

**9. Die Aufzeichnung  
von akustischen Schwebungen<sup>1)</sup>;  
von C. Déguisne.**

(Hierzu Taf. IV, Figg. 1, 2, 3 a, 3 b, 5, 6, 8, 10 a, 10 b, 11 u. 13.)

Will man die Schwingungszahlen zweier nahe beisammen liegender Töne mit Hilfe von Schwebungen miteinander vergleichen, so muß man sich im allgemeinen auf die Beobachtung der letzteren mit dem Ohr beschränken, wenn man nicht von komplizierten Einrichtungen mit Membranen, Königschen Flammen oder dergl. in Verbindung mit photographischen Aufnahmen Gebrauch machen will. Eine direkte Abzählung der Stöße mit dem Ohr erlaubt nur die Beobachtung von höchstens sechs bis acht Schwebungen in der Sekunde; bei Schwingungszahlen, die weiter auseinander liegen, versagt diese Methode. Vor kurzem ist nun von K. Marbe gezeigt worden, daß sich Schallschwingungen direkt und ohne Membran mit genügender Intensität auf Flammen übertragen und die so erzeugten Bewegungen der Flammen durch Rußbilder in einfacher Weise sich fixieren lassen. Durch solche Rußbilder können nun Schwebungen in weit größerer Häufigkeit in der Sekunde beobachtet und aufgezeichnet werden, wodurch eine bequeme Vergleichung von relativ weit auseinander liegenden Schwingungszahlen mit großer Genauigkeit ermöglicht ist. Andererseits sind solche Aufnahmen nicht auf das Schwingungsverhältnis 1:1 beschränkt, sondern auch bei anderen ganzzahligen Schwingungsverhältnissen leicht durchführbar. Durch andere Untersuchungen veranlaßt, habe ich eine Anzahl solcher Aufnahmen gemacht, die im nachstehenden beschrieben und wiedergegeben werden mögen.

Zu den Versuchen wurden Stimmgabeln benutzt, die durch Laufgewichte nach Wunsch verstimmt werden konnten. Zum Teil wurden die Gabeln elektrisch zum Schwingen gebracht,

1) Aus dem Psychologischen Institut der Akademie zu Frankfurt a/M.

indem die eine Zinke mit einem Selbstunterbrecher ausgestattet war, der im Stromkreis eines zwischen den Zinken sitzenden Elektromagneten lag; zum Teil wurden sie bloß angeschlagen und klangen aus.

Die von den beiden Gabeln ausgehenden Schallschwingungen wirkten auf eine und dieselbe Flamme. Es war dies nach K. Marbe (l. c.) eine vertikal brennende Acetylenflamme von ca. 30 mm Höhe, über deren stark rußenden Spitze ein Papierstreifen in horizontaler Richtung mit verschiedener wählbarer Geschwindigkeit vorbeigeführt werden konnte. Die Übertragung der Schallschwingungen auf die Flamme erfolgte nach bereits an anderen Orten beschriebenen Methoden, entweder mit einem über der Breitseite der Gabeln befindlichen Blechzylinder<sup>1)</sup> oder indem die schwingenden Zinken der Gabeln in unmittelbare Nähe der Flamme gehalten wurden.<sup>2)</sup> Hierbei wurden die Rußringe am schärfsten erhalten, wenn die durch die Zinken gehende Ebene nicht senkrecht zur Achse der Flamme, sondern parallel zu ihr stand und die Achse der Gabel auf die Mündung des Gasbrenners wies.

Da die Geschwindigkeit des bewegten Papierstreifens nur  $\frac{1}{2}$ — $\frac{3}{4}$  m in der Sekunde betrug, konnte man mit Leichtigkeit die Schwebungen über mehrere Sekunden aufzeichnen und bequem abzählen, selbst wenn sie in weit größerer Anzahl pro Sekunde vorhanden waren, als dies bei Beobachtungen mit dem Ohr zulässig ist.

Zwei Schallwellen setzen sich zu einer resultierenden Welle zusammen, die durch die Resultierende von zwei Sinuskurven graphisch dargestellt werden kann, wenn die Schallschwingungen selbst sinusförmig verlaufen. Für die mit Stimmgabeln erzeugten Schwingungen trifft dies mit genügender Annäherung zu. Die Form der Resultierenden kommt nun im aufgenommenen Rußstreifen in der Weise zum Ausdruck, daß die in dem einen Sinne wirkenden Maxima scharfe Rußringe erzeugen, die im anderen Sinne wirkenden dagegen nicht. Die ersteren sollen im folgenden positive Maxima oder Maxima kurzweg genannt und in der graphischen Darstellung der

---

1) C. Déguisne u. K. Marbe, *Physik. Zeitschr.* 8. p. 200 ff. 1907.

2) K. Marbe, *Physik. Zeitschr.* 8. p. 92 ff. 1907.

Resultierenden in der Richtung der positiven Ordinatenachse gezeichnet werden.

Stehen die Schwingungszahlen der beiden Komponenten in einem einfachen Verhältnis, wie 1:1, 2:1, 3:2 etc., so hat die Resultierende eine relativ einfache und leicht übersichtliche Kurvenform. Diese ist von der gegenseitigen Phasenstellung der beiden Komponenten abhängig. Sie ändert sich nicht, wenn bei gleichbleibenden Amplituden die Phasenstellung unverändert bleibt. Dies ist der Fall, solange das Verhältnis der Schwingungszahlen den oben aufgezählten ganzzahligen Werten genau gleich ist. Ist es jedoch von den ganzzahligen Werten etwas verschieden, so ändert sich die Phasenstellung und damit die Kurvenform periodisch, und zwar kehrt die gleiche Phase dann wieder, wenn die eine Kurve gegenüber der anderen um den vollen Wert oder um einen Bruchteil ihrer Periode vor- oder nachgeeilt ist. Die periodische Wiederkehr der gleichen Phase gibt sich in der Wiederkehr der gleichen Kurvenform zu erkennen und läßt sich in den Rußstreifen sehr schön beobachten, wie an den auf Taf. IV wiedergegebenen Bildern nunmehr gezeigt werden soll.

Jedem Rußstreifen ist der Maßstab für die Zeit beigefügt. Dieser wurde durch eine zweite neben der ersten brennende Flamme aufgezeichnet, auf die ein mit Stromstößen von bekannten Intervallen beschicktes Telephon oder eine Stimmgabel von niedriger Schwingungszahl einwirkte.

Es muß hier noch betont werden, daß die Deutlichkeit der Ringe nicht nur durch die Wiedergabe im Druck, sondern vor allem dadurch eine Einbuße erleidet, daß die Rußbilder mit einer Schellacklösung fixiert werden müssen, wenn sie erhalten bleiben sollen.

Die Fig. 1, Taf. IV, wurde durch zwei Stimmgabeln von 258,5 und 250,0 Schwingungen aufgezeichnet. Man kann die Schwebungen an der abwechselnden Verstärkung und Schwächung der Ringe deutlich erkennen.

Unter „Schwebung“ soll im folgenden allgemein die Wiederkehr der *gleichen* gegenseitigen Phasenstellung der beiden Komponenten verstanden sein. Es sei  $z$  die Anzahl der auf die Sekunde entfallenden Schwebungen. Ist ferner die Schwingungszahl der einen Stimmgabel  $n$  und liegt das

Schwingungsverhältnis in der Nähe des ganzzahligen Wertes  $a$ , so ist die Schwingungszahl der anderen Gabel  $an \pm z$  und das gesuchte Schwingungsverhältnis

$$\frac{an \pm z}{n} \quad \text{oder} \quad a \pm \frac{z}{n}.$$

Da die Zeitmarkierung sich mit großer Schärfe durchführen läßt, so ist die Genauigkeit von  $z$  nur bedingt durch den Fehler, dem die Festlegung der Grenze zwischen zwei Schwebungen unterliegt. Es sei  $p$  derjenige Bruchteil des Abstandes zweier Schwebungen, um den die Abgrenzung der gezählten Schwebungen am Anfang und am Ende des Streifens unsicher ist. Ist  $t$  die Anzahl der aufgeschriebenen Sekunden, so ist  $zt$  die Gesamtzahl der beobachteten Schwebungen, und der relative Fehler bei der Bestimmung von  $z$  ist im ungünstigsten Falle  $\pm 2p/zt$ . Als Verhältnis der Schwingungszahlen wird dann gefunden

$$a \pm \frac{z}{n} \left( 1 \pm \frac{2p}{zt} \right) = a \pm \frac{z}{n} \pm \frac{2p}{n \cdot t},$$

wobei  $\pm 2p/n \cdot t$  der größte mögliche absolute Fehler bei der Bestimmung des Schwingungsverhältnisses ist. In dem Original unserer Fig. 1, Taf. IV, ist  $p$  ca. 0,1,  $n = 250$ ,  $t$  war ca. 10 Sek. Demnach ist der größte Wert des möglichen Fehlers

$$\pm \frac{0,2}{2500} = \pm 0,01 \text{ Proz.}$$

Die Schwebungen können sich auch durch periodisch auftretende Verbreiterungen des Rußstreifens bemerkbar machen, wie dies in Fig. 2, Taf. IV, der Fall ist. Diese ist aus 300,0 und 254,6 Schwingungen erhalten. Trotz der relativ hohen Anzahl von 45,4 Schwebungen pro Sekunde ist auch hier die Abzählung der Schwebungen ebenso sicher und die Genauigkeit in der Bestimmung des Schwingungsverhältnisses die gleiche wie oben.

Die Anzahl der Schwebungen während einer längeren Zeitdauer kann natürlich in derselben bequemen Weise bestimmt werden, wie dies bei der Messung der Schwingungsdauer von Pendeln, Magnetnadeln üblich und z. B. von Kohlrausch<sup>1)</sup> beschrieben ist.

1) F. Kohlrausch, Lehrbuch d. prakt. Physik. 10. Aufl. p. 115. 1905.

Verhalten sich die Schwingungszahlen nahe wie 2:1, so erhält man ein Rußbild, von dem in Fig. 3, Taf. IV, zwei charakteristische Stellen wiedergegeben sind. Die aus den entsprechenden Sinuskurven graphisch konstruierte Resultierende zeigt, wie aus den Figg. 4 a und 4 b zu ersehen ist,



Fig. 4a.

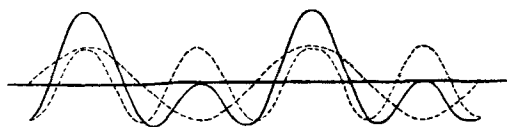


Fig. 4b.

Figg. 4a und 4b: Schwingungsverhältnis 2:1.

je nach der gegenseitigen Phasenstellung der beiden Komponenten bald gleiche, bald verschiedene Maximalwerte. Dem ersteren Falle entspricht das Rußbild 3 a, dem zweiten das Bild 3 b. Die Größe der Maximalwerte macht sich dabei durch größere oder geringere Höhe der Ringe kenntlich. Jeder Wiederkehr der gleichen Konfiguration im Rußbild entspricht eine Vor- bez. Nacheilung der höheren Schwingungszahl um eine volle Schwingung. In Fig. 3 entfallen 0,77 Voreilungen auf die Sekunde. Die eine Gabel hatte 100 Schwingungen, demnach die andere, die etwas verstimmt worden war, 49,61 Schwingungen.

Die Figg. 5 und 6, Taf. IV, sind in der Weise erhalten worden, daß ein Wechselstrom von ca. 45 Perioden durch ein Telefon geschickt wurde; über dessen Membran stand die Beobachtungsflamme, die gleichzeitig von den Schallwellen einer Stimmgabel von 49,6 Schwingungen in Fig. 5 und von 100 Schwingungen in Fig. 6 beeinflusst wurde. Die Schwebungen, die hier besonders stark ausgeprägt sind, lassen aus Fig. 5 eine Periodenzahl von 44,4, aus Fig. 6 eine solche von 44,1 errechnen. Der Unterschied zwischen beiden Werten ist

nicht etwa durch Fehler der Beobachtung, sondern durch Schwankungen der Periodenzahl verursacht.

Kombiniert man zwei Schallwellen mit dem Schwingungsverhältnis 3:1, so erhält man eine Resultierende, die die in Figg. 7 a und 7 b aufgezeichneten Formen annimmt. Bei der einen Phasenstellung, Fig. 7 a, folgen sich die Maximalwerte in Gruppen von je dreien, nämlich ein hoher von zwei kleineren benachbart, bei der anderen, Fig. 7 b, in Gruppen von zwei gleich hohen abwechselnd mit einem einzelnen erheblich

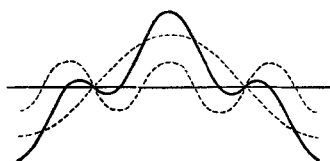


Fig. 7 a.

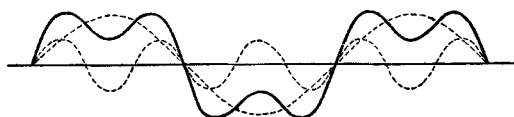


Fig. 7 b.

Figg. 7 a und 7 b: Schwingungsverhältnis 3 : 1.

kleineren Maximum. Den Figg. 7 a und 7 b entsprechen in dem mit Gabeln von ca. 300 und 100 Schwingungen erhaltenen Rußbild der Fig. 8, Taf. IV, die Stellen *A* und *B* (linke Hälfte der Ringe!), wenn man berücksichtigt, daß hier die Größe der Maxima durch die Stärke der Ringe zum Ausdruck kommt. Es entfallen hier 2,7 Schwebungen auf die Sekunde.

Die Frage, welche der beiden Gabeln in ihren Schwingungen zurückbleibt, läßt sich bei diesem Bilde aus der Verschiebung des schwach gezeichneten Rußringes, der von der Gabel mit 300 Schwingungen herrührt, gegenüber den anderen Ringen entscheiden. Dieser wandert etwas schneller als die starken, von der Gabel mit 100 Schwingungen gezeichneten Ringe. Es folgt daraus, daß die Gabel von 300 Schwingungen etwas größere Wellenlängen, also etwas kleinere Schwingungszahl lieferte, als dem genauen Schwingungsverhältnis 3:1 ent-

sprechen würde. Das Schwingungsverhältnis der Gabeln ist demnach 297,3 : 100,0.

Mindestens ebenso charakteristisch ist das Bild, das man mit dem Schwingungsverhältnis 3 : 2 erhält. Die Figg. 9 a und 9 b geben die Kurven in verschiedenen Phasen nebst den

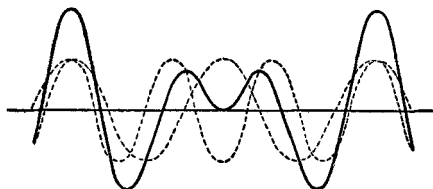


Fig. 9 a.

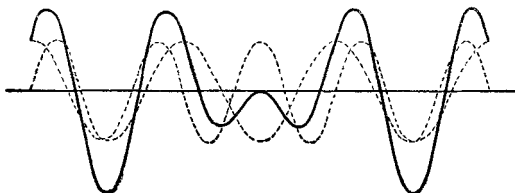


Fig. 9 b.

Figg. 9 a und 9 b: Schwingungsverhältnis 3 : 2.

jeweiligen Resultierenden und die Figg. 10 a und 10 b, Taf. IV, die Rußbilder zweier Gabeln von nominell 300 und 200 Schwingungen. In Fig. 9 a sind die spitzen, stark hervortretenden Maxima durch je zwei erheblich kleinere Maxima getrennt. Dieselbe Reihenfolge zeigen die Rußringe in Fig. 10 a. In Fig. 10 b dagegen ist je ein Paar stärkerer Rußringe durch einen schwachen getrennt, ebenso wie in Fig. 9 b zwei stärkere Maximalwerte mit einem schwächeren abwechseln. Figg. 10 a und 10 b zeigen 0,83 Schwebungen pro Sekunde. In Fig. 11, Taf. IV, jedoch sieht man die paarweise auftretenden Ringe mit den Einzelringen in rascherer Folge abwechseln. Es sind hier 20,0 Schwebungen in der Sekunde vorhanden. Auch hier läßt sich aus dem Rußbild entscheiden, welche Schwingung beispielsweise nacheilt. Geht man von einem Paar gleich starker Ringe aus in einer Richtung, z. B. nach rechts, so findet man bei den folgenden Paaren, daß der linke Ring allmählich stärker wird. Es folgt daraus, daß die Gabel mit

200 Schwingungen zu große Wellenlängen, also zu kleine Schwingungszahl besitzt. Tatsächlich war auch die Gabel mit 200 Schwingungen durch ein auf die Zinke geschobenes Laufgewicht ziemlich stark verstimmt worden. Das Schwingungsverhältnis war danach 300,0:186,7.

Zum Schluß sei noch ein Schwingungsverhältnis besprochen, bei dem die Schwebungen mit dem Ohr wohl kaum abgezählt werden können, selbst wenn sie genügend langsam aufeinanderfolgen. Es ist das Schwingungsverhältnis 5:2. Dieses Verhältnis könnte zwar als Verhältnis 2:1 oder 3:1 durch Ab-

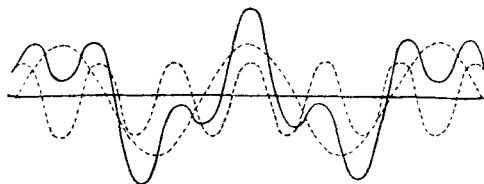


Fig. 12a.

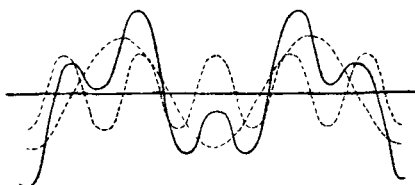


Fig. 12b.

Figg. 12a und 12b: Schwingungsverhältnis 5:2.

zählen der Schwebungen ausgewertet werden. Da aber hierbei auf jede zweite Schwingung des unteren Tones schon eine Schwebung entfällt, würde die Abzählung der letzteren leicht zu Unsicherheiten und Fehlern führen. Genauer wird das Resultat, wenn man die dem Verhältnis 5:2 eigene Resultierende zugrunde legt. Diese ist in Figg. 12a und 12b bei zwei um eine viertel Periode verschiedenen Phasenstellungen der kürzeren Welle gezeichnet. Das entsprechende Rußbild Fig. 13, Taf. IV, wurde mit zwei Gabeln von ca. 250 und 100 Schwingungen erhalten. Ein Vergleich der beiden Figuren läßt an den mit *A* bezeichneten Stellen den starken, zwischen zwei schwächeren liegenden Maximalwert, entsprechend Fig. 12a,



und bei den Punkten *B*, der Fig. 12 b entsprechend, das schwache Maximum in der Mitte zwischen zwei Paaren von stärkeren Maximalwerten wiederfinden. Es wurden 12,8 Schwebungen pro Sekunde abgezählt. In ähnlicher Weise wie früher kann gefolgert werden, daß die kleinere Gabel voreilt. Da hier jeder Schwebung eine Verschiebung um eine *halbe* Schwingung entspricht, so ist das Schwingungsverhältnis der beiden Gabeln 256,4:100,0.

Es ist im vorhergehenden gezeigt worden, wie mit Hilfe der Marbeschen Rußmethode Schwebungen von Stimmgabeln fixiert und bequem abgezählt werden können. Die Anzahl der auf die Sekunde entfallenden Schwebungen darf dabei 50 und mehr erreichen. Solange die Schwingungszahl des tieferen Tones das Vier- bis Fünffache der Anzahl der Schwebungen beträgt, kann die Abzählung der letzteren mit genügender Sicherheit erfolgen. Nicht nur das Verhältnis 1:1, sondern auch Schwingungszahlen mit den Verhältnissen 2:1, 3:1, 3:2, 5:2 lassen sich miteinander vergleichen. Andere Verhältnisse können auf diese zurückgeführt und durch Abzählung der Schwebungen bestimmt werden. So ist es möglich, mit einer Stimmgabel von z. B. 100 Schwingungen sämtliche Schwingungszahlen zwischen 30 und 300 ohne weiteres zu messen. Die Periodenzahlen von Wechselströmen lassen sich in gleicher Weise bestimmen. Es ist wahrscheinlich, daß die beschriebene Methode sich auch auf Töne, die mit Zungen, Pfeifen, Sirenen etc. erzeugt werden, anwenden läßt.

Die oben wiedergegebenen Rußbilder sind im Psychologischen Institut der Akademie zu Frankfurt a. M. aufgenommen worden, wo mir Prof. Marbe seine Apparate und Institutseinrichtungen in entgegenkommendster Weise zur Verfügung stellte. Ich möchte ihm dafür auch an dieser Stelle meinen wärmsten Dank aussprechen.

(Eingegangen 10. April 1907.)

---