X. *Die electrische Sirene;* *von Robert Weber.*

(Hierzu Taf. XII Fig. 7—9.)

Für die Akustik sowohl als für die Theorie der Musik ist es von grösster Wichtigkeit, die Ursache des Tones nachzuweisen und die jedem Ton entsprechende Schwingungszahl zu bestimmen, weil es sich aus diesen ergibt, in welchem Verhältniss die Töne zu einander stehen. Die bezüglichlichen Untersuchungen sind ausgeführt worden theils nach akustischen Methoden, theils nach optischen, und walten über die Ergebnisse keine Zweifel mehr.

Ein neuer Apparat, welcher nur die bekannten Ergebnisse bestätigen würde, hätte darum nur wenig Werth.

Die im Nachfolgenden beschriebene Sirene unterscheidet sich von den Apparaten ähnlicher Art durch einige wesentliche Punkte. Erstens ist das in Schwingungen versetzte Mittel, zweitens die Art der Schwingungserzeugung von den bisherigen verschieden, und drittens können Versuche und Wirkung beliebig voneinander entfernt werden. Diese Sirene liefert auch einen experimentellen Beweis der Gesetze über die Combinationstöne, wie solche von H. v. Helmholtz aufgestellt wurden. Mit den bislang bekannten Sirenen hat diese gemein, dass nach Belieben einer oder mehrere Töne erzeugt werden können, und dass das bezüglichliche Tonintervall zum voraus festgesetzt werden kann. Durch eine kleine, leicht anzubringende Abänderung wird es möglich, den gewöhnlichen Uebelstand der Sirenen fast ganz zu heben, den Uebelstand nämlich, dass eine bestimmte Tonhöhe nicht genau beibehalten werden kann.

I. Beschreibung des Apparates.

1. Grundform des Apparates. — In seiner einfachsten Form besteht die Sirene aus folgenden wesentlichen Theilen: ein metallisches Zahnrad *R* (Fig. 7) ist auf einer ebensolchen Axe *A* befestigt und soll mit ihr um diese sich drehen können. Auf dem Rand des Rades liegt eine Feder *F*

an, deren eines Ende festgeschraubt und mit einem Kupferdraht leitend verbunden ist, deren anderes Ende aber abwechselnd über einen Zahn und die darauf folgende Lücke gleitet. Die Lücken alle sind mit isolirender Masse ausgefüllt. Der von der Feder F ausgehende Draht geht weiter nach einem der Pole einer galvanischen Säule P . Ihr anderer Pol aber ist direct mit einem Telephon T verbunden. Der electrische Stromkreis ist also folgendermassen geschlossen: Ausgehend von der Säule P , geht die Leitung nach dem Telephon T , zur Axe A , nach dem Rad R , zur Feder F und zurück nach dem anderen Pol der Säule. Wenn sich daher das Rad R dreht, so wird der Stromkreis geschlossen oder offen sein, je nachdem die Feder F auf einem der Metallzähne oder auf der isolirenden Lücke aufliegt. Im Telephon wird dadurch die Platte in regelmässig wechselnder Folge angezogen und wieder losgelassen werden. Die schwingende Bewegung aber erzeugt einen Ton.

Die Tonhöhe oder die ihr entsprechende Schwingungszahl wird proportional sein erstens der Zähnezahl des Rades R und zweitens der Umdrehungsgeschwindigkeit der Axe A .

Die Tonstärke oder die Schwingungsweite der Telephonplatte wird abhängen von der Stärke des electrischen Stromes und von der Art und Qualität des Telephons.

Die Klangfarbe oder die Zahl, Höhe und Stärke der Töne, welche sich dem Hauptton beigesellen, wird von der Constanz des Elementes P , von der Beschaffenheit des Rades R und der Feder F , sowie von der Art und Qualität des Telephons T abhängen.

2. Die mehrfache Sirene mit primärem Strom.
— Ich habe eine Sirene bauen lassen mit fünfzehn gezahnten Rädern, welche alle auf derselben Stahlaxe festsitzen. Jedes der Räder hat 4 cm im Durchmesser, und stehen alle gleichweit voneinander ab, nämlich um etwa 3 mm. Die Zahl der Zähne ist für jedes Rad eine andere; das erste Rad hat deren 24, das zweite 27, das dritte 30 und so fort, jedes folgende Rad diejenige Zahl, die ihm zukommen muss, um dem jeweiligen Ton der Leiter zu entsprechen. Der Zwischenraum zwischen den einzelnen Rädern sowohl als

zwischen den einzelnen Zähnen ist gleichmässig mit einer sehr harten und isolirenden Masse ausgefüllt. Der so entstehende Cylinder wurde dann sorgfältig abgedreht, sodass jeder Zahn eines jeden Rades sich scharf abgrenzte, ohne aus der Masse herauszutreten.

An zwei Querstücken, welche die Axenträger zusammenhalten, sind fünfzehn Federn festgeschraubt. Jede einzelne Feder liegt in der Ebene des entsprechenden Rades und liegt mit dem nicht festgeschraubten Ende auf diesem Rad abwechselnd auf einem Zahn und einer isolirten Lücke auf. Vor dem Cylinder, auf einem nämlichen Grundbrett befinden sich fünfzehn Klemmschrauben, welche durch Drähte leitend mit dem festgeschraubten Federende verbunden sind. Eine sechzehnte Feder schleift gegen die Stahlaxe und ist andererseits mit einer sechzehnten Klemmschraube verbunden. Nach eben dieser Klemmschraube gelangt einer der vom Telephon kommenden Drähte; der andere Draht geht vom Telephon nach dem Element.

Verfügt man nun über eine Anzahl von Elementen, welche gleich ist dem Einfachen (oder einem Vielfachen) der Zahl der Räder, so ist folgende Anordnung empfehlenswerth: die negativen Pole sind unter sich und mit dem Telephon verbunden; der positive Pol jedes Elementes (oder jeder Reihe) ist hingegen mit einer der Klemmschrauben verbunden und durch sie mit je nur einer der Federn F , also mit je nur einem der Räder R . Soll also nur eines der Räder einen Ton erzeugen, so ist nur durch eine der Klemmschrauben die Verbindung herzustellen. Um mehrere Töne zugleich zu erhalten, sind mehrere der Elemente durch die entsprechenden Klemmschrauben in den Stromkreis einzuschalten.

Es ist klar, dass die Anzahl der nothwendigen Elemente auch kleiner sein kann, als die Anzahl der Räder, und nur höchstens gleich zu sein braucht der Anzahl Räder, welche zugleich einen Ton erzeugen sollen. Eine derartige Beschränkung der Anzahl Elemente bedingt dann nur, dass bei jedem Wechsel der Räder die Drahtverbindung bei den Klemmschrauben entsprechend geändert werden muss.

Die schematische Anordnung der Räder R , der Federn

F, der Elemente *P* und des Telephons *T* ist in Fig. 8 gegeben.

3. Verwendung der Inductionsströme. — In manchen Fällen wird es passender sein, das Telephon nicht durch primären Strom, sondern durch Inductionsstrom zu erregen; so z. B., wenn der Widerstand im Stromkreis ein grosser ist.

Da die Oeffnungsinductionsströme von kürzerer Dauer und grösserer Stärke sind als die Schliessungsinductionsströme, so müssen sich erstere ganz besonders dazu eignen, starke und reine Töne zu erzeugen. Ich habe diese Töne nicht genauer untersucht.

4. Das Zählwerk. — Um die Schwingungszahl eines Tones zu bestimmen, kann man verschieden verfahren. In jedem Falle aber wird man ausser der Zähnezahls des betreffenden Rades noch die Anzahl der Umdrehungen kennen müssen, welche die Axe in einer bekannten Zeit ausführt.

Zu diesem Zwecke trägt die Axe der Sirene eine Schraube ohne Ende, welche in ein Rad mit 150 Zähnen eingreift. An der Axe, welche dieses Rad trägt, und welche vertikal steht, ist oben noch eine weitere Scheibe befestigt. Diese ist auf ihrem Umfange in 400 gleiche Theile getheilt, sodass also zwei und ein halber Theil einer Umdrehung der Sirenenaxe entsprechen. Der Einfachheit wegen können die auf der Scheibe eingegrabenen Zahlen gleich die Zahl der Umdrehungen der Axe angeben. Die Axe der Scheibe hält zwei voneinander unabhängige Zeiger, welche beide über die Scheibe hinausragen und übereinander liegen. An Stelle der marketragenden Platte befinden sich zwei Schieber, welche gewöhnlich die beiden Zeiger anhalten. Zu Anfang einer bestimmten Secunde kann der eine der Zeiger durch den Schieber frei gemacht werden, und nun geht dieser mit der Scheibe herum. Nach einer ebenfalls beliebigen, aber zu bestimmenden Zeit kann auf dieselbe Weise der andere Zeiger frei gemacht werden, ohne dass wieder die Umdrehungsgeschwindigkeit der Axe im geringsten geändert würde. Der Abstand der beiden Zeiger in Verbindung mit

der bestimmten Zeit und Zähnezahl erlaubt die Bestimmung der Schwingungszahl.

5. Der Motor. — Die Sirenenaxe kann durch irgend einen Motor in Drehung versetzt werden. Ich benutzte zu meinen Versuchen gewöhnlich das Schwungrad eines Gas-motors. Es genügt also, dass zu diesem Zwecke am einen Ende der Axe eine Rolle mit Schnurlauf angebracht werde.

Die Sirene kann auch getrieben werden mit einem kleinen electrodynamischen Motor, wie z. B. mit dem Griscom-Motor, der kräftig genug ist, um eine Nähmaschine zu treiben. Die beiden Maschinen können nebeneinander auf einem gemeinschaftlichen Brett so befestigt werden, dass die Axe der einen in der Verlängerung der Axe der anderen liegt. Ein gabelförmiger Fortsatz der Axe des Motors greift in die Rolle, welche auf der Axe der Sirene festgemacht ist.

Endlich ist auf dieser nämlichen Axe noch ein Schwungrad angebracht, welches die Bewegung gleichförmig macht.

Dieser Motor in Verbindung mit der Sirene ist in Fig. 9 dargestellt.

Die Sirene wurde nach meinen Angaben von Hrn. Dr. M. Hipp, Director der Telegraphenfabrik in Neuenburg, gebaut, der auch geneigt ist, auf Bestellung hin noch weitere auszuführen.

II. Versuche und Ergebnisse.

6. Einfluss der Breite der Zähne. — Da die Zähne der Räder den Stromkreis jeweilen schliessen, und die mit isolirender Masse gefüllten Lücken denselben öffnen und offen halten, so folgt unmittelbar, dass die Breite der Zähne die Dauer des Stromschlusses bedingt, ebenso wie die Breite der Lücken die Dauer der Unterbrechung bestimmt. Aber wirklich bestimmend für die Bildung des Tones ist offenbar weder die Breite des Zahnes noch diejenige der Lücke, sondern nur das Verhältniss beider Breiten. Aus diesem Grunde habe ich vier Räder von gleicher Grösse und gleicher Zähnezahl schneiden lassen; es waren je 40 Zähne. Die vom Zahn und von der Lücke eingenommenen Räume waren aber verschieden bei

den einzelnen Rädern, und zwar standen sie im Verhältniss von 1:12 beim ersten Rad, von 3:12 beim zweiten, von 6:12 beim dritten, und von 9:12 beim vierten Rad.

Wenn die übrigen Versuchsbedingungen dieselben blieben, so gab jedes dieser 4 Räder denselben Ton nach Höhe und Stärke, aber die Töne waren verschieden nach ihrer Klangfarbe. Mit jedem der Räder ergab sich ein guter, angenehmer Ton, aber immer erklangen zum Grundton noch einige harmonische Obertöne.

So kommt zum Ton des vierten Rades, welcher den Eindruck eines starken und tiefen Tones macht, noch seine Octave und die Doppeloctave, d. h. also 2 Töne, deren Schwingungszahlen mit derjenigen des Grundtones im Verhältniss von 1:2:4 stehen. Von den beiden genannten Tönen ist besonders der erste Oberton stark.

Zu dem vom dritten Rad erzeugten Ton kommen hauptsächlich der erste und zweite harmonische Oberton (1:2:3); dabei ist die Oberquinte (1:3) stärker als die Octave (1:2). Der Gesammtton ist klarer als derjenige des vierten Rades.

Das zweite Rad ergab einen Ton, der mehrere leicht wahrnehmbare Obertöne enthielt: Zunächst kommt die Octave (1:2) nur schwach hinzu; am stärksten tönt die Oberquinte (1:3); sodann die Doppeloctave (1:4) und ferner noch die harmonischen Obertöne 1:5, und 1:6, und 1:8.

Der vom ersten Rad erzeugte Ton scheint höher zu sein als die anderen und dabei erheblich leiser. Die Octave des Grundtones ist nicht hörbar, hingegen ist die Doppeloctave (1:4) leicht wahrnehmbar.

Ich bin zu diesen nämlichen, durch das Gehör abgelesenen Ergebnissen auch durch die optische Methode gelangt. Zu letzterer Methode bediente ich mich eines grossen Telefons, dessen Magnet Stimmgabelform hat, und welches einen starken Ton gab. Auf dem Rand seines Mundstückes habe ich eine Manometerkapsel befestigt, wie solche H. König zum Studium der Luftschwingungen in Orgelpfeifen vorgeschlagen hat. Im Rotationsspiegel gesehen, haben die Flammen sehr charakteristische Formen, welche sich scharf von-

einander unterscheiden, wenn man die verschiedenen Räder einschaltet.

In jedem Falle bestand das Flammenbild aus einer Anzahl scharf und leicht ersichtlicher, identischer Gruppen. Jede Gruppe entspricht einer Schwingung des Grundtones. Dann bestand gewöhnlich jede dieser Gruppen aus vier weniger scharf abgegrenzten Zähnen; diese Zähne waren von verschiedener Länge, je nach dem Rad, dem dieselben entsprachen. — Das erste Rad ergab Zähne, welche alle gleiche Höhe, gleichen Werth hatten; der Gesammtton setzt sich also zusammen aus dem Grundton und dem Ton (1:4), d. i. der Doppeloctave. — Bei Verwendung der anderen Räder haben die Flammenzähne verschiedene Länge, indem z. B. der erste und dritte länger sind als der zweite und vierte, oder der zweite und dritte länger sind als der erste und vierte, und dabei zugleich der vierte der längste ist.

Im allgemeinen geben die Räder mit breiten Zähnen einen stärkeren, aber weniger reinen Ton als die Räder mit schmalen Zähnen.

7. Der einfache Sirenenton. — Wenn man die Sirene, die Elemente und das Telephon zusammenstellt, wie oben angegeben wurde, so gibt das Telephon leicht jeden irgend einem der Räder entsprechenden Ton, und die hohen Töne so leicht als die tiefen.

Wenn in denselben Kreis, für das nämliche Telephon, zwei oder mehr der Zahnräder eingeschaltet werden, so erhält man im Telephon entsprechend zwei oder mehr Töne.

8. Combinationstöne. — Dadurch, dass man in denselben Kreis zwei oder mehr Räder einschaltet, sendet man zwei oder mehr electriche Wellensysteme nach demselben Telephon; diese Wellensysteme werden interferiren wie es die Wellen im allgemeinen thun. Es wird daher neben den Hauptwellen noch eine Reihe von Wellen zweiter oder dritter Ordnung entstehen infolge dieser Interferenzen. Diese Wellen höherer Ordnung werden ebenfalls alle auf die Telephonplatte wirken und dadurch ihnen entsprechende Schallwellen erzeugen. Man erkennt so, dass man die Combinationstöne erhalten muss. Bekanntlich sind diese von

H. v. Helmholtz untersucht worden, und unterschied er zuerst die Differenztöne von den Summationstönen.

In der That enthält man mit einem grossen Telephon und einem Strom von 3 bis 4 Daniell für jedes Rad der Sirene genügend starke Grundtöne, um leicht einige der Combinationstöne herauszuhören. Diese Combinationstöne werden leichter wahrgenommen, wenn man die Grundtöne so wählt, dass die Combinationstöne in der mittleren Region der wahrnehmbaren Töne sich befinden, und wenn ausserdem die Combinationstöne mit den Grundtönen nicht im Einklang stehen. Nach einiger Uebung gelangt man dazu, auch die übrigen Combinationstöne aufzufassen.

Wenn man die Nummer des Sirenenrades mit einer römischen Zahl bezeichnet, und die Zähnezahl des entsprechenden Rades mit arabischen Ziffern darunter schreibt, so werden sich folgende Zahlen entsprechen:

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
24	27	30	32	36	40	45	48	54	60	64	72

und die Töne:

$$c_1 \quad d_1 \quad e_1 \quad f_1 \quad g_1 \quad a_1 \quad h_1 \quad c_2 \quad d_2 \quad e_2 \quad f_2 \quad g_2$$

werden Schwingungszahlen haben, welche das nämliche Vielfache der Zahlen der vorhergehenden Reihe sind; es sei p dieses Vielfache.

Im Folgenden gebe ich einige der leichter erhältlichen Ergebnisse:

1) Die Räder I und III geben die Grundtöne: $c_1 = p \cdot 24 = n_1$ und $e_1 = p \cdot 30 = n_2$.

Sie erzeugen die Combinationstöne:

$$C_1 = p \cdot 6 = p(n_2 - n_1), \quad G = p \cdot 18 = p(2n_1 - n_2), \\ d_2 = p \cdot 54 = p(n_1 + n_2), \quad a_1 = p \cdot 40.$$

2) In gleicher Weise erzeugen die Räder I und VII die Grundtöne $c_1 = p \cdot 24 = n_1$ und $h_1 = p \cdot 45 = n_2$, sowie die Combinationstöne $ais = p \cdot 21 = p(n_2 - n_1)$, und $ges_2 = p \cdot 69 = p(n_1 + n_2)$.

3) Die Räder III und VII ergeben $e_1 = p \cdot 30 = n_1$, $h_1 = p \cdot 45 = n_2$, und $E = p \cdot 15 = p(n_2 - n_1)$, $gis_2 = p \cdot 75 = p(n_2 + n_1)$.

4) Die Räder V und VIII ergeben $g_1 = p \cdot 36 = n_1$ und $c_2 = p \cdot 48 = n_2$; sodann noch $C = p \cdot 12 = p(n_2 - n_1)$, $c_1 = p \cdot 24 = p(2n_1 - n_2)$, $(ais_2) = p \cdot 84 = p(n_1 + n_2)$.

5) Die Räder I und IX geben $c_1 = p \cdot 24 = n_1$ und $d_2 = p \cdot 54 = n_2$; sodann die Töne $e_1 = p \cdot 30 = p(n_2 - n_1)$, $C = p \cdot 6 = p(n_2 - 2n_1)$, $(as_2, a_2) = p \cdot 78 = p(n_1 + n_2)$.

6) Die Räder I und X ergeben $c_1 = p \cdot 24 = n_1$ und $e_2 = p \cdot 60 = n_2$; ferner noch $g_1 = p \cdot 36 = p(n_2 - n_1)$, $c_2 = p \cdot 48$, $(ais_2) = p \cdot 84 = p(n_1 + n_2)$.

7) Die Räder I und XI geben $c_1 = p \cdot 24 = n_1$, und $f_2 = p \cdot 64 = n_2$, sowie ferner $a_1 = p \cdot 40 = p(n_2 - n_1)$, $c_2 = p \cdot 48$, und $(b_2, h_2) = p \cdot 88 = p(n_2 + n_1)$.

8) Die Räder I und XIII geben $c_1 = p \cdot 24 = n_1$ und $a_2 = p \cdot 80 = n_2$, und weiter $(d_2, dis_2) = p \cdot 56 = p(n_2 - n_1)$, $f_1 = p \cdot 32 = p(n_2 - 2n_1)$, $c_2 = p \cdot 48 = p\{n_2 - (n_2 - 2n_1)\}$, $a_1 = p \cdot 40$, $(des_3, d_3) = p \cdot 104 = p(n_2 + n_1)$.

9) Die Räder I und XIV geben $c_1 = p \cdot 24 = n_1$ und $g_1 = p \cdot 90 = n_2$, sowie $(f_2) = p \cdot 66 = p(n_2 - n_1)$, $(ais_1) = p \cdot 42 = p(n_2 - 2n_1)$, $G = p \cdot 18 = p(n_2 - 3n_1)$, $(dis_3, es_3) = p \cdot 114 = p(n_2 + n_1)$.

10) Die Räder I und XVI ergeben $c_1 = p \cdot 24 = n_1$ und $d_3 = p \cdot 108 = n_2$, sowie $(ais_2) = p \cdot 84 = p(n_2 - n_1)$, $e_2 = p \cdot 60 = p(n_2 - n_1)$, $g_1 = p \cdot 36 = p(n_2 - 3n_1)$, $(fis_3) = p \cdot 132 = p(n_2 + n_1)$.

11) Die Räder I und XVII geben $c_1 = p \cdot 24 = n_1$ und $e_3 = p \cdot 120 = n_2$, ferner $c_3 = p \cdot 96 = p(n_2 - n_1)$, $g_2 = p \cdot 72 = p(n_2 - 2n_1)$, $c_2 = p \cdot 48 = p(n_2 - 3n_1)$.

12) Die Räder XIV und XVII geben $c_3 = p \cdot 96 = n_1$ und $e_3 = p \cdot 120 = n_2$, und noch den Combinationston $c_1 = p \cdot 24 = p(n_2 - n_1)$ u. s. w.

In diesem letzteren Fall waren die hohen Grundtöne nur schwach, wenn die gewöhnliche Drehgeschwindigkeit beibehalten wurde; der Differenzton erster Ordnung dagegen erklang sehr stark, sogar viel stärker als die Grundtöne.

Aber nicht nur die Combinationstöne zweier Grundtöne lassen sich untersuchen, sondern auch diejenigen für drei oder mehr Grundtöne. Ein vorläufiger Versuch lehrt schon,

dass die Combinationstöne dann sehr zahlreich werden, dabei eine verhältnissmässig grosse Intensität erlangen, und die Grundtöne dagegen schwächer erklingen.

Vorläufig gedenke ich auf diesen Theil der Untersuchung später zurückzukommen.

9. Physiologische Frage. — Unter den Physiologen war es lange eine offene Frage, ob die Combinationstöne wirklich und ausserhalb des Gehörorganes existiren, oder ob dieselben nur eine Gehörempfindung sind, welche im Gehörorgan infolge gewisser mechanischer Störungen entstehen.

H. v. Helmholtz¹⁾ hat im Jahre 1856 eine Theorie der Combinationstöne gegeben, welche von physiologischen Fragen unabhängig ist. Dieser Theorie hat er auch einen experimentellen Nachweis für das objective Vorhandensein der Combinationstöne gegeben, indem er nachwies, dass eine passend gespannte Membran mit dem Combinationston im Einklang zum Schwingen gebracht werden kann.

Die mit der Sirene angestellten Versuche, über welche in § 8 berichtet wurde, geben einen neuen und kürzeren Beweis für die Richtigkeit der v. Helmholtz'schen Ansicht; denn, wenn wir aus dem Telephon einen Ton hören, so muss er von wirklichen Schwingen der Platte erzeugt, der Luft mitgetheilt und uns zum Bewusstsein gebracht werden.

Neuchâtel, im Juni 1884.

1) v. Helmholtz, Pogg. Ann. 99. p. 497. 1856.

Berichtigungen.

- Bd. XIX. (C. Christiansen) p. 273 Z. 7 u. 8 lies ϕ statt θ .
 „ XXI. p. 368 Z. 26 lies „ statt 11°.
 „ XXIII. p. 303 Z. 6 lies 0,06 statt 0,6.
-