

Jens T. Broch

# On The Description And Measurement Of Sound Signals Part II

## Über die Beschreibung und Messung von Schallsignalen Teil II

### Summary of part I and II

Following a brief notice of the frequency and dynamic range of audible signals, mathematical methods of characterizing such signals are outlined. Some weight is given to the statistical method of amplitude description because of the statistical nature of most sounds in daily life. Various methods of magnitude measurement and frequency analysis are outlined and the influence of the instrument's phase response briefly discussed. Variation in recorded signal level due to the finite averaging time of the measuring and recording equipment is illustrated. Finally some typical frequency and amplitude distributions of commonly encountered sound signals are given.

### Zusammenfassung von Teil I und II

Nach einem kurzen Hinweis auf den Frequenz- und Dynamikbereich hörbarer Schallsignale folgt ein Abriss über die mathematische Methode zur Charakterisierung solcher Signale. Die statistische Methode der Amplitudenbeschreibung wird insbesondere an Schallvorgängen des täglichen Lebens dargelegt. Verschiedene Methoden der Intensitätsmessung und Frequenzanalyse sind beschrieben und der Einfluß der Phasenwiedergabe des Instrumentes ist kurz diskutiert. Die Abweichungen beim Aufzeichnen des Schallpegels, hervorgerufen durch eine endliche Einstellzeit der Meß- und Aufzeichnungsgeräte, werden beschrieben. Schließlich sind noch einige typische Frequenz- und Amplitudenverteilungen von allgemein auftretenden Schallsignalen angegeben.

### Résumé du part I et II

Après un rappel des gammes de fréquence et dynamiques couvertes par les signaux audibles, les méthodes de définition mathématique de ces signaux sont décrites. Les caractéristiques statistiques dues à l'aspect aléatoire des sons naturels sont examinées plus spécialement. Les diverses méthodes de mesure d'intensité et d'analyse des sons sont passées en revue, et l'influence du déphasage apporté par les instruments est discutée brièvement. L'influence du temps d'intégration des instruments à aiguille ou enregistreurs sur le résultat des mesures est également illustrée. Enfin, quelques exemples typiques de distributions fréquentielles et statistiques de sons ordinaires sont donnés.

**II** In the foregoing the features required from r.m.s. measuring circuits have been briefly discussed. These circuits are, as described, typically non-linear. Average absolute and peak measuring circuits belong to a category often called linear rectifiers, because the

Bis hierhin wurden die Anforderungen an Effektivwertmeßschaltungen kurz behandelt. Diese Schaltungen sind alle — wie beschrieben — typisch nicht-linear aufgebaut. Meßschaltungen für Mittel- und Spitzenwerte gehören jedoch zur Gruppe der sogenannten

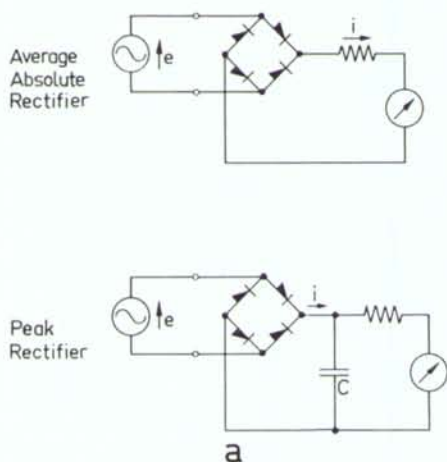


Fig. 6 Basic circuit diagrams (a) and principle of operation (b) of average absolute and peak value detectors.

relationship between the voltage and current in these rectifiers is supposed to be linear, see Fig. 6. There are, however, a few things which might be worth while pointing out in connection with the use of average and peak detectors.

In the r.m.s.-detector a squaring and integrating process takes place which cancels the effects of phase-shifts. If a signal, like music, speech or noise, which consists of a complex combination of a number of separate »sinusoidal« components is passed through amplifying and/or transducing devices with certain restrictions in frequency response, normally a phase shift of the various components relative to each other also takes place. This can be understood by looking at the gain vs. frequency and phase-shift vs. frequency characteristics plotted in Fig. 7. The result of a phase shift is a change in waveform of the signal even though it contains the same amount of energy and the same number of frequency components as long as the gain vs. frequency characteristic is on the 0 db line (linear).

As an example of waveform distortion due to amplifier phase shift, the output signal from an amplifier with a response corresponding

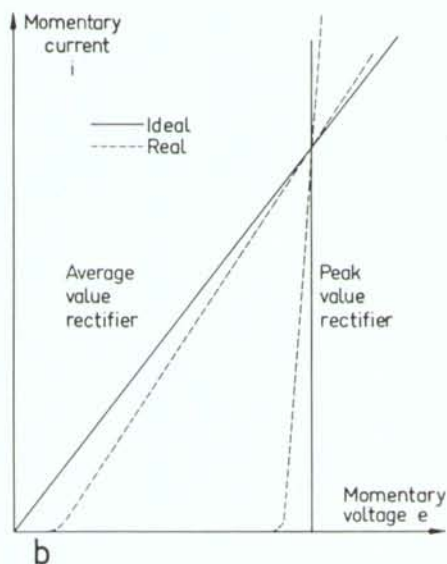


Abb. 6 Grundsaltung (a) und Prinzip der Arbeitsweise (b) eines arithmetischen Mittelwert- und eines Spitzenwertanzeigers

linearen Gleichrichter, weil das Verhältnis zwischen der Spannung und dem Strom in diesen Gleichrichtern linear sein soll, s. Abb. 6. Es gibt jedoch einige Punkte, auf die man in Zusammenhang mit der Verwendung von Mittel- und Spitzenwertanzeigern hinweisen sollte:

In dem Effektivwertanzeiger wird quadriert und integriert, wobei sich Phasenverzerrungen nicht auswirken. Wenn ein Signal wie Musik, Sprache oder Geräusch, das aus einer komplexen Kombination vieler einzelner »sinusförmigen« Komponenten besteht, durch einen Verstärker oder/und ein Übertragungssystem mit bestimmten Abweichungen in der Frequenzwiedergabe geschickt wird, treten normalerweise auch Phasenverschiebungen bei den einzelnen Komponenten relativ zueinander auf. Das ersieht man aus der Übertragungskurve und der entsprechenden Kurve der Phase als Funktion der Frequenz, dargestellt in Abb. 7. Eine Phasenverzerrung ruft eine Änderung der Wellenform des Signals hervor, wenn auch der Betrag der Energie der gleiche bleibt und die Anzahl der Frequenzkomponenten nicht verändert wird, solange die Übertragungscharakteristik mit der 0 db-Linie identisch ist (linear).

Als Beispiel für die Änderung der Wellenform, bedingt durch die Phasenverzerrungen im Verstärker, ist in Abb. 8 das Ausgangs-

to the curves shown in Fig. 7 is given in Fig. 8. The input signal to the amplifier was in all cases a square wave and it is clearly noticed how the output signal changes due to the phase shift. The average absolute value measured at the output of the amplifier will not deviate too much from the true value even though the waveshape is considerably changed. However, the peak value is greatly influenced

signal dieses Verstärkers gezeigt, dessen Wiedergabekurve mit der in Abb. 7 übereinstimmt. Das Eingangssignal am Verstärker war in allen Fällen eine rechteckige Welle, und man kann klar erkennen, wie sich das Ausgangssignal bei Phasenverzerrungen ändert. Der Mittelwert, gemessen am Ausgang des Verstärkers, weicht vom tatsächlichen Wert nicht weit ab, obwohl sich die Wellenform ziemlich

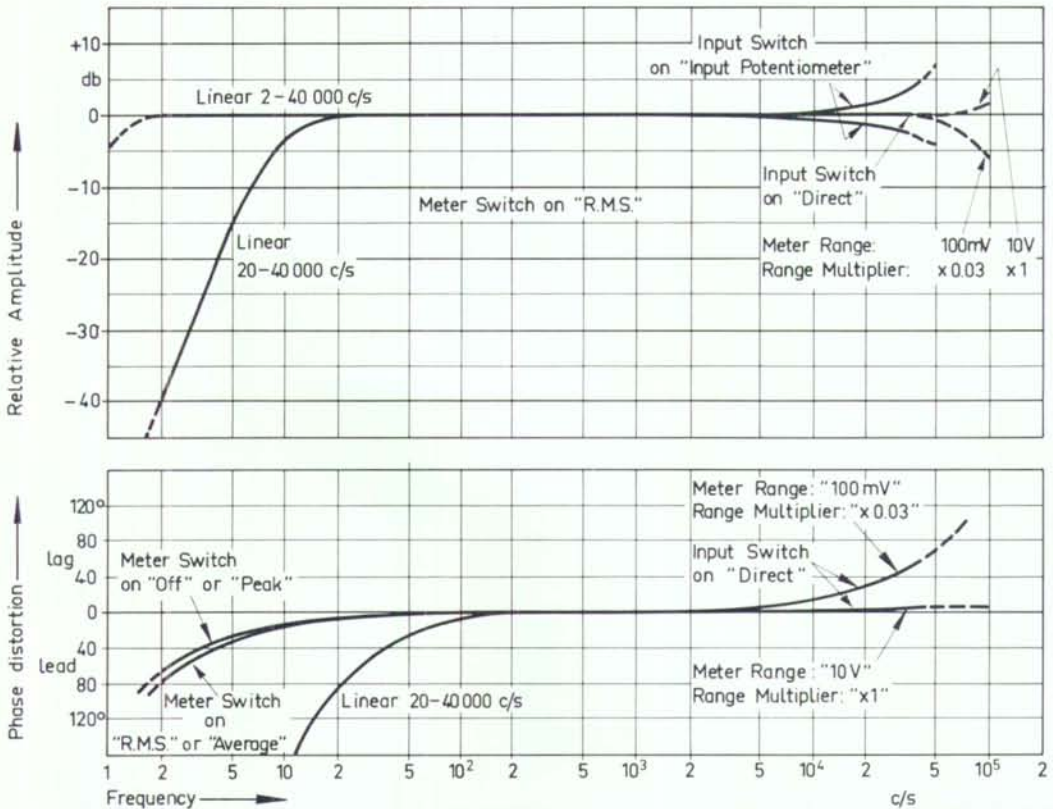


Fig. 7 Typical phase response of a high quality measuring amplifier (Brüel & Kjør).

Abb. 7 Typische Wiedergabekurven und Phasengang eines Meßverstärkers (Brüel & Kjør)



Fig. 8 Typical wave form distortion of a symmetrical square-wave treated in the amplifier (Frequency response 2 c/s—40 kc/s).

Abb. 8 Typische Verzerrung der Wellenform eines Rechtecksignals nach Durchlauf durch einen Verstärker (Frequenzwiedergabe von 2 Hz bis 40 kHz), für Signale von

- a) A 2 c/s signal.
- b) A 50 c/s signal.
- c) A 1000 c/s signal.
- d) A 40 kc/s signal.

- a) 2 Hz
- b) 50 Hz
- c) 1000 Hz
- d) 40 kHz

by phase shifts and deviations of as much as + 6 db (twice the current value) may be obtained.

It has been mentioned previously that the »simplest« type of signal is the sinusoid, but that most sounds occurring in practice have a much more complex waveshape than the sinusoid.

However, FOURIER has shown that any signal, no matter how complex, may be looked upon as combination of a number (eventually an infinite number) of sine waves. These *components* of the signal constitute the signal *spectrum*. In the case of a pure sine wave the spectrum consists of one single line only, Fig. 9 a. If the wave-shape is a little more complex but repeats itself periodically with time the spectrum consists of a number of discrete lines which are harmonically related to each other, Fig. 9 b. Finally, statistically distributed signals, such as random noise, and pulse type signals show continuous frequency spectra. Fig. 9 c.

Obviously much can be learnt about the nature of a sound signal if it is broken down into its constituent sine components, i.e. if it is frequency analysed.

To determine the frequency spectrum of a sound picked up by a microphone, electronic frequency analyzers are used. These may be

verändert. Der Spitzenwert ist jedoch wesentlich beeinflusst durch die Phasenverzerrungen und man erhält Abweichungen von + 6 dB (2 x Signalwert).

Im vorhergehenden wurde gesagt, daß die »einfachste« Art eines Signals die Sinuskurve ist, aber daß die am häufigsten vorkommenden Schallvorgänge einen viel komplizierteren Kurvenverlauf haben als die Sinuswelle.

FOURIER hat jedoch gezeigt, daß jedes Signal, ganz gleich wie kompliziert es ist, als eine Kombination einer Anzahl (gelegentlich eine unendlich große Zahl) von Sinuskurven angesehen werden kann. Diese Komponenten des Signals bilden das Signalspektrum. Im Falle einer reinen Sinuskurve besteht das Spektrum nur aus einer einzelnen Linie (Abb. 9 a). Wenn die Kurve etwas komplizierter ist, aber sich periodisch wiederholt, dann setzt sich das Spektrum aus einer Anzahl diskreter Linien zusammen, die in einer harmonischen Beziehung zueinander stehen (Abb. 9 b). Die statistisch verteilten Klänge endlich, wie Rauschen und pulsartige Signale, zeigen fortlaufende Frequenzspektren (Abb. 9 c).

Offensichtlich kann man eine ganze Menge über die Natur des Schallsignals erkennen, wenn es in seine einzelnen Sinuskomponenten zerlegt wird, d.h. wenn es nach Frequenz analysiert wird.

Um das Frequenzspektrum eines Schallvorganges, das vom Mikrophon aufgenommen wird, zu bestimmen, werden elektronische

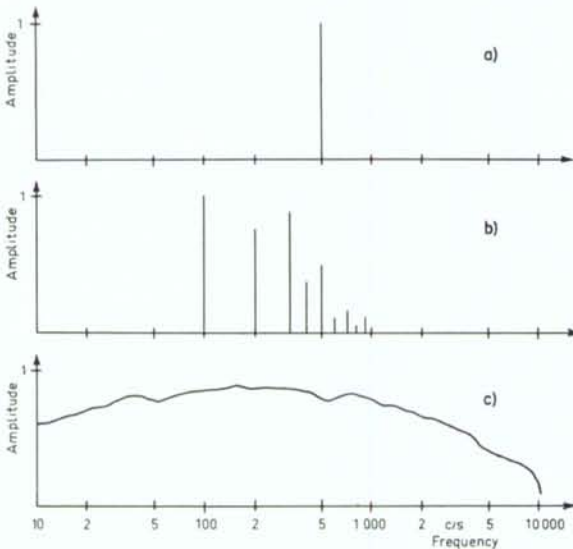


Fig. 9 Examples of signal frequency spectra:  
 a) The frequency spectrum of a pure sine wave.  
 b) Frequency spectrum of a complex but periodic sound wave.  
 c) Frequency spectrum of a complex non-periodic wave.

Abb. 9 Beispiele von Signalfrequenzspektren  
 a) Frequenzspektrum einer Sinuswelle  
 b) Frequenzspektrum einer komplexen, aber periodischen Schallwelle  
 c) Frequenzspektrum einer komplexen, nicht periodischen Schallwelle

designed according to various principles, but are usually of one of two basic types:

1. The constant bandwidth type analyzer, or
2. The constant percentage bandwidth type analyzer.

Both types of analyzers «split» the audio-frequency range (20—20 000 c/s) into narrow frequency bands. In the constant bandwidth type analyzer the width of the narrow band is the same, independent of where in the audio range the band is «taken out». In the constant percentage bandwidth type analyzer, on the other hand, the width of the narrow band will depend upon the frequency around which the band is centered (the frequency to which the analyzer is tuned). The constant percentage bandwidth type analyzer is the one most frequently used in sound measurements and Fig. 10 shows a photo of an audio frequency analyzer (spectrometer) which can be switched to analyse the audio spectrum in bands of  $\frac{1}{3}$  octave or  $\frac{1}{4}$  octave widths. The instrument shown in Fig. 10 has the advantage that it can be controlled from the mechanical drive of a level recorder so that the level of each band can be automatically recorded on a pre-printed chart of recording paper.

A recording of this kind is shown in Fig. 11; it was obtained by noise measurements in a

Frequenzanalysatoren benutzt. Diese sind nach verschiedenen Prinzipien gebaut, aber gewöhnlich werden zwei Grundtypen benutzt:

1. Analysator mit konstanter Bandbreite
2. Analysator mit konstanter prozentualer Bandbreite.

Beide Analysatoren zerlegen den Hörfrequenzbereich (20—20 000 Hz) in enge Frequenzbänder. Bei dem Analysator mit konstanter Bandbreite bleibt die Breite des Bandes die gleiche, unabhängig davon, an welcher Stelle innerhalb des Hörbereiches das Band «herausgenommen» wird. In dem Analysator mit konstanter prozentualer Bandbreite ist dagegen die Breite des schmalen Bandes abhängig von der Frequenz, die das Band einschließt (die Frequenz, auf die der Analysator eingestellt ist). Der Analysator mit konstanter prozentualer Bandbreite wird in der Akustik am häufigsten verwendet. Abb. 10 zeigt ein Bild eines Hörfrequenzspektrometers, das umgeschaltet werden kann, um das Spektrum in Bändern von  $\frac{1}{3}$  Oktave oder in Bändern von einer Oktave Breite zu analysieren. Dieses Instrument hat den Vorteil, daß es mit einem mechanischen Antrieb an einen Pegelschreiber gekoppelt werden kann, so daß der Pegel in jedem Frequenzband automatisch auf einem vorgedruckten Papierstreifen aufgezeichnet werden kann.

Eine automatische Aufzeichnung ist in Abb. 11 gezeigt. Sie wurde bei Geräuschmessungen in



Fig. 10 Photo of a modern sound spectrum analyzer (Brüel & Kjær Audio Frequency Spectrometer Type 2112).

Abb. 10 Foto eines modernen Schallanalysators

mechanical workshop. The recorded levels are here the r.m.s. value of  $1/3$  octave frequency bands.

Returning for a moment to the equations characterising the magnitude of sounds, it will be clear that the integration time  $T$  is very important. For many purposes it would be reasonable to choose for the instrumentation an integration time (averaging time) which is of the same order as that of the human ear. Just as a person can discern a rise and fall in sound levels, so can a record, taken as a function of time, indicate similar fluctuations. See Fig. 12. A perfectly steady record could be obtained using an infinite integrating time, but the amount of information contained in the record would then be reduced, quite apart from the fact that measurement would take an infinitely long time to perform!

Considering the above discussion it may be concluded that both the spectrum and the variation in level with time of the various spectrum components, play an important role in the physical characterization of sound. However, if the sound is not definitely of a distinctly transient nature, but rather of a steadier kind, it will normally suffice to perform a frequency analysis only, using a reasonable averaging time in the measuring circuit.

einer Maschinenfabrik gemacht. Die aufgezzeichneten Schallpegel sind hier Effektivwerte in  $1/3$  Oktavbändern.

Kehren wir einen Augenblick zu den Gleichungen zurück, die die Größe des Schallvorganges charakterisieren, so wird klar, daß die Integrationszeit  $T$  sehr wichtig ist. Für viele Zwecke wäre begründet, eine Integrationszeit zu wählen, die von gleicher Größenordnung wie die des menschlichen Ohres ist. Gerade so wie ein Mensch unterscheiden kann, ob ein Schallpegel steigt oder fällt, so kann ein entsprechendes Schreibgerät ähnliche Schwankungen als Funktion der Zeit anzeigen, vergleiche Abb. 12. Eine vollständige gleichmäßige Aufzeichnung könnte erhalten werden, wenn man über eine unendlich lange Zeit integriert. Aber der Betrag der Information, den diese Aufzeichnung enthält, würde herabgesetzt sein, ganz abgesehen von der Tatsache, daß diese Messungen in einer unendlich langen Zeit durchgeführt werden müssen. Betrachtet man die oben angestellten Diskussionen, so kann man daraus schließen, daß sowohl das Spektrum als auch die Änderung des Schallpegels der verschiedenen spektralen Kombinationen als Funktion der Zeit eine weitere Rolle in der physikalischen Charakterisierung des Schallvorganges spielt. Wenn der Schallvorgang nicht ein bestimmtes Übergangsstadium ist, sondern vielmehr andauernd, wird es normalerweise ausreichend sein, eine Frequenzanalyse allein durchzuführen, indem man eine hinreichende Integrationszeit in dem Meßkreis benutzt.

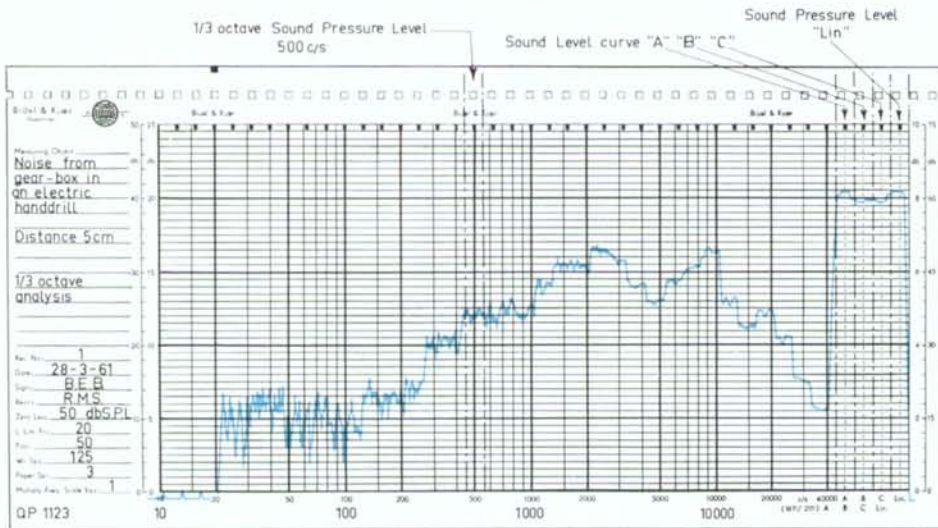


Fig. 11 Example of an automatically recorded sound spectrogram.

Abb. 11 Beispiel eines automatisch aufgeschriebenen Schallspektragramms

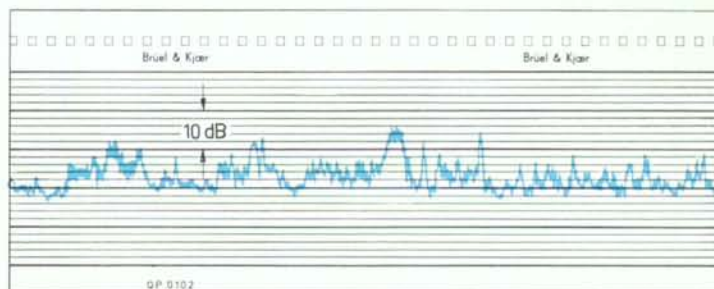


Fig. 12 Example of the variation in r.m.s. level of the sound in a quiet office as a function of time.

Abb. 12 Beispiel für die Änderung des Effektivwertpegels eines Schallvorganges in einem ruhigen Geschäftsraum als Funktion der Zeit

In Fig. 13 the spectra of a variety of sounds are depicted in the form of  $\frac{1}{3}$  octave spectrograms.

One of the reasons why the  $\frac{1}{3}$  octave frequency analysis is of great importance in sound measuring technique is its relationship to the critical bands (Frequenzgruppen) in the hearing mechanism of the ear. A number of investigations have shown that there is a distinct difference between how sounds of frequencies inside one critical band and sounds containing several critical bands are added together in the ear. It is, however, outside the scope of this article to discuss these phenomena in more detail and interested readers should consult the bibliography given at the end of the article.

The existence of the critical bands also, to a certain degree, accounts for what is known as «masking», i. e. if two different sounds are simultaneously presented to the ear (s) of a human being, one of the sounds may, under certain circumstances, «mask» the other so that it cannot be perceived by the hearing mechanism. This is often made use of in audiometry, where bone conduction in the skull can conduct sound to one ear while the other ear is being tested. If the «good» ear was not «masked» the patient might hear the test-tone via bone conduction and the net result of the test would be invalid.

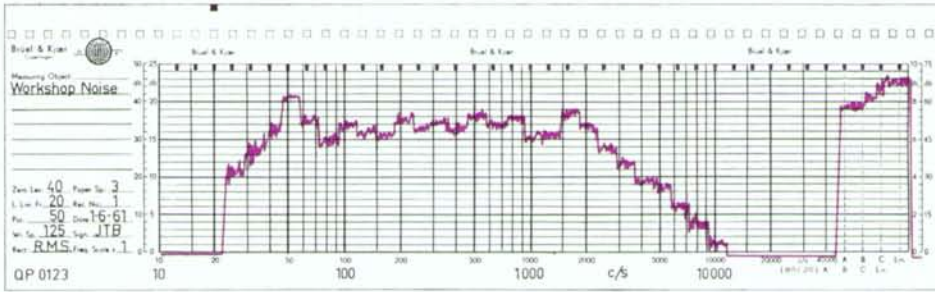
The «masking» sound normally consists of some sort of random noise. The spectrum of the noise could be «shaped» to follow the threshold of hearing, it could consist of a band of noise centered around the test-tone or it could have a «flat» frequency spectrum.

In Abb. 13 sind Spektren verschiedener Schallvorgänge herausgesucht, und zwar als  $\frac{1}{3}$  Oktavspektren.

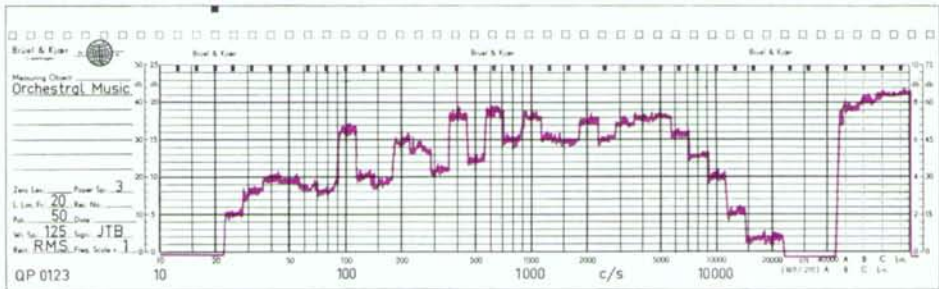
Einer der Gründe, warum der  $\frac{1}{3}$  Oktavfrequenzanalysator von großer Wichtigkeit bei der Schallmeßtechnik ist, liegt in der Verwandtschaft mit den kritischen Bändern (Frequenzgruppen) des Hörvermögens des menschlichen Ohres. Eine Anzahl von Untersuchungen haben gezeigt, daß eine bemerkenswerte Differenz für die Lautstärkebestimmung besteht, je nachdem ob der Schall innerhalb eines kritischen Bandes liegt oder ob der Schall mehrere kritische Breiten überdeckt. Es liegt außerhalb des Themas des Artikels, dieses Phänomen mehr detaillierter zu diskutieren, und die interessierten Leser werden auf die Literatur hingewiesen (s. Literaturverzeichnis).

Die Existenz von Frequenzgruppen erklärt auch zu einem gewissen Maße, was wir unter Vertäubung verstehen: Wenn zwei verschiedene Schallvorgänge gleichzeitig dem Ohr dargeboten werden, so kann unter gewissen Umständen der eine Schallvorgang den anderen verdecken, so daß er nicht mehr vom Hörorgan wahrgenommen werden kann. Hiervon wird auch in der Audiometrie Gebrauch gemacht, wo infolge Knochenleitung über den Schädel Schall dem einen Ohr zugeführt werden kann, während das andere Ohr gemessen werden soll. Wenn das «gute» Ohr nicht «vertäubt» ist, kann der Untersuchte den Prüftönen über Knochenleitung hören, und das wirkliche Resultat der Messung ist ungültig.

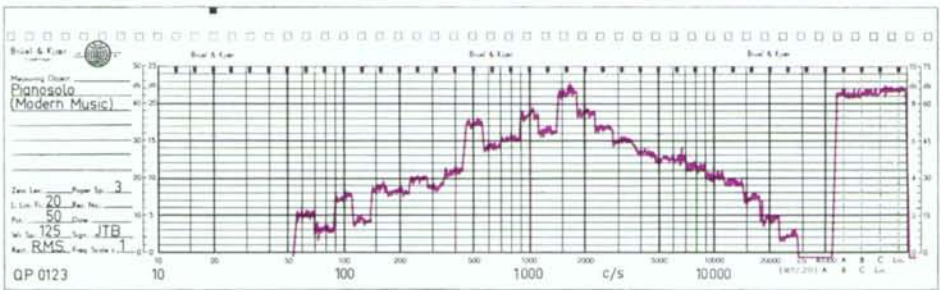
Der Vertäubungsschall besteht normalerweise aus Rauschen. Das Spektrum dieses Geräusches kann entsprechend der Hörschwelle gestaltet sein, es kann aus Bändern von Geräuschen bestehen, die um den Prüftönen herum liegen oder es kann auch ein «flaches» Spektrum sein. Das



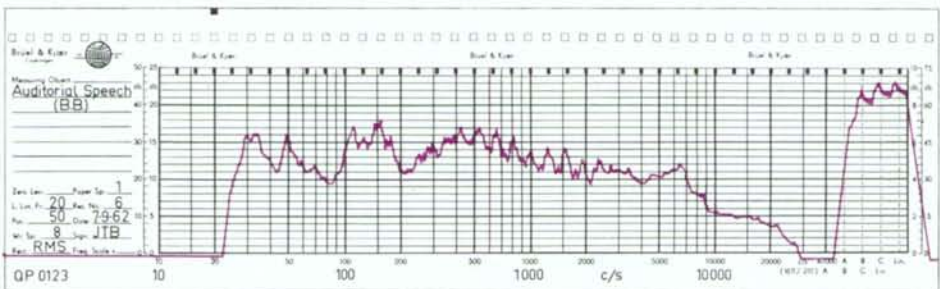
a



b



c



d

Fig. 13 Example of spectral distribution of various sounds:

- Workshop noise.
- Orchestral music (Vivaldi).
- Pianosolo ("Fats" Waller).
- Speech in a small auditorium.

Abb. 13 Beispiele für die spektrale Verteilung von verschiedenen Schallvorgängen

- Geräusch in einer Werkstatt
- Orchestermusik
- Klavier
- Sprache in einem kleinen Hörsaal

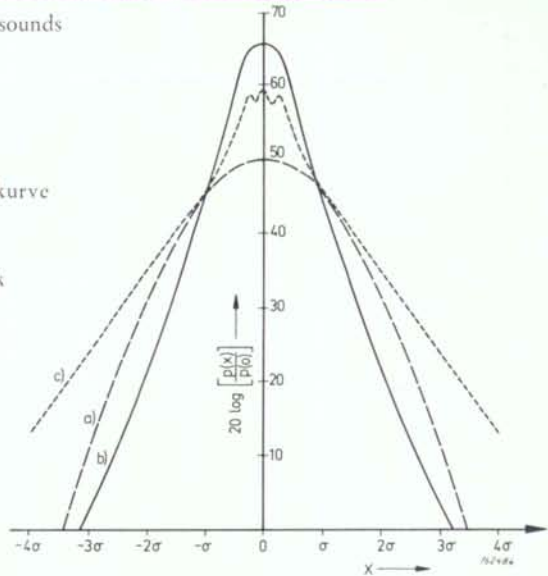


Fig. 14 Amplitude density curves of sounds commonly met with in daily life:

- a. Random Noise.
- b. Music played by an orchestra.
- c. Speech in an auditorium.

Abb. 14 Amplitudendichte-Verteilungskurve von Schallvorgängen

- a) Rauschen
- b) von einem Orchester gespielte Musik
- c) Sprache in einem Hörsaal



The «flat» spectrum may be the least convenient one to use because of the variation in sensitivity with frequency of the ear.

It has been attempted to explain here, as briefly as possible, some important factors involved in the characterization and measurement of sound waves. Considerable weight has been given to the description of statistically distributed signals because most sounds occurring in daily life show characteristics similar to these types of signal, Fig. 14, and it is expected that the statistical method of describing complex signals will become more and more important in the future.

«flache» Spektrum kann wegen der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Ohres am wenigsten günstig sein.

In dieser Arbeit wurde versucht, einige bemerkenswerte Faktoren zu erwähnen, die für die Charakterisierung und Messung von Schallwellen wesentlich sind. Besonderes Gewicht wurde auf die Beschreibung statistisch verteilter Signale gelegt, weil die meisten Schallvorgänge im täglichen Leben Charakteristiken zeigen, die ähnlich diesen Signaltypen sind (Abb. 14) und es wird erwartet, daß die statistischen Methoden der Beschreibung von komplexen Signalen mehr und mehr in Zukunft an Wichtigkeit gewinnen werden.

*Bibliography / Literaturverzeichnis*

L. L. Beranek, Acoustic Measurements. John Wiley & Sons, New York 1949  
 J. T. Broch, Automatic Recording of Amplitude Density Curves. B & K Technical Review No. 4-1959  
 J. T. Broch and C. G. Wahrmann, R. M. S. Recording of Narrow Band Noise with the Level Recorder Type 2305. B & K Technical Review No. 4-1960  
 J. T. Broch and C. G. Wahrmann, Effective Averaging Time of the Level Recorder Type 2305. B & K Technical Review No. 1-1961  
 J. T. Broch, The Application and Generation of Audio Frequency Random Noise. B & K Technical Review No. 2-1961  
 J. T. Broch, Loudness Evaluation. A Review of Current Methods. B & K Technical Review No. 2-1962

R. Feldtkeller and E. Zwicker, Das Ohr als Nachrichtenempfänger. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1956  
 H. Fletcher, Speech and Hearing in Communication. Nostrand, 1953. London, New York, Toronto  
 C. M. Harris, Handbook of Noise Control. Mc Graw-Hill 1957  
 W. Reichardt, Grundlagen der Elektroakustik. Akademische Verlagsges., Leipzig 1960  
 C. G. Wahrmann, A true R. M. S. Instrument. B & K Technical Review No. 3-1958  
 E. Zwicker, Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit. Acustica 8 (1958), Beiheft 1 p. 237  
 E. Zwicker, G. Flottorp and S. S. Stevens, The critical band width in loudness summation. J.S.S.A. 29 (1957) p. 548