

Meßgeräte und Meßmethoden

A. Lauber

Artikel eingegangen am 18. Januar 1971

Zusammenfassung

Es werden kurz die technischen Verbesserungen der Mikrophone, Verstärker, Schallpegelmesser und Tonbandgeräte angegeben. Schallpegelmessungen werden heute nicht nur «life» ausgeführt, sondern sehr oft auch «indirekt» von Tonbandaufnahmen. Für Überwachungszwecke werden auch «zeitgeraffte» Tonbandaufnahmen gemacht. Grundlage für eine genauere Lärmuntersuchung liefert das Geräuschspektrum, das durch eine geeignete Frequenzanalyse erhalten wird. Die Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Lautstärke nach dem Verfahren von S. S. Stevens sowie der Lästigkeit nach K. D. Kryter werden beschrieben.

Die Entwicklung neuer und verbesserter akustischer Meßgeräte und Meßmethoden hat in den vergangenen zehn Jahren große Fortschritte gemacht.

Bei den *Mikrophonen* wurde der Frequenzgang erweitert. Neu sind die nun im Handel erhältlichen Mikrophone mit Trägerfrequenzsystemen, mit denen praktisch auf 0 Hz hinunter gemessen werden kann, was zum Beispiel für Messungen des Überschallknalles von Bedeutung ist.

Bei den Meßmikrophonen werden mehrheitlich piezoelektrische Wandler oder Kondensatorsysteme verwendet, die ein besonders gutes Verhalten bezüglich der Einschwingvorgänge haben und daher auch für die Messung von Knallen verwendet werden können.

Diese Mikrophone werden in verschiedenen Größen hergestellt, was sich wie folgt auf den Frequenzgang und den Dynamikbereich auswirkt (siehe Tabelle unten).

Daneben gibt es im Handel auch Mikrophone mit den verschiedensten Richtcharakteristiken.

Reine Druckempfänger haben, solange ihre Abmessungen klein im Verhältnis zur Wellenlänge des zu messenden Schalles sind, eine kugelförmige Richtcharakteristik.

Die Richtcharakteristik der Druckgradientenempfänger (zum Beispiel die Bändchenmikrophone) haben eine 8er-förmige Richtcharakteristik, die sich vorzüglich dazu eignet, den störenden Schall, der von der Seite einfällt, auszublenden.

Die Kombination von Druck- und Druckgradientenempfänger führt zu einer «Nieren»-förmigen Richtcharakteristik, die zum Beispiel bei Schallaufnahmen in Radiostudios usw. viel verwendet wird.

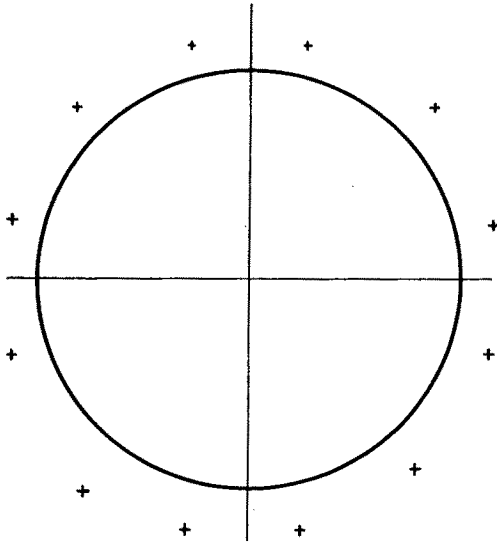
Neuerdings sind auch Richtmikrophone mit einem sehr hohen Bündelungsgrad im Handel erhältlich, der durch eine besondere Kombination des Interferenz- und des Gradienten-Prinzips oder durch parabolisch geformte Reflektoren zustande kommt. Innerhalb eines Winkelbereiches von $\pm 30^\circ$ lassen sich damit keulenförmige Richtcharakteristiken mit Pegeländerungen von 20 dB und mehr erzielen, so daß vereinzelte Schallquellen auch noch auf große Distanzen klar und deutlich aufgenommen werden können.

Auch bei den *Mikrophonverstärkern* sind verschiedene Verbesserungen festzustellen. Der Frequenzgang erstreckt sich von etwa 2 Hz bis 200 kHz; die Verstärker sind mit Überlastanzeigen ausgerüstet, die Ein- und Ausgänge sind flexibel gestaltet, so daß verschiedene Mikrophone oder Schreiber usw. angeschlossen werden können. Der Dynamikbereich wurde vergrößert, und meistens können auch verschiedene Filtersätze in den Übertragungsweg eingeschaltet werden. Die

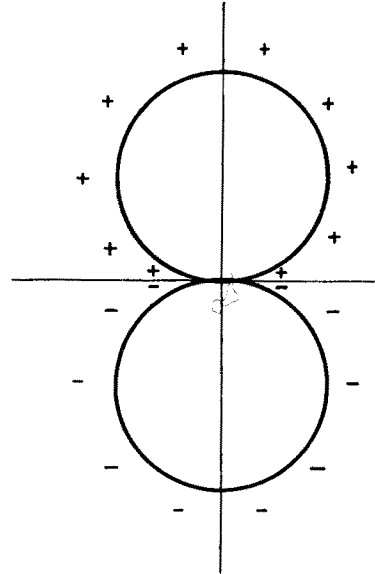
Durchmesser der Mikrophonkapsel	Mikrophontyp	Frequenzgang (± 2 db)	Dynamikbereich
1 Zoll	Kond. freifeld	2 Hz– 18 kHz	10–146 dB
1/2 Zoll	Kond. freifeld	5 Hz– 40 kHz	32–160 dB
1/4 Zoll	Kond. freifeld	8 Hz–100 kHz	64–174 dB
1/8 Zoll	Kond. freifeld	30 Hz–140 kHz	76–184 dB

Abb. 1 Richtcharakteristiken von Mikrofonen

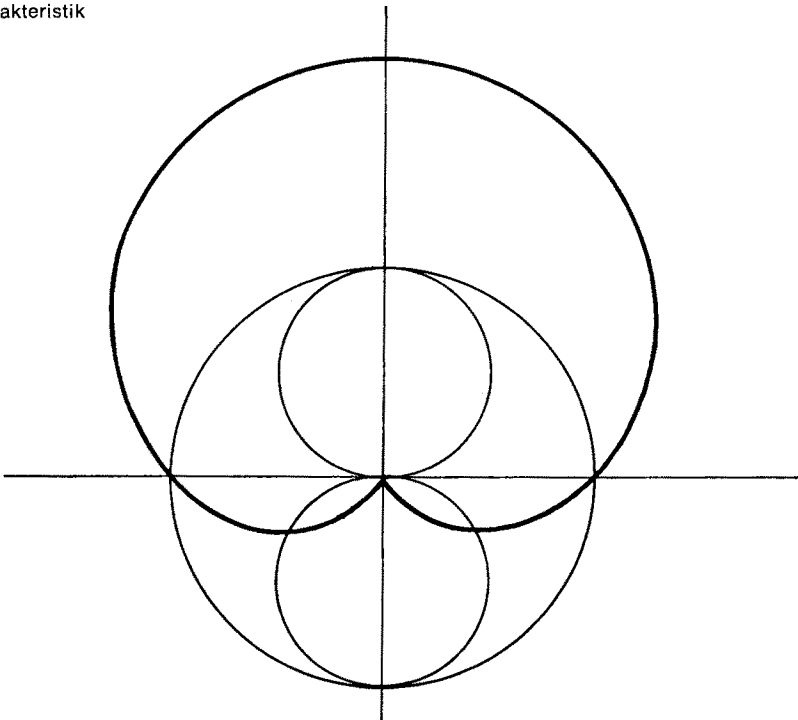
Kugel-Charakteristik



8er-Charakteristik



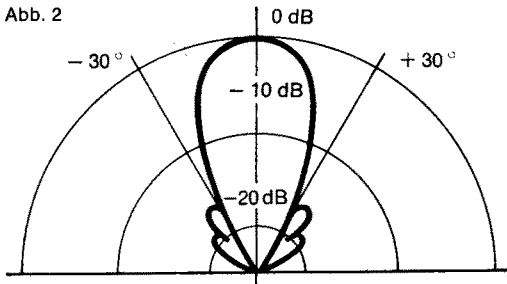
Cardioid-Charakteristik



Anzeigegeräte können Spitzenwert oder Effektivwert anzeigen und sind auf verschiedene Zeitkonstanten umschaltbar.

Vor allem auch bei den *Schallpegelmeßgeräten* gibt es neben den genormten Zeitkonstanten «Slow» and «Fast» noch eine neue Zeitkonstante von 35 ms für eine gehörophysiologisch bessere Impulsmessung. Zusammen mit der eingebauten Festhaltung des maximalen Zeigerausschlages können kurzzeitige Schallvorgänge sehr viel besser gemessen werden.

In Verbindung mit einem Beschleunigungsaufnehmer lassen sich diese Vorteile auch für die Messung von Erschütterungen und Vibrationen ausnützen.

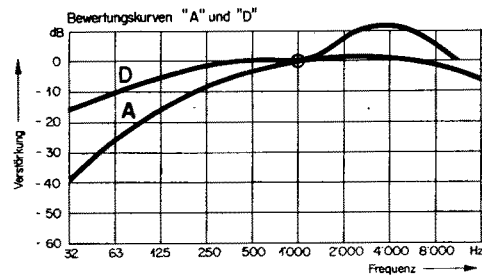
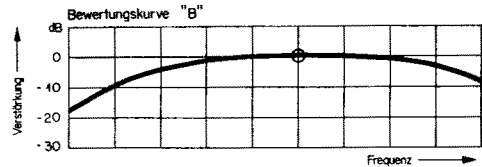
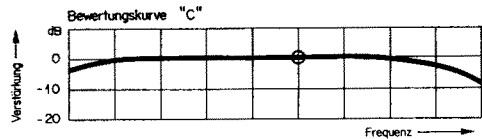
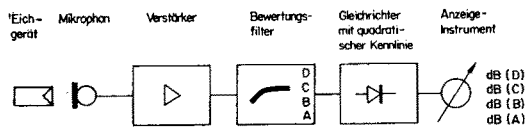


Die neuen *Schallpegelmesser* werden auch noch mit einer neuen Bewertungskurve gebaut. Neben den traditionellen Bewertungskurven A, B und C gibt es nun noch eine sogenannte D-Kurve, die Frequenzen im Gebiet von 1000 bis 8000 Hz noch stärker betont und damit die Lästigkeit eines Geräusches noch etwas besser bewertet.

Das damit gemessene dB(D) kann durch Hinzufügen einer konstanten Zahl von 7 dB als gute Approximation für den sogenannten «perceived noise level» gelten, der heute besonders bei der Messung von Fluglärm eine Rolle spielt. Die Schallpegelmesser sind international genormt, durch die Publikationen CEI 123 (1961) und 179 (1965). (Siehe Abb. 2, Referat Prof. Bosshard.)

Abb. 3 *Schallpegel-Meßgerät*

Commission Electrotechnique Internationale
Publikationen Nr. 123 (1961) und 179 (1965)



Neben der *direkten Schallmessung* ist in vielen Fällen eine *indirekte Messung* ab Tonband von Vorteil. Dabei wird zunächst an Ort und Stelle mit einem Magnetophon eine Schallaufnahme gemacht, die später im Laboratorium ausgewertet wird.

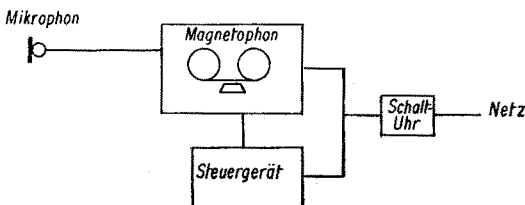
Für diese Schallaufnahmen gibt es vorzügliche *Magnetophone*, mit denen sowohl Geräusche als auch Erschütterungen über einen großen Frequenzbereich und mit genügend großer Dynamik naturgetreu aufgenommen werden können. Zudem eignet sich das Tonband auch vorzüglich für die Speiche-

rung von Daten und Meßwerten zur weiteren Auswertung mit einem Computer.

Es gibt auch mehrkanalige Magnetophone, die zum Beispiel dann notwendig sind, wenn ein Geräusch gleichzeitig an verschiedenen Orten gemessen werden soll oder wenn gleichzeitig verschiedene Signale aufgezeichnet werden müssen.

Neben der kurzzeitigen Messung der Geräusche ist oft ihre Registrierung während längerer Zeit (zum Beispiel während 24 Stunden) notwendig. Dazu eignen sich besonders gut die *Pegelschreiber*, die in den letzten Jahren ebenfalls zahlreiche Verbesserungen erfahren haben. Diese Pegel-Zeitdiagramme beschreiben sehr anschaulich die an einem bestimmten Ort herrschende Lärmsituation. Für die über längere Zeit sich erstreckende Lärmregistrierung mit Hilfe eines Tonbandgerätes hat sich ein Zeitraffverfahren gut bewährt, bei dem das Aufnahmegerät in Zeitintervallen von 2 Minuten während nur 10 Sekunden eingeschaltet wird. Eine Tonbandspule von zweistündiger Spieldauer kann so stichprobenartige Aufnahmen während 24 Stunden machen und damit auch den Zeitaufwand der späteren Auswertearbeiten in Laboratorien stark verkürzen.

Abb. 4 Apparatur für akustische Überwachungen



Das Steuergerät schaltet das Magnetophon automatisch während 10 Sekunden ein und während 110 Sekunden aus. Dadurch wird eine Zeitraffung im Verhältnis von 1:12 bewirkt. Eine zweistündige Magnetophonspule enthält dann Geräuschaufnahmen von 24 Stunden. Alle 2 Minuten wird während 10 Sekunden gemessen; das sind also 30 Messungen pro Stunde oder 720 Messungen während 24 Stunden. Diese Anzahl von Messungen

gibt in den meisten Fällen ein sehr zuverlässiges Bild der Geräuschsituation. Von den Magnetophonaufnahmen wird später mit einem Pegelschreiber ein Schallpegel-Zeit-Diagramm geschrieben. Die Dauer einer einzelnen Aufnahme (10 Sekunden) genügt gerade, um auch eine Frequenzanalyse machen zu können.

Für die Aufzeichnung linearer Größen (Schalldruck, Beschleunigung oder Vibrationen usw.) gibt es zahlreiche vorzügliche Schreibgeräte und Schleifenszillographen. Die bei einem typischen Signalzustand auftretenden zeitlichen Intensitätsschwankungen werden am besten mit *statistischen Methoden* ausgewertet. Dazu eignen sich *Klassiergeräte*, die mit Zählern ausgerüstet sind und das variable Signal mit einer bestimmten Meßfrequenz abtasten.

Mit entsprechenden Zusatzgeräten ausgerüstet, werden auch hier wieder häufig Pegelschreiber für die verschiedensten Steuerungen verwendet, zum Beispiel auch als «Geräuschwächter» für fest installierte Fluglärm-Überwachungsanlagen und auch in der Fabrikationskontrolle.

Die statistische Analyse zeitlich schwankender Schallpegel wird auch oft dazu verwendet, um einen *äquivalenten Dauerschallpegel*, und damit die Lärmbelastung, während einer Zeitperiode zu ermitteln.

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{100} \sum f_i \cdot 10 \frac{L_i}{10}$$

f_i = prozentuale Dauer der Pegel in der Klasse i

L_i = mittlerer Pegel in der Klasse i

Von großer Bedeutung in der technischen Akustik ist *die spektrale Analyse* der Signale. Sie kann entweder mit Filtern vorgenommen oder aus einem Oszillogramm gerechnet werden. Das letztere Verfahren ist bei kurzzeitigen Stoßvorgängen von Bedeutung, wenn Filter wegen ihrer zu großen Einschwingzeit nicht mehr verwendet werden können.

Es gibt heute sehr rasche Analog-Digital-

wandler, mit denen auch von sehr kurzzeitigen Vorgängen genügend Stützpunkte erhalten werden, aus denen ein Computer die notwendige Fourier-Analyse errechnen kann. Bei den Filtern ist zu unterscheiden zwischen solchen, die mit konstanter absoluter Bandbreite, und anderen, die mit konstanter relativer Bandbreite analysieren.

- 3 Analyse mit Terzbandfilter (rel. Bandbreite)
- 4 Analyse mit einem Filter von 10 Hz konstanter Bandbreite

Abb. 5 Kleinste hörbare Frequenzänderung bei Schallpegeln von 5 bis 60 dB

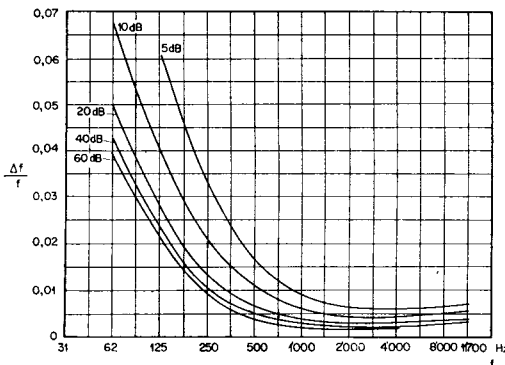
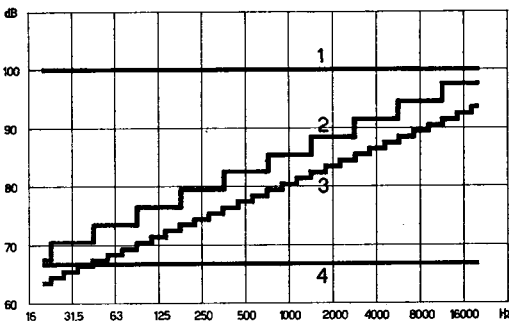


Abb. 6 Frequenzanalyse mit verschiedenen Bandfiltern
Beispiel: Thermisches Rauschen, Frequenzumfang 20–20 000 Hz



- | | | |
|---|-------------------------------------|-------------|
| 1 | Totaler Pegel (Linear, ohne Filter) | 100 dB |
| | Bewerteter Pegel (C-Kurve) | 95,5 dB (C) |
| | Bewerteter Pegel (B-Kurve) | 95,5 dB (B) |
| | Bewerteter Pegel (A-Kurve) | 97 dB (A) |
- 2 Analyse mit Oktavbandfilter (rel. Bandbreite)

Die Filter mit konstanter absoluter Bandbreite eignen sich zum Suchen selektiver Komponenten und auch zum Ausmessen von Filtercharakteristiken, da ja bei den neueren Geräten immer auch die Frequenz, die der Mitte des jeweiligen Durchlaßbereiches entspricht, zur Verfügung steht.

Bei den Filtern mit konstanter relativer (prozentualer) Bandbreite werden bei der Lärmbekämpfung am häufigsten Oktavband- und Terzbandfilter verwendet. Die neueren Modelle dieser Filter sind um viele Frequenzstufen erweitert worden und enthalten zum Beispiel bis zu 50 oder mehr Terzfilter mit Mittenfrequenzen von 2 Hz bis 160 kHz.

Häufig werden die einzelnen Stufen dieser Filter zusätzlich mit einer über einen weiten Bereich einstellbaren Zusatzdämpfung ausgerüstet, so daß gewisse Änderungen und Korrekturen im Frequenzgang der Übertragungskette besonders leicht vorgenommen werden können.

Neben den Oktav- und Terzbandfiltern werden auch sogenannte Schmalbandanalysatoren mit einer konstanten relativen Bandbreite (ca. $1/10$ Oktave) häufig verwendet.

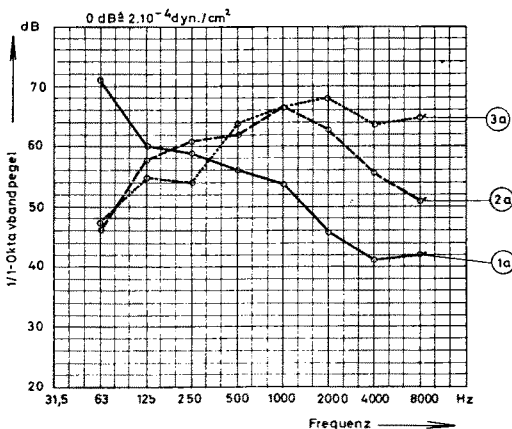
Von großem Interesse sind die sogenannten *Real-Time-Analyzer*. Es lassen sich dabei zwei verschiedene Typen unterscheiden, nämlich solche, die mit einem Analogspeichersystem arbeiten und wo die Digitalisierung bei der Ablesung dieser Speicher erfolgt, und andere Typen, wo die Digitalisierung der Wechselspannungen schon bei den Filterausgängen gemacht wird und bei denen die Integration und Speicherung bereits in digitaler Form geschehen.

Bei allen Real-Time-Analysatoren können die analysierten Schallspektren auf einer Kathodenstrahlröhre angezeigt, auf Schreiber (zum Beispiel x-y-Schreiber) übertragen, auf Strei-

Abb. 7 Frequenzanalyse

Beispiel von 1/1-Oktavbandanalysen

Gegenstand	L _A	L _B	L _C	S	P	NC
Kurve 1a: Geräusch des Brenners einer Ölheizung, gemessen im Keller Mikrophon: 1,5 m seitlich, 1 m über dem Boden	59	66	73	10,1	74	54
Kurve 2a: Geräusch eines Staubsaugers auf Teppich im Wohnzimmer Mikrophon: 1,5 m seitlich, 1 m über dem Boden	70	70	70	15,8	80	67
Kurve 3a: Geräusch einer Kaffeemühle auf dem Küchentisch Mikrophon: 1,5 m seitlich, 1 m über dem Boden	73	72	73	21,7	85	71
	dB(A)	dB(B)	dB(C)	Son (o/D)	Phon (o/D)	ISO Nr.



fen gelocht oder direkt in einen Kleinrechner eingelezen werden.

Je nach System können 5 bis 50 Terzbandspektren pro Sekunde analysiert werden. Für eine maximale Ausnützung dieser Geräte wird daher ein Kleinrechner benötigt.

Die *subjektiv empfundene Lautstärke* eines Schalles kann bekanntlich nur durch einen mühsamen Hörvergleich richtig bestimmt werden. Es gibt aber auch genormte Rechnungsverfahren (ISO, R 532–1966), um aus

einer Frequenzanalyse die Lautstärke mit guter Annäherung zu berechnen.

Neben der einfachen Methode von S. S. Stevens gibt es das etwas kompliziertere «Zwicker»-Verfahren, das sich auf eine Terzbandanalyse stützt und sowohl für das diffuse als auch für das freie Schallfeld angewendet werden kann.

Es gibt heute Meßgeräte, die auch diese Berechnung augenblicklich ausführen.

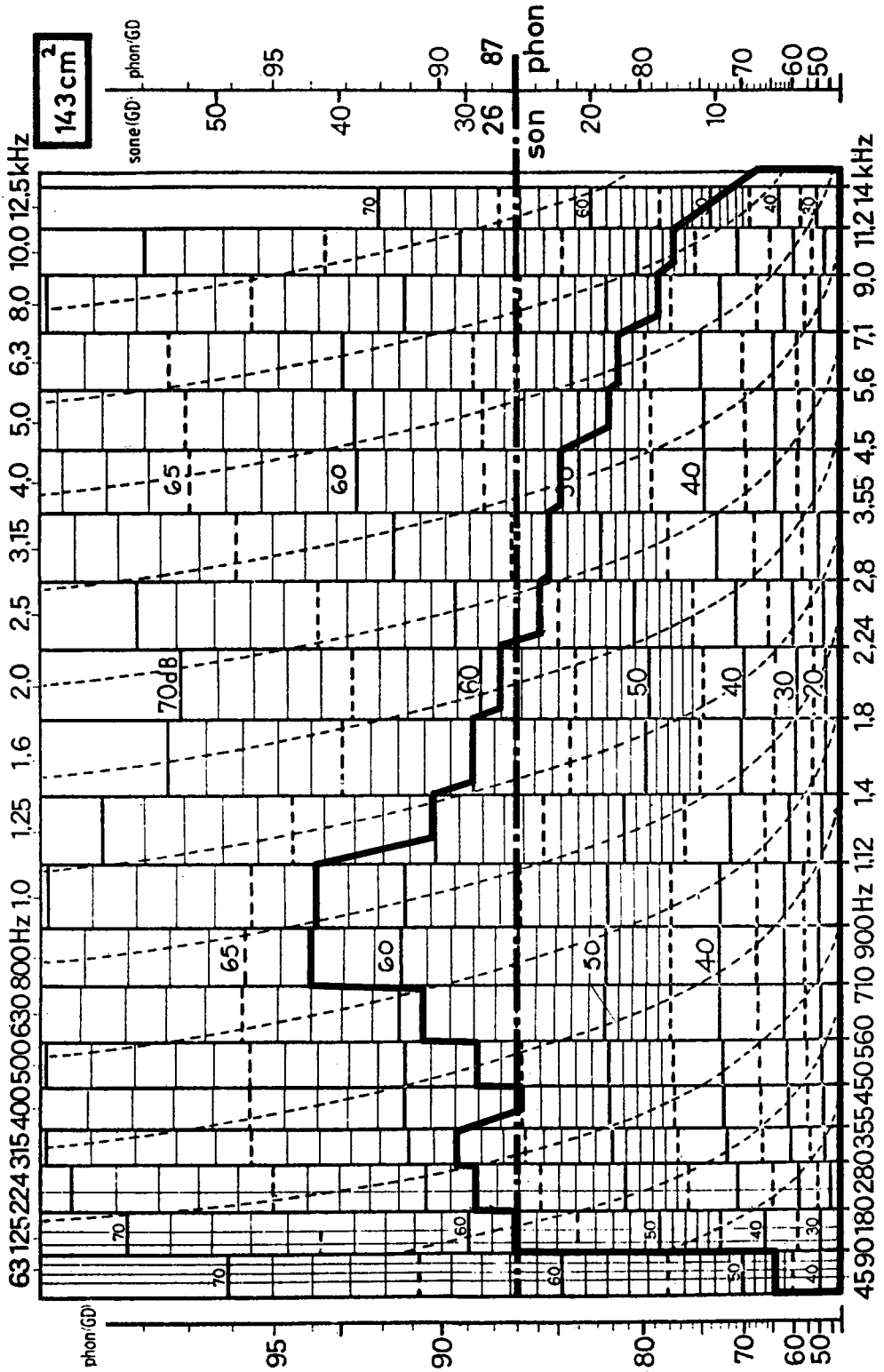
In der Raumakustik wird die Messung der Nachhallzeit meistens noch mit Hilfe von Pegelschreibern oder mit logarithmischen Verstärkern und Kathodenstrahloszillographen ausgeführt. Mit zusätzlichen Gebern wird heute die Nachhallzeit immer häufiger mit elektronischen Zählern bestimmt und auf Computern weiterverarbeitet.

Ganz allgemein wird auch für die akustischen Messungen und Auswertungen immer mehr der Computer eingesetzt, wobei sich die folgenden zwei Verfahren anbieten:

Das On-Line-Verfahren, wobei die Meßdaten an Ort und Stelle sofort von einem Kleinrechner verarbeitet werden, und die Benützung von Großrechnern, die über verschiedene Terminals nach dem sogenannten «Time-

Abb. 8 Beispiel einer Lautstärkeberechnung nach Zwicker (ISO, R 532, 1966)

Geräusch eines Staubsaugers auf Teppich im Wohnzimmer



Sharing»-Verfahren erreicht werden können. Das On-Line-Verfahren hat den Vorteil, daß die gewünschten Resultate sehr rasch, wenn auch nicht immer in der idealen graphischen Darstellung erhalten werden.

Der Großrechner bietet mit seinem sehr viel größeren Speicherplatz andere wesentliche Vorteile:

Einmal können hier mehrere komplizierte Programme gleichzeitig gespeichert werden, und die graphische Darstellung der Datenausgabe kann allen Wünschen leicht angepaßt werden.

Bei der EMPA werden schon seit vielen Jahren zahlreiche Berechnungen, wie zum Beispiel die Bestimmung der Schallabsorption nach dem Hallraumverfahren, die Trittschall-

isolation, die Dämpfungen bei der Schallausbreitung usw., mit solchen Großrechnern ausgeführt. Früher haben wir die alte ERMET-Anlage an der ETH benützt, und heute arbeiten wir bis auf weiteres mit einem in Bern befindlichen IBM-360-40-System, das über ein RAX, IBM-1050-Terminal angesteuert wird.

Um die Vorteile der Automatisierung voll ausnützen zu können, ist es aber notwendig, daß schon bei der Messung die Daten computergerecht erfaßt werden.

Adresse des Autors:

Anselm Lauber, dipl. Ing. ETH, Vorsteher der Abteilung Akustik und Lärmbekämpfung an der EMPA, 8600 Dübendorf

Laboreinrichtungen

Mech. Schreinerei

Innenausbau

8055 Zürich

Friesenberg-/Haldenstraße

Vögeli Söhne Zürich

Telephon 33 03 30