

**IX. Ueber die Töne rotirender Stimmgabeln.
Zweite Notiz von W. Beetz.**

(Der physikalisch-medicinischen Societät zu Erlangen mitgetheilt am
18. Februar 1867.)

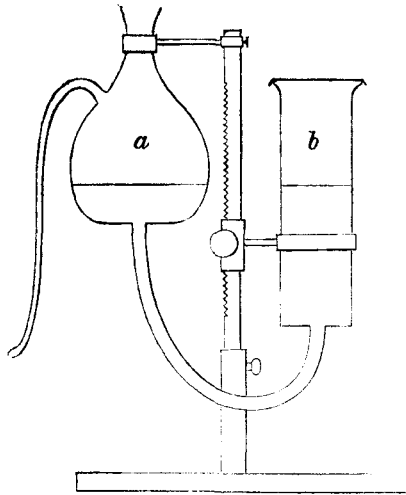
In meiner ersten Mittheilung über die Töne rotirender Stimmgabeln ¹⁾ habe ich den Gedanken, daß die beiden Schenkel derselben dem Ohre zwei verschiedene hohe Töne zusenden könnten, indem sich der eine dem Ohre nähert der andere sich von demselben entfernt, deshalb aufgegeben, weil die ganze Erscheinung Nichts mit der Schalleitung in der Luft zu thun habe, sondern auch bei verstopften Ohren durch die festen Theile des Kopfes gehört werden könne. Ich wandte deshalb meine Aufmerksamkeit auf diese Erscheinung als auf eine vollkommen objective und erklärte sie als eine andere Gestalt des Foucault'schen Pendelversuchs. In der Sitzung der physikalisch-medicinischen Societät vom 12 November v. J. hatte ich schon die Bemerkung ausgesprochen: zuweilen hört man auch deutlich tiefere Töne, welche aber nicht, wie die höheren, objectiver Natur zu seyn scheinen. In weiterer Verfolgung dieser letzten Beobachtung, welche ich durch nichts Anderes als durch eine Tonveränderung bei der Fortpflanzung der Welle durch die Luft zu erklären wufste, wurde es mir unwahrscheinlich, daß zwei ganz verschiedene Gründe zur Veränderung des Gabeltones gleichzeitig vorhanden seyn sollten, und ich wiederholte deshalb alle meine früheren Versuche. Der Grundversuch, auf den ich meine Ansicht von der Constanz der Schwingungsebene in der Stimmgabel gestützt hatte, war der, daß ein Stahlstab mit rechteckigem Durchschnitte, welcher mit freien Enden in der Richtung der einen Seite des Rechtecks schwingt, seinen Ton plötzlich in den verwandelt, welcher der Stabdicke im Sinne der anderen Rechtecksseite entspricht, wenn man den Stab um

1) Diese Ann. Bd. CXXIX, S. 490.

90° dreht, dafs aber der Ton unverändert bleibt, wenn man den Stab ruhen läfst, und das Ohr um ihn herumführt. Bei diesem Versuche bin ich einer Täuschung unterlegen. Der Stab wurde an einem seiner Knoten von einem Faden getragen, während ich einen anderen Knoten zwischen den Fingern hielt. Drehte ich nun den Stab, so entstand der zweite Ton durch Reibung am Faden. Es wurde deshalb nicht gehört, wenn statt des Stabes das Ohr bewegt wurde. Wenn ich den Stab nur zwischen den Fingern fixire und frei hangend durch Streichen (besser als durch Anschlagen) zum Tönen bringe, so bleibt der ursprüngliche Ton auch beim Drehen unverändert. Mit dem Wegfall dieses Versuchs ist aber meine Theorie von der Constanz der Schwingungsebene der Boden entzogen, da sich alles Andere auch anderen Erklärungsweisen anpafst. Ich darf deshalb auch in Bezug auf die Figuren, welche die rotirenden Stäbe des Kaleidophons zeigen, diese Constanz gar nicht in Betracht ziehen. Die von mir beschriebenen Figuren 1, 2 und 3 erklärten sich ohnehin ohne dieselbe, und Fig. 4 dürfte sich auf kleine Excentricitäten, welche sich während der Rotation stark vermehren, zurückführen lassen.

Ehe ich nun auf die von mir behauptete Objectivität der Tonerhöhung näher eingehe, will ich die Resultate meiner weiteren Versuche über die Töne der rotirenden Stimmgabeln mittheilen.

Um die vielen Töne, welche gleichzeitig von einer rotirenden Gabel ausgehen, unterscheiden zu können, mufste man für eine jede Gabel eine grofse Reihe von Resonatoren haben, alle um kleine Tonintervalle von einander gestimmt. Ich ersetze dieselben durch einen verstimmbaren Resonator. Er besteht aus einem weitbauchigen Glasgefäfs (Kochflasche) *a* und einem Cylinderglase *b*. (Siehe umstehende Figur). Das Gefäfs *a* ist an einem Stative befestigt, *b* kann an demselben durch Rad und Zahnstange auf und abbewegt werden. Eine zweite Verstellung erlaubt das gemeinschaftliche Heben und Senken des ganzen Stativs. Die Böden beider Gefäfs sind durchbohrt, und die beiden Enden



eines Kautschukschlauchs sind in beide Oeffnungen eingekittet. Gießt man nun Wasser oder Olivenöl in die beiden Gefäße, so kann man den eigenen Ton der Luftmasse in *a* innerhalb weiter Gränzen höher oder tiefer stimmen, wenn man das Gefäß *b* auf- oder abwärts bewegt. Man könnte auch die Stellung des Schlittens, welcher *b* trägt, am Stativ unmittelbar für Messung der Tonhöhe in *a* gebrauchen. In die Seitenwand von *a* ist noch ein Loch gebohrt, in welches das Ende eines zweiten Kautschukschlauches eingekittet ist, dessen freies Ende der Beobachter in sein Ohr einführt. Hält man über die Resonatoröffnung einen tönenden Körper, während beide nicht ganz *unisono* gestimmt sind, so hört man den Ton zwar deutlich, verschiebt man aber das Gefäß *b*, bis der Einklang hergestellt ist, so schwillt der Ton mächtig an, verliert sich aber wieder, wenn die Verstimmung nach der anderen Richtung eintritt. Erklingen mehrere Töne gleichzeitig über den Resonator, so hört man einen jeden kräftig heraus, wenn der Resonator auf ihn eingestimmt ist, selbst wenn seine Intensität nur eine sehr geringe ist. Durch diesen Apparat konnte ich nun deutlich aus dem Tongewirr die darin enthaltenen Töne isoliren.

Die Gabeln wurden meistens um die Axe ihres Stieles, wie früher, gedreht. Sie waren in die Drehbank oder in eine Sauerwald'sche Rotationsmaschine eingeschraubt, wurden durch Streichen zum Tönen gebracht, und dann in möglichst gleichmäßige Drehungen versetzt, deren Zahl durch gleichzeitige Beobachtung eines Secundenpendels festgestellt wurde. Auf diese Art sind die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Versuche 1 bis 9 und 11 ausgeführt. Der Resonator wurde so dicht wie möglich unter das Ende der Gabel gestellt, zuerst in den Einklang mit ihr gestimmt, und dann während der Drehung allmählich nach oben und nach unten verstimmt. Man hört bei jeder Drehungsgeschwindigkeit alle höheren und tieferen Töne bis zu bestimmten Grenzen. Ueberschreitet man diese, so klingt der eigene Ton des Resonators nicht mehr mit. Die Spalten »Erniedrigung und Erhöhung« enthalten die jedesmal beobachteten Gränztöne mit Namen und schätzungsweise Angabe ihres Intervalls gegen den Grundton. In der Spalte »Intervall, gefunden,« ist das ganze Intervall zwischen beiden Gränzen angegeben. Die Spalte »Durchmesser« giebt den grössten Durchmesser der Gabelbahn an ihrer Spitze an, d. h. den Abstand der beiden äusseren Schenkelflächen von einander. Aus diesem Durchmesser und der Zahl der »Umdrehungen« ist dann die »Geschwindigkeit« in Metern ausgedrückt, berechnet, mit welcher sich die Theilchen auf der äusseren Gabeloberfläche in ihrer Bahn bewegen.

Bei den Versuchen 10 und 12 waren die Gabeln anders befestigt. Die c_2 Gabel im Versuch 12 stand senkrecht gegen die Rotationsaxe, drehte sich also in einer Kreisebene, auf der die Rotationsaxe im Centrum senkrecht steht. Der Abstand der Gabelspitze vom Centrum betrug 205 Millimeter. Die a_1 Gabel im Versuch 10 war auf eine Kreisscheibe senkrecht zu derselben in einer Entfernung von 60 Millimetern vom Centrum befestigt, und diese Scheibe so auf die Drehbank gesteckt, dass die Drehaxe auf ihr im Centrum senkrecht stand. Die Gabel bewegte

sich also in einer Cylinderfläche um die Drehaxe. Bei beiden Versuchen war es ganz gleichgültig, welche Richtung die Schwingungsebene einnahm. Diese beiden Versuche unterscheiden sich von den früheren dadurch, daß die Gabel während jeder Umdrehung nur einmal am Resonator vorübergeht. Man hört dennoch das Mitklingen in diesem Moment ganz gut, aber bei gröfseren Geschwindigkeiten, wie z. B. im Versuch 12, läuft man Gefahr, daß der durch die Rotation erzeugte Luftstrom den Resonator selbst anbläst. Man muß denselben etwas entfernen und sich überzeugen, daß er gar nicht tönt, wenn die Gabel ohne zu tönen an ihm vorbeigeht. Freilich erwächst hieraus ein Nachtheil, der nachher erwähnt werden soll. Noch gröfsere Geschwindigkeiten anzuwenden wurde mir deshalb ganz unmöglich. Ich hatte die a_1 Gabel wie im Versuch 10 mit einem Bahnradius von 250 Millimeter rotiren lassen. Dabei entstand aber schon bei 5 Umdrehungen ein solches Pfeifen, und wurde der Resonator soweit hin angeblasen, daß ein brauchbares Resultat nicht zu erzielen war.

No.	Gabel	Umdrehungen	Durchmesser	Geschwindigkeit	Erniedrigung	Erhöhung	Intervall	
							gefunden	berechnet
1	a_1	6,5	12 ^{mm}	0,245	$as_1 + = 1,03$	$b = 1,05$	1,08	1,0014
2	c_1	6,5	19	0,388	$h - c_1 = 1,03$	$d_1 - = 1,10$	1,13	1,0023
3	a_1	13	12	0,490	$as_1 - = 1,05$	$h_1 = 1,12$	1,19	1,0029
4	c_2	6,5	29	0,591	$h_1 = 1,05$	$d_2 = 1,12$	1,18	1,0035
5	a_1	19,5	12	0,735	$g_1 = 1,12$	$h_1 - c_2 = 1,15$	1,29	1,0044
6	c_1	13	19	0,775	$b - h = 1,09$	$es_1 = 1,19$	1,30	1,0046
7	c_1	19,5	19	1,163	$a = 1,19$	$f_1 = 1,33$	1,58	1,0069
8	c_2	13	29	1,183	$b_1 = 1,12$	$es_2 + = 1,23$	1,38	1,0070
9	c_2	19,5	29	1,774	$a_1 = 1,19$	$f_2 = 1,33$	1,58	1,0105
10	a_1	6	120	2,261	$c_1 = 1,33$	$c_2 = 1,50$	2,00	1,0134
11	as	12	63	2,374	$es = 1,33$	$es_1 = 1,50$	2,00	1,0141
12	c_1	5	410	6,437	$as_1 - = 1,26$	$g_2 + = 1,53$	1,93	1,0386

Qualitativ passen die erhaltenen Resultate ganz und gar auf das Doppler'sche Princip¹⁾, nach welchem die Tonhöhe eines Wellenzuges erhöht wird, wenn die Tonquelle sich nähert, vertieft, wenn sie sich entfernt. Die Resonatoröffnung (oder an deren Stelle das Ohr) treffen aber Wellenzüge, deren Tonquelle sich mit sehr verschiedener Geschwindigkeit nähert oder entfernt. Der der Oeffnung diametral gegenüberstehende Punkt, der Gabelbahn, nähert oder entfernt sich relativ gar nicht; die Punkte der einen Bahnhälfte nähern sich mit wachsender Geschwindigkeit, die der anderen Bahnhälfte entfernen sich mit abnehmender Geschwindigkeit. Die Punkte, welche gerade an der Oeffnung vorübergehen, nähern und entfernen sich mit dem Maximum der Geschwindigkeit, nämlich mit derjenigen, welche in der Tabelle in der Spalte »Geschwindigkeit« aufgeführt ist. Einer jeden Stellung der Tonquelle kommt also eine andere Tonveränderung zu, und mit allen tönt der verstimmte Resonator mit, bis zu der höchsten Gränze, welche der größten Näherungs-, und der tiefsten, welche der größten Entfernungsgeschwindigkeit entspricht. Um die Tonverschiebungen recht klar zu hören, ist eine sehr vollkommene Centrirung der Gabeln erforderlich, weil sich sonst beide Schenkel mit verschiedener Geschwindigkeit am Resonator vorüberbewegen. Auch muß die Gabel den Resonatorrand fast berühren, weil sich sonst der Wellenzug der Oeffnung gar nicht mit der vollen Rotationsgeschwindigkeit nähert, die Tongränzen also viel zu eng ausfallen. Dies ist der oben erwähnte Nachtheil, welcher aus der Entfernung des Resonators erwächst, und den Versuch 12 zur Beurtheilung der GröÙe der Tonverschiebung unbrauchbar macht.

Was nun diese GröÙe betrifft, so zeigt die Tabelle im Allgemeinen, daÙ Erhöhung und Erniedrigung mit der Geschwindigkeit zunehmen, wie es die Doppler'sche Theorie verlangt. Die Intervalle erscheinen aber bei ungefähr gleicher Geschwindigkeit größer, wenn der Bahndurchmesser

1) Dove, Repertorium VIII, Akustik, S. 86.*

kleiner war, also bei der a_1 Gabel gröfser, als bei der c_1 Gabel, und bei dieser gröfser, als bei der c_2 Gabel. Dies erklärt sich gut, wenn man bedenkt, dafs bei kleinem Bahndurchmesser viel mehr Theile der Bahnstrecke, welche sich beinahe mit dem Geschwindigkeitsmaximum nähern oder entfernen, auf den Resonator einwirken, als bei gröfserem. Die Luft im Resonator wird also stärker angeregt, und man hört noch Tonveränderungen, welche bei geringerer Schallstärke dem Ohre entgehen. Die Versuche 10 und 11 geben, wiewohl ganz verschieden angestellt, bei fast gleicher Geschwindigkeit auch gleiche Intervalle. Bei dem oben erwähnten, in die Tabelle nicht aufgenommenen Versuch, bei welchem die a_1 Gabel mit einem Radius von 250 Millimetern bewegt werde, konnte ich mit blofsem Ohre oder durch einen Schlauch nur geringe Tonveränderungen entdecken. Freilich war auch die Tonstärke nur sehr gering.

Vergleichen wir nun die beobachteten Intervalle mit mit denen, welche die Rechnung verlangt. Nach der Döppler'schen, oder vielmehr nach der an ihrer Stelle von Mach ¹⁾ benutzten Formel ist die scheinbare Schwingungsdauer

$$\tau' = \tau \frac{\gamma \mp k}{\gamma},$$

wo γ die Geschwindigkeit des Wellenzuges, k die der Tonquelle, und τ die wahre Schwingungsdauer des Tones darstellt. Für γ ist der Werth 340 Meter angenommen worden. Das gesammte Tonintervall zwischen den äufsersten Gränzen ist dann durch

$$\frac{\gamma + k}{\gamma - k}$$

ausgedrückt. Die Werthe sind in der letzten Spalte der Tabelle «Intervall, berechnet» aufgeführt. Man sieht, dafs sich dieselben den Beobachtungen auch nicht im Entferntesten anpassen. Erst bei Versuch 11 sollte das Gesamtintervall etwa ein Comma seyn, es wurde aber eine Octave beobachtet. Bei der geringsten Drehungsgeschwindigkeit,

1) Diese Ann. Bd. CXII, S. 60.*

welche angewandt wurde, ist das Intervall schon 1,08, d. h. so groß, wie es nach der Formel erst bei einer Geschwindigkeit von 13 Metern seyn sollte.

Die Versuche, welche früher zur Bildung des von Doppler aufgestellten Principis angestellt worden sind, haben sich demselben weit besser angeschlossen. Beobachtungen in der Gestalt, wie sie von Buys-Ballot¹⁾ und von Scott Russell²⁾ angestellt worden sind, sind offenbar die reinsten, da sich Tonquelle und Beobachter nur in gerader Linie einander nähern oder von einander entfernen. Wenn sie aber, trotz vielfacher Abweichungen unter einander, sich nur annähernd der Theorie anpassen, so scheint darin eine große Bestätigung derselben zu liegen. Der Versuch von Mach,³⁾ bei welchem eine Pfeife mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 Metern im Kreise herumgeschwungen, eine Tondifferenz von ungefähr einer Secunde gab, hat mehr Aehnlichkeit mit den von mir angestellten Versuchen: im Resultat aber differirt er ungeheuer von demselben. Bei den ungünstigen Ergebnissen, welche mir die größeren Rotationsgeschwindigkeiten geliefert haben, kann ich es gar nicht unternehmen, diesen Versuch nach meiner Methode zu wiederholen; der Resonator würde gewaltsam angeblasen werden.

Ein Vergleich meiner Beobachtungsergebnisse mit der Formel zeigt noch eine eigenthümliche Abweichung. Es muß nämlich das Intervall, welches die Erhöhung ausdrückt, $\frac{\gamma + k}{\gamma}$, immer etwas kleiner ausfallen als das Intervall der Erniedrigung, $\frac{\gamma}{\gamma - k}$. In meinen Versuchen ist es stets umgekehrt: die Erhöhung betrug immer mehr als die Erniedrigung. Ich kann nicht glauben, daß die geringere Intensität des tieferen Tones allein hinreicht, um diesen Unterschied zu begründen.

1) Diese Ann. Bd. LXVI, S. 321; Repertorium VIII. Akustik S. 87. *

2) Institut No. 768; Fortschr. d. Physik 1848, S. 127. *

3) Diese Ann. Bd. CXII, S. 65. *

Poggendorff's Annal. Bd. CXXX.

Nach den Ergebnissen der vorstehenden Untersuchungen trägt das Doppler'sche Gesetz entweder dem Einflusse der Bewegung der Tonquelle auf die Tonhöhe noch nicht vollständig Rechnung, oder bei den durch Rotation erfolgten Bewegungen tritt noch eine andere Veränderung der Welle hinzu, welche noch nicht bekannt ist. Ich bin indeß jetzt schon überzeugt, daß nicht die Rotation die großen Tonintervalle bedingt. Stimmt man z. B. den Resonator auf h_1 und hält eine c_2 Gabel ruhig darüber, so hört man deutlich c_2 klingen. Man braucht aber die Gabel nur mit mäßiger Geschwindigkeit über die Resonatoröffnung parallel mit sich hinwegzuführen, um den Ton h_1 zu hören. Das Entsprechende geschieht, wenn der Resonator auf cis_2 oder gar auf d_2 gestimmt wird.

Ich komme schließlich zur Betrachtung der Vorgänge, welche man durch eine feste Leitung hindurch beobachtet. Um zu prüfen, ob etwa die ganze Wahrnehmung, welche mich veranlaßte, die Tonveränderung als objectiv zu betrachten, auf einer Täuschung beruht habe, schraubte ich das eine Ende einer 6 Meter langen, der ganzen Länge nach mit Baumwolle umhüllten eisernen Stange fest an den Axenträger der Drehbank, welche die Gabel hielt, verstopfte beide Ohren und nahm das andere Ende der Stange, welches sich in einem benachbarten Zimmer befand, zwischen die Zähne. Wurde nun die Gabel gestrichen und gedreht, so hörte ich, ohne die Stange in den Mund zu nehmen, gar nichts. Bifs ich aber auf dieselbe, so hörte ich die früher beschriebenen Stöße und eine Tonerhöhung; bei einer Gabel, der as Gabel, gleichzeitig eine Erniedrigung. Dasselbe war zu hören, wenn das freie Stabende auf einen Resonanzkasten gedrückt wurde. Auf die Natur der Stöße wurde ich aufmerksam, als ich eine Stimmgabel in einer anderen Stellung als der früher beschriebenen rotiren liefs. Herr Kiefling in Berlin hatte mir brieflich mitgetheilt, er höre die Tonerhöhung deutlich durch einen Kautschukschlauch, wenn er denselben excentrisch gegen eine Gabel richte, welche in ihrer eigenen Schwingungsebene

rotire, so daß die Rotationsaxe etwa durch die Mitte der Gabellänge geht, nicht aber, wenn er den Schlauch gerade vor dem Drehungsmittelpunkt münden lasse. Als ich diesen Versuch, den ich vollkommen bestätigt fand, an der Drehbank wiederholte, bemerkte ich, daß die Stöße bei bestimmten Stellungen der Gabeln eintraten, nämlich bei den beiden lothrechten. Ebenso zeigten alle übrige Gabeln diese Stöße in bestimmten Stellungen: die um ihre eigene Axe in der Drehbank rotirenden, wenn die beiden Schenkel lothrecht übereinander standen, die auf der verticalen Axe der Rotationsmaschine rotirenden, wenn beide Schenkel in der Längsrichtung des die Axe tragenden Brettes standen. Bei der geringsten Unsymmetrie beider Gabelhälften wird die Axe in den beiden Richtungen der Schwingungen gegen ihr Lager gedrückt. Geschieht dieser Druck in der Richtung der besten Leitung, so wird er als Stoß gehört. Die Erscheinung beruht aber auf einer verschiedenartigen Leitung in den sich berührenden festen Leitern und gehört in die Klasse der Klirrtöne. Sie ist wohl zu unterscheiden von der Weber'schen Interferenzerscheinung, welche man mit dem Resonator sehr stark hört. Die Tonveränderung ist aber gewiß ebenso zu erklären, wie die mit dem Resonator beobachtete. Es treffen Wellenzüge von verschiedener Geschwindigkeit durch die Luft auf die festen Theile der Rotationsmaschine und bringen dieselben zum Mitschwingen. Da diese nahezu parallel der Rotationsaxe laufenden Züge keine große Geschwindigkeitsdifferenz haben können, so ist das Intervall, das sie veranlassen, weit kleiner als das an den unmittelbar unter der Gabel stehenden Resonatoren beobachtete. Auch konnte ich die Tonerniedrigung gar nicht beobachten, bis ich die *as* Gabel anwandte, deren Schenkel so weit auseinander stehen, daß auch hier die Geschwindigkeit der Wellenzüge merklich differirt. Danach hätte die durch die feste Leitung wahrgenommene Erscheinung ihr akustisches Interesse verloren.

Erlangen, im Februar 1867.