3. *Über den Resonanzverlauf erzwungener Schwingungen;* *von R. Hartmann-Kempf.*

(Hierzu Taf. IV—VII.)

(II. Teil des Referates aus der Abhandlung: Elektroakustische Untersuchungen.)

Unter akustischer Resonanz wird meistens schlechtweg das auffällige Mitschwingen eines Klangkörpers verstanden, wenn Konsonanz, d. h. Gleichklang oder Frequenzgleichheit, mit einer periodischen Erregerkraft vorliegt. Richtiger aber spricht man von der Stelle eines Resonanzmaximums und von einem Resonanzgrad, d. h. dem Verhältnis irgend einer Resonanzamplitude zu der bei gleich starker Erregerfrequenz beobachteten maximalen Resonanzamplitude.

Dagegen läßt sich der Begriff der Konsonanz unzweideutig definieren, sobald es sich um konstante Schwingungszahlen oder Frequenzen zweier voneinander unabhängiger Körper oder pulsierender Kräfte handelt. Streng genommen kann die akustische Konsonanz nur unter zwei gleichartigen, von der Amplitude in gleicher Weise abhängigen Eigenschwingungen bestehen, da, wie wir im ersten Teil des Referates erneut gesehen haben, die Schwingungszahl eines Klangkörpers je nach seiner Beschaffenheit eine kompliziertere Funktion der Amplitude ist; somit leuchtet es ein, daß zwischen einem frei abklingenden Klangkörper und der konstant gehaltenen Frequenz eines pulsierenden magnetischen Feldes nur für eine einzige oder einzelne Amplitude Konsonanz bestehen kann, und daß man für den ganzen Tonverlauf nur von einer annähernden oder mittleren Konsonanz reden darf.

M. Wien¹⁾ hat bewiesen, daß die früher allgemein verbreitete Annahme, es falle die Schwingungszahl des Systems nach aufgehobener Dämpfung bei maximaler Resonanz mit der Frequenz der erzwingenden Kraft zusammen, unrichtig sei. Besagter Autor hat ausgerechnet, daß die Stelle maximaler Resonanz sogar noch tiefer liegt, als die Tonhöhe der gedämpften Schwingungen, und zwar um den nämlichen Betrag, um welchen letztere bereits von der sogenannten natürlichen, d. h. ungedämpften Schwingungszahl, abweicht. Für die musikalische Bedeutung der meisten Klangkörper deckt sich die Resonanzstelle mit der Konsonanzstelle.²⁾ Wohl aber kommen die Verschiedenheiten in Betracht, wenn es sich darum handelt, einen Klangkörper auf eine bestimmte Frequenz maximal ansprechen zu lassen, z. B. ein Vibrationsrelais auf die konstant gehaltene Periodenzahl eines Erregerstromes von schwankender Intensität. Wir dürfen im voraus sagen, daß das Bereich maximaler Resonanz eines mit der Amplitude tiefer werdenden Klangkörpers, z. B. einer Stimmgabel, mit wachsender Amplitude in stets stärkerem Grade nach der tieferen Lage wandert, ohne damit zugleich alle Nebenerscheinungen überblicken zu können; dagegen ist es kaum möglich, das Resonanzbereich eines zungenförmigen Stahlfederbandes mit Hilfe mathematischer Spekulation zu ermitteln; wir sind bei Klangkörpern, deren Verstimmung in solch wechselnder Richtung von der Amplitude abhängig ist, wie wir es bei einer eingespannten Feder kennen gelernt haben, vollständig auf das Experiment angewiesen.

Auch liegt der Hauptreiz der Ergebnisse im Anschauen der Resonanzkurven, welche ich deshalb unverkürzt in den lithographischen Tafeln vorlegen will. Die Übersichtlichkeit der graphischen Darstellung gestattet eine knappere Form der Erläuterungen; selbstredend bedarf es zum Verständnis der

1) M. Wien, Über die Periode, für welche die Amplitude einer erzwungenen Schwingung ein Maximum wird. Wied. Ann. 58. p. 725. 1895.

2) Es gehört ein sehr geschultes Ohr dazu, um das geringe Höherwerden des Tones im ersten Augenblick der plötzlichen Wegnahme des Bogens von einer gestrichenen leeren Geigensaite wahrzunehmen; der Unterschied ist geringer als die Schwankungen der Tonhöhe bei starkem und leisem Streichen.

meisten Eigentümlichkeit einer vorangehenden Kenntnissnahme der Resultate des ersten Teiles dieses Referates; nötigenfalls können etwaige Unklarheiten durch die ausführlichere Beschreibung in der Originalabhandlung gehoben werden.

Es muß jedoch vorher noch eine kurze Kritik über die Zulässigkeit der bisher angewandten Methode Platz finden.

Zwei Wege können eingeschlagen werden: der absolut zuverlässige besteht in der Ermittlung des Resonanzbereiches aus stationär gehaltenen Amplituden, zu welchen nach dem früher (p. 131) beschriebenen optischen Schwebungsverfahren die Frequenz des Erregerstromes ermittelt werden kann. Es ist aber sehr schwierig, die Frequenz des erregenden Magnetfeldes so konstant zu erhalten, daß der Resonanzgrad keine Änderung erfährt. Mit einem gut gebauten Saitenunterbrecher läßt sich das unschwer bewerkstelligen; die Fälle der Praxis verlangen aber auch die Verwendung von Wechselströmen aus Generatoren, jedoch setzt es eine große Vertrautheit mit der Behandlung der Maschine voraus, um ihre Tourenzahl auf mindestens 1 Promille genau aufrecht zu erhalten. Diese Erfahrung gewann ich erst nach längerem Arbeiten an dem zum speziellen Zwecke angeschafften und jetzt im Besitz des Physikalischen Institutes zu Würzburg befindlichen Maschinensatzes, einem sogenannten Gleichstrom-Drehstromumformer von Siemens & Halske, A.-G., welcher — relativ genommen — sehr gleichmäßig lief.

Das zweite, anfänglich von mir angewandte Verfahren ist leichter zu handhaben. Es schließt sich den Vorgängen bei der praktischen Handhabung von Resonanzinstrumenten insofern besser an, als es von dem Resonanzverlauf ein solches Bild wiedergibt, wie wir es beim Einstellen einer Frequenz zu sehen bekommen. Man läßt nämlich die Erregerfrequenz das Resonanzbereich nach zwei Richtungen passieren, d. h. man steigert sie langsam von einer tieferen nach einer höheren Lage bis zur Überschreitung der Maximalresonanzstelle und durchläuft dann die nämliche Strecke in umgekehrter Richtung.

Wennschon es interessant ist, das der Wirklichkeit entsprechende Bild wiederzugeben und dabei manche Begleiterscheinungen photographisch festzuhalten, so muß man doch eine Fehlerquelle mit in Kauf nehmen, die in dem sogenannten

Phasensprung ihren Sitz hat. Bekanntlich besteht zwischen der Erregerperiode¹⁾ und der erzwungenen Schwingungsperiode ein Phasenabstand, der von dem Minimalwerte, woselbst der Eigenton viel tiefer liegt als die Erregerfrequenz, erst ganz langsam und dann ebenso schnell bis auf 90° anwächst, als die anfängliche schwache Resonanz zu voller Resonanz anschwillt. In dem Maße wie die Amplitude nach Überschreiten der Resonanzstelle nachläßt, vergrößert sich wiederum der Phasenabstand, um schließlich asymptotisch 180° zu erreichen. Wenn also die Resonanzkurve sehr steil aufschießt, so bezeichnet man das Wandern des Phasenabstandes sehr treffend mit Phasensprung. In unseren Kurven vollzieht sich dieser,

Schema einer Resonanzkurve für Stimmgabeln

wenn auch nicht mit einem Male, so doch ziemlich lebhaft. Wir setzten bisher stillschweigend Synchronismus zwischen der Periode des Magnetfeldes und der Schwingungsperiode voraus und durften daher die Dauer einer optischen Schwebungsperiode als genaues Maß für den Frequenzabstand des Stromes sowie des Klangkörpers von der normalen Frequenz des Stimmgabellichtblitzapparates ansehen. Nunmehr aber bleibt die Zahl der erzwungenen Schwingungen beim Passieren des Resonanzbereiches beim Hinweg um fast 180° zurück, und beim Rückweg eilt sie um ebensoviel vor (vgl. vorstehende Figur).

1) Als Periode der erzwingenden Kraft ist hier nicht etwa die Periode des Wechselstromes zu verstehen, sondern die Periode der magnetischen Wirkung eines Polwechsels, die immer — weil nur anziehend — im nämlichen Sinne erfolgt.

Es wird deshalb beim Hinweg die Stromfrequenz zu tief, und beim Rückweg zu hoch berechnet. Die Folge ist, daß zwei Resonanzkurven ermittelt werden, welche den wirklichen Verlauf umhüllen, und die sich ihm um so mehr nähern, je langsamer die Tourenzahl der Maschine variiert wurde, d. h. je mehr Schwingungen das Photogramm innerhalb des Resonanzbereiches aufweist. Dieses Maß findet in der Anzahl und Ausdehnung der auswertbaren Schwebungsperioden seinen sichtbaren Ausdruck, daher wird man beim Schätzen des wirklichen Verlaufes kaum einen störenden Fehler begehen können.

Die durch Schätzen gefundenen Kurven (lithographische Farbentafel V u. VI) sind kräftig gestrichelt und in gleicher Farbe wie die dünneren, zusammenhängenden errechneten Kurvenlinien angelegt. Die aus stationären Amplituden ermittelten Resonanzkurven erhielten eine mittelstarke Strichdicke.

Eine übersichtliche Zusammenstellung der Versuchsbedingungen ist wohl unnötig, da die Überschriften auf den lithographischen Tafeln die Orientierung ermöglichen werden.

Wir wollen uns zunächst den Resultaten zuwenden, welche über die Verwendbarkeit einer Stimmgabel als Resonanzinstrument Aufschluß geben.

Als brauchbar, wenngleich nicht ohne Einschränkung, hat sich die Stimmgabel von R. König erwiesen, dank ihrer zufällig vorhandenen relativ starken Dämpfung. Im Gegensatz zu der vielfach vorhandenen Meinung eignen sich gute Normalstimmgabeln von geringer Dämpfung, wie z. B. die von M. Kohl, sehr wenig zur Frequenzmessung, selbst nicht bei skalenartiger Anordnung. Erstens kann man die Tourenzahl eines Generators gar nicht so genau einstellen oder aufrecht erhalten, daß das Resonanzmaximum stehen bleibt, weil die Resonanz bei der geringfügigsten Störung oder Schwankung erlischt, und zwar unter gleichzeitigen starken Schwebungserscheinungen; außerdem braucht diese Stimmgabel sehr lange, um überhaupt in die maximale Resonanzamplitude hineinzuwachsen. Die Neigung zur Schwebungsbildung hängt mit der großen lebendigen Kraft der massiven Gabel zusammen, der gegenüber die Energie der erzwingenden Kraft sehr gering bleibt. Es wäre aber verfehlt, die Erregerkraft zu steigern, weil sonst die maxi-

male Resonanz die für das Material zulässige Höhe überschreiten würde. Dagegen verhält es sich mit der Verwendbarkeit schwach gedämpfter Stimmgabeln zu selbsttätigen Unterbrechern gerade umgekehrt; doch können wir hier dieser Betrachtung keinen Raum geben.

Kurvenblatt IX auf Taf. V zeigt den Resonanzverlauf der Stimmgabel König bei Erregung durch Wechselstrom und intermittierenden Gleichstrom. Die Resonanzmaxima sind durch gestrichelte Linien verbunden, desgleichen ist die Tonhöhe der frei abklingenden Stimmgabel angegeben. Wir sehen, daß das Wandern des Resonanzbereiches nach der Tiefe im großen Ganzen nur von der Verstimmung abhängig ist, welche die Stimmgabel durch den Einfluß der Amplitude erleidet. Die Resonanz bei Erregung durch Wechselstrom liegt sogar um ein Geringes höher, während die Resonanz auf intermittierenden Gleichstrom das Maximum allerdings nach der tieferen Frequenz verlegt. Mit Ausnahme der anormal starken Erregung (Aufnahme 18) ist das Hinuntergedrücktwerden des Resonanzmaximums merkwürdig gering und insofern auffällig, als die Theorie, wie schon eingangs des Referates erwähnt, die maximale Resonanz einer Frequenz zuspricht, welche um das Doppelte des Betrages, um den die Schwingungszahl des gedämpften Systems von derjenigen des ungedämpften differiert, weiter nach abwärts liegt. Die Frequenz der ungedämpften Eigenschwingung ist ca. 101,5; die Verstimmung, welche wir, solange nichts anderes bekannt ist, nur auf Kosten der Dämpfung zu setzen haben, beträgt z. B. bei $\alpha = 1,3^0$ bereits 0,5 Schwingungen, d. h. der Eigenton wäre 101,0 Schwingungen. Das zugehörige Resonanzmaximum müßte demnach bei 100,5, also 0,5 Proz. tiefer liegen. Die weitere Vertiefung ist aber, wie die Kurve lehrt, nur 0,07 Proz. groß, bei Wechselstromerregung beobachten wir sogar eine Erhöhung um 0,02 Proz. Wir haben jedoch früher bereits gesehen, daß Verstimmung und Dekrement wohl in gesetzmäßigem Zusammenhang zu stehen schien, daß aber das Verhältnis mit der gewohnten theoretischen Berechnung nicht im entferntesten im Einklang stand, da diese noch nicht den hundertsten Teil der wirklich beobachteten Erniedrigung ausmacht. Diese Unstimmigkeit dürfte schon geeignet sein, uns auf diesen neuesten Wider-

spruch vorzubereiten. Glücklicherweise bringt die Resonanz nicht abermals eine wesentliche Verstimmung zu dem ohnehin reichlichen Betrag, denn sonst wäre die Brauchbarkeit einer Stimmgabel als Resonanzinstrument überhaupt ausgeschlossen, d. h. es würden die demnächst näher zu besprechenden Unzuträglichkeiten nicht erst bei großen, sondern schon bei mittelgroßen Amplituden überhand nehmen.

Betrachten wir genau die Autotypie der Aufnahme 22 auf Taf. VII. Diese ist wegen des charakteristischen Verlaufes fast unverkürzt wiedergegeben. Wir sehen zunächst bei steigender Erregerfrequenz einen allmählichen Anstieg zum Resonanzmaximum, ebenso vollzieht sich nach dessen Überschreitung die Abnahme. Auf dem Rückwege, also nach dem Umkehrpunkt, steigt die Amplitude wieder an; es entsteht aber nicht etwa das Spiegelbild der ersten Hälfte, sondern die Amplitude bleibt in maximaler Stärke an der fallenden Erregerfrequenz geradezu festhaften, bis endlich ein plötzlicher, von starken Schwebungen begleiteter Absturz der Resonanz ein Ende setzt. Die Erklärung dieser für den Resonanzverlauf an Stimmgabeln durchaus typischen Erscheinung macht keine Schwierigkeiten. Wir wissen, daß die wachsende Amplitude den Ton vertieft; also halten fallende Frequenz und wachsende Amplitude 'annähernd gleichen Schritt, und der nämliche Resonanzgrad bleibt eine Zeitlang aufrecht erhalten. Das Bild wäre ein ähnliches, wenn eine Anzahl in ganz feinen Intervallen abgestimmte, von der Amplitude unbeeinflusste Stahlschwingungen nacheinander von der fallenden Frequenz zur Resonanz gebracht würden; jede Zungenfeder repräsentierte dann eine bestimmte, durch die Amplitude gegebene Eigenschwingung der Stimmgabel.

Nach dem plötzlichen Aufhören dieses Zustandes treten starke Schwebungen auf, die steten Begleiterscheinungen bei irgend einem äußeren Anlaß, der zur ruckweisen Störung des Resonanzgrades bez. des Phasenabstandes führt (z. B. Ein- und Ausschalten des Stromes, Berühren mit dem Finger etc.). Auch bei schwächerer Erregung verderben die Schwebungen das Resonanzbild; wensschon hier der Abbruch nicht so hart erfolgt, so können doch Schwebungen eher auftreten, weil die Dämpfung bei kleinen Amplituden geringer ist.

Wir müssen also wohl zur Einsicht gelangen, daß auch die stark gedämpfte Stimmgabel entweder ein unbequemes oder — bei größeren Amplituden — ein ungenaues Resonanzinstrument zur Frequenzbestimmung ist.

Taf. VI zeigt uns den Resonanzverlauf an den übrigen, im ersten Teile des Referates besprochenen, federbandartigen Resonanzkörpern.¹⁾ Blatt XXX lehrt die Abhängigkeit der Resonanzmaxima von der Stärke der Erregung. Der kräftige Erregermagnet stand so weit von dem freien Federende ab, daß eine merkliche Vergrößerung der Dämpfung durch Luftwiderstand nicht zu befürchten war. Die hier nochmals aufgetragene Höhe des Eigentons bestimmt wiederum die ungefähre Lage der Resonanzmaxima; für kleine Amplituden freilich liegen sie höher, eine Erscheinung, die an das Verhalten der durch Wechselstrom erzwungenen Stimmgabelschwingungen erinnert, und die an selbsttätig sich erregenden Stimmgabeln auch von anderen Beobachtern erwähnt wurde. Das Resonanzbild der Aufnahmen ist bei kleinen Amplituden häufig durch Schwebungen gestört, deshalb läßt sich das Maximum nicht so gut ermitteln wie bei stärkeren. Bis zu Amplituden über $2\mathfrak{A} = 10$ mm ist eine genaue Frequenzmessung oder ein scharfes Einstellen auf Frequenzen von schwankender Stromstärke so wenig möglich, wie bei der Stimmgabel für deren gesamten Amplitudenbereich. Anders gestaltet sich die Lage

1) Die Wiedergabe der Originalaufnahmen wurde hier naturgemäß tunlichst beschränkt, und zwar auf folgende typische Aufnahmearten: Aufnahme Nr. 92 auf Photographietafel IV und Nr. 80 auf Autotypietafel VII. Das Original zu letzterer eignete sich besonders wegen seiner photographischen Kontraste zur autotypischen Reproduktion; zudem illustriert es deutlich den nachteiligen Einfluß eines experimentell zu schnell hergestellten Resonanzverlaufes. Es vollzieht sich nämlich die Änderung der Erregerfrequenz an der sattelartigen, die Umkehrstelle einschließenden Abschnitt zu schnell; man vgl. hierzu die Auswertung, Kurve 80 auf Blatt XXXI, Taf. VI, unter Berücksichtigung des auf p. 274 über den Phasensprung Gesagten.

Das Photogramm 92 ist aus zwei kleinen Stücken der Originalaufnahme zusammengesetzt. Es soll das Verfahren charakterisieren, die Resonanz aus stationär gehaltenen Amplituden zu ermitteln. Die breiten weißen Flecke entsprechen den längeren Pausen, während deren die Erregerfrequenz geändert und die Filmfolie (bez. die Trommel) so lange angehalten wurde, bis der gewünschte Resonanzgrad eintrat.

der Resonanzmaxima bei stärkerer Erregung, wie aus der strichpunktierten Verbindungslinie herausgeht. Da liegen die Kulminationspunkte der Kurven so senkrecht übereinander, daß von einer Abhängigkeit der Resonanzlage von der Amplitude der Erregung kaum mehr die Rede sein kann; und es ist interessant zu sehen, wie schön das beim Schwingen sich verkürzende Trägheitsmoment einer Feder alle vertiefenden Einflüsse gerade ausgleicht. In welchen Ursachen diese Vertiefung zu suchen ist, soll hier nicht weitläufig erörtert werden; doch sei an den tonvertiefenden Einfluß eines permanenten Feldes erinnert, wie wir ihn früher bei dem Stahlfederband, der Stahllanze und am stärksten bei der schwachen Relaisfeder bemerkt haben.

In der Aufnahme 72 ist die Erscheinung festgehalten, daß zu einer bestimmten Frequenz zwei verschiedene Resonanzamplituden gehören können. Bei einer langsam und gleichmäßig vorgenommenen Frequenzänderung spricht die geringere Resonanzamplitude an; jedoch kommt es bei ruckweisem Steigern der Frequenz ziemlich häufig vor, daß sich zwischen dem mit der abklingenden Amplitude höher werdenden Eigenton der Feder und der erzwingenden Frequenz ein günstiger Resonanzgrad ausbilden kann, der erst bei wesentlich höher gestiegener Frequenz gestört wird. Es bildet dieser Fall, dem wir noch einige Male begegnen werden, in gewissem Sinne ein Analogon zu dem Haften der Resonanz der stark erregten Stimmgabel an der sinkenden Frequenz, wie wir es auf Taf. VII sahen.

Die Aufnahmen 78 und 79 wurden zur speziellen Erforschung eines etwaigen durch Erregung mit verschiedener Stromart herbeigeführten Unterschiedes angestellt. Das Ergebnis lautet wider Erwarten dahin, daß die Resonanzstelle bei Erregung durch intermittierenden Gleichstrom höher liegt. Eine sichere Erklärung vermag ich nicht zu geben; vielleicht spielt die Dämpfung durch Foucaultströme in den Metallmassen der Feder bei Wechselstrom eine wichtigere Rolle als bei pulsierendem Gleichstrom.

Für einzelne Fälle mag sich die Verwendung derartig beschaffener Stahlfederbänder zu Resonanzindikatoren empfehlen, z. B. zum Betätigen von Resonanzrelais mit verhältnismäßig starker Leistungskraft. Jedoch wäre eine etwas mehr symmetrische Form der Resonanzkurve erwünscht.

Ein wohlgefälliges Aussehen zeigt Kurve 86 auf Blatt XXXII. Sie stellt das Resonanzbereich einer Stahlzunge bei sehr starker Erregung vor, welches zugunsten der Übersichtlichkeit der lithographischen Tafel nach einer tieferen Lage transportiert wurde. Der Maßstab dieses Blattes und der beiden folgenden ist der gleiche wie in Blatt XXX; jedoch ist zu bedenken, daß der Verbiegung des freien Zungenendes um 1 mm eine größere Bedeutung zukommt, als bei dem Stahlfederband; freilich ist wiederum die Zunge an der Stelle stärkster Durchbiegung wesentlich dünner als dieses, so daß sie eine relativ stärkere Amplitude vertragen sollte. Trotzdem darf man die Zunge mit einer Gesamtamplitude von $2\mathfrak{A} = 22$ mm nicht länger als etwa eine Minute schwingen lassen; ohne solche Unterbrechungen erleidet die Biegungsstelle Strukturänderungen, welche ein Tieferwerden des Eigentones bedingen.

Die mir neuerdings häufiger vorgelegte Frage, ob sich bei andauerndem Schwingenlassen keine Veränderungen zeigen, kann ich dahin beantworten, daß ich nicht den geringsten Einfluß der Dauererregung beobachtete, solange die Amplituden den Betrag von $2\mathfrak{A} = 15$ mm nicht überschritten. Ebenso bleibt eine kurze nur wenige Minuten dauernde Beanspruchung auf $2\mathfrak{A} = 20$ mm ohne jeden nachteiligen Einfluß. Hierbei kommt es natürlich in erster Linie auf die Beschaffenheit des Materiales an. Sehr gut bewährt sich dünnes, 0,4—0,7 mm starkes, gewalztes Stahlfederband. Außerdem gelten diese Erfahrungen nur für die Tonlage von 100 Schwingungen; denn offenbar kommt es weniger auf die absolute Stärke der Ausbiegung an, sondern weit mehr auf die Geschwindigkeit bez. auf die dem Quadrat der Tönhöhe proportionale lebendige Kraft der Bewegung, sowie auf den Reibungswiderstand. Folgender Versuch mag erwähnt werden: Es wurden zwei völlig gleiche Stahlfederbänder von 0,55 mm Dicke und 62 mm freier Länge verwendet; die Schwingungszahl des einen wurde durch Belasten des freien Endes von 100 auf 50 Schwingungen herabgesetzt. Jede wurde mit Hilfe des Saitenunterbrechers dauernd auf der überstarken Maximalresonanz von $2\mathfrak{A} = 30$ mm gehalten. Nach etwa 5 Min. wurde die Feder von $n = 100$ merklich tiefer und die Maximalresonanz schwächer, während die Feder von $n = 50$ unter gleichen Verhältnissen nach

2 Stunden noch keine Veränderung erkennen ließ. Im Zusammenhang mit dieser Frage sei erwähnt, daß seit länger als einem Jahr 0,5 mm dicke Stahlfederbänder von 88 bis 93 Schwingungen Tag und Nacht ununterbrochen schwingen. Diese befinden sich in den Resonanzrelais des Frankfurter Elektrizitätswerkes und erreichen bei voller Resonanz, welche aber wegen des häufigen, wenngleich nur geringen Schwankens der Maschinen nie länger als einige Minuten anhält, eine Amplitude von ca. $2\mathfrak{A} = 14$ mm.

Die Elastizitätsgrenze gewährt gar keinen Anhalt für die Beurteilung der dauernd zulässigen Schwingungsweite; denn eine Verbiegung von mehr als dem doppelten Ausschlag, welcher also etwa $2\mathfrak{A} = 45$ mm entsprechen würde, hat noch keine remanente Deformation bewirken können. Viel wesentlicher ist die Beanspruchung der Biegungsstelle beim Überwinden des Luftdruckes, wie aus den Versuchen im Vakuum hervorging. Wenn bei vollem Luftdruck eine stationäre Amplitude von $2\mathfrak{A} = 22$ mm nach einigen Minuten schon zu einer Strukturänderung der Biegungsstelle führte, so ließ sich an der mit noch größerer Amplitude im Vakuum schwingenden Zunge selbst nach längerem Betriebe kein Nachlassen der maximalen Resonanz bemerken. Die zum Antrieb erforderliche Stromstärke konnte wegen des Fortfalles der Luftdämpfung auf etwa $\frac{1}{3}$ vermindert werden. Infolge der geringeren Dämpfung ändert sich auch die Resonanzkurve nach Lage und Form. Es ergibt sich ein viel steilerer Verlauf, was aber keineswegs als Vorteil anzusehen ist. Außerdem zeigt sich hier wieder bei steigender Frequenz eine zweifache Resonanzmöglichkeit, die in dem Höherwerden des Eigentones bei starken Amplituden begründet ist. Diese Erscheinung kann das Gelingen der Messung sehr in Frage stellen; tatsächlich führte sie auch in zwei Fällen zum Abbrechen der Zunge; denn wenn die Tourenzahl der Wechselstrommaschine von der Resonanzstelle an langsam steigt, so nimmt die Resonanzamplitude so lange zu, bis die Biegungsstelle der Zunge reißt. Aus diesem Grunde ist es geraten, zur Ermittlung des Resonanzverlaufes mit anfänglich höher gelegener Frequenz zu beginnen. Im vorliegenden Fall geschah die Aufnahme bei stationären Amplituden, d. h. also absatzweise vergrößerten Schwingungen,

welches Verfahren, wie schon früher erwähnt, größere Übung verlangt.

Die Resonanzfiguren auf Blatt XXXI sind leicht zu verstehen. Die Dämpfung an der ohne Kasten (Metallrahmen) schwingenden Zunge bleibt so gering, daß weder diese noch die anderen vertiefenden Einflüsse die mit der Amplitude wachsende Erhöhung des Eigentones völlig kompensieren. Die Gesamtfigur rückt allerdings nach der Tiefe, aber die maximalen Resonanzgipfel behalten ihre Frequenz bei, woraus man einen erfreulichen Rückschluß auf die Zuverlässigkeit einer Frequenzmessung mittels derartiger Zungen ziehen kann. Freilich gilt diese Sicherheit nur für den Fall, daß man auf die geeichte Frequenzzahl, unbekümmert um die Stromstärke oder Spannung, einstellen will, oder wenn die aufzusuchende Frequenz den günstigsten Resonanzgrad hervorruft. Ist man dagegen auf das Verfahren angewiesen, aus den relativen Schwingungsweiten zweier in der abgestimmten Skala benachbarten Zungen Bruchteile der geeichten Werte zu interpolieren, so muß man eine kleine, höchstens 0,1 Schwingungen betragende Korrektur der geschätzten Zahl zufügen, um sicher zu sein, daß der Messungsfehler 1 Promille nicht überschreitet.

Die Resonanzlage ist bei einer mit Kasten versehenen, also laut tönenden Zunge in etwas stärkerem Maße von der Amplitude abhängig. Da aber bei Messungen die höchst zulässige Amplitude 15 mm nicht überschreiten soll, andererseits die geeichte Resonanztonhöhe sich auf diese Amplitude bezieht, so sind diese Abweichungen immer noch recht klein, so daß man beim Einregulieren einer Frequenzzahl keine Rücksicht auf genaues Einhalten der geeichten Amplitude bez. auf Spannungsschwankungen zu nehmen hat. Andererseits ist hier an den Kurven die günstige durch beiderseits gleiches und gemäßigtes Abfallen charakterisierte Form zu würdigen.

Die Ermittlung sämtlicher auf diesem Blatt abgebildeten Kurven geschah bei stationär gehaltenen Resonanzamplituden.

Es wurde noch versucht, die Zuverlässigkeit der Messungen zu prüfen, wenn durch Annähern der Polfläche des Erregermagnetes an das schwingende Zungenende sowohl durch Luftwiderstand als auch durch magnetische Wirkung die Dämpfung

vergrößert wurde. Die blaue Kurvengruppe zeigt, daß für die Fälle, wo eine Verringerung des Widerstandes des magnetischen Kreises notwendig wird (vgl. Beschreibung p. 127 dieses Bandes), ein nachteiliger Einfluß nicht zu bemerken ist, während die Resonanzkurve bei relativ starker Erregung einseitig verzerrt wird. Man wird also gut tun, von der auf p. 127 genannten Einrichtung nur dann Gebrauch zu machen, wenn die Resonanzamplituden zu schwach ausfallen.

Über den Einfluß der Magnetstellung wurden noch spezielle Versuche unternommen, von denen hier nur mitzuteilen ist, daß von einem gewissen Abstände ab (ca. 13 mm zwischen Ruhelage des freien Zungenendes und oberen Magnetpolfläche) die Resonanzkurven weder in Lage noch Form wesentliche Unterschiede aufweisen.

Blatt XXXIV auf Taf. VI zeigt eine Anzahl Kurven, die sich auf die Resonanz des schwachen Stahlfederbandes beziehen, das zu Kontaktrelais in Aussicht genommen war und dessen Tonhöhe und Dekrement an früherer Stelle einer Besprechung unterzogen worden ist (p. 150ff.).

Die Resonanzkurven sind leicht verständlich. Wenn man sich vergegenwärtigt, daß die Eigentonhöhe mit der Amplitude leicht steigt, so darf es kaum verwundern, daß die beiden Gipfel der blauen und der rot eingeränderten Resonanzfigur übereinanderliegen, wenn auch die Resonanzfiguren selbst infolge der Dämpfung durch Luftwiderstand und dergleichen nicht nur verbreitert, sondern insgesamt nach der tieferen Lage verschoben werden. Die erregende Stromstärke des intermittierenden Gleichstroms blieb bei sämtlichen Phasen dieses Versuches gleich gering; es sollte unter anderem dargetan werden, ob das Entfernen des Luftwiderstandes für ein empfindliches Relais vorteilhaft ist. Allerdings kann der Ausschlag fast das Doppelte erreichen, wie Kurve 93 lehrt, aber es dauert relativ lange, bis dieser maximale Ausschlag erreicht ist, und außerdem tritt auch wieder eine doppelte Resonanzmöglichkeit ein. Wir sehen letzteres auch aus Kurve 92¹⁾,

1) In der Farbenerklärung für Blatt XXXIV wolle man die rote Linie mit der grünen vertauschen.

deren Aufnahme leider für die rechte, vermutlich von dem roten Kurvenstück wenig abweichende Hälfte nicht auswertbar ausgefallen ist. Für die Erregung durch Wechselstrom, dessen Stärke jedenfalls viel geringer war, ist das Relais noch empfindlicher; man sieht dies aus der Steilheit der Resonanzkurve. Aber für Messungen von sinusartigen Wechselströmen kommen derartige Relais nur ausnahmsweise in Anwendung; ihre praktische Bestimmung wäre vorzüglich, als Resonanzrelais in Empfangsstationen für drahtlose Telegraphie zu dienen. Dies Relais müßte auf die Frequenz der Unterbrechungen an dem auf der Geberstation befindlichen Induktor abgestimmt sein, es würde dann durch die Gleichstromimpulse des Kohörers in Resonanzschwingungen versetzt. Die dahin zielenden Versuche erfordern aber ein Relais, das schnell anspricht, also von starkem Dekrement. Gewöhnlich bringt schon die magnetische Dämpfung des permanenten Feldes, wie es sich z. B. bei der Anordnung des Vibrationsgalvanometers von Rubens vorfindet, eine hinreichend starke Dämpfung mit sich. Wir haben aber gesehen, daß jegliche Art von Dämpfung die Tonhöhe beeinflusst¹⁾ und daß das Resonanzbereich mit wachsender Amplitude nach der Tiefe wandert, dies um so mehr, je zarter das System ist. Es stehen daher die meisten der bisher versuchten Vergrößerungen der Empfindlichkeit untereinander im Widerspruch, und es wäre eine nicht nur interessante, sondern auch praktisch wertvolle Aufgabe, Mittel und Wege zu finden, einen von der Amplitude nicht abhängigen Resonanzkörper zu finden, etwa dadurch, daß man den Eigenton für jede Amplitude im gleichen Maße durch Änderung der physikalischen Konstanten künstlich steigern würde, als er durch magnetische und andere Dämpfung herabgedrückt wird.

Solche Versuche würden zweckmäßig und viel bequemer nur mit unterbrochenem Gleichstrom ausgeführt.

Ein lehrreiches Photogramm ist auf Taf. IV in Aufnahme 94a reproduziert. Man sieht zunächst das Ansprechen der schwachen Feder bei einem vorher einregulierten möglichst

1) Die Patentanmelder des Rubensschen Vibrationsgalvanometers weisen ausdrücklich auf diese Eigenschaft hin, vermöge deren eine bequeme Abstimmung erzielt werden soll.

günstigen Resonanzgrad. Es sei nochmals hervorgehoben, daß es genau genommen nur für jedes kleine Amplitudeninkrement einen solchen günstigsten Resonanzgrad gibt, daher auch das Anwachsen viel langsamer dauert als das freie Abklingen. Es würde dann das erregende Feld durch Zusatz eines geringen permanenten Stromfeldes verstärkt, in ähnlicher Weise, wie es zum Abstimmen oder zum Empfindlichermachen solcher Relais durch Nähern von permanenten Magneten geschehen kann. Es treten dadurch starke Schwebungen auf, die uns zeigen, daß eine Tonerniedrigung von ca. 4 Proz. eingetreten ist. Dem entspricht der endgültige, in der Abbildung nicht mehr verfolgbare, geringe Resonanzgrad.

Die Erklärung der Resonanzkurve wäre hiermit zu Ende. Es sei mir aber gestattet, im Anschluß hieran auf eine der wichtigsten Begleiterscheinungen zu sprechen zu kommen, die allgemein unter dem Namen der Schwebungen bekannt ist. Obgleich das Phänomen der Schwebungen vielfach besprochen und auch theoretisch untersucht worden ist, glaubte ich doch, eine Anzahl von Abbildungen in meiner Originalarbeit (die verschiedenartigsten Schwebungsformen wurden daselbst durch 16 Photogramme reproduziert) leichtverständliche bildliche Darstellungen niederlegen zu sollen, da in der Literatur meines Wissens nur wenig instruktive figürliche Hinweise vorhanden sind. Auf der hier beigehefteten Taf. IV konnte ich nur zwei Photogramme wiedergeben, die aber die beiden hauptsächlichsten Fälle charakterisieren, nämlich vorübergehende und andauernde Schwebungen.

Die ersteren treten stets auf zu Beginn der Resonanzschwingungen, sofern das System schwach gedämpft und der Resonanzgrad nur angenähert erreicht ist. Es bildet sich nach einem asymptotischen Abschwellen der Schwebungsstöße ein gleichbleibender Resonanzgrad aus. Bei jeder ruckweisen Frequenzänderung der erzwingenden Kraft treten die Schwebungen wieder mehr oder weniger stark auf; das gleiche geschieht bei jeder schnellen Änderung des Phasenabstandes, wozu es z. B. genügt, den schwingenden Resonanzkörper zu berühren. Auch Ungleichmäßigkeiten im Antrieb, wie sie z. B. bei unterbrochenem Gleichstrom vorkommen, stören den vorhandenen Phasenabstand und führen dadurch zu Schwebungen.

Darin besteht auch eine der unangenehmsten Mißlichkeiten bei der Ermittlung des Resonanzverlaufes mit Hilfe von unterbrochenem Gleichstrom und es muß deshalb die Unterbrechungsstelle des hierzu benutzten Saitenunterbrechers in mechanischer Beziehung sehr sorgfältig behandelt werden.

Kontinuierliche Schwebungen treten beispielsweise bei der Übereinanderlagerung zweier Tonwellen von verschiedener Periode, sowie bei stroboskopischen Beobachtungen auf; ein schönes Beispiel bietet unter anderem auch das schwebungsartige Aufleuchten einer Glühlampe unter der Einwirkung zweier Ströme von verschiedener Frequenz. Dagegen ist es nicht ohne weiteres möglich, an einem mechanischen System dauernde Schwebungen zwischen dessen Eigenschwingungen und einer erzwingenden Kraft von anderer Periode hervorzubringen. Es gelingt dies aber sehr schön, wenn man eine auf einem Luftkasten befestigte stählerne Harmoniumzunge anbläst und gleichzeitig durch magnetische Erregung in Resonanzschwingungen versetzt. Da der Luftstrom immer wieder den Eigenton aufrecht erhält, so kann man Schwebungen von absolut gleichbleibender Andauer und Intensität und in beliebiger Anzahl pro Sekunde herstellen. Wie das Photogramm 109 lehrt, vollziehen sich die Schwebungen in solch idealer Weise, wie sie auf anderem Wege kaum hergestellt werden können. Durch Anbringen eines kleinen Spiegels am freien Ende lassen sich diese Schwebungen auf einen Schirm produzieren und einem größeren Auditorium auch optisch vorführen, wiewohl die akustische Wirkung schon sehr deutlich ausfällt.

Die dem Schwebungsphotogramm übergelagerten Schwingungen stammen von einer gesondert erregten Stahlzunge, deren Schwingungen mit der magnetischen Erregerkraft isochron verlaufen. Es soll dadurch die Methode gekennzeichnet werden, mittels derer die Phasenänderungen des schwebenden Resonanzkörpers während einer Schwebungsperiode untersucht werden können.

Direkte photographische Reproduktion durch Rotationsdruck der Neuen Photographischen Gesellschaft Berlin-Steglitz.

Das in den Taf. I u. IV dieses Bandes dargestellte Reproduktionsverfahren ist an sich neuartig und findet sich auch in den Annalen zum ersten Male vor. Es mag daher eine kurze Besprechung der Herstellungsweise, sowie der Vorzüge am Platze sein.

Die bisher gebräuchlichen Reproduktionsarten für möglichst getreue Wiedergabe von Originalbildern sind die Autotypie und der Lichtdruck. Die Feinheit beider Verfahren erreicht aber bald eine Grenze an der Korngröße (des Netzes bei der Autotypie und des Kornes der lichtempfindlichen Substanz, womit die Lichtdruckglasplatte überzogen ist) Um derartig feine und scharf begrenzte Linien wiederzugeben, wie sie sich an den Originalnegativen der vorliegend besprochenen Aufnahmen vorfinden, reicht die Autotypie gar nicht und der Lichtdruck nur sehr unvollständig aus.

Die getreuesten Kopien würde man auf feinkörnigem Chlor- oder Bromsilberpapier liefern können, indessen eignet sich diese Reproduktion nicht zu größeren Auflagen (speziell nicht bei ungebundenen Heften). Das technisch durchaus einwandsfreie Verfahren der oben genannten Firma liefert aber ebenfalls sehr schöne Kopien, namentlich wenn direkt nach den Originalnegativen gearbeitet werden kann, wie dies bei der Anfertigung der zahlreichen Abbildungen für die relativ geringe Auflage meiner Abhandlung über Elektroakustische Untersuchungen möglich war. Anderenfalls müssen besondere Negative hergestellt werden. Es hängt dies mit folgender Einrichtung zusammen:

Die Negative werden auf einen sogenannten Druckrahmen aufgespannt, dessen Breite von maximal 64 cm, der Breite der Bromsilberpapierrolle entspricht. Die Höhe, allgemein 50 cm, kann geringer genommen werden. Um eine Rahmenbreite auszunützen, bedarf es also des Materiales für ca. vier Tafeln des Annalenformates. Da im vorliegenden Falle nur zwei Tafeln zu reproduzieren waren, wurden von jeder Tafel nach den Originalfilmnegativen ein Glasdiapositiv hergestellt, und davon je vier Dianegative, so daß der Rahmen zu 62 cm Breite und 47 cm Höhe ausgenutzt wurde.

Interessant ist nun, die Unterschiede zwischen Kopien nach Originalfilms und solchen nach Glasdianegativen zu verfolgen. Die Photogramme der Taf. I u. IV können entschieden noch als zartlinig angesehen werden, außerdem weisen sie gegen die Kopien nach Originalnegativen eine Verstärkung auf; sie sind härter und kontrastreicher geworden. Daran ist eben die mehrfache Übertragung schuld, [wie ich schon gelegentlich früherer, eigener Versuche bemerken konnte. Wenngleich die Linien lange nicht so fein und die Übergänge viel plötzlicher sind, als bei den in meiner zitierten Abhandlung wiedergegebenen Photogrammen, so reicht doch die Schärfe noch vollkommen aus, um alle Einzelheiten der Auf-

nahme wahrnehmen und kritisieren zu können, was bei den anderen, vorhin erwähnten Methoden ausgeschlossen wäre.

Die Neue Photographische Gesellschaft übernimmt gegen eine mäßige Vergütung die Anfertigung solcher Glasdianegative, sowie das ganze Arrangement nebst Schriftsatz. Die Aufnahmen werden durch Abdecken mittels Seidenpapier etc. auf annähernd gleiche Lichtdurchlässigkeit gebracht. Die Belichtung durch elektrische Beleuchtung wird genau ausprobiert (ca. 5—10 Sek.), so daß die Tafeln eine erfreuliche Gleichmäßigkeit besitzen.

Die Kosten des Rotationsdruckverfahrens sind begreiflicherweise höher als die der sonst üblichen Reproduktionsarten, zumal sehr große Auflagen keine wesentlichen Ermäßigungen ermöglichen können; jedoch sind die Ausgaben bei einer Mindestauflage von ca. 3000 Stück solcher Tafeln nicht zu hoch, um diesem schönen Reproduktionsverfahren die Aufnahme in wissenschaftliche Werke zu erschweren, die es dank seiner gerade hierbei schätzenswerten Vorzüge verdient.

Die besprochenen Versuche wurden größtenteils im physikalischen Institut der Universität Würzburg unter freundlicher Unterstützung seitens des Hrn. Prof. Willy Wien ausgeführt; einige Vorversuche sowie nachträgliche Beobachtungen konnte ich in den Laboratorien von Hartmann & Braun, Frankfurt a/M. anstellen.

Paris, November 1903.

(Eingegangen 8. Dezember 1903.)

92. Resonanz einer schwachen Feder auf Wechselstrom.

94 a. Anklingen einer schwachen Feder. Änderung des Resonanzgrades infolge Verstärkung des permanenten Magnetfeldes.

103. Schwebungen beim Einschalten von Wechselstrom bis zur Ausbildung eines stationären, geringen Resonanzgrades.

109. Andauernde Schwebungen einer angeblasenen Zunge bei gleichzeitiger Erregung durch unterbrochenen Gleichstrom.

Resonanz der Stimmgabel von R. Koenig auf Wechselstrom und unterbrochenem Gleichstrom.

Joh. Neumann & Neudorf, Frankfurt a. M.

Resonanz eines Stahlfederbandes.

Resonanz einer stählernen Harmoniumzunge.

Blatt XXXIV.
Resonanz einer schwachen Relaisfeder
bei verschiedenem Luftdruck.

Blatt XXXII. Stahlzunge ohne Kasten.
Weitabstehender kräftiger Magnet mit starkem Streufeld.

Blatt XXXVIII. Stahlzunge mit Kasten.
In skalentartiger Anordnung. Magnetabstand konstant.

Blatt XXXI. Stahlzunge ohne Kasten.
Magnetabstand konstant (40 mm). Erregung durch Wechselstrom.

R. Hartmann-Kempf.

Joh. Neumann & Neumann, Frankfurt a. M.

Aufnahme 22. Resonanzverlauf an einer Stimmgabel von 100 Schwingungen.

Aufnahme 80. Resonanzverlauf an einem zungenförmigen Stahlfederband von 100 Schwingungen.

Das Resonanzmaximum wurde jedesmal zuerst durch steigende, alsdann durch wieder fallende Erregerfrequenz hervorgerufen. Aufnahme 80 hat man sich symmetrisch zur Mittellinie ergänzt vorzustellen. Verkleinerung der Autotypen gegen die Originalaufnahme ca. $\frac{1}{2}$.