

Frequenzgebiet um 1000 Hz, und zwar gegenüber 50 Hz die 25fache. Für den Schwellwert war deshalb bei 1000 Hz ein etwa 10000mal kleinerer Strom erforderlich als bei 50 Hz, während das dynamische Telephon in Übereinstimmung mit den Fletcherschen Ohrkurven bei 1000 Hz nur einen 400mal kleineren Strom benötigte als bei 50 Hz. Hierdurch erklärte sich, daß die Lautstärke von periodisch wiederholten Knacken mit Erhöhung der Periode gegenüber einem Einzelknack bei dem früher verwendeten Posttelephon nicht nur um das 20fache

(= 26 Phon) ansteigt, wie es bei dem dynamischen Telephon geschieht, sondern um etwa das 200fache (= 36 Phon). Es war also weniger das Ohr, als das Telephon, das sich den subjektiv lautesten Teilton, der um 1000 Hz herum lag, herausuchte, und so das früher angegebene Gesetz ergab. Wenn ein das Ohr treffender Teilton die übrigen Teiltöne an Lautstärke erheblich übertrifft, so gilt natürlich das alte Gesetz noch weiter.

(Eingegangen am 23. Dezember 1932).

Über Empfindung und Messung der Lautstärke.

Von Ulrich Stedel.

Mitteilung aus dem Institut für Schwachstromtechnik der Technischen Hochschule Dresden.

Inhaltsübersicht.

- I. Über Empfindung der Lautstärke.
 - A. Meßergebnisse.
 1. Einmalige Knacke.
 2. Wiederholte Knacke, Geräusche.
 3. Lautstärkezerfall.
 - B. Folgerungen für die Beurteilung der Lautstärke.
 1. Einmalige Knacke.
 2. Wiederholte Knacke, Geräusche.
 3. Lautstärkezerfall.
 4. Die physiologischen Vorgänge bei der Lautstärkeempfindung.
- II. Über Messung der Lautstärke.
 - Zusammenfassung.
 - Literaturverzeichnis.

Es werden zuerst die Lautstärken von mannigfachen Geräuschen, meist Knacken, einmaligen und periodischen, gemessen, teils direkt durch Vergleich mit einem 1000 Hz-Ton, teils auf dem Umweg über ein anderes geeichtes Vergleichs-Geräusch. Aus der Gesamtheit der Messungen werden dann Folgerungen gezogen, die als wichtigstes Ergebnis die Aufstellung einer neuen Lautstärkeformel haben, die gute Näherungswerte liefert. Die Formel kann auch auf Geräusche und Töne erweitert werden.

Im zweiten Teil wird ein objektiver Lautstärkemesser und die Entwicklung seiner Einzelteile angegeben, der imstande ist, jeden beliebigen Schall, selbst einzelne Knacke, einwandfrei zu messen.

I. Über Empfindung der Lautstärke.

A. Meßergebnisse.

1. Einmalige Knacke.

Die Bausteine eines jeden Geräusches sind einzelne Knacke. Es ist deshalb besonders wichtig, deren Lautstärke zu kennen, um Folgerungen auf die Lautstärke ihrer Gesamtheit, eines Geräusches, zu schließen.

In Abb. 1 ist ein leicht herstellbarer Knack gezeichnet, dessen Lautstärke in Abhängigkeit von der Maximalamplitude zunächst bei großer Zeitkonstante T (~ 1 msec) untersucht wurde. Hergestellt wurde dieser Knack durch Entladen eines Kondensators über ein dynamisches Telephon, das einen gleichmäßigen Frequenzgang über alle für das Ohr wichtigen Frequenzen, und mit dem immer vorgeschalteten Widerstand praktisch einen reellen Widerstand hatte. Dieses Telephon, das bei allen Messungen als einziges benutzt wurde, war von Siemens

& Halske geeicht, und ergab bei 1000 Hz und $2,4 \text{ mA}_{\text{max}} = 1,7 \text{ mA}_{\text{eff.}}$, dicht auf ein Ohr gedrückt, einen effektiven Schalldruck von 1 bar am Ohreingang gleich 70 Phon Lautstärke¹⁾. Es wird sich also der Druckverlauf am Eingang des Gehörganges von dem Stromverlauf des Telephons wenigstens unterhalb der Hohlraumresonanzen (d. h. unter etwa 4000 Hz) praktisch nicht unterscheiden.

Gemessen wurde die Lautstärke der Knacke mit dem Barkhausen-Geräuschmesser [4]. Das Ergebnis zeigt Abb. 2. Als Ordinate ist die Lautstärkeskala eines 1000 Hz-Tones aufgetragen, wie sie gemäß Festsetzung

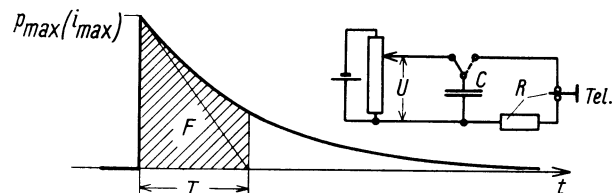


Abb. 1. Druckkurve eines Knackes (Kondensatorentladung). F = Fläche der Impulsformel (2) für $T = C \cdot R = 0,3$ msec.

durch den A. E. F. als logarithmisch vom Druck abhängig definiert wird. Diese Skala hat auch der Barkhausen-Geräuschmesser. Jede Lautstärkemessung beruht auf Lautstärkevergleich. Aus Abb. 2 erkennen wir, daß die Lautstärke der Knacke mit der Stromstärke ebenso zunimmt, wie die Lautstärke des Normaltones von 1000 Hz (45°-Linie), abgesehen von dem Gebiet kleiner Lautstärken unter 40 Phon L. Das besagt, daß in dem Knack nicht ausschließlich extreme Frequenzen für die Lautstärke maßgebend sind, sondern in der Hauptsache die am besten hörbaren in dem Gebiet zwischen 300 und 3000 Hz, da hier die Ohrempfindlichkeitskurven [2, 11] in dem Gebiet größerer Lautstärke noch fast parallelverschoben sind. Abb. 2 zeigt die Meßwerte von neun Personen mit normalem Ohr. Die Einzelwerte streuen sehr stark. Es kommt auf die Empfindungseinstellung des einzelnen an, die sich in kurzer Zeit von allein oder durch eine Probemessung ändern kann. Empfindliche Personen messen mehr den Belästigungsgrad und nicht die Lautstärke. Die Schwierigkeit ist offenbar die, daß für die eigentliche Messung

¹⁾ „Phon Lautstärke“ oder kurz „Phon L“ bedeutet die von dem A. E. F. definierte „Lautstärke“. Es sind 20 Phon gleich einem Unterschied im Schalldruck von 10 : 1, während man früher 1 Phon gleich einem Druckunterschied von 2 : 1 setzte.

nur die ungemein kurze Zeit des Knackes zur Verfügung steht. Zweifellos läßt sich aber eine derartige Messung sehr üben. Vier Personen, die sich länger in der Messung von Knacken geübt hatten, kamen ohne gegenseitige Beeinflussung zu sehr wenig unter sich und untereinander streuenden Ergebnissen. Es konnte von diesen mit großer Bestimmtheit die Lautstärke eines Knackes angegeben werden. Es ist wichtig, daß man solche Personen die Messungen ausführen läßt, die sich zu ihrer Erlernung eignen. Es wurde mehrmals beobachtet, daß eine Person sich einen reproduzierbaren, aber falschen Begriff der Lautstärke zurechtlegte, und mit diesem sichere, aber falsche Kurven maß. Die Falschheit ergab sich daraus, daß ein Knack *a* mit größerem Maximalstrom beim Vergleich mit einem 1000 Hz-Ton leiser gemessen wurde, als ein Knack *c* mit kleinerem i_{max} ,

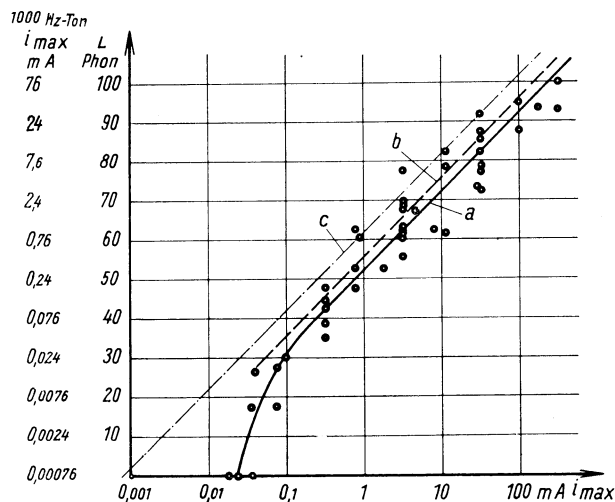


Abb. 2. Lautstärke eines einmaligen Knackes nach Abb. 1 mit $T = 1$ msec. *a* Mittlerer Verlauf der Meßwerte (oo) von 9 Personen. *b* Anzeige des neuen objektiven Apparates. i_{max} = Stromspitze im dynamischen Telefon. *c* Lautstärke eines 1000-Hz-Tones von gleichem i_{max} .

obwohl beim unmittelbaren Vergleich zwischen *a* und *c* der Unterschied richtig angegeben wurde. Das heißt, diese Personen haben einen Schall *b* lauter als *a*, und *c* lauter als *b*, bei direktem Vergleich aber *a* lauter als *c* gemessen. Es empfiehlt sich überhaupt bei der Erlernung der Messung einen derartigen Probevergleich zwischen *a* und *c* öfters vorzunehmen, da nur dann der richtige Weg zur Erlernung garantiert ist. Man kann auch so vorgehen, daß man $a = b$ und $c = d$ einstellt und darauf die vier Unterschiede zwischen $a-c$ und $b-d$ als auch zwischen $a-d$ und $b-c$ als Probe vergleicht. Hierbei könnten z. B. *b* und *d* 1000 Hz-Ton von verschiedener Lautstärke und *a* und *c* verschieden laute Knacke sein. Es ist demnach nicht immer richtig, für Lautstärkemessungen möglichst ungeübte Personen zu verwenden. Diese Gesichtspunkte wurden bei der Ziehung der Mittelwertskurve *a* in Abb. 2 berücksichtigt, die als Eichkurve für die folgenden Messungen dienen soll.

Abb. 3 zeigt die Abnahme der Lautstärke desselben Knackes, wenn man die Maximalamplitude konstant läßt, aber T verkleinert, d. h. den plötzlich auf i_{max} ansteigenden Strom mehr oder weniger langsam abklingen läßt. Die Messung ist hier sehr genau, wenn unter Verwendung der Eichkurve von Abb. 2 zum Lautstärkevergleich wieder ein Knack genommen wird. Es wird also

ein Knack mit konstantem i_{max} (Telephonstrom, der an jeder Kurve steht) und veränderlichem T (Abszisse) mit einem Knack von konstantem T (1 msec) und veränderlichem Maximalstrom (Ordinate, unter Benutzung der Eichkurve *a* in Abb. 2) auf gleiche Lautstärke eingestellt.

Um die elementaren Teile eines Geräusches kennen zu lernen, ist es vorteilhaft, auch die Lautstärke von Knacken mit anders geformter Druckkurve zu untersuchen. Hierzu wurden folgende Versuche ausgeführt:

Die Lautstärke eines Druckanstieges in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Anstieges zeigt Abb. 4. Das dynamische Telefon wurde wie ein Spannungsmesser mit einem großen Vorschaltwiderstand R_1 parallel zu einem Kondensator C geschaltet, der über einen definierten Widerstand R_2 , einschließlich Stromquellen-

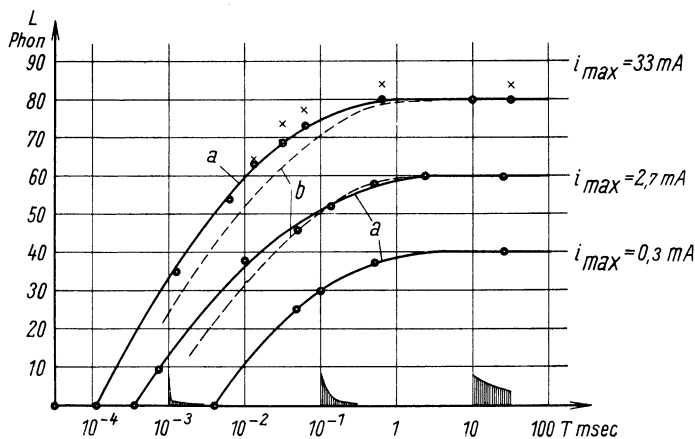


Abb. 3. *a* Lautstärke L eines Knackes nach Abb. 1 in Abhängigkeit von der Zeitkonstanten T . (Gemessen durch Vergleich mit Knacken nach Abb. 1 von $T = 1$ msec und veränderlichem i_{max} . Kurve *a* von Abb. 2 für $L = f(i_{max})$ zugrunde gelegt.) *b* Nach Formel (2) berechnet. \times Anzeige des objektiven Apparates bei $i_{max} = 33$ mA.

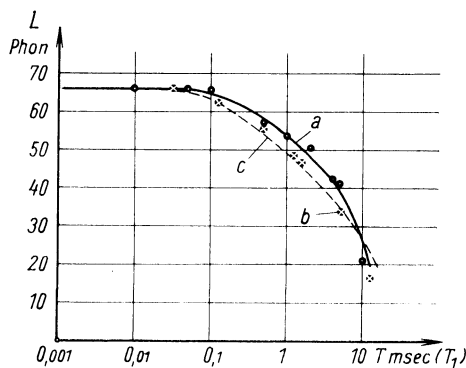


Abb. 4. Einfluß der Zeitkonstante eines Stromanstieges auf die Lautstärke. *a* Stromanstieg Abb. 5, $i_{max} = 5$ mA. *b* Stromanstieg Abb. 6, $i_{max} = 5$ mA, $T = 2,6 \sqrt{LC}$. *c* Nach Formel (2) berechnet.

widerstand auf die Spannung U aufgeladen werden konnte. Es ergibt sich dann der Stromverlauf im Telefon nach Abb. 5. Da $R_1 \geq 50 R_2$ war, wird nahezu $T_1 = C \cdot R_2$ und $T_2 = C \cdot R_1$ und $i_{max} = U/R_1$. T_2 ist so gewählt, daß der Druckabfall unhörbar wird. T_1 konnte durch R_2 und C geändert werden. Es war i_{max} konstant gleich 5 mA. Der bei der Aufladung von C entstehende Knack wurde lautstärkemäßig gemessen durch Vergleich mit einem Knack nach Abb. 1 und $T = 1$ msec, dessen Lautstärkeskala bekannt ist (Abb. 2).

In Abhängigkeit von T_1 ergibt sich dann Kurve *a* in Abb. 4. Der Grenzfall $T_1 = 0$ (praktisch $T_1 < 10^{-4}$ sec) ist identisch mit dem Grenzfall $T = \infty$ in Abb. 3 (praktisch $T > 10^{-3}$ sec). Alle diese Vergleichsmessungen von Knacken, auch wenn sie sehr verschiedenen Klangcharakter haben, sind recht genau; Streuungen über ± 2 Phon sind selbst bei Einzelmessungen selten.

Um auch die Lautstärke von Knacken, die nicht gleich mit dem steilsten Druckanstieg *beginnen*, zu kennen, wurde in derselben Schaltung der Kondensator über eine Induktivität L aufgeladen, deren Größe gerade den aperiodischen Grenzfall ergab ($C \cdot R^2 = 4L$). Der Strom im Telefon ist dann:

$$i = i_{\max} \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{t}{\sqrt{LC}}\right) e^{-\frac{t}{\sqrt{LC}}}\right) \quad i_{\max} = \frac{U}{R_2 + R_L}$$

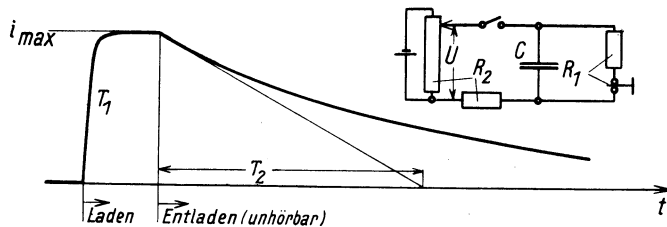


Abb. 5. Druckkurve eines Knackes (Telephonstrom).

wobei R_L der Spulenwiderstand ist. Kurve *a* in Abb. 6 zeigt diesen Stromverlauf. Die *e*-Funktion mit gleichem Endwert und derselben steilsten Tangente besitzt die Zeitkonstante $T = 2,6 \cdot \sqrt{LC}$. Die Lautstärke derartiger Knacke wurde wieder bei konstantem $i_{\max} = 5$ mA und veränderlichem \sqrt{LC} durch Vergleich mit den bekannten Knacken gemessen. Wenn man $2,6 \cdot \sqrt{LC}$ als Abszisse aufträgt, ergeben sich die Punkte *b* in Abb. 4.

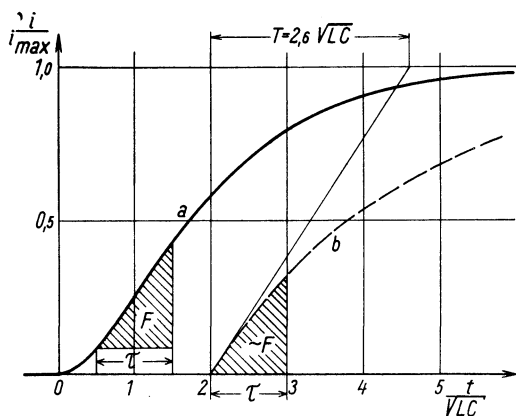


Abb. 6. *a* Stromanstieg im aperiodischen Grenzfall. *b* *e*-Funktion mit derselben maximalen Steilheit ($T = 2,6\sqrt{LC}$). *F* = maßgebende Fläche für Formel (2) für $\sqrt{LC} = \tau = 0,3$ msec.

Schließlich wurde noch die Lautstärke von Knacken untersucht, die entstehen, wenn durch das Telefon der Entladungsstrom eines Kondensators C über eine Induktivität L fließt. Es wurde wieder jeweils der aperiodische Grenzfall eingestellt. Der Strom folgt dann dem Gesetz:

$$i = \frac{U}{R} \frac{2t}{\sqrt{LC}} e^{-\frac{t}{\sqrt{LC}}}; \quad \sqrt{LC} = \frac{C \cdot R}{2}$$

wenn der Kondensator vorher auf die Spannung U aufgeladen wurde. Der Stromverlauf ist in Abb. 8 gezeich-

net. Es wurde wieder $U/R = 10$ mA konstant gelassen und \sqrt{LC} geändert (diesmal ist $i_{\max} = 0,74 \frac{U}{R}$!). Die Abhängigkeit der Lautstärke von \sqrt{LC} zeigt Abb. 7, Kurve *a*.

Bei allen Messungen des Vergleichs zweier Knacke wurden diese mit einem vielpoligen Umschalter mit zwei Stellungen erzeugt, der von der Meßperson selbst bedient wurde. Eine Stellung gab den Vergleichsknack und die andere Stellung den zu vergleichenden. Der Knack, der nicht das Telefon bediente, wurde in jeder Stellung vorbereitet (z. B. der Kondensator aufgeladen). Die Messung gestaltet sich so sehr einfach und sicher, da man sich den Knack selbst schaltet, sich also gut auf den Augenblick der Messung konzentrieren kann. Außer

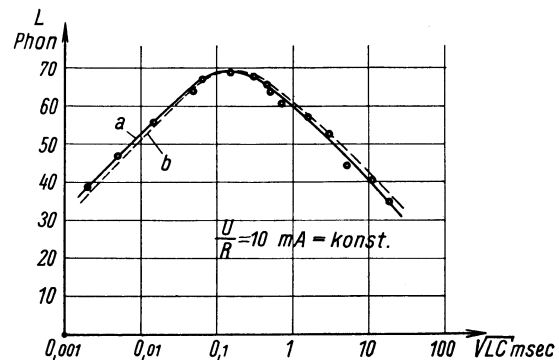


Abb. 7. *a* Lautstärke eines aperiodischen Knackes (Abb. 8). *b* Nach Formel (2) berechnet.

den Messungen in Abb. 2 habe ich die Vergleichsmessungen von Knacken allein ausgeführt, jedoch häufig Stichproben durch andere Personen vornehmen lassen. Diese überschritten ebenfalls niemals die Fehlergrenze von ± 2 Phon.

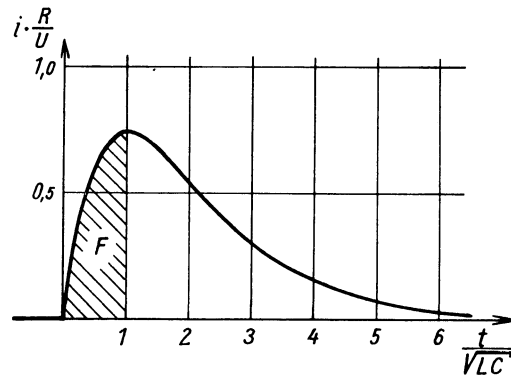


Abb. 8. Entladung eines Kondensators im aperiodischen Grenzfall. *F* = Fläche für Formel (2) für $\sqrt{LC} = \tau = 0,3$ msec.

2. Wiederholte Knacke, Geräusche.

Wie der allmähliche Übergang vom Knack zum Geräusch oder Ton lautstärkemäßig vor sich geht, zeigen die folgenden zwei Versuche:

Die Lautstärke von Knacken in Form einer gedämpften Schwingung wurde durch Vergleich mit dem bekannten Knack gemessen. Sie wurden durch Entdämpfung eines Kreises mit einer Röhre im dynamischen Telefon hergestellt. Ein Umschalter gab einmal den aperiodischen und einmal den oszillierenden Knack (Frequenz 1000 Hz). Von beiden wurden dann die Lautstärke mit dem Barkhausen-Geräuschmesser gemessen. Gemessen haben

acht Personen im Lautstärkebereich von 50 bis 100 Phon. Zunächst wurde die Richtigkeit der logarithmischen Lautstärkekala in diesem Bereich (Abb. 2) wieder bestätigt. Weiter gibt Abb. 9 die Abhängigkeit der Lautstärke des oszillierenden Knackes von seiner Zeitkonstanten bei konstantem i_{max} (es steht rechts an jeder Kurve). Es ist dies noch einmal eine gute Nachprüfung der Lautstärke des Einzelknackes gemäß Abb. 2, da ein kontinuierlicher

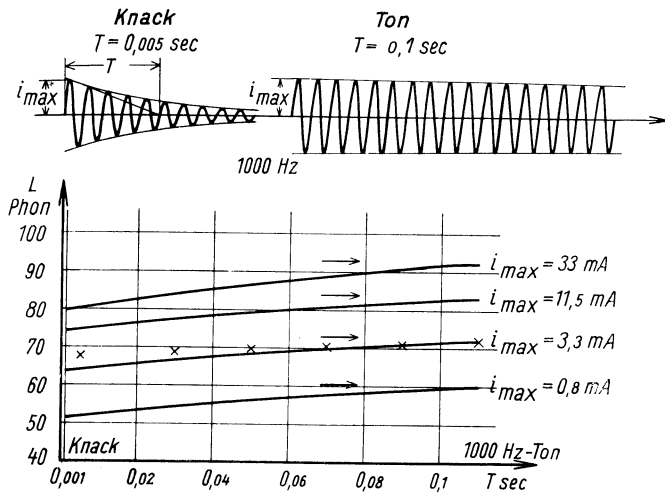


Abb. 9. Lautstärke eines abklingenden 1000-Hz-Tones. \times Anzeige des objektiven Apparates bei $i_{max} = 3,3$ mA. \rightarrow Lautstärke des dauernden 1000-Hz-Tones gleicher Amplitude.

Übergang von 1000 Hz-Ton ($T = \infty$) zum Einzelknack ($T < 0,003$ sec) besteht, denn der Toncharakter beginnt bei einer Lautstärke von 85 Phon erst bei $T = 3$ msec, von 45 Phon erst bei $T = 6$ msec. Trotzdem streuen die Versuchswerte durchschnittlich ± 8 Phon. Abb. 9 zeigt Mittelwerte. Der Gang der Kurven ist auf ± 4 Phon genau, nicht aber ihre absolute Höhe (vgl. die Streuwerte in Abb. 2). Bei $T = 5$ msec, wo etwa noch 50 ganze Schwingungen hörbar sind, hat der oszillierende Knack etwa dieselbe Lautstärke wie ein aperiodischer Knack ($T > 1$ msec) von derselben Maximalamplitude und ist etwa 10 Phon leiser als ein 1000 Hz-Ton von ebenfalls derselben Amplitude.

Die Lautstärke der Knacke von Abb. 1 mit $T = 0,6$ msec in Abhängigkeit von der Frequenz zeigt Abb. 10. Die Messung geschah wieder mit dem Barkhausen-Geräuschmesser. Es sind die Mittelwerte der

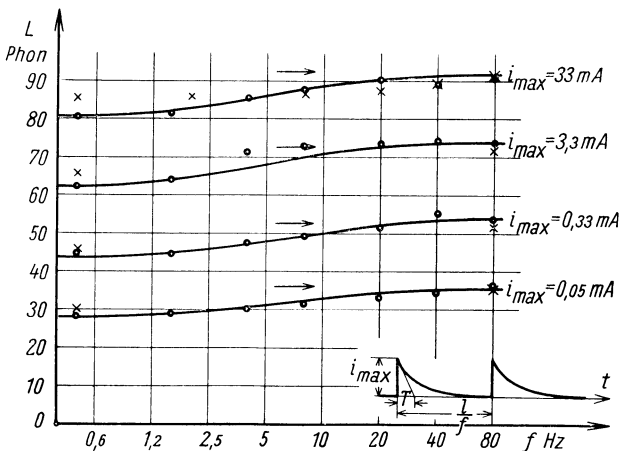


Abb. 10. Lautstärke von periodischen Knacken. \circ Mittelwerte. \times Anzeige des objektiven Apparates. \rightarrow Lautstärke des dauernden 1000-Hz-Tones von gleichem i_{max} .

Messungen von drei geübten Personen eingetragen. Der Streubereich ist bei höherer Frequenz (Geräusch) kleiner (± 4 Phon) als bei niedriger (Einzelknack, ± 8 Phon). Die Lautstärke steigt mit wachsender Frequenz um etwa 10 Phon an und erreicht dann die Lautstärke des 1000 Hz-Tones gleicher Amplitude. Bei noch höherer Frequenz (über 80 Hz) steigt sie praktisch nicht mehr.

Schließlich wurde noch die Abhängigkeit der Lautstärke bei stark spitzenhaltigen Geräuschen von den Phasen der sinusförmigen Bestandteile untersucht. Es wurde der Schnarrton Abb. 23a über eine zwölfgliedrige Phasenkette, deren Laufzeitkurve Abb. 11 zeigt, geschickt. Die Amplituden der Komponenten werden in der Phasenkette nicht geändert. Es ergab sich gegen den direkt auf das Telephon gegebenen Ton durch die Phasenverschiebung eine Lautstärkeschwächung um 7 Phon. Schon Helmholtz hat eine Abhängigkeit von den Phasen bei derartigen Geräuschen vorausgesagt [1].

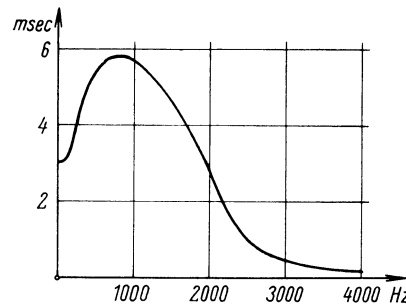


Abb. 11. Laufzeitkurve der Siemens-Phasenkette (12 Resonanzglieder).

3. Lautstärke-Zerfall.

Um über die Abnahme der Lautstärke nach dem Aufhören einer Erregung des Ohres etwas aussagen zu können, wurde folgender Versuch gemacht: Man läßt über das dynamische Telephon einen Ton f_1 auf das Ohr lange Zeit einwirken (etwa 0,5 sec) und unterbricht ihn kurzzeitig, am besten periodisch. Gleichzeitig gibt man auf das Telephon dauernd einen ein wenig höheren Ton f_2 , dessen Strom von kleinen Werten langsam gesteigert wird. Er wird erst verdeckt, bis schließlich seine Anwesenheit durch Änderung des ursprünglichen Schallcharakters des unterbrochenen Tones f_1 bemerkbar wird. Der Strom des verdeckten Tones f_2 ist dann (wenn er sich eben bemerkbar macht) ein Maß für die kleinst vorkommende Lautstärke in dem verdeckenden Schall f_1 . Man erhält also die Lautstärke, auf die die ursprüngliche Lautstärke von f_1 in der Unterbrechungspause gesunken ist. Für einen richtigen Lautstärkemaßstab ist nur vorher die bekannte Verdeckungskurve [2, 13] der beiden Töne aufzunehmen (Abb. 13).

Abb. 12 zeigt die Ergebnisse: Es ist die aus Abb. 13 ermittelte kleinste Lautstärke von dem unterbrochenen f_1 über der Unterbrechungszeit aufgetragen. Sie zeigt also die Lautstärke vom Ton f_1 , der zur Zeit $t = 0$ abgeschaltet wird, kurz nach dieser Abschaltung. Eine ungeübte Person mißt Kurve a . Der Knack im Augenblick des Abschaltens scheinbar eine Lautstärkeerhöhung, so daß der verdeckte Ton lauter gemacht werden mußte, um gegenüber seinem Fehlen eine merkliche Änderung im Tonbild zu erzeugen, wenn die Knacke in genügend kleinem Abstand aufeinander folgten; es mußte deshalb die Tonanzahl des Unterbrechers erhöht werden. Offenbar ist diese Lautstärkeerhöhung aber nicht reell, wenigstens nicht in

bezug auf ihre Verdeckungskraft, denn bei sehr aufmerksamer Beobachtung bemerkt man deutlich den verdeckten Ton. Man könnte diese scheinbare Lautstärkerhöhung mit den Machschen Streifen beim Auge vergleichen, die auf Kontrastwirkung beruhen. Beim Ohr ist hierbei das Charakteristische der Übergang vom Ton zum Geräusch (Knack). Derartige „akustische Täuschungen“ erschweren sehr die Messungen.

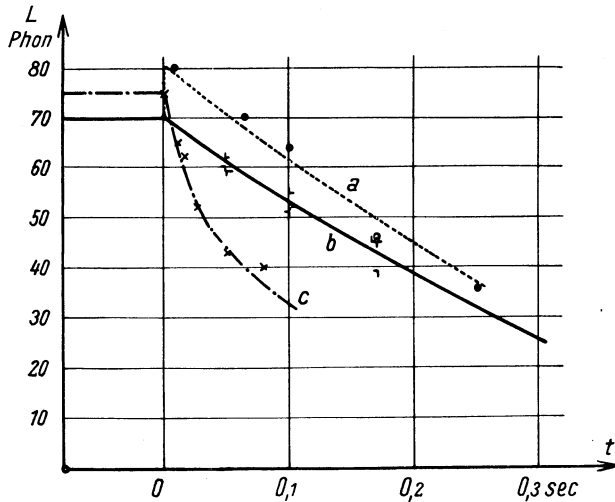


Abb. 12. Abnahme der Lautstärke eines Tones nach dem Abschalten. *a* Ungeübte Meßperson (800 Hz). *b* 480, 850 und 1850 Hz-Töne. *c* Periodische Knacke.

Kurve *b* zeigt die Lautstärkeabnahme bei guter Konzentration der Meßperson. Sie ist, wie die Versuchswerte zeigen, im Bereich von 400 bis 2000 Hz von der Tonhöhe unabhängig. Es ist unwahrscheinlich, daß bei dieser Meßmethode der Lautstärkeabnahme die Entwicklungszeit [3] des verdeckten Tones eine ausschlaggebende Rolle spielt, denn er ist in Wirklichkeit dauernd da, und man steigert ihn auch nur so weit, bis man eine Veränderung im unterbrochenen Ton, nicht bis man den verdeckten Ton der Tonhöhe nach hört.

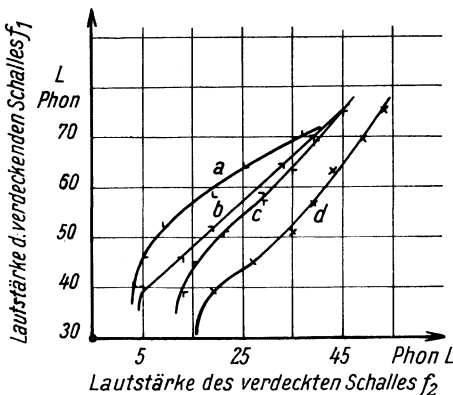


Abb. 13. Verdeckungskurven zu Abb. 12. *a* $f_1 = 1784$ Hz; $f_2 = 1850$ Hz. *b* $f_1 = 800$ Hz; $f_2 = 850$ Hz. *c* $f_1 = 431$ Hz; $f_2 = 480$ Hz. *d* $f_1 =$ Periodisch 80mal je sec wiederholte Knacke gemäß Abb. 1 ($T = 10^{-3}$ sec); $f_2 =$ Schnarrton Abb. 23a.

Werden an Stelle des Tones f_1 periodisch wiederholte Knacke von Abb. 1 mit $T = 10^{-3}$ sec gewählt, so ergibt sich Kurve *c* in Abb. 12. Die Abszisse bedeutet hier den Zwischenraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Knacken. Als f_2 ist ein Schnarrton (Abb. 23a) gewählt worden. Die Verdeckungskurve (Abb. 12) muß natürlich mit dauernder voller Lautstärke der Knacke auf-

genommen werden; diese ist bei etwa 80 Hz praktisch erreicht. Bei allen Kurven in Abb. 12 lassen sich die leiseren Werte unter 40 Phon nicht mehr aufnehmen wegen des ungünstigen Verlaufes der Verdeckungskurven in Abb. 13.

B. Folgerungen für die Beurteilung der Lautstärke.

1. Einmalige Knacke.

Aus der Gesamtheit der vorhergehenden Versuchsergebnisse kann man folgende Schlüsse ziehen:

Das menschliche Ohr reagiert nur auf Änderungen des Luftdruckes. (1)

Diese Änderungen müssen genügend schnell sein (ein 10 Hz-Ton ist nicht hörbar), um eine Lautstärkeempfindung auszulösen, und dürfen nicht nach sehr kurzer Zeit durch gleichgroße entgegengesetzte Änderungen wieder rückgängig gemacht werden, sonst wird trotz starker Änderungen kaum eine Lautstärkeempfindung ausgelöst (z. B. 10000 Hz-Ton).

Aus Abb. 3 und 4 ist zu erkennen, daß für die Lautstärke der Knacke nur eine erste kurze Zeit der Druckkurve maßgebend, während die ganze spätere Zeit für die Lautstärke belanglos ist. Für die maßgebende Zeit ergibt sich aus Abb. 3 und 4 etwa $3 \cdot 10^{-4}$ sec. Es ist nahelegend, für die Lautstärkebeurteilung die Fläche unter der Druckkurve in dieser kurzen Zeit, also einen Impuls heranzuziehen. Da aber nur immer der steilste Druckanstieg oder -abfall maßgebend ist, muß auch die Fläche in der genannten Zeit unter diesem Teil der Druckkurve genommen werden (s. Abb. 6). Außerdem ist der Gleichdruckanteil für die Lautstärke belanglos, er muß abgezogen werden.

Wenn L die Lautstärke für einen dauernden 1000 Hz-Ton in Phon, p der effektive Schalldruck in bar, p_0 der effektive Schwellwertdruck in bar ist, dann lautet definitionsgemäß (nach dem A. E. F.) die Lautstärkeformel

$$L = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \text{ mit } p_0 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ bar}_{\text{eff}} \\ (70 \text{ Phon} = 1 \text{ bar}_{\text{eff}}).$$

Ganz analog wurde nun unter Berücksichtigung der Lautstärkemessungen einmaliger Knacke für diese eine neue Formel aufgestellt

$$L = 20 \cdot \log \left(\frac{1}{P_0} \cdot \frac{1}{\tau} \left[\int_{t_0}^{t_0+\tau} (p-p_0) dt \right]_{\text{max}} \right). \quad (2)$$

Gültig für $L > 50$ Phon.

Hierin ist L wiederum die Lautstärke des Knackes in Phon, $p = p(t)$ der Momentanwert des Schalldruckes in bar (am Eingang des Gehörganges), p_0 der Druck zur Zeit t_0 in bar, τ die kurze maßgebende Zeit, sie soll Impulszeit genannt werden, $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$ sec und P_0 eine Schwellwertkonstante in bar. Die Zeit t_0 muß so gewählt werden, daß das Integral ein Maximum wird. Es ist dabei einerlei, ob $p(t_0)$ größer oder kleiner als $p(t_0+\tau)$ ist. Die Schwellwertkonstante P_0 läßt sich z. B. aus einem Wert von Abb. 3 und dem bekannten Telephonwirkungsgrad ausrechnen. Wir wählen z. B. einen rechtzeitigen Stromanstieg, also $T = \infty$ und lesen aus Abb. 3 den Mittelwert ab: Für $i_{\text{max}} = 3,3$ mA ist $L = 62$ Phon. Der Maximalwert des Integrals in Gl. (2) wird also $3 \cdot 10^{-4} \text{ sec} \cdot 3,3 \text{ mA} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 3,3}{1,7} \text{ barsec}$, denn der Wirkungsgrad des dynamischen Telephons ist 1 bar = 1,7 mA, wenn es auf das Ohr gedrückt wird; er ist

von der Frequenz nahezu unabhängig. Der Schalldruck muß naturgemäß stets auf den Eingang des Gehörorgans bezogen werden. Es wird nun nach Gl. (2)

$$10^{62} = 1260 = \frac{1}{P_0} \cdot \frac{1}{3 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 3,3}{1,7},$$

$$P_0 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ bar.}$$

Diese Schwellwertkonstante P_0 ist gleich dem Wert, den die verlängerte Gerade a in Abb. 2 auf der Abszisse abschneidet, mit dem Telephonwirkungsgrad multipliziert.

Gl. (2) soll *Impulsformel* oder *Flächensatz* genannt werden.

Rechnet man mit der so gefundenen Impulsformel die Werte für Abb. 4 aus, so ergibt sich die Kurve c . Der Gang stimmt gut mit den gemessenen Werten überein. Die Punkte b in Abb. 4 müßten, wenigstens für große T , auch mit den errechneten c übereinstimmen, da als Abszisse die Zeitkonstante einer e -Funktion mit derselben größten Steilheit (Abb. 6) aufgetragen und diese größte Steilheit für die Lautstärkeformel maßgebend ist. Sie stimmen auch tatsächlich gut überein.

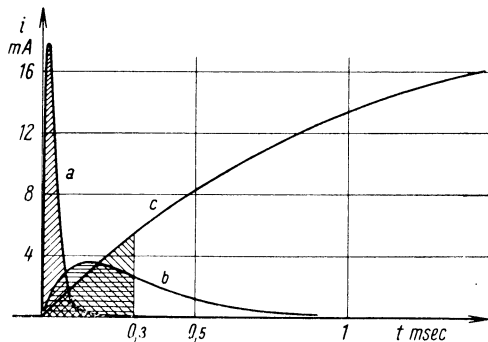


Abb. 14. Knacke der gleichen Lautstärke von 65 Phon. i — Strom im dynamischen Telephon.

$a \sqrt{LC} = 0,018 \text{ msec. } b \sqrt{LC} = 0,15 \text{ msec. } c \sqrt{LC} = 2,3 \text{ msec.}$

In Abb. 3 liegen die errechneten Werte b etwas niedriger als die gemessenen: aber der Gang wird sehr gut wiedergegeben. In Abb. 7 sind die nach der Formel errechneten Werte als Kurve b ebenfalls eingetragen. Die Übereinstimmung ist hier eine vollkommene. Es ist zu beachten, daß die Übereinstimmung nicht nur relativ, sondern absolut ist! Zur besseren Veranschaulichung sind in Abb. 14 drei verschiedene Druckkurven von Werten aus Abb. 7, die dieselbe Lautstärke (65 Phon) besitzen, maßstäblich aufgezeichnet mit den für die Lautstärke in Frage kommenden Flächen. Es ist erstaunlich, daß so verschieden aussehende Druckkurven (und sie hätten, wenn es das Blatt erlaubte, noch viel extremer gezeichnet werden können) vollkommen die gleiche Lautstärke besitzen, wovon sich viele Personen überzeugt haben. Zum guten Verständnis der wichtigen Impulsformel (2) sind in allen Abbildungen, die Druckkurven wiedergeben, die der Formel entsprechenden Flächen schraffiert.

2. Wiederholte Knacke, Geräusche.

Aus Abb. 9 und 10 muß man folgern:

Die Lautstärke periodisch sich wiederholender Knacke wächst, wenn die Wiederholung des (3) die Lautstärke bedingenden Druckimpulses mehr als 50mal je sec erfolgt, um etwa 10 Phon an gegenüber einem einmaligen Knack.

Ist die Knackfolge größer als 50 je sec, dann wächst die Lautstärke nicht mehr weiter an. Ein Geräusch mit über 50 Hz Knackfolge kann man also als *dauernde* Erregung des Ohres ansehen. Z. B. ist ein 1000 Hz-Ton längst eine dauernde Erregung. Abb. 9 zeigt, in welcher Weise die Lautstärke von der *Dauer der Erregung* des Ohres abhängt. Bei *einem* Knack je sec haben wir es nur noch mit Einzelknacken zu tun, d. h. nach jeder Erregung des Ohres vergeht so lange Zeit, daß wieder derselbe Zustand des Ohres wie der Ausgangszustand (Ruhezustand) eintritt. Es sei aber ausdrücklich bemerkt, daß diese Überlegungen nur angenähert für einen Lautstärkebereich von 50 bis 100 Phon gelten. Bei leiseren Lautstärken werden die Verhältnisse anders.

Bei Berücksichtigung von Satz (3) kann die Lautstärkeformel (2) (Impulsformel) auch für beliebige Geräusche und Töne, soweit sie nicht unter 50 Phon laut sind, angewendet werden. Man muß nur folgendes beachten: Erscheint eine solche Fläche, wie sie in der Formel ausgedrückt wird, in der Druckkurve eines

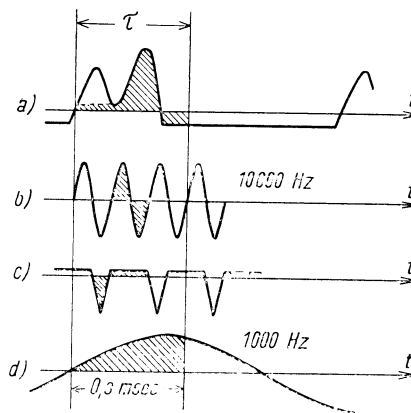


Abb. 15. Die Flächen F' der Lautstärkeformel(2).

Schalles öfter als einmal pro sec., dann ist nach Satz (3) zu dem aus der Formel erhaltenen Wert von L noch ein Zuschlag bis zu etwa 10 Phon zu machen, dessen Größe sich aus Abb. 10 in Abhängigkeit von dieser Häufigkeit pro sec ergibt.

Zur jeweils richtigen Wahl der Fläche scheinen mir folgende Gesichtspunkte die besten zu sein: Grundsätzlich muß die Fläche immer von der Nulllinie (nämlich der Nulllinie, die sich ergibt, wenn man die Druckkurve als reinen Wechselstrom zeichnet) und der Druckkurve eingeschlossen sein. Dann ergibt sich immer Eindeutigkeit der Fläche, außer bei solchen einmaligen Knacken, deren Druckkurve einen Übergang von einem Druck p_1 in einen Druck p_2 darstellt. Man kann dann als Nulllinie sowohl p_1 als auch p_2 annehmen. Wählt man aber in diesem Ausnahmefall die Nulllinie so, daß die Impulsfläche ein Maximum wird, dann können Fehler über 1 : 2 (6 Phon) kaum auftreten. Die Impulsfläche kann in zwei Teile zerfallen, denn eine Fläche *unter* der Nulllinie muß auch als positiv gerechnet werden. Das Ohr kann einen Druckabfall von einem Druckanstieg nicht unterscheiden. Immer ist die maximale Fläche für die Lautstärke maßgebend; sie kann also auch unter abfallenden Ästen der Druckkurven auftreten. Wenn die Druckkurve eines Schalles so aussieht, daß in der zu bildenden Fläche über 0,3 msec nicht allein *ein* Druckanstieg und -abfall stattfindet, dann darf man die Fläche über gleichen Druckwerten, die im gleichen Sinne durchlaufen werden, nur einmal rechnen. Die Integration der Formel (2) darf sich also nur über zwei gleiche Druckwerte erstrecken, wenn der eine sich im ansteigenden, der andere im ab-

fallenden Zweig der Druckkurve befindet. Über mehr als zwei gleiche Werte darf nicht integriert werden. Abb. 15 zeigt als Beispiel einige Druckkurven und die nach obigen Gesichtspunkten gefundenen maximalen Flächen. Da alle Kurven von höherer Periodizität sind, müßten zu dem Ergebnis aus der Impulsformel nach Satz (3) noch 10 Phon zugeschlagen werden.

Untersucht man nach diesem Schema die Abhängigkeit der Lautstärke sinusförmiger Töne von gleicher Druckamplitude von der Frequenz f , dann ergibt sich unter 1000 Hz etwa ein $1/f$ -Gang, von 1000 bis 3000 Hz bleibt die Lautstärke annähernd konstant, und über 3000 Hz ergibt sich etwa ein f -Gang. Dieser Gang stellt eine rohe, aber immerhin leidliche Annäherung an die Ohrempfindlichkeitskurve bei 70 Phon L [2,11] dar. Abb. 16 zeigt beide Kurven. Rechnet man z. B. nach der Impulsformel (2) die Lautstärke eines 1000 Hz-Tones von 1,4 bar Amplitude aus, dann ergibt sich 57 Phon, mit einem Zuschlag nach Satz (3) von 10 Phon gleich 67 Phon gegenüber dem bekannten Wert [2] von 70 Phon. Es ist zu

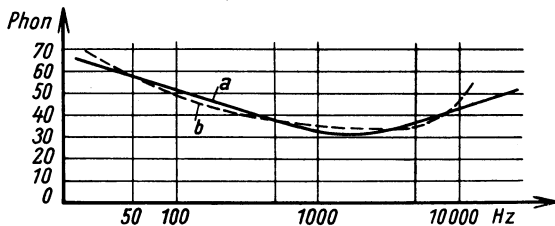


Abb. 16. Anpassung der nach Formel (2) für sinusförmige Töne errechneten Werte a an die Ohrempfindlichkeitskurve, b für 70 Phon L nach Fletcher.

beachten, daß die Impulsformel allein aus der Lautstärke von den Knacken Abb. 3 und 4 abgeleitet und die Impulszeit τ und die Schwellwertkonstante P_0 berechnet ist. Der Übergang zum periodischen Schall geschieht nur durch den aus Abb. 10 abgeleiteten Satz (3). Deswegen kann obige Übereinstimmung beim 1000 Hz-Ton als gut bezeichnet werden, zumal man aus Abb. 16 erkennt, daß die Übereinstimmung bei anderen sinusförmigen Tönen (z. B. 500 Hz) noch besser ist.

Die Impulsformel (2) darf natürlich nur als Näherungsformel bezeichnet werden, denn sie ist rein empirisch gefunden. Immerhin ist ihr physikalischer Sinn nicht sehr fremd, denn es scheint erklärlich, daß für das Ansprechen des Ohres auf die Lautstärke in erster Linie *Impulse* maßgebend sind. Ebenfalls geht aus der Impulsformel und der Tatsache des langsamen Zerfalls der Lautstärke (Satz 4) sowie der Existenz des Satzes (3) hervor, daß die Ohrnerven in bezug auf die Lautstärkeaufnahme nicht linear arbeiten, so daß die aus einer Fourierschen Reihe oder Integral erhaltenen sinusförmigen Komponenten der Druckkurve selbst im eingeschwungenen Zustand (s. u.) nicht eindeutig die Lautstärke bestimmen. Eine Folge davon ist die erwiesene Abhängigkeit der Lautstärke von den *Phasen* der Komponenten. Deshalb mußten auch Versuche, die Lautstärke der Knacke aus den Komponenten des Fourierschen Integrals bei Bewertung durch die Ohrempfindlichkeitskurve und verschiedenartiger Überlagerung zu bestimmen, fehlschlagen. Wichtiger als das Klangspektrum ist zur Beurteilung der Lautstärke deshalb die *Kurvenform*.

Sehr schön läßt sich durch die abgeleitete Beurteilung der Lautstärke die von Békésy untersuchte Abhängigkeit der Lautstärke eines 800 Hz-Tones von der Einschaltdauer ([3], S. 118, Abb. 6) erklären. Bei dieser

Kurve ist bei sehr kurzen Zeiten ($\sim 0,01$ sec) Impulsformel (2) maßgebend; die Lautstärke steigt momentan auf einen Wert etwa 10 Phon kleiner als der Endwert bei Dauereinschaltung. Bei längeren Zeiten (bis 0,2 sec) kommt Satz (3) in Anwendung, weswegen entsprechend Abb. 9 die Lautstärke allmählich noch um etwa 10 Phon ansteigt.

3. Lautstärkezerfall.

Im Gegensatz zu der sehr kurzen Zeit von 0,3 msec, die maßgebend ist für die Größe der entstehenden Lautstärke, geht das Verschwinden der Lautstärke nach Beendigung der Erregung sehr viel langsamer vor sich (s. Abb. 12).

Die Lautstärke zerfällt in einer Zeit der Größenordnung $0,5 \text{ sec}^2$. (4)

Die vorhergehende Erregung war bei den Kurven b (Abb. 12) eine dauernde ($\sim 0,5$ sec). Wenn die Erregung des Ohres nur eine sehr kurze Zeit dauert, wie z. B. beim Knack, dann geht der Lautstärkeabfall etwas schneller vor sich, wie Kurve c zeigt.

Der Zerfall der Lautstärke ist von der Dauer der vorhergehenden Erregung abhängig. (5)

Die hier abgeleiteten Sätze dürften über manche zunächst unerklärlich scheinende Lautstärkeempfindung von Geräuschen Aufschluß geben.

4. Die physiologischen Vorgänge bei der Lautstärkeempfindung.

Wie hat man sich nun den Vorgang der Lautstärkeaufnahme durch das Ohr vorzustellen? Die Grundzüge der Fletcherschen Theorie [16] sollen als anerkannt vorausgesetzt werden. Bei der Aufnahme von *Knacken* scheint sich die Basilarmembran wie eine einheitliche Membran (wie bei einem Telephon) mit sehr kleiner Masse und großer Dämpfung zu verhalten. Die Masse muß klein sein wegen der kleinen Zeit τ in Formel (2) und die Dämpfung groß, sonst wäre die Einschwingzeit groß und es müßten auch Schwebungen beim Einschwingen auftreten. Ebenso wie eine Telephonmembran bei verschiedener sinusförmiger Erregung verschiedene Schwingungsformen annehmen kann (stehende Knotenlinien), so scheint auch die Basilarmembran in verschiedener Form schwingen zu können. Die scharfe Ausbildung dieser Schwingungsformen ist aber nicht nur bei bestimmten Frequenzen vorhanden, sondern bei jedem hörbaren sinusförmigen Ton entsteht eine besondere Schwingungsform, die dann aber nicht nur aus stehenden Knotenlinien, sondern aus der Überlagerung von stehenden und fortschreitenden Wellen besteht (s. Fletcher [16]). Betrachtet man nur die stehenden Wellen, dann entspricht jeder hörbaren sinusförmigen Frequenz eine bestimmte Resonanzstelle auf der Basilarmembran. Man könnte die Membran also auch mit einer Reihe von abgestimmten Resonatoren vergleichen (Zungenfrequenzmesser), nur daß die Dämpfung der einzelnen Resonatoren sehr groß ist. Bei einer Tonempfindung, die sich stark von einer Geräuschempfindung unterscheidet, erfassen also die Nervenfasern, die sich längs der Basilarmembran verteilen, in ihrer Gesamtheit das „Bild“ der schwingenden Membran; natürlich erst, wenn der Zu-

²⁾ Daß der Lautstärkeabfall von der Frequenz unabhängig ist, steht bis zu gewissem Grade im Widerspruch mit der Tatsache, daß man bei höheren Tönen noch schnellere Schwebungen hören kann als bei tieferen Tönen. Im Gegenteil scheinen sehr hohe Töne noch sehr lange nachzuklingen.

stand eingeschwungen ist. Auf diese Art ist es möglich, trotz der starken Dämpfung der Einzelresonatorstellen, geringe Tonhöhenunterschiede wahrzunehmen, da die Gesamtheit der Nerven beteiligt ist, die kleine Änderung in dem Schwingungsbild der Membran festzustellen.

Zwischen Tönen und Geräuschen gibt es einen stetigen Übergang, der aber nicht nur von der mehr oder weniger erfüllten Periodizität abhängt. Zum Beispiel muß ein periodischer Schall mit scharfen Spitzen, die die Ohrmembran in ihrer Gesamtheit ausschlagen lassen und jeden eingeschwungenen Zustand verwischen, als Geräusch bezeichnet werden. Ich möchte als Maß für den Geräuschcharakter das Verhältnis vom Spitzenwert zum Effektivwert vorschlagen, neben der Bedingung, daß keine wichtige Periodizität im guten Hörbereich liegt.

Wie die Versuche gezeigt haben, scheinen im wesentlichen für die Lautstärkeempfindung bei Knacken und Tönen (eingeschwungener Zustand) dieselben Gesichtspunkte zu gelten. Die besondere Schwingungsform der Basilmembran bei Tönen wird also auf die Lautstärke nicht von großem Einfluß sein. Man kann deshalb mit Recht zwischen Lautstärkeempfindung und Tonempfindung unterscheiden.

Die Tatsache des Satzes (3) ist jedenfalls im Nervensystem selbst begründet. Bei den meisten Empfindungsnerven ist die Abhängigkeit der Erregungsstärke von der Dauer der Erregung in gewissen Grenzen bekannt [3, 22]). Dasselbe gilt auch von Satz (4) und (5), die wahrscheinlich in der Art der Nervenerregung selbst ihren Grund finden.

Auffallend ist die starke Analogie zum Auge. Satz (3) bis (5) gelten auch für die Sehnerven. Wesentlich ist, daß nach dem oben Gesagten die Lautstärkeempfindung mit der Helligkeitsempfindung, die Tonempfindung aber mit der Bildaufnahme verglichen werden muß.

II. Ueber Messung der Lautstärke.

Unabhängig von der Theorie über die Lautstärkeaufnahme durch das Ohr muß ein objektiver Lautstärkemesser einen der Empfindung eines normalen Ohres entsprechenden Ausschlag anzeigen. Seine Anzeige muß bestimmt im Streubereich von vielen normalen Ohren liegen, am besten möglichst nahe ihrem Mittelwert sein. Ist der Streubereich sehr weit, dann ist man nicht mehr berechtigt, einen Mittelwert zu bilden, die Lautstärke ist nicht klar definierbar.

Man könnte nun einen Apparat bauen, der direkt die in der Impulsformel (2) definierte Fläche anzeigt. Er würde aber wahrscheinlich außerordentlich kompliziert werden. Ich könnte ihn mir z. B. folgendermaßen vorstellen: Der durch ein Mikrophon aufgenommene Schall teilt sich in zwei Stromkreise. Im ersten wird durch eine Drosselspule der Differentialquotient gebildet, dessen größte Spitzen einen, möglichst elektrischen, Schalter momentan schalten, der den anderen Stromzweig auf einen Kondensator schließt, aber nur $\tau = 0,3$ msec lang. Der Kondensator wird in dieser Zeit von dem Sprechstrom aufgeladen; seine Spitzenspannung wird gemessen. Nach jedesmaliger Aufladung und Spitzenspannungsmessung muß er wieder entladen werden. Satz (3) ließe sich wohl durch eine geeignete Zeitkonstante des Spitzenspannungsmessers erfüllen. Das Maximum in der Impulsformel wäre durch Auslösung der Kondensatoraufladung durch den größten Differentialquotienten an-

nähernd erfüllt. Man sieht, daß ein derartiger Apparat auf ungeheure technische Schwierigkeiten stoßen würde.

Es mußte deshalb ein anderer Weg gesucht werden, wie man bei dem Prinzip der bisher gebauten objektiven Schallmesser eine Verbesserung anbringen kann, so daß er der subjektiven Empfindung entsprechende Ausschläge gibt.

Das allgemeine Schema eines objektiven Lautstärkemessers zeigt Abb. 17. Die Siebkette ist einer bestimmten Ohrenempfindlichkeitskurve angeglichen und ihr Gang darf durch kein Glied des Apparates gestört werden, sonst werden schon die sinusförmigen Töne nicht richtig angezeigt.

Als grundsätzliche Registriervorrichtungen wurden untersucht:

1. Effektivwert-Registrierung,
2. Spitzenwert-Registrierung.

In jedem Falle wurde eine Eichung des Apparates mit einem sinusförmigen 1000 Hz-Ton entsprechend der A. E. F.-Definition vorausgesetzt. Die Effektivwert-Registrierung gab teilweise vollkommen falsche Werte,

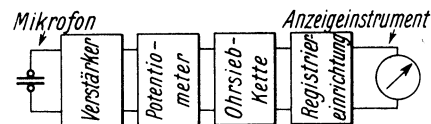


Abb. 17. Prinzipielle Schaltung eines objektiven Schallmessers.

wie aus den späteren Bildern ersichtlich ist. Nur zur Messung von tonartigen Schallen und beliebigen Geräuschen in wenig gedämpften Zimmern (Hallen) ist sie geeignet. Aber auch die reine Spitzenmessung (es wurde ausschließlich das Impulsaudion [32] verwendet) zeigt nicht richtig an. Das erkennt man am besten aus Abb. 18. Alle dort gezeichneten Druckschwankungen empfindet das Ohr als gleich laut, wenn sie im Lautstärkebereich von 50 bis 100 Phon liegen. Den Ton Abb. 18b hat

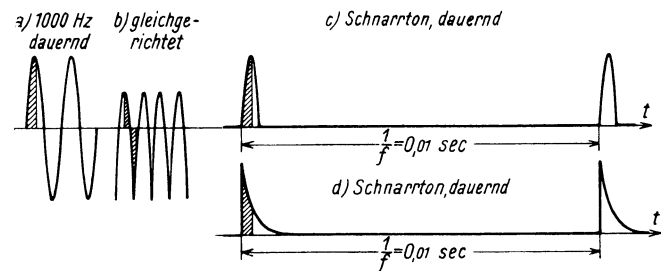


Abb. 18. Maßstäbliche Druckkurven von annähernd gleich lauten Geräuschen, gültig für Lautstärken von 50 bis 100 Phon. Die Flächen der Formel (2) sind schraffiert.

Heinze [23] in umfangreichen Messungen auf seine Lautstärke hin untersucht. Er stellte ihn durch Gleichrichtung eines 1000 Hz-Tones mit einem weit ausgesteuerten Vakuumgleichrichter her. Die Lautstärke der Formen c und d habe ich mit vielen Personen untersucht; c wurde von einem Schnarrsummer bei bestimmter Belastung erzeugt; d stellte ich wie die Geräusche von Abb. 10 mit einem von einem Unterbrecher gesteuerten polarisierten Relais her, das einen Kondensator periodisch auf konstante Spannung auf- und über das dynamische Telephon entlud. Aus der Impulsformel (2) geht die Gleichheit der Lautstärke von den Druckkurven in Abb. 18 ohne weiteres hervor (die Flächen sind dort schraffiert). Wir lernen hier also die erstaunliche Tatsache kennen, daß

ein 1000 Hz-Ton etwa ebenso laut ist, als wenn nur jede zwanzigste Halbwellen von ihm vorhanden ist.

Der Spitzenwert der Druckkurve wäre bei Abb. 18 die richtige Anzeige. Die im Lautstärkemeßapparat notwendige Siebkette (für 70 Phon L) verkleinert aber die Spitzen um 5 bis 10 Phon, während sie den 1000 Hz-Ton glatt durchläßt. Ein rein Spitzen messendes Gerät hinter der Siebkette würde also die Druckkurven in Abb. 18 nicht richtig anzeigen. Wegen häufig vorkommenden unsymmetrischen Schalldruckkurven müßte man außerdem einen Zweiweg-Spitzenmesser einführen, der

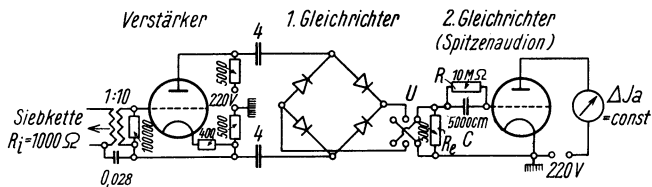


Abb. 19. Prinzipschaltbild der Registriervorrichtung des objektiven Schallmessers mit zweimaliger Gleichrichtung.

die Gesamt-Amplitude messen würde. Es könnte also ein maximaler Fehler von etwa 16 Phon eintreten. Um dennoch bei stark Spitzen haltigen Geräuschen (zum Beispiel Motorrad) eine richtige Anzeige zu erhalten, wurde eine zweite Gleichrichtung eingeführt, die bewirkt, daß tonartiger Schall gegenüber stark geräuschartigem weniger stark angezeigt wird. Das vollständige Prinzipschaltbild dieser neuen, eingehend untersuchten Registriervorrichtung zeigt Abb. 19.

Zum besseren Verständnis wollen wir wieder die beiden Druckkurven Abb. 18a und c zunächst ohne Siebkette, also wie sie gezeichnet sind, betrachten. Wie man durch einige Überlegungen unschwer ableiten kann,

zeigt das Spitzenaudion allgemein in idealer Arbeitsweise (geknickte Kennlinie, C sehr klein, $C \cdot R$ sehr groß) bei jeder Spannungskurve den Maximalwert vermindert um den Gleichstromwert.

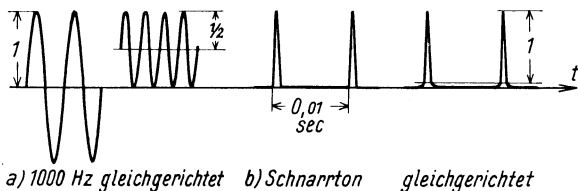


Abb. 20. Vorteil der doppelten Gleichrichtung.

Wir erhalten also nach einer quadratischen Zweiweggleichrichtung, wie Abb. 20 zeigt, bei dem 1000 Hz-Ton den Ausschlag $1/2$, bei dem Geräusch mit gleicher einfacher Amplitude (Abb. 20b) aber fast den Ausschlag 1. Bei einmaliger Gleichrichtung (Spitzenmessung) würde der 1000 Hz-Ton gleich 1 angezeigt werden, bei einem Gegentakt-Spitzenaudion (was wegen der häufig vorkommenden unsymmetrischen Kurvenform des Schalles notwendig wäre) sogar der Wert 2. Man erkennt die Vorteile der zweimaligen Gleichrichtung. Es wird durch sie das, was durch die Siebkette verloren geht (Erniedrigung der alle $1/100$ sec kommenden Spitzen um ~ 6 Phon), wieder gut gemacht.

Auf den zweiten Gleichrichter können nur reine Wechselströme auftreten, da die Siebkette Gleichstrom sperrt.

Das Gleichstromglied hat ja auch keinen Anteil an der Lautstärke. Nach dem ersten Gleichrichter ist aber ein Gleichstromglied in der Stromkurve vorhanden, welches, wenn es gegen den Maximalstrom beträchtlich ist, ein zu geringes Ausschlagen des Spitzenaudions bewirken kann. Denn dieses zeigt ja nicht die Maximalamplitude der Stromkurve, sondern diese vermindert um den Gleichstromwert an. Um diesen Übelstand zu vermeiden, wird eine Umpolvorrichtung U in Abb. 19 hinter dem ersten Gleichrichter vorgesehen; man könnte sie auch durch eine Transformatorschaltung ersetzen. Es ist dann jeweils der größte Ausschlag des Audions zu rechnen. Abb. 21 erläutert dies: Links sind zwei gleichlaute Druckkurven gezeichnet, wie es ja auch der Flächensatz (2) verlangt. Sie mögen in dieser Form auf den ersten Gleichrichter gelangen (Siebkette vernachlässigt). Rechts daneben ist dieselbe Kurve gezeichnet, wie sie hinter einem idealen Zweiweggleichrichter aussehen würde. Bei der oberen Kurve 21a haben wir den Fall, daß das Audion fast Null anzeigen würde, weil das Gleichstromglied so groß ist. In der dritten Reihe sind dieselben Kurven hinter der Umpolvorrichtung gezeichnet. Man wird nämlich den ersten Schall 21a umpolen,

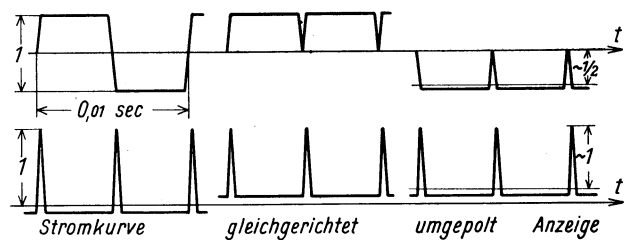


Abb. 21. Zur Umpolvorrichtung.

weil dann das Spitzenaudion mehr anzeigt ($\sim 1/2$); den zweiten Schall polt man nicht um, weil dann das Audion mehr anzeigt (~ 1). Daß sich die Ausschläge bei gleicher Lautstärke um etwa 6 Phon unterscheiden, ist kein Fehler, denn in der Siebkette werden die Spitzen von Schall 21b um etwa denselben Betrag mehr geschwächt, als die von Schall 21a (vgl. Abb. 20 und die dortigen Erläuterungen). Wiederum kommt auch die Trapezkurve 21a nicht so scharfkantig durch die Siebkette (besonders bleibt sie nicht so lange Zeit auf gleicher Höhe), so daß das Umpolen in Wirklichkeit nicht so viel ausmacht, wie es im Beispiel scheint. Der Versuch mit einer Rechteckkurvenform ergab ohne Umpolen eine um 10 Phon zu leise Anzeige, während nach dem Umpolen der richtige Wert angezeigt wurde. Bei fast allen praktisch vorkommenden Geräuschen kann man U in derselben Stellung stehen lassen, da eine Druckkurve wie in Abb. 21a kaum vorkommt. Man hat es praktisch immer mit kurz dauernden Druck- oder Saugspitzen zu tun (Motorrad).

Der objektive Schallmesser wurde mit einem Potentiometer ausgerüstet, das immer auf gleichen Ausschlag des Anzeigeeinstrumentes eingestellt wird. Das Audion läßt sich dann leichter dimensionieren. Man liest also am Potentiometer die gemessene Lautstärke in Phon ab. Zur Dimensionierung des Potentiometers wurden sämtliche Schalle von Abb. 24 auf ihre Lautstärkeskala hin untersucht. Das Ergebnis ist, wie auch schon Abb. 2 und 3 zeigt, daß überall die Lautstärkeskala des 1000 Hz-Tones noch vollkommen korrekt gilt im Bereich von 50 bis 100 Phon. Abb. 22 zeigt als Beispiel die Meßwerte von vier Personen für einen Schnarrton wie in Abb. 23a.

Zugleich ist die Anzeige des neuen objektiven Apparates, eines mit Gegentakt-Spitzenaudion und eines solchen mit Effektivwert-Registrierung eingezeichnet. Es scheint erklärlich, daß das logarithmische Gesetz so genau gilt, da in diesem Lautstärkebereich (50–100 Phon) bei einer Bezugslautstärke von 70 Phon selbst bei einem 100 Hz-Ton der Fehler noch nicht größer als 6 Phon ist ([2], S. 162). Nach oben bleibt die Lautstärkeskala sogar bis 10000 Hz praktisch konstant. Unter 40 Phon L erhält man allerdings bei vielen Geräuschen große Abweichungen von der logarithmischen Lautstärkeskala (vgl. Abb. 2). Die Lautstärke nimmt schneller ab, als der Spannung entspricht. Der Apparat wurde deshalb nur für Lautstärken von 50–100 Phon untersucht, zumal

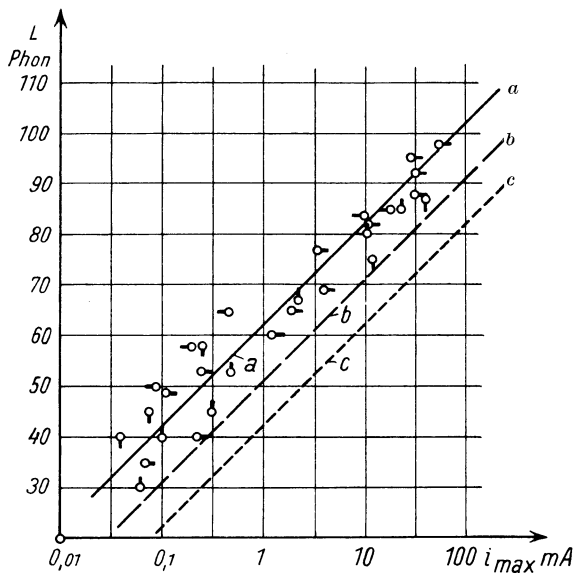


Abb. 22. Lautstärke eines Schnarrtones im dynamischen Telephon (im Freien) in Abhängigkeit vom Maximalstrom. *a* Anzeige des objektiven Apparates. *b* Einmalige Spitzen registrierende Zweigweg-Gleichrichtung. *c* Effektivwert-Registrierung.

diese die praktisch wichtigsten sind. Das Potentiometer konnte also bei jeweiliger Spannungsverzehnfachung mit 20 Phon geeicht werden; es wurde eins für Grob- und eins für Feineinstellung benutzt.

Die *Siebkette* wurde der Ohrenempfindlichkeitskurve von 70 Phon angeglichen. Sie wurde mit konstantem Wellenwiderstand aus Brücken- T -Gliedern gebaut [30] und so berechnet, daß sie mit Mikrophondämpfung und Dämpfung ihres Ein- und Ausgangstransformators zusammen die richtige Ohrdämpfungskurve ergibt. Der größte Laufzeitunterschied der gesamten Apparatur ergab sich zu 1,25 msec, wobei allerdings der größte Abfall unter 400 Hz liegt. Immerhin dürfte dies schon die obere Grenze der zulässigen Phasenverzerrung sein.

Bei dem Spitzenaudion hat man die Möglichkeit, folgende Größen zu ändern:

1. Kondensator C ,
2. Ableitewiderstand R ,
3. Eingangswiderstand R_e ,
4. Einschwingzeit des Anzeigeelementes.

Die Anklingzeit des Apparates bei kurzen Impulsen wird bestimmt durch die Zeitkonstante $C \cdot R$ und die Einschwingzeit des Instrumentes. Die Abklingzeit wird gewöhnlich durch die des Instrumentes allein bestimmt. Durch Vergrößerung von C erreicht man einen kleineren Ausschlag bei sehr kurz dauernden Impulsen;

der Kondensator lädt sich nicht voll auf. Dasselbe erreicht man durch Vergrößerung des Eingangswiderstandes R_e , ohne mit diesem den Wert $C \cdot R$ zu verändern. Der Kondensator C muß über R_e durch den Gitterstrom aufgeladen werden, welcher durch die negative Richtspannung über R_e begrenzt wird. Sollen noch sehr kurz dauernde Spitzen richtig angezeigt werden, wie es hier der Fall ist, dann darf man R_e nicht zu groß machen, während R das 1000-fache davon sein kann.

Die Einschwingzeit des Instrumentes möchte möglichst groß sein, um bequemes Ablesen zu haben. Praktisch ergibt sich aber schon sehr früh eine Grenze, weil wegen der Notwendigkeit einer vollen Anzeige sehr kurz dauernder Impulse dann $C \cdot R$ sehr groß gemacht werden müßte. Dies ist aber wieder wegen der besprochenen Zeitintegration des Ohres (s. Abb. 10) nicht möglich. Außerdem würde der immer vorhandene Ionenstrom bald eine Grenze setzen (er war im Apparat maximal $5 \cdot 10^{-10}$ A). C wiederum muß klein sein, damit sich der Kondensator bei Knacken nach Abb. 1 und $T = 1$ msec noch voll auflädt. Man kann dies auch in gewissen Grenzen mit der Aussteuerungsamplitude regeln, da man damit die Größe des Gitterstromes in der Hand hat. Diese Amplitude wird man nach dem Vorhergehenden möglichst groß machen, solange keine Anodengleichrichtung eintritt. Praktisch ist eine vollkommene Befriedigung aller Faktoren überhaupt nicht möglich. Es wurde ein Instrument gewählt mit kleiner Einschwingzeit (bei einer Stromkurve nach Abb. 1 schlägt es bei $T = 360$ msec voll aus), bei dem noch ein bequemes Ablesen möglich ist. Die Kurven von Abb. 10 werden dann noch annähernd richtig wiedergegeben.

Die Dimensionierung von C , R und R_e ist durch die eingangs beschriebenen Messungen der Knacke voll bestimmt. Sie kann empirisch gefunden werden. Als Bestes ergab sich bei einem Gitterstrom des Rohres von $5 \cdot 10^{-6}$ Amp für 0 Volt und einer konstanten Spitzenaussteuerung des Gitters von 2 Volt max. $C = 5000$ cm, $R = 10$ Megohm und $R_e = 5000$ Ohm. Ein genaues Einhalten dieser Werte ist nicht nötig. Der Sockel des Rohres muß gut isoliert sein wegen des hohen Ableitewiderstandes. Eine Verkleinerung von R ist bei Benutzung eines Anzeigeelementes mit normaler technisch ausführbarer Einschwingzeit nicht möglich. Die Aussteuerung des Gitters und die Anodenspannung darf nicht zu klein sein, weil sonst der Ionenstrom und nicht $C \cdot R$ die Zeitkonstante bestimmt.

Mit dem beschriebenen Instrument wurden die Geräusche von Abb. 2 (Kurve *b*), 3 (Kreuzpunkte), 9 (Kreuz), 10 (Kreuz) und 22 (Linie *a*) gemessen und die Werte in diese eingetragen. Die Messung geschah über das dynamische Telephon, das unter luftdichtem Abschluß auf das Kondensatormikrophon gepreßt wurde, bei Berücksichtigung der Volumenverhältnisse. Große Sorgfalt ist dabei auf gute statische Abschirmung des Mikrophons zu legen, sogar für sehr kurze Wellen (bis zu ultrakurzen), da die scharfen Knacke alle Frequenzen enthalten. Andernfalls wird der Knack neben dem akustischen Wege noch auf elektrischem Wege als im ersten Rohr gleichgerichteter Impuls übertragen. Die Eichung des Gerätes wurde in jedem Falle mit dem von Siemens & Halske geeichten dynamischen Telephon bei einem reinen Ton von 1000 Hz vorgenommen. Ebenso wurde hiermit auch öfters unter Berücksichtigung der Luftvolumenverhältnisse der Barkhausen-Geräuschmesser

objektiv nachgeprüft, da sich gezeigt hatte, daß er sich mit der Zeit um 5 Phon ändern kann.

Zur Feststellung der praktischen Brauchbarkeit des entwickelten Apparates sind nun noch umfangreiche Messungen gemacht worden. Im ganzen waren 17 Personen an den Messungen beteiligt. Der Hauptgesichtspunkt bei diesen Messungen war weitgehende Anpassung an die Wirklichkeit. Daß dies bei einer Messung im gewöhnlichen Zimmer nicht erfüllt ist, zeigt Abb. 23: Derselbe Schnarrton wurde mit dem Braunschen Rohr einmal direkt (*a*), dann über einen Lautsprecher und Mikrophon in 2 m Abstand im stark gedämpften Zimmer

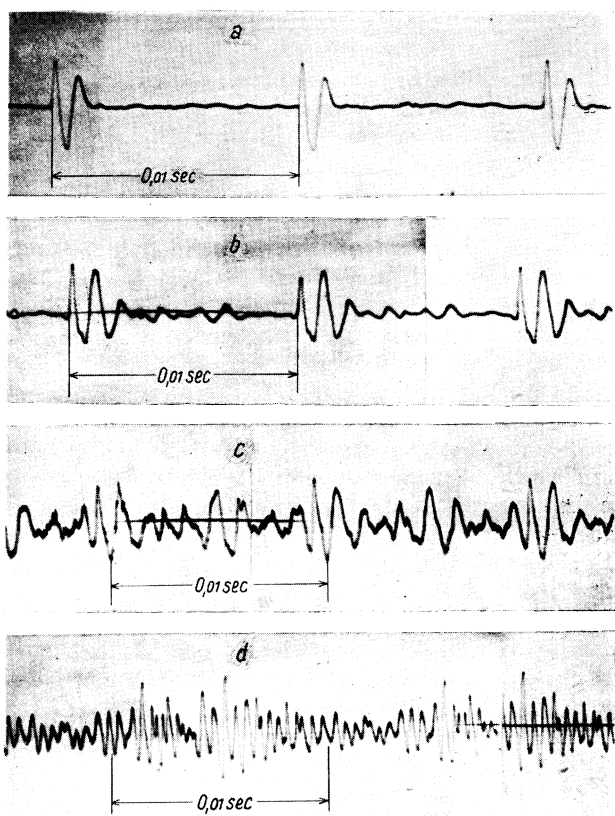


Abb. 23. *a* Schnarrton. *b* Derselbe, über eine akustische Übertragungsstrecke von 2 m im gedämpften Zimmer. *c* Wie *b*, nur im ungedämpften (normalen) Zimmer. *d* Geräusch 6 in Abb. 24.

(*b*) und schließlich ebenso im gewöhnlichen Zimmer (*c*) oszillographiert. Durch die Raumakustik verliert der Schnarrton sehr seinen Geräuschcharakter. Das Verhältnis vom Spitzenwert zum Effektivwert wird viel kleiner. Es war deshalb nötig, die meisten Messungen im gedämpften Zimmer vorzunehmen, denn das ist eine viel härtere und der Wirklichkeit entsprechendere Probe für den Lautstärkemesser, der ja vorzugsweise im Freien verwendet werden soll. Die Geräusche selbst wurden auch möglichst weit der Wirklichkeit angepaßt. In Abb. 24 sind sie angegeben, wie sie dem Ohr erscheinen.

Die Messungen gingen so vor sich, daß im Abstand von 4 m von der Geräuschquelle dicht neben dem Kondensatormikrophon eine Person mit dem Barkhausen-Geräuschmesser maß. Gleichzeitig wurde die Lautstärke im Nebenzimmer objektiv gemessen. Von dem objektiven Apparat stand also im Meßzimmer allein das Mikrophon mit einem einstufigen Verstärker, der sich wegen der langen Verbindungsleitung als notwendig

erwies. Gleichzeitig wurde jedesmal der Effektivwert der Spannung hinter der Siebkette gemessen, um zu untersuchen, wie sich ein derartiger Apparat verhält. (In neuerer Zeit sind wiederholt solche Apparate gebaut worden.) Die Effektivwertmessung geschah über einen besonderen frequenzunabhängigen Verstärker mit einem Detektorinstrument, dessen Anzeige bei den verwickelten Druckkurven mit einem Thermokreuz nachgeprüft und korrigiert wurde.

Bei allen diesen Geräuschmessungen wurde die Lautstärke im Bereich von 50 bis 100 Phon geändert. In Abb. 24 sind der Übersichtlichkeit halber alle Messungen auf 70 Phon Anzeige des objektiven Apparates reduziert worden. Dazu war ich berechtigt, weil sich bei keinem Geräusch bei der Untersuchung der Lautstärkeskala ein bestimmter Gang gegen die Skala des 1000 Hz-Tones gezeigt hatte. Für andere Lautstärken in dem erwähnten Bereich würde also Abb. 24 entsprechend aussehen.

Als Beispiel sei das Versuchsprotokoll von Geräusch 9 in Abb. 24 in folgender Tabelle wiedergegeben:

Tabelle.

Meßperson	Neuer objekt. Lautst.-Messung	Effektivwertmessung	Subjekt. Messung	S red. auf 70 Phon 0	Mittelwert von R	Streubereich
<i>P</i>	<i>O</i> Phon	<i>E</i> Phon	<i>S</i> Phon	<i>R</i> Phon	Phon	Phon
1	52	43	50	68		
2	52	43	50—55	70,5		
3	56	47	55—60	71,5		
4	66	56	65—70	71,5		
5	72	62	65	63		
6	72	62	70—75	70,5		
7	75	65	80	75	69	62—75
2	78	68	75—80	69,5		
1	78	68	75	67		
8	78	68	70	62		
9	80	70	85	75		
2	82	72	80—85	70,5		
1	93	82	90	67		
4	93	82	90	67		

In Abb. 24 sind die Ergebnisse zusammengestellt. Man erkennt die großen Fehler des den Effektivwert anzeigenden Instrumentes bei spitzenhaltigen Geräuschen. Die Einschwingzeit des Meßinstrumentes würde nur bei den Geräuschen 11 und 12 in Betracht kommen. Eine brauchbare Anzeige bei Effektivwert messenden Geräten würde man demnach nur bei einer Einschwingzeit des Instrumentes von 10^{-3} sec (Oszillograph) und großer Dämpfung erreichen. Sehr drastisch läßt sich die falsche Anzeige bei Effektivwert-Messung darstellen, wenn man z. B. den Schnarrton von Abb. 23*a* einmal direkt und einmal über die erwähnte Phasenkette auf das dynamische Telephon gibt. Der Effektivwert ist beidemal genau derselbe, während der objektive Apparat 7,5 Phon Unterschied anzeigt, was auch genau der subjektiven Empfindung entspricht. Bei einer längeren Phasenkette dürfte der Unterschied noch größer werden.

Mit einem normalen Spitzen messenden Instrument mit Gentaktadion und 0,1 sec Zeitkonstante der *CR*-Glieder wurden auch zahlreiche Messungen ausgeführt. Die Meßwerte sind in Abb. 24 eingetragen. Sie liegen bei spitzenhaltigen Geräuschen etwa 12 Phon unter dem Wert des neuen Apparates, wie es auch die theoretische Betrachtung verlangt. Die Grenzen des Streubereiches werden meistens schon überschritten. Da

die meisten praktisch zu messenden Geräusche starke Spitzen enthalten, könnte man diesen Apparat durch eine absichtlich falsche Eichung, wenn auch beschränkt, brauchbar machen. Das scheint schon mehrfach geschehen zu sein.

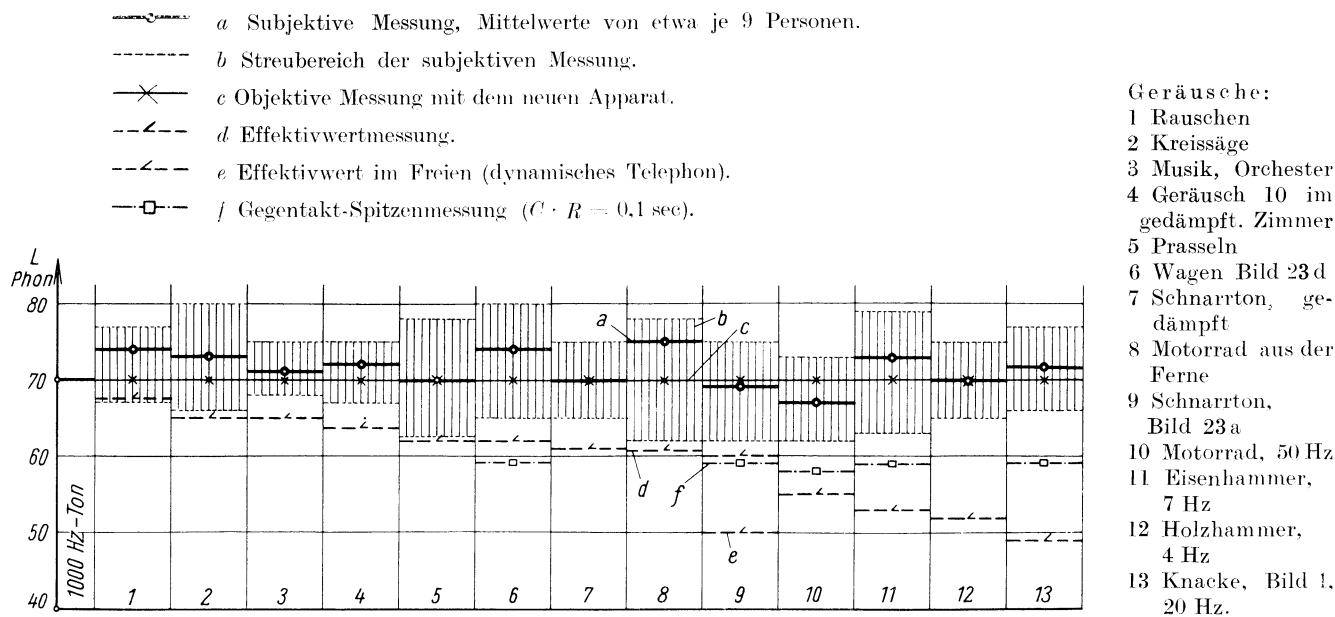
Da unter anderem sehr extreme Geräusche untersucht worden sind, läßt sich an Hand der Versuchsergebnisse sagen, daß der beschriebene Apparat für die Praxis durchaus brauchbar ist. Sogar ein Einzelknall nach Abb. 1 wird noch etwa richtig angezeigt. Der Übergang vom Geräusch zum Einzelknall macht allerdings wegen des besprochenen eigenartigen Verlaufes der Kurven in Abb. 10 eine kleine Ungenauigkeit auf jeder Seite notwendig wegen der Grenzen der Einstellbarkeit des Audions. Durch die doppelte Gleichrichtung ist diese

Es muß noch erwähnt werden, daß sämtliche subjektiven Lautstärkemessungen (auch die Eichungen) zweiohrig gemacht worden sind; d. h. der zu messende Schall trifft das eine und der Vergleichston unter gutem Luftabschluß das andere Ohr. Weil also nur eine Meßmethode benutzt wurde, können derartige Effekte, daß man mit beiden Ohren anders hört als mit einem, die Richtigkeit des Apparates nicht beeinträchtigen.

Interessant ist, daß man ebenso wie ein „absolutes Gehör“ für Tonhöhen auch ein solches für Lautstärken üben kann. Ich kann nach den vielen Messungen mit ziemlicher Sicherheit die Lautstärke eines Schalles ohne irgendeinen Vergleich auf 5 Phon genau angeben.

Das Prinzip der zweifachen oder noch öfteren Gleichrichtung ließe sich in Verbindung mit einer entsprechenden

Abb. 24. Messung von Geräuschen.



Ungenauigkeit mehr zur richtigen Anzeige des Geräusches hin entschieden worden. Dieses ist auch wichtiger, da der Einzelknall selbst doch keine so genau definierte Lautstärke besitzt (s. Abb. 2).

Bei einigen Geräuschen, die durch eine elektrische Spannungsquelle über einen Lautsprecher erzeugt wurden, konnte auch die Messung im vollkommen freien Raum, wenigstens bis zu Frequenzen von etwa 3000 Hz nachgebildet werden, indem sie statt auf den Lautsprecher auf das dynamische Telefon gegeben wurden, das dicht auf das Mikrophon zu pressen war. Bei diesen Messungen zeigt der neue objektive Apparat auch noch vollkommen richtig an, während die Anzeige des Effektivwertes noch ungünstiger wird (s. Abb. 24 Geräusch 9). In Wirklichkeit wird man es meist mit einem Zwischending zwischen diesen Extremen (freier Raum und ungedämpftes Zimmer) zu tun haben. Es ist aber doch wichtig, daß die Messungen bei Nachbildung des freien Raumes die richtige Anzeige des Apparates bestätigen, denn naturgemäß ist die Schallabsorption des gedämpften Zimmers frequenzabhängig (nur die hohen Frequenzen werden so gut wie gar nicht reflektiert).

Siebplatte wahrscheinlich auch vorteilhaft zur Messung des Belästigungsgrades anwenden. Es ist nämlich bekannt, daß stark Spitzen enthaltende Geräusche sehr belästigend auf den menschlichen Organismus wirken, und solche werden durch die mehrfache Gleichrichtung stark hervorgehoben.

Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden im Institut für Schwachstromtechnik der Technischen Hochschule zu Dresden ausgeführt. Dem hochverehrten Leiter, Herrn Prof. Dr. H. Barkhausen danke ich herzlich für seine reichen Anregungen und sein freundliches Interesse. Ferner danke ich der Mitteldeutschen Rundfunkgesellschaft und der Heinrich Hertz-Gesellschaft für ihre Unterstützungen, sowie der Notgemeinschaft Deutscher Wissenschaften und der Helmholtz-Gesellschaft für geliehene Apparate. Zu Dank bin ich auch den Herren des Instituts verpflichtet, die die Lautstärkemessungen ausgeführt haben, insbesondere Herrn Dr. Ing. M. Kluge und Herrn Dipl.-Ing. Th. Mulert für manch guten Rat.

Zusammenfassung.

I. 1. Es wird die Lautstärke verschiedenartiger Knacke in Abhängigkeit von ihrer Form und ihrer Dauer untersucht. Zur Beurteilung ihrer Lautstärke aus der gegebenen Schalldruckkurve wird eine neue Lautstärkeformel angegeben, die einen Impuls, das maximale Druckintegral, über eine Zeit von 0,3 msec als für die Lautstärke verantwortlichen Faktor angibt. An Hand von Lautstärkemessungen von Schallen, die einen stetigen Übergang vom Einzelknack zum Geräusch und zum Ton bilden, wird ein Satz aufgestellt, mit dessen Hilfe sich die Lautstärkeformel auf beliebige Schalle verallgemeinern läßt. Die nach der Formel berechneten Lautstärkewerte für Knacke, Geräusche und Töne stimmen gut mit den gemessenen Werten überein.

2. Der Lautstärkeabfall nach Aufhören eines Tones oder Geräusches wird durch Verdeckungsmethode untersucht. Er geht in der Größenordnung von 0,5 sec vor sich. Am Schluß des ersten Abschnittes wird noch auf die physiologischen Gesichtspunkte bei der Schallaufnahme durch das Ohr kurz eingegangen.

II. Im zweiten Abschnitt wird ein neu entwickelter objektiver Apparat zur Messung der Lautstärke beschrieben. Er arbeitet mit mehrfacher Gleichrichtung und Spitzenwertregistrierung. An Hand zahlreicher Lautstärkemessungen von Knacken und Geräuschen durch viele Personen wird die richtige Dimensionierung der Einzelteile des Apparates abgeleitet. Es zeigt sich, daß die Lautstärkeskala sämtlicher untersuchter (zum Teil sehr extremer) Geräusche mit ziemlicher Genauigkeit gleich der eines 1000 Hz-Tones ist in dem Bereich von 50 bis 100 Phon. Zur Kontrolle der praktischen Brauchbarkeit des neuen objektiven Apparates wurden zahlreiche Messungen gemacht, die der Wirklichkeit weitgehend angepaßt waren, z. B. unter Benutzung eines gedämpften Zimmers, um die Messung im Freien nachzuahmen. Es zeigt sich, daß der Apparat vollständig befriedigende Angaben der Lautstärke macht, die sehr nahe dem Mittelwert der subjektiven Messungen, und immer in ihrem Streubereich liegen. Schließlich wird die Brauchbarkeit anderer bisher benutzter objektiver Lautstärkemesser geprüft.

Literatur.

Grundlegendes.

1. H. v. Helmholtz, Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig 1863. — 2. H. Fletcher, Speech and Hearing. New York 1930. — 3. G. v. Bekesy, Zur Theorie des Hörens. Phys. Z. **30**, 115-125 und 721-745, 1929, Annalen d. Phys. (5) **13**, 120, 1932 und (5) **14**, 111, 1932.

Schallmessung.

4. H. Barkhausen, Ein neuer Schallmesser für die Praxis. Z. Techn. Phys. **7**, 599, 1926, Z. V. D. I. **71**, 1471, 1927. — 5. G. Bakos u. S. Kagan, Lärmmessung. Z. V. D. I. **76**, 145, 1932. — 6. E. Meyer u. C. Willms, Geräuschmessungen an Kraftfahrzeugen. Z. V. D. I. **76**, 983, 1932. — 7. R. H. Galt, Results of Noise Surveys. Journ. Ac. Soc. Am. **2**, 530, 1930. — 8. T. G. Castner, A Portable Sound Meter. Bell Lab. Record **10**, 334, 1932. — 8a) T. G. Castner, E. Dietze, G. T. Staution

u. R. S. Tucker, Indicating Meter for Measurement and Analysis of noise. Bell Telephone System technical publications B 563 (1930). Journ. Am. Instit. Electr. Eng. **50**, 342, 1931. — 9. J. Obota, S. Morita, On the accuracy of the aural method of measuring noises. Journ. Ac. Soc. Am. **4**, 129, 1932.

Frequenz- und Amplitudengang.

10. J. Tröger, Die Schallaufnahme durch das äußere Ohr. Phys. Z. **31**, 26-47, 1930. — 11. B. A. Kingsbury, A Direct Comparison of the Loudness of Pure Tones. Phys. Rev. **29**, 518, 1926 und **29**, 588, 1927. — 12. B. Shower u. W. Biddulph, Differential Pitch Sensitivity of the Ear. Journ. Ac. Soc. Am. **3**, 275, 1931. — 13. R. L. Wegel, C. E. Lane, Auditory Masking of one Pure Tone by another. Phys. Rev. **23**, 266, 1924. — 14. R. R. Riesz, Differential Intensity Sensitivity of the Ear for Pure Tones. Phys. Rev. **31**, 867, 1928. — 15. T. Ham, T. Parkinson, Loudness and Intensity Relations. Journ. Ac. Soc. Am. **3**, 511, 1932.

Lautstärkeempfindung.

16. H. Fletcher, A Space-Time-Pattern Theory of Hearing. Journ. Ac. Soc. Am. **1**, 311, 1930. — 17. H. Barkhausen, G. Lewicki, Die Empfindlichkeit des Ohres für nicht sinusförmige Töne. Phys. Z. **25**, 537, 1924. — 18. H. Barkhausen, H. Tischner, Die Lautstärke von zusammengesetzten Tönen und Geräuschen. Z. Techn. Phys. **8**, 215, 1927. — 19. F. A. Firestone, Binaural localization of pure tones. Journ. Ac. Soc. Am. **2**, 260 und 271, 1930. — 20. H. Fletcher, J. C. Steinberg, Dependence of Loudness of a Complex Sound. Phys. Rev. **24**, 306, 1924. — 21. G. W. Stewart, Binaural Hearing. Journ. Ac. Soc. Am. **1**, 344, 1930. — 22. R. L. Wegel, Physical Data and Physiology of Excitation of the Auditory Nerve. Annals of Otology **41**, 740, 1932. — 23. H. H. Heinze, Diplomarbeit. Dresden 1932.

Klang-Spektren.

24. H. Fletcher, Some Physical Characteristics of Speech and Music. Bell Syst. Techn. Journ. **10**, 349, 1932. — 25. H. Lueder, Zur Statistik der Intensitätsverteilung im Spektrum natürlicher Klangbilder. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern **9**, 167, 1930. — 26. E. Meyer, Klangspektren von Musikinstrumenten. Z. Techn. Phys. **12**, 606, 1931. — 27. U. Schmidt, Auspuffgeräusch von Verbrennungsmotoren. Dissertation. Charlottenburg 1932. — 28. L. J. Sivian, H. K. Dunn, S. D. White, Absolute Amplitudes and Spektra of Certain Musical Instruments... Journ. Ac. Soc. Am. **2**, 331, 1931.

Vierpole.

29. K. Küpfmüller, Die Erhöhung der Reichweite von Pupinleitungen. El. Nachr. Techn. **3**, 82, 1926. — 30. V. Gandtner, G. Wohlgemuth, Diagramme zur Berechnung von Vierpolen. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern **7**, 67, 1928. — 31. S. P. Mead, Phase Distortion and Phase Distortion Correction. Bell Syst. Techn. Journ. **7**, 195, 1928.

Spitzenaudion.

32. D. Thierbach, Impulsmesser. Z. Techn. Phys. **9**, 438, 1928. — 33. W. Grube, Impulsverlängerung. Dissertation. Charlottenburg 1930. — 34. G. Lubszynsky, H. Weigt, Aussteuerungsgeräte im Rundfunkbetrieb. El. Nachr. Techn. **9**, 4, 1932.

(Eingegangen am 23. Dezember 1932.)