

**6. Über den Einfluß der Länge des Windrohrs auf die Tonstärke und Tonhöhe einer Zungenpfeife;
von J. Rich. Ewald.**

(Aus dem physiologischen Institut der Universität Straßburg.)

Die Zunge der Pfeife bestand aus Messing und war 12,5 mm lang und 1,5 mm breit. Sie wurde aus einem Gebläse von mehr als $\frac{1}{2}$ Kubikmeter Inhalt unter 65 mm Wasserdruck angeblasen, und machte 680,0 Schwingungen. Da $c' = 344,2$, ergab sich $l = 50,6$ cm. Damit stimmte gut überein, daß in einer 1,5 m langen Glasröhre, deren Lumen einen Durchmesser von 11 mm hatte, der Abstand zwischen den Lykopodiumknoten 1 und 4 bei gleicher Zimmertemperatur 76,1 cm betrug.

Die Pfeife befand sich in einem Messingrohr, natürlich mit einschlagend gestellter Zunge (vgl. Fig. 1).

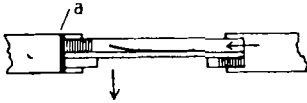


Fig. 1.

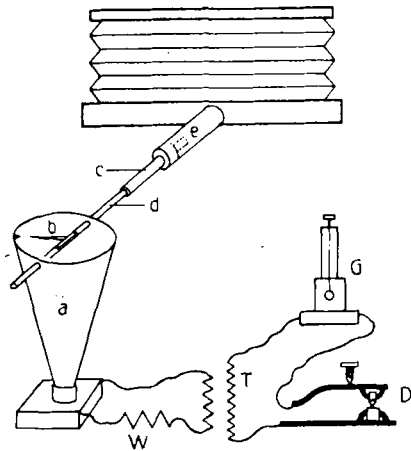


Fig. 2.

Die eine Seite dieses Messingrohrs bildete das Windrohr (d der Fig. 2), die andere Seite diente nur zur Befestigung der Pfeife und war unmittelbar an derselben (bei a der Fig. 1) verschlossen. Das Messingrohr ging durch die Wände eines auf ein sogenanntes Stentor-Telephon (Mixt und Genest) aufgesetzten Schalltrichters (a der Fig. 2). Ein Zeiger b an der Pfeife gestattete dafür sorgen zu können, daß die Pfeife immer die gleiche Lage dem Schalltrichter gegenüber beibehielt.

Das Windrohr bestand aus zwei ineinander gesteckten Messingröhren. Die äußere *c* hatte außen 11 mm Durchmesser; die engere *d* 10 mm innen. Um die Einstellung der Länge des Windrohrs beim Hinein- und Hinausschieben der inneren Röhre zu erleichtern, war diese in Zentimeter eingeteilt. Von solchen ineinanderschiebbaren Messingröhren standen acht Paare zur Verfügung, die einen Bereich von 5,5—597 cm umfaßten. Das Gebläse lieferte einen sehr konstanten Luftstrom; aber der Blasebalg konnte leider nicht ganz direkt mit dem Windrohr in Verbindung gebracht werden; zwischen beiden befand sich noch ein weites Rohr *e* von 67 mm Lumen und 65 cm Länge. In diesem letzteren endete aber das Windrohr ganz frei, und ich überzeugte mich davon, daß dies weite Rohr keinen wesentlichen Einfluß auf das Ansprechen und die Tonhöhe der Pfeife hatte, also nicht etwa wie eine Verlängerung des Windrohrs wirkte.

Durch Vergleichung mit einem Tonvariator wurde bei jedem Versuch die Tonhöhe der Pfeife bestimmt.

Die Intensität des Tons wurde in folgender Weise gemessen. Die durch die Pfeife erzeugten Telefonströme, die durch einen eingeschalteten Widerstand *W* passend abgeschwächt werden konnten, gingen durch einen Transformator *T*. Hierdurch auf höhere Spannung umgeformt, wurden sie einem Kristalldetektor *D* (Perikondetektor¹⁾; vgl. J. Zenneck, Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie, 2. Aufl.) und einem Drehspulgalvanometer *G* zugeleitet.

Mit einer lauten Orgelpfeife, die in verschiedener Entfernung von dem Telephon angeblasen wurde, ließ sich feststellen, daß innerhalb der in Frage kommenden Grenzen die Schallstärken den Galvanometeraus schlägen einigermaßen proportional waren. Es brauchte auf genauere Proportionalität oder auf eine bessere Kenntnis der Abhängigkeit der Galvanometeraus schläge von den Schallstärken kein Wert gelegt zu werden, da nur gezeigt werden sollte, daß die Pfeife desto leiser tönt, je mehr ihre Tonhöhe infolge ungünstiger Länge des Windrohrs herabgesetzt wird.

Wenn wir nun, mit unserem sehr langen Windrohr (600 cm)

1) Nachdem sich eine Rayleighsche Scheibe für die vorliegenden Versuche nicht bewährt hatte, machte mich Herr Prof. Gildemeister auf obigen Detektor aufmerksam.

beginnend, dieses von Zentimeter zu Zentimeter verkürzten, so veränderte sich das Verhalten der Pfeife immer in gleicher Weise in Perioden von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge. Jede dieser Perioden besteht aus zwei ziemlich gleichlangen Strecken des Windrohrs (also von etwa $\frac{1}{4}$ Wellenlänge), die sich zunächst dadurch unterscheiden, daß die Pfeife innerhalb der einen Strecke überhaupt nicht anspricht. Teilen wir also das ganze Windrohr in $\frac{1}{4}$ -Wellenstrecken¹⁾, indem wir an der Pfeife, und zwar an der Stelle, wo die Schwingungen der Zunge die größten Amplituden haben (freies, dem Windrohr abgewendetes Ende der Zunge), beginnen und indem wir auch von hier anfangen die Strecken zu zählen, so versagt die Pfeife innerhalb aller geradzahligen Strecken, also innerhalb des 2., 4., 6. ... Wellenviertels (vgl. Fig. 3). Innerhalb der ungeraden Wellen-

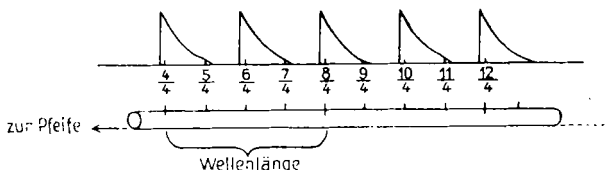


Fig. 3.

viertel tönt die Pfeife, fängt aber, wenn man das Windrohr allmählich verkürzt, nur mit schwacher Intensität an, tönt dann bei weiterer Verkürzung des Windrohrs immer stärker, bis sie am Ende der betreffenden Viertelwellenstrecke das Maximum der Intensität erreicht. Dies Maximum besteht aber nur für eine sehr kurze Strecke, denn bei nur ganz geringer noch weiterer Verkürzung des Windrohrs versagt die Pfeife ganz plötzlich. Will man also eine Zungenpfeife möglichst laut tönen lassen, so muß das Windrohr eine Länge haben, welche einer geraden Zahl von Viertelwellen, also einer beliebigen Zahl von halben Wellen entspricht. Dies ist leicht der schematischen Fig. 3 zu entnehmen, bei der oberhalb des Windrohres die Kurven der Tonstärken angegeben sind.

1) Diese Strecken fallen nicht genau mit den stehenden Schallwellen im Windrohr zusammen. Es folgen sich vielmehr in mittleren Längen desselben, von der Pfeife aus gerechnet: Punkt des Ansprechens der Pfeife, Teilpunkt $n/2$ und Mittelpunkt des Bauches der stehenden Schallwelle.

Wenn bei der allmählichen Verkürzung des Windrohrs die Pfeife zu tönen beginnt, weicht ihre Schwingungszahl recht bedeutend von der Zahl ihrer Eigenschwingungen ab. Die Tonhöhe steigt dann mit dem Wachsen der Intensität allmählich an und erreicht erst in der Nachbarschaft des Intensitätsmaximums ihre normale (maximale) Größe.¹⁾

Die Beeinflussung der Tonhöhe der Pfeife durch die Länge des Windrohrs besteht also immer nur in einer Vertiefung, nie in einer Erhöhung des normalen Tons. Die Erniedrigung der Schwingungszahl ist aber so bedeutend, daß es auf die Länge des Windrohrs sehr wesentlich ankommt. Bei unserer Pfeife sank der Ton von 680 auf 640 herab, also um mehr als einen Halbton.

Wir geben als Beispiel die in der Strecke 98—143 cm Windrohrlänge (9—11 Viertelwellenlänge) gefundenen Werte.

Länge des Windrohrs	Tonstärke der Pfeife ²⁾	Zahl der Schwingungen
98 cm	0	0
99	46	680
100	42	680
101	37	680
101,2 Ende der 8. Viertelwellenlänge		
102	32,5	680
103	30	680
104	28	678
105	24,5	677,5
106	20,5	676
107	18	674
108	14,5	671
109	11	670
110	8,5	668
111	7	665
112	6	661
113	4,5	657
113,8 Ende der 9. Viertelwellenlänge		
114	4	652
115	3	647

1) Als normale Tonhöhe wird hier die Schwingungszahl bezeichnet, die die Pfeife ausführt, wenn sie ohne Wind- und Ansatzrohr, aber bei gleicher Windstärke angeblasen wird.

2) Galvanometerausschläge.

Länge des Windrohrs	Tonstärke der Pfeife	Zahl der Schwingungen
116	1	640
117—123	0	0
124	42	680
125	37	680
126	33	680
126,5	Ende der 10. Viertelwellenlänge	
127	30,5	680
128	28	680
129	25	679
130	22	678
131	20	675
132	17	674
133	14,5	672,5
134	12	670
135	9	667
136	8	665
137	6,5	661
138	5	657,5
139	4	655
139,1	Ende der 11. Viertelwellenlänge	
140	2,5	650
141	2	647
142	1	640
143	0	0

Die Viertelwellenstrecken werden nicht ganz genau von der Pfeife eingehalten. Vielmehr geht der Bereich, innerhalb dessen die Pfeife anspricht, beiderseits etwas über die Grenzen der ungeraden Viertelwellenstrecken hinaus. Dies ist besonders auffallend an der der Pfeife näher gelegenen Grenze der betreffenden Windrohrstrecke, also dort, wo die Pfeife plötzlich versagt, da die stehenden Schallwellen im Windrohr rückwärts gegen unsere Teilstrecken verschoben sind (vgl. Anm. p. 1211).

Zu der obigen Tabelle ist noch zu bemerken, daß die Zahlen in umgekehrter Reihenfolge, als hier angegeben ist, gewonnen wurden, d. h. es wurde stets mit dem längeren Windrohr angefangen und dies dann allmählich verkürzt. Wenn man zur Kontrolle wieder rückwärts ging, also das Windrohr wieder verlängerte, so stimmten die Zahlen gut mit den vorher gewonnenen überein, nur trat gewöhnlich das plötzliche und

starke Ansprechen der Pfeife erst bei einer etwas größeren Länge des Windrohrs ein. Oder mit anderen Worten: Bei allmählicher Verkürzung des Windrohrs tönt die Pfeife noch bei Längen weiter, bei denen sie bei Verlängerung des Windrohrs noch nicht zu schwingen beginnt. Diese Differenz kann 1—2 cm betragen.

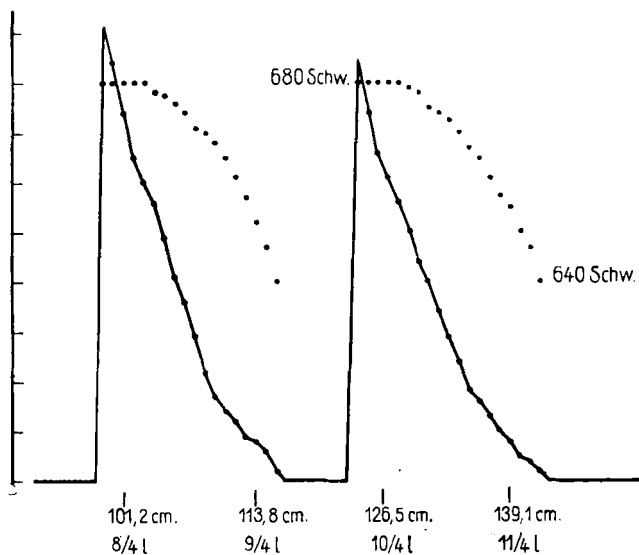


Fig. 4.

Die oben gegebene Tabelle ist in Fig. 4 in der Weise graphisch dargestellt; daß die Abszissenachse der Länge des Windrohrs entspricht. Die Viertelwellenlängen sind darunter besonders vermerkt. Die Ordinaten der ausgezogenen Kurve entsprechen den Tonstärken in Galvanometerausschlägen, die Ordinaten der punktierten Kurve den Tonhöhen. Für letztere Ordinaten bedeutet $\frac{2}{3}$ Millimeter 1 Schwingung, und die Abszissenachse oder die Ordinate 0 entspricht einer Tonhöhe von 600 Schwingungen.

Die Pfeife wurde innerhalb der ersten 48 Viertelwellenlängen untersucht. Bei kurzen Windrohlängen erfolgte das plötzliche Versagen der Pfeife bei etwas längeren Windrohlängen, daher fast genau bei $n \frac{1}{2}$.

Schlussfolgerungen.

In dem Windrohr bilden sich, wie man das leicht durch Staubfiguren zeigen kann, stehende Wellen aus. Die Knoten derselben haben Abstände voneinander, die einer halben Wellenlänge entsprechen. Am Ende des Windrohrs muß sich, damit die Pfeife gut anspricht, etwa die Mitte eines Schwingungsbauches befinden. Das ist alles leicht erklärlich. Aber weshalb versagt die Pfeife so plötzlich, wenn das Windrohr etwas kürzer als $n l/2$ wird, da sie doch nur allmählich an Intensität und Tonhöhe verliert, wenn man das Windrohr länger als $n l/2$ macht? Weshalb liegen die Schwingungsbedingungen nicht symmetrisch zum Optimum?

Ich sehe die Erklärung in der Theorie, die ich für das Zustandekommen der Schwingungen der Zungenpfeifen gegeben habe¹⁾, und sehe auch zugleich in der oben beschriebenen Wirkung des Windrohrs eine Bestätigung meiner Theorie. Letztere lautet etwa: Vorschwing und Rückschwing einer einschlagend-durchschlagend gestellten Zungenpfeife würden durch den Luftstrom in gleicher Weise angetrieben und gehemmt werden, und es würde daher ein dauernder Schwingungszustand unmöglich sein, wenn nicht noch ein besonderer Umstand einen Antrieb erzeugte, der nicht durch eine entsprechende Hemmung kompensiert wird. Dieser einseitige Antrieb kommt dadurch zustande, daß in dem Moment, wenn die Zunge bei ihrem Vorschwunge die Röhrenöffnung verschließt, eine antreibende positive Stoßwelle (pneumatischer Widder) entsteht.

Diese Stoßwelle gibt uns auch die Erklärung für das vorliegende Problem. Sie pflanzt sich als positive Welle durch das Windrohr fort, wird aber dann am offenen Ende desselben als negative Welle reflektiert. Wie sich experimentell feststellen läßt, steigt die Kurve dieser Stoßwelle sehr steil an, fällt aber weniger steil ab. Wo sich die positiven und die negativen Wellen begegnen, superponieren sie sich und heben sich einander auf. Wir wollen diese Punkte, von denen also die beiden Wellen stets gleichweit entfernt sind, ihre Treffpunkte nennen; sie entsprechen den Knotenpunkten stehender Wellen, liegen aber nicht genau an den gleichen Stellen des

1) J. Rich. Ewald, Die Physiologie des Kehlkopfes usw. im Handb. d. Laryngologie, herausg. von Heymann, Bd. 1. p. 176. Wien 1898.

Windrohrs, wo sich die Mitten der Bäuche der stehenden Schallwellen befinden.

Es kommt nun ganz darauf an, wo sich der erste Treffpunkt der Stoßwellen befindet. Liegt er dort, wo sonst die positive Stoßwelle die Zunge antreibt, so kann der Stoß nicht mehr dauernd zur Wirkung kommen, da ja die reflektierten negativen Stoßwellen die positiven nicht zustande kommen lassen, und es fehlt dann der Pfeife der wesentliche Antrieb. Dieser fehlt auch, wenn das Windrohr kürzer als $nl/2$ ist. In diesem Falle erreicht nämlich die reflektierte negative Stoßwelle mit ihrem steilen Anfangsteil die Zunge vor dem Zeitpunkt, in dem die positive Stoßwelle entstehen würde und hindert eine genügende Ausbildung derselben.

Ist dagegen das Windrohr länger als $nl/2$, so treibt der Anfangsteil der positiven Stoßwelle die Zunge an und die etwas später anlangende negative Stoßwelle wird durch den Teil der positiven Welle, den sie an der betreffenden Stelle noch trifft, wesentlich abgeschwächt.

Es wird also durch diese Theorie die Tatsache verständlich, daß bei gewissen Längen des Windrohrs (die etwas kleiner als $nl/2$ sind) eine geringe Verkürzung desselben das Ansprechen der Pfeife plötzlich verhindert, während seine Verlängerung nur allmählich die Intensität und die Höhe des Tons herabsetzt.¹⁾

1) Die Unmöglichkeit, eine Zungenpfeife bei gewissen Längen des Windrohrs anzublasen, machte sich auch bei der Konstruktion von Stimmgabeln bemerkbar, die in ähnlicher Weise wie eine Zungenpfeife angetrieben wurden (vgl. J. Rich. Ewald, Durch einen Luft- oder Wasserstrom bewegte Stimmgabeln, Pflügers Archiv, **44**, p. 555. 1889). Damals gab ich daher an, es solle immer ein Windkessel in das Windrohr eingeschaltet werden, wodurch das Ansprechen der Stimmgabel von der Länge des Windrohrs unabhängig gemacht werden kann.

(Eingegangen 7. September 1914.)