



## Schallmessung (Versuch Nr.IV – Raum D 5)

### Aufgabe:

In einem „Reflexionsarmen Schallmeßraum“ wird der Frequenzgang, die Richtcharakteristik, die Schalleistung, der Schalleistungspegel und der Wirkungsgrad eines Lautsprechers bestimmt.

### Lernziele:

Verständnis des Aufbaus und der Anwendung eines Schallpegelmessers  
des Begriffs „Schalldruckpegel“, „Schalleistungspegel“,  
der physikalischen und physiologischen Schalleinheiten und der Bewertungskurven.

Der Lernende kann

das Terzpegeldiagramm einer Schallquelle bestimmen,  
die Schalleistung und den Schalleistungspegel einer Quelle messen,  
den A-,B-,C- und D - bewerteten Schalldruckpegel angeben.

## 1. Grundlagen:

Da die Umweltbelastung durch Lärm ständig zunimmt (die Lärmschwerhörigkeit steht an der Spitze aller Berufskrankheiten) und gleichzeitig die Beurteilung von Lärmsituationen nur durch Messung möglich ist, ist die Kenntnis der Schallmeßtechnik von großer Wichtigkeit.

### 1.1 Physikalische Schallgrößen:

Da das Ohr ein Schalldruckempfänger ist, ist der **Schalldruck** die wichtigste Schallgröße. Man versteht darunter den Effektivwert der kleinen Luftdruckschwankungen um den atmosphärischen Luftdruck  $p_{at} \sim 1 \text{ bar}$ .  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa}$ .

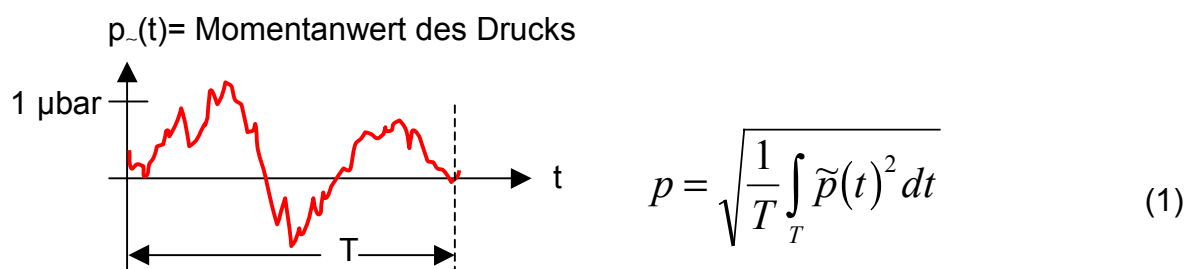


Abb.1 Oszillogramm eines Geräusches mit Mikrofon aufgenommen.

Größenordnung:  $p = 1 \mu\text{bar} = 0,1 \text{ Pa} =$  Verständigungslautstärke in 1 m Abstand beim Sprechen  $= 10^{-6} \cdot$  Luftdruck !  
 $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} =$  Druck an der Hörschwelle

Aufgrund des Weber-Fechner'schen Gesetzes (Empfindung  $\sim$  Logarithmus des physikalischen Reizes) und wegen des großen Druckintervalls von 6 Zehnerpotenzen im Hörbereich (Abb.2) führt man den **Schalldruckpegel  $L_p$**  ein mit der Definition:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} (\text{dB}) = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} (\text{dB}); \quad p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}; \quad (2)$$

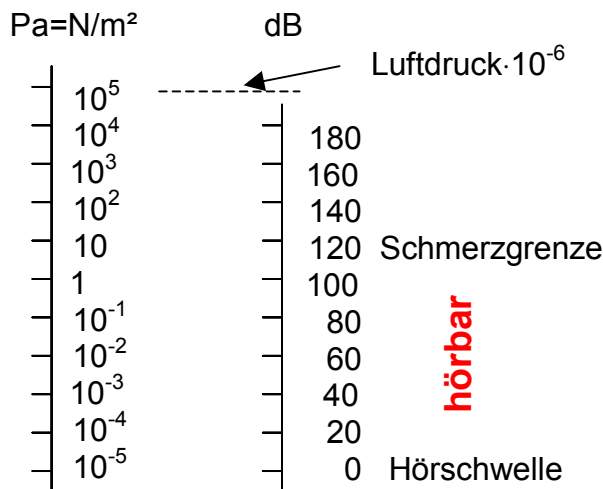


Abb.2  
 Der hörbare Schall umfaßt 6 Zehnerpotenzen und wird deshalb durch das logarithmische Maß Dezibel auf den Bereich 0 – 120 dB zusammengedrückt. Eine Pegelabsenkung um 10 dB empfindet man als Halbierung des Lautstärkeindrucks.

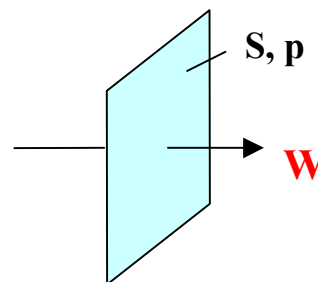
**Frage:** Welche effektiven Schalldrücke sind bei den Schalldruckpegeln 0, 100 und 74 dB vorhanden ?

Eine wichtige Größe zur Charakterisierung der Geräuschemission von Quellen bildet die **Schalleistung  $W$**  = Schallenergie, die in der Zeiteinheit durch die Fläche  $S$  strömt. Sie ist durch die Formel (3) gegeben.

$$W = \frac{\overline{p^2} \cdot S}{\rho \cdot c}; \quad (3)$$

$\overline{p^2}$  = mittleres auf der Meßfläche

$S$  herrschendes Schalldruckquadrat.



$c$  ist die Schallgeschwindigkeit,  $\rho$  ist die Dichte,  $\rho c = 408 \text{ Ns/m}^3$  für Luft bei Normalbedingungen. Größenordnung: menschliche Stimme  $10^{-6} - 10^{-3} \text{ [W]}$ .

**Frage:** Eine ebene Schallwelle dringt durch eine Fläche von  $2 \text{ m}^2$ , auf der ein Schalldruckpegel von 74 dB gemessen wird. Welche Schalleistung transportiert die Schallwelle.

Der **Schalleistungspegel**  $L_w$  ist definiert als

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0}; W_0 = 10^{-12} [W]; \quad (4)$$

$W_0$  = Bezugsleistung = Schalleistung durch 1 m<sup>2</sup> an der Hörschwelle bei einer ebenen Welle.

Schließlich dient neben dem Schalldruckpegel und der Schalleistung  $W$  das Frequenzspektrum zur Charakterisierung von Schallsituationen. Gemäß Fourieranalyse trägt man dabei die Amplituden von Grund- und Oberschwingungen als Funktion der Frequenz auf (Einseitiges Betragsspektrum). (Abb.3)

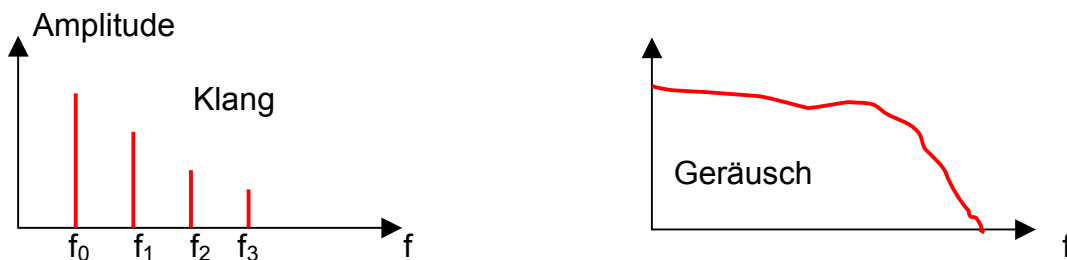


Abb.3. Frequenzspektrum von Klang und Geräusch.

## 1.2 Physiologische Schallgrößen:

Zwei Töne mit demselben Schalldruck aber verschiedenen Frequenzen werden vom Ohr als verschieden laut empfunden, dh. die Lautstärkeempfindung hängt nicht nur vom Schalldruck, sondern auch von der Frequenz ab.

Die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Ohres wird in Schallpegelmessern durch sog. BewertungsfILTER mit den genormten Bewertungskurven A, B, C und D nachgeahmt. Man spricht von bewerteten Schalldruckpegeln  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$ ,  $L_D$  mit den Einheiten dB(A), dB(B), dB(C), dB(D).

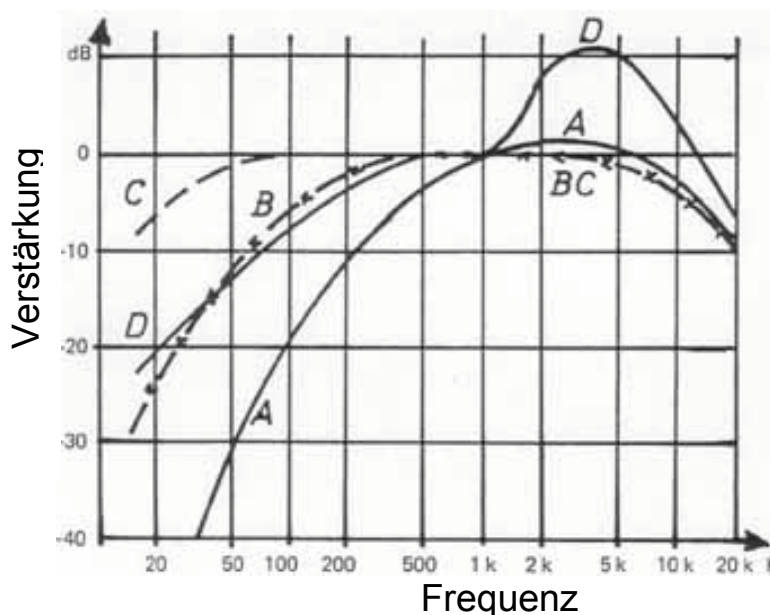


Abb.4 Bewertungskurven

Richtwerte: Wohngebiet 50 dB(A) tags, 35 dB(A) nachts;  
 gesundheitsschädlicher Dauerlärm > 85 dB(A).

## 2. Meßgeräte:

### 2.1 Schallpegelmesser

Es wird ein Schallpegelmesser (Abb.5) mit einem Satz von **Terzfiltern** verwendet.

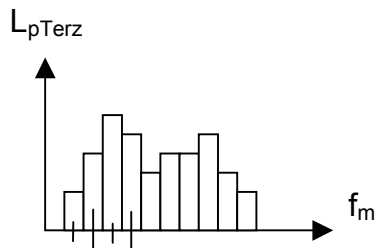
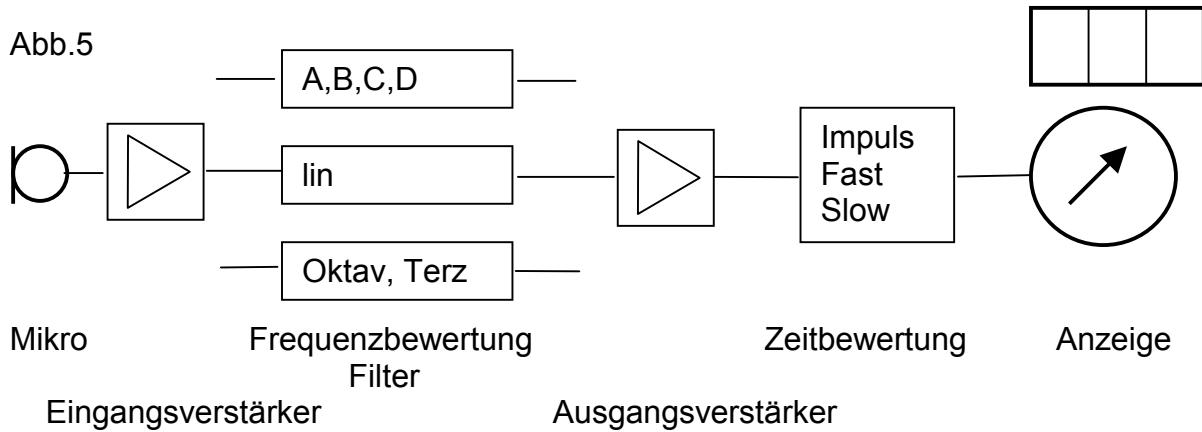


Abb.6 Terzpegeldiagramm

Bei den Terzfiltern wird jeweils nur ein Frequenzbereich von einer Terz durchgelassen, auf den Filtern stehen die Terz-Mittenfrequenzen  $f_m$ . Es gilt

$$f_o = \sqrt[3]{2} \cdot f_u ; \quad f_m = \sqrt{f_u \cdot f_o}$$

$f_o$  = obere Frequenzgrenze,  $f_u$  = untere Frequenzgrenze einer bestimmten Terz. Die Terzmittenfrequenzen sind genormt.

Die Mittenfrequenzen der einzelnen Filter können mit einem Schalter nacheinander durchgedreht werden. Die Terzpegel werden linear auf der Ordinate und die Mittenfrequenzen äquidistant auf der Abszisse aufgetragen, dies ergibt ein **Terzpegeldiagramm**. (Abb. 6)

## 2.2 Reflexionsarmer Schallmeßraum:



Die Messung findet in einem „**Reflexionsarmen Schallmeßraum**“ statt, fälschlich als „schalltoter Raum“ bezeichnet (Abb.7). Da keine Reflexionen von den Wänden stören, kann die Schalleistung und Richtcharakteristik von Schallquellen fehlerlos bestimmt werden.

Die Keiltiefe  $h$  bestimmt die niedrigste Frequenz  $f_{\min}$  bzw. die maximale Wellenlänge  $\lambda_{\max}$ , bei der der Raum noch schwach reflektierend ist. Es gilt:

$$h = \frac{\lambda_{\max}}{4}$$

Abb.7, Schallmeßraum

## 2.3 Rosa-Rauschgenerator:

Der Lautsprecher wird von einem Rosa-Rauschgenerator mit Verstärker gespeist. Bei „Rosa“- Rauschen ist die **Spektraldichte**  $S = dW/df =$  Leistung pro Frequenzintervall  $\approx 1/f$ . Damit erreicht man, daß in jeder Terz oder Oktav dieselbe elektrische Leistung enthalten ist, sodaß bei einem idealen Lautsprecher sekundärseitig sämtliche gemessenen Terzpegeln gleich sein müßten, eine Abweichung davon ist ein Maß für die Güte des Lautsprechers.

## 3. Messungen:

### 3.1 Meßaufbau:

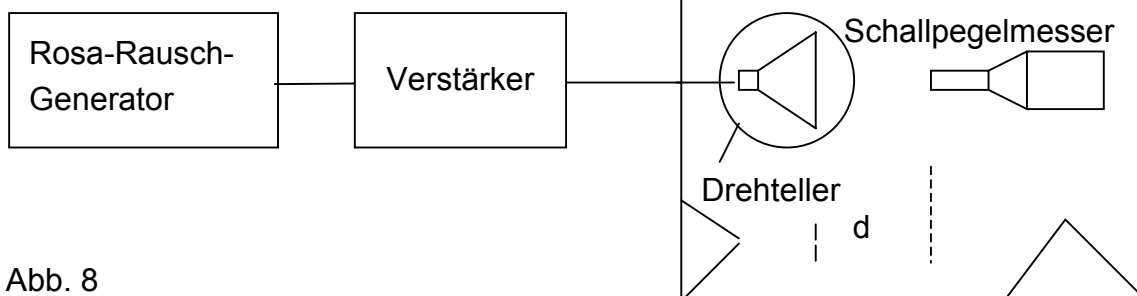


Abb. 8

Reflexionsarmer Schallmeßraum

## 3.2 Frequenzgang, Richtcharakteristik:

### Frequenzgang

Zunächst wird der Abstand  $d$  zwischen Lautsprecher und Mikrofon des Schallpegelmessers auf 1 m eingestellt. (Abb.8). Danach wird die Verstärkung des Rauschverstärkers solange hochgedreht, bis der Schallpegelmesser im **linearen** Bereich **80 dB** anzeigt. **Verwenden Sie die aufliegenden Muscheln zum Gehörschutz.** Anschließend schalten Sie den Schallpegel auf „externes Filter“ und das Terzfilter auf „on“. Drehen Sie von 1000 Hz beginnend nach unten und oben die Terzfilter durch und notieren den jeweiligen Terzpegel (Zahl zwischen den Strichen + Zeigerausschlag)  $L_{p\text{Terz}}$  in Abhängigkeit von der Mittenfrequenz  $f_m$ . Bei Beendigung der Messung Terzfilter und Schallpegelmesser unbedingt **ausschalten** (Batterie !)

Bei Pegeln  $< 30$  dB können Sie die Messung beenden, da dann nur Hintergrundgeräusche gemessen werden. Notieren Sie die Standardunsicherheit der Messung des Abstandes  $d = \text{Unsicherheitsintervall}/\sqrt{3}$ . Die Standardunsicherheit der Pegelanzeige ist  $s_L = 1\text{dB}/\sqrt{3}$ .

$s_d =$

Bemerkung: Nach der neuen DIN 13005 werden nicht mehr Größtunsicherheiten angegeben, sondern mittlere Unsicherheiten sog. Standardunsicherheiten. Bei Einzelmessungen wird angenommen, daß der wahre Meßwert mit gleicher Wahrscheinlichkeit über ein Toleranzintervall verteilt ist (Rechteckverteilung); da die Standardabweichung der Rechteckverteilung  $\text{Intervall}/\sqrt{3}$  ist, erhält man den angegebenen Zusammenhang. Bei Vielfachmessungen wird als Standardunsicherheit Standardabweichung/ $\sqrt{n}$  = Streuung des ar. Mittels verwendet. Die Unsicherheit des Ergebnisses heißt „Kombinierte Standardunsicherheit“. Der Begriff Fehler wird generell ersetzt durch „Unsicherheit“. Siehe Vorlesung bzw. homepage, Physikpraktikum, Unsicherheitsrechnung Paßwort „studiosus“.

### Richtcharakteristik

Nun wird der Lautsprecher mit Hilfe des Drehtellers um jeweils  $10^\circ$  verdreht und bei einer vorher bestimmten noch gut abgestrahlten hohen und niedrigen Terz der jeweilige Terzpegel in Abhängigkeit vom Winkel gemessen und in die Tabelle unten eingetragen. Notieren Sie sich die Standardunsicherheit der Winkelmessung.

$s_\alpha =$

Mit Hilfe eines vorbereiteten Rechenprogrammes wird der Frequenzgang und die Richtcharakteristik graphisch aufgetragen.

Bei niedrigen Frequenzen ist die Richtcharakteristik mehr kugelförmig, da bei den großen Wellenlängen die Öffnung des Lautsprechers bereits als beugende Öffnung wirkt (wie eine Wasserwelle beim Durchgang durch einen engen Spalt halbkugelförmig gestreut wird), bei hohen Frequenzen ergibt sich eine eher keulenförmige Abstrahlcharakteristik.



### 3.3 Wirkungsgrad $\eta$ :

Schließlich wird der Wirkungsgrad  $\eta$  = (abgestrahlte Schalleistung des Lautsprechers / elektrische Leistung am Eingang des Lautsprechers) bestimmt. Die elektrische Leistung wird durch Strom und Spannungsmessung zu  $W_{el} = u \cdot i$  erhalten. Die akustische Leistung wird aus Formel (3) berechnet, wobei die Hüllfläche  $S$  eine Halbkugel mit Radius 1 m ist (der Abstand d Lautsprecher – Schallpegelmesser wurde anfangs auf 1 m eingestellt), der Schalldruckpegel auf der Hüllfläche ist 80 dB, dieser wurde ebenfalls anfangs eingestellt. Die Hüllfläche ist wegen des schallharten = totalreflektierenden Bodens eine Halbkugel, nur nach oben kann Schall entweichen.

### 4. Ausarbeitung

$$\eta = \frac{W_{Ak}}{W_{el}}; W_{el} = u \cdot i; W_{Ak} = \frac{p^2}{\rho c} \cdot 2\pi \cdot r^2 = \frac{p_0^2 \cdot 10^{0,1 \cdot L_p}}{\rho c} \cdot 2\pi \cdot r^2$$

$$\text{mit } L = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} \rightarrow p^2 = p_0^2 \cdot 10^{0,1 \cdot L_p}; p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$$

$$L_p =$$

$$r =$$

$$W_{Ak} =$$

*Schalleistungspegel*

$$L_{W_{Ak}} =$$

$$i =$$

$$i_{end} =$$

$$u =$$

$$u_{end} =$$

$$W_{el} =$$

$$\eta =$$

**Es sollen die ausgefüllten Seiten 7,8,9 und die Rechnerausdrucke von Frequenzgang und Richtcharakteristik , mit Namen und Gruppennummern versehen, abgegeben werden !**



### Unsicherheitsrechnung:

$$s_{W_{Ak}} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_{Ak}}{\partial L_p} \cdot s_{L_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{Ak}}{\partial r} \cdot s_r\right)^2}; \quad \frac{\partial a^{k \cdot x}}{\partial x} = k \cdot \ln a \cdot a^{k \cdot x};$$

$$s_{L_p} = \frac{1dB}{\sqrt{3}};$$

$$s_r = \dots\dots\dots;$$

$$s_{W_{Ak}} = \dots\dots\dots$$

$$\frac{s_{W_{el}}}{W_{el}} = \sqrt{\left(\frac{s_u}{u}\right)^2 + \left(\frac{s_i}{i}\right)^2};$$

$$s_u = \frac{\text{Klasse Spannung} \cdot u_{end}}{100 \cdot \sqrt{3}}; \quad s_i = \frac{\text{Klasse Strom} \cdot i_{end}}{100 \cdot \sqrt{3}}$$

$$s_u =$$

$$s_i =$$

$$s_{W_{el}} =$$

$$\eta = \frac{W_{Ak}}{W_{el}} = \frac{p_0^2 \cdot 10^{0,1 \cdot L_p}}{\rho c} \cdot 2\pi \cdot r^2$$

$$s_\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial L_p} \cdot s_{L_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial r} \cdot s_r\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial u} \cdot s_u\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial i} \cdot s_i\right)^2}$$

$$\text{oder} \quad \frac{s_\eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{s_{W_{Ak}}}{W_{Ak}}\right)^2 + \left(\frac{s_{W_{el}}}{W_{el}}\right)^2} \quad (\text{Unabhängigkeit von Zähler und Nenner})$$

$$\text{Ergebnis} = \eta \pm s_\eta$$

