

2. Über den Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe; von Franz Lindig.

[Auszug aus der Kieler Dissertation, I. Teil¹⁾.]

Historischer Überblick und Ergebnisse der Arbeit.

Die Frage, ob beim Zusammenklingen mehrerer Töne deren gegenseitiger Phasenunterschied die Klangfarbe beeinflusse, ist zum ersten Male von H. v. Helmholtz aufgeworfen worden und seitdem der Gegenstand vieler Forschungen gewesen. Ihre Lösung hat sowohl für die Physik, wie auch für die Physiologie die größte Bedeutung; denn von ihrer Beantwortung hängt die Entscheidung ab, wie man die Gehörempfindungen erklären bez. den menschlichen Gehörapparat in seinen einzelnen Teilen deuten will.

Hat die Phase keinen Einfluß auf die Klangfarbe, so reagiert das Ohr nur auf die *einzelnen Sinusbestandteile* der zusammengesetzten Schallwelle; *hat sie aber Einfluß*, so kommt *auch die Form der Gesamtwelle* bei der Wahrnehmung zu Gehör. Danach wird sich also auch die Vorstellung über unseren Gehörapparat modifizieren müssen.

Die Literatur über diesen Gegenstand beginnt mit den grundlegenden Arbeiten von v. Helmholtz²⁾ aus den Jahren 1863 und folgenden.

Daran schließen sich später die Untersuchungen von Dr. R. König³⁾, Lord Kelvin⁴⁾ und Prof. L. Hermann⁵⁾. Helmholtz und Hermann fanden keine Wirkung der Phasen auf die Klangfarbe; König und Lord Kelvin kamen zum

1) Der Fakultät eingereicht im Mai 1902.

2) H. v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen I. Aufl. p. 190 f. 1863.

3) R. König, Quelques Experiences d'Acoustique p. 218 f. Paris 1882; Wied. Ann. 14. p. 369 f. 1881; 57. p. 555. 1896.

4) Lord Kelvin, Proc. of the Roy. Soc. of Edinb. 9. p. 602. 1878.

5) L. Hermann, Pflüger's Arch. 56. p. 467 f. 1894; Wied. Ann. 58. p. 391 f. 1896.

entgegengesetzten Resultat. Schon dieser Gegensatz zeigt, daß es nicht überflüssig ist, die Frage noch einmal wieder aufzunehmen.

Die *historische Entwicklung* ist im näheren kurz folgende:

1. H. v. Helmholtz entschied die Frage des Phaseneinflusses bezüglich der Klangfarbe der Vokale, die er sich durch eine Reihe elektrisch erregter Stimmgabeln mit davorstehenden cylindrischen Resonatoren erzeugte.

Durch Schwächung der Resonanz oder durch direkte Verstimmung der Stimmgabeln wurden die Phasenunterschiede der einzelnen komponierenden Töne eines Vokales geändert und die Klangfarbe in allen Fällen untersucht.

Helmholtz fand, daß die Klangfarbe der Vokale stets die gleiche blieb und schloß so auf die Einflußlosigkeit der Phasen überhaupt.

Hiergegen ist eingewendet worden, daß erstens mit der Phasenänderung eine Tonhöhenänderung Hand in Hand gegangen sei, und daß zweitens die Verallgemeinerung der Resultate der Vokalfrage nicht unbedingt zugegeben zu werden brauche. Immerhin konnte auch durch die beim Umstellen der Apparate verstrichene Zeit eine kleine Klangfarbenänderung der Beobachtung entgehen.

Diese Gründe machten weitere Untersuchungen über den Gegenstand erwünscht.

2. R. König prüfte die Wirkung der Phasen durch seine Wellensirene. Diese hat zur Voraussetzung, daß eine einfache Sinuskurve, wenn sie als Rand einer runden Blechscheibe ausgeschnitten, während deren Rotation angeblasen wird, auch die Luft in einfache Sinusschwingungen versetzt.

König ließ demnach mehrere solcher Scheiben mit verschieden vielen Sinusperioden zugleich um dieselbe Achse rotieren und durch einzelne Spalte anblasen; dann veränderte er die Lage der einzelnen Spalte und dadurch die Phasen zwischen den Tönen.

In dieser Weise ergaben sich beträchtliche Klangunterschiede. Die Gewährleistung für die richtige Deutung dieser Versuchsergebnisse hängt davon ab, ob wirklich die Wellensirene die geforderten Bedingungen genau erfüllt. Hr. Dr. König gibt aber selbst in einer späteren Untersuchung

über die Leistungsfähigkeit der Sirene¹⁾ zu, daß „die durch Anblasen einfacher Sinuskurven erzeugten Töne bei geringer Intensität und mittlerer Tonhöhe von einer leisen Oktave begleitet seien, bei noch größerer Tiefe auch wohl von einer noch leiseren Duodezime“. Bei sehr großer Intensität waren sogar Obertöne bis zum fünften zu hören.

Ähnliche Ergebnisse haben auch die gleichzeitigen Untersuchungen von Hrn. Prof. C. Stumpf²⁾ gehabt.

Eine zweite Methode Königs, die Wellensirene zur Entscheidung der Phasenfrage zu benutzen, bestand darin, daß er Kurven konstruierte, die eine Grundschwingung und bestimmte Reihen von Obertönen mit festgewählten Amplituden- und Phasenverhältnissen darstellten. Wurden auch diese Kurven, jede als Rand einer runden Blechscheibe ausgeschnitten und angeblasen, so gaben sie je nach den darin gewählten Phasenverhältnissen, d. h. je nach der Form der Welle, ganz verschiedene Klangfarben. Hierdurch wird das oben gefundene Resultat bestätigt.

Doch auch hier möchte man zweifeln, ob wirklich die Luft durch die Kurven in genau solche Schwingungen versetzt wird, die der Zahl, den Amplituden und den Phasen der Sinusbestandteile des dargestellten Wellensystems entsprechen.

Sobald beim Rotieren und Anblasen der Blechscheiben auch andere Obertöne als die gewünschten, oder diese mit anderer Amplitude und Phase auftreten, ist die Entscheidung der Phasenfrage durch diese Methode in Zweifel gestellt.

Dieser Einwand scheint in der Tat berechtigt, wenn man die Ergebnisse einiger weiterer Untersuchungen von Hrn. Prof. Stumpf berücksichtigt. Er gibt dort³⁾ an, daß er in den Klängen der beiden Kurven Königs, die nur die vier ersten ungeradzahligen Teiltöne erzeugen sollten, auch, zwar schwächer, die drei ersten geradzahligen durch Schwebungen habe nachweisen können. Ferner hätten zwei Kurven, die sich nur durch die Phasen der Komponenten unterscheiden sollten, beim Anblasen schon für das bloße Ohr erkennen lassen, daß die

1) R. König, Wied. Ann. 57. p. 339 f. 1896.

2) C. Stumpf, Wied. Ann. 57. p. 677 f. 1896.

3) C. Stumpf, l. c. p. 678.

relative Intensität der Obertöne in beiden wesentlich verschieden sei.

Demnach hält Hr. Prof. Stumpf die bei der Königschen Methode auftretenden Klangveränderungen für wohl vereinbar mit dem Helmholtzschen Erklärungsprinzip für Klangfarbenunterschiede.

3. An dritter Stelle möchte ich die Untersuchungen von Hrn. Prof. L. Hermann anführen. Er benutzte dazu in erster Linie den neuen Edisonschen *Phonographen*.

Sowohl durch zeitliche Umkehrung des Vorganges (Abszissenumkehr), als auch durch räumliche, d. h. solche, bei der Berg und Tal des aufgezeichneten Kurveindruckes sich vertauschten (Ordinatenumkehr), veränderte er die Phasenverhältnisse aller auftretenden Klänge gänzlich. Trotzdem blieb die Klangfarbe unverändert erhalten; also ist hier die Phasenfrage wiederum im Sinne der alten v. Helmholtzschen Ergebnisse entschieden. Einwände, wie gegen die früheren Methoden, lassen sich hier nicht machen.

Nur wäre zu sagen, daß diese Versuche die Frage nicht an einem einfachen Falle entscheiden, wo alle Bedingungen klar auf der Hand liegen. Sie benutzen nicht bestimmte Phasenverschiebungen, die zu regeln in unserer Macht läge, sondern wie einmal durch die Abszissen- oder Ordinatenumkehr die Phasen „durcheinander geworfen“ werden (nach Hrn. Prof. Hermanns eigenen Worten), so müssen wir sie hinnehmen, ohne etwa in systematischer Weise den allmählichen Übergang studieren zu können.

Es wäre jetzt nötig, auf alle die Versuche einzugehen, die die Phasen durch die Erscheinungen bei verstimmten Stimmgabelintervallen, namentlich dem der Oktave, entscheiden. Versuche derart sind außer von den bisher genannten Forschern auch von Lord Kelvin angestellt worden. Auf sie werde ich erst in einem zweiten, später folgenden Teile im Zusammenhang mit eigenen diesbezüglichen Untersuchungen eingehen.

Aus dem geschichtlichen Überblick ist zu ersehen, daß die Phasenfrage noch durchaus nicht als endgültig erledigt zu betrachten ist. Wichtig ist, daß sich aus den bisherigen Arbeiten über diesen Gegenstand mit größerer Sicherheit die *Bedingungen* gewinnen lassen, die man für eine exakte, syste-

matistische Behandlung der Frage an die dabei verwendete *Tonquelle* stellen muß. Diese muß erstens *in ihren einzelnen Tonbestandteilen nach Zahl und Phasen genau bekannt* sein; zweitens muß man *jede Phasenverschiebung* der Wellensysteme genau *zu kontrollieren* und *nach Belieben direkt herbeizuführen* im stande sein.

Der von mir benutzte Apparat entspricht allen aufgestellten Bedingungen vollkommen; er entstand durch geeignete Abänderungen einer im hiesigen Institut vorhandenen Weber-Karstensen *Telephonsirene*. Auf die Verwendung absolut reiner Töne¹⁾ wird dabei von vornherein verzichtet, dagegen wird die Intensität der vorhandenen Obertöne in sehr weiten Grenzen variiert.

Dabei zeigt sich, daß große Klangfarbenunterschiede bei den Phasenverschiebungen dann auftreten, wenn gewisse Obertöne in großer Intensität vorhanden sind, daß dagegen mit Verminderung der Intensität dieser Obertöne auch jene Klangfarbenunterschiede geringer werden, um schließlich ganz wegzufallen, wenn entweder gerade jene bestimmten Obertöne nicht in dem Klange enthalten sind, oder überhaupt die Obertöne alle an die Grenze des Verschwindens gebracht worden sind und also angenähert reine Töne zusammenklingen.

Diese Versuche werden an einer großen Zahl von Intervallen und mit vielen Variationen in Bezug auf die Obertöne durchgeführt.

Die beim Vorhandensein von Obertönen auftretenden Klangunterschiede verschiedener Phasenstellungen werden dabei in allen Fällen als das Resultat gegenseitiger Verstärkung, bezüglich Vernichtung einzelner oder mehrerer beiden Klängen gemeinsamer Obertöne erklärt. Andere Klangfarbenunterschiede, als die so durch Interferenz vorhandener Obertöne erklärlichen, waren niemals zu beobachten.

Apparate.

Die von Dr. L. Weber (jetzt Prof. L. Weber-Kiel) konstruierte und von Prof. Karsten technisch vervollkommnete

1) Es soll hier und im folgenden stets die Terminologie gebraucht werden, daß die Ausdrücke: „einfache Töne, reine Töne, einfache (reine) Sinusschwingungen“, identisch gebraucht werden. Klang wird als Grundton mitsamt Obertönen gefaßt.

Telephonsirene¹⁾ diene zur Erläuterung der Wirkung des Telephons. Sie besteht aus einer mit kleinen Magneten radial besetzten Messing- oder Pappscheibe, die in Umdrehung versetzt wird, während ein von der Membran befreites Telephon ihrem Rande genähert ist.

Man hört dann in einem zweiten, mit jenem ersten verbundenen Telephon einen Ton, dessen Schwingungszahl sich aus dem Produkt der Umdrehungszahl der Scheibe und der Anzahl der Magnete ergibt. Als Laufapparat diene Gestell und Uhrwerk des Kohlrauschschen Sinusinduktors.²⁾

Ich wählte bei meinen Untersuchungen zwei wesentlich verschiedene Anordnungen der Magnete auf den Scheiben, und zwar ordnete ich sie so, daß sie entweder alle den gleichen Pol nach außen kehrten, oder abwechselnd einen Nord- und einen Südpol. Jene Lage nenne ich die der Gleichpole, diese die der Wechselfole.

Die Gleichpole geben durch ihre Zahl auch die Zahl der Stromstöße während einer Umdrehung der Scheibe. Die Wechselfole dagegen geben nur halb so viele Stromstöße, als ihre Zahl beträgt. Also erhält man hier einen Ton, der die tiefere Oktave von dort ist.

Durch verschieden viele Magnete und durch Änderung der Rotationsgeschwindigkeit lassen sich ziemlich weite Grenzen für die Tonhöhen ziehen.

Statt des membranlosen Telephons verwandte ich fast immer als Stromempfänger Spulen von umsponnenem Kupferdraht, die um einen Kern von ausgeglühten Eisendrähten gewickelt waren. Dies gibt nicht minder starke Töne und man vermeidet dadurch die immerhin recht umfangreichen Bellschen Telephone. Auch macht diese Anordnung den Verlauf der Kraftlinien und Ströme bei Wechselfolen wesentlich übersichtlicher, da sich die unmagnetischen Kerne zu jedem vorbeistreichenden Pole gleich verhalten, während die Magnete der Telephone einmal in ihrem Magnetismus geschwächt, und dann wieder gestärkt werden.

1) G. Karsten, Schriften d. nat. Vereins f. Schleswig-Holstein 3. 2. Heft, p. 27 ff. Kiel 1879.

2) F. Kohlrausch, Pogg. Ann., Jubelbd., p. 290 f. 1874.

Mehrere membranlose Telephone oder Spulen mit Kernen verstärken sich offenbar in ihrer Wirkung auf das hörende Telephon, wenn sie gleichzeitig die gleiche Stellung zu den Magnetpolen einnehmen. Daher verwandte ich fast immer vier stromaufnehmende Spulen mit Kernen und verband je zwei zu einem einheitlichen System.

Um ferner die Phase zwischen den ins Telephon gelangenden Tönen jederzeit beliebig ändern zu können, brauchte ich nur das eine Elektromagnetsystem beweglich anzubringen.

Bisher war von Versuchen mit nur einer Scheibe die Rede. Für akustische Untersuchungen wertvoll gestaltet sich der Apparat erst dann, wenn wir zwei Scheiben auf derselben Achse rotieren lassen. So kann durch eine andere und andere Zahl von Magneten auf jeder der Scheiben jedes gewünschte harmonische oder unharmonische Intervall auf der Membrane des hörenden Telephons erregt werden; und durch die Verschiebung des einen Elektromagnetsystems gelingt es, die Phasen der Bestandteile des Intervalles beliebig gegeneinander zu verändern.

Die nötigen Scheiben stellte ich mir aus dünnem Aluminiumblech her. Auf diese wurde mit dem Zirkel die gewünschte Winkelteilung des Kreises eingeritzt und dann die kleinen 3 cm langen prismatischen Stabmagnete mittels Klebwachs radial, in gleicher Entfernung vom Mittelpunkt, aufgeklebt.

Sobald das Klebwachs erhärtet war, vermochte selbst bei sehr großen Umdrehungsgeschwindigkeiten (50—60 pro sec) die Zentrifugalkraft nicht die Magnete aus ihrer Stellung zu entfernen.

Demnach erhielt *der Hauptteil des Apparates* die in Fig. 1 angegebene Gestalt. Die Uhrwerkteile sind, da sie aus Kohlrauschs Beschreibung seines Sinusinduktors hervorgehen, fortgelassen. Ebenso hätten die Verbindungsdrähte der Spulen untereinander und mit dem Telephon die Zeichnung nur verwirrt; übrigens habe ich im allgemeinen bei Hintereinanderschaltung sämtlicher Apparateile gearbeitet.

Das feste Elektromagnetsystem E_1 befindet sich rechts. Die Kerne der Spulen, bestehend aus 8 cm langen, 0,7 mm dicken, ausgeglühten Eisendrähten, sind durch zylindrische Korke gelassen. Der Spulendraht selbst besteht aus seide-

umsponnenem Kupferdraht von 0,2 mm nackter Drahtdicke; jede Spule trägt ungefähr 1200 Windungen. Die Durchlaßkorke sind auf einem kreisförmig gebogenen Gabelstück von 3 mm dickem Messingdraht verschiebbar angebracht. Das Gabelstück endigt an der Messingröhre R , die zur Zentrierung des Gabelbogens vor und zurückgezogen werden kann und in dieser Lage festgeschraubt wird. Das ganze System E_1 kann in dem festen Endstück A_1 höher oder niedriger, je nach der Höhe der rotierenden Scheibe, festgeklemmt werden.

Durch diese Anbringung der Elektromagnete ist es mir gelungen, diese ohne jede Mühe sowohl vor oder zurückzuziehen, wie es der jeweilige Durchmesser der Scheiben verlangt, als auch auf dem Gabelbogen seitlich zu verschieben, damit sie in die gewünschte Lage zu den bald dicht, bald weniger dicht stehenden Magneten der Scheiben kommen, ohne etwas von ihrer Radialstellung einzubüßen. Der Kreisbogen des Gabelstückes bleibt natürlich ein für allemal so stehen, daß sein gedachter Mittelpunkt mit dem der rotierenden Scheibe zusammenfällt.

Das bewegliche Elektromagnetsystem E_2 hat seinen Stütz- und Drehpunkt oberhalb des übrigen Apparates, senkrecht über der Achse der rotierenden Scheiben. Ein eisernes Stativ, das mit der Plattform des alten Sinusinduktors fest verschraubt ist, trägt an zwei Armen einen messingenen Halter H mit dem drehbaren Arme A_2 . In dessen unteres Ende wird der Fuß des zweiten Gabelstückes mit dem Elektromagnetsystem E_2 eingelassen und in der gewünschten Höhe festgeklemmt. Die

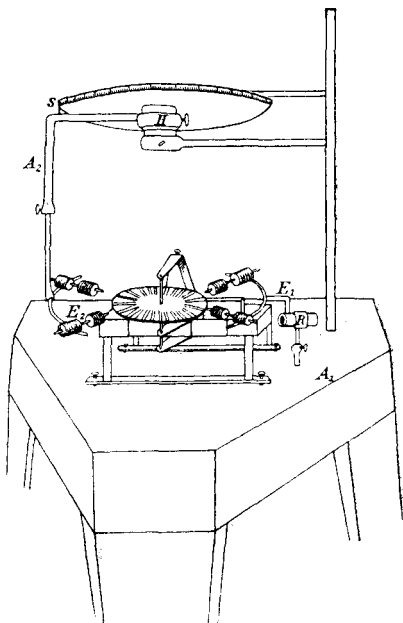


Fig. 1.

Die Telefonsirene.

Elektromagnete sind hier ebenso wie bei dem System E_1 vermitteltst je eines Korkes angebracht.

Zum Zwecke genauerer Messungen der Phasenverschiebungen, die durch Drehung des Armes A_2 und damit auch der Elektromagnete E_2 vor der Scheibe hervorgebracht werden, trägt der Arm A_2 noch an seiner Biegung eine feine Nadelspitze s , die dicht vor einer Millimeterskala entlang streicht.

Diese Skala endlich auf einem genau kreisförmig gebogenen Pappstreifen, der durch eine dicke Pappscheibe von 110,8 mm Radius in zentrischer Lage gehalten wird und mit dem unbeweglichen Teile des Armes A_2 , d. h. mit dem Halter H , fest verbunden ist, läuft um die ganze Kreisperipherie herum.

Da jedoch der Spielraum für den Arm A_2 und sein Elektromagnetsystem nur ungefähr $\frac{2}{3}$ Umdrehung betrug, so kam auch nur dieser Teil der Skala für die Messungen in Betracht; er ging demnach von 0 bis 400. Ein Skalenteil (1 mm) entspricht einer Drehung des Armes A_2 um einen halben Grad oder genauer 31,03'.

Durch den ziemlich großen Spielraum des beweglichen Elektromagnetsystems konnte ich bei meinen Untersuchungen die Wellensysteme stets fortschreitend so weit gegeneinander verschieben, daß sie mehrere Male nacheinander alle Phasenzustände durchliefen. Die Gesetzmäßigkeit der Klangveränderungen tritt hierbei offenbar viel sicherer hervor, als wenn die Drehung des Armes A_2 nur so groß wäre, daß die Phasen nur einmal sämtlich durchlaufen würden. In dem Falle könnten Klangveränderungen während der Phasenverschiebung auch in Apparatfehlern ihren Grund haben. Schließlich hatte ich noch einen Stromwender am Apparat angebracht, um jederzeit bequem den Strom eines Elektromagnetsystems umkehren zu können. Da das ganze Stativ des alten Sinusinduktors aus sehr festem, dickem Holz hergestellt ist, so habe ich von etwaigen Erschütterungen der einzelnen Apparatteile, und dadurch herbeigeführten Unsicherheiten in den Resultaten nichts zu leiden gehabt. Auch die Befestigung der Elektromagnete durch Kork erwies sich als gut und zweckmäßig.

Durch Versuche wird sich zeigen, daß es von Wichtigkeit ist, auf einer Scheibe nur Magnete von gleicher Polstärke zu

haben, ich verglich daher häufig, gewöhnlich alle drei Tage, die Magnete mit Hilfe eines als Magnetometer benutzten Quinckeschen Spiegelgalvanometers. Die Magnete besaßen prismatische Gestalt; das Verhältnis ihrer rechtwinklig aneinanderstoßenden Kanten war in Centimetern: 3:0,3:0,3. Jeder Magnet wog durchschnittlich 2,2 g. Auf einer 100 cm vom Magnetometer entfernten Skala riefen die Magnete bei einem Abstand von 22 cm von der Magnetometernadel einen Ausschlag von 4,0 bis 7,2 cm hervor. Danach beträgt also für einen Magneten das Moment 20—25 [C.G.S.]-Einheiten. Ich stellte mir im ganzen etwa 100 Magnete her, um jederzeit eine genügende Anzahl gleich starker Magnete zur Verfügung zu haben; denn trotz allen Nachmagnetisierens stellte sich bei jedem Magneten nach einiger Zeit doch eine ihm eigene, konstante Polstärke ein. Mit den so hergestellten Magneten besetzte ich die verschiedenen Aluminiumscheiben, und zwar wählte ich solche mit 3, 4, 5, 6 etc. bis zu 32 Magneten. Der Durchmesser der Scheiben wechselte demnach zwischen 8, 10 und 12 cm. Die Tonhöhen der Grundtöne lagen, der Zahl der Magnete und der Rotationsgeschwindigkeit der Scheiben entsprechend, zwischen 30 und 600 Doppelschwingungen. Dabei betrug die Belastung des Uhrwerkes 5—32 kg. Sehr schön ist beim langsamen Anlaufen des Apparates das allmähliche Übergehen einzelner Stöße in einen zuerst sehr tiefen Ton im Telephone zu beobachten. Als Telephone verwandte ich meistens zwei Siemenssche; sie zeigten sich empfindlicher als die alten von Bell.

Grundversuche.

Meine Grundversuche hatten kurz folgende Resultate:

1. Ich hörte bald, daß die durch die Telefonsirene gelieferten Töne nicht rein seien, sondern begleitet von einer Reihe harmonischer Obertöne. Je mehr Magnete sich auf einer Scheibe befanden, und je schneller diese rotierte, umsomehr traten auch die Obertöne an Intensität gegenüber dem Grundtone zurück.¹⁾

1) Bei Berücksichtigung dieses Umstandes dürfte kein Widerspruch bestehen zwischen dem obigen und der Angabe Karstens (l. c.), daß die Telefonsirene reine Töne gebe.

2. Stellte ich durch Drehen des beweglichen Elektromagnetsystems Phase $\frac{1}{2}$ zwischen den in das Telephon gelangenden Wellensystemen her, so erlosch bei Wechseelpolen die ganze Klangmasse, bei Gleichpolen aber trat dann die Oktave stark hervor. Dies führt zur Vermutung, daß dort die Oktave nicht, hier jedoch sehr wohl vorhanden war. Diese sehr wichtige Tatsache wird unten experimentell und theoretisch weiter begründet werden.

Phase $\frac{1}{2}$ ist bei Wechseelpolen die Stellung, wo die halbe Anzahl der Spulen von Südpolen steht, während die andere Hälfte vor Nordpolen sich befindet, und bei Gleichpolen die, wo die halbe Zahl der Spulen aus der Polgegenüberstellung in die Mitte zwischen zwei Pole verschoben ist.

3. Durch Stromumkehr eines Elektromagnetsystems erlosch sowohl bei Wechseelpolen, wie auch bei Gleichpolen der ganze Klang. Hieraus folgt, wie dies in der Dissertation näher ausgeführt ist, daß die Oberschwingungen des Stromes und damit auch die Obertöne des Klanges nur in Phase 0 oder $\frac{1}{2}$ zur Grundschwingung bez. zum Grundtone stehen können. Auch dies wird noch weiter untersucht werden. Übrigens haben wir in der Auslöschung der Klänge bei Stromumkehr ein sehr einfaches Mittel gefunden, die Elektromagnetsysteme genau auf Phase 0 zueinander einzustellen. Denn es wird unserem Ohr in allen Fällen viel leichter sein, den Punkt genau zu bestimmen, wo ein Klang gänzlich erlischt, als den, wo alle Bestandteile des Klanges ihre größte Intensität zeigen. Daher habe ich später die Stromumkehr viel zur scharfen Einstellung auf Phase 0 benutzt.

Nach diesen Grundversuchen kam es vor allem darauf an, zu ermitteln, welche Obertöne in jedem einzelnen Falle neben dem Grundton mit erregt wurden. Von etwaigen Eigentönen des Telephons war ich bei meinen Versuchen ganz unabhängig, da ich es durch Veränderung der Magnetzahl und der Rotationsgeschwindigkeit der Scheiben ganz in der Hand hatte, den Versuch in einer bis zu gewissen Grenzen beliebigen Tonhöhe auszuführen.

Ermittlung der in den Klängen auftretenden Obertöne.

Die Ermittlung der Obertöne in den Klängen der Telefonsirene bewerkstelligte ich in folgender einfachen Weise:

Da mein Apparat die Phasenverschiebung direkt gestattete, so habe ich denselben Klang zweimal in allmählich veränderter Phase auf der Membran des Telephons erzeugt. Die beiden Wellensysteme superponieren sich dadurch und nach der jeweiligen Phase erlischt der fragliche Oberton oder tritt stärker hervor. Bei der Verschiebung um eine ganze Phasenperiode wird jeder Teilton von der Teilzahl n (Grundton als Teilton 1 mitgerechnet) gerade n mal ausgelöscht und verstärkt. Durch Rechnung läßt sich ferner leicht finden, bei welcher Phasenstellung gerade die Verstärkung, bei welcher die Auslöschung stattfinden muß. Ich fixierte also, während sich beide Elektromagnetsysteme vor derselben Scheibe, und zwar in Phase 0 zueinander befanden, einen bestimmten Oberton im Klange des Telephons, verschob dann das bewegliche System gegen das andere, sodaß sich die beiden gleichen Tonwellen in immer anderer Phase auf der Membran des Telephons superponierten, und zählte, wie viele Male der beobachtete Ton während der Verschiebung um eine ganze Phasenperiode des Grundtones verschwand. Hatte ich so oberflächlich die Existenz des Tones ermittelt, so wiederholte ich den Versuch in der Weise, daß ich nun während der Verschiebung an der Skala die Stellen der Auslöschung des fraglichen Tones ablas und notierte. Die Zahlen müssen zusammen mit den Phase-0-Stellen die durch Rechnung gefundenen Werte ergeben. Das Gebiet der Auslöschung betrug für die einzelnen Obertöne immer mehrere Skalenteile. Die angegebenen Zahlen sind Mittelwerte von je vier Einzelbeobachtungen, die ich so anstellte, daß ich mich der Auslöschungsstelle abwechselnd von der einen oder anderen Seite her näherte.

Aus der größeren Versuchsreihe, die in der Dissertation angegeben ist, sei hier nur ein Beispiel angeführt:

Scheibe mit 12 Magneten in Wechseipolstellung. Ermittlung des Teiltone 3 (Duodezime).

Der beobachtete Ton wurde während der Verschiebung um eine ganze Phasenperiode dreimal ausgelöscht, und

zwar ergaben sich als Auslöschungsstellen der Duodezime die Zahlen :

beobachtet	98,5	136,5	174,5	211	253	290,5
berechnet	98,3	136,9	175,5	214,1	252,6	291,2

Phase 0 war beobachtet bei 80, 197, 312.

Also war der gehörte Oberton in der Tat die Duodezime.

In gleicher Weise wurden auch die Versuche bei Gleichpolen ausgeführt. Es sind Obertöne bis zum sechsten und siebenten beobachtet worden; als allgemeines Resultat der ganzen Reihe solcher Versuche hat sich ergeben:

Die Telefonsirene erzeugt bei gleichliegenden Polen der Scheibenmagnete die ganze Reihe der harmonischen Obertöne, bei Wechseipolen nur die ungeraden Teiltöne. Je mehr Magnete auf den Scheiben verwandt werden, umsomehr treten die Obertöne gegenüber dem Grundton an Stärke zurück, und zwar geschieht dies schneller bei Gleichpolen, als bei Wechseipolen. Im Falle von 32 Magneten waren für beide Polanordnungen keine Obertöne mehr zu konstatieren.

Der Induktionsvorgang.

Bisher habe ich den Vorgang bei der Telefonsirene lediglich nach der akustischen Seite hin betrachtet. Es ist daher jetzt erforderlich, den Verlauf auch nach seiner genetischen Seite zu beschreiben, d. h. durch die Gesetze der elektromagnetischen Induktion zu erklären, wie der Stromverlauf unter den jeweiligen Verhältnissen sich gestaltet, und welche Töne danach zu erwarten sind.

Der einfache Satz, der für diese Betrachtung anzuwenden ist, ist der, daß die induzierte elektromotorische Kraft proportional der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinienzahl ist. Hierbei sei den Kraftlinien eine bestimmte Richtung als positiv zugeschrieben. Man hat also die Gleichung:

$$e = C \cdot \frac{dN}{dt},$$

wo N = Kraftlinienzahl, t = Zeit, C = Proportionalitätsfaktor.

Es mögen sich zunächst *Wechselfole* auf der rotierenden Scheibe befinden und ihnen ein Elektromagnet gegenüberstehen. Dann sieht man leicht

1. die Polgegenüberstellung bewirkt einen Nullwert der elektromotorischen Kraft, weil dort $N = \text{Maximum}$; vor und hinter dem Pole hat e entgegengesetztes Vorzeichen, denn abnehmende Kraftlinienzahl gibt die umgekehrte Stromrichtung, wie zunehmende, falls die Kraftlinien ihre Richtung behalten.

2. In der Mitte zwischen zwei Polen ist dN ein Maximum, also auch die elektromotorische Kraft, und zwar einmal ein positives, das andere Mal ein negatives Maximum.

Es ergibt sich hier insgesamt für die elektromotorische Kraft das nebenstehende Bild (Fig. 2).

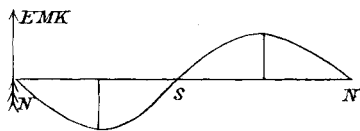


Fig. 2.

Daß der Verlauf der elektromotorischen Kraft rein sinusförmig vor sich geht, ist von vornherein nicht anzunehmen; das Gegenteil haben auch schon die mit dem Grundton auftretenden Obertöne bewiesen. Es lassen sich aber, wenn man die durch den Verlauf der Kraftlinien bedingten Symmetrieverhältnisse ins Auge faßt, einige Schlüsse auf die möglichen Oberschwingungen machen, in welche die ganze Schwingungsform des Stromes sich zerlegt denken läßt.

Nimmt man an, daß auf einer Scheibe nur Magnete von gleicher Polstärke verwendet sind, und daß diese beim Rotieren alle gleichen Abstand vom Elektromagneten haben, so zeigt eine einfache Betrachtung des Kraftlinienverlaufes, daß die Kurve der elektromotorischen Kraft in der Mitte zwischen N und S , wie auch zwischen S und N symmetrisch sein muß, und ferner, daß sie an den Polen selbst symmetrisch mit Vertauschung von oben und unten ist.

Die erste Art der Achsen nennen wir einfach Symmetriachsen, die zweite Art Umlappings-Symmetriachsen. Diese Achsen müssen auch von allen möglichen Partialschwingungen erfüllt werden.

Demnach gelten folgende Schlüsse, die in der Dissertation ausführlicher mathematisch behandelt sind:

I. Alle Partialschwingungen müssen in Phase 0 oder in Phase $\frac{1}{2}$ zur Grundschiwingung gedacht werden, da sie sonst die Umklappungs-Symmetrieachse nicht befriedigen würden. Derselbe Schluß hatte sich schon aus dem Stromumkehrversuch ergeben.

II. Die Oktave und ebenso alle übrigen geradzahigen Oberschwingungen können von den Wechseipolen nicht mit erregt werden, da sie gegen die eigentlichen Symmetrieachsen verstoßen würden. Auch dies war schon bei den Versuchen hervorgetreten.

Ganz ähnlich gestalten sich die Verhältnisse bei *Gleichpolscheiben*. Auch hier sind die Polstellen absolute Nullwerte der elektromotorischen Kraft, und zwar geht hier die Kurve bei jedem Pol in gleicher Richtung durch die Gleichgewichtslage. Da nun in der Mitte zwischen zwei Polen in dem Falle der Gleichpole die Änderung der hier immer gleichgerichteten Kraftlinien Null ist, so muß auch dort eine Nullstelle der Kurve angenommen werden. Der

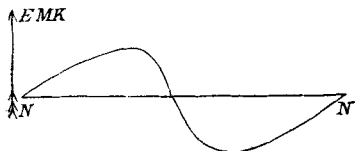


Fig. 3.

Vorzeichenwechsel erfolgt hier in umgekehrter Richtung, wie an den Polen; wir erhalten insgesamt das vorstehende Bild (Fig. 3).

In Bezug auf die Symmetrieverhältnisse dieser Kurve ergibt sich der Unterschied gegen vorhin, daß hier gar keine eigentliche Symmetrieachse zu existieren braucht.

Es ist sogar, wie man sich durch die Zeichnung der Kraftlinien leicht überzeugen kann, unwahrscheinlich, daß die Änderung derselben vom Pol bis zur Mitte zwischen zwei Polen symmetrisch an- und absteigt. Das Fehlen dieser Symmetrieachse hat zur Folge, daß in diesem Falle sehr wohl die geradzahigen Oberschwingungen auftreten können; eine Tatsache, die durch die Beobachtungen schon festgestellt war.

Die Umklappungs-Symmetrieachsen, die sich bei Gleichpolscheiben an den Polen und in der Mitte dazwischen befinden, bedingen auch hier die oben angegebene Phasenbeschränkung.

Es werde im Anschluß hieran kurz der Fall behandelt, daß wir bei Wechseipolen die Voraussetzung der gleichen Pol-

stärke fallen lassen. Wir nehmen einmal an, daß mehrere schwache Südpole zwischen je zwei stärkeren Nordpolen lägen. Dann fällt die oben genannte eigentliche Symmetrieachse fort, und es können sehr wohl auch geradzahlige Oberschwingungen auftreten, und demnach also z. B. die Oktave gehört werden.

Dieser Ausnahmefall ist durch Versuche bestätigt worden. Durch eingehende Messungen ist auch ferner die Grenze festgestellt worden, bis zu welcher die Polstärken verschieden sein müssen, um eine hörbare Oktave zu liefern.

Optische Darstellung des Klangunterschiedes bei Wechseelpolen und bei Gleichpolen.

Eine von den bisher angegebenen gänzlich verschiedene Methode, die Obertöne meiner Telephonklänge nachzuweisen, habe ich in folgender Weise angewendet:

In einer Abhandlung über den „Leitungswiderstand von Wismutdraht“¹⁾ wendet Hr. Prof. Lenard (p. 631) zum empfindlichen Nachweis von Wechselströmen eine in einem starken Magnetfelde befindliche gespannte Metallsaite an.

Erzeugt man hiernach einen Wechselstrom und läßt seine Periodenzahl langsam steigen, so sieht man in dem Augenblick, wo diese Periodenzahl mit der der Saite übereinstimmt, die Saite plötzlich stark hin- und herschwingen. Sobald die Periodenzahl weiter wächst, kommt die Saite wieder in Ruhe.

Dies Verfahren wandte ich in der Weise an, daß ich den durch alle vier Elektromagnete (bei Phase 0) erzeugten Wechselstrom durch eine gespannte Kupferdrahtsaite gehen ließ, diese währenddes durch das magnetische Feld eines starken Elektromagneten führte und dann ihre Schwingungsform im Augenblick der Resonanz durch ein Mikroskop beobachtete. Die Saite, deren ich mich bediente, war aus Cu-Draht von 0,2 mm Durchmesser. Ich verwandte wohl auch bisweilen dickere Saiten und solche aus Messingdraht; die dickeren ergaben jedoch, wie zu erwarten war, weniger große Schwingungsweiten während der Resonanz durch Wechselstrom. Die Saite war

1) P. Lenard, Wied. Ann. **39**. p. 618f. 1890. Die Saite wird daselbst als Ersatz des Telephons in der Wheatstoneschen Brücke verwandt, in derselben Weise, wie das später von Hrn. M. Wien angegebene „optische Telephon“.

auf einer Holzleiste von 95 cm Länge gespannt, sodaß die Spannweite von Steg zu Steg genau 80 cm betrug. Auf der Holzleiste lief unter der Saite eine Zentimeterskala aus Papier entlang. Die Spannung geschah, ganz wie bei einem Monochord, vermittelt eines Hebels, an den verschiedene Gewichte gehängt werden konnten.

Zwei Holzstege von 3 cm Höhe markierten Anfangs- und Endpunkt der Saite. Den Grundton derselben stimmte ich so, daß er dem bei gleichmäßiger Rotation der Magnetscheibe im Telephon erzeugten Grundton angenähert entsprach. Meist wählte ich diesen ziemlich tief (etwa 60—70 v. d.), weil so die Amplituden der resonierenden Saite größer und die Schwingungsform charakteristischer ausgeprägt wird. Im Prinzip ist hier übrigens nichts im Wege, mit der Zahl der Grundschnitte der Saite und des Wechselstromes sogar unter die Grenze der Hörbarkeit herabzugehen; auch dann bleiben die Erscheinungen in aller Deutlichkeit bestehen.

Zur Herstellung des magnetischen Feldes bediente ich mich eines starken Ringelektromagneten, der durch eine Akkumulatorenbatterie mit 10 Amp. gespeist wurde. Der Abstand seiner Pole war mit Hilfe eines Scharniers an der Unterseite des Elektromagneten in weiten Grenzen verstellbar; ich machte ihn meist gleich 1—3 mm. Dabei verwandte ich zwei Arten von Polformen, die ausgewechselt werden konnten; ihre Wirkungsunterschiede finden sich in der Dissertation näher charakterisiert.

Die Holzleiste wurde durch Stative in einer solchen Lage gehalten, daß die 3 cm über ihr befindliche Saite gerade mit dem gewünschten Punkte durch die Pole des Elektromagneten frei hindurchlief.

Die Beobachtung der schwingenden Saite endlich geschah durch ein horizontal auf einem Tischchen befindliches Quinckesches Kathetometermikroskop, das mit dem Tischchen vor der Saite entlang geschoben werden konnte. Ein Teilstrich seines Okularmikrometers entsprach bei dem zu meinen Versuchen gewählten Objektiv dem fünfzigsten Teil eines Millimeters. Die Ablesungen, also die Zahlen in den nachher folgenden Tabellen, beziehen sich immer nur auf die Elongationen nach einer Seite, von der Gleichgewichtslage an gerechnet.

Die Ausführung des Versuches geschah in folgender Weise:

Da es nur schwer möglich war, die Geschwindigkeit des Laufwerkes so genau zu regulieren, daß sich der Ton des zugleich im Stromkreis befindlichen Telephons andauernd auf der Höhe des Grundtones der Saite befand, so ließ ich die Sirene durch abwechselndes Bremsen und Wiederfreigeben mehrere Male diesen Punkt durchlaufen, beobachtete an einer Stelle mit dem Mikroskop die jedesmal auftretenden Maxima der Elongationen und wiederholte den Versuch an einer benachbarten Stelle, wohin ich das Mikroskop auf einem Tischchen verschoben hatte.

Im ganzen erhielt ich ein Bild von der Schwingung der Saite während der Erregung durch den Wechselstrom. Wenn die Saite gerade in ihrer Mitte, also bei Skalenteil 40 (das Ganze gleich 0 bis 80), durch das magnetische Feld geführt war, so zeigte ihre Schwingungsform eine mehr oder weniger sinusförmige Gestalt. Teilweise hing diese von der Art der verwendeten Polschuhe ab.

Um nun zu ermitteln, welche Obertöne im Klange des Telephons, also welche Oberschwingungen in dem Wechselstrom vorhanden waren, ließ ich die Saite in dem Punkte durchs Magnetfeld gehen, wo die fragliche Oberschwingung, als Schwingung der Saite betrachtet, ihren Bauch hatte. War die Oberschwingung in dem Strome vorhanden, so bildeten sich in dem Augenblick, wo die Periodenzahl des Wechselstromes dem Grundton der Saite, und also auch die Zahl der Oberschwingungen dem fraglichen Oberton der Saite entsprach, die Knoten und Bäuche dieses Obertones in der Schwingungsform der Saite ab. War dagegen jener Oberton nicht im Klange des Telephons vorhanden, so geriet die Saite im beschriebenen Augenblick nur in Grundtonschwingung, schwang also mit dem Maximum der Elongationen in der Mitte bei 40. Der Grundton der Saite wird nämlich durch den Wechselstrom stets mit erregt, einerlei in welchem Punkte man sie durch das magnetische Feld führt.

Dies ist auch der Grund, weshalb ich nie die reine Oberschwingung in der Form der Saite erhielt.

Charakteristisch aber für das Vorhandensein eines Obertones sind seine Bäuche, die sich durch ein Wiederansteigen

der Elongationen mehr an den Enden der Saite zu erkennen geben, und die Knoten in der Nähe der Mitte, kenntlich durch das Kleinerwerden der Amplituden.

Die folgende Tabelle zeigt den charakteristischen Unterschied zwischen den Klängen der Wechselelektroden und denen der Gleichpole. Beide Versuchsreihen bezweckten hier die Aufsuchung der Oktave in den durch die Telefonsirene erzeugten Klängen; also war jedesmal die Saite in $\frac{1}{4}$ ihrer Länge, bei 20, durch das Magnetfeld geführt worden. Bei der Schwingungsform der Saite, die durch den Induktionsstrom der Wechselelektroden erzeugt wurde, ist aber, obwohl die Saite im Bauch der Oktave (20) erregt wurde, gar nichts von einer Oktavenschwingung der Saite zu sehen. Die Elongationen steigen bis zur Mitte der Saite (40) an und fallen von dort an regelmäßig bis zum Ende der Saite (bei 80) ab. Also ist hier nur die Grundschiwingung des Wechselstromes tätig gewesen und diese hat die Grundschiwingung der Saite erregt, gerade als wenn ich die Saite in ihrer Mitte (bei 40) erregt hätte. Im Gegensatz hierzu zeigen die Zahlen für den Versuch mit Gleichpolen deutlich die Oktavenschwingung der Saite über der auch mit erregten Grundschiwingung.

Man sieht ein Absteigen der Kurve nach der Mitte zu (40) und ein Ansteigen beim zweiten Bauch ($\frac{3}{4}$ Saitenlänge = 60).

Aufsuchung der Oktave bei Wechselelektroden und bei Gleichpolen.

Elektromagnet = 20 (konische Pole).

	27	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
I. Wechsel- pole	34,5	35,9	41,3	45,1	40,1	40,0	30,1	26,5	22,5	15,1	7,0	0
	35,0	38,2	40,1	46,6	41,5	38,2	32,4	28,4	23,6	14,9	7,6	0
	34,6	39,0	42,2	45,3	40,0	37,0	33,2	27,6	24,0	15,0	7,4	0
	34,4	37,6	41,9	44,8	41,3	39,5	32,5	29,0	22,8	15,6	7,5	0
Mittel:	34,62	37,67	41,37	45,45	40,47	38,67	32,05	27,87	23,22	15,15	7,37	0
II. Gleich- pole	17,6	16,0	15,0	14,8	15,2	16,0	16,5	16,0	13,6	8,1	4,0	0
	17,5	15,3	15,2	14,9	15,6	15,8	16,0	16,5	12,3	7,7	3,2	0
	17,0	14,9	14,8	15,0	15,9	15,8	15,6	15,8	12,0	7,5	3,5	0
	16,5	14,9	15,0	14,8	15,2	15,4	15,8	16,0	12,0	7,2	3,2	0
Mittel:	17,15	15,27	15,0	14,87	15,47	15,75	15,97	16,07	12,47	7,62	3,47	0

Ich habe die beiden Versuchsreihen dieser Tabelle schnell hintereinander ausgeführt, und auch nur in Abständen von 5 cm je vier Ablesungen gemacht, um so ganz sicher zu sein, daß während des Versuches noch alle Verhältnisse in Bezug auf magnetisches Feld, Spannung der Saite etc. dieselben geblieben waren. Auf den Scheiben hatte ich 16 bez. 8 Magnete verwendet, sodaß ich die Spannung der Saite während des ersten und des zweiten Teiles der Beobachtungen nicht zu verändern brauchte.

Dieselben Versuche habe ich in vielen Variationen wiederholt, mit anderen Magnetzahlen und mit anderen Tonhöhen. Das Resultat blieb stets dasselbe: die *Wechselpole* erzeugten *niemals* die Schwingungsform der *Oktave*. Ich habe diese Methode weiterhin auch zum Nachweis höherer Obertöne in den Klängen angewandt. Die Duodezime trat sowohl bei Wechselempolen wie bei Gleichpolen auf. In diesem Falle erregte ich die Saite bei $\frac{1}{5}$ ihrer Länge (13,3). Dann bildeten sich über der wiederum miterregten Schwingungsform des Grundtones die Knotenstellen der Duodezime nahe bei 26,6 und 53,3 aus; dagegen waren die Bäuche bei 40 und 66 zu erkennen. Letzterer trat aber nicht mehr ganz deutlich hervor.

Bei höheren Obertönen, dem vierten und fünften, lieferte mir die optische Methode keine sicheren Resultate mehr. Die einzelnen Knoten und Bäuche waren wegen der Miterregung der Grundschwingung der Saite nicht mehr in jedem Falle mit Bestimmtheit zu erkennen. Es kam mir auch vor allem bei dieser Methode darauf an, einmal auf einem anderen, als dem akustischen Wege, den Unterschied zwischen den Klängen der Wechselpole und denen der Gleichpole nachzuweisen. Es hat sich also das durch frühere Methoden gefundene Resultat auch hier bestätigt.

Lagerung der Obertöne.

Die bisherigen Versuche gingen lediglich darauf aus, festzustellen, welche Obertöne bei den beiden Anordnungen der Magnete auftraten oder auftreten konnten.

Die Resultate der Versuche, in denen ich durch Auslöschung und Verstärkung die Existenz der einzelnen Obertöne ermittelte, sind ganz unabhängig von den Phasen der

Töne. Der Stromumkehrversuch dagegen, sowie die theoretischen Betrachtungen beschränkten die Phasenmöglichkeiten auf Phase 0 und $\frac{1}{2}$. Hier soll jetzt eine Methode zur Ermittlung der Phasen gegeben werden, die ganz unabhängig von den früheren Voraussetzungen oder Beschränkungen ist. Darauf leitet die folgende Betrachtung:

Die Grundschiwingung des Wechselstromes ist jedesmal durch die Magnetstellung und Lage der Elektromagnete zu jenen in der Phase fest bestimmt. Wenn ich also bei einer Scheibe die Phase eines Obertones zum Grundtone finden will, so brauche ich jenen Oberton nur auf einer zweiten Scheibe als Grundschiwingung zu erregen. Werden dann die Wellensysteme gegeneinander verschoben, so müssen offenbar Maxima und Minima des fraglichen Obertones auftreten. Die Phase des als Grundschiwingung erregten Obertones ist bekannt; mithin läßt sich die gesuchte finden. Das bewegliche System brachte dabei die Interferenz des Obertones zu stande. Handelte es sich z. B. um Ermittlung der Phase der Oktave, so las ich an der Skala die gehörten Stellen der Maxima und Minima der Oktave ab. So ergab sich die wirkliche Phase des Obertones; im Maximum hatte er die gleiche, im Minimum die entgegengesetzte Phase wie die als Grundschiwingung erregte Oktave. Hierbei ist es offenbar am zweckmäßigsten, wenn man den Abstand der Obertonscheibe so regelt, daß der beobachtete Ton im Minimum gerade verschwindet. Daher hat man im allgemeinen, weil die Obertöne schwächer sind als der Grundton, die Elektromagnete von der Obertonscheibe etwas weiter zu entfernen. Dies ist durch das Zurückziehen der Elektromagnete in den Korken immer leicht möglich.

Als Phase 0 bezeichne ich die Lage, bei der vor beiden Elektromagneten zu gleicher Zeit ein Nordpol steht. Da das bewegliche Elektromagnetsystem sich stets vor der Obertonscheibe (d. h. derjenigen, die den zu untersuchenden Oberton als Grundschiwingung hat) befindet, so genügt folglich eine Verschiebung des Armes um den Abstand zweier Magnete der Obertonscheibe, um den Zustand der Phase 0 wieder herzustellen. Die Phase 0-Stellen ermittelte ich in der Weise, daß ich an der Skala ablas, wo gerade der Arm A_2 sich befinden mußte, wenn sämtliche vier Elektromagnete vor Nordpolen standen.

Aus den in der Dissertation ausführlich angegebenen Versuchsreihen sei hier nur folgendes Beispiel angeführt:

Grundtonscheibe: 6 Magnete in Gleichpolstellung

Obertonscheibe: 12 „ „ „

Auslöschung der Oktave:	65	123,5	180	239	296,5	
Verstärkung der Oktave:	93	151	208	266,5	325	
Phase 0:	93	151	209	267	325	

Aus den Zahlen läßt sich schließen, daß *die Oktave* im Klange der Grundtonscheibe *in Phase 0 zum Grundton* steht; denn sie hat ihr Maximum, wenn die Obertonscheibe in Phase 0 zur Grundtonscheibe steht; folglich stimmen in dem Augenblick die Phasen der beiden Oktaven überein.

In ähnlicher Weise sind auch die Phasen der höheren Obertöne (bis zum fünften und sechsten) und zwar sowohl bei Gleichpolen wie bei Wechseipolen festgestellt worden. Bei letzteren wählte ich teilweise auch Gleichpolscheiben, um die Interferenz des fraglichen Obertones zu stande zu bringen, weil sonst die Zahl der rotierenden Magnete unnötig groß wird. Überall ergab sich dasselbe Resultat, daß nämlich die Obertöne sämtlich, soweit sie sich beobachten ließen, in Phase 0 zum Grundton stehen.

Ich kann demnach als Ergebnis aller bisher angeführten Untersuchungen über die Eigenschaften der Telefonsirene allgemein den Satz aussprechen:

Läßt man Magnete, sei es in gleicher oder in abwechselnder Polstellung, in gleichen Abständen kontinuierlich vor Elektromagneten vorbeieilen, so erzeugen sie in diesen periodische Wechselströme, die, durch ein Telephon geleitet, auf dessen Membrane Klänge erzeugen, welche neben dem Grundton harmonische Obertöne in Phase 0 zu diesem enthalten. Wechseipole erzeugen dabei nur die ungeraden Obertöne.

Da wir jetzt aufs genaueste unsere Tonquelle in ihren Bestandteilen analysiert haben, können wir sie nunmehr zur Lösung der Frage benutzen, ob die Phasen der Komponenten eines beliebigen Intervalles seine Klangfarbe beeinflussen. Ich habe allerdings keine ins einzelne gehenden quantitativen

Messungen über die *Intensität* der Grund- und Obertöne angestellt; dies ist jedoch für die Lösung der vorliegenden Frage von durchaus keiner Wichtigkeit. Es genügt völlig, daß es möglich ist, Zahl und Intensität der Obertöne in den weitesten Grenzen zu variieren.

Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe beliebiger Intervalle.

Schon bei der Untersuchung, in welchen Phasen die Obertöne zum Grundton stehen, haben wir zwei Magnetsysteme auf einmal als Tonerreger verwandt und den so entstandenen Klang bei Phasenverschiebung beobachtet. Die obere Komponente aber wählten wir immer so, daß sie einen bestimmten Teilton des Grundklanges darstellte, und ihn so je nach der Phase verstärkte oder vernichtete.

Um jetzt die Telefonsirene zur Entscheidung der allgemeinen Phasenfrage zu verwenden, brauche ich nur zwei Scheiben mit beliebig vielen Magneten auf einmal rotieren zu lassen. Vermittelt des drehbaren Elektromagnetsystems gelingt es, die beiden Komponenten des entstandenen Intervalles in beliebiger Phase zueinander auf das Telephon wirken zu lassen. Hierbei muß sich ein Phaseneinfluß, falls solcher überhaupt bemerkbar ist, auch geltend machen.

Bei der Durchführung dieses Hauptteiles meiner Arbeit bin ich bestrebt gewesen, die Klangfarbe der einzelnen Intervalle erstens in verschiedenen Tonhöhen, zweitens mit ganz verschiedener Stärke der Obertöne und drittens auch jedesmal in den verschiedenen möglichen Polanordnungen der Scheiben zu untersuchen.

Bezeichne ich die Scheibe, die den tieferen der beiden Töne erzeugt, mit A , die andere mit B , so waren vier Kombinationen der Polstellung auf den Scheiben möglich:

1. $A = Gp$, $B = Gp$. 3. $A = Wp$, $B = Gp$.
2. $A = Gp$, $B = Wp$. 4. $A = Wp$, $B = Wp$.

wo Wp Wechselepoles und Gp Gleichpole bedeutet.

Die Höhe der Töne ließ sich durch die Anzahl der verwendeten Magnete und durch die Geschwindigkeit des Laufapparates regulieren; die Obertöne wurden gleichfalls durch

größere oder geringere Zahl der Magnete in ihrer Intensität variiert.

Bei diesen Untersuchungen ist es von Wichtigkeit, genau zu wissen, was unter der Phase der Komponenten eines beliebigen Intervalles zu verstehen ist, und wie weit die Wellensysteme gegeneinander verschoben werden müssen, daß wieder der Anfangszustand, etwa Phase 0, eintritt. Als Phase 0 bezeichnen wir die Lage der beiden Wellenzüge zueinander, wenn zwei Wellen zu gleicher Zeit in derselben Richtung durch die Gleichgewichtslage gehen. Bei der Quinte geschieht dies z. B. dann jedesmal in Abständen von zwei Wellenlängen der tieferen, oder drei der höheren Komponente. Folglich braucht man, um bei der Phasenverschiebung die Phase 0 wieder zu erhalten, die Wellensysteme auch nur so weit gegeneinander zu verschieben, bis wiederum irgend zwei Wellen zugleich in positiver Richtung durch die Gleichgewichtslage gehen. Das Problem ist ganz dasselbe wie beim Nonius; den Teilstrichen dort entspricht hier je eine Wellenlänge. Das Resultat ist allgemein folgendes: Beim Intervall $A:B = n:m$ genügt es, wenn wir B um den n^{ten} Teil seiner Wellenlänge gegen A verschieben, damit wieder der Zustand von Phase 0 erreicht wird. Dies ist also bei der Quinte $A:B = 2:3$ gleich $\frac{1}{2} B$, bei der Quarte $A:B = 3:4$ gleich $\frac{1}{3} A$ etc. Da die beiden Wellen als fortlaufend gedacht werden müssen, so ist es ganz einerlei, welche beiden Wellenlängen gerade den Zustand von Phase 0 markieren.

Demnach habe ich an meinem Apparat die Phase 0 so aufgesucht, daß ich, während die Scheiben stillstanden, nachsah, bei welcher Zahl der Skala gerade allen Elektromagneten gleiche Pole (N) gegenüberstanden. Von da aus ergaben sich durch Rechnung die Zahlen für die übrigen Phase 0-Stellen in Abständen von $\frac{1}{n} B$. Bei allen Versuchen ermittelte ich *zuerst die Klangeigentümlichkeiten; nachträglich* stellte ich dann erst die *Phase 0-Stellen* fest.

Als Beispiel der in der Dissertation angeführten größeren Versuchsreihe sei hier das Intervall der Quinte herausgegriffen. Ich wählte dabei

$$1. \quad A = 10 \text{ Gp}, \quad B = 15 \text{ Gp}.$$

In der Tat zeigte sich ein sehr bemerkbarer Unterschied der Klangfarbe während der Phasenverschiebung, und zwar

wurde der Klang der Quinte dumpfer in Abständen von ungefähr 23 Skt.

Nun muß aber in Betracht gezogen werden, daß die von den Scheiben in diesem Falle gelieferten Töne nicht rein waren, sondern begleitet von einer Reihe Obertönen. Der Zahl der Magnete nach verhielten sich die Grundtöne der Scheiben wie 2:3. Dabei hatte ich auf beiden Scheiben Gleichpole; diese erzeugen theoretisch die ganze Reihe der harmonischen Teiltöne. Wenn wir damit praktisch bis zum sechsten gehen, erhalten wir folgendes Tonschema, wobei der Grundton als Teilton 1 mitrechnet.

Teilton	1	2	3	4	5	6
Scheibe $A = 10 \text{ Gp}$	2	4	6	8	10	12
Scheibe $B = 15 \text{ Gp}$	3	6	9	12	15	18

Hieraus ist ersichtlich, daß der dritte Teilton von A mit dem zweiten von B identisch ist (beide durch „6“ bezeichnet). Dieser gemeinsame Oberton kann also bei der Phasenverschiebung sehr wohl eine Klangveränderung des Intervalles bedingen. Ferner kann auch der gemeinsame Ton „12“, einmal als sechster und einmal als vierter Teilton, einen Phaseneinfluß hervorrufen.

Demnach wäre zu untersuchen, ob in unserem Falle die Klangveränderung allein darin bestand, daß diese Obertöne miteinander interferierten.

Ich stelle hier die durch Rechnung und durch Beobachtung gefundenen Zahlen nebeneinander. Optisch festgestellte Phase 0 war 50. Da $\frac{1}{2} B = 23,2 \text{ Skt.}$, so folgt nach obiger Regel:

Phase 0 : 50: 73,2, 96,4, 119,6, 142,8, 166,0, 189,2, 212,4, 235,6,
258,8, 282,0, 305,2, 328,4.

Stellen dumpferen Klages	16	40	62	85	110	131	153
Auslöschung des Tones „6“	15,2	38,4	61,6	84,8	108	131,2	154,4

Stellen dumpferen Klages	177	203	224	250	272	294	320
Auslöschung des Tones „6“	177,6	200,8	224	247,2	273,6	270,4	316,8

Wie man sieht, stimmen die Zahlen der Auslöschung sehr gut mit den für dumpferen Klang gefundenen überein.

Also ist nicht daran zu zweifeln, daß die Klangveränderung in diesem Fall lediglich durch das Verschwinden der Oktave von B veranlaßt wurde. Bei genauerer Beobachtung zeigte sich auch der Charakter der Klangveränderung als derart, daß abwechselnd ein Oberton stärker und schwächer wurde. Andere Klangveränderungen waren nicht wahrzunehmen. Der Oberton $2n.m = 12$ war den Scheiben nicht mehr eigen.

2. $A = 10 Gp$, $B = 30 Wp$.

Bei dieser Anordnung veränderte die Quinte während der Phasenverschiebung in keiner Weise ihren Klang. Dieser floß in allen Bestandteilen gleichmäßig dahin. Die Überlegung zeigt, daß Interferenzen zwischen gleichen Obertönen nicht eintreten konnten. Der Ton „6“ müßte ein gerader Oberton von B sein und wird bei Wechselempolen nicht erregt. Also zeigte die Quinte hier *keinen Phaseneinfluß*.

3. $A = 20 Wp$, $B = 15 Gp$.

Dieser Fall ist dem in 1. behandelten ganz analog. Daher zeigte sich hier ein Hin- und Hergehen des Klanges zwischen dumpferer und hellerer Farbe. Durch Rechnung zeigt sich, daß die Zahlen dumpferen Klanges genau den Auslöschungsstellen des Tones „6“ entsprechen. Im übrigen bringt der Versuch nichts Neues.

4. $A = 16 Wp$, $B = 24 Wp$.

Hier findet während der Phasenverschiebung durchaus keine Klangveränderung statt. Der Versuch ist also, ebenso wie 2., ausschlaggebend für das Urteil: daß die reine Quinte ohne gleiche Partialtöne keinen Phaseneinfluß hören läßt.

Schließlich habe ich das Quintenintervall noch mit einer größeren Zahl von Magneten: $A = 16 Gp$, $B = 24 Gp$ und $A = 20 Gp$, $B = 30 Gp$ untersucht. In beiden Fällen fiel die Interferenz gleicher Obertöne fort, da solche, namentlich in den Scheiben B , nicht mehr vorhanden waren. Damit fiel aber auch zugleich die Wirkung der Phasen auf die Klangfarbe der Quinte fort. Diese tönt unverändert durch alle Phasen. In dem zuletzt angeführten Beispiel 20:30 klangen fast reine Töne zusammen.

Aus diesem einen Beispiel ist schon das Gesetz zu ersehen, das sich mir bei allen untersuchten Intervallen bestätigt hat.

Es zeigte sich hier, daß die reine Quinte an sich in allen Phasenstellungen ihrer Komponenten denselben Klang behält.

Ein Klangunterschied macht sich nur dann, aber auch immer dann geltend, wenn die Komponenten gemeinsame Obertöne haben.

In ähnlicher Weise habe ich die Intervalle der Oktave, Quarte, großen und kleinen Terz, großen und kleinen Sexte, großen und kleinen Sekunde und der Septime untersucht.

Immer konnte ein sich bemerkbar machender Klangwechsel während der Phasenverschiebung als Interferenzvorgang gemeinsamer Obertöne nachgewiesen werden. Fiel die Interferenz fort, so fiel damit auch der Klangwechsel fort.

Es werde gleich an dieser Stelle ein Einwand widerlegt, der vielleicht dem obigen noch gemacht werden könnte: Man könnte die Untersuchung vermissen, ob die Telephonklänge in Amplituden und Phasen ihrer Grund- und Obertöne auch genau den durch die Induktionsströme erzeugten Grund- und Oberschwingungen entsprechen. Jedoch würde eine etwaige Amplitudenänderung nicht in Betracht kommen, da sie für die vorliegende Frage überhaupt keine Bedeutung haben. Aber auch eine etwaige geringe Verspätung der Phasen der höheren Obertöne verliert dadurch ihre Bedeutung, daß in den entscheidenden Versuchen überhaupt keine Phasenunterschiede gehört wurden; anderenfalls aber konnten sie sehr wohl durch Obertoninterferenzen erklärt werden. Schließlich ist auch für die Obertöne bis zum fünften und sechsten durch die Versuche über Lagerung der Obertöne die Verspätungsfrage verneinend beantwortet worden.

Demnach läßt sich aus allen Einzelbeobachtungen mit Sicherheit das allgemeine Gesetz ableiten:

Verschiebt man zwei einfache Töne oder zwei Klänge, die ein beliebiges Intervall bilden, in der Phase gegeneinander, so hat dies auf die Klangfarbe des Intervalles keinen Einfluß. Ein Einfluß der Phasenverschiebung tritt nur dann auf, wenn in den Klängen gleichhohe Obertöne vorhanden sind, die miteinander interferieren können. Der einzige Fall, wo Phasenverschiebung direkt hörbar wird, ist demnach der Einklang.

Alle Versuche früherer Beobachter, die in der Phasenfrage mit dem Erfolg angestellt wurden, daß eine Klangfarbe-

änderung bei der Phasenverschiebung wahrgenommen ward, glaube ich deshalb in derselben Weise erklären zu müssen, wie meine gleichartigen Versuche. Die meinigen haben gegenüber jenen den Vorzug, zwar ebenfalls Klänge, nicht reine Töne, zu benutzen; jedoch Klänge von genau bekannter Zusammensetzung. Ich meine hier namentlich die schon im Anfange der Arbeit angeführten *Versuche Königs mit der Wellensirene*. Herr Dr. König hat selbst bei den einfachen Sinuskurven die Obertöne nachgewiesen. Daher kann sehr wohl die Phasenverschiebung eine Interferenz unbeobachtet gebliebener gleicher Obertöne hervorgerufen haben, sodaß dadurch die Klangveränderung entstand. Da ich keine Apparate zur Verfügung habe, diese Frage selbst eingehender zu prüfen, so kann ich auch nur die obige Erklärung als eine Vermutung aussprechen. Trifft sie zu, so behält einerseits die Königsche Wellensirene ihren Wert für derartige Untersuchungen, andererseits ist damit der große Gegensatz, in dem Königs Versuchsergebnisse zu denen anderer Forscher, namentlich zu denen v. Helmholtz und Hermanns' stehen, aufgehoben.

Wenn auf Grund der vorliegenden Untersuchungen die Phasenfrage nunmehr auch wohl als endgültig erledigt betrachtet werden dürfte, so habe ich doch dem, wie v. Helmholtz ihn nennt, scheinbaren Ausnahmefalle, nämlich der bestimmten Stimmgabeloktave, noch eingehende Untersuchungen gewidmet. Diese bilden den zweiten Abschnitt der Dissertation und werden in einem etwas späteren Aufsatz mitgeteilt werden.

Vorstehende Untersuchungen wurden in dem unter Leitung des Hrn. Professor P. Lenard stehenden physikalischen Institut der Universität Kiel ausgeführt.

(Eingegangen 30. Oktober 1902.)
