Über die

Sichtbarmachung von Saitenschwingungen

mit dem Vibroskop.

Von

Prof. Dr. Anton Lampa.

Vortrag, gehalten den 18. November 1914.

Mit 1 Abbildung im Texte.

Seit den Erkenntnissen der pythagoreischen Schule über das Verhältnis zwischen Saitenlänge und Tonhöhe sind dem Problem der schwingenden Saiten überaus zahlreiche Untersuchungen gewidmet worden. Die moderne Physik der Töne beginnt allerdings erst mit Galilei, der in seinen berühmten „Discorsi e dimostrazioni matematiche“ auch die Saitenschwingungen erörtert, ohne allerdings wesentlich mehr zu geben, als die pythagoreische Schule bereits wußte. Damit war aber der Anstoß gegeben, das Problem von neuem zu untersuchen. Mit viel Glück beschäftigte sich Mersenne mit dieser Frage der Akustik; er studierte die Abhängigkeit der Tonhöhe einer Saite von ihrer Länge, Dicke, Spannung und spezifischem Gewicht. Seine Resultate gaben erst die Basis für die mathematische Untersuchung des Problems. Eine solche wurde zuerst von Taylor ausgeführt. Diese Untersuchung lenkte die Aufmerksamkeit auf eine neue, bis dahin unbeachtete Seite des Problems: die Form der Kurve, in welcher die Saite ihre Schwingungen ausführt.

Wir übergehen die weitere geschichtliche Entwicklung. Es genüge der Hinweis, daß seit Mersenne und Taylor Experiment und Theorie, sich gegenseitig stützend und fördernd, weiter fortgeschritten sind. Es stellte sich bei dieser Entwicklung heraus, daß die Frage nach der Form der Saitenschwingungen nicht bloß ein mathematisches, sondern auch ein eminent physikalisches Interesse hat. Die Form, in welcher die Saite schwingt, ist ja die physikalische Grundlage für jene charakteristische Eigentümlichkeit des Saitentones, welche wir als seine Klangfarbe bezeichnen. Durch die Untersuchungen von H. v. Helmholtz über die Bewegungen geschlagener, gezupfter und gestrichener Saiten wurde dieses Problem außerordentlich gefördert. Helmholtz selbst hat durch die Konstruktion des Vibrationsmikroskops ein Mittel zum experimentellen Studium der Saitenbewegungen angegeben. Aber weder in theoretischer noch in experimenteller Hinsicht ist durch die Arbeiten von Helmholtz das Problem der Saitenschwingungen zum vollständigen Abschluß gebracht worden. Erwähnt sei z. B. die nachgelassene Abhandlung von F. Lippich über die Theorie der Bewegung gestrichener Saiten (kais. Akad. d. Wissensch. in Wien, März 1914), welche eine Aufklärung über die Wirkungsweise des Violinbogens versucht. In experimenteller Hinsicht bedeuten insbesondere die Untersuchungen über Saitenschwingungen von Krigar-Menzel und A. Raps (Sitzungsberichte d. k. Preuß. Akad. d. Wissensch., Physik.-math. Klasse, Juni 1891 und Annalen der Physik und Chemie, Bd. 44, 1891) bemerkenswerten Fortschritt gegenüber der Helmholtzschen Beobachtungsmethode mit dem Vibrationsmikroskop.

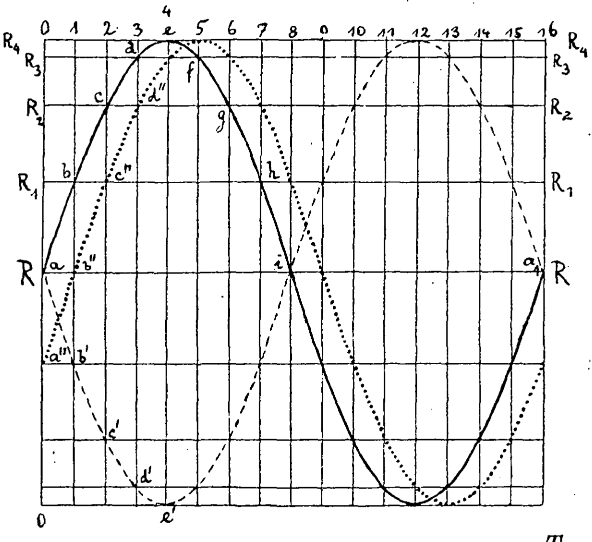
Die von Krigar-Menzel und Raps angewandte Methode, Saitenschwingungen aufzuzeichnen, ist eine photographische. Das Wesentlichste derselben, die Erzeugung des Bildes eines scharf begrenzten, sehr stark beleuchteten Punktes der Saite ohne jede Belastung derselben, wurde bei Gelegenheit eines mit Professor Kundt ausgeführten Versuches aufgefunden. Spannt man nämlich quer vor einer von hinten stark beleuchteten Spalte eine Saite aus und entwirft hievon ein objektives Bild auf einem Schirm, so erscheint mitten in der Spalte ein dunkler Punkt, welcher bei einer Erregung der Saite auf und ab schwingt. Wird nun dieses Spaltbild auf eine mit photographischem Papier überzogene, gleichförmig schnell umlaufende Trommel geworfen, so findet sich auf dem photographischen Papier nach der Entwicklung eine Kurve (weiß auf schwarzem Grunde), welche die Lage des Saitenpunktes in ihrer Abhängigkeit von der Zeit darstellt. Auf diese Weise haben die genannten Physiker die Bewegung verschiedenartig erregter Saiten untersucht. Die Methode arbeitet sehr exakt, weil das photographisch fixierte Bild eine bequeme und genaue Ausmessung gestattet.

Diese Methode ist natürlich auch für die Demonstration sehr wertvoll; die erhaltenen Bilder geben ein anschauliches Bild der theoretischen Resultate. Aber für die unmittelbare Demonstration ist sie wenig geeignet, da sie die Zwischenschaltung eines immerhin umständlichen Verfahrens, der Entwicklung des photographischen Bildes, erfordert. Dieses wird vermieden bei einer Methode der Sichtbarmachung der Saitenschwingungen, welche von S. Mikola angegeben worden ist (Annalen der Physik, Bd. 20, 1906). Diese Methode ermöglicht die unmittelbare Demonstration der Saitenschwingungen und insbesondere die Demonstration des Vorhandenseins verschiedener Obertöne bei den verschiedenen Arten der Anregung der Saite.

Mikola projiziert ein Stück der horizontal gestellten Saite auf die Mantelfläche eines um eine vertikale Achse rotierenden Zylinders, auf welcher ein System gleichweit abstehender schmaler, weißer Streifen auf schwarzem Grunde parallel zur Zylinderachse aufgetragen ist. Rotiert der Zylinder, so erscheint er infolge des Nachwirkens des Lichteindruckes gleichförmig grauweiß. Projiziert man die ruhende Saite auf diesen Zylinder, so sieht man auf demselben eine schwarze, gerade Schattenlinie. Wird die Saite in Schwingungen versetzt, so erhält man bei passender Rotationsgeschwindigkeit eine einfache, ruhende Wellenlinie, falls die Saite keine Obertöne hat; sind Obertöne vorhanden, so laufen über die Wellenlinie verschiedenartige Zacken.

Zur Erklärung der Erscheinung stellen wir folgende Überlegungen an. In der Figur (S. 39) stellen die horizontalen Geraden die Lagen des Mittelstückes einer Saite während einer einfachen reinen Schwingungsbewegung der Saite dar. (Die Saite sei lang gegen das betrachtete Stück, so daß dieses auch während der Schwingung als geradlinig angesehen werden kann.)

Wir beginnen die Zeitzählung in dem Momente, wo die Saite die Ruhelage RR in der Richtung nach oben durchschreitet. In diesem Moment habe ein an der Saite mit unveränderlicher Geschwindigkeit vorbeigleitender Stab die Stellung 00. Es ist dann a der Kreuzungspunkt der Saite und des Stabes im Momente 0. Die



Schwingungsdauer der Saite sei T. Zur Zeit $\frac{T}{16}$ ist dann die Saite in der Stellung R_1R_1, während der Stab in die Stellung 1 gekommen ist. Der Kreuzungspunkt von Saite und Stab liegt jetzt in b. Zur Zeit $2\frac{T}{16}$ ist die Saite in R_2R_2, der Stab in 2, der Kreuzungspunkt in *c*. Ähnlich finden wir für die Zeit $3\frac{T}{16}$ den Kreuzungspunkt *d*, für $4\frac{T}{16} = \frac{T}{4}$ den Kreuzungspunkt *e*. $R_4 R_4$ ist die höchste Stellung, welche von der Saite erreicht wird. Sie geht nun gegen die Ruhelage zurück. Zur Zeit $5\frac{T}{16}$ ist sie wieder in $R_3 R_3$, der Stab in 5, der Kreuzungspunkt in *f* usw. Zur Zeit $18\frac{T}{16} = \frac{T}{2}$ liegt der Kreuzungspunkt in *i*, wieder in der Ruhelage der Saite. Nun bewegt sich die Saite unter die Ruhelage, erreicht zur Zeit $12\frac{T}{16} = 3\frac{T}{4}$ die tiefste Lage, aus welcher sie dann zurückgeht, um zur Zeit $16\frac{T}{16} = T$ wieder die Ruhelage zu erreichen. Zu dieser Zeit liegt der Kreuzungspunkt also wieder in der Ruhelage der Saite, in a_1. Wir sehen also, daß während einer Schwingungsdauer T der Saite der Kreuzungspunkt der Saite und des Stabes eine **einfache** Wellenlinie beschreibt: der einfachen Schwingungsbewegung der Saite entspricht eine einfache Wellenbewegung des Kreuzungspunktes.

Auf dem Mikolaschen Apparat, dem sogenannten Phonoskop, kann diese Bewegung des Kreuzungspunktes beobachtet werden. Der Kreuzungspunkt des schwarzen Schattens der Saite, der den weißen Strich durchschneidet, ist hier als dunkler Punkt auf dem weißen Strich wahrnehmbar. Wegen des Nachwirkens des Lichteindruckes wird die Bewegung des Kreuzungspunktes in einer Wellenlinie sichtbar. Freilich wäre die dunkle Spur, welche der Kreuzungspunkt zieht, nicht sehr deutlich. Man kann sie verstärken, indem man nicht bloß einen weißen Strich, sondern zahlreiche Striche auf der Trommel anbringt und nun die Rotationsgeschwindigkeit der Trommel so wählt, daß die Spuren der einzelnen Kreuzungspunkte aufeinander zu liegen kommen. In unserer Figur würde dies erreicht, wenn in 0 ein zweiter Stab einrückt in dem Moment, in welchem der erste Stab, dessen Kreuzungspunkt mit der Saite wir verfolgt haben, in Stellung 16 eingerückt ist. Ebenso würde ein dritter Stab dieselbe Spur des Kreuzungspunktes ergeben, wenn er in 0 erscheint, sobald der zweite in 16 eingerückt ist usf. Regulieren wir also die Geschwindigkeit der Trommel so, daß der Abstand zweier Striche während einer Schwingungsdauer der Saite durchlaufen wird, so sehen wir auf der Trommel eine feststehende Wellenlinie, deren Wellenlänge gleich ist dem Abstand zweier Striche. Dies die Grunderscheinung. (Demonstration.)

Nebenbei sei bemerkt, daß man, falls man die Umlaufszeit der Trommel und die Zahl der Striche auf derselben kennt, durch diesen Versuch auch sofort die Schwingungsdauer der Saite ermittelt hat; denn es ist diese Dauer T gleich der Umlaufszeit U der Trommel dividiert durch die Zahl Z der Striche: $T = \frac{U}{Z}$; somit die Schwingungszahl n der Saite: $n = \frac{1}{T} = \frac{Z}{U}$.

Wir fragen nun weiter: Welche Erscheinung würde sich ergeben, wenn wir bei gleich bleibender Umlaufszeit der Trommel die Strichzahl verdoppeln und nun den Versuch mit derselben Saite wiederholen würden? Wir kehren zu unserer Figur zurück. Es würde dann offenbar der zweite Stab in 0 erscheinen, wenn der erste Stab in die Lage 8 eingerückt ist. Sein Kreuzungspunkt mit der Saite geht durch die Punkte a', b', c', d' usf., wie durch Anwendung der gleichen Betrachtung, wie wir sie oben durchgeführt haben, erhellt, beschreibt also die in der Figur gestrichelte Wellenlinie. Es geben nun die Stäbe 1, 3, 5, ... dieselbe Wellenlinie und die Stäbe 2, 4, 6, ... ebenfalls. Diese zwei Wellenlinien sind aber um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben. Die Verdopplung der Stabzahl vermindert die Zeit zwischen dem Erscheinen zweier benachbarter Stäbe an derselben Stelle auf die Hälfte. Denselben Effekt kann man natürlich bei gleichbleibender Entfernung zweier Nachbarstäbe auch durch Verdoppelung der Geschwindigkeit erreichen, mit welcher sich die Stäbe bewegen. Wir müssen also diese Erscheinung mit unserem Phonoskop darstellen können, wenn wir die Umlaufsgeschwindigkeit der Trommel verdoppeln. Dies ist in der Tat der Fall, wie der Versuch zeigt. (Demonstration.)

Man erhält durch entsprechende weitere Steigerung der Umlaufsgeschwindigkeit noch komplizierter verschlungene Wellenzüge, worauf wir aber nicht näher eingehen wollen. Aber eine Erscheinung müssen wir noch besonders hervorheben, das ist das Auftreten fortschreitender Wellenlinien. Wir kehren zu diesem Zweck zu unserer Figur zurück. Es erscheine in 0 ein zweiter Stab im Momente, wo der erste Stab in 15 angelangt ist. Der Kreuzungspunkt dieses zweiten Stabes mit der Saite ist dann a″. Rückt der erste Stab weiter nach 16, so geht der zweite in derselben Zeit nach 1, die Saite nach *RR* und der Kreuzungspunkt des zweiten Stabes mit der Saite nach b″ usw. Die Spur der Kreuzungspunkte des zweiten Stabes liefert jetzt eine Wellenlinie, welche gegen die erste um $^1/_{16}$ Wellenlänge in der Fortschreitungsrichtung der Stäbe verschoben ist. Diese Wellenlinie ist in der Figur durch die punktierte Wellenlinie a″ b″ c″ . . . . dargestellt. In ähnlicher Weise wird ein dritter Stab, welcher vom zweiten ebenfalls $^{15}/_{16}$ Wellenlängen absteht, wieder eine Wellenlinie liefern, die abermals um $^1/_{15}$ Wellenlänge in der Fortschreitungsrichtung der Stäbe verschoben ist usf. Die Verringerung des Abstandes der Stäbe um $^1/_{15}$ Wellenlänge können wir bei gleichbleibendem Abstand derselben ersetzen durch eine Steigerung der Fortschreitungsgeschwindigkeit derselben um $^1/_{15}$. Wir können daher mit dem Phonoskop die Wirkung leicht studieren. Wir finden, daß wir diese bei kleiner Steigerung der Umlaufsgeschwindigkeit einzelnen Wellenzüge nicht mehr gesondert wahrnehmen, sondern daß wir den Eindruck einer in der Richtung der Trommeldrehung fortschreitenden Wellenlinie erhalten. (Demonstration.) In ähnlicher Weise ergibt die Verlangsamung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel eine entgegengesetzt zur Richtung der Trommeldrehung fortschreitende Wellenlinie. Die Wellenlinie steht also nur still, wenn das Produkt aus Geschwindigkeit des Fortschreitens der Stäbe mal Schwingungsdauer der Saite gleich ist dem Abstand der Stäbe. Ist dieses Produkt kleiner oder größer als der Abstand der Stäbe, so schreiten die Wellenlinien in der oder gegen die Bewegungsrichtung der Stäbe fort. Nimmt der Unterschied dieser Größen über einen gewissen, von physiologischen Bedingungen abhängigen Wert zu, so erhalten wir, wie wir schon an einem besonderen Fall gezeigt haben, Systeme von Wellenlinien, an denen wir wieder Stillestehen oder Fortschreiten beobachten können.

Das Phonoskop von Mikola hat den Nachteil, daß die Fläche, auf welche projiziert wird, keine Ebene ist. Infolgedessen ist die Wellenlinie gegen die beiden Ränder des Zylindermantels zu weniger scharf als in der Mitte, auf welche man einstellt. Auch gestattet das Phonoskop nicht die unmittelbare subjektive Beobachtung der Saite. Man kann immer nur die Erscheinung auf der rotierenden Trommel beobachten oder photographisch fixieren und das bedeutet gerade für die wissenschaftliche Verwertung des Mikolaschen Prinzips einen Mangel.

Ich habe nun das Mikolasche Prinzip zu einer Anordnung verwendet, welche von den genannten Nachteilen frei und im ganzen auch einfacher als das Mikolasche Phonoskop ist. Ich habe meinen Apparat

Vibroskop getauft. Mein Vibroskop besteht aus einer dünnen kreisförmigen Blechscheibe, in welche ein Kranz radialer, in gleichem Winkelabstand von einander abstehender Schlitze eingeschnitten ist. Die zu beobachtende Saite durchschneidet als Sehne eine Reihe dieser Schlitze. Es ist dabei gleichgültig, auf welcher Seite der Scheibe die Saite liegt.

Zur objektiven Demonstration bringt man das Vibroskop in den Projektionsapparat. Saite und Scheibe müssen möglichst nahe beisammen liegen. Man bildet die von der Saite gekreuzten Schlitze auf dem Projektionsschirm scharf ab, bringt die Saite zum Tönen (wobei darauf zu achten ist, daß die Schwingungsebene der Saite parallel zu der Ebene der Scheibe ist), erteilt der Scheibe die geeignete Rotationsgeschwindigkeit — sei es von Hand, sei es durch einen Motor — und beobachtet nun auf dem Projektionsschirm die gleichen Erscheinungen, wie man sie auf der rotierenden Trommel des Mikolaschen Phonoskops beobachten kann.

Die Konvergenz der Schlitze ergibt keine merkliche Störung in der Reinheit des Phänomens. Wollte man eine Wellenlinie von größtmöglicher geometrischer Einfachheit erzielen, so müßte man ein Band mit gleichweit abstehenden parallelen Schlitzen längs der Saite vorbeiziehen, was zwar technisch leicht ausführbar (z. B. Filmband im Kinematographen), aber für die gewöhnliche Verwendung des Vibroskops überflüssig kompliziert wäre.

Dieses Vibroskop gestattet, die Saite auch vertikal oder in einem beliebigen Winkel gegen die Horizontale anzuordnen, je nach Bedürfnis oder Bequemlichkeit. Die Dimensionen des Projektionsbildes sind in einfachster Weise zu verändern, auch kann man sich leicht mehrere Scheiben mit verschiedenen Schlitzzahlen herstellen, um verschieden große Wellenlängen zu erhalten.

Um die Erscheinungen direkt subjektiv beobachten zu können, stellt man das Vibroskop vor eine hell erleuchtete Fläche. Will man die Erscheinungen photographisch fixieren, so erzeugt man die Abbildung der Schlitze und Saite direkt auf der photographischen Platte mit Hilfe des Objektivs des photographischen Apparates. Man kann also mit diesem Vibroskop die Erscheinungen unmittelbar photographisch festhalten, während dies mit dem Mikolaschen Phonoskop nur indirekt möglich ist.

Die Scheibe des Vibroskops, mit welchem die nun zu demonstrierenden Versuche ausgeführt werden, hat einen Durchmesser von 25 cm und 102 Schlitze. Diese sind 3 cm lang und enden 8 mm vor dem Rand der Scheibe.

Zunächst untersuchen wir die Schwingungen einer Stimmgabel. Die Stimmgabel liegt horizontal, derart, daß ihre Zinken in einer zur Scheibe parallelen Ebene schwingen. An der einen Zinke ist eine Verlängerung, Borste, dünner Draht, angebracht, dessen Schwingungsbewegung wir beobachten wollen. Wir sehen nach Einregulierung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe eine einfache Wellenlinie, ein Beweis dafür, daß die Stimmgabel praktisch ohne Obertöne schwingt. (Versuch.)

Nun betrachten wir die Schwingungen einer Saite. Wir können die Saite durch Zupfen, Schlagen oder Streichen mit einem Violinbogen zum Tönen bringen. Wir sehen nun deutlich, daß die Schwingungsformen der Saite je nach der Anregungsart verschieden sind. (Versuche.) Die Saitenpunkte führen nicht eine einfache Schwingungsbewegung aus, wir erhalten daher auch nicht mehr eine einfache Wellenlinie auf dem Projektionsschirm. Wir sehen über die stehende Linie verschiedene Zacken laufen, welche durch die Oberschwingungen bedingt sind, die sich der Grundschwingung überlagern. Diesen Oberschwingungen entsprechen Obertöne, die im Zusammenklang mit dem Grundton die Klangfarbe des Saitentones bedingen.

Besonders charakteristisch ist das Bild, welches die gestrichene Saite liefert. Es besteht aus Zacken, die aus geraden Linien zusammengesetzt sind. Hebt man den Bogen ab, so geht die Bewegung der weitertönenden Saite bald in eine einfache Schwingungsbewegung über. Die Zacken verschwinden und machen einer einfachen Wellenlinie Platz.

Durch die Analyse der zu beobachtenden Kurven erhält man Aufschluß über die Schwingungsform der Saite. Wir können hierauf nicht weiter eingehen, aber die vorstehenden Ausführungen werden wohl die Möglichkeit solcher Analyse erkennen lassen.