4. *Neuere Untersuchungen*
über den Resonanzverlauf abgestimmter
Klangkörper;
von R. Hartmann-Kempf.

a) **Frei schwingende und stark gedämpfte elastische Körper.**

Die in diesen Annalen 13. 1904 auf p. 125—162 und p. 271—288 veröffentlichten Ergebnisse der Untersuchungen über zungenförmige Klangkörper¹⁾ haben durch eine Anzahl für die praktische Durchbildung des elektroakustischen Resonanzsystems zu Frequenzmessern weiterhin notwendig gewordene Einzelversuche im wesentlichen ihre Bestätigung gefunden, so daß sich vorliegende Betrachtungen ohne weiteres an die damaligen Resultate anschließen lassen.

Die Dämpfungserscheinungen an solchen schwingenden Stahzlungen infolge von oszillierenden und permanenten Kraftlinienfeldern wurden damals zwar theoretisch in ihren Grundverhältnissen richtig erkannt, allein die hohen Ansprüche, die man an die Genauigkeit der Frequenzmesser mit skalenartiger Abstimmung im Laufe der Zeit stellte, verlangten eingehende praktische Versuche, um eine tunlichst große Unabhängigkeit der Resonanzstelle von der Amplitude, also von der Stärke der Erregung zu erreichen: oder, mit den Fachausdrücken der Elektrotechnik; um auch bei größeren Spannungsschwankungen das Schwingungsbild stets am nämlichen Zifferwert der Skala zu erhalten.

Es hatte sich nun bereits gezeigt, daß es keinerlei elastische Körper von absolut konstanter Eigenschwingungszahl gibt. Alle derartigen Klangkörper verändern ihre Tonhöhe

1) Auszug aus: R. Hartmann-Kempf, „Über den Einfluß der Amplitude auf Tonhöhe und Dekrement von Stimmgabeln und zungenförmigen Stahlfedern“, Dissert. Würzburg 1902.

mit der Amplitude. Massive Stimmgabeln werden mit zunehmender Schwingungsweite etwas tiefer, und zwar in einer stetig zunehmenden Weise. Man kann ihre Tonhöhe nur für kleine durch Anschlagen hervorrufbare Schwingungen als konstant ansehen. In einer viel stärkeren und im voraus nicht zu mutmaßenden Weise prägt sich die Abhängigkeit von der Amplitude bei einseitig eingespannten Federbändern, sogenannten Zungen, aus. Bereits für die frei abklingende, nur durch den Luftwiderstand gedämpfte Zunge ergibt sich eine Kurve mit mindestens einem Umkehrpunkt. Kommen nun noch starke Dämpfungen, namentlich durch Wirbelströme hinzu, so kann der Kurvenverlauf mehrere Umkehrpunkte, Maxima und Minima, zeigen. Obwohl man (z. B. aus dem Kurvenblatt XXX der genannten Dissertation) gesehen hat, daß das Resonanzmaximum noch weit mehr nach der Tiefe verschoben wird als es auf Grund theoretischer Berechnung unter Berücksichtigung der aus Deformation und Dämpfung resultierenden Eigentonhöhe hervorgehen sollte, so läßt sich doch nicht genau vorher sagen, bei welcher bestimmten Frequenz eine Zunge ihr Resonanzmaximum erreichen wird. Einzig der Versuch kann da entscheiden. Aber die eine Voraussage hat Anspruch auf große Wahrscheinlichkeit, nämlich: daß ein zusätzlicher Betrag von Dämpfung imstande ist, den tonerhöhenden Einfluß der Deformation in einer für den idealen (d. h. in einer möglichst symmetrischen Kurve darstellbaren) Resonanzverlauf der erzwungenen Schwingungen günstigen Weise zu kompensieren. Mitunter — und zwar je nach den Dimensionen einer Zunge — kann das Resonanzmaximum einer durch mechanische Erschütterung der Wurzel erregten, also nur durch Luftwiderstand gedämpften Zunge stärkere Verschiebungen erleiden, als dasjenige einer gleichen Zunge, die von einem ihr gegenüberstehenden Wechselstrommagneten in Schwingung versetzt wird und gleichzeitig durch die von seinem Kraftlinienfelde ausgehenden Wirbelströme eine geringe zusätzliche Dämpfung erhält. Bei den auf mechanischer Erschütterung beruhenden Resonanzapparaten der Technik werden schon aus diesem Grunde vorteilhafterweise nur schwache Zungen verwandt, deren Schwingungsenergie im Verhältnis zu dem Luftwiderstand so gering ist, daß die Luftdämpfung ausreicht, um der

Erhöhung des Eigentones vertiefend entgegenzuwirken. Die für das folgende Experiment benutzte Zunge ist im Gegensatz zu den seinerzeit verwendeten Stahlzungen nur durch indirekte Erschütterung in Resonanz gebracht. Hinsichtlich ihrer Dimension ist sie von mittlerer Stärke; an sich bedeutend stärker als in den Resonanz-Frequenzmessern aber wiederum wesentlich schwächer als die Zungenfedern, welchen ihrerseits wieder die Verrichtung einer mechanischen Funktion (z. B. das Betätigen von starken Relaiskontakten) zugemutet werden soll. Starke Zungen eignen sich aber überhaupt nicht zur indirekten (durch Erschütterung erfolgenden) Erregung, wie später gezeigt werden soll.

Wir untersuchen zunächst den Resonanzverlauf einer solchen Zunge von mittlerer Stärke. Die Resonanzkurven der Fig. 1 bringen zwar nichts Unerwartetes gegenüber den früheren

Fig. 1.

Feststellungen (vgl. die Kurvenblätter XXX und XXXI auf Taf. VI des Auszugs in Ann. d. Phys. 13. 1904) bilden aber eine hübsche Ergänzung hierzu.

Der Versuchsapparat wurde gleich in eine übersichtliche, aus Fig. 2 und 3 hervorgehende Form gebracht, welche sich zur Wiederholung und Vorführung für die theoretische Physik in mancher Hinsicht lehrreicher Versuche eignet. Die Zunge, welche ca. 50 ganze Eigenschwingungen ausführt, ist mit einer Gesamtbreite von etwa 36 mm (einschließlich Fähnchen) schwingend photographiert. Sie besteht aus Federstahlband von ca. $50 \times 4 \times 0,3$ mm. Zur besseren Wahrnehmung des Schwingungsbildes trägt sie ein weißgestrichenes Blechfähnchen

von 5×6 mm Schaufläche. Dementsprechend müssen die an der Vergleichsskala gemessenen Ausdehnungen jeweils um 5 mm gekürzt werden, um die tatsächliche Ausbiegung des freien Zungenendes zu ermitteln.

Fig. 2.

Fig. 3.

Die Zunge schwingt aus verschiedenen Gründen und im Gegensatz zu früheren Versuchsanordnungen, nicht direkt als Anker vor einem gegenüberstehenden Elektromagnet, sondern

sie wird indirekt (wie im Prinzip von Melde vorgeschlagen und später von Frahm in seinen bekannten Resonanztecho- metern benutzt), in Resonanzschwingungen versetzt. Hierzu dient ein polarisierter Elektromagnet in Hufeisenform e , der zunächst den Anker a in erzwungene Schwingungen versetzt, welche, weil nicht in Konsonanz mit dem Gesamtsystem, sehr klein bleiben. Der Anker endet in eine Fußleiste f , die zwischen zwei Blattfedern b elastisch gelagert ist und welche auch die Zunge z trägt. Durch mechanisches Hin- und Herbewegen des eingespannten Endes kommt die Zunge ebenfalls in erzwungene Schwingungen. Die Stellschraube s dient zur Regelung des Ankerabstandes vom Magneten.

Der kräftige permanente Hufeisenmagnet m Fig. 2 erteilt der Zunge eine zusätzliche Dämpfung. Aus späterhin ersicht-

Fig. 4.

lichen Gründen steht er nicht in der für Magnet und Anker bisher üblichen Weise der Zunge gegenüber, sondern so, daß die Zunge zwischen den beiden Polenden hindurchschlagen kann. Es entsteht daher ein magnetischer Anzug, der je nach der Stellung (in der Abbildung ist die Entfernung zwischen Ruhelage und Magnetanfang 10 mm)

in einer verwickelten Weise zu- oder abnimmt, etwa im Sinne der Kurve Fig. 4.

Wir untersuchen aber vorerst an Hand der Fig. 1 den Resonanzverlauf der lediglich durch Luftwiderstand gedämpften Zunge, also unter Abwesenheit des Dämpfermagnets. Die Zunge wurde vorher genau auf 50 Schwingungen abgestimmt, d. h. sie erreichte das Resonanzmaximum bei genau 50 Erregerperioden mit einer Maximalamplitude von 24 mm (unter Abzug der Fähnchenbreite). Bei schwächerer Erregung liegt die stärkste Resonanz bis zu 0,15 Schwingungen = 0,3 Proz. tiefer; bei einer sehr starken (für technische Resonanzapparate übrigens viel zu kräftigen) Erregung sehen wir das Maximum bei einer um die gleichen Beträge erhöhten Frequenz. Der vermutliche geometrische Ort der Resonanzmaxima bei sämtlichen Er-

regungsstärken ist durch die gesondert gezeichnete Linie r_1 Fig. 1 b dargestellt.

Bei der Kurve V mit der zweitstärksten Erregung deutet die schwarze Fläche die Stelle an, woselbst die Resonanzschwingungen keinen eindeutigen Wert annehmen; das Schwingungsbild pendelt hin und her. Für alle anderen Erregungsstärken ließen sich nur eindeutige Resonanzamplituden ermitteln. Selbst bei der überstarken Erregung gemäß der obersten (nur teilweise ausgezogenen) Kurve VI kann für die absteigende Frequenz kein wesentlich anderer Verlauf ermittelt werden, wie bei ansteigender Frequenz. Allerdings hält die Maximalschwingungsweite von 55 mm bei ansteigender Frequenz ein wenig länger an, etwa bis zu dem Werte 52,3 Schwingungen, um dann in bekannter Weise den Sturz bis auf 15 mm zu erleiden.

In Fig. 1 sind die beiden Frequenzwerte oberhalb und unterhalb der normalen (50) herausgezeichnet, bei welchen die Resonanz die Hälfte ihres Maximalwertes erreicht. Man erhält die Linien r_3 und r_4 , und es scheint, als wenn sich der theoretisch verlangte, stark vertiefende Einfluß noch in beiden Linien bewahrheiten wolle. Offenbar liegt eine ganz außerordentliche Erhöhung des Eigentons infolge der starken Durchbiegung der Zunge vor, mutmaßlich in der Größe gemäß Linie r_2 . Leider standen mir zurzeit die damals benutzten Versuchsgesetze nicht zu Gebote, um die Eigentonshöhe der frei abklingenden Zunge zu ermitteln; doch hoffe ich, in Bälde wieder über die nötigen Einrichtungen zu verfügen.

Die für vorliegende Zwecke hinreichend genaue Methode der Ermittlung von Resonanzkurven besteht in der Anwendung des bei meinen früheren Arbeiten bereits benutzten und eingehend beschriebenen Saitenunterbrechers¹⁾, dessen technische Durchbildung inzwischen noch vervollkommen wurde. Der intermittierende Gleichstrom erregt einen sehr präzise abgestimmten Frequenzmesser mit zwei Reihen von Zungen (vgl. Fig. 5), deren obere Reihe von 48—52 Schwingungen (Unterbrechungsperioden) in halben Schwingungen abgestimmt ist, während das engere Meßbereich der unteren Reihe eine

1) R. Hartmann-Kempf, Ann. d. Phys. 13. p. 140. 1904.

noch einmal so feine Abstufung, also von $\frac{1}{4} : \frac{1}{4}$ Schwingungen aufweist. Die Ablesegenauigkeit für maximal eingestellte Resonanzschwingungen darf man mit Sicherheit auf mindestens $\frac{1}{20}$ Schwingung, also 0,1 Proz., annehmen, während die Zwischenwerte der unteren Reihe immerhin auf $\frac{1}{15} - \frac{1}{10} = 0,15 - 0,2$ Proz., genau abgelesen werden können.

Fig. 5.

Die ungewöhnliche Bauweise dieses Frequenzmessers trägt der eigentümlichen Erscheinung Rechnung, daß die Abstimmung und das Ansprechen der Zungen genauer wird, wenn die Resonanzschwingungen eines Zungenkammes durch diejenigen eines gegenüberstehenden Kammes derart kompensiert werden, daß das gesamte, aus Magnet und Befestigungsplatte bestehende System keine seitlichen Erschütterungen ausführt, also ähnlich wie die Brücke einer Stimmgabel in Ruhe bleibt. Es soll weiter unten von derartigen gegenseitigen Beeinflussungen, z. B. von einer Zunge auf ihre Nachbarzunge, die Rede sein.

Die Resonanzkurven Fig. 1 der nur durch Luftwiderstand gedämpften Zunge zeigen, daß der Resonanzverlauf bei jeder Stärke der Erregung (Maximalamplitude) eindeutig vor sich geht, d. h. zu jeder Frequenz gehört bei bestimmter Erregungsstärke nur eine einzige Amplitude. Zwar will es in nächster Nähe der Konsonanz scheinen, als wenn die Amplitude zwischen zwei Werten hin- und herpendele, so daß eine stabile Einstellung kaum möglich ist. Das hat einerseits seinen Grund in dem plötzlichen starken Hineinwachsen in die vollen Resonanzschwingungen; andererseits können tatsächlich labile Gleich-

gewichtszustände eintreten, wenn sich der Konsonanzgrad ebenso schnell ändert, wie die Verstimmung durch Deformation und Dämpfung. Sofern nun diese Verstimmungen nicht proportional, sondern kräftiger auftreten, entstehen die merkwürdigen Fälle eines zweifachen, unterschiedlichen Resonanzverlaufs, je nachdem die Zunge bei steigender oder bei fallender Frequenz in Resonanzschwingungen versetzt wird. Auch dies hat sich bereits bei früheren Untersuchungen ergeben.

Auf Kurvenblatt XXXIV der genannten Dissertation (auch in den Ann. d. Phys. 13. 1904 enthalten) ist bereits ein solcher Grenzfall und zwar für ein ganz schwaches Federband veröffentlicht. Es dürfte von Interesse gewesen sein, diesen Versuch wiederholt zu haben, nicht nur um Bestätigung zu erhalten, sondern auch deshalb, weil die Unterlagen zu dem Versuch viel einfacher und in ihren Ursachen übersichtlicher sind. Bei den früheren Versuchen lieferte der Erregermagnet zugleich die dämpfenden Foucaultströme; hier aber dient dazu ein gesonderter permanenter Magnet, so daß man deutlich unterscheiden kann, welcher neu hinzukommende Einfluß diesem zuzuschreiben ist.

Die hierauf bezügliche Fig. 6 zeigt 5 Resonanzkurven, bezeichnet mit I—V. Jedesmal blieb die elektrische Erregung

Fig. 6.

der Erschütterungsvorrichtung gleich stark, nämlich von einem solchen Betrag, daß die bei Abwesenheit des Dämpfermagnets schwingende Zunge ein Schwingungsbild von 36 mm (beiderseitig einschließlich 5 mm Fähnchenfläche gemessen) liefert. Die entsprechende Kurve I offenbart nichts Überraschendes. Dagegen zeigt Kurve II den Einfluß des Dämpfermagnets, der im Abstand von 20 mm von der Ruhelage steht. Er wirkt

auf die ruhende Zunge fast gar nicht; man kann eine Annäherung nur um 0,1 mm bemerken. Dagegen erleidet die in seinem Streufeld schwingende Zunge bereits eine merkliche Dämpfung, welche das Maximum in der Resonanzkurve zwar vertieft, aber ihr dafür einen sehr schönen symmetrischen Verlauf verleiht. Man sieht, daß zwischen den Kurven I und II eine Kurve von idealem Resonanzverlauf gedacht werden kann, wobei die zusätzliche Dämpfung den Eigenton ebensoviel vertieft, wie ihn die Deformation erhöht. Beachtenswert ist schon hier an Kurve II, das dank dieser Kompensation merklich — und zwar um mehr als $\frac{1}{4}$ — vergrößerte Resonanzmaximum.

In der Entfernung 10 mm, Kurve III, woselbst der Magnet die ruhende Zunge um 0,5 mm ausbiegt, überwiegt schon die Tonerniedrigung durch Dämpfung alle übrigen Verstimmungen. Die Resonanz vermag die kritische Amplitude von 27 mm weder bei steigender noch bei fallender Erregerfrequenz zu übersteigen. Die Konsonanzlage sinkt um 2% gegen die mittlere Tonhöhe der frei abklingenden Zunge, die man um etwa $\pm 0,2$ Schwingungen genau bei 50 anzunehmen hat. Aber auch dieser Resonanzverlauf bleibt immer noch eindeutig.

Ein zweifacher Resonanzverlauf spielt sich jedoch ab bei einer Annäherung des Dämpfermagnets an die Zunge bis auf 5 mm. Diese wird hierbei um etwa 1,8 mm abgebogen. Bei steigender Frequenz (IVa) sieht man bis zum Maximum ein fast proportional zunehmendes Anwachsen der Amplitude. Nur kurz nach 47 macht die Kurve einen Buckel. Nach Überschreiten des Wertes 50 ist ein weiteres Mitschwingen in dieser Stärke unhaltbar. Die Zunge fällt rapid auf eine ganz geringe Resonanzamplitude. Wechselt man die Richtung der Erregerfrequenz, so vermag die Zunge überhaupt nicht recht in Resonanz zu kommen; unter Bildung starker Schwebungen nähert sie sich einem Maximum bei 47,25, in das sie plötzlich hineinschießt. Zwischen den Amplituden 12 und 47 mm schwingt sie labil. Dieses Experiment bildet ein Gegenstück zu den Versuchen an stark gedämpften Stimmgabeln; vgl. deren plötzliches Abfallen bei sinkender Frequenz. (Dissert. des Verfassers bzw. Ann. d. Phys. 13. Taf. V und VII). Jedoch erfolgt im vorliegenden Fall der Absturz bei steigender Frequenz.

Eine Erklärung läßt sich finden, wenn auch keine präzise erschöpfende; denn wir werden sehen, daß neue Kräfte mit im Spiel sind, die bisher unbeachtet blieben und gerade durch dieses Experiment gefunden wurden.

Soweit die magnetische Dämpfung in Frage kommt, äußert sie sich in herkömmlicher Weise im Verlauf der Kurve IVb. Die Konsonanzlage wird stark heruntergedrückt, und zwar gleich um 5%. Sobald aber die Zunge an den dämpfenden Polen vorübergeschwungen ist, treten ganz neue Einflüsse auf. Um diese zu verstehen, muß man sich die Frage vorlegen, ob der permanente Magnet denn ausschließlich dämpft?

Die vorliegenden Versuche wurden nämlich zuerst mit anderem Aufbau gemacht. Der Magnet stand dabei in herkömmlicher Weise mit beiden Polen vor der Zunge, also gerade um 90° gegen seine in Fig. 2 abgebildete Stellung verdreht. Hierbei zieht er die Zunge als Anker viel stärker an und sie erfährt doch ohne Zweifel eine Verstärkung ihrer Richtkraft oder Spannkraft. Demgemäß müßte der Ton eigentlich höher werden. Da aber die Dämpfung in gleicher Weise wächst wie die Spannkraft, so ist es schwer, den wahren Sachverhalt zu ermitteln. Man müßte annehmen, daß die etwaige Tonerhöhung überreichlich durch die Vertiefung wieder erniedrigt wird.

Die Neugestaltung des experimentalen Aufbaues ermöglicht aber den Beweis zu erbringen, daß der Magnet die Eigenschwingungszahl nicht nur vertieft, sondern auch erhöht, letzteres unter Umständen sogar viel beträchtlicher, wie dies Kurve V der Fig. 6 lehrt. Hierbei stand der permanente Magnet mit seinen Polkanten gerade seitlich zu der Zunge; er lenkte diese also nach keiner Richtung hin ab. Ein Eigenton erscheint bei aufsteigender Frequenz an der Stelle 55, also um 10% erhöht. Bei absteigender Frequenz kommt die Zunge in so starke Resonanzschwingungen, daß der tonerhöhende Einfluß des Magnets nachläßt; aber er macht sich in dem Resonanzmaximum der Kurve Vb unverkennbar bemerklich. Wir haben tatsächlich den überraschenden Fall vor uns, daß die Eigenschwingungszahl durch die gleichen bisher bremsenden und vertiefenden Magnete erhöht werden kann. Es müßte daher auch prinzipiell die Möglichkeit gegeben werden, ein System

bei einer höheren Frequenz als bei seiner Eigenschwingung durch irgend eine Art von magnetischer Erregung in maximale Resonanz zu versetzen. Theorie und Erfahrung zeigten bisher nur das Gegenteil.

Die Versuchsanordnung unterscheidet sich insofern wesentlich von den anderen Arten der unmittelbaren Erregung einer Zunge durch ein pulsierendes Kraftlinienfeld, als der Kraftlinienzug des permanenten Magnets in der Ruhelage der Zunge gar nicht zur Geltung kommt, dagegen bei der schwingenden Zunge nach zwei Seiten wirkt, genau wie ein Gummiband. Er unterstützt also die Richtkraft ohne Federkraft der Zunge.

Demgegenüber wirkt der permanente Magnet bei den übrigen Stellungen zwar nur einseitig; da er jedoch die Zungenfeder ebenfalls spannt, müßte ihre Schwingungszahl eigentlich gesteigert werden. Ich habe noch durch eine andere Anordnung versucht, diese vermeintliche Tonhöhensteigerung festzustellen. Hierzu wurde ein starkes schwingendes System von 50 Schwingungen mit Hilfe zweier kurzer, durch einen Steg verbundener Federbänder hergestellt. Der Steg trägt einen aus Lamellen zusammengeklippten Eisenanker, der in kurzem Abstand von etwa 2 mm durch einen Wechselstromelektromagnet erregt wird. Letzterer besitzt Spulen mit zweifacher Wickelung, von denen die eine für Wechselstrom, die andere für Gleichstrom zur Bildung eines starken permanenten Feldes dient. Es wurde erhofft, daß die dämpfende Wirkung angesichts der Lamellierung kleiner ausfallen würde als die Tonerhöhung durch Vergrößerung der Federspannung. Diese Annahme bewahrheitete sich jedoch nicht. Vielmehr trat nur eine starke Vertiefung der Resonanzlage ein.

Dagegen war es möglich, diesen theoretisch vorausgesagten Fall der Erhöhung des Eigentons und damit der Resonanzkurve durch Zusatz einer elastischen aber ebenfalls nur nach einer Richtung hin wirkenden Kraft herbeizuführen. Drückt man mit dem Finger oder einem Radiergummi an das untere Ende der Feder, also dahin, wo auch die periodischen magnetischen Stöße angreifen, so kann man eine Tonerhöhung um 5—10% herbeiführen, so daß auch hier wieder das Resonanzmaximum, wiewohl absolut wesentlich verkleinert, in einer entsprechend erhöhten Lage auftritt.

Ein naheliegendes Analogon bildet folgender Versuch: Man belastet eine starke Feder mit einem Gewicht von etwa 0,5 kg, so daß Eigenschwingungen von etwa 3 in der Sekunde eintreten.

Die in einen Schraubstock nach oben in der Art eines Metronoms eingespannte Feder schwingt bekanntlich merklich langsamer, als die in entgegengesetzter Lage wie ein Uhrenpendel eingespannte Feder, da die Erdschwere das eine Mal verzögernd, das andere Mal beschleunigend wirkt. Verlegt man die Schwingungsebene horizontal zur Erde, so ist deren Einfluß aufgehoben. Die alsdann ermittelte Eigenschwingung muß man als die tatsächliche ansehen. Wie nun, wenn man diese Feder in der letztgenannten Lage um 90° verdreht, so daß sie in der Ruhelage (annähernd!) parallel zum Erdboden steht, aber in der senkrechten Ebene schwingt? In diesem Falle wirkt doch die Erdschwere auf die in ihrer Ruhelage wagerechte Zunge ebenfalls einseitig, so daß sie infolgedessen durchgebogen und stärker angespannt ist, genau wie ein permanenter Magnet einseitig wirkt. Tatsächlich ist auch die Eigenschwingung der freischwingenden ungedämpften Feder in letzterem Falle wesentlich erhöht. Man folgert daraus wohl mit Recht, daß eben nur der überwiegende dämpfende Einfluß des Magnetfeldes die Erhöhung völlig verschleiert.

Es wurde versucht, den Einfluß der Schwerkraft dadurch experimentell vorzuführen, daß eine starke Zunge in verschiedenen Lagen schwingen kann aber jeweils ihre Eigenschwingung unmittelbar durch Erschüttern eines Zungenkammes anzeigen sollte. Das Experiment ist aber nicht sehr anschaulich, weil sich die Verstimmung durch Lagenveränderung nur bei sehr tiefen Schwingungszahlen (4—8 per Sekunde) deutlich bemerkbar macht, woselbst aber die Erscheinung der Resonanz wiederum weniger exakt und gleichmäßig vor sich geht.

b) Gegenseitige Beeinflussung zwischen abgestimmten Zungen von eng benachbarter Schwingungszahl.

Es ist bekannt, daß zwei durch eine nachgiebige oder elastische Brücke verbundene Pendel von gleicher Schwingungszahl einander so beeinflussen, daß sie niemals zu gleicher Zeit das nämliche Schwingungsstadium durchmachen. Sofern eines

der Pendel angestoßen wird, setzt es das andere in Resonanzschwingung und wird rückwärts von diesem wieder beeinflusst so daß beide eine Art Schwebung ausführen und es den Anschein hat, als sei eines der Systeme höher, das andere tiefer gestimmt, als es zuvor einzeln ermittelt wurde. Derartige Experimente gewinnen an Interesse, wenn man sie zur Erklärung der eigenartigen verstimmenden Rückwirkung zwischen der ausgesandten Energie und dem abgestimmten Stromkreis der Sendestation bei der drahtlosen Telegraphie heranzieht. Der Gedanke liegt nahe, ähnliche Verhältnisse bei abgestimmten Zungen zu untersuchen, wobei mehrere Zungen von gleicher oder benachbarter Schwingungszahl sich gegenseitig beeinflussen.

Es gewährt einen sonderbar reizvollen Anblick, zu verfolgen, wie die einzelnen Zungen eines Kammes von abgestimmten Zungen in Resonanz kommen, wenn man einen solchen Kamm auf weiche Unterlage aufspannt, oder einfach in der Hand festhält und nun eine der Zungen stark anzupft. Man erhält ähnliche Schwebungserscheinungen wie bei den Pendelversuchen; aber die Erscheinungen spielen sich mit einer derartigen Mannigfaltigkeit ab, daß eine systematische Untersuchung erschwert wird. Augenfällig wirkt aber folgendes: Die Zungen führen mehr und minder große Schwebungen aus; eng benachbarte (von 1—2 Proz. Unterschied) reagieren indessen zuweilen viel schwächer als solche mit größeren Tonhöhenabständen (4—5 Proz.). Nach vielem Hin- und Herwandern der Schwebungsstellen durchzieht den ganzen Zungenkamm ein plötzlicher Ruck, worauf sämtliche Schwingungen nahezu verstummen. Ähnliches gewahrt man an einem Zungenkamm mit einer langen Reihe von Zungen (z. B. an dem Demonstrations-Frequenzmesser von Hartmann & Braun mit 101 auf die Schwingungszahlen 30—130 pro Sekunde abgestimmten Zungen). Reißt man eine einzelne Zunge an, so führen die Nachbarzungen ein Durcheinander von Schwebungen aus. Anders aber ist es, wenn man alle Zungen auf einmal erregt. Man fahre mit dem Nagel unter kräftigem Fingerdruck schnell an der gesamten Zungenskala entlang, so schwingen diese Zungen ausnahmslos stark und schwebungslos und klingen allmählich ab, als wenn jede für sich allein schwänge. Nach einiger Zeit

geht ein plötzlicher Ruck durch die ganze Reihe und es setzt ein Wellenspiel von Schwebungen ein.

Die genannten Erscheinungen ändern sich mit der Stärke der Stahlzungen und mit der Art sie in Resonanz zu bringen. Man muß bei der geplanten Verwendung eines Zungenkammes zu Frequenzmessungen danach streben, daß jede Zunge von ihrer Nachbarzunge möglichst unbeeinflußt bleibe. Da zeigt es sich nun, daß die Zungen selbst sehr schwach sein müssen, und zwar um so weniger Energie benötigen sollen, je weniger sie auf die Unterlage des Zungenkammes bzw. auf die Vorrichtung zum Hervorbringen der Resonanzschwingungen rückwirken dürfen. Die von Frahm eingeführte indirekte Erregung der Zungen durch Hin- und Herbewegen der Kammleiste erweist sich daher um so günstiger, je weniger Kraft die Zungen zu ihrer Erregung bedürfen, d. h. je schwächer sie sind. Will man stärkere Zungen verwenden, z. B. zur Betätigung irgend eines Hebelkontaktes oder dergl., so müssen sie auf fester Unterlage eingespannt sein und durch direkt wirkende, die Stahlzunge selbst wie einen Eisenanker anziehende Kraftlinien erregt werden. Je mehr die Zunge an Energie durch das von ihr selbst ausgehende Erschüttern an der Befestigungsstelle bzw. des gesamten Untergestells abgibt, um so schwerer ist es, sie in starke Resonanzschwingungen zu versetzen.

Um diese letztgenannten Verhältnisse recht anschaulich zu machen, habe ich folgenden kleinen Demonstrationsapparat gebaut (Fig. 7). Auf einem festen Handgriff ist ein Zungenwinkel mit 3 verschiedenen Zungen eingelassen, von den Längen 11, 8 und 5 cm. Die durch Fähnchen und Lötzinn beschwerten Zungen haben die Schwingungszahlen 25, 50 und 100 pro Sekunde. Die stark angezupften Zungenbänder (einseitige Ausbiegungen von etwa 10, 5 und 2,5 cm sind zulässig!) klingen ungemein schnell ab, so lange der Stiel frei in der Hand gehalten wird; etwa in 3, 1,5

Fig. 7.

und 0,5 Sekunden. Diese Abklingungszeit verdreifacht sich annähernd, sobald man den Winkel (also die Befestigungsstelle der Zungen) gegen eine feste Unterlage auflegt. Nur die Zunge von höchster Schwingungszahl klingt auch dann noch rasch ab, und an dem Entstehen eines vernehmlichen Tons merkt man die beträchtliche Abgabe von Energie. Spannt man den Winkel dagegen in einen großen Schraubstock ein, so wird von der Umgebung nur wenig Energie aufgezehrt, und die Zungen schwingen bedeutend länger.

Genau entsprechend verhält sich die Resonanzamplitude und die Steilheit der Resonanzkurve. Es muß daher bei Resonanzmeßgeräten darauf gesehen werden, daß die Befestigung im Vergleich zu dem Bedarf der Zungen an Schwingungsenergie eine hinreichend große ist. Nach dem Gesagten leuchtet es ein, daß eine Anordnung nach Fig. 5 den Vorteil hat, daß die von der Zungenwurzel an die Unterlage abgegebene Energie der ihr gegenüberstehenden Zunge zu statten kommt; demgemäß darf die Erscheinung nicht verwundern, die man bei Frequenzmessern beobachten kann, nämlich daß sich die Resonanzamplitude etwas vergrößert, wenn man den Apparat selbst in die Hand nimmt, d. h. ihm seine feste Auflage entzieht. Streng genommen kann man daher eine Zunge nur in zwei Fällen ganz genau stimmen: einmal wenn ihre Energieabgabe an die Umgebung durch eine nahezu um 180° entgegengesetzt schwingende, also z. B. ihr gegenüber gestellte Zunge kompensiert wird, oder wenn die Unterlage so massiv gewählt ist, daß diese nicht merklich ins Mitschwingen versetzt werden kann.

Die Zungen für Frequenzmesser, bei denen es erwünscht wäre, daß ihre Resonanzkurven bei jeder Erregerstärke ganz symmetrisch übereinander liegen, und bei welchen man deshalb gegenseitige Beeinflussung soviel wie möglich zu vermeiden sucht, sind, wie schon gesagt, sehr schwache elastische Gebilde. Trotzdem kann man solche gegenseitigen Störungen deutlich beobachten. Nachfolgende Versuche wurden an einem Frequenzmesser mit indirekter Erschütterung nach der Frahm'schen Methode angestellt. Die drei benachbarten Zungen von ca. $50 \times 3 \times 0,25$ mm wurden einzeln genau abgestimmt auf 49,75, 50,00, 50,25 Schwingungen pro Sekunde. Dabei wurden

zunächst die Nachbarzungen durch Einschieben von Papierblättchen am Mitschwingen gehindert. Es zeigte sich, daß die auf 50 abgestimmte Zunge bei nachheriger Freigabe der Nachbarzungen eine kleine Verstimmung erlitten hatte, sie wird nämlich um etwa 0,1 Schwingungen höher.

Nun wurde untersucht, was es auf die Resonanzkurve ausmacht, wenn die Nachbarzungen festgehalten, d. h. am Mitschwingen gehindert werden, und zwar im Vergleich zu dem normalen Fall bei Frequenzmessern, wo die mit nur kleinen Unterschieden abgestimmten Nachbarzungen ebenfalls beträchtliche Resonanzschwingungen ausführen also nicht gebremst sind. Das Bremsen muß aber so geschehen, daß nicht etwa der Abstand des an dem Zungenkamm befestigten Ankerstückes von dem Erschütterungsmagnet

sich ändert. Dazu eignen sich zwei oben und unten zwischen die einzelnen Zungen geschlungene Kartonstreifen. Aus der Kurve *a* in Fig. 8 ersieht man den schönen Verlauf der für sich allein, d. h. also bei ge-

Fig. 8.

dämpften Nachbarzungen schwingenden Zunge mit 50 Schwingungen. Sobald diese Zungen frei mitschwingen, entsteht Kurve *b* mit dem merkwürdigen Knick zwischen 49,50 und 49,75; außerdem bleibt das Resonanzmaximum um 3 mm zurück. Kurve *b*₂, welche lediglich einer schwächeren Erregung entspricht, verläuft normal, d. h. ohne Knick.

Um die Ursachen dieses Knickes zu ergründen, wurde der Einfluß der linken und der rechten Nachbarzunge für sich getrennt untersucht. Es ist erstaunlich, den Unterschied in dem Resonanzverlauf der mittleren Zunge zu sehen, wenn die linke Zunge 49,75 mitschwingt (Kurve *a* in Fig. 9) oder wenn die rechte Zunge 50,25 schwingt, während jeweils die andere künstlich gebremst ist. Im ersten Falle entsteht die prachtvolle Resonanzkurve *a* mit dem verbreiterten Maximum von 24 mm, das allerdings um etwa 0;15 Schwingungen (0,3 Proz.) vertieft erscheint; im zweiten Fall (Kurve *b*) kann sich die Zunge nicht über 11 mm verbreitern. (Maße abzüglich der Fähnchenbreite von 3 mm). Die Stärke der

Erregung war genau die gleiche wie bei den Kurven *a* und *b* in Fig. 8.

Die Entstehungsursache der Kurve *b*₁ in Fig. 8 erhellt analytisch ohne weiteres aus Fig. 9. Dagegen dürfte es nicht einfach sein, eine Erklärung dieser überraschenden, in Fig. 9

Fig. 9.

dargestellten Erscheinung zu geben. Ich habe versucht, durch Beobachtung an dem Resonanzverlauf zweier auf ganz genau gleiche Schwingungszahl abgestimmter Zungen von 50 Schwingungen, irgend weitere Aufschlüsse zu erhalten. Die Abstimmung der 4 Nachbarzungen war demnach 49,5; 50,0; 50,0; 50,25. Aber hier zeigte sich merkwürdigerweise nicht der geringste Einfluß der Nachbarzungen. Beide Zungen schwingen unbekümmert, und zwar ganz gleichmäßig; lediglich der relativ große Bedarf an Erregerenergie ist zu erwähnen, der aber zu erwarten stand.

Es konnte nicht Sache der vorliegenden Untersuchungen sein, die in erster Linie aus technischen Gründen, nämlich zur Erprobung der Genauigkeit der Resonanzapparate (Frequenzmesser) ermittelten Resultate zu veröffentlichen. So günstig zwar diese Proben wiederum für diese eigenartigen Meßinstrumente ausgefallen sind, so erblicke ich doch den Hauptwert der Mitteilungen in der Anregung zu weiteren Untersuchungen über die Resonanzerscheinungen an elastischen Systemen, insbesondere an sogenannten gekoppelten Systemen, wobei ein Schwingungssystem das andere beeinflusst, bzw. mehrere Schwingungssysteme aufeinander einwirken. Die der Beobachtung so leicht zugänglichen Schwingungsbilder gestatten ohne Zweifel Rückschlüsse auf Vorgänge in elastischen abgestimmten Systemen, deren Erscheinungen unserer sinnlichen Wahrnehmung weniger zugänglich ist.

Frankfurt a. M., Laboratorium der Firma Hartmann & Braun. Winter 1910.

(Eingegangen 5. Juli 1911.)