

Eine neue optische Meßmethode für Grammophonplatten.

(Mitteilung aus dem Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung.)

Von Gerhard Buchmann und Erwin Meyer.

Die starke Entwicklung der Grammophon-technik in den letzten Jahren hat auch die Aufmerksamkeit auf die Meßmethoden dieses Gebietes gelenkt. Bei den modernen elektrischen Aufnahmegeräten, die allenthalben die alten mechanischen Apparate verdrängt haben, kann man drei wesentliche Bestandteile unterscheiden: das Aufnahmemikrophon, den Verstärker und den elektromagnetischen Schreibapparat. Verfahren zur Messung des Aufnahmemikrophons sowie des Aufnahmeverstärkers sind in genügender Zahl bekannt. Dagegen fehlen bisher geeignete einfache Methoden zur Festlegung der Eigenschaften des Grammophonschreibers, d. h. des Apparates, der die an ihn angelegten Wechselspannungen als Amplituden auf die Wachsaufnahmeplatte eingräbt; die heute dabei allgemein übliche Aufzeichnung ist die seitliche Schrift (Berliner Schrift). Will man die Frequenzabhängigkeit eines Schreibers messen, so muß man an ihn für alle Frequenzen eine konstante oder wenigstens eine bekannte sinusförmige Wechselspannung anlegen und die zugehörigen Amplituden auf der Wachsplatte bzw. nach dem Kopierprozeß auf der „schwarzen“ Grammophonplatte ausmessen. Eine solche Platte mit bekannten Amplituden für die einzelnen Frequenzen ist andererseits auch notwendig, um die Frequenzabhängigkeit der Wiedergabeapparate, der elektrischen oder mechanischen Grammophone, zu bestimmen. Die Meßverfahren sowohl der Aufnahme- wie der Wiedergabetechnik laufen also darauf hinaus, die Größe von Amplituden auf Grammophonplatten zu ermitteln.

Die älteste und dabei gebräuchlichste Methode ist die mikroskopische; sie liefert direkt die Amplitude, bereitet allerdings wegen der Kleinheit der Amplituden, vor allem für die hohen Frequenzen, ziemliche Meßschwierigkeiten. Die für die Grammophontechnik wesentliche Größe ist nämlich nicht die Amplitude selbst, sondern das Produkt: Amplitude \times Frequenz, d. h. die

Geschwindigkeitsamplitude. Ein idealer elektrischer Schreiber soll bei Erregung mit konstanter Wechselspannung für alle Frequenzen eine konstante Geschwindigkeitsamplitude aufzeichnen; die Amplitude selbst nimmt daher bei wachsender Tonhöhe umgekehrt proportional mit der Schwingungszahl ab.

Ein zweites Verfahren, das der eine von uns¹⁾ vor einiger Zeit entwickelt hat, arbeitet mit einem elektrischen Tonabnehmer, dessen Wechselspannung ein Maß für die Amplituden auf der Grammophonplatte gibt. Um die Frequenzabhängigkeit des Tonabnehmers auszuschalten, erzeugt man durch entsprechende Veränderung der Umdrehungszahl der Grammophonplatte stets die gleiche Frequenz. Der Nachteil der Methode besteht darin, daß ein größerer Aufwand an Apparaten, Verstärker, Gleichrichter sowie eine Vergleichstonquelle variabler Frequenz, erforderlich ist. Das Verfahren liefert unmittelbar die Amplituden, erst nach Umrechnung die Geschwindigkeitsamplituden, aber nicht in der wirklichen Größe, sondern in der Stärke, in der sie die Spitze der Abnahmenadel ausführt, in der sie also für die Wiedergabe maßgebend sind; wir kommen darauf später noch zurück.

Im folgenden soll nun ein sehr einfaches, optisches Verfahren beschrieben werden, das gestattet, unmittelbar die Geschwindigkeitsamplitude auf der Grammophonplatte in absolutem Maße abzulesen. Die Methode ist nichts weiter als die quantitative Auswertung der allgemein bekannten Lichtreflexe an einer Grammophonplatte; sie geht auf folgende Erscheinung zurück. Auf der Grammophonplatte sei ein sinusförmiger Ton bestimmter Amplitude und Frequenz aufgezeichnet; Kurve *AE* der Abb. 1 stelle einen Normalschnitt einer Seitenwand der eingegrabenen Furche auf einem kurzen Kurvenstück (einer Wellenlänge) dar.

¹⁾ Erwin Meyer und Paul Just: „Frequenzkurven von elektrischen Tonabnehmern und mechanischen Grammophon“. ENT 6, S. 264, 1929.

Die Seitenwand sei als lichtreflektierend vorausgesetzt. Auf die Kurve AE falle paralleles Licht auf. Der Winkel, den die reflektierten Strahlen mit der Einfallrichtung bilden, ist von dem Reflexionspunkt abhängig. Er variiert von der Größe 0 bei den Extremwerten A , C und E bis zu einem Grenzwinkel γ an den Wendepunkten B und D ,

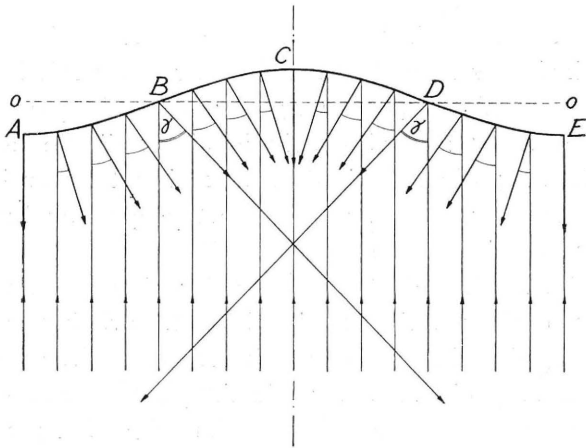


Abb. 1. Reflexion parallelen Lichtes an einer Sinuskurve.

welche die Schnittpunkte der Sinuskurve mit der Nulllinie oo sind. Wesentlich ist, daß die Größe des Winkels γ von der Steilheit der Sinuslinie an dieser Stelle, d. h. von dem Differentialquotienten und damit von der Geschwindigkeits-

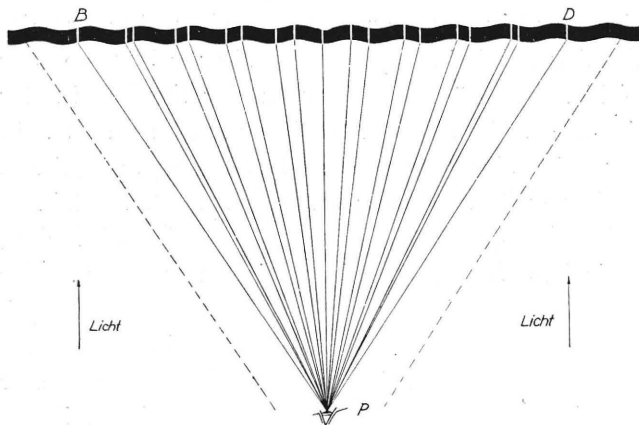


Abb. 2. Reflexionspunkte einer Sinuskurve bei mehreren Wellenlängen.

amplitude abhängt. Geht man nun zu mehreren Wellenlängen über, so erhält man Abb. 2, bei der ebenso wie vorher paralleler Lichteinfall vorausgesetzt wird. Ein Beobachter im Punkte P sieht, wie Abb. 2 andeutet, eine Reihe von Lichtpunkten; die am weitesten nach außen liegenden Punkte B und D , bei denen also die Licht-

ablenkung am stärksten ist, liegen an den Wendepunkten der Sinuskurve, sind daher durch die Größe der aufgezeichneten Geschwindigkeitsamplitude bestimmt. Reflexionspunkte jenseits von B und D , die noch zur Lichterscheinung für den Beobachter in P beitragen könnten, existieren nicht. Bewegt man die Sinuslinie in ihrer Längserstreckung — bei der Grammophonplatte bedeutet dies eine Rotation —, so bewegen sich die einzelnen Punkte und liefern den Eindruck einer Lichtlinie, die sich von B bis D erstreckt. Die Länge dieser Lichtlinie ist bei gegebener Stellung von P ein Maß für die Geschwindigkeitsamplitude. Abb. 3 zeigt zunächst die beschriebene Licht-

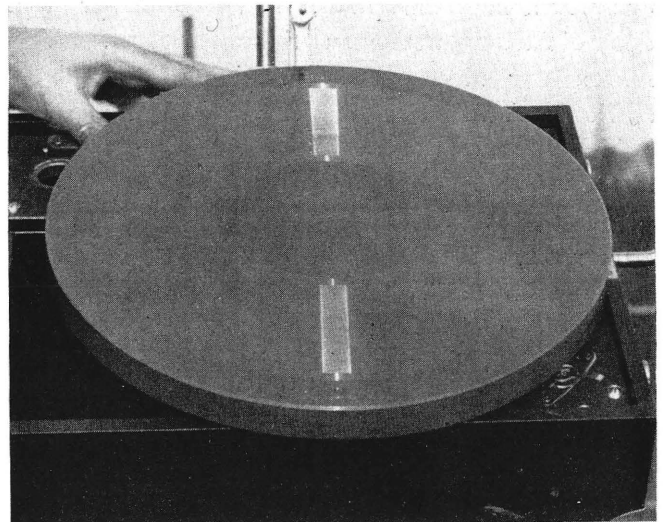


Abb. 3. Wachsplatte mit konstanter Frequenz und Amplitude.

erscheinung an einer Wachsplatte, die mit einem reinen Ton konstanter Frequenz (600 Hz) und konstanter Amplitude beschrieben ist; Anfang und Ende der Platte enthalten einige Leerlaufriellen, d. h. Rillen, die nicht beschrieben sind. Als Lichtquelle diente die Sonne; die Wachsplatte wurde so geneigt, daß die Rillenwand möglichst lichtstark nach dem photographischen Apparat zu reflektierte. Die Platte wurde bei der Aufnahme etwas bewegt, so daß die einzelnen Lichtpunkte zu einem Lichtband verschmelzen. Das Lichtband ist, wie auch die Reproduktion noch zeigt, ganz scharf begrenzt und kann sehr einfach ausgemessen werden. Es ist zunächst verwunderlich, daß das Lichtband auf der ganzen Platte trotz der verschiedenen Krümmung der einzelnen Rillen eine konstante Breite hat. In der Ab-

leitung ist bisher vorausgesetzt worden, daß die Sinuslinie längs einer Geraden, nicht längs eines Kreises aufgezeichnet wird, wie es in Wirklichkeit der Fall ist. Haben wir keine Gerade wie in Abb. 2, sondern einen Kreis²⁾ mit der konvexen Seite nach *P* als Nulllinie der Sinuskurve, so wird die Neigung der reflektierenden Stellen bei *B* und *D* gegenüber der Einfallsrichtung des Lichtes verkleinert; damit wird das Lichtband gegenüber dem in Abb. 2 dargestellten Fall schmaler, und zwar um so mehr, je kleiner der Radius *R* des Kreises ist. Nach dieser Überlegung müßte also das Lichtband in Abb. 3 nach

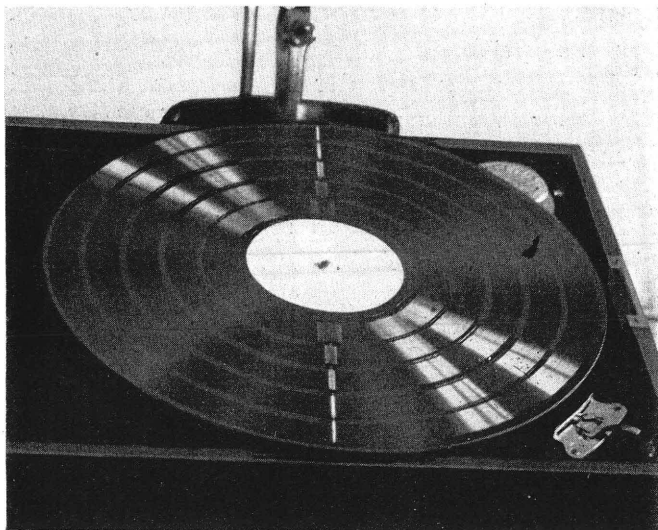


Abb. 4. Ton 435 Hz mit verschiedenen Amplituden.

dem Mittelpunkt der Platte hin proportional *R* in der Breite abnehmen. Dieser Effekt wird aber dadurch rückgängig gemacht, daß die Wellenlänge des aufgezeichneten Tones nach der Mitte zu geringer und damit die Steilheit der Sinuskurve größer werden; diese Vergrößerung der Steilheit erfolgt wie $\frac{1}{R}$ und bewirkt gerade eine solche Verbreiterung des Lichtbandes, daß es auf der ganzen Platte konstant wird.

Abb. 4 zeigt ein weiteres Beispiel: den Ton 435 Hz in verschiedenen Stärkestufen. Die Amplituden wurden bei der Aufnahme wie 1:2:4:8:16 variiert, was auch die Ausmessung von Abb. 4 bestätigt. Die Aufnahme Abb. 4 ist

²⁾ Die Breite des Lichtbandes wird dann schon in ganz geringer Entfernung von der Grammophonplatte unabhängig von der Lage von *P* (vgl. Abb. 7).

an einer „schwarzen“ Grammophonplatte mit einer künstlichen Lichtquelle, einer Wolfram-Punktlichtbogenlampe, ausgeführt; da die Erscheinung der Lichtbänder außerordentlich lichtstark ist und die Punktlichtlampe zur Allgemeinbeleuchtung der Platte nicht hinreicht, wurde zur Vermeidung von zu starken Kontrasten noch



Abb. 5a. Töne 50, 100, 200, 400 Hz.



Abb. 5b. Töne 800, 1600, 3200, 6400 Hz.

Tageslicht zur Beleuchtung herangezogen. Auf dieses Tageslicht, das durch zwei Fenster in den Aufnahmeaum einfiel, gehen die beiden schräg liegenden Lichtstreifen zurück. Daß diese Lichtstreifen so verwaschen sind und nicht die Intensitätsunterschiede zeigen, beruht auf dem diffusen Lichteinfall des Tageslichtes. Zur scharfen Ausbildung der Lichtbänder ist, wie oben besprochen, paralleles Licht erforderlich; je besser die Parallelität der Lichtstrahlen, um so schärfer sind auch kleine Amplituden und kleine Amplitudenunterschiede noch erkennbar. Begrenzt wird

allerdings die Randschärfe außer durch die Art der Lichtquelle noch durch eine andere Erscheinung, nämlich die Tatsache, daß die Rillenwände nicht rein geometrisch, sondern zum großen Teil auch diffus reflektieren. Diese diffuse Reflexion bewirkt,



Abb. 6a. Frequenzkurve eines Grammophonschreibers.

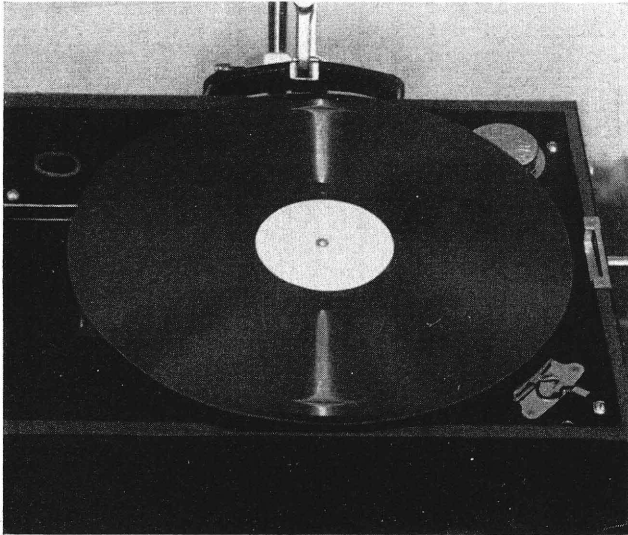


Abb. 6b. Frequenzkurve eines Grammophonschreibers.

daß z. B. die Leerlaufrielen (siehe Abb. 1) keinen unendlich feinen Strich, sondern eine endliche Ausdehnung selbst bei guter Parallelität der Lichtstrahlen hervorrufen. Diese Ausdehnung des Lichtstreifens bei unbesprochener Platte ist abhängig von der Rauigkeit des Materials und dürfte mit dem Nadelgeräusch in engem Zusammenhang stehen. Das diffuse Reflexionsvermögen

der Rillen hat übrigens auch zur Folge, daß die Lichterscheinung für den Beobachter auf der Grammophonplatte liegt, da die Rillen zum Selbstleuchter werden.

Zwei weitere Beispiele geben Abb. 5a und 5b, Platten, auf denen diskontinuierlich reine Töne verschiedener Frequenz und Amplitude aufgezeichnet sind; die Schwingungszahlen betragen jeweils von innen nach außen für Abb. 5a 50, 100, 200, 400 Hz, für Abb. 5b 800, 1600, 3200 und 6400 Hz. Die Breite der Lichtbänder gibt die Geschwindigkeitsamplituden an. Um, wie eingangs erwähnt, den Grammophonschreiber zu prüfen, erregt man ihn mit konstanter Wechselspannung, die kontinuierlich alle Frequenzen des zu prüfenden Bereiches durchläuft. Die Lichterscheinung auf der Platte gibt dann bei bekannter Frequenzverteilung sofort die Frequenzkurve an. Abb. 6a und 6b sind auch hierfür Beispiele; die Frequenz variiert von der Mitte nach dem Rand von etwa 100 bis 6000 bzw. 50 bis 10000 Hz. In Abb. 6b fällt besonders die stark ausgeprägte Resonanzstelle des Schreibers bei höheren Frequenzen (6400 Hz) auf. Die Kurven Abb. 6a und 6b sind zwar an „schwarzen“ Platten aufgenommen, jedoch zeigen auch die ursprünglichen Wachsaufnahmen (vgl. Abb. 1) die Lichterscheinung in der gleichen Weise, was einen besonderen Vorteil des hier beschriebenen Verfahrens darstellt, da der Grammophonschreiber ohne Vervielfältigungsarbeit und damit ohne Zeitverlust geprüft werden kann.

Aus der Breite des Lichtbandes folgt auch durch wenige Messungen die absolute Größe der Geschwindigkeitsamplitude. Abb. 7 erläutert das Verfahren hierzu. ABC ist eine Sinuslinie mit der Amplitude a und der Kreisfrequenz ω und längs eines Kreises mit dem Radius R aufgezeichnet; M ist der Mittelpunkt der Grammophonplatte. Das Licht falle wiederum parallel ein; die Entfernung des Beobachters sei ebenso wie bei den früheren Aufnahmen groß gegenüber der Bandbreite b . Dann können die reflektierten Lichtstrahlen gleichfalls als parallel angenommen werden. Aus Abb. 7 folgt als Beziehung zwischen b und R

$$\sin \alpha = \frac{b}{2R}, \quad (1)$$

wenn α den halben Winkel bei M bezeichnet. Andererseits besteht, da α die Neigung der Sinus-

linie am Wendepunkt gegenüber dem Kreis ist, die Gl.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a \cdot \omega}{2 \pi R u}, \quad (2)$$

wobei u die Umdrehungszahl der Grammophonplatte in der Sekunde ist, also üblicherweise den Wert 78/60 hat. Der Quotient auf der rechten Seite von Gl. (2) ist das Verhältnis zweier Geschwindigkeiten, der radialen und der tangentialen Schreibgeschwindigkeit. Aus Gl. (1) und (2) folgt die Geschwindigkeitsamplitude

$$a \cdot \omega = \frac{b \cdot \pi \cdot u}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

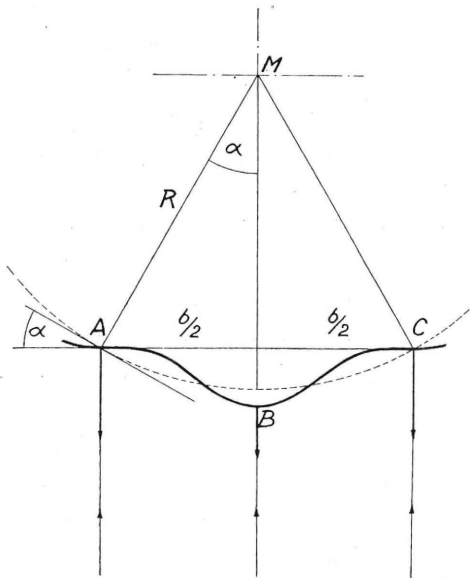


Abb. 7. Absolute Messung der Geschwindigkeitsamplitude.

$\cos \alpha$ kann in sehr vielen Fällen, da die Bandbreite im Verhältnis zum Radius gering ist, gleich 1 gesetzt werden. Kennt man die Umdrehungszahl u und mißt die Bandbreite b z. B. mit Fernrohr und Maßstab, so erhält man aus Gl. (3) die Geschwindigkeitsamplitude $a \cdot \omega$. Wird an Stelle der Kreisfrequenz ω die Schwingungszahl n in Hertz eingeführt, so folgt unter der Annahme $\cos \alpha = 1$ als Beziehung für die Amplitude

$$a = \frac{b \cdot u}{2 \cdot n}. \quad (4)$$

Bei der Ableitung von Gl. (3) bzw. (4) ist stillschweigend vorausgesetzt, daß die reflektierenden Rillenwände senkrecht zur Zeichenebene von Abb. 7 stehen. Das ist in Wirklichkeit nicht der Fall, vielmehr liegen die Wände entsprechend der Form des die Wachplatte schneidenden

Saphirs irgendwie schräg zur Plattenebene; Beobachtungs- und Plattenebene fallen nicht zusammen. Eine geometrische Überlegung zeigt jedoch, daß die Tatsache der schrägen Wände nicht das Resultat beeinflusst. Es sei übrigens bei dieser Gelegenheit kurz darauf hingewiesen, daß die Schnittwinkel bei den Apparaten der verschiedenen Grammophonfirmen verschieden sind, und daß man infolgedessen die einzelnen Platten auch verschieden zur Lichteinfallrichtung neigen muß, um das Optimum der Lichterscheinung zu erhalten. Formel 4 wurde experimentell bei größeren Amplituden durch Vergleich mit direkter mikroskopischer Ausmessung (vgl. Einleitung) geprüft;

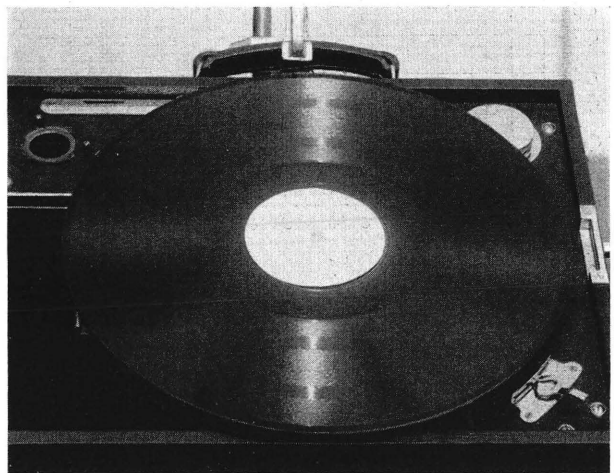


Abb. 8. Orgelplatte.

es ergab sich innerhalb weniger Prozente eine gute Übereinstimmung.

Die beschriebene Meßmethode gibt auch für nicht sinusförmige Schalle interessante Aufschlüsse. Die Aufnahme an dem Grammophonschreiber Abb. 6b zeigt beispielsweise, daß er bei großen Amplituden auch eine verhältnismäßig starke, nichtlineare Verzerrung hat, d. h., daß er bei sinusförmiger Erregung Obertöne erzeugt. Man erkennt dies bei den tiefen Frequenzen, für die die Amplituden ja sehr groß sind, an einem feinen hellen Strich innerhalb des Lichtbandes, ähnlich wie man auch das Vorhandensein von Obertönen beim Oszillographieren eines beinahe sinusförmigen Stromes aus einer verschiedenen Lichtverteilung im Lichtband qualitativ ersieht. Außerdem zeigt der genannte Schreiber noch, daß die starke Resonanzstelle 6400 Hz infolge der Entstehung von Obertönen von den Frequenzen

800, 1600 und 3200 Hz angeregt wird. Besonders stark ausgeprägt und auf der Reproduktion noch sichtbar ist dies für die Frequenz 3200 Hz. Daß schließlich das Verfahren sich auf handelsübliche Sprach- und Musikplatten ausdehnen läßt, zeigt Abb. 8, die die Photographie einer Orgelplatte darstellt. Hier kann man aus der Breite des Lichtbandes die Geschwindigkeitsamplitude an den betreffenden Stellen schätzen.

Zum Schluß sei noch kurz auf einen Vergleich der bisher bekannten Verfahren mit dem hier

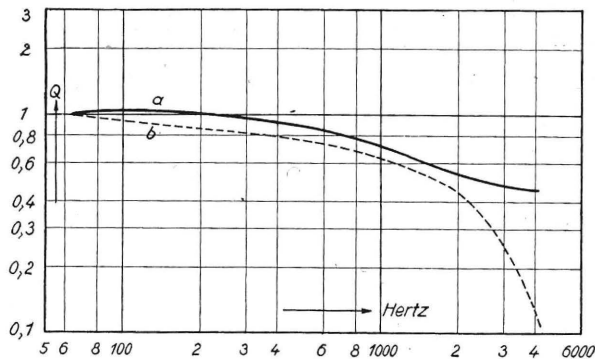


Abb. 9. Vergleich der Geschwindigkeitsamplituden, ermittelt nach dem optischen und dem elektrischen Verfahren.

beschriebenen eingegangen. Die mikroskopische Ausmessung liefert unmittelbar die Bewegungsamplitude auf der Grammophonplatte; die neue Methode ergibt unmittelbar die Geschwindigkeitsamplitude. Beide Verfahren sind ohne weiteres miteinander vergleichbar, wie auch die Prüfung von Gl. (3) bzw. (4) bestätigt hat. Das in der Einleitung erwähnte elektrische Verfahren dagegen ermittelt eine etwas andere Größe. Es wird hier nicht die Amplitude optisch mit einem feinen Lichtstrahl, sondern mechanisch mit der groben Nadelspitze der Grammophonabnahmenadel abge-

tastet und gemessen. Ist die Abrundung der Nadelspitze in der Größenordnung vergleichbar mit der Krümmung der aufgezeichneten Kurve, so folgt sie nicht mehr genau der Rille, sondern führt kleinere Bewegungen aus. Daß diese Anschauung richtig ist, zeigt Abb. 9, in der an Platten, ähnlich Abb. 5a und 5b, das optische und elektrische Verfahren bei einer handelsüblichen Stahlnadel normaler Stärke und einer amerikanischen Holznadel (Bambusfaser) verglichen sind. Als Abszisse sind in Abb. 9 die Frequenzen, als Ordinaten die Quotienten Q der aus dem elektrischen und optischen Verfahren ermittelten Werte aufgetragen. Die Holznadel (Kurve *b*) mit der breiten Spitze zeigt einen sehr viel stärkeren Abfall bei den höheren Frequenzen als die Stahlnadel (Kurve *a*).

Die vorliegende Arbeit gehört zu einer größeren akustischen Untersuchungsreihe, für welche die Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft in dankenswerter Weise die Mittel zur Verfügung gestellt hat.

Zusammenfassung.

Die vorliegende Arbeit berichtet über ein neues, sehr einfaches Verfahren, die Geschwindigkeitsamplitude auf Grammophonplatten optisch zu messen. Fällt auf eine Platte paralleles Licht auf, so erhält man eine Lichterscheinung, ein Lichtband, dessen Breite direkt der Geschwindigkeitsamplitude proportional ist, und das auch absolut diese Größe bestimmen läßt. Die Theorie der Erscheinung sowie Meßbeispiele werden angegeben; auch ein Vergleich mit den bisher bekannten Methoden der Ausmessung für Grammophonplatten wird durchgeführt.

(Eingegangen am 4. Dezember 1929.)