

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 26 (1935)
Heft: 2

Artikel: Elektroakustische Übertragungssysteme
Autor: Fischer, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058433>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

sées en la matière. Cela est important en particulier pour l'exécution des arrêtés; en effet, les prescriptions de la LE ne sont pas valables dans ce cas et l'indemnité ne doit par conséquent pas être payée selon l'art. 89, 1^{er} al., LE en mains du conservateur du registre foncier compétent, mais bien directement à l'ayant-droit. Les titulaires de droit de gage immobilier peuvent faire valoir leurs droits (dépôt de garanties ou à-compte) selon les prescriptions du droit civil (art. 809/810 code civil),

lorsqu'ils sont menacés d'un préjudice du fait d'une réduction éventuelle de valeur par suite du renouvellement de la servitude. De même, une entente directe, intervenue après l'introduction de la procédure d'arbitrage selon art. 53^{bis} LIE, a un effet de droit purement civil.

Pour le recours au Tribunal fédéral contre une décision prise par la commission d'estimation ou son président, prévu également à l'art. 53^{bis} LIE, les art. 77—87 LE sont applicables.

Elektroakustische Uebertragungssysteme.

Vortrag, gehalten an drei Abenden in der Physikalischen Gesellschaft Zürich, am 1., 8. und 15. Juni 1934.

Von Prof. Dr. F. Fischer, Zürich.

Nach einer Betrachtung der Grundlagen der Uebertragung von Tönen und Geräuschen werden die verschiedenen linearen und nichtlinearen Verzerrungsarten und deren subjektive Empfindung behandelt. Eine Methode zur Darstellung akustischer und elektroakustischer Systeme durch elektrische Ersatzbilder wird angegeben und an Beispielen (Lautsprecher) erläutert. Ein Ueberblick über die verschiedenen Messverfahren zeigt den heutigen Stand der elektroakustischen Messtechnik. Zur Tonaufzeichnung kommen heute je nach Verwendungszweck namentlich drei Verfahren in Frage: Die Schallplatte, der Stahldraht und der Lichttonfilm, welche einzeln erläutert werden.

Après quelques considérations sur les principes de la transmission des sons et des bruits, l'auteur étudie les différentes sortes de déformations linéaires et non linéaires, ainsi que la perception subjective de ces déformations. L'exposé d'une méthode de représentation de systèmes acoustiques et électroacoustiques par des schémas électriques, étayé d'exemples (haut-parleur), est suivi d'un aperçu des différents procédés de mesure montrant l'état actuel de la technique des mesures électroacoustiques. Pour l'enregistrement de sons, trois procédés entrent aujourd'hui en considération suivant le but visé: le disque, le fil d'acier et le film. Une description de ces trois procédés termine l'article.

Ein ideales elektroakustisches Uebertragungssystem ist eine elektrische Einrichtung, die ein Schallfeld in der Umgebung des Ortes A (primäres Schallfeld) formgetreu nach dem Ort B überträgt (sekundäres Schallfeld). Wenn man bedenkt, dass die Ausbildung des primären Schallfeldes auch vom Raume abhängig ist, der A umgibt, so führt die Forderung der Gleichheit beider Schallfelder auf eine Kongruenz der beiden Räume. Zudem müssten im Raume um B gleichviel und gleich placierte Schallquellen vorhanden sein wie im Raum A. Besteht also z. B. die Aufgabe, das Spiel eines Orchesters zu übermitteln, so müsste jedes einzelne Instrument gesondert übertragen werden. Die Forderung nach kongruenten Räumen, sowie getrennten Aufnahme-, Uebertragungs- und Wiedergabegeräten für jede Schallquelle ist praktisch nicht zu erfüllen. Man verzichtet deshalb in der Praxis auf eine ideale Uebertragung und bezeichnet als elektroakustisches Uebertragungssystem eine Einrichtung, welche die Schallfeldgrößen im Punkt A auf einen Schallstrahler im Punkt B überträgt. Es bleibt dann Aufgabe der Raumakustik, sowie der Aufnahme- und Wiedergabetechnik, auch in der weiteren Umgebung des Punktes B ein Schallfeld zu erreichen, das den Anforderungen des menschlichen Ohres genügt.

In einem Schallfeld führen die Luftteilchen schwingende Bewegungen aus. Ist diese Bewegung sinusförmig, so handelt es sich um einen reinen Ton ohne Klangfarbe und man kann für den zeitlichen Verlauf der Teilchengeschwindigkeit setzen:

$$v = v_0 \sin(\omega t).$$

Da der Schallträger (vorwiegend Luft) bei kleinen Druckveränderungen ideal elastisch ist, kann auch für die Druckschwankungen gesetzt werden:

$$p = p_0 \sin(\omega t). \quad (1)$$

Aehnlich wie etwa bei einem schwingenden Pendel ist die Schallfeldenergie pro Volumeneinheit zur Hälfte kinetischer und zur Hälfte potentieller Art. Bedeutet ρ die mittlere Dichte des Schallträgers, so ergibt sich für die Energie pro Volumeneinheit:

$$\Theta = \rho \cdot \frac{v_0^2}{2}.$$

Da der Schall mit der Geschwindigkeit c fortschreitet, so erhält man für die pro Zeiteinheit durch die Flächeneinheit strömende Schallenergie:

$$J = c \Theta = c \rho \cdot \frac{v_0^2}{2} = c \rho \bar{v}^2$$

oder durch p ausgedrückt:

$$J = \frac{p_0^2}{2} \frac{1}{\rho \cdot c} = \frac{1}{c \rho} \bar{p}^2 \quad (2)$$

wobei durch Ueberstreichung die Effektivwerte gekennzeichnet sind. Die Schallintensität ist also proportional dem Quadrat der Geschwindigkeit oder auch proportional dem Quadrat der Druckamplitude.

Für $c \rho$ gilt demnach

$$c \rho = \frac{\bar{p}}{v}$$

und für die Schallintensität

$$J = \bar{p} \cdot \bar{v}.$$

Bei einem Phasenunterschied des Druck- und Geschwindigkeitsvektors ist wie im analogen Fall von elektrischem Strom und Spannung zu setzen:

$$J = \bar{p} \bar{v} \cos(\varphi). \quad (3)$$

Bei der Uebertragung der Schallfeldgrößen von A auf den Schallstrahler im Punkte B verlangt man, dass die abgestrahlte Leistung N_B proportional der Schallintensität in A ist, d. h.

$$N_B = k_p p_{0A}^2 = k_v v_{0A}^2. \quad (4)$$

Je nachdem, ob das Mikrophon in A die Teilchengeschwindigkeit oder Druckschwankung misst, spricht man von einem Geschwindigkeits- oder Druckempfänger. Bei einem guten Uebertragungssystem soll zunächst die Konstante k von der Tonhöhe unabhängig sein. Zur Feststellung, wie weit sich das Frequenzgebiet erstreckt, in dem diese Forderung erfüllt sein muss, sind zwei Untersuchungen durchzuführen. Erstens ist festzustellen, wie die Druck- bzw. Geschwindigkeitsschwankungen der zu übertragenden Laute bzw. Klänge beschaffen sind. Zweitens ist zu prüfen, mit welchem Gewicht das Ohr die verschiedenen Komponenten der Klänge wahrnimmt. Im ersten Fall handelt es sich um rein physikalische Messungen, während es sich im zweiten Fall um physiologische Erwägungen handelt. Frequenzen, die von der Schallquelle nicht erzeugt werden, oder die keinen Reiz auf unser Ohr ausüben, brauchen natürlich durch ein elektroakustisches Uebertragungssystem auch nicht übertragen zu werden.

Um verschiedene Töne und Geräusche zu untersuchen, kann man die Druck- bzw. Geschwindigkeitsschwankungen unter Verwendung eines geeigneten Mikrophons mit einem Oszillographen festhalten. Das Oszillogramm lässt sich bekanntlich harmonisch analysieren, d. h. es ist durch eine Superposition sinusförmiger Vorgänge darzustellen:

$$\bar{p} = \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} p_{0\nu} \sin(\nu \omega t + \varphi_\nu). \quad (5)$$

Bei einem musikalischen Ton ist ν ganzzahlig. Wir haben es mit einem Grundton ($\nu = 1$), dem verschiedene Obertöne (ν grösser als 1) überlagert sind, zu tun. Die Amplituden der Obertöne $p_{0\nu}$ bestimmen die Klangfarbe.

Auch bei den gesprochenen Vokalen treten einzelne diskrete Frequenzen auf, welche die Unterscheidung von a, i, e, u usw. ermöglichen, wobei die sogenannten Formantbereiche massgebend sind, d. h. Gebiete, innerhalb denen Teiltöne vorhanden sind.

Im Gegensatz hierzu sind im Frequenzspektrum eines Geräusches die Schwingungszahlen über einen grösseren oder kleineren Bereich stetig verteilt. Die Verteilung der Amplituden im Geräuschktrum

bestimmt den Eindruck, den das Ohr z. B. von einem Staubsaugergeräusch erhält (Fig. 1). Aehnlich verhält es sich bei den gesprochenen Konsonanten (Fig. 2).

Eine plötzlich einsetzende oder rasch aussetzende Sinusschwingung führt, wie die Analyse nach Fou-

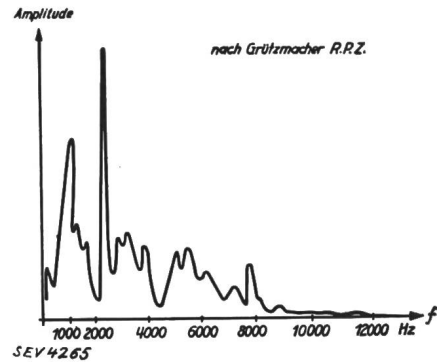


Fig. 1.
Geräusch eines Staubsaugers.

rier zeigt, auf eine unendliche Anzahl Schwingungen verschiedener Frequenzen, die sich um die Grundfrequenz der Sinusschwingung häufen, d. h. es sind bei klavierähnlichen Instrumenten neben den diskret verteilten Teiltönen Kontinua vorhanden, die durch den Einschwingvorgang beim Anschlag, resp. durch starke Dämpfung bedingt sind.

In Praxis ist eine ideale elektroakustische Uebertragung von A nach B nur schwer möglich: es treten Verzerrungen auf. Erstens werden die Amplituden verschiedener Frequenzen gegenseitig verändert, die Uebertragung ist nicht frequenztreu. Ferner kann auch die Uebertragungszeit von der Fre-

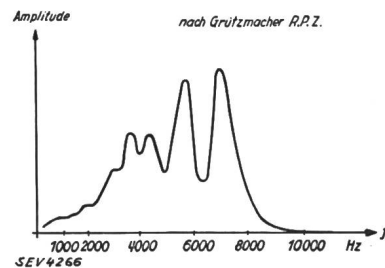


Fig. 2.
Klangbild des
Konsonanten «s».

quenz abhängen: die Uebertragung ist nicht phasentreu. Es können drittens auch noch durch die sogenannten nichtlinearen Verzerrungen Schwingungen erzeugt werden, die bei der Schallaufnahme gar nicht vorhanden sind.

Lineare Verzerrungen.

Um eine lineare Verzerrung erster Art handelt es sich, wenn die k_p resp. k_v der Gleichung (4) frequenzabhängig sind. Dabei werden also die Amplituden der Oberschwingungen gegenüber der Grundschwingung und damit auch die Klangfarbe verändert. Die physiologische Wirkung einer solchen unvollkommenen Uebertragung lässt sich am besten mit Hilfe von Siebketten verfolgen, mit

denen man bestimmte Frequenzbereiche aus der Uebertragung ausschliesst (Versuch mit Klaviermusik). Schneidet man sämtliche Frequenzen, die unterhalb 150 Hertz liegen, mit Hilfe eines Hochpass-Filters heraus, so ist schon deutlich eine Veränderung in der Klangfarbe zu erkennen. Steigt diese Grenzfrequenz nach und nach, so geht der Klavierton in den Klang eines Cembalo über, und schliesslich glaubt man, eine Zither zu hören. Bei einer Grenzfrequenz von etwa 6000 bis 7000 Hertz ist dem menschlichen Ohr überhaupt nichts mehr wahrnehmbar. Mit einem Tiefpass-Filter kann das Frequenzband auch von oben her begrenzt werden. Bei Klaviermusik hat die Unterdrückung sehr hoher Teiltöne für den Ungeübten zunächst keinen grossen Einfluss. Fällt die Grenzfrequenz aber unter ca. 3000 bis 4000 Hertz, so ändert sich die Klangfarbe doch merklich und schliesslich sind nur noch die tieffrequenten Anteile, die durch die Grundwellen der tiefen Töne bedingt sind, wahrzunehmen. Das übertragene Frequenzband lässt sich auch gleichzeitig von beiden Seiten her verkleinern. Je mehr man die obere und untere Grenzfrequenz einander nähert, um so mehr entspricht die Klangfarbe dem Ton eines kurzen Trichterlautsprechers, wie er noch vor ca. 15 Jahren gebräuchlich war. Interessant ist auch der Fall, wo aus der Mitte des Frequenzbandes ein Stück herausgeschnitten wird. Lässt man z. B. nur Teiltöne unterhalb 700 und oberhalb 1500 Hertz passieren, so ist bei guter Uebertragung der verbleibenden Komponenten

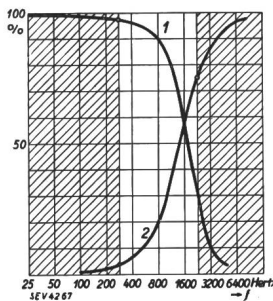


Fig. 3.
Silbenverständlichkeit in %
in Abhängigkeit von der
Grenzfrequenz einer Kon-
densator- (1) und Spulen-
leitung (2).

Die Versuche lassen sich auch mit Sprach- und Geräuschübertragung wiederholen. Bei Ausschluss der hohen Frequenzen ist deutlich festzustellen, dass die Zischlaute nicht mehr zu unterscheiden sind. Bei zunehmender Verkleinerung des übertragenen Frequenzbandes vermindern sich die Unterschiede der gesprochenen Vokale, die schliesslich überhaupt nicht mehr zu unterscheiden sind.

Für die Güte der Verständlichkeit gibt man zweckmässig an, wieviele Prozent von 100 nicht zusammenhängenden gesprochenen Silben noch zu verstehen sind. In Fig. 3 gibt die abfallende Kurve diese sog. Silbenverständlichkeit in Funktion der Grenzfrequenz eines Hochpass-Filters wieder (Kondensatorleitung), die ansteigende Kurve dagegen

die Silbenverständlichkeit in Funktion der Grenzfrequenz eines Tiefpassfilters (Spulenleitung). Eine normale Telephonleitung überträgt heute Frequenzen im Bereiche von etwa 250 bis 2000 Hertz. Bei der rasch fortschreitenden Entwicklung der Uebertragungstechnik in den letzten Jahren wurden die Anforderungen an die Silbenverständlichkeit sehr stark gesteigert. Die Verständlichkeit kann heute zu 100 % angenommen werden, wenn es sich um gesprochene zusammenhängende Wörter und Sätze von einem bestimmten Sinn handelt. Schneidet man auch bei der Sprachübertragung aus der Mitte des Frequenzbandes ein Stück etwa zwischen 900 und 1400 Hertz heraus, so ist wieder kein wesentlicher Einfluss zu bemerken. Diese Erscheinung wird bei der Telephonie auf langen Leitungen ausgenützt, indem die herausgeschnittenen, d. h. für die Sprache gesperrten Frequenzbänder zur Uebertragung von einem oder mehreren Tonfrequenztelegrammen verwendet werden. Es handelt sich dabei um die sogenannte Kanaltelegraphie. Am Empfangsort sind natürlich die Trägerfrequenzen der telegraphischen Uebertragung von der akustischen Wiedergabe auszuschliessen. Andererseits sind die übertragenen Sprachfrequenzen von den Telegraphie-Empfangsapparaten fernzuhalten. Dies geschieht durch eine sogenannte elektrische Weiche, eine zweckmässige Kombination von verschiedenen Siebkreisen.

Das Frequenzband eines Uebertragungssystems hängt im allgemeinen ab von der Güte des Mikrophons, des Verstärkers, der Uebertragungsleitung, resp. der Tonaufzeichnung und des Lautsprechers. Es hat natürlich keinen Sinn, z. B. ein hochqualifiziertes Mikrophon und einen guten Verstärker mit einem schlechten Lautsprecher zusammenzuschalten. Ein schlechter Frequenzgang des Lautsprechers lässt sich grundsätzlich aber nicht ohne wesentlichen Aufwand durch einen geeigneten Verstärker kompensieren.

Die Frequenzkurven der praktisch verwendeten Uebertragungssysteme haben meist einen recht zakigen Verlauf, ohne dass dies besonders unangenehm empfunden würde. Bei einem guten Lautsprecher sind z. B. Amplitudenschwankungen bei ursprünglich gleich starken Tönen im Bereiche von 1 : 3 noch anzutreffen. Es sei schon hier bemerkt, dass kleine Einbuchtungen im übertragenen Frequenzband weit weniger störend empfunden werden als einzelne Spitzen.

An Hand von Gleichung (5) soll noch eine andere lineare Verzerrungsart, die sogenannte Phasenverzerrung untersucht werden. Durch geeignete Siebkreise lässt sich die Phasenlage φ_v der Overtöne gegenüber dem Grundton verändern, während die Amplituden gleich bleiben. Ein Einfluss auf die Klangfarbe ist dabei nicht festzustellen. Aus diesem Grunde können zwei Klänge als genau gleich empfunden werden, obschon die entsprechenden Oszillogramme bei oberflächlicher Betrachtung grundverschieden sind. Dies hat seinen

Grund darin, dass unser Ohr jeden Klang in seine Teilschwingungen zerlegt, ähnlich wie ein Fourier-scher Analysator. Wird aber die relative Veränderung der Phasen für hohe und tiefe Töne ausserordentlich gross, so kann sich die Phasenverzerrung unter Umständen doch unangenehm äussern. Setzt man für die veränderte Phase

$$\varphi'_\nu = \varphi_\nu - \tau \cdot \nu \cdot \omega$$

so entsteht aus Gleichung (5)

$$p = \sum_{\nu=1}^{\nu=\infty} p_{0\nu} \sin [\nu \omega (t - \tau) + \varphi_\nu]$$

d. h. diese Fourierreihe stimmt mit der ursprünglichen überein, wenn

$$t' = t - \tau$$

ist. Der Anfangspunkt der Zeitählung ist dabei um τ Sekunden verschoben, d. h. τ ist die Laufzeit der Uebertragung. Bei einem stark pupinisierten Kabel von Zürich nach Australien würde diese Laufzeit ungefähr eine Sekunde betragen. Man müsste also bei einer telephonischen Unterhaltung nach jeder Frage mindestens 2 Sekunden auf die Antwort warten. Da dies beim telephonischen Verkehr des ungeübten Publikums unweigerlich zu Konfusionen führt, sind Zeiten dieser Grösse praktisch nicht zulässig. Die Erfahrung hat gezeigt, dass als maximale Laufzeit einer telephonischen Uebertragung $\frac{1}{4}$ Sekunde angesetzt werden muss.

Bei einem praktischen Kabel verläuft die Phasenverzerrung überhaupt nicht nach dem idealen Gesetz

$$\varphi'_\nu = \varphi_\nu - \tau \cdot \nu \cdot \omega.$$

In diesem Falle wird die Laufzeit τ frequenzabhängig und man definiert

$$\tau_\omega = \frac{d\varphi}{d\omega}. \quad (6)$$

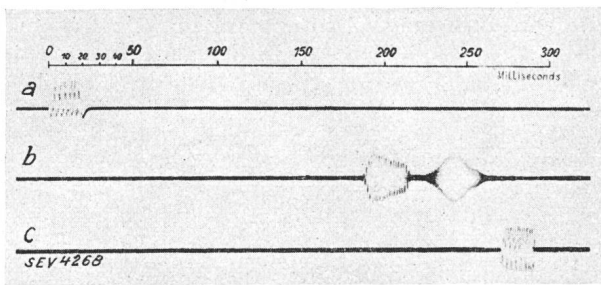


Fig. 4.
Wirkung der Phasenkompensation.

Ist diese Laufzeit für hohe und tiefe Töne derart verschieden, dass die Zeitunterschiede subjektiv empfunden werden, so wirkt sich die Phasenverzerrung in einer Klangveränderung aus, vorausgesetzt, dass es sich nicht um die Uebertragung andauernder Töne handelt, sondern etwa um plötzliche Geräusche oder die Klänge klavierähnlicher Instrumente. Explosivlaute der Sprache werden auseinandergerissen und unter Umständen auch die

übrigen Konsonanten und Vokale bei rascher Aussprache verstümmelt (Versuch: Uebertragung über ein Kabel, bei dem die Laufzeit hoher Frequenzen grösser ist als die Laufzeit tiefer Frequenzen). Diese unangenehmen Phasenverzerrungen können durch Kunstkabel, sogenannte Phasenausgleichsschaltungen, kompensiert werden, bei denen die Laufzeiten verschiedener Frequenzen entsprechend der Leitung passend gewählt sind (vgl. Fig. 4; a: 2 Töne von 700 und 1650 Hertz am Eingang eines Kabels, b: die Töne am Ausgang, c: die Töne am Ausgang mit Phasenkompensierung).

Es ist allgemein festzustellen, dass das menschliche Ohr für die besprochenen linearen Verzerrungen relativ unempfindlich ist. Auch lassen sich beide Verzerrungsarten durch zweckmässige Massnahmen weitgehend kompensieren. Anders verhält es sich bei den

Nichtlinearen Verzerrungen.

Drückt man eine Sinusschwingung am Eingang eines nicht linear verzerrenden Systems auf, so sind am Ausgang mehrere Frequenzen festzustellen: Es entstehen Oberschwingungen, die am Eingang noch nicht vorhanden sind. Das Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen zum Effektivwert der Grundschwingung bezeichnet man als Klirrfaktor. Es gibt Geräte, die zu einer aufgedrückten Grundschwingung Oberschwingungen erzeugen und die Grundschwingung absperren. Schaltet man einen solchen Apparat parallel zu einem linearen Uebertragungssystem, so lässt sich ein beliebiger Klirrfaktor je nach dem Uebertragungsanteil beider Geräte einstellen. Durch Versuch ist dann festzustellen, dass Orchestermusik schon durch einen Klirrfaktor von wenigen Prozenten sehr stark beeinträchtigt werden kann: bei Orchesterwiedergabe sind die nichtlinearen Verzerrungen sehr empfindlich hörbar. Klingen nur wenige Töne zusammen oder handelt es sich gar um die Wiedergabe eines einzelnen Instrumentes, so sind diese nichtlinearen Verzerrungen weit weniger störend.

Wird nämlich der Oberwellenanteil eines einzelnen Tones durch nichtlineare Verzerrungen um einige Prozent geändert, so ist noch kaum ein Einfluss auf die Klangfarbe wahrzunehmen, da, wie bereits festgestellt wurde, Aenderungen im Frequenzgang von Uebertragungssystemen nur relativ sehr schwer subjektiv festzustellen sind. Wird dagegen ein Zwei- oder Mehrklang einem nichtlinear verzerrten System aufgeprägt, so entstehen sogenannte Kombinationstöne, die bezüglich der Solltöne unharmonisch liegen, da ihre Frequenzen ganzzahlige Vielfache der Differenzen und Summen der Primärtöne sind. Je nach der Lage des Störtönes zum Primärtönen können 3 Fälle unterschieden werden:

1. Liegt der Störton tiefer als der tiefste Primärtön, so wird er durch keinen Primärtön verdeckt und ist schon bei kleiner Lautstärke hörbar.

2. Der Störton liegt wesentlich höher als der tiefste Primärtön und fällt nicht in die Nachbar-

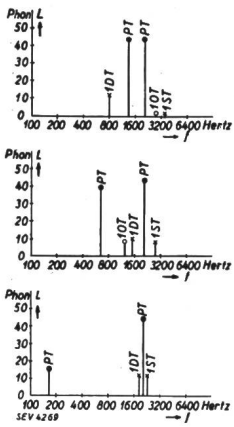


Fig. 5. Lautspektren eines nichtlinear verzerrten Zweiklanges.

schaft eines andern Primärtones. Tiefe Primärtöne verdecken schwache Störtöne, wenn diese höher liegen. In diesem Falle werden deshalb die Störtöne im allgemeinen nicht wahrgenommen.

3. Der Störton fällt in die unmittelbare Nachbarschaft eines Primärtones. Mit diesem Primärton erzeugt er Schwebungen, die, wenn sie genügend rasch erfolgen, als Heiserkeit anzuhören sind. Massgebend für die Störimpfindung ist somit der absolute Betrag der Differenz zwischen der Frequenz des Primärtones und des Störtones.

In Fig. 5 sind die Summen-, Differenz- und Störtöne für drei charakteristische Zweiklänge aufgetragen.

Bei der Definition der Lautstärke ist zu unterscheiden zwischen Reiz und Empfindung. Für den Reiz sind die physikalischen Grössen des Schallfeldes, also die Druck- bzw. Geschwindigkeitschwankungen massgebend. Die Empfindung ist dagegen ein Mass für den subjektiven Eindruck. Untersucht man die Veränderung der Empfindung in Abhängigkeit vom Reize, so stösst man auf das Weber-Fechnersche Gesetz, das besagt, dass die Änderung der subjektiven Lautstärke proportional ist der Veränderung des Reizes und umgekehrt proportional dem Reize selbst, d. h.

$$dL = a \frac{dp}{p}$$

$$L = a \lg \frac{p}{p_0}$$

p_0 stellt die Reizschwelle dar; a kann man für eine bestimmte Frequenz willkürlich festlegen. Der Phonskala liegt die Frequenz 1000 zugrunde, wobei $a = 20 \cdot 2,3$ gesetzt wird. Es ist dann

$$L_{1000} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \tag{7}$$

Die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres ist frequenzabhängig. Die Kurven gleicher subjektiver Lautstärke, die von Kingsbury stammen, sind in Fig. 6 dargestellt.

Wegen Gl. (7) kommt es bei der Wiedergabe von Sprache und Musik durch den Lautsprecher auf die absolute Schallstärke an. Ist diese bei der Wiedergabe viel grösser als bei der Aufnahme, so

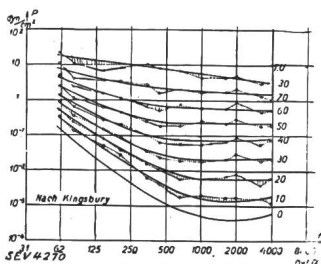


Fig. 6. Kurven gleicher Lautstärke nach Kingsbury.

kann eine wesentliche Klangänderung eintreten, denn die subjektiven Lautstärkeproportionen bleiben wegen dem logarithmischen Zusammenhang mit dem Schalldruck nicht erhalten. Schwache Teiltöne werden dann relativ übertrieben stark

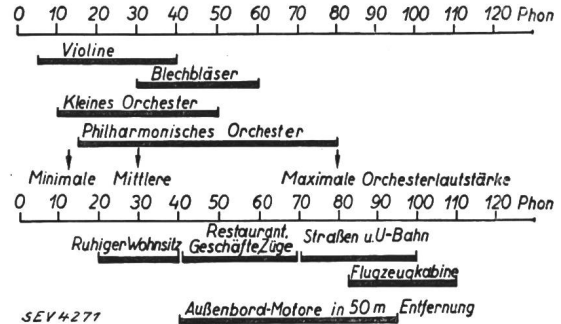


Fig. 7. Musik- und Geräusch-Lautstärken.

empfunden. Diese Erscheinung ist häufig in Tonfilmtheatern zu beobachten, wo infolge der übertrieben lauten Wiedergabe die Sprache einen unnatürlich dumpfen Charakter erhält.

Interessant ist der Vergleich der Lautstärken verschiedener Schallquellen (Fig. 7).

Elektrische Filter.

Aus dem Frequenzband der Sprache und Musik z. B. kann, wie schon ausgeführt wurde, ein Kanal herausgeschnitten werden, der in der Kanaltele-

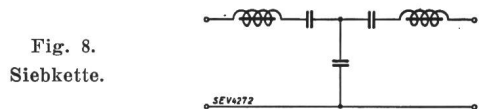


Fig. 8. Siebkette.

graphie zur Uebermittlung von Telegrammen Verwendung findet. Hierzu benützt man die sogenannten elektrischen Siebketten, die im vorliegenden Falle verhältnismässig einfach gebaut sein können. In Fig. 8 ist ein Schwingkreis, der als Filter wirkt, dargestellt. Mehrere derartige Glieder aneinandergereiht ergeben die Kette.

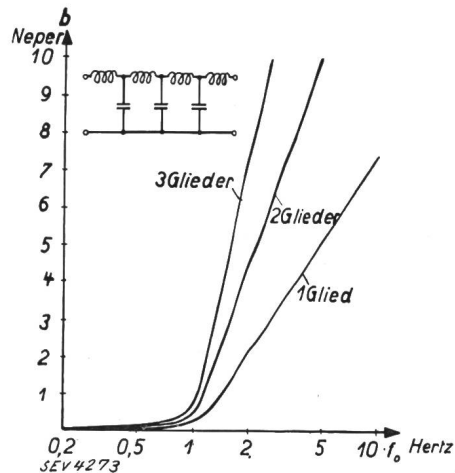


Fig. 9. Spulenkette und ihre Dämpfungseigenschaft.

In Fig. 9 ist die Betriebsdämpfung eines Siebes in Funktion der Frequenz aufgetragen. Die Dämpfung wird meist in Nepern angegeben. Darunter versteht man den natürlichen Logarithmus des Verhältnisses der Spannung bzw. des Stromes am Eingang zur Spannung bzw. zum Strom am Ausgang des Siebes, oder, was meist gleichbedeutend ist, das Verhältnis der Quadratwurzeln der Scheinleistungen am Ein- und Ausgang des Siebes. Die Dämpf-

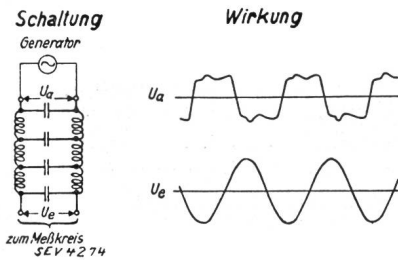


Fig. 10.
Wirkung der
Spulenleitung.

fung 1 Neper besagt demnach, dass Spannung und Strom am Eingang 2,7 mal grösser sind als Spannung bzw. Strom am Ausgang. Die Steilheit des Dämpfungsanstieges nimmt zu mit steigender Gliederzahl der Kette. Fig. 10 zeigt eine Spulenleitung. Sie lässt Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz, die vom Produkt von Induktivität und Kapazität eines Gliedes abhängt, passieren und glättet deshalb einen Wechselstrom mit überlagerten Oberwellen.

Bekanntlich setzt sich eine plötzlich einsetzende und wieder aussetzende Sinuswelle aus einem Spektrum unendlich vieler Einzelfrequenzen zusammen, deren Ueberlagerung erst den Verlauf des unterbrochenen Wellenzuges ergibt. Soll also ein unterbrochener Sinuswellenzug formgetreu übertragen werden, so müssen auch diese Teilschwingungen amplituden- und phasentreu passieren. Da durch

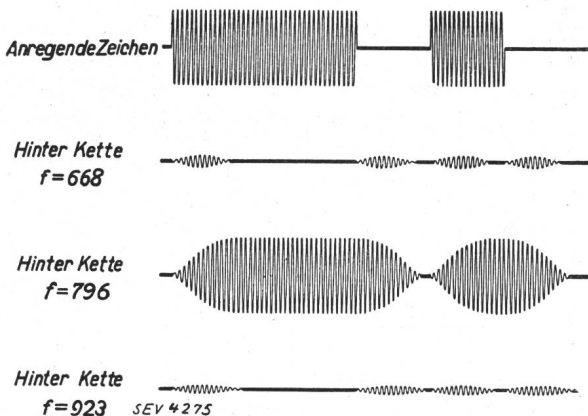


Fig. 11.
Anregung durch harte Zeichen.

ein Filter naturgemäss ein Teil dieser Schwingungen absorbiert wird, so ist der übertragene Wellenzug verzerrt.

Liegt die Grenzfrequenz eines Tiefpass-Filters unterhalb der Grundwelle, so überträgt das Sieb beim Ein- und Aussetzen des Wellenzuges die verbleibenden tieferen Frequenzen, welche für den

sogenannten Einschwingvorgang charakteristisch sind. Erhöht man die Grenzfrequenz über die Grundwelle, so wird im wesentlichen der gesamte Wellenzug übertragen und der Einschwingvorgang äussert sich in einer Abflachung der einzelnen Wellenzüge. Andererseits lässt ein Hochpass-Filter, dessen Grenzfrequenz über der Grundwelle liegt, nur die für den Ein- und Ausschwingvorgang charakteristischen höheren Frequenzen passieren (vgl. Fig. 11). Als Einschwingzeit bezeichnet man die Zeit, die verstreicht vom Augenblick, wo 10 % des Endwertes erreicht sind bis zum Augenblick, wo die Welle auf 90 % des Endwertes angestiegen ist. Bei der Kanaltelegraphie nimmt die Einschwingzeit mit abnehmender Lochbreite der Siebe zu. Mit steigender Einschwingzeit muss aber die Telegraphiergeschwindigkeit abnehmen, damit die Zeichen nicht verwischt werden. Aus diesem Grunde ist es nicht möglich, beliebig viele Telegramme bei vorgeschriebener Telegraphiergeschwindigkeit in einem Kanal unterzubringen. Die Anzahl der pro

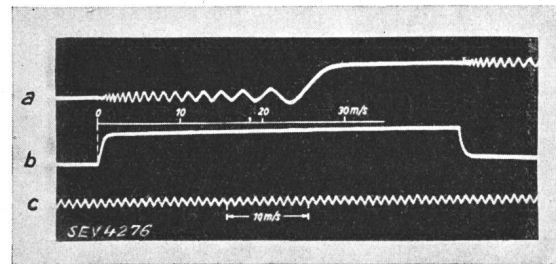


Fig. 12.
Gleichstromstoss über ein Phasenausgleichsglied.
a Hinter dem Glied.
b Vor dem Glied.
c Zeitkurve.

Zeiteinheit in einem oder mehreren Telegrammen durch den Kanal zu befördernden Zeichen hat ein bestimmtes Maximum.

Naturgemäss besteht auch jeder einzelne Stromstoss, wie er etwa beim Einschalten einer festen Spannungsquelle auftritt, aus unendlich vielen andauernden Sinusschwingungen. Ein solcher «Knaks» wird also durch jedes Filter verzerrt. Bei Phasenverzerrung beobachtet man die in Fig. 12 dargestellte Erscheinung, d. h. die Schwingungen höherer Frequenz treffen z. B. vor den niederfrequenten ein (Versuch).

Ersatzbilder für elektroakustische Uebertrager.

Neben den elektrischen Kreisen spielen bei der elektroakustischen Uebertragung natürlich auch die mechanischen Systeme (Membrane usw.) eine grosse Rolle. Es handelt sich dabei im wesentlichen um träge Massen, Federn und mechanische Widerstände, die entsprechend miteinander gekoppelt sind. Die rechnerische Erfassung eines ganzen Uebertragungssystems führt dann zu umfangreichen und unübersichtlichen Gleichungen je nach dem Aufbau aus den elektrischen und mechanischen Elementen. Aus diesen Gleichungen sind die

charakteristischen Eigenschaften des Systems nur schwer ersichtlich. Da aber andererseits das Verhalten rein elektrischer Kreise dem Elektroingenieur geläufig ist und meist schon leicht aus den Schaltbildern abgelesen werden kann, so empfiehlt es sich, die mechanischen Systeme durch gleichwertige elektrische zu ersetzen. Ohne auf Einzelheiten einzugehen, soll deshalb eine einfache Methode zur Aufstellung der elektrischen Ersatzbilder für mechanische Kreise angegeben werden, die im wesentlichen von W. Hähnle stammt¹⁾.

Als entsprechende mechanische und elektrische Größen stehen sich gegenüber:

- mechanische Kraft (p) — elektrischer Strom (i)
- Geschwindigkeit (v) — elektr. Spannung (u)
- Federkonstante (F) — elektr. Induktivität (L)
- träge Masse (M) — elektr. Kapazität (C)
- mech. Widerstand (W) — elektrische Leit-

$$\text{fähigkeit } (G = \frac{1}{R})$$

Es ist dann leicht festzustellen, dass sich die Gleichungen für entsprechende Größen an entsprechenden Elementen entsprechen. Zum Beispiel:

$$\text{Feder: } p = (1/F) s = 1/F \int v dt + p_0$$

$$\text{Induktivität: } i = 1/L \int e dt + i_0 \text{ usw.}$$

Wegen dieser weitgehenden Analogie seien auch als Symbole für die Elemente mechanischer Systeme die von der Elektrizitätslehre her gewohnten

entspricht dem einseitig geerdeten Kondensator usw. (Tabelle I.)

Bei einem elektrischen Netzwerk lassen sich die Strom- und Spannungswerte für beliebige Punkte aus den Gleichungen der Schaltelemente und den Kirchhoffschen Gesetzen eindeutig bestimmen. Die Kirchhoffschen Gesetze sind, wie leicht einzusehen ist, auch für die einzelnen Punkte und Maschen eines linear ausgedehnten mechanischen Netzwerkes erfüllt: die Summe sämtlicher Kräfte in einem Punkt ist = 0 (unter Berücksichtigung der d'Alembertschen Trägheitskräfte) und die Summe der Relativgeschwindigkeiten zwischen den Punkten eines mechanisch geschlossenen Maschenkreises ist auch = 0 (sonst müsste Bruch auftreten). Da für ein Netzwerk nur die Gleichungen der Ele-

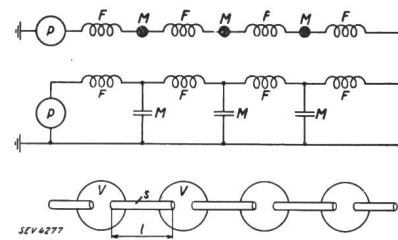


Fig. 13.

mente und die Kirchhoffschen Gesetze bestimmend sind, so kann also jedes linear ausgedehnte mechanische System mit vollkommener Analogie durch ein elektrisches Ersatzschema dargestellt werden, wobei z. B. der ideale elektrische Transformator einem mechanischen Hebel entspricht.

Tabelle I.

<p>Fall 1. Kraftquelle mit Masse.</p>		$p = M \frac{dv}{dt}$		$i = C \frac{du}{dt}$
<p>Fall 2. Kraftquelle mit mechan. Widerstand.</p>		$p = W v$		$i = \frac{1}{R} u$
<p>Fall 3. Kraftquelle mit Feder.</p>		$p = p_0 + \frac{1}{F} \int v dt$		$i = i_0 + \frac{1}{L} \int u dt$

Zeichen verwendet. Man stellt also z. B. eine mechanische «Geschwindigkeitsquelle» (wie sie etwa bei der bewegten Rille einer Schallplatte vorliegt) durch eine elektrische Spannungsquelle dar. Eine durch diese Geschwindigkeitsquelle bewegte Masse

Für ein mechanisches System von durch Federn gekoppelten Massen, das durch eine «Geschwindigkeitsquelle» p angeregt werde, erhält man beispielsweise als Ersatzbild das elektrische «Tiefpassfilter» Fig. 13. Ähnlich lässt sich auch ein Hochpassfilter konstruieren. Es ist auch leicht, mechanische

¹⁾ Wissenschaftl. Veröff. aus dem Siemens-Konzern 1931.

Schwingkreise von vorgeschriebenen Eigenschaften aus den entsprechenden elektrischen (deren Eigenschaften bekannt sind) abzuleiten.

Ein für akustische Zwecke geeignetes Tiefpassfilter lässt sich aus einer Reihe von Helmholtzschen Resonatoren mit Verbindungshälsen aufbauen. Jeder Resonator stellt ein Luftpolster, d. h. eine Feder dar, während die in den Verbindungshälsen rasch bewegte Luft die Masse verkörpert. Für die Federkonstante des Luftpolsters ist zu setzen:

$$F = \frac{V}{\rho c^2 S^2}$$

wobei V das Resonatorvolumen und S den Halsquerschnitt bezeichnet. Für die Masse der Luft in jedem Verbindungsrohr gilt:

$$M = S l \rho.$$

Die Grenzfrequenz einer elektrischen Spulenleitung genügt bekanntlich der Gleichung:

$$\frac{1}{4} C L \omega_0^2 = 1.$$

Das akustische Filter hat also eine Grenzfrequenz:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4}{M F}} = 2 c \sqrt{\frac{S}{l V}}.$$

Alle Töne höherer Frequenz werden absorbiert. Solche Filter können z. B. als Auspufftopf zur Verminderung der Auspuffgeräusche von Explosionsmotoren verwendet werden, wobei eine Abschwächung aller Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz auf etwa $\frac{1}{50}$ des ursprünglichen Amplitudenwertes zu erreichen ist.

Es soll nun gezeigt werden, wie die elektromechanischen Wandler in das elektrische Ersatzbild einbezogen werden, wobei nur der elektrodynamische Wandler, wie er bei jedem magnetischen Lautsprecher vorliegt, eingehender behandelt wird.

Für jedes Zweispulensystem gilt bekanntlich

$$p = i I \frac{d L_{12}}{d a}$$

wobei a die mechanische Verschiebung in Richtung von p bedeutet. I soll einen grossen und konstanten Strom bezeichnen (entsprechend der konstanten magnetischen Erregung des Lautsprechers). Nach dem Induktionsgesetz gilt aber auch:

$$u = I \frac{d L_{12}}{d a} \cdot \frac{d a}{d t} = I \frac{d L_{12}}{d a} \cdot v \text{ Volt}$$

Man betrachtet nun zweckmässig den elektromechanischen Wandler als Transformator mit dem Uebersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = I \frac{d L_{12}}{d a} = B \cdot l$$

wo B die magnetische Induktion der Erregung in der Schwingspule und l die Drahtlänge auf der Schwingspule bedeutet. Es ist also:

$$\begin{aligned} p &= \ddot{u} \cdot i \\ v &= l/\ddot{u} \cdot u \end{aligned}$$

\ddot{u} ist mit einer Dimension behaftet, entsprechend dem Dimensionsunterschied der elektrischen Impedanz \mathfrak{Z}_1 und der mechanischen «Impedanz» \mathfrak{Z}_2 :

$$[\ddot{u}] = \left[\frac{\text{Kraft}}{\text{Strom}} \right] = \left[\frac{\text{Spannung}}{\text{Geschwindigkeit}} \right] = \left[\frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{cm}} \right].$$

Nach Einführung des passenden Symbols können nun irgendwelche elektrodynamisch gekoppelte mechanische und elektrische Systeme durch

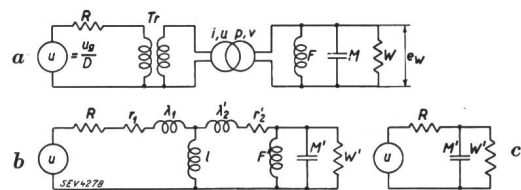


Fig. 14.

das Ersatzbild dargestellt werden. Ein Verstärkerrohr, das auf einen Lautsprecher arbeitet, entspricht z. B. dem Ersatzbild nach Fig. 14a. Dabei ist u die mit dem Röhrendurchgriff D auf die Anode bezogene Gitterwechselspannung, R der Röhrenwiderstand, und Tr bezeichnet den Ausgangstransformator. Durch das in der Elektrotechnik allgemein übliche Symbol ist der Wandler bezeichnet, der gemäss obigem die elektrischen Grössen i, u mit den mechanischen Grössen p, v koppelt. F symbolisiert die elastische Bindung der Membran an die Ruhelage, M deren Masse und W den akustischen Strahlungswiderstand. Die Transformatoren entfernt man aus dem Schaltbild durch Einführung der Steinmetzschen Ersatzbilder und Reduktion aller Grössen auf den Primärkreis, gemäss Fig. 14b, was durch den Strich (W') gekennzeichnet sei.

Für einen guten Lautsprecher fordert man, dass die Leistung in W' , d. h. die abgestrahlte Schallleistung nach Gleichung (4) frequenzunabhängig proportional sei u^2 , d. h. proportional der Gitterspannung am Ausgangsrohr. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Strahlungswiderstand W gewöhnlich mit dem Quadrat der wachsenden Frequenz abnimmt.

Ist die Transformatorkopplung sehr fest (grosses l , kleines λ) und die Impedanz des Ersatzkondensators M' gegenüber dem Strahlungswiderstand W' und der Ersatzinduktivität F' bei den vorkommenden Frequenzen sehr klein (geringe elastische Rückführung der Membran bei grosser Membranzmasse), so dürfen im Schaltbild alle Glieder gegenüber dem Kondensator M und dem Röhrenwiderstand R vernachlässigt werden. Ist ferner R gross gegenüber der Kapazität von M' , so wird

die Wechselfspannung am Strahlungswiderstand (vergleiche Fig. 14c):

$$e'_w = \frac{u}{R} \cdot \frac{1}{\omega M'}$$

Für den Strahlungswiderstand einer Kolbenmembran gilt angenähert

$$W = \frac{2c}{\pi \rho r_0^4 \omega^2} = \frac{k_1}{\omega^2}$$

so dass die abgestrahlte Leistung

$$N'_B = \frac{l_w'^2}{W'} = \frac{u^2}{R^2} \left(\frac{1}{\omega M'} \right)^2 \omega^2 = K u^2.$$

Diese Verhältnisse sind beim sogenannten Blatthaller realisiert, allerdings auf Kosten eines guten Wirkungsgrades, denn die Verlustleistung in R muss gross gegenüber der Scheinleistung in M und diese wieder gross gegenüber der abgestrahlten Nutzleistung in W sein. Bei einem guten Frequenzgang kann ein Wirkungsgrad von ca. 2% nicht überschritten werden.

Bedeutend günstiger sind die Verhältnisse beim richtig dimensionierten Konuslautsprecher. Auch hier sei die elastische Bindung an die Ruhelage sehr schwach, also F sehr gross, ferner aber auch die Membranmasse sehr klein, so dass als äussere Belastung der Röhre nur der Strahlungswiderstand in Frage kommt.

Der Konuslautsprecher ist also frequenzunabhängig, wenn die Membranfläche indirekt proportional der Frequenz ist:

$$r^2 \pi = \frac{k}{\omega^2}$$

$$W = \frac{2c\pi}{k_1^2} = K_1.$$

Diese Verhältnisse sucht man praktisch dadurch zu erreichen, dass man die Konusmembran nicht ganz starr gestaltet. Sie ist hinsichtlich ihres mechanischen Verhaltens mit einem langen elektrischen Kabel entsprechend der elektrischen Spulenleitung zu vergleichen. Das Zentrum des Konus entspricht dem Kabeleingang. Bei tiefen Tönen schwingt die ganze Membrane (grosser Radius), bei hohen Tönen aber nur die mittleren Partien, während die äusseren Teile durch die Trägheitskräfte zurückgehalten werden (kleiner Radius r). Wichtig ist dabei die richtige Wahl des Konus-Oeffnungswinkels. Auf diese Weise ist es in letzter Zeit gelungen, ganz beträchtliche Wirkungsgrade bei gutem Frequenzgang zu erreichen (ca. 10 bis 20 %).

Natürlich lassen sich auch für andere elektrodynamische Uebertrager, z. B. den pic up, entsprechende Ersatzschaltbilder aufstellen. Bei elektrostatischen Wandlern (Kondensatormikrophon) ist zwecks Erfüllung der Kirchhoffschen Gesetze im

Ersatzbild eine sogenannte reziproke Umformung des elektrischen oder des mechanischen Teiles erforderlich.

Es sei erwähnt, dass sich die Betrachtungsweise von mechanischen Problemen mit elektrischen Ersatzbildern auch in anderen Gebieten bewährt und in der Behandlung von schwierigen mechanischen und elektromechanischen Schwingungsproblemen wertvolle Dienste leistet, so z. B. bei der Untersuchung von Torsionsschwingungen raschlaufender Wellen mit verteilten Massen oder bei Pendelungen von Synchronmaschinen.

Elektroakustische Uebertrager.

Von grosser Bedeutung bei der elektroakustischen Uebertragung ist die Membran, die als starres Ganzes oder als leicht flexible gespannte Folie schwingt. Aehnlich wie bei schwingenden Saiten hat eine gespannte Membran bestimmte Eigenwellen, welche durch Knotenstrahlen und -ringe gekennzeichnet sind. Die Resonanzlagen äussern sich in unerwünschten Spitzen der Frequenzkurve (Fig. 15). Da zudem die abgestrahlte Leistung naturgemäss stark abnimmt, wenn sich einzelne Membranpartien gegeneinander bewegen, so strebt man den Fall an, wo im praktischen Frequenzbereich die ganze Membran als Ganzes schwingt, d. h. man stimmt sie entweder genügend hoch ab oder man sorgt für einen zweckmässigen, über die ganze Fläche verteilten Antrieb (Blatthaller), wodurch die Anregung in höheren Eigenfrequenzen und die Ausbildung von Schwingungsknoten vermieden wird.

Beim heute oft verwendeten, *stark geöffneten Konus* schwingen bei hohen Frequenzen nur die zentralen Partien: Die Membran verhält sich im elektrischen Ersatzbild ähnlich wie eine Spulenleitung mit einer oberen Grenzfrequenz, d. h. grosse Höhen fehlen in der Wiedergabe.

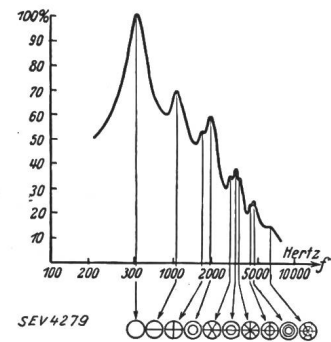


Fig. 15.
Resonanzen einer Membran.

Eine andere Möglichkeit, guten Wirkungsgrad bei gutem, ausgeglichenem Frequenzgang zu erzielen, bietet die Anwendung von *Trichtern*. Theoretisch am besten ist der sogenannte Exponentialtrichter, bei dem der Querschnitt exponentiell mit der Länge zunimmt. Der Exponentialtrichter besitzt eine ausgesprochene untere Grenzfrequenz, d. h. er verhält sich wie eine Kondensatorleitung. Die Grenzfrequenz sinkt indirekt mit steigender Trichtertlänge und liegt bei etwa 7 m Länge bei ca. 80 Hertz. Man wickelt den Trichter zweckmässig auf, um Platz zu sparen. Trotzdem stellt sich der Preis eines 7 m-Trichters ausserordentlich hoch, so dass den rein technischen Vorteilen wirtschaftliche

Mängel gegenüberstehen. Ein etwa 1 m bis 2 m langer Trichter-Lautsprecher lässt sich dagegen noch praktisch gut und ohne sehr grossen Aufwand herstellen. Seine Grenzfrequenz liegt dann in der Gegend von einigen 100 Hertz. Der Gedanke, einen stark geöffneten Konus-Lautsprecher durch einen Trichter-Lautsprecher zu ergänzen, liegt nun ausserordentlich nahe. Der Konus-Lautsprecher mit einer oberen Grenzfrequenz gibt dann die tiefen Frequenzen wieder, während der Trichter für die Wiedergabe der hohen Frequenzen bestimmt ist. Eine kleine elektrische Weiche sorgt für die richtige Verteilung des Frequenzgemisches.

Sehr wichtig ist das Verhalten der Lautsprecher bezüglich der Schallstrahlung in verschiedenen Richtungen. Hohe Töne werden im wesentlichen gerichtet abgestrahlt. Ihre Ausbreitung ist ähnlich der des Lichtes. Die tiefen Frequenzen dagegen breiten sich nach allen Richtungen aus. Mass-

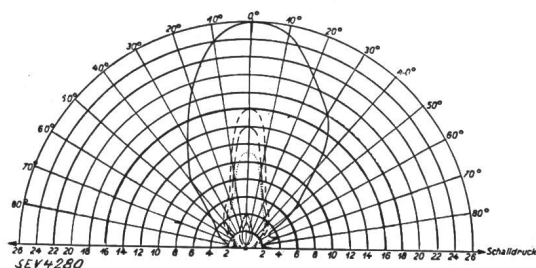


Fig. 16.
Polardiagramm eines Trichterlautsprechers mit geradem Trichter.

gebend ist dabei das Verhältnis der Schallwellenlänge zum Membrandurchmesser. Die Orte gleichen Schalldruckes können in einem Polardiagramm aufgetragen werden (vergleiche Fig. 16). Die kurzen Schallwellen werden verhältnismässig stark absorbiert. Diese Tatsache ist aber für die Qualität des Schallstrahlers ohne Bedeutung; denn bei jeder natürlichen Schallwelle, beim Sprechen oder bei Musikinstrumenten erfolgt die Absorption nach den gleichen Gesetzen.

Unter den Mikrofonen sind zwei Systeme für qualitativ guten Schallempfang bekannt. Das Kon-

densatormikrophon arbeitet auf elektrostatischer Grundlage. Eine leichte, hoch abgestimmte Membran wird durch den Schall bewegt. Die Kapazitätsänderungen gegenüber einer festen Platte werden zur Erzeugung des Wechselstromes benützt. Eine andere Art von Mikrofonen, die bis zu hoher Qualität entwickelt sind, beruht auf elektrodynamischer Grundlage. Der elektrische Strom wird in gleicher Weise erzeugt wie in jedem Kraftwerk. Auf einen hohen Stand entwickelt ist das *Moving-coil-Mikrophon* der Western Electric Co. Bei Siemens & Halske wurde das *Bändchen-Mikrophon* durchgebildet. Ein sehr dünnes Bändchen aus Magnalium liegt zwischen den Polen eines starken permanenten Magnetes. Durch die Schalldruckänderungen wird das Bändchen bewegt und erzeugt dabei eine Wechselspannung. Es ist niederohmig und wird über einen Transformator, der zweckmässig in dem vom Magnet umgebenen Hohlraum angebracht ist, am Verstärker angeschlossen. Durch besondere Ausbildung der Luftpolster, die das Bändchen umgeben, wird ein praktisch geradliniger Frequenzgang erreicht. Auch das *Kohle-Mikrophon* wurde bis zu einer gewissen Vollkommenheit entwickelt. Dessen Nachteile bestehen in einer Reizschwelle einerseits und im verhältnismässig grossen Störpegel andererseits. Das Kohle-Mikrophon neigt bei hoher Verstärkung zum Rauschen.

Für Sonderzwecke verwendet man Mikrophone mit Hohlspiegel, z. B. wenn es sich darum handelt, eine bestimmte Schallquelle auf das Mikrofon abzubilden. So ist es möglich, aus einem Volksgemurmel einen bestimmten Sprecher herauszuholen, oder eine bestimmte Schallquelle, z. B. ein Flugzeug anzupeilen (Versuch).

Die Schallwellen können auch an nichtstarrten Diskontinuitätsflächen reflektiert werden (Versuch mit Flammwand). Ferner werden sie durch nicht-homogene Schallträger gebrochen. Es ist also möglich, durch Erwärmung bestimmter Luftpartien eine akustische Linse zu erzeugen. Die warme Luftsäule über einem Gasbrenner wirkt beispielsweise wie eine zerstreue Zylinderlinse.

(Fortsetzung folgt.)

Technische Mitteilungen. — Communications de nature technique.

Verbesserungen im Bau der Zellen für die Wasserelektrolyse. Die Knowles-Zelle.

661.931

Die Herstellung von gasförmigem Wasserstoff und Sauerstoff durch die Elektrolyse des Wassers kann mit der chemischen Herstellung dieser Gase nur konkurrieren, wenn billige elektrische Energie zur Verfügung steht. Der Wasserelektrolyseur muss also genügend anpassungsfähig sein, um mit der anfallenden billigen Ueberschussenergie eines Elektrizitätswerkes arbeiten zu können. Ferner bestehen folgende wichtige Forderungen: Grosse Reinheit der erzeugten Gase, geringer Energieverbrauch pro m³ Wasserstoff, lange Lebensdauer, kleine Reparaturkosten und absolute Betriebs- und Explosionssicherheit.

Die zur Herstellung von 1 m³ Wasserstoff und von 0,5 m³ Sauerstoff nötige elektrische Energie ist keine Konstante;

sie ist proportional der an die Elektroden einer Zelle gelegten Spannung und beträgt

$$W = 2,39 U$$

wo W die nötige «spezifische» Energie in kWh für die Herstellung von 1 m³ H und 0,5 m³ O und

U die Spannung zwischen den Elektroden in Volt bedeutet.

U kann als Summe von 4 Gliedern geschrieben werden:

$$U = E_0 + E_A + E_K + R \cdot I$$

E_0 ist die theoretisch für die als reversibel betrachtete Elektrolyse nötige Minimalspannung,

E_A ist der Anodenspannungsabfall,

E_K der Kathodenspannungsabfall,

R der innere Widerstand der Zelle,

I der durch die Zelle fliessende Strom.