratzollc Pariser Maafs. Wenn wir ferner annehmen, daß der mit einer Geschwindigkeit von 17,868 Fufs auf einen Pariser Quadratfufs stossende Wind eine Kraft von einem halben Pfd Cölln. ausübt, so giebt dieses auf einem halben Quadratzoll einen Druck von 10,55 Gran. Da aber noch überdieß der dem Winde zugekehrte Theil der Saite einen halben Cylinder bildet, so kann der Druck des Windes auf die gekrümmte Fläche, wenn wir die neuesten Versuche des Obersten Mark Beaufoy zum Grunde annehmen, auf die ganze Saite nur eine Gewalt von höchstens 6,6 Gran ausüben. — Ich hing deshalb, von diesem Ergebniss ausgehend an meine obige zwei Schuh lange Saite, die in's *g* des hiesigen Orchesters gestimmt war (wozu eine Kraft von 8 Baier'schen Pfunden angewendet werden mußte) Gewichte in laufender Reihe von 10 bis zu 80 Granen an einem sehr feinen Haare auf, und brannte dann dieses Haar mittelst der Spitze einer Löthbrohrflamme ab. Die Gewichte fielen auf eine sehr weiche Unterlage; aber nie kam beim jedesmaligen Reissen auch nur der leiseste Ton zum Vorschein, welchen der Fufs einer von der Saite aufliegenden Mücke sehr leicht hervorzubringen im Stande ist. Was ein Gewicht von 80 Granen nicht vermochte, wird der mehr als dreizehn mal geringere Druck des Windes schwerlich hervorzubringen im Stande seyn, auch wenn er, wie es nicht der Fall ist, in einem Augenblicke aufhörte.

«Die Wirkung des Windes fährt Young fort, wenn

er

er über Getreidefelder fährt, kann dazu dienen, dieses (seine obige Behauptung) zu rechtfertigen. Ist der Wind so schnell, daß eh' sich der gebogene Halm in die senkrechte Lage zurückbeugt u. s. f.»

Young vergleicht die gegen die Stärke des Windes fast verschwindende Elasticität des langen oben mit einer Aehre von bedeutendem Durchmesser versehenen Halmes, der noch überdies nicht wie eine an beiden Enden befestigte Saite, sondern wie ein an einem Ende freier elastischer Stab schwingt, zu einer Schwingung wenigstens eine Secunde Zeit bedarf, mit der Elasticität einer gespannten Saite, die in der nämlichen Zeit wenigstens 128 Schwingungen vollbringt; — eine Parallele, die in jeder Beziehung höchst unpassend gewählt ist. Passender ist sein Hinweisen auf das vom Winde gekrümmte Takelwerk eines Schiffes, obwohl die Elasticität eines gespannten 200 Fufs langen Seiles von einem Zoll Durchmesser, das dem Luftstosse eine Fläche von fast 17 Quadratfufs entgegensetzt, und von dem Windstosse in eine sehr bemerkbare Curve gekrümmt wird, mit der Elasticität einer gespannten tönenden Saite nicht wohl verglichen werden kann.

Um vor allem die Schwingungsknoten derselben auszumitteln, befestigte ich zwischen die 2 Schuh von einander entfernten Stege meiner Aeolsharfe einen in gleiche Theile getheilten eben so langen Maafsstab, auf welchem den, jedem Aeolstone zugehörigen, aliquoten Theil der Saite ein Vernier maß, der ein auf ihm senkrecht stehendes schmales Blättchen von Elfenbein trug, welches mit seiner schmalen Kante die Saite jedesmal in jenem aliquoten Theile leise berührte, den das Vernier unten auf dem Maafsstabe angab. Ich setzte die auf diese Art zubereitete Maschine dem Winde aus und brachte nach Maafsgabe der erscheinenden Töne das Vernier auf den demselben entsprechenden Theilstrich. Der Ton wurde auf diese Weise nicht gestört, während er nach Verrück-

kung des Verniers auch nur um den zehnten Theil einer Linie sogleich verschwand. Dieser Versuch schien mir hinreichend zu beweisen, dafs, wenn auch die Saite vom Winde bewegt, nicht in aliquoten Theilen schwingen sollte, dennoch die leise Berührung derselben an der dem Tone entsprechenden aliquoten Stelle dem Tone nicht hinderlich, oder in manchen Fällen selbst eine solche Theilschwingung der Saite hervorzurufen im Stande sey.

Um mich aber von der Gegenwart der Schwingungsknoten der tönenden Saite zu überzeugen, wenn keine Berührung zu ihrem Entstehen Anlaß gab, bediente ich mich folgender Vorrichtung.

Ich hatte nämlich die Erfahrung gemacht, dafs ein auch nur die Hälfte der Saite treffender Luftstofs die nämlichen Erscheinungen hervorbringe, als wenn er auf die ganze Saite zugleich wirkt. Deshalb schützte ich die obere Hälfte des dem Winde ausgesetzten Instrumentes vor seiner Einwirkung, und hing sehr feine Hebel aus leichten Rohrstreifchen an feinen Fäden ungesponnener Seide in der Art auf, dafs sie mit ihrem einen Ende in Ruhe, alle möglichen durch einen Windstofs entstehenden Schwingungsknoten der bedeckten Hälfte der Saite berührten, und durch ihre Ruhe oder ihre Oscillationen das Erscheinen derselben, oder die gänzliche Abwesenheit der Schwingungsknoten nothwendig anzeigen mußten. Die Hebel sammt ihren Fäden wurden durch einen Glaskasten sorgfältig vor der Berührung des Windes geschützt, und hierauf die freie Hälfte der Saite dem Winde ausgesetzt. Sobald die Saite zu tönen anfang, entfernten sich die Hebel alle von der Saite und geriethen in Schwingung, schneller oder langsamer, in gröfseren oder kleineren Bögen; nie aber wollte es gelingen, auch nur einen Hebel auf irgend einen Schwingungsknoten in Ruhe zu erhalten, man mochte die berührende Spitze des Hebels auch in die verschiedenartigsten Formen bringen; ausgenommen es wurde die Saite an einem ihrer Schwin-

gungsknoten leise berührt, und dann erschienen, aber auch nur unter besondern Umständen, die ich später erwähnen will, die übrigen dem ersten entsprechenden Schwingungsknoten, welche sich durch Ruhe der dort anliegenden Hebelarme, oder wenigstens durch einen kleinern Schwingungsbogen derselben verriethen. Diese bisherigen, unter den verschiedensten Abänderungen angestellten Versuche, waren keineswegs geeignet, den ziemlich dunklen Gegenstand unserer Untersuchung aufzuhellen, und ich beschloß daher, da die Young'schen Beobachtungen immer weniger mit den meinigen übereinstimmten, die wunderbaren Töne von ihrem ersten Entstehen an, ohne Rücksicht auf fremde Erfahrungen, zu verfolgen. Vor allem war die Kraft des Windstosses und sein Verhältniß zum erscheinenden Aeolstone aufzusuchen, wozu ich mich folgender Vorrichtung bediente.

Ich nahm alle Saiten von meiner Aeolsharfe bis auf eine, schon oben beschriebene hinweg, und hing neben ihr eine Parallelogramm von 10 Baier'schen Zoll Länge und 3 Zoll Breite an feinen Seidenfäden in der Art auf, daß die Fläche des Parallelogramms mit dem Längenschnitte der Saite in einer Ebene lag, auf welcher die Richtung des Windstosses vertical war. Der Leser wird leicht bemerken, daß dieß pendelartig schwingende Parallelogramm ein Anemometer zu bilden bestimmt war, von der Art, von welcher wir ein ähnliches in Lichtenberg's Magazin für das Neueste der Physik u. s. f. abgebildet finden, nur mit dem Unterschiede, daß der Gradbogen, welcher die Winkel angab, bis zu welchen das Instrument vom jedesmaligen Luftstosse gehoben wurde, nicht durch das Parallelogramm ging, sondern ihm zur Seite angebracht wurde, um jede lästige Friction oder andere Störungen, so viel als möglich zu vermeiden. Neben diesen war eine gewöhnliche Windfahne, mit einem Lind'schen Anemometer versehen, angebracht, so wie eine verticale Drehwaage, den Winkel zu messen,

den die Directionslinie des Windes mit dem Horizont machte. Die Länge der Saite war, wie schon bemerkt, 2 Schuh, ihre Dicke 0,02 Schuh; ihre Spannung das kleine des hiesigen Orchesters.

Sobald sich der Wind erhob und der parallelogrammatische Windflügel einen Bogen von 5 Graden abschnitt, erschien der Grundton der Saite, und zwar so rein und ohne alle mitklingenden Nebentöne, die bei jeder gewöhnlichen Art, die Töne zu erregen, mit dem Grundtone immer zugleich erscheinen, daß ein ungeübtes Ohr, welches ihn mit dem entsprechenden Tone des Piano-Forte verglich, ihn anfangs um eine ganze Octave tiefer hielt, und sich nicht genug wundern konnte, daß die Aeolsharfe auch tiefere, als ihre Grundtöne, hervorzubringen vermöchte.

Sobald das Anemometer auf 10 Grade stieg, erschien die Quinte des Grundtones eben so rein und bestimmt ohne mitklingende höhere Octave u. s. f.

Es erscheint hier die erste Anomalie, die sich aus den Theilschwingungen der Saiten nicht mehr erklären läßt. Um die Quinte zum Grundtone hervorzurufen, müssen nach den aliquoten Theilschwingungen der Saite zwei Drittheile ihrer Länge schwingen; wogegen das dritte Drittheil der Saite die höhere Octave der Quinte geben muß. Die Theorie sowohl als der schärfere Calcul beweisen die Unmöglichkeit des Zugleichseyns zweier Schwingungen der Art an einer und der nämlichen Saite. Das Gleiche findet sich durch die Erfahrung bestätigt. Man versuche nur, und rufe durch Untersetzen eines die Saite am Ende ihres ersten Drittheils leise berührenden Steges einen Schwingungsknoten hervor, und streiche hierauf die Saite transversal, wie gewöhnlich, mit dem Bogen. Setzt man den Bogen zwischen zwei Schwingungsknoten der Saite an, so ertönt sogleich regelmäsig die nächst höhere Octave der Dominante. Streicht man über einem Schwingungsknoten selbst, so erfolgt gar kein Ton; nie aber



wird es gelingen zwei Drittheile der Saite auf diese Art zum tönen zu bringen, daß sie die nächste Quinte zum Grundtone gebe. Streicht man so leise als möglich, daß der Bogen nur wie ein leichter Hauch die Saite berührt, oder bläst so stark auf die Saite, daß sie zum Tönen kömmt, so erscheint zwar der zwei Drittheilen der Saite entsprechende Ton; allein das dritte Drittheil der Saite bleibt nun ganz in Ruhe, da man es festhalten kann, ohne daß der Ton dadurch gestört würde. Die Saite aber, welche dem Winde ausgesetzt die Dominante ihres Grundtones giebt, ist an allen Stellen zugleich in Schwingung, und man mag sie berühren wo man immer will, dieser Ton (die Dominante) wird augenblicklich verschwinden, selbst in dem Falle, wenn man, durch Berührung eines Schwingungsknotens der Saite, dieselbe zuerst in entsprechende aliquote Theile getheilt zu haben scheint. Beobachtungen dieser Art wurden unzähligemal wiederholt, und es ist nicht wohl möglich, daß eine Täuschung dabei statt gehabt haben sollte, so paradox dieß Phänomen auch erscheinen mag.

Sobald das Anemometer 15 Grade zeigte, erschien die Octave der Tonica  $\bar{g}$ ; bei 25 Graden die Octave der Dominante  $\bar{d}$ ; bei 30 Graden die 7 der Tonica; bei 35 die Doppel-Octave des Grundtones; bei 40 Graden die Octave der 9. — Der Windflügel mochte übrigens durch die Gewalt des Luftstoßes auf irgend eine beliebige Höhe gehoben werden, so erschien während seines Steigens, so lange kein Ton, bis er das Maximum seiner Höhe für den Augenblick erreicht hatte; beim Zurücksinken des Flügels hingegen, das eine viel längere Zeit als seine Erhebung nöthig hatte, erschienen die Töne höherer Ordnung absteigend und dem jedesmaligen Grade genau entsprechend, über welchem der Flügel sich im Augenblicke befand. Dabei ist zu bemerken, daß im Aufsteigen des Flügels die Terze zum Grundtone niemals, wohl aber die Octave zur Terz im Zurücksinken des Flügels erschien.

Die Reihe der Töne während des Zurücksinkens des Flügels war also folgende: entweder  $\bar{f} \bar{d}$ ; oder  $\bar{f} \bar{d} \bar{h} g$ ; oder  $\bar{f} \bar{d} \bar{h} \bar{g} g$ ; oder  $\bar{g} \bar{f} \bar{d} \bar{h} g$ ; oder  $\bar{a} \bar{g} \bar{f} \bar{d} \bar{h} g$ .

Aus den Graden, auf welche der Windstoß den Flügel hob, berechnete ich nach der bekannten Kästner'schen Formel, die im 6sten Bande des Gotha'schen Magazins für Physik, 3tes Stück, p. 84., zu finden ist; nämlich  $v = \frac{Q}{M \cdot a^2} \cdot \frac{\sin \zeta}{\cos \zeta^2}$ ; wo bei  $v$  die Gewalt des Luftdruckes,  $Q = 760$  Gran das Gewicht des Flügels,  $M =$  dem Gewichte eines Cubikfusses atmosphärischer Luft  $= \frac{7}{8}\sigma$  Pfund, was bei der Unvollkommenheit der ganzen, bei diesen Rechnungen anwendbaren Methode hinreichend genau ist, und  $a^2$  den Inhalt der Fläche des Flügels bedeutet. Aus dem Ergebnisse dieser Formel wurde dann die Geschwindigkeit des Windes  $c = 2\sqrt{(g \cdot v)}$  gefunden, wobei  $g =$  der Höhe des Falles zu 15,625 angenommen wurde, woraus sich dann folgendes Resultat ergab.

Grade der Elevation	Geschwindigkeit des Windes	Aeolstöne	Schwingungszahlen	Aliquote Saitentheile
5°	5,99	$\bar{g}$	191,8	1
10	9,24	$\bar{d}$	255,6	$\frac{2}{3}$
15	11,20	$\bar{g}$	383,6	$\frac{1}{2}$
20	13,24	$\bar{h}$	450,0	$\frac{2}{3}$
25	15,28	$\bar{d}$	511,2	$\frac{1}{3}$
30	17,48	$\bar{f}$	609,8	$\frac{6}{13}$
35	19,78	$\bar{g}$	767,2	$\frac{1}{4}$
40	22,44	$\bar{a}$	774,8	$\frac{2}{9}$

Die Höhe des jedesmal erscheinenden Tones ist also durchaus so ziemlich der Schnelle des Luftstromes proportional, und der Wind durchläuft fast  $\frac{1}{4}$  Zoll, während

die Saite, wenn sie ihre Tonica giebt, eine Schwingung vollendet, und einen solchen Raum etwa würde auch in der nämlichen Zeit ein freifallender Körper zurücklegen.

Noch ist zu bemerken, daß die oben angeführten Resultate die Frucht zahlreicher Beobachtungen sind; denn es ist mit ziemlichen Schwierigkeiten verknüpft, den jedem Tone entsprechenden Winkel in dem Augenblicke seines Entstehens mit der gehörigen Genauigkeit abzulesen, da nicht bloß die Art des Windes, sondern die absolute Spannung der Luft selbst, wesentlichen Einfluß auf die Bildung der Töne hat. Ist jedoch einmal der Winkel bekannt, unter welchem die Saite ihre Tonica angiebt, so befolgen die Winkel, unter welchem die übrigen Töne erscheinen, immer ihr ursprüngliches, oben bemerktes Verhältniß. Es ist schon bemerkt worden, daß zur Hervorbringung der Aeolstöne der Luftstrom nicht unumgänglich nothwendig die Breite der Seitenlänge haben müsse, und ich will deßhalb hier noch erinnern, daß man die Breite des Luftstromes selbst bis auf ein Viertel der Saitenlänge beschränken könne; daß es völlig einerlei sey, auf welchen Saitentheil dieser Luftstrom treffe, und daß die Winkel, unter welchen bei so beschränktem Luftstrome die Töne erscheinen, sich umgekehrt wie die Breiten des Luftstroms verhalten. Hat man sich übrigens eine gewisse Fertigkeit in Beobachtung des Flügels errungen, so kann man aus dem Stande desselben jeden Ton, der eben diesem Stande entspricht, genau voraus bestimmen, oder auch die Saite mittelst eines Kartenblattes oder dergleichen in die dem Winkel entsprechenden aliquoten Theile theilen. Der Ton wird unter diesen Umständen sogleich erscheinen, aber auch sogleich wieder aufhören, sobald der Windflügel seinen Stand verändert, und nur dann wieder erscheinen, wenn der Flügel den diesem Tone zugehörigen Winkel bildet. Bei allen diesen durch den Stoß der Luft erregten Aeolstönen war durchaus keine durch Instrumente meßbare Transversal-

Schwingung zu bemerken, obgleich der Ton gar oft so intensiv war, daß er durch zwei wohl verschlossene Zimmer sehr deutlich zu hören war. Ich brachte ferner die Saite zwischen zwei Micrometerschrauben, deren Spitzen nur mehr um  $\frac{1}{1000}$  Theil eines Zolles entfernt waren, und setzte sie so dem Winde aus; allein die Töne erschienen ungestört und verschwanden erst bei der unmittelbaren Berührung der Saite durch die Schraubenspitzen. Aus allem bisher erwähnten läßt sich klar einsehen, daß alle diese Erscheinungen aus dem bisher beobachteten Verhalten tönender Saiten sich nicht genügend erklären lassen; bei näherer Beobachtung jedoch werden wir bemerken, daß die Aeolstöne am meisten mit den Schwingungen tönender Luftsäulen Aehnlichkeit haben, und daß eine Saite, welche einen Aeolston von sich giebt, in gewissen Fällen das sey, was wir eine überblasene Orgelpfeife nennen, wie wir es in folgender Untersuchung darzuthun bemüht seyn werden. Kein Körper, den wir als ungetheiltes Ganze betrachten, wird, auch noch so schnell bewegt, in's Tönen gerathen, und der Ton, den ein schwingender Körper hervorbringt, ist nur die Summe gleichzeitiger Schwingungen unendlich kleiner Theile des Körpers, welche mit den Schwingungen der Saite, als ein Ganzes betrachtet, in keinem nothwendigen Zusammenhange stehen, und es giebt ursprünglich nur eine Schwingungsart; denn alle die sogenannten bis jetzt bekannten transversalen, longitudinalen und rotirenden Schwingungen beruhen nur auf der verschiedenartigen Modification, unter welchen die eine Grundkraft eines elastischen Körpers afficirt wird.

Es giebt nur eine Art, einen tonfähigen Körper zum Tönen zu bringen, nämlich, wenn man irgend einem beliebigen Theile des Körpers, oder dem ganzen Körper zugleich, so lange schnell auf einander folgende Stöße in der Art mittheilt, daß nur allein alle Molecule desselben in gleichzeitige Bewegung gerathen. Die gleichzeitige

Bewegung aller dieser unmeßbar kleinen Theile steht aber mit der schnellen Folge der erregenden Stöße immer in geradem Verhältnisse, und alle tonfähigen Körper sind bei einer stets sich gleichbleibenden Länge, Spannung, Ausdehnung und Elasticität fähig, alle natürlichen Töne hervorzubringen: denn der höhere oder tiefere Ton richtet sich einzig und allein nach der schnellern oder langsamern Folge, oder der größern oder geringern Gewalt der Stöße.

Bei Blasinstrumenten verrichtet das Geschäft des Stosens die aus einer schmalen Ritze auf das Labium des Instrumentes stossende Luftschicht. Die durch die Reaction des unelastischen Labiums in Pulsation versetzte Luftschicht wirkt auf den dem Labium am nächsten liegenden Querdurchschnitt der Luftsäule, wodurch die ganze Säule wie eine Saite in Bewegung geräth. Wird jedoch das Labium so verfertigt, daß es verschiedenartig gespannt werden kann, so erfolgt auch der Ton bei unveränderter Schnelligkeit des Windes ebenfalls im Verhältnisse der Spannung des Labiums, welche wieder, so wie der auf diese Art hervorgebrachte Ton, ganz der Schnelligkeit der Pulsation proportional ist, in welche die Luftschicht durch die verschiedene Reaction des verschiedenartig gespannten Labiums versetzt wird. Daher giebt es bei Blasinstrumenten, wo bei der gewöhnlichen Art, sie zu behandeln, alle Schwingungsbedingungen noch in ihrer am wenigsten verunstalteten primitiven Form vorherrschen, kein eigentliches durch die größere oder geringere Gewalt des erregenden Körpers hervorgebrachtes Schwellen oder Nachlassen des Tones, kein Forte und Piano; denn der verstärkte Wind bringt bei allen Blasinstrumenten ohne Ausnahme sogleich eine Erhöhung des Tones oder sogar unsere Aeolstöne hervor; ja bei cubischen Pfeifen, wo der Stofs die ganze Länge der Luftsäule trifft, lassen sich sogar durch gehöriges, genau gemessenes Verstärken des Windes, alle Töne innerhalb

einer Octave hervorbringen. Auf dieser Maxime beruht die Kunst des Flötenspielers, einen Ton schwellen oder auch abnehmen zu lassen. Da nämlich ein verstärkter Luftstrom den Ton augenblicklich erhöhen würde, so muß man durch das verminderte Volumen des Luftstromes, den man in's Instrument stößt, den Ton gerade um so viel herabzuziehen suchen, um wie viel ihn die verstärkte Kraft des Luftstromes erhöht haben würde, und dieß ist einzig und allein das Geschäft der Lippen.

Bei Saiten hingegen verrichtet dieß Geschäft \*) die Transversal-Schwingung der Saite selbst, welche Transversal-Schwingung von ihrer Spannung, Elasticität und Dicke abhängt, und darum giebt eine Saite, die sich selbst zum Tönen bringt, natürlich nur immer einen Ton von sich, sie mag von schnellen oder langsamen Stößen afficirt werden, weil die Anzahl der Stöße, welche das wechselseitige Zusammendrücken oder Ausdehnen der *kleinsten Theile* der Saite in sich selbst hervorbringen, immer von ihrer Transversal-Schwingung abhängt, und sich nie ändern kann, so lange die Schwingungszahl der Saite dieselbe ist. Soll sich darum die Saite selbst in eine Schwingung versetzen, welche einen höhern Ton bedingt, so muß ich sie dazu durchaus durch leises Berühren am Endpunkte einer ihrer aliquoten Theile zwingen. Der Violinbogen hat bei unsern gewöhnlichen Instrumenten darum nichts zu thun, als die Saite aus ihrer geraden Lage zu reißen. Ist auf diese Art das Gleichgewicht zwischen den spannenden Kräften und der Elasticität der Saite aufgehoben, so erregt die Saite durch das lebhafte Zusammenschnellen ihrer Moleculartheilchen den der Schnelligkeit dieses Zusammenstoßens entsprechenden Ton, und die Bestimmung des Violinbogens ist darum nur, die ganze Saite jederzeit, wenn sie ruhen will, wieder aus ihrer geradlinigen Lage zu reißen, und sie in Schwingung

\*) Ihre kleinsten Theile nämlich durch Stöße in Bewegung zu setzen.

zu erhalten, so lange der Ton dauern soll. Der Bogen verhält sich also in diesem Falle nur *passiv* in Betreff der Tonhöhe; *activ* hingegen, wenn er als die Höhe des Tones bedingend in Wirkung kömmt. Und dieß ist der Fall, wenn die Saite in der Art zum Tönen gebracht wird, daß ihr Ton ganz *unabhängig von ihren Transversal-Schwingungen* erscheint.

Man bewirkt dieß am besten, wenn man sich übt, den Bogen so leise über die Saite zu führen, daß er ihr wohl Stöße mittheilt, ohne sie ihrer ganzen Länge nach in Schwingung zu versetzen. Dieß gelingt vorzüglich, wenn der Ungeübte den Bogen dicht am Stege einer etwa zwei Schuh langen, ein Drittheil Linie dicken in's *g* gestimmten Saite aufsetzt, und so leicht als möglich und in einem immer gleichen Zuge zu streichen anfängt. Der erscheinende Ton richtet sich dann ganz nach der Stärke oder Schnelligkeit des Striches, und man kann alle Töne, welche eine Saite mittelst des Windes giebt, und noch die meisten dazwischen und höher liegenden Töne auf diese Art sehr leicht erhalten. Wenn man den Bogen beim Frosche aufsetzt, und so im raschen Zuge bis an seine Spitze über die Saite führt, so wirkt der Bogen als ein immer kürzer werdender Hebel der ersten Art, und nach Maßgabe seines immer schwächer werdenden Druckes (der indeß in seinem höchsten Grade sehr leicht seyn, und mit der Hand regulirt werden muß) erscheinen alle harmonischen Töne von ihrer größten Höhe, bis zur möglichsten Tiefe, und man hat sogar alle möglichen Töne so sehr im Bogen, daß man bei hinlänglicher Fertigkeit auf einer stets gleich langen Saite bei unveränderter Spannung sogar nicht unangenehme Melodien spielen kann. — Die Schwingungen jener Molecule, welche der Bogen unmittelbar berührt, laufen dabei in dem nämlichen Zeitraume, in welchem die Saite eine Schwingung vollbringen würde, an's entgegengesetzte Ende der Saite, und werden dort reflectirt, so daß es scheint,

als entstände der Ton an dem, dem gestrichen entgegengesetzten Ende der Saite.

Ich muß hier noch einmal bemerken, daß bei allen diesen Versuchen der Bogen nur wie ein leiser Hauch über die Saite geführt werden darf, und sobald der Grundton der Saite allein oder mit einem der Aeolstöne zugleich gehört wird, war der Druck des Bogens schon zu stark. Hat man aber die Führung des Bogens einmal in seiner Gewalt, so wird man staunen, welch' eine reizende Folge von Tönen auf einer einzigen Saite hervorgebracht werden kann. Die Töne sind auf diese Art denen der Aeolsharfe so täuschend ähnlich, daß sie durch das Gehör nicht von einander unterschieden werden können.

Läßt man mit dem Aeolstone den Grundton der Saite zugleich ertönen, so gelingt es oft eine Folge von Accorden hervorzubringen, die, wenn sie mit den einfachen Flötentönen in Verbindung gebracht werden, einen so eigenthümlichen Effect hervorbringen, daß man bald eine leise Flötenmelodie, bald ferneres Glockengeläute, bald Harmonien einer entfernten Orgel zu hören glaubt.

Welch' bedeutenden Einfluß die Art des Striches auf Saiteninstrumenten habe, kann man daraus ersehen, wenn man statt der Pferdehaare eine gewöhnliche Violine-saite in den Bogen spannt, diese gleich den Pferdehaaren mit Kolophonium bestreicht; und sich derselben statt des gewöhnlichen Streichinstrumentes bedient. Der Ton, der auf diese Art der töngebenden Saite entlockt wird, richtet sich bei gehöriger Vorsicht nach dem Grade der Spannung der in den Bogen gespannten Saite, und Young hat die auf diese Art erregten und von dem Grundton der Saite oft sehr bedeutend abweichenden Töne schon bemerkt (siehe Gilbert's Ann. der Physik 22ster Band, p. 373.); allein er schrieb diese Töne den Schwingungen des Saitentheiles des Bogens zu, welches



sich zwischen dem einen Ende desselben und der gestrichenen Saite befand u. s. f.

Vergleichen wir all' diese Erfahrungen mit einander, so geht daraus hervor, daß der Ton, den eine Saite giebt oder geben kann, von ihren Transversal-Schwingungen überhaupt ganz unabhängig sey; daß ein und die nämliche Saite nach Maafsgabe des erregenden Körpers aller Töne des Tonsystemes fähig sey, sobald der hervorzubringende Ton von der Transversal-Schwingung der Saite nicht gestört wird, und daß eben die Transversal-Schwingung der Saite das Erscheinen jedes andern höhern von ihrer Transversal-Schwingung unabhängigen Tones darum verhüte, weil sie der Saite eine von ihrer Schwingungszahl bedingte stets gleichförmige Anzahl von Stößen mittheilt, die so lange Norm für den Ton bleiben, als sie von der äußern erregenden Kraft nicht überwältigt werden; dieß lehrt ein Versuch mit obiger in den Bogen gezogenen und hinlänglich straff gespannten Saite, welche, wenn sie einmal einen Grad der Spannung erreicht hat, daß ihre Schwingungen ein Multiplum der Schwingungszahl der tangebenden Saite sind, auch eine wirklich in Transversal-Schwingungen versetzte Saite so gleich in ein ihrer Schwingung entsprechendes Verhältniß umstimmt. Darum verschwindet auch ein von den Transversal Schwingungen der Saite unabhängiger Aeolston, sobald die erregende Ursache aufhört, wie dieß bei Blasinstrumenten der Fall ist, und die Fortdauer des Tones einer transversal-schwingenden Saite beruht nur auf der Fortdauer der erregenden Ursache, nämlich der Total-Schwingungen selbst, und verschwindet mit diesen.

Die Bewegung der tönenden Körper beruht bloß auf einem wechselweisen Zusammenpressen und wieder Ausdehnen der Molecule nach der Längenaxe der Saite, und die comprimierten Theile der Saite kehren wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurück, sobald der Druck nachgelassen hat.

Schon die Alten waren auf die Unabhängigkeit des Tones von den Schwingungen der Saite aufmerksam geworden, nur waren sie mit ihren Begriffen aus Mangel hinreichender Beobachtungen nicht in's Reine gekommen. So erklärt z. B., wenn wir die frühern Werke eines Mersennius u. s. f. übergehen, Musschenbroek in seiner *Introductio ad philosophiam naturalem Tom II. pag. 906.* unter andern: *Quando autem ita oscillatur, partes, quae in chorda recta, partibus impositae erant, jam in inflexa, longiori aliquantum ab invicem recedunt; sed quoque compinguntur, decrescente chordae crassitie; redeunte jam chorda in priorem brevitatem, compressae simul laxantur partes, increscitque crassities, adeo ut partim ad se accedant in abbreviatione, partim recedant in incremento crassitiei: ab hoc duplici motuum genere non editur a corporibus sonus. Verum si chorda a corpore quodam duro percutiatur in intermedio loco, ut partes alio adhuc tremulo motu in superficie agitentur, a quibus superficies exasperatur, nonnullis partibus subsidentibus, aliis exsultantibus, sonus fit, qui durante hoc tremore perstat.* Ihm entgegnet Gabler in seiner Abhandlung: „*Der Instrumentalton*“ sehr wahr, daß eine mit dem Finger angezogene und losgelassene Saite dennoch bloß durch diese ihre Schwingung in's Tönen gerathe, daß also die Schwingungen der Saite mit den Beugungen ihrer kleinsten Theile in wechselseitiger Beziehung stehen müßten; aber auch er, so wie alle nachfolgenden Physiker, vermochten sich kein Tönen der Saite ohne eine Schwingung derselben in Ganzen oder in Theilen zu denken, da doch die Urform aller Schwingungen, nämlich die longitudinalen, der Sache so nahe führten.

Musschenbroek macht in Betreff dieser Schwingungen nicht weit von obiger Stelle, nämlich §. 2194., schon folgende merkwürdige Bemerkung: *Prout nervus supra Violam tensus a plectro varia directione, vel nor-*

*mali, vel obliqua percutitur, alius auditur tonus, qui non ab oscillationibus pendere videtur diversis, quam quidem ab alio tremore partibus inducto: nisi forte et oscillationes et tremores tum differant.*

Vergleicht man die Elasticität oder Rigidität der Saiten und elastischen Stäbe mit einander, und sieht die der durch eigene Steifheit elastischen Körper als positiv an, so können wir füglich die Elasticität der durch Spannung elastischen Körper negativ nennen, und der Ausdruck  $N=E$  kann auf alle möglichen Fälle, durch welche ein Ton hervorgebracht wird, angewandt werden. Wenn wir eine Saite bei gleicher Spannung um ihre Hälfte verkürzen, so werden sich die Molecule der Hälfte dieser Saite, wenn sie zu schwingen anfangen soll, um einen nochmal so großen Raum von einander entfernen müssen, als dies früher bei der noch einmal so langen Saite geschah, und darum wird auch die Zahl der Schwingungen noch einmal so groß ausfallen als vorher.

Wird ein durch eigene Steifheit elastischer Stab um die Hälfte verkürzt, so wird zur Bewegung der Hälfte eine doppelt so große Kraft erforderlich seyn, da nicht nur allein die kleinsten Theilchen des Stabes auf der einen Saite sich auf eine nochmal so große Entfernung bewegen müssen, sondern da zugleich auf der andern concaven Saite des schwingenden Stabes diese kleinsten Theilchen noch einmal so stark zusammengepreßt werden. Beide Bewegungen durch Ausdehnung und Zusammendrückung, durch Repulsion und Attraction der Materie bedingt, fallen zusammen, und verdoppeln einander. Bei schwingenden Saiten wirkt auf ihre Schwingung nur eine Kraft, nämlich die Attraction, da keine Zusammendrückung statt findet, welche durch ihre Dauer der Attraction das Gleichgewicht halten könnte.

Ein noch einmal so dicker Stab giebt darum einen doppelt so hohen, eine noch einmal so dicke Saite von einem immer gleichen Gewichte gespannt, giebt einen

noch einmal so tiefen Ton. Ebenso steht der Ton einer gespannten Saite mit dem eines elastischen Stabes von gleicher Länge in einem geraden Verhältnisse, und der Stab muß die Saite um so viel an Dicke übertreffen, als seine Elasticität die der gespannten Saite übertrifft, und die erscheinenden Töne stehen dann im umgekehrten Verhältnisse zu der Elasticität der beiden Körper. Alle bis jetzt bekannten Schwingungen beruhen immer auf einem und dem nämlichen Grunde, und es ist sehr leicht möglich einen algebraischen Ausdruck für alle möglichen Schwingungen zu finden, wie ich an einem andern Orte darzuthun gesonnen bin.

Wenn wir die Saite unserer Aeolsharfe in dem Augenblicke denken, in welchem ein Windstoß sie trifft, und uns noch überdies die in ihrer ganzen Länge zugleich gestoßene Saite als ein Conflict sphärischer Körper vorstellen, so wird erstens der Stoß nicht nöthig haben von einem Punkte der Saite aus ihre ganze Länge, so lange vorwärts und rückwärts zu durchlaufen, bis immer ein gleich großer sogenannter Wellenberg einem gleich großen Wellenthale begegnet, sondern es wird eine sogenannte stehende Schwingung im Augenblicke des Stoßes erscheinen. Ueberhaupt verhalten sich der Windstoß und die Saite zu einander wie ein bewegter elastischer Körper zu einem unbeweglichen elastischen Hindernisse. Nach dem Stoße würden die anstoßenden Lufttheilchen nahe mit der Geschwindigkeit zurückgehen, mit welcher sie die Saite trafen; aber sie werden von den nachfolgenden Luftstößen verdrängt und gezwungen zu beiden Seiten der Saite auszuweichen, während im zweiten Zeittheilchen ein neuer Antheil Luft die Saite stößt, und die nämliche Wirkung wieder hervorbringen muß. Auf solche Weise übt der continuirliche Luftstrom eine Reihe von Stößen auf die Saite aus, welche dadurch, wie durch den leisen Bogenstrich in ihren Moleculartheilchen in Longitudinal-Schwingungen versetzt und zum Tönen gebracht wird;  
auf

auf keine Art dürfte es aber denkbar seyn, durch einen dauernden Luftstrom eine gespannte Saite in irgend eine dem Drucke entsprechende Krümmung zu versetzen, und sie darin auch nur einen Augenblick zu erhalten.

Versetzt man die Saite also in Transversal-Schwingungen, so werden durch, diese die eigentlich tongebenden longitudinalen Schwingungen hervorgerufen, und die Saite verstummt erst dann, wenn diese erregende Transversal-Schwingungen aufgehört haben zu wirken. Dafs aber der Ton einer schwingenden Saite nicht durch ihr schnelles Durchschneiden der Luft absolut entstehe, beweist schon der Umstand, dafs, wenn man eine gespannte Saite in einem beliebig weiten Bogen auszieht, und dann auf irgend ein Hinderniß ihrer Bewegung aufschnellen läfst, noch ehe sie ihre geradlinigte Lage erreicht hat, durchaus kein Ton oder etwas ähnliches zum Vorschein kömmt. Befindet sich hingegen das Hinderniß auch nur um ein Geringes jenseits der Längensaxe der Saite, versteht sich in der Bahn derselben, dafs sie also in dem Indifferenz-Punkte ungehindert angekommen ist, in welchem sie ruhen würde, wenn sie nicht durch die beschleunigte Bewegung in der ersten Hälfte ihrer Bahn eine neue Geschwindigkeit erhalten hätte, welche sie, wie bekannt, nöthigt, gleich einem Pendel, ihre Bewegung in gleichem Maafse auf der andern Seite ihres Ruhepunkts fortzusetzen; so erfolgt jederzeit sogleich der der Saitenlänge und Spannung entsprechende Ton, der also durchaus nur durch das Oscilliren der sich zusammenziehenden Saitentheilchen, wie schon bemerkt worden ist, entstehen kann. Diese Bewegung wiederholt sich bei einer schwingenden Saite so oft, als sie durch ihren Meridian geht, worauf sich also die Dauer ihres Tones gründet.

Wir haben oben das Entstehen der Töne durch die Oscillationen erklärt, in welche die Saite nach ihrer Längensaxe durch das plötzliche in sich selbst Zusammenziehen der in einem Bogen ausgedehnten schwingenden Saite

geräth. Wir wollen hier, um allen Mißverständnissen vorzubeugen, nur noch hinzusetzen, daß, so wie die Saite transversalschwingend eine einfach beschleunigte Bewegung erhält, eben so auch die Saitentheilchen bei ihrem longitudinalen Zusammenschnellen sich mit beschleunigter Bewegung so lange einander nähern, bis die Spannung der Saite ihnen das Gleichgewicht hält. Der Moment aber, in welchem beide Kräfte einander ausgleichen, bildet eine Größe, welche die der ursprünglichen Spannung nothwendig um etwas übertreffen muß. Sobald also die durch die beschleunigte Bewegung erzeugte Geschwindigkeit wieder  $=0$  geworden ist, kehrt auch die Saite wieder zu ihrem alten Grade der Spannung zurück, wodurch ein wechselseitiges Ausdehnen und Zusammenziehen der kleinsten Theilchen der Saite, und also unsere bekannte Längenschwingung entsteht. Auf diese Art geräth eine gespannte Saite in's Tönen, wenn sie plötzlich zu einem geringern Grade der Spannung nachgelassen wird, oder wenn man den kürzern Saitentheil zwischen dem Stege und dem Sattel niederdrückt und dann plötzlich losschnellen läßt, wodurch der längere Saitentheil auf gleiche Art zum Tönen gebracht wird, was auch jeder Stoß des Instruments auf eine harte Unterlage bewirkt, der mit der Längensaxe der Saite parallel läuft. Zum Schlusse will ich nur noch bemerken, daß man sich vielleicht von der eigentlichen Schwingung der Saite sehr einfach überzeugen könnte, wenn man einen Faden von beliebigem Durchmesser mit einer einfachen Schlinge um die Saite knüpft, und die beiden Enden des Fadens, etwa eine Linie breit von der Saite abschneidet. Die Schlinge darf jedoch nur so lose gezogen werden, daß sie sich ungehindert an der Saite auf und ab bewegen kann. Dreht man hierauf die beiden hervorstehenden Endchen des Fadens so, daß sie einander gegenüber stehen, sich jedoch unter einem nicht zu spitzigen Winkel gegen die Saite neigen, und versetzt die Saite auf eine beliebige Art in

Schwingung, so wird die Schlinge nach der Richtung der Fadenendchen in einer raschen drehenden Bewegung aufwärts oder abwärts laufen u. s. f. Ich glaube somit genug gesagt zu haben, daß Andere im Stande sind den interessanten Gegenstand durch weitere Versuche näher zu beleuchten oder zu berichtigen. Gegenwärtig habe ich diesen Gegenstand, so wie andere sich darauf beziehende akustische Erfahrungen, einem möglichst scharfen Calcul unterworfen, dessen Ergebnisse ich nach seiner Vollendung und Berichtigung später bekannt zu machen gesonnen bin.

---

VII. *Ueber das Gesetz der partiellen Polarisation des Lichts durch Reflexion;*

*von D. Brewster.*

(*Philosoph. Transactions, f. 1830, Pt. 1. p. 69.*)

---

Im Jahre 1815 theilte ich der K. Gesellschaft über die Polarisation des Lichts durch successive Reflexionen eine Reihe von Versuchen mit, welche den Keim zu denen enthält, deren Resultate ich gegenwärtig zu erläutern beabsichtige.

Aus diesen Versuchen ging hervor, daß ein gegebener Lichtbündel unter jedem Einfallswinkel vollständig polarisirt werden kann, sobald er nur eine hinlängliche Zahl von Reflexionen erleidet, gleichviel ob die Winkel sämtlich größer oder sämtlich kleiner, oder auch zum Theil größer und zum Theil kleiner als der Winkel des Polarisationsmaximums sind. Es war kaum möglich, sich der Folgerung zu enthalten, daß das Licht, welches bei der ersten Reflexion nicht polarisirt worden ist, bei jeder Einwirkung der reflectirenden Kräfte eine physische Veränderung erlitten habe, durch welche es dem Zustande