

# RTM

## Rundfunktechnische Mitteilungen

Herausgegeben im Auftrage der Arbeitsgemeinschaft  
der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten der  
Bundesrepublik Deutschland sowie des Zweiten  
Deutschen Fernsehens vom

Institut für Rundfunktechnik GmbH **IRT**

### Ausgewählte Aufsätze zum 80. Geburtstag von Professor Dr.-Ing. Lothar Cremer

Zusammengestellt anlässlich eines Kolloquiums  
zu diesem Geburtstag im IRT, München,  
September 1985

- Henning Wilkens* Professor Cremers 80. Geburtstag
- Theodore John Schultz* Acoustical Uses for Perforated Metals
- Manfred Heckl, Ulrich Donner* Schalldämmung dicker Wände
- Ralf Kürer* Schallschutz im Wohnungsbau – Welche Beurteilungskriterien?
- Hans Lazarus* Ein Modell zur sprachlichen Kommunikation unter Störbedingungen  
und deren Bewertung

Verlagsort Hamburg  
Mensing GmbH + Co KG  
Abt. Verlag  
2000 Norderstedt  
ISSN 0035-9890

**Juli 1986**

## INHALTSVERZEICHNIS:

Professor Cremers 80. Geburtstag .....	1	Schallschutz im Wohnungsbau — Welche Beurteilungskriterien? .....	16
Henning Wilkens		Ralf Kürer	
Acoustical Uses for Perforated Metals .....	2		
Theodore John Schultz			
Schalldämmung dicker Wände .....	11	Ein Modell zur sprachlichen Kommunikation unter Störbedingungen und deren Bewertung .....	21
Manfred Heckl, Ulrich Donner		Hans Lazarus	

## PROFESSOR CREMERS 80. GEBURTSTAG



Professor Dr.-Ing. Lothar Cremer feierte am 16. August 1985 seinen 80. Geburtstag. Am 21. September 1985 fand aus diesem Anlaß ein wissenschaftliches Kolloquium mit vielen in- und ausländischen Gästen im IRT in München statt. Die dort vorgetragenen Beiträge und einige darüber hinaus dem Jubilar gewidmete Arbeiten werden in den folgenden Heften der RTM veröffentlicht.

Nach Schulbesuch und Studium an der Technischen Hochschule Berlin promovierte Lothar Cremer 1932 mit einer Arbeit über die „Absorption poröser Materialien“. Danach war er Oberingenieur an der Technischen Hochschule und arbeitete mit der Akustikgruppe am Heinrich-Hertz-Institut eng zusammen. Nach dem Kriege war Cremer akustischer Berater in München, gleichzeitig lehrte er an der Münchner Universität, bis er 1954 an die TU Berlin zum ordentlichen Professor berufen wurde. Hier hat er das Institut für Technische Akustik aufgebaut, das er bis zu seinem Ruhestand 1973 geleitet hat. Daneben war er Leiter der Abteilung Akustik am Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung in Berlin.

Schon während seiner Zeit in München begann Cremer mit der Beratung bei Konzertsälen. Eine lange Liste von Objekten zeugt von seinen einfühlsamen Bemühungen gemeinsam mit den Architekten, deren Vorstellungen mit den Anforderungen für eine gute Akustik zu vereinen. Stellvertretend für die vielen Säle seien hier der Sendesaal des Senders Freies Berlin, die Deutsche Oper in Berlin und die neue Berliner Philharmonie genannt. Gerade bei dem letzten Saal galt es, den Grundgedanken der amphitheatralischen Anordnung mit den akustischen Forderungen

zu vereinen. Die von Cremer so genannten Weinbergstufen und die als leichte gewölbte Segel ausgeführten Reflektoren über der Bühne gaben diesem Raum das unverwechselbare Aussehen.

Schon früh galt sein großes Interesse der wissenschaftlichen Bearbeitung raumakustischer Probleme. So gab Cremer 1948 den ersten Band der wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik heraus, dem 1950 der Band 3 und 1961 der Band 2 folgte. Aufgrund der vielen neuen Erkenntnisse, die zu einem nicht unerheblichen Teil in seinem Institut erarbeitet wurden, brachte er gemeinsam mit H. A. Müller 1976 eine völlig neu bearbeitete Auflage in 2 Bänden heraus. Grundlegende Arbeiten hat Cremer auf dem Gebiet des Körperschalls geleistet und schrieb gemeinsam mit Manfred Heckel 1967 das Standardwerk.

Die besondere Liebe galt der Akustik der Musikinstrumente. Hierzu wurden viele wissenschaftliche Untersuchungen in seinem Institut durchgeführt, deren Ergebnisse er nach seiner Emeritierung in dem Buch „Die Physik der Geige“ (1981) zusammenfassend dargestellt hat. Diese Werke sind inzwischen auch in englischer Sprache erschienen.

Aber auch die anderen Gebiete der Akustik, wie Geräuschbekämpfung, physiologische Akustik und Elektroakustik, wurden in seinem Institut bearbeitet. Vorbildlich war auch die Art der Wissensvermittlung an die Hörer seiner Vorlesungen. Klar und auf physikalisches Verständnis angelegt war jede einzelne Vorlesung, die man nur ungern versäumte. Jeder, der sich in die Akustik einarbeiten möchte, kann zu dem in Buchform herausgegebenen Vorlesungstext greifen.

Für seine Verdienste auf den vielfältigen Gebieten der Akustik wurde Cremer neben anderen Auszeichnungen 1973 mit dem W. C. Sabine Award der Akustischen Gesellschaft von Amerika geehrt. Cremer ist Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Göttingen. Alle, die Professor Cremer kennen, wünschen ihm auch weiterhin Gesundheit und nicht nachlassende Frische.

Henning Wilkens

ACOUSTICAL USES FOR PERFORATED METALS<sup>1</sup>

BY THEODORE JOHN SCHULTZ

Manuskript eingegangen am 27. September 1985

Raum- und Bauakustik

**Summary**

Perforated metal can be used in acoustical treatments either as a transparent covering for something else, or as an acoustically functional element in a tuned resonant sound absorber. In the former case, the main job of the perforated metal is to "disappear" and contribute no acoustical property at all to the treatment. In the latter case, the perforated metal takes an essential part in the acoustical behavior; it helps to determine the resonance frequency of the absorber. Since the latter application is already well covered in the literature, we deal only with the "transparency approach" here. The Transparency Index and the Access Factor are introduced as parameters to help the designer choose the proper perforated metal for his purpose. It appears that these useful design tools are not readily available elsewhere.

**Sommaire Utilisation acoustique de métaux perforés**

On peut utiliser du métal perforé dans des installations acoustiques, soit comme revêtement acoustiquement inerte, soit comme élément acoustique fonctionnel dans un isolateur acoustique à résonance. Dans le premier cas, le rôle principal du métal perforé est d'être transparent et de ne modifier d'aucune manière la caractéristique acoustique de l'installation. Dans le second cas, le métal perforé joue un rôle essentiel dans le comportement acoustique; il intervient pour déterminer la fréquence de résonance de l'isolateur acoustique. Cette seconde application faisant déjà l'objet d'une littérature abondante, seule l'utilisation transparente est abordée dans le présent article. L'indice de transparence et le facteur d'accès sont deux paramètres pris en compte pour permettre au concepteur de choisir le métal perforé adapté à ses besoins. On constate que ces éléments conceptuels utiles ne sont encore disponibles nulle part ailleurs.

**Zusammenfassung Die akustische Verwendbarkeit von Lochblechen**

Lochblech kann in der Raumakustik entweder als transparentes Abdeckmaterial oder als akustisch funktionelles Element in einem abgestimmten Resonanzabsorber verwendet werden. Im ersteren Fall ist es die Hauptaufgabe des Lochblechs, akustisch nicht in Erscheinung zu treten, d. h. überhaupt keinen Einfluß auf die Akustik auszuüben. Im letzteren Fall hat das Lochblech entscheidenden Einfluß auf das akustische Verhalten; es dient zur Bestimmung der Resonanzfrequenz des Absorbers. Da diese Anwendung in der Literatur schon ausführlich behandelt wurde, befaßt sich dieser Aufsatz mit der Verwendung als transparente Abdeckung. Es werden der Durchlässigkeitsindex und der Zugriffsfaktor als Parameter eingeführt, um dem Konstrukteur bei der Auswahl des für seinen Zweck geeignetsten Lochblechs zu helfen. Es scheint, daß diese nützlichen Hilfsmittel für den Entwurf noch nicht überall zur Verfügung stehen.

**1. How Perforated Metals Are Used in Acoustical Applications**

There are two principal acoustical applications for perforated metals:

**1.1. As a Facing for Something Else**

Here the perforated metal is used as a protective or decorative covering for some special kind of acoustical material; that material may be designed either to absorb sound or to reflect or scatter sound in a certain way. It is this special material that does the actual acoustical work, so the purpose of the perforated metal in such applications is to "disappear" acoustically: that is, it must be so **transparent** that the sound waves can pass completely through it to encounter the acoustical treatment that lies behind.

Our design goal in this case is to choose the perforated metal for greatest sound transparency, for sounds of all frequencies.

**1.2. In Tuned Resonant Sound Absorbers**

Sometimes, however, we may wish to absorb sound very effectively only in a certain band of frequencies but not at frequencies lying above and below that band. For this purpose we design a Resonant Sound Absorber. Here, the perforated metal, instead of disappearing, takes an active part in tuning the absorber, that is, it helps to determine which frequencies of sound are absorbed.

The technical background for resonant sound absorbers appears elsewhere in the acoustical literature

[1], so we will not cover that matter here. Instead, we present some thoughts on the "transparency approach".

**2. Perforated Metal Sheet with High Transparency, for Use in Broad-Band Sound Absorptive Treatments**

Perforated sheet metal is often used as a sound-transparent protective covering for sound absorptive materials that actually do the work of absorbing the sound. In this case, because the perforated metal is chosen to be completely transparent to sound, the intention is that it does not alter the intrinsic performance of the absorptive material in any way.

A great disadvantage of other commonly-used sound absorptive treatments is that they cannot be cleaned or repainted without seriously degrading their sound absorptive properties.

Perforated metals are useful as components of acoustically absorptive treatments because they can be cleaned or refinished without harming the absorptive properties for which they were designed, subject only to the proper choice of perforation size and spacing, described later.

Other important advantages of perforated metals in such applications are:

- inherent structural strength, compared with woven or felted facing materials; they can stand alone, if necessary;
- ability to be formed into complex curved shapes for architectural (visual) purposes;
- resistance to abuse and damage.

<sup>1</sup> Aufsatz zum Kolloquium anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Lothar Cremer im IRT, München, 21. Sept. 1985.

Finally, the chief architectural advantage of perforated metal is that it is basically **uninteresting**. It can be made to look like something else: for example, plain plaster.

The design approach proposed here is, of course, not restricted to perforated metals, but can be applied to any perforated material having weight comparable to metal sheet: for example, motion picture screens and the hemispherical domes in planetariums on which the constellations of the heavens are projected. (In this last case, there is need for heavy sound-absorptive treatment behind a sound-transparent screen, in order to avoid a severe focus from the dome.)

### 3. Sound Transparency of Perforated Metal

Most people assume that the greater the percent open area of the sheet, the more easily sound can go through it. In a general way, this assumption is correct . . . but not always.

For example, we could make a sheet with 10% open area in two ways: either by removing a single large hole at the center or by very fine perforations overall.

In the first case, instead of a transparent facing material, we would have a small completely open area at the center of the sheet (10% of the total area); but the rest of the sheet would be completely opaque to sound, reflecting ALL of it.

In the second case, the entire sheet is almost completely transparent to sound, because the tiny solid areas between the holes are too small to intercept the sound waves.

For high transparency, the most important consideration is to have many small perforations, closely spaced. It is better to minimize the bar size (the size of the solid portions between the perforations) and (to a lesser extent) to minimize the sheet thickness, rather than to concentrate on percent open area.

In order to help the designer choose a suitably transparent sheet for such applications, we introduce a parameter called the Transparency Index<sup>2</sup> (TI) given by the following formula:

$$TI = nd^2/ta^2 = 0.04 P/\pi ta^2 \quad (1)$$

where:

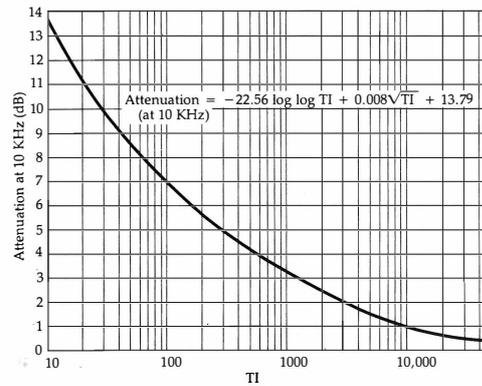
- n = number of perforations per sq in;
- d = perforation diameter (in);
- t = sheet thickness (in);
- a = shortest distance between holes (in);  
a = b - d, where
- b = on-center hole spacing (in);
- P = percent (not fractional) open area of sheet.

The formula is valid for either straight or staggered perforations. An approximation for the value of a, when you do not know the value of b, is:

$$a = d [(const./P^{1/2}) - 1] \quad (2)$$

The value of the constant is 9.5 for staggered and 8.9 for straight perforations.

<sup>2</sup> Note: The terms "index" and "factor" are used in this paper in their general English sense, rather than the more specific sense of technical German.



**Figure 1**  
Curve of Transparency Index (TI) vs Sound Attenuation at 10 000 Hz

We can predict from the value of TI the amount by which sound waves at the very high frequency of 10 kHz are attenuated in passing through the sheet, according to the curve in **Figure 1**. Then, from the attenuation at 10 kHz, we can develop a curve for the attenuation at lower frequencies.

A value of TI upwards of 10 000 should be the goal in choosing a perforated sheet intended for a completely sound-transparent facing material. This would lead to an attenuation no greater than one decibel (dB) at a frequency of 10 kHz; and at lower frequencies the attenuation decreases rapidly. In other words the sheet is essentially acoustically transparent over the entire frequency range of importance.

However, it is not essential to insist on very high Transparency Index. For relatively high values of TI, the transparency is not spoiled very rapidly with decreasing values of TI: with TI as low as 5000, the attenuation is only 1.5 dB, and with TI = 2000, the loss is only 2.5 dB.

Therefore, there is no harm in shopping around among the readily available perforated materials to find one whose TI lies between, say, 2000 and 20 000. Any value within this range will yield acceptably good sound transparency for most sound absorption applications.

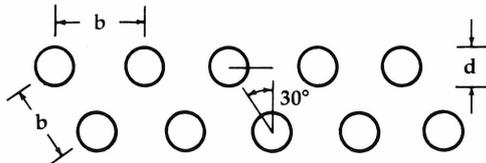
**Note:** The value of TI increases as the hole size and the number of holes per sq in **increases** and as the thickness of the sheet and the distance between holes **decreases**. For values of TI less than 2000, the sound transparency diminishes rapidly. One can also see from the formula that TI generally increases with increasing percent open area P, but NOT if this is achieved with larger holes and an increase of the distance (a) between holes.

#### Example 1

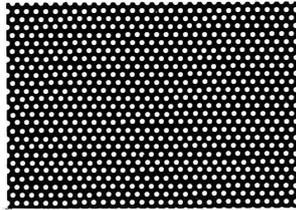
A perforated sheet of 26 gauge steel with 0.023-in. holes on 0.054-in. staggered centers leads to the following parameters:

- b = 0.054"
- d = 0.023"
- t = 0.0184"

$$\begin{aligned} A &= \text{Sheet area per hole} = b^2 \cos 30^\circ \\ &= (0.054)^2 \times 0.87 \\ &= 2.525 \times 10^{-3} \text{ sq in;} \end{aligned}$$



This is what the industry refers to as a standard 60° staggered pattern



then  $n = 1/A = 396$  holes/sq in;

$$a = b - d = 0.054 - 0.023 = 0.03'' ;$$

$$\begin{aligned} P &= [(\pi d^2/4)/A] \times 100 \\ &= [(\pi \times (0.023)^2)/(4 \times 2.525 \times 10^{-3})] \times 100 \\ &= 16.45 \% \end{aligned}$$

We calculate the Transparency Index by two methods; first by:

$$\begin{aligned} TI &= nd^2/ta^2 \\ &= [396 \times (0.023)^2]/0.0184 \times (0.03)^2 \\ &= 12\,650; \end{aligned}$$

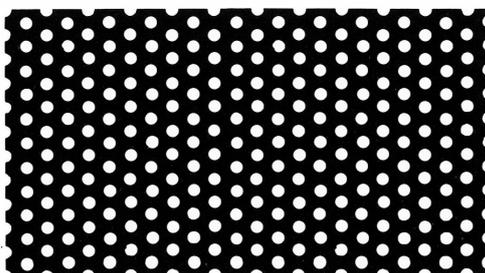
or, alternatively by:

$$\begin{aligned} TI &= 0.04 P/\pi ta^2 \\ &= [0.04 \times 16.45/\pi \times 0.0184 \times (0.03)^2] \\ &= 12\,648. \end{aligned}$$

The two values of TI agree very well. The sound attenuation at 10 kHz is only 0.9 dB.

### Example 2

We have 16 gauge steel sheet, with 0.066" holes on 0.125" staggered centers. Then:



$$\begin{aligned} b &= 0.125'' \\ d &= 0.066'' \\ t &= 0.0625'' \\ A &= (0.125)^2 \times 0.87 = 13.6 \times 10^{-3} \text{ sq in} \\ n &= 1/A = 73.6 \text{ holes/sq in} \\ a &= b - d = 0.125 - 0.066 = 0.059'' \\ P &= [\pi(0.066)^2/4 \times 73.6 \times 10^{-3}] \times 100 \\ &= 26.16 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TI &= [73.6 \times (0.066)^2/0.0625 \times (0.059)^2] \\ &= 1474; \end{aligned}$$

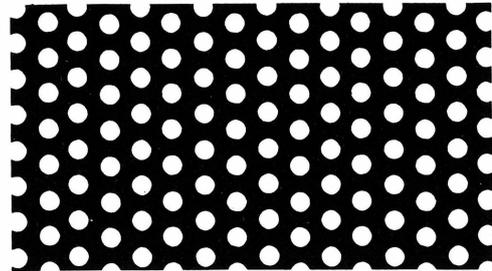
or:

$$\begin{aligned} TI &= [0.04 \times 26.16/\pi \times (0.0625) \times (0.059)^2] \\ &= 1472. \end{aligned}$$

Again, the agreement between the two calculated values of TI is very good. But notice that the 10-kHz-attenuation has increased to 2.9 dB, **much** more than the attenuation of Example 1, despite the fact that the open area for this example is 53 % greater than in the earlier case!

### Example 3

Again, we have 16 gauge steel, but with 7/64" holes on 3/16" staggered centers.



$$\begin{aligned} b &= 0.1875'' \\ d &= 0.109'' \\ t &= 0.0625'' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= (0.1875)^2 \times 0.87 \\ &= 30.6 \times 10^{-3} \text{ sq in} \\ n &= 1/A = 32.7 \text{ holes/sq in} \\ a &= b - d = 0.0785'' \\ P &= [\pi(0.109)^2/4 \times 30.6 \times 10^{-3}] \times 100 \\ &= 30.49 \% \end{aligned}$$

Then:

$$\begin{aligned} TI &= [32.7 \times (0.109)^2/(0.0625) \times (0.0785)^2] \\ &= 1009; \end{aligned}$$

or:

$$\begin{aligned} TI &= [0.04 \times 30.49/\pi \times (0.0625) \times (0.0785)^2] \\ &= 1008. \end{aligned}$$

Here, even with a percent open area greater than 30 %, the 10-kHz-attenuation has increased to 3.3 dB. You may wonder, then, why it would not ALWAYS be best to choose the most transparent possible material.

Generally speaking, we have seen that perforated sheets with small holes close together give the greatest sound transparency; but for practical reasons, very tiny holes should be avoided because they may get clogged with dust or filled with paint when the sheet is repainted. Perhaps more important, very finely perforated sheets tend to be fragile and are **much** more expensive to manufacture.

Therefore, it is sometimes best to choose the gage of the metal first, based on cost, availability or other reasons; then choose a reasonable hole size, and finally jockey the other parameters to achieve the desired transparency.

## 4. Sound Transparency at High Frequencies

Figure 2 presents laboratory-measured data (see the Appendix for further details of the tests) that indicate how sounds of different frequency are attenuated, in passing through samples of perforated metal having different values for the Transmission In-

dex (TI). The horizontal scale gives the frequency in Hz; the vertical scale gives the attenuation in decibels.

At frequencies below about 1000 Hz there is no attenuation at all: the sound passes right through the sheet with no loss whatever. But as the frequency increases, there is more and more attenuation . . . meaning that the sound is reflected from the sheet and fails to get through to reach the acoustical treatment that lies behind.

This condition is more severe, the lower the value of TI. For a sheet with TI = 1500, the attenuation of sound at 16 000 Hz is as much as 4.75 dB; for TI = 12 000, the loss is only 1.5 dB at the same frequency.

In **Figure 2**, the curves of attenuation vs frequency suggest, but do not correspond to, the behavior of a simple low-pass sound filter. The physical phenomena involved here must combine the motion of the medium in the perforations (mass and viscosity) with the motion of the sheet, itself, in a rather complex manner.

Sometimes the acoustical treatment that lies behind the sheet is a hard, sound-diffusing surface, intended to break up the sound waves and reflect them back to the room, as in a concert hall. If so, then the attenuation must be counted twice: once on the way in and once on the way back.

### 5. Access to the Sound Treatment

On the other hand, if the acoustical treatment is intended to **absorb** the incident sound, then we must

determine how seriously the perforated metal covering degrades the intrinsic absorptive properties of the material installed behind it.

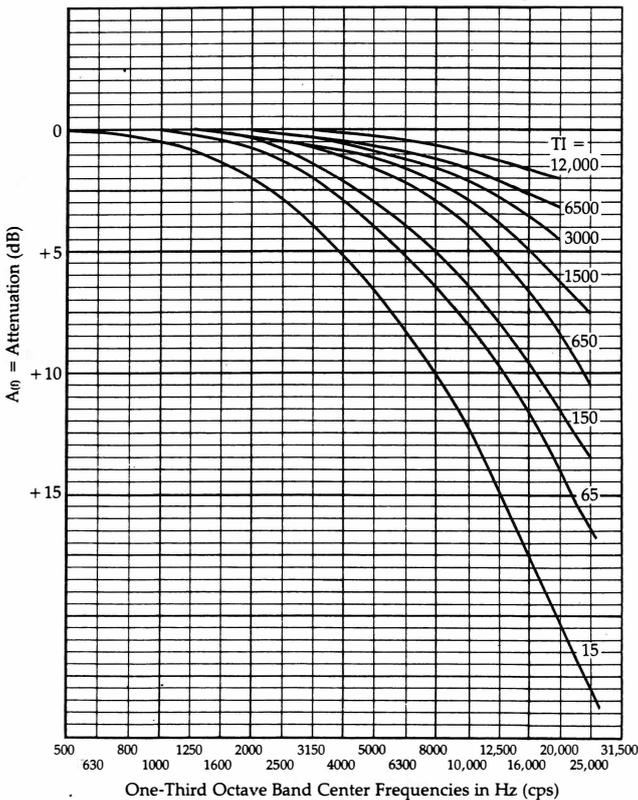
For this purpose, we introduce the Access Factor (AF), illustrated in **Figure 3** for the same samples of perforated metal that we saw in **Figure 2**. In general, the Access Factor (AF) at any frequency is related to the Attenuation (A) at that frequency by the formula:

$$AF = 10^{-(A/10)} \quad (3)$$

The published sound absorption coefficients for acoustical materials usually assume no covering over the sound absorptive material. But when we cover the material with perforated metal, we may find some degradation of the sound absorptive efficiency. The amount will depend on the frequency, of course, but also on the choice of the perforated metal.

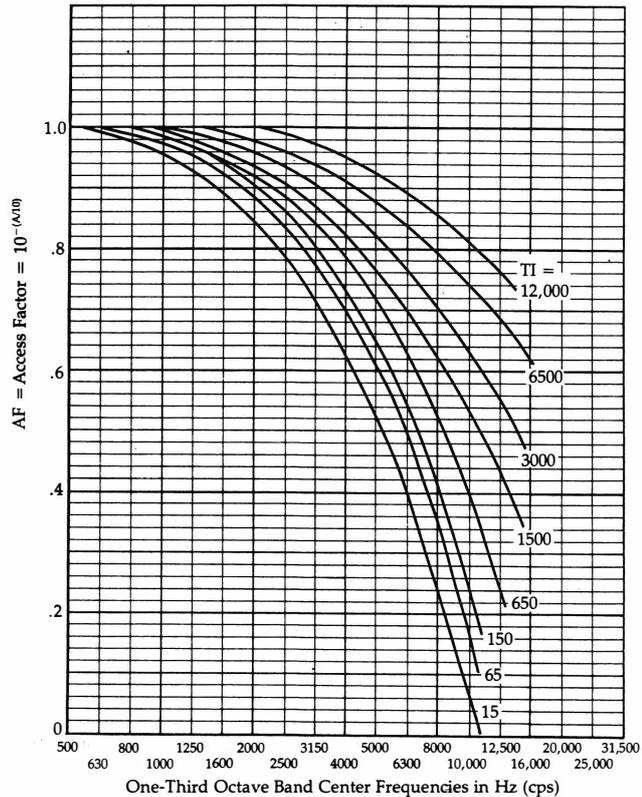
The Access Factor is a measure of this degradation: it describes how much "access" the sound wave has to the underlying acoustical treatment. If the Access Factor is 1.0, there is complete access and 100 % of the sound energy can get through. But if the Access Factor is 0.50, then only half the sound energy can pass through; the other half is reflected from the surface of the sheet and never reaches the acoustic treatment at all.

In order to find the "effective sound absorption efficiency" of an acoustical material covered with perforated metal sheet, we multiply the sound absorption coefficient of the basic material at each fre-



**Figure 2**

Sound Attenuation vs Frequency for Samples of Perforated Metal Having Different Values of TI



**Figure 3**

Curves Showing the Corresponding Access Factor (AF) vs Frequency for the Same Samples of Perforated Metal as in Figure 2

Item	d (in.)	b (in.)	t (in.)	n (holes/in. <sup>2</sup> )	P (%)	a (in.)	TI	A <sub>(10kHz)</sub>	AF <sub>(10k)</sub>
1.	0.080	$\frac{7}{64}$ " = 0.109	0.030	97	48.5	0.029	24 605	0.55 dB	0.88
2.	0.100	$\frac{5}{32}$ " = 0.156	0.030	47	37.2	0.056	4996	1.54	0.70
3.	0.100	$\frac{3}{16}$ " = 0.188	0.030	33	25.9	0.088	1420	2.84	0.52
4.	0.125	$\frac{3}{16}$ " = 0.188	0.030	33	40.0	0.063	4330	1.67	0.68
5.	0.125	$\frac{1}{4}$ " = 0.250	0.030	18	22.5	0.125	600	3.97	0.40
6.	0.156	$\frac{1}{4}$ " = 0.250	0.078	18	36.0	0.094	636	3.89	0.41
7.	0.063	$\frac{1}{8}$ " = 0.125	0.037	74	22.5	0.062	2065	2.41	0.57
8.	$\frac{3}{16}$ " = 0.188	$\frac{5}{16}$ " = 0.313	0.060	12	32.5	0.125	445	4.42	0.36

$$a = b - d; TI = nd^2/ta^2; A_{(10)} = -22.56 \log \log (TI) + 0.008\sqrt{TI} + 13.79 \text{ (dB)}; AF = 10^{-(A/10)}$$

Table 1

Acoustical properties of commonly-manufactured perforated metal products

quency by the corresponding Access Factor for the metal sheet<sup>3</sup>.

For example, suppose that we cover a 1-inch glass fiber material, having a coefficient of 0.99 at 4000 Hz, with a perforated metal sheet having TI = 1500; this corresponds to an Access Factor at 4000 Hz of 0.85. Then the effective sound absorption coefficient of the combination is  $0.99 \times 0.85 = 0.84$ . The perforated covering has degraded the absorptive performance of the original material at 4000 Hz by 15 percentage points.

Of course, perforated sheet with a TI of only 1500 is a poor choice for this application in the first place. The whole point of the acoustical design in the "transparency approach" is to find a sheet with as high a value of TI as possible, consistent with the other requirements of the project.

The following nomogram allows you to go directly from the calculated value of TI to either the Sound Attenuation or the Access Factor, both at 10 000 Hz (Figure 4). The procedure is as follows: Enter the lower horizontal scale with the value of TI for the sheet and move directly upward to intersect the lower of the two slanting lines. Move to the left from this intersection point until you strike the vertical scale, where you can read the attenuation at 10 000 Hz in decibels, for this sheet.

<sup>3</sup> In principle, this procedure is not technically correct; the matter is much more complicated than that. If we were to carry out the correct procedure, it would require adding the mass impedance represented by the perforated metal screen to the impedance of whatever combination of materials lies behind it, and then recalculating, from the impedance of the whole ensemble, the net absorption coefficient presented to the incident sound. This is a complicated procedure, and one that (even so) does not necessarily give the right answer, since a number of questionable assumptions are involved.

It is believed that, for the range of perforated materials likely to be used in these applications, and for the types of sound absorptive treatments that they will be used to cover, the use of the Access Factor, as prescribed here, will give answers with acceptable accuracy.

Alternatively, if you want the Access Factor, you can move to the right from the first intersection point to intersect the upper slanting line, then move upward from this second intersection point to strike the upper horizontal scale, where you can read the Access Factor at 10 000 Hz for the sheet.

The mathematical formulas corresponding to the curves in this nomogram are, respectively:

$$A = -22.56 \log \log (TI) + 0.008 (TI)^{1/2} + 13.79 \text{ dB} \quad (4)$$

and

$$AF = 10^{-(A/10)} \quad (3)$$

The first formula is valid for values of TI up to 50 000, but only for a frequency of 10 000 Hz; the second formula is generally valid for any frequency for which the value of A is known.

#### Example 4

Suppose you have a perforated metal sheet with TI = 4000, used as a covering for a sound absorptive glass fiber blanket. What is the effect of the covering?

Enter the lower horizontal scale of Figure 4 at TI = 4000, move upward to strike the lower curve, then move left to find an attenuation at 10 000 Hz of 1.8 dB. Next, move to the right from the first intersection point to intersect the upper slant line, then upward from this point to the horizontal scale to find an Access Factor of 0.66. With this sheet covering an absorptive material, you will realize only 66 % of the intrinsic absorption performance of the glass fiber material at 10 000 Hz.

Table 1 presents calculated values of the TI, the Attenuation (A) and the Access Factor (AF) at 10 000 Hz, for a group of the most commonly manufactured perforated metals. You will notice that many popular products have values of TI that come nowhere near the value of 10 000 recommended above for perfect sound transparency.

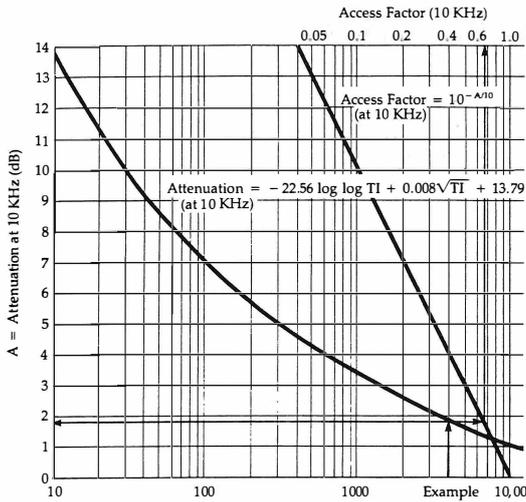


Figure 4

Nomogram for Calculating the Attenuation (A) and the Access Factor (AF), for a Frequency of 10 000 Hz

No matter! Most acoustical problems are concerned with frequencies in the mid-range of 1000 to 4000 Hz. And a glance at Figure 2 will assure you that practically ANY common perforated metal is nearly transparent to sound at those frequencies and below.

So why the emphasis on performance at 10 000 Hz in the Transparency Index? The answer is that a useful distinction in the transparency of perforated metals is possible only at very high frequencies. For example, if we decided to rate our Transparency Index at 1000 Hz, say, this would be no good at all, because all the samples would get the same (nearly perfect) rating. We concentrate here on the 10 000 Hz frequency so that people who are interested in making distinctions in the sound transparency of different samples can do so meaningfully.

### 6. A Case History Illustrating the "Transparency Approach"

A typical application where widespread use is made of perforated metal is in the acoustical treatment of large "hush houses" for the run-up and testing of jet engines. In many cases these facilities are large enough to accommodate an entire airplane for testing.

Since the jet engines on large aircraft are among the noisiest of today's noise sources, it would be intolerably uncomfortable (and often a great hazard to hearing) if people had to work in buildings with these engines, unless very effective methods are introduced for controlling and abating the jet noise.

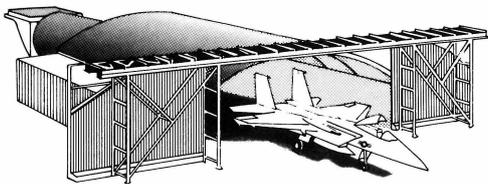


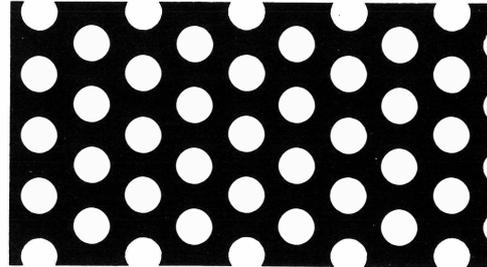
Figure 5

"Hush House", Designed to Confine the Noise of Jet Engine Tune-ups

Among the most effective methods is the treatment of the walls and/or ceiling with sound-absorptive material (typically glass fiber blankets or board), covered with perforated metal for protection and ease of maintenance (Figure 5).

### Example 5

If we must choose a very economical wall treatment, it might consist of a 1.5-inch layer of glass fiber board, faced with perforated metal that has been chosen for the best acoustical transparency consistent with high structural integrity and availability.



For this purpose one might select a stock perforated sheet of 16 gauge steel ( $t = 0.0598''$ ) with  $3/16''$  holes ( $d = 0.188''$ ) on  $5/16''$  centers ( $b = 0.0313''$ ). These dimensions lead to  $n = 12$  holes/sq in,  $P = 32.5\%$  and  $a = b - d = 0.125''$ . We calculate the Transparency Index to be:

$$\begin{aligned} TI &= nd^2/ta^2 \\ &= 12 \times (0.188)^2 / 0.0598 \times (0.125)^2 \\ &= 445. \end{aligned}$$

We can already anticipate from this very low value of TI that we will get some degradation of the performance of the glass fiber board; but the sheet dimensions are in this case determined by structural requirements and availability, so we may not have a better choice.

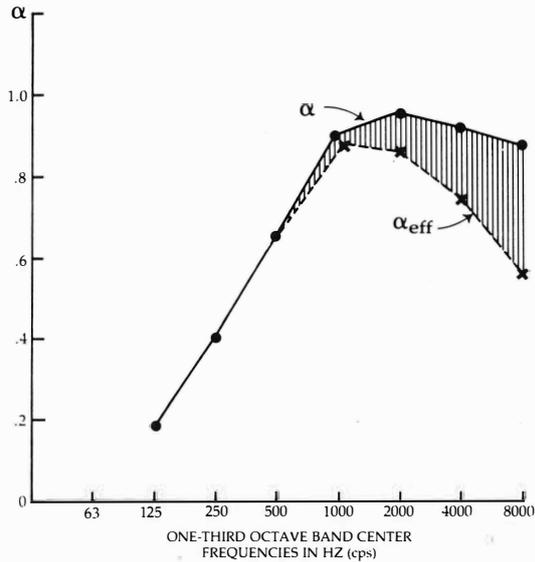
From the nomogram of Figure 4, above, we find the attenuation at 10 000 Hz to be 4.4 dB and the corresponding Access Factor to be 0.36. We can interpolate in Figure 3, which gives the curves of the Access Factor vs frequency, in order to estimate the Access Factor at octave band frequencies down to 500 Hz.

Table 2 gives the sound absorption coefficients at various frequencies for the basic fiber board, as well as the (estimated) Access Factors for the perforated

Freq.	$\alpha$	AF	$\alpha_{eff}$
125	0.18	1.0	0.18
250	0.40	1.0	0.40
500	0.65	1.0	0.65
1000	0.90	0.98	0.88
2000	0.95	0.90	0.86
4000	0.92	0.75	0.69
8000	0.88	0.49	0.43

Table 2

Effect of perforated metal sheet with a low value of TI on the absorption coefficients for glass fiber board



**Figure 6**  
Effect of Perforated Metal Sheet with Low TI on the Absorption of Glass Fiber Board

metal, and finally the effective sound absorption coefficients for the composite structure.

Comparing  $\alpha$  and  $\alpha_{\text{eff}}$ , it is evident that the perforated metal covering is hindering the sound absorption at high frequencies (see **Figure 6**). But this may not be a serious drawback, if there is not much high-frequency energy in the spectrum to be controlled, in the first place. Actually, neither the glass fiber board nor the perforated metal in this example are especially well-selected, but sometimes outside constraints (like cost) prevent the choice of optimum materials.

## 7. Large-Scale Sound Absorptive Treatments Using Perforated Metals

Other acoustical applications that use large quantities of perforated metals as facings for sound absorptive treatments include subway tunnels and stations, and street and highway tunnels and barriers. Because of the extremely crowded conditions in the large cities of Japan, the highways and elevated roadways often pass quite near residential communities, and cause considerable annoyance to the residents because of the noise.

Significant protection can be afforded to these communities by erecting sound barriers along the roadways, in order to shield and absorb the sound of the motor vehicles. In Tokyo alone, there are ninety running miles of such barriers, ranging from 8 to 15 feet in height! A similar large-scale application of perforated metals occurs in the newly built section of the subway in Vienna.

### 7.1. Sound Attenuation and Access Factors for These Treatments

Some of the perforated metal sheets in these treatments have quite large perforations, rather widely spaced (with only a few perforations per sq ft). In view of our earlier discussion of the advantage of numerous small holes, it is of interest to calculate the TI for these large-scale sheets and the corresponding acoustical parameters.

#### Example 6

Let us assume the 1/16" sheet has 1" holes, staggered at 1-1/4" on centers. The Percentage Open Area is 58% and the number of holes per sq in is 0.73; that is:

$$n = 0.73; d = 1.0"; b = 1.25";$$

$$t = 0.063"; \text{ and } a = b - d = 0.25".$$

Then

$$\begin{aligned} \text{TI} &= nd^2/ta^2 \\ &= 0.73 \times (1)^2 / 0.063 \times (0.25)^2 \\ &= 185. \end{aligned}$$

Such a low value of TI implies poor transparency at high frequencies. **Figure 4** indicates an attenuation of 5.9 dB at 10 kHz, and a corresponding Access Factor of only 0.26 at that frequency. But the important frequencies in the noise of roadway and subway traffic are below 2000 Hz. At that frequency, according to **Figures 2** and **3**, the attenuation is only 0.2 dB and the Access Factor is up to 0.91; and, of course, the situation improves for all lower frequencies.

Other properties of the perforated sheet in these applications, such as ruggedness and durability are sometimes more important than the highest acoustical transparency.

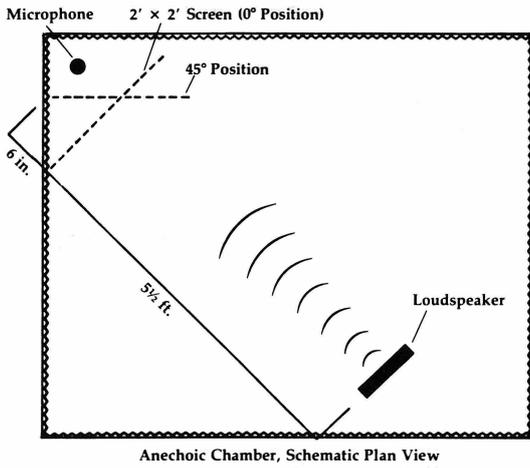
#### LITERATURE

- [1] Cremer, L.; Müller, H. A.: Principles and Applications of Room Acoustics. 2 volumes, translated by Theodore J. Schultz. Applied Science Publishers, Ltd., London 1982.

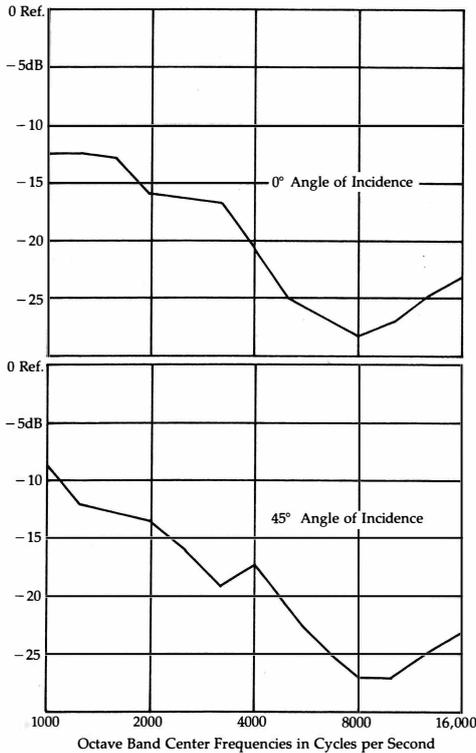
**APPENDIX: Background for the Transparency Index and the Attenuation of Perforated Metal at High Frequencies**

A few years ago some acoustical measurements were made for the purpose of evaluating various kinds of transparent and semi-transparent material to determine how readily they would transmit sound. The experiment was conducted in an "anechoic chamber", namely, a room whose interior surfaces are all covered with highly sound-absorptive material, in order to suppress all sound reflections as completely as possible.

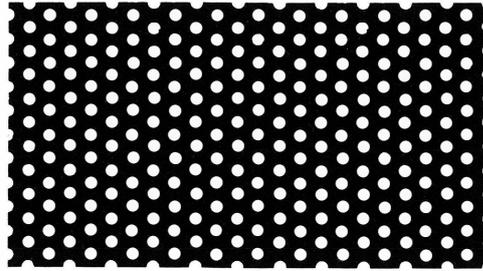
Figure A-1 shows the set-up. A loudspeaker out in the center of the room radiates broad-band sound toward a microphone located in a corner of the room.



**Figure A-1**  
"Direct Path" Test Arrangement

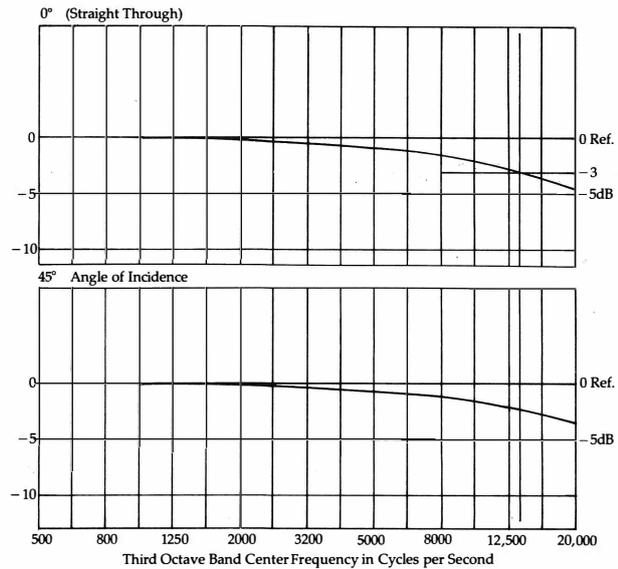


**Figure A-2**  
Differences in Sound Pressure Levels, Showing Insertion Loss of 2' x 2' Plastic Panel (i.e., the "Spill")



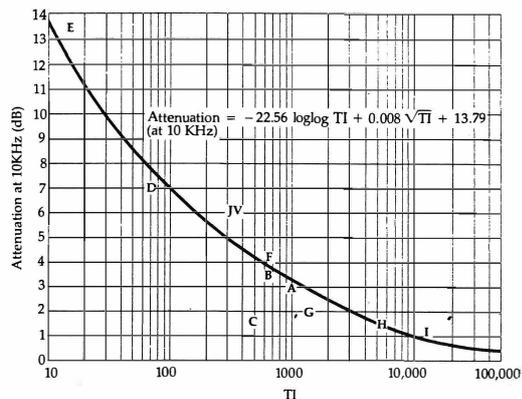
**Figure A-3**  
Material "G", Full Scale

The sound pressure level at various frequencies received by the microphone in this situation is regarded as a baseline. Then, when a sample of perforated material is interposed between the loudspeaker



**Figure A-4**  
Test Results, Insertion Loss vs Frequency for Material "G"

ker and the microphone and the measurements are repeated, the differences, frequency by frequency, between the new measurement and the baseline measurement give an indication of the amount by which the sample attenuates the sound passing through.



**Figure A-5**  
Test Data Points and the Empirically-Fitted Curve of Attenuation at 10 000 Hz vs the Values of Transparency Index (TI)

The measurements were made with two angles for the incident sound: perpendicular ( $0^\circ$ ) and  $45^\circ$ .

**Figure A-2** shows the result of such a measurement with a solid (i. e., acoustically opaque) plastic panel in the sample position, to illustrate that there is very little "sound-spill" around the sample. In other words, this test with a solid sample shows that the measurement procedure accurately assesses the attenuation of the perforated test samples, since there is no significant contamination by sound leaking around the sample.

One sample, Material "G", was perforated metal sheet having No. 8 perforations, 0.066" in diameter, 1/8" on center (73 holes per sq in). The sample was 1/16" thick and 2' x 2' square. It is shown full-scale in **Figure A-3**. The value of TI was 1461. It was tested with  $0^\circ$  and  $45^\circ$  angles of incidence for the incoming sound. The test results are shown here in **Figure A-4**. The attenuation at a frequency of 10 000 Hz was 2 dB for  $0^\circ$  incidence, and 1.5 dB for  $45^\circ$  incidence.

The results of measurements of ten such samples for  $0^\circ$  incidence are given by the lettered data points of **Figure A-5**. The values of the Transmission Index ( $TI = nd^2/ta^2$ ) for the various test samples are indicated on the horizontal scale, while the corresponding values of sound attenuation for a frequency of

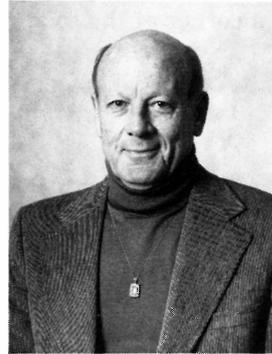
10 000 Hz are shown on the vertical scale. The data point "G" is for the sample described above.

The curve shown on **Figure A-5** was empirically fitted to the measured data points; it corresponds to the following formula:

$$A_{(10 \text{ kHz})} = -22.56 \log \log TI + 0.008 TI^{1/2} + 13.79 \text{ dB} \quad . \quad (A-1)$$

The study on which this paper is based was supported by the Industrial Perforators Association, 710 North Plankinton Avenue, Milwaukee, Wisconsin, 53203 (USA).

#### The Author



Dr. Theodore J. Schultz studied acoustics at Harvard University in Cambridge, Massachusetts (USA). From 1960 to 1983 he was Principal Scientist and Technical Director of Architectural Acoustics and Noise Control at Bolt Beranak and Newman, Cambridge, Mass. Since 1983, he is President of the acoustics consulting firm, Theodore J. Schultz Associates, Boston, Mass.

## SCHALLDÄMMUNG DICKER WÄNDE<sup>1</sup>

VON MANFRED HECKL UND ULRICH DONNER

Manuskript eingegangen am 27. September 1985

Raum- und Bauakustik

### Zusammenfassung

Ausgehend von der Biegewellengleichung von Timoshenko-Mindlin, in der die Schubdeformation und die Drehträgheit berücksichtigt sind, wird eine Näherung für die Berechnung der Schalldämmung von dicken, homogenen Einfachwänden angegeben. Solche Wände mit Dicken von mehr als 25 cm werden beim Bau von Gebäuden mit hohen Ansprüchen an die Schalldämmung (Rundfunk) manchmal verwendet. Es zeigt sich dabei, daß die Schalldämmmaße etwas niedriger sind, als man es auf Grund der bekannten Theorie dünner Wände erwarten würde. Dies stimmt mit Ergebnissen von Schalldämmmessungen überein.

Abschließend wird über die Reziprozität aus den angegebenen Schalldämmmaßen der Realteil der Punkteingangsadmittanzen von dicken, homogenen Einfachwänden berechnet und mit der Anzahl der Eigenmoden einer Platte in Beziehung gebracht.

### Summary Acoustic absorption of thick walls

Starting from the Timoshenko-Mindlin bending wave equation, which includes shear deformation and rotary inertia, an approximate formula for the transmission loss of thick, homogeneous, single walls is given. Such walls with thicknesses of more than 25 cm are used in buildings that have high requirements on sound isolation (e.g., in broadcasting). It is shown that thick walls at high frequencies have a transmission loss which is lower than the values predicted by the thin plate theory. This is in agreement with measured data.

Using the principle of reciprocity, the real part of the input impedance of thick walls is calculated and related to the number of modes in such a plate.

### Sommaire Absorption acoustique des parois épaisses

A partir de l'équation des ondes de vibration de Timoshenko-Mindlin qui tient compte à la déformation et à la torsion, les auteurs proposent une formule approximative pour calculer l'absorption acoustique des parois homogènes épaisses. De telles parois épaisses de plus de 25 cm sont souvent utilisées dans des bâtiments où une absorption acoustique importante est exigée, notamment pour la radiodiffusion. On constate que leur capacité d'absorption acoustique est inférieure à ce que permet de prévoir la théorie connue des parois minces, ce qui est confirmé par les résultats de mesures d'absorption acoustique.

La composante effective de l'impédance d'entrée des murs homogènes épais est calculée et liée au nombre de modes propres d'une paroi selon le principe de réciprocité des capacités données.

### 1. Einleitung

Die Schalldämmung von Einfachwänden ist ein grundlegendes Problem der Bauakustik. Bereits Lord Rayleigh [1] beschäftigte sich damit, wobei er nur die wichtigste Eigenschaft einer Wand, nämlich ihre Masse, berücksichtigte. Qualitativ stimmen die von ihm erhaltenen Ergebnisse mit dem von Berger [2] experimentell gefundenen „Massengesetz“ überein.

Die beiden anderen wichtigen Eigenschaften einer Einfachwand, nämlich ihre Biegesteife und ihre innere Dämpfung, wurden zum ersten Male von L. Cremer [3] in die Theorie der Schalldämmung mit einbezogen. Er konnte zeigen, daß sich die Masse und die Biegesteife einer Wand unter gewissen Bedingungen kompensieren und daß das so entstehende Koinzidenzphänomen oberhalb der sog. Grenzfrequenz für die Schalldämmung allein ausschlaggebend ist. Die Theorie von Cremer ist im Einklang mit den allgemeinen Formeln von Reissner [4], die unmittelbar aus den elastischen Grundgleichungen abgeleitet sind und alle Kombinationen von Schubwellen und Longitudinalwellen in einer dicken Festkörperschicht enthalten. Die Formeln von Reissner werden zwar bei Ultraschalluntersuchungen, bei denen genau definierte Einfallrichtungen vorliegen (vgl. Götz [12]), benutzt, in der Bauakustik werden sie dagegen nicht angewandt, weil die notwendige Mittelung über alle Einfallrichtungen mit großem Aufwand verbunden ist.

In späteren Untersuchungen zum Fragenkomplex „Schalldämmung von Einfachwänden“ standen andere Fragestellungen im Vordergrund, z. B. der Einfluß der Randeinspannung und der Wandfläche (Heckl [5], Josse u. Lamure [6]). Es wurden aber auch Spezialfälle wie der in der Praxis nur sehr geringe Einfluß einer statischen Vorlast (als Zug oder Druck, Czuchaj [7]) und die Schalldämmung von orthotropen Platten (Heckl [8]) untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit soll noch einmal dem grundlegenden Problem nachgegangen werden und der Einfluß der in der einfachen Biegetheorie nicht erfaßten Drehträgheit und der Schubdeformation berücksichtigt werden. Es wird dabei von den Biegewellengleichungen nach Timoshenko [9] und Mindlin [10] ausgegangen, welche Dickenresonanzen, die das akustische Verhalten von Platten bei sehr hohen Frequenzen bestimmen, jedoch nicht berücksichtigen. Es wird sich zeigen, daß bei dicken Wänden und hohen Frequenzen die endliche Schubdeformation zu einer Verringerung der Schalldämmung führt.

### 2. Ausgangsgleichungen

Entscheidend für die Schalldämmung einer unendlich großen Wand ist die sog. Trennimpedanz [3], also das Verhältnis von Druckdifferenz  $p_1 - p_2$  auf beiden Seiten der Platte zu erzeugter Plattenschnelle  $v$ . Wenn die einfallende Welle die Frequenz  $\omega$ , die Einfallrichtung  $\theta$  und in der Plattenebene den Winkel  $\phi$  hat, dann ist der einfallende Schalldruck (siehe Bild 1)

<sup>1</sup> Aufsatz zum Kolloquium anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Lothar Cremer im IRT, München, 21. Sept. 1985.

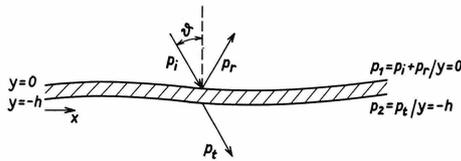


Bild 1

Anregung von dicken Einfachwänden durch ebene Schallwellen

$$p_i \sim e^{-jk_0 x \sin \theta \sin \Phi} \cdot e^{-jk_0 z \sin \theta \cos \Phi} \cdot e^{jk_0 y \cos \theta} \quad (1)$$

und die Trennimpedanz

$$Z_\tau = \frac{p_1 - p_2}{v} \quad (2)$$

Bei den Feldgrößen  $p$  und  $v$  handelt es sich um Zeiger, wobei der Faktor  $e^{j\omega t}$  weggelassen wurde. Die Wellenzahl  $k_0 = \omega/c_0$  ergibt sich aus der Kreisfrequenz  $\omega$  und der Schallgeschwindigkeit  $c_0$  im umgebenden Medium.

Für die einzelnen Modelle von Einfachwänden lauten die Bewegungsgleichungen und die dazugehörigen Trennimpedanzen:

a) „Schlappe Masse“:

$$j\omega m'' v = p_1 - p_2 ; \quad Z_\tau = j\omega m'' \quad (3)$$

b) Biegesteife Platte [3]:

$$B \Delta \Delta v - \omega^2 m'' v = j\omega (p_1 - p_2) ;$$

$$Z_\tau = j\omega m'' - j \frac{B}{\omega} (k_0 \sin \theta)^4 \quad (4)$$

c) Orthotrope Platte [5]:

$$B_x \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + 2 B_{xz} \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial z^2} + B_z \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} - \omega^2 m'' v = j\omega (p_1 - p_2) ;$$

$$Z_\tau = j\omega m'' - \frac{j}{\omega} (k_0 \sin \theta)^4 \cdot [B_x \sin^4 \Phi + 2 B_{xz} \sin^2 \Phi \cos^2 \Phi + B_z \cos^4 \Phi] \quad (5)$$

d) Biegesteife Platte mit Vorspannung [7]:

$$B \Delta \Delta v - T \Delta v - \omega^2 m'' v = j\omega (p_1 - p_2) ;$$

$$Z_\tau = j\omega m'' - j \frac{B}{\omega} (k_0 \sin \theta)^4 - j \frac{T}{\omega} (k_0 \sin \theta)^2 \quad (6)$$

e) Biegesteife Platte mit Schubdeformation und Drehträgheit [9, 10]:

$$B \Delta \Delta v + \omega^2 \left( \frac{B m''}{G^* h} + \frac{m'' h^2}{12} \right) \Delta v - \omega^2 m'' \cdot \left( 1 - \omega^2 m'' \frac{h}{12 G^*} \right) v = j\omega \left( 1 - \omega^2 m'' \frac{h}{12 G^*} \right) (p_1 - p_2) - j\omega \cdot \frac{B}{G^* h} \Delta (p_1 - p_2) ;$$

$$Z_\tau = \frac{j\omega m'' N - j \frac{B}{\omega} M^4 + j \frac{B}{\omega} k_S^2 M^2}{N + M^2 h^2 c_L^2 / 12 c_T^2} \quad (7)$$

mit  $N = 1 - k_T^2 h^2 / 12$ ,  $M = k_0 \sin \theta$ .

In diesen Gleichungen bedeuten

$m''$  = Masse pro Flächeneinheit,

$B$  = Biegesteife einer isotropen Platte,

$B_x, B_z, B_{xz}$  = Biegesteifen einer orthotropen Platte in den einzelnen Richtungen,

$T$  = Vorspannung bzw. statische Belastung,

$\Delta \dots$  = Laplace-Operator

$G^*$  = korrigierte Schubsteife [10],

$h$  = Plattendicke,

$k_T^2 = \omega^2 \rho / G^*$  = korrigierte Schubwellenzahl,

$c_T^2 = G^* / \rho$  = Schubwellengeschwindigkeit,

$c_L^2 = E / \rho (1 - \mu^2)$  = Dehnwellengeschwindigkeit in einer Platte

$k_S^2 = \omega^2 (1/c_L^2 + 1/c_T^2)$ .

Die Materialdämpfung wird im Folgenden dadurch berücksichtigt, daß die Biegesteife  $B$  und der Schubmodul  $G^*$  komplex angenommen werden. Es sollen also gelten

$$B = B_0 (1 + j\eta) ,$$

$$G^* = G_0^* (1 + j\eta) \quad (8)$$

Dabei sind  $B_0$  und  $G_0^*$  die Biegesteife und der Schubmodul ohne Dämpfung.  $\eta$  ist der Verlustfaktor. Mit  $B$  und  $G^*$  werden natürlich auch  $k_T^2$ ,  $c_L^2$ ,  $c_T^2$  und  $k_S^2$  komplex.

### 3. Schalldämmmaße

Es ist bekannt [3], daß der Transmissionsgrad  $\tau$ , also das Verhältnis von durchgelassener und einfallender Schalleistung, und die Trennimpedanz  $Z_\tau$  über die Beziehung

$$\tau = |1 + Z_\tau \cos \theta / 2 \rho_0 c_0|^{-2} \quad (9)$$

zusammenhängen. Dabei ist  $\rho_0$  die Dichte des umgebenden Mediums. Wie man sieht, tritt für  $Z_\tau = 0$  ein Totaldurchgang ( $\tau = 1$ ) auf. Bei verschwindendem Verlustfaktor kann dieser Fall durchaus vorkommen, allerdings erst oberhalb einer Grenzfrequenz, die bei einer biegesteifen Platte mit Schubsteife durch

$$f_g = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B_0}} \cdot \frac{1}{1 - (c_0^2/c_T^2) - (c_0^2/c_L^2)} \quad (10)$$

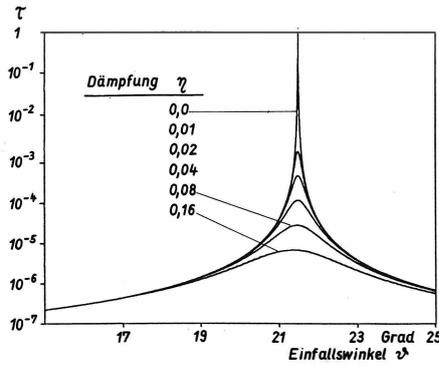
gegeben ist (7). Für Schallübertragung in Luft ist bei allen verwendeten Baustoffen  $c_0 \ll c_L$  und  $c_0 \ll c_T$ ; man kann also den letzten Faktor in (10) in guter Näherung durch 1 ersetzen und erhält so die bekannte Formel für die Grenzfrequenz [3]. Bei Wasserschallproblemen, bei denen  $c_0$  wesentlich größer ist, sollte der Term  $(c_0/c_T)^2$  berücksichtigt werden.

Eine zweite Möglichkeit eines Totaldurchgangs liegt bei  $\cos \theta = 0$ , also bei  $\theta = \pi/2$  vor. Es läßt sich aber zeigen, daß die dabei übertragene Schalleistung keine große Rolle spielt.

Bei der Mittelwertbildung über alle Einfallrichtungen von (9) ist zu beachten, daß für einen gegebenen Winkelbereich in der Nähe der Senkrechten ( $\theta \approx 0$ ) weniger Schallenergie einfällt als bei anderen Richtungen. Das führt dazu [3], daß die Formel für den Transmissionsgrad gemittelt über alle Einfallrichtungen

$$\bar{\tau} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^1 \frac{d\Phi d(\sin^2 \theta)}{|1 + Z_\tau \cos \theta / 2 \rho_0 c_0|^2} \quad (11)$$

lautet.



**Bild 2**

Transmissionsgrade einer 36 cm starken Ziegelwand bei 10facher Grenzfrequenz

$\rho \cdot h = 800 \text{ kg/m}^2$ ,  $E = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $\mu$  (Poissonzahl) = 0,30,  $c_L \approx 2700 \text{ m/s}$

Mit Berücksichtigung von Drehträgheit und Schubdeformation

Trägt man den Integranden über dem Winkel auf, dann sieht man (**Bild 2**), daß die Schallübertragung auf ein Gebiet von nur wenigen Zehntelgrad um den sog. Koinzidenzwinkel konzentriert ist.

Man kann daher, genauso wie es Cremer [3] für die dünne Platte machte, die Funktion  $Z_\tau$  in der Nähe des Koinzidenzwinkels nach  $\sin^2\theta$  entwickeln. Man erhält so

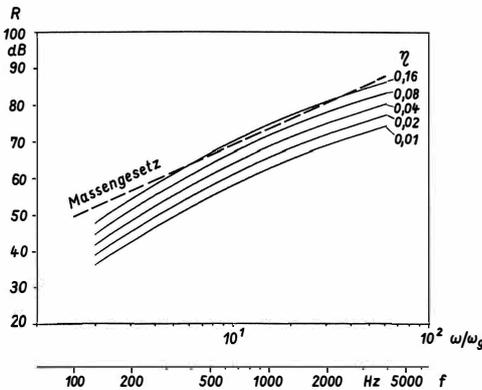
$$\tau = \frac{1}{|1 + D_1 - jD_2(\gamma - \gamma_0)|^2} = \frac{1}{(1 + D_1)^2 + D_2^2(\gamma - \gamma_0)^2} \quad (12)$$

Dabei ist

$$D_1 = \eta \cdot \frac{B_0 \cos \theta_0}{2\rho_0 c_0 \omega} \cdot k_B^4 \cdot \frac{A + k_0^2 k_S^2 \gamma_0 / k_B^4}{1 + \frac{h^2}{12} \left( k_0^2 \frac{c_L^2}{c_T^2} \gamma_0 - k_T^2 \right)},$$

$$D_2 = \frac{B_0 \cos \theta_0}{2\rho_0 c_0 \omega} \cdot \frac{2k_B^2}{k_0^2} \cdot \frac{\sqrt{A + k_S^4 / 4 k_B^4}}{1 + \frac{h^2}{12} \left( k_0^2 \frac{c_L^2}{c_T^2} \gamma_0 - k_T^2 \right)},$$

$$A = 1 - k_T^2 h^2 / 12; \quad \gamma = \sin^2 \theta; \quad \gamma_0 = \sin^2 \theta_0. \quad (13)$$



**Bild 3**

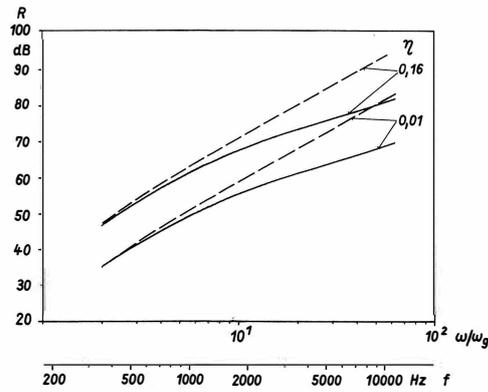
Schalldämmmaß einer 36 cm starken Ziegelwand

$\rho \cdot h = 800 \text{ kg/m}^2$ ,  $E = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $\mu = 0,30$ ,  $c_L \approx 2700 \text{ m/s}$

Mit Berücksichtigung von Drehträgheit und Schubdeformation

Massengesetz

für den senkrechten Schalleinfall



**Bild 4**

Schalldämmmaß einer 20 cm starken Leichtbetonwand

$\rho \cdot h = 260 \text{ kg/m}^2$ ,  $E = 3,8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $\mu = 0,17$ ,  $c_L \approx 1700 \text{ m/s}$

Mit (—) und ohne (---) Berücksichtigung von

Drehträgheit und Schubdeformation

Der Winkel  $\theta_0$  ist derjenige, bei dem für  $\eta = 0$  bzw.  $D_1 = 0$  Totaldurchgang erfolgt. Er ist durch

$$\gamma_0^2 - \gamma_0 k_S^2 / k_0^2 - k_B^4 / k_0^4 = 0 \quad (14)$$

gegeben.

Setzt man (12) in (11) ein, so ist die Integration über  $\gamma_0 = \sin^2\theta$  leicht durchzuführen und man erhält

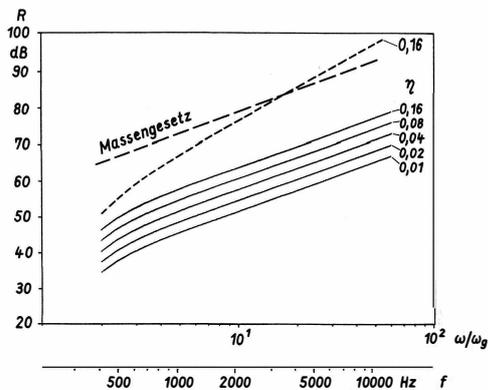
$$\bar{\tau} = \frac{\pi}{(1 + D_1) D_2}. \quad (15)$$

In den **Bildern 3 bis 5** sind für einige Beispiele die nach (15) errechneten Schalldämmmaße, also

$$R = 10 \lg 1/\bar{\tau} \quad (16)$$

aufgetragen. Die Kurven wurden sowohl nach (15) als auch durch numerische Integration von (7) und (11) erhalten. Die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren waren so klein, daß sie im hier benutzten Maßstab zeichnerisch nicht darstellbar sind.

Setzt man die Ausdrücke (13) in (15) ein und berücksichtigt, daß normalerweise  $D_1 \gg 1$ , d. h. daß die Strahlungsdämpfung wesentlich kleiner ist als die sonstige Dämpfung der Platte, so findet man nach einigen Zwischenrechnungen



**Bild 5**

Schalldämmmaß einer 40 cm starken lehmähnlichen Wand

$\rho \cdot h = 800 \text{ kg/m}^2$ ,  $E = 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $\mu = 0,30$ ,  $c_L \approx 740 \text{ m/s}$

Mit (—) und ohne (---) Berücksichtigung von

Drehträgheit und Schubdeformation

Massengesetz für senkrechten Schalleinfall

$$\bar{\tau} = \frac{4\rho_0^2 c_0^2}{\omega^2 \rho^2 h^2} \cdot \frac{\pi k_B^2}{2\eta k_0^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \Theta_0} \cdot \left[ 1 + \frac{h^2}{12} \left( k_0^2 \frac{c_L^2}{c_T^2} \gamma_0 - k_T^2 \right) \right]^2 \cdot \left( A + \frac{k_0^2 k_S^2 \gamma_0}{k_B^4} \right) \sqrt{A + \frac{k_S^4}{4k_B^4}} \quad (17)$$

Wenn die Schubsteife keine große Rolle spielt, wenn also  $k_S^2 \ll k_B^2$  und  $A \approx 1$ , folgt aus (17)

$$\bar{\tau} = \frac{4\rho_0^2 c_0^2}{\omega^2 \rho^2 h^2} \cdot \frac{\pi k_B^2}{2\eta k_0^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \Theta_0} = \tau_{cr} \text{ für } k_S^2 \ll k_B^2 \quad (18)$$

Das ist genau der Ausdruck, den Cremer [3] für dünne Platten gefunden hat.

Im anderen Grenzfall, d. h.  $k_S^2 \gg k_B^2$  (also bei sehr hohen Frequenzen), liefert (17)

$$\bar{\tau} = \tau_{cr} \cdot \frac{\omega}{\omega_g} \cdot \frac{c_0^2}{c_T^2} \cdot g(\mu) \quad (19)$$

( $\omega_g$  = Grenzfrequenz ohne Berücksichtigung der Schubsteife).

Die hier auftretende Funktion  $g(\mu)$  hängt nur schwach von der Poissonzahl  $\mu$  ab. In guter Näherung kann man  $g(\mu) = 2$  setzen. Der Einfluß der Schubdeformation und der Drehträge bewirkt also eine gegenüber dem Cremerschen Ausdruck etwas geringere Schalldämmung, wobei der Unterschied mit wachsender Frequenz zunimmt. Rechnet man (19) in Schalldämmmaße um, so ergibt sich, daß bei bauüblichen Materialien die Schubdeformation die Schalldämmung um

$$\Delta R \approx 3 + 10 \lg \frac{c_0^2 \omega}{c_T^2 \omega_g} \text{ für } \omega \gg \omega_g \quad (20)$$

reduziert. Bei konstantem Verlustfaktor nimmt also das Schalldämmmaß einer dicken Wand nur um 6 dB pro Oktave zu.

Ein in der Praxis sehr häufig auftretender Fall ist auch, daß der Verlustfaktor proportional mit der Frequenz abnimmt. Dies kommt speziell dann zustande, wenn die Energieableitung an den Begrenzungen die Verluste bestimmt und wenn dementsprechend die Körperschallnachhallzeit frequenzunabhängig ist. Unter diesen Voraussetzungen nimmt das Schalldämmmaß einer dicken Wand nur mit 3 dB pro Oktave zu.

Den Vergleich einer gemessenen und einer gerechneten Schalldämmung zeigt **Bild 6**.

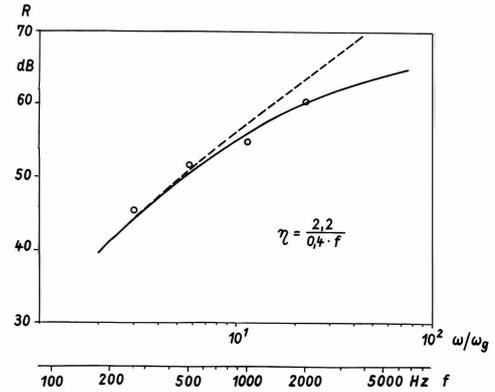
#### 4. Vergleich von Schalldämmmaßen mit Eingangsimpedanzen

Es ist bekannt [11], daß zwischen der mittleren Schnelle einer durch Luftschall angeregten Wand und der von der gleichen Wand bei Punktkraftanregung abgestrahlten Luftschalleistung wegen der Reziprozität ein Zusammenhang besteht. Wenn  $\bar{v}_1^2$  das mittlere Schnellequadrat einer Wand bei Anregung durch ein Halbfeld mit dem Schalldruckquadrat  $\bar{p}_1^2$  ist, dann gilt

$$\bar{v}_1^2 = \beta \bar{p}_1^2 \quad (21)$$

Wenn ferner die von derselben Wand bei Anregung mit der Punktkraft  $F$  abgestrahlte Leistung  $P$  durch

$$P = \alpha F^2 \quad (22)$$



**Bild 6**

**Schalldämmmaß einer 25 cm starken Ziegelwand**  
 $\rho \cdot h = 500 \text{ kg/m}^2$ ,  $E = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ,  $\mu = 0,30$ ,  $c_L \approx 2900 \text{ m/s}$   
 Mit (—) und ohne (---) Berücksichtigung von Drehträge und Schubdeformation  
 Körperschallnachhallzeit ca. 0,4 s im gesamten Frequenzbereich  
 Meßwerte (o)

gegeben ist, dann ergibt sich aus der Reziprozität [11]

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{k_0^2 \rho_0 c_0}{4\pi} \quad (23)$$

Die Größe  $\alpha$  läßt sich aus der Punkteingangsimpedanz  $Z$  der Platte, ihrer Masse und ihrer Fläche berechnen. Man findet [11]

$$P = \rho_0 c_0 S \bar{v}_F^2 / \cos \Theta_0 \sigma = \text{Re} \left\{ \frac{1}{Z} \right\} \cdot \frac{\rho_0 c_0 S F^2 \sigma}{\omega \eta S \rho h} \cdot \frac{1}{\cos \Theta_0} \quad (24)$$

also

$$\alpha = \text{Re} \left\{ \frac{1}{Z} \right\} \cdot \frac{\rho_0 c_0 \sigma}{\omega \eta \rho h} \cdot \frac{1}{\cos \Theta_0} \quad (25)$$

In diesen Gleichungen bedeuten

$S$  = Wandfläche,

$\sigma$  = Abstrahlgrad [11].

Der mittlere Transmissionsgrad einer Wand, die durch ein diffuses Luftschallfeld angeregt wird, berechnet sich aus dem Quotienten von durchgelassener Schalleistung  $P_t$  und einfallender Schalleistung  $P_i$ :

$$\bar{\tau} = \frac{P_t}{P_i} = \frac{4 \rho_0^2 c_0^2 \sigma}{\cos \Theta_0} \cdot \frac{\bar{v}_1^2}{\bar{p}_1^2} \quad (26)$$

also

$$\beta = \frac{\bar{\tau} \cos \Theta_0}{4 \rho_0^2 c_0^2 \sigma} \quad (27)$$

Zwischen dem Realteil der Punkteingangsimpedanz und dem Transmissionsgrad besteht damit der Zusammenhang

$$\text{Re} \left\{ \frac{1}{Z} \right\} = \frac{k_0^2 \rho h \eta \omega \cos^2 \Theta_0}{16 \pi \rho_0^2 c_0^2 \sigma^2} \cdot \bar{\tau} \quad (28)$$

Setzt man den von Cremer gefundenen Transmissionsgrad (17) ein, so erhält man die bekannte Beziehung

$$\text{Re} \left\{ \frac{1}{Z} \right\} = \frac{1}{8 \sqrt{\rho h B_0}} \quad (29)$$

Der Abstrahlgrad wurde dabei zu eins gesetzt, da hier nur das Frequenzgebiet weit oberhalb der Grenzfrequenz interessiert.

Setzt man jedoch den Transmissiongrad nach (17) ein, so folgt

$$\operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{Z} \right\} = \frac{1}{8 \sqrt{\rho h B_0}} \cdot \left[ 1 + \frac{h^2}{12} \left( k_0^2 \frac{c_L^2}{c_T^2} \gamma_0 - k_T^2 \right) \right]^2 \cdot \sqrt{A + \frac{k_0^2 k_S^2 \gamma_0}{k_B^4}} \sqrt{A + \frac{k_S^4}{4 k_B^4}} \quad (30)$$

Für bauübliche Materialien wird daraus bei sehr hohen Frequenzen:

$$\operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{Z} \right\} \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{\omega}{G_0 h} \approx 0,055 \frac{\omega h^2}{B_0} \quad (31)$$

Bei der Anwendung von (31) und auch von (19) ist zu beachten, daß die Timoshenko-Mindlin-Theorie eine Erweiterung der Biegewellentheorie darstellt. Die bei sehr dicken Platten noch auftretenden Dickenresonanzen (S- und P-Wellen), die die Wellenausbreitung bei sehr hohen Frequenzen bestimmen, werden dabei nicht erfaßt. Wenn die Frequenz so hoch ist, daß die Plattendicke gleich oder größer als eine halbe Longitudinalwelle ist, beschreiben die hier angegebenen Formeln das Plattenverhalten nicht mehr vollständig.

### 5. Zusammenhang zwischen Eigenmodendichte und Schalldämmmaß

Mit Hilfe von Energiebetrachtungen kann man zeigen, daß für endliche Systeme mit der Masse  $M$  folgender Zusammenhang zwischen der Eigenmodendichte  $\Delta N/\Delta \omega$  und dem Realteil der Eingangsimpedanz besteht [11]:

$$\frac{\Delta N}{\Delta \omega} \approx \frac{2}{\pi} \cdot M \cdot \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{Z} \right\} \quad (32)$$

Durch Kombination von (32) und (28) kann man also auch Eigenmodendichte und Schalldämmmaß ineinander umrechnen. Die Umrechnung ist allerdings nur dann zulässig, wenn die Schalldämmung durch die sog. freien Wellen (resonant modes) bestimmt ist; d. h. die Frequenz muß über der Grenzfrequenz liegen, so daß die Wellenlänge der resonanzfähigen Moden größer ist als die Wellenlänge im umgebenden Medium, außerdem darf die Dämpfung nicht zu groß sein.

Mit Hilfe von (32) kann man auch (30) nachprüfen. Man muß dabei nur berücksichtigen, daß im Gültigkeitsbereich von (30) die Frequenz bereits so hoch ist, daß die sich aus (7) ergebende Ausbreitungsgeschwindigkeit etwa durch  $c_s = \omega/k_S \approx 0,8 c_T$  gegeben ist (das ist für

$$\omega > \omega_s = \sqrt{12} \cdot \frac{c_s}{c_L} \cdot \frac{c_s}{h}$$

der Fall). Es liegt also bei den hier interessierenden Frequenzen keine Dispersion mehr vor und man kann daher für die Eigenmodendichte dieselbe Formel anwenden wie für einen Flachraum, d. h.

$$\frac{\Delta N}{\Delta \omega} \approx \frac{S \omega}{4 \pi c_s^2} \quad \text{für } \omega > \omega_s > \omega_g \quad (33)$$

Hierbei ist  $S$  die Wandfläche. Setzt man diesen Ausdruck in (32) ein, so ergibt sich

$$\operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{Z} \right\} \approx \frac{1}{8} \cdot \frac{\omega}{\rho h c_s^2} \quad \text{für } \omega > \omega_s > \omega_g,$$

also praktisch dasselbe Ergebnis wie im letzten Abschnitt. Die kleinen Unterschiede sind auf die Verschiedenheit von Schubsteife und korrigierter Schubsteife zurückzuführen.

### SCHRIFTTUM

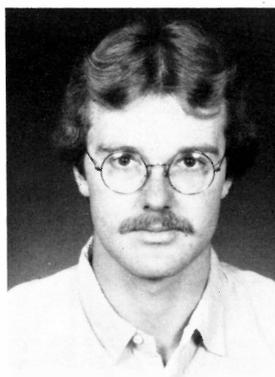
- [1] Lord Rayleigh: Theory of sound II, § 271. Macmillan Company, London 1877.
- [2] Berger, R.: Über die Schalldurchlässigkeit. Dissertation. Technische Hochschule München, 1911.
- [3] Cremer, L.: Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. Akust. Z. 7 (1942), S. 81 bis 104.
- [4] Reissner, H.: Der senkrechte und schräge Durchtritt einer in einem flüssigen Medium erzeugten ebenen Dilationswelle durch eine in diesem Medium befindliche planparallele, feste Platte. Helvetia Physica Acta 11 (1938), S. 140 bis 155.
- [5] Heckl, M.: Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche. Acustica 10 (1960), S. 98 bis 108.
- [6] Josse, R.; Lamure, C.: Transmission du son par une paroi simple. Acustica 14 (1964), S. 266 bis 280.
- [7] Czuchaj, J.: Schalldämmung, Abstrahlung und Impedanz von ebenen Platten mit axialer Belastung. Acustica 58 (1985), S. 27 bis 38.
- [8] Heckl, M.: Untersuchungen an orthotropen Platten. Acustica 10, (1960), S. 109 bis 115.
- [9] Timoshenko, S. P.: Schwingungsprobleme der Technik. Abschnitt 41. Springer-Verlag, Berlin 1932.
- [10] Mindlin, R. P.: Influence of rotary inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates. J. Appl. Mech. 18 (1951), S. 31 bis 38.
- [11] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Kaptitel 4 und 6. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 1982.
- [12] Götz, J.: Über den Schalldurchgang durch Metallplatten in Flüssigkeiten bei schrägem Einfall einer ebenen Welle. Akust. Z. 8 (1943), S. 145 bis 168.

### Die Autoren



Professor Dr. rer. nat. Manfred Heckl (55) studierte Physik an der Universität München. 1957 Promotion an der TU Berlin. Von 1959 bis 1962 Mitarbeiter in einem Ingenieurbüro für Akustik in den USA. 1962 bis 1973 leitender Angestellter in einem Ingenieurbüro für Akustik in München. 1967 Habilitation.

Seit 1973 Hochschullehrer am Institut für Technische Akustik im Fachbereich Umwelttechnik der TU Berlin.



Dipl.-Ing. Ulrich Donner (29) studierte Umwelttechnik an der Technischen Universität in Berlin. Nach dreijähriger Tätigkeit beim schalltechnischen Beratungsbüro Müller-BBM in München ist er seit 1984 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Technische Akustik, Berlin.

SCHALLSCHUTZ IM WOHNUNGSBAU — WELCHE BEURTEILUNGSKRITERIEN?<sup>1</sup>

VON RALF KÜRER

Manuskript eingegangen am 5. Dezember 1985

Raum- und Bauakustik

**Zusammenfassung**

Für die Kennzeichnung der Schalldämmung von Bauteilen hat sich das bewertete Bauschalldämmmaß als Einzahlengabe bewährt. Zur Beschreibung des Schallschutzes zwischen Räumen sollte dagegen besser eine andere Kenngröße benutzt werden. Nach Auffassung des Autors sollte hierfür vorzugsweise die nachhallzeitreduzierte Schallpegeldifferenz nach DIN 52 210 benutzt werden. Hierdurch würde die Klarheit bezüglich der am Bau einzuhaltenden Schallschutzanforderungen deutlich verbessert. Darüber hinaus wird vorgeschlagen, die Anforderungen für die verschiedenen Bereiche des baulichen Schallschutzes (Luftschall außen/innen, Trittschall, Nutzer- und Betriebsgeräusche) weiter zu einer „Schallschutzklasse“ zusammenzufassen. Hierdurch würde die notwendige Abstimmung zwischen diesen einzelnen Anforderungsbereichen gefördert und eine für den Laien verständlichere Beschreibung erreicht.

**Summary Criteria for the evaluation of acoustic isolation in dwellings**

Evaluation of acoustic loss is the only way of determining the acoustic isolation of materials. It is nevertheless preferable to use a different parameter to evaluate the acoustic isolation between rooms. For this purpose, the author advises using the difference in acoustic level with reduced reverberation time according to the DIN 52 210 standard. This will appreciably improve the accuracy of observed parameters concerning acoustic isolation in buildings. It is also proposed to unify the characteristics for different categories of structural acoustic isolation (internal and external air-borne noise, footsteps, work-related noise). This would enable the various characteristics to be made uniform and rendered more-easily understood by non-experts.

**Sommaire Critères d'évaluation de l'isolation acoustique dans des immeubles d'habitation**

L'évaluation de l'affaiblissement acoustique constitue le seul moyen de déterminer l'isolation acoustique des matériaux. Par contre, il est préférable d'utiliser une autre valeur caractéristique pour évaluer l'isolation acoustique entre des locaux. L'auteur conseille à cet effet de se baser sur la différence de niveau acoustique avec réduction du temps de réverbération selon la norme DIN 52 210. On améliorera ainsi considérablement la précision des caractéristiques à observer en matière d'isolation acoustique dans la construction. On propose en outre d'unifier les caractéristiques propres aux différentes catégories d'isolation acoustique structurelle (sons aériens intérieurs et extérieurs, bruits de pas, bruits d'activité). Cela permettrait d'uniformiser les diverses caractéristiques et d'en faciliter la compréhension par le profane.

**1. Einführung**

Der Schutz vor Lärm ist eine wichtige Voraussetzung für gesunde Lebensverhältnisse. Die Höhe der Lärmbelastung unserer Bevölkerung ist aber in Teilbereichen so hoch, daß wir beunruhigt sein müssen. Störungen durch Lärm im besonders schützenswerten Wohnbereich sind eine sehr häufige Beschwerdequelle. Es sind zwar noch keine genauen statistischen Daten bekannt, bei den Beratungsstellen des DAL (Deutscher Arbeitsring für Lärmbekämpfung) liegt aber der Prozentsatz von Klagen über Wohnnachbarschaftslärm besonders hoch.

Während beim Schallschutz im Außenbereich die Notwendigkeit von Lärmbekämpfungsmaßnahmen unbestritten ist und nur wegen noch schwerwiegender Umweltbelastungen nicht so zügig wie wünschenswert vorankommt, scheint sich neuerdings beim Schallschutz im Innenbereich eine Tendenz zur Negierung der Notwendigkeit von erhöhten Anstrengungen abzuzeichnen. Der vorhandene Stand der Bautechnik wird – im übrigen auch unter Hinweis auf weniger fortschrittliche Praktiken im Ausland – als zu aufwendig und zu kostspielig bezeichnet.

Dem muß entgegengehalten werden, daß die Zahl der durch Lärm störenden Geräte auch im häuslichen Bereich stetig zugenommen hat, daß das Verhalten den Nachbarn gegenüber eher unkümmert wurde, und daß dennoch der eigene Ruheanspruch zugenommen hat.

Wissenschaftliche Untersuchungen haben außerdem gezeigt, daß es für Lärmbetroffene besonders wichtig ist, den Lärm „bewältigen“ zu können [1], d. h. die Lärmursache abstellen zu können oder sich an einen ruhigen Ort, vorrangig die eigene Wohnung zurückziehen zu können. Die Ruhe im eigenen Wohnbereich ist daher ein so wertvolles Gut, daß sie nicht zur Disposition wirtschaftlicher Interessen stehen kann.

Nun kommen, wie oben bereits erwähnt, aber dennoch aus dem häuslichen Bereich besonders viel Klagen über Lärmstörungen. Eigentlich muß dies erstaunen, bedenkt man den bei uns vorliegenden hohen bauakustischen Standard und die guten Kenntnisse der bauakustischen Grundlagen, die wir insbesondere auch den hervorragenden Arbeiten von Professor Lothar Cremer verdanken.

Mein heutiges Anliegen soll es nicht sein, mich mit der Höhe der bauakustischen Anforderungen auseinanderzusetzen. Dies habe ich ausführlich letztes Jahr in schriftlicher Form getan [2]. Mein Anliegen soll es vielmehr sein, zu untersuchen, ob die z. Z. bei uns benutzten Anforderungskriterien Grund dafür sind, daß die Bauausführungspraxis deutlich hinter den Erwartungen zum Schallschutz zurückbleibt.

**2. Bauakustische Kriterien****2.1. Schalldämmung von Bauteilen**

Aus der Sicht der Bauausführenden besteht der Wunsch, Bauteile so zu kennzeichnen, daß eine von der akustischen Quell- und Empfangssituation unab-

<sup>1</sup> Aufsatz zum Kolloquium anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Lothar Cremer im IRT, München, 21. September 1985.

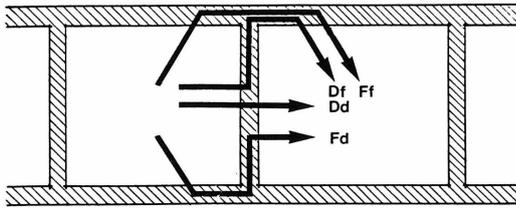


Bild 1

Schemazeichnung der Luftschallübertragungswege am Bau nach DIN 52 217

hängige Beschreibung vorliegt. Hierzu wird die Schalldämmung eines Bauteils ermittelt.

Die schalldämmende Wirkung eines Bauteils kommt jedoch je nach Einbau am Bau unterschiedlich zur Wirkung. Grundsätzlich sind hierbei die in Bild 1 gezeigten Übertragungswege, deren Kennzeichnung auf eine Anregung von Cremer zurückgeht (zitiert aus [9]), zu beachten. Die aufgrund von Prüfstandsmessungen vorgenommene Kennzeichnung der Schalldämmung einer Wand läßt sich nur dann auf die Verhältnisse am Bau übertragen, wenn dort die gleichen Einbauverhältnisse, d. h. die gleichen Einzelwegübertragungen vorgefunden werden. Am eindeutigsten beschreibbar ist die Schalldämmung, wenn man jeden Übertragungsweg einzeln betrachten kann.

Die Schalldämmung ist definiert als das Verhältnis von auftreffender zu abgestrahlter Schalleistung. Für den Fall, daß nur der Weg Dd betrachtet wird, ist das Schalldämmmaß der Trennwand durch Gleichung (1) gegeben:

$$R_d = 10 \lg \left( \frac{N_{Sd}}{N_{Ed}} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

- $R_d$  = Schalldämmmaß in dB
- $N_{Sd}$  = auf die Trennwand treffende Schalleistung
- $N_{Ed}$  = von der Trennwand abgestrahlte Schalleistung.

Zur meßtechnischen Bestimmung der Schalldämmung werden in der Regel die Schalldruckpegel in den Räumen, die durch das Bauteil getrennt werden, gemessen. Unter gewissen Annahmen kann man dann mit Hilfe der folgenden Meßgleichung – wie Mechel sie nennt [3] – das gesuchte Leistungsverhältnis berechnen:

$$R_d = L_S - L_E + 10 \lg \left( \frac{S_d}{A_E} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

- $L_S$  = mittlerer Schalldruckpegel im Senderraum in dB
- $L_E$  = mittlerer Schalldruckpegel im Empfangsraum in dB
- $S_d$  = Trennwandfläche im Senderraum in  $\text{m}^2$
- $A_E$  = äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum in  $\text{m}^2$ .

Zur Ableitung der Meßgleichung wird angenommen, daß die im Senderraum auftreffende Schalleistung gemäß Gleichung (3) und die abgestrahlte gemäß Gleichung (4) mit dem gemessenen Schalldruck

zusammenhängen. Es werden also in beiden Fällen diffuse Schallfeldverhältnisse angenommen!

$$N_{Sd} = \frac{S_d}{4 \rho c^2} \cdot \tilde{p}_S^2 \quad (3)$$

$$N_{Ed} = \frac{A_E}{4 \rho c^2} \cdot \tilde{p}_E^2 \quad (4)$$

- $\tilde{p}_S$  = Effektivwert des mittleren Schalldrucks im Senderraum
- $\tilde{p}_E$  = Effektivwert des mittleren Schalldrucks im Empfangsraum
- $\rho c$  = Schallkennwiderstand der freien Luft
- $c$  = Schallausbreitungsgeschwindigkeit.

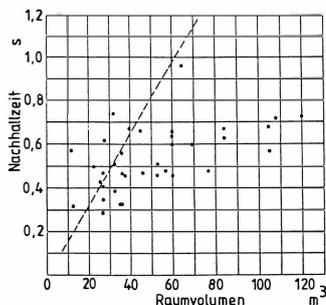
In der Bauakustik ist es bisher üblich, nur den Frequenzbereich von 100 bis 3200 Hz zu betrachten. In letzter Zeit wird aber immer häufiger gefordert, auch Dämmwerte bei tieferen Frequenzen als 100 Hz anzugeben. Deren meßtechnische Ermittlung sei heute aufgrund moderner Gerätetechnik kein Problem. Hier ist eine Warnung am Platze: Es muß jeweils geprüft werden, ob die Voraussetzungen für die Gleichungen (2) bzw. (3) und (4) unterhalb von 100 Hz überhaupt noch gültig sind!

Die Kennzeichnung von Bauteilen durch ihre Schalldämmung bzw. ihr Schalldämmmaß hat tatsächlich viele Vorteile. Auch das Problem der Vergleichbarkeit der Einbaubedingungen im Prüfstand und am Bau konnte die Generation der Bauakustiker um Professor Cremer dadurch in den Griff bekommen, daß Prüfstände mit „bauüblichen“ Nebenwegen eingeführt wurden. Dies war sicher ein sehr praxisnaher Weg, der sich bei der damals üblichen Schwerbauweise bewährt hat.

Hatte man einmal für eine Baukonstruktion eine Eignungsprüfung durchlaufen, so erübrigten sich weitere Laborgutachten. Die ermittelten Dämmwerte konnten zusammen mit genauen Konstruktionsbeschreibungen in einen Bauteilkatalog aufgenommen werden (z. B. DIN 4109 Teil 3). Auch die Gefahr, daß „Laborschönheiten“ hingetrimmt wurden, war nicht sehr groß, denn die damalige Eignungsprüfung umfaßte drei Nachmessungen am Bau während eines Zeitraumes von zwei Jahren nach der Labormessung. Bedauerlicherweise haben die Bauaufsichten fast nie darauf geachtet, daß Eignungsprüfungen ohne diese Nachmessungen am Bau spätestens nach zwei Jahren ungültig wurden. Aus dieser Nachlässigkeit wurde dann für die Neuauflage der DIN 4109 (Entwurf 1984), m. E. zu Unrecht, abgeleitet, daß kein „Bedarf“ für derartige Nachprüfungen am Bau sei und der entsprechende Teil der Eignungsprüfung entfiel im neuen Normentwurf 1984.

## 2.2. Schalldämmung zwischen Räumen

Liegen also am Bau die gleichen akustischen Randbedingungen vor wie im Labor, dann ist die Dämmung zwischen den beiden Räumen auch gleich der im Prüfstand ermittelten oder im Bauteilkatalog angegebenen Dämmung des Trennbauteils. Diese Gleichheit der Randbedingungen ist nun leider bei den heutigen Bauweisen nicht immer sichergestellt. Die resultierende Schalldämmung zwischen den Räumen



**Bild 2**

Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit und dem Volumen bei Wohnräumen verschiedener Größe

(100 bis 3150 Hz)

--- = Nachhallzeit bei äquivalenter Absorptionsfläche  $A = 10 \text{ m}^2$

weicht dann von der Schalldämmung des trennenden Bauteils ab – in der Regel ist sie wegen des stärker werdenden Einflusses der Flankenübertragung geringer. Bei der Angabe der erforderlichen Dämmwerte in DIN 4109 wird zwar darauf hingewiesen [4], daß die Dämmwerte von der Gesamtanordnung der trennenden Bauteile einzuhalten sind – also nicht nur von der eigentlichen Trennwand oder der Trenndecke. Die Praxis zeigt aber, daß dies leicht übersehen wird. Fälschlicherweise wird teilweise der einzelne Bauteildämmwert mit der Gesamtdämmwertanforderung zwischen den Räumen gleichgesetzt.

Dies wäre dann nicht so schlimm, wenn der z. B. über die flankierenden Wege durchgelassene Schall gegenüber dem durch die Trennwand durchgelassenen vernachlässigt werden könnte. Wenn dies nicht der Fall ist, dann wird die sich zwischen den Räumen ergebende und eigentlich sicherzustellende Schallpegeldifferenz nicht mehr durch den Schalldämmwert der Trennwand beschrieben. Eine Vernachlässigung der Nebenwegübertragung bei der Bauplanung kann dann selbst bei einwandfreiem Trennbauteil zu Beanstandungen bei den Nachprüfungen am Bau führen.

Hier liegt m. E. einer der Mängel unserer existierenden Kriterien für den baulichen Schallschutz: Die gleiche Bewertungsgröße – die Schalldämmung – wird einmal für eine Bauteildämmung und ein anderes Mal für eine Schutzanforderung zwischen Räu-

men benutzt. Dies führt zwangsläufig zu Unklarheiten in der Baupraxis.

**2.3. Schallpegeldifferenzen zwischen Räumen**

Die Forderung von Frau J. Lang [5], daß – allein schon aus didaktischen Gründen – Schallschutzanforderungen zwischen Räumen anders als durch eine Schalldämmzahl beschrieben werden sollten, ist daher sicher völlig berechtigt. Hierfür bietet sich fast automatisch die Angabe einer Schallpegeldifferenz an. Zur Auswahl stehen die bereits in DIN 52 210 Teil 1 (1984) angegebenen Größen: die „Normschallpegeldifferenz  $D_n$ “ [Gleichung (5)] oder die „Nachhallzeitreduzierte Schallpegeldifferenz  $D_{nT}$ “ [Gleichung (6)].

$$D_n = L_S - L_E + 10 \lg \left( \frac{A_0}{A_E} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

$$A_0 = 10 \text{ m}^2.$$

$$D_{nT} = L_S - L_E + 10 \lg \left( \frac{T_E}{T_0} \right) \text{ dB} \quad (6)$$

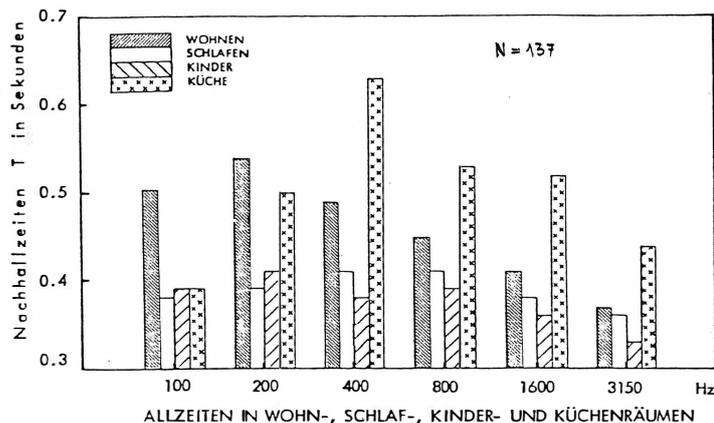
$$T_E = \text{Nachhallzeit im Empfangsraum}$$

$$T_0 = 0,5 \text{ s.}$$

Oft wird gegen die Verwendung dieser Pegeldifferenzen als Anforderungskriterium eingewandt, daß man dann ja je nach Möblierung der Räume unterschiedlich dämmende Wände einbauen müßte. Genau das Gegenteil ist der Fall: Die Definitionen besagen, daß man von einem „normal“ möblierten Raum auszugehen hat und die meßtechnisch bestimmte Pegeldifferenz entsprechend dem jeweiligen Raumzustand zu korrigieren hat.

Aus dem Wunsch, die Schallpegeldifferenz auf einen „normalen“ Raum zu beziehen, kann man auch die Entscheidung für  $D_n$  oder  $D_{nT}$  ableiten. Es hat sich nämlich gezeigt, daß die Nachhallzeit in Wohnräumen – relativ unabhängig vom Volumen – etwa 0,5 s beträgt (siehe Bild 2 aus [5] und Bild 3 aus [6]). Dagegen gibt die äquivalente Schallschluckfläche von  $10 \text{ m}^2$  die „Normal“-Verhältnisse nicht richtig wieder (siehe Bild 2).

Der Zusammenhang zwischen der nachhallzeitreduzierten Schallpegeldifferenz und dem Dämmmaß läßt sich für den Fall, daß andere Schallwege als der



**Bild 3**

Mittlere Nachhallzeit in verschiedenen Wohnräumen

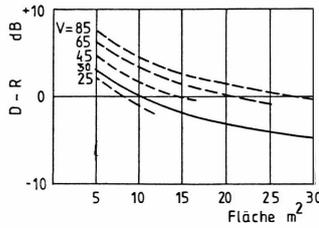


Bild 4

Zusammenhang zwischen Schalldämmmaß R des Trennbauteils und Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit von der Fläche des Trennbauteils

(Trennwandfläche im Senderraum)

Parameter V: Volumen des Empfangsraums

— =  $D_n$  für  $A = 10 \text{ m}^2$

- - - =  $D_{nT}$  für Nachhallzeit 0,5 s und verschiedene Volumina V in  $\text{m}^3$

Weg  $D_d$  in Bild 1 vernachlässigt werden können, aus den Gleichungen (2) und (6) ableiten:

$$D_{nT} = R + 10 \lg \left( \frac{V_E}{S_d} \right) - 5 \text{ dB} \quad (7)$$

$V_E$  = Volumen des Empfangsraumes in  $\text{m}^3$

$S_d$  = Trennwandfläche im Senderraum in  $\text{m}^2$ .

Wie man sieht, ist dieser Zusammenhang abhängig vom Raumvolumen des Empfangsraums und der Trennwandfläche im Senderraum. Auch dies wird von Kritikern dieser Vorgehensweise beanstandet: Man müsse unterschiedliche Dämmungen vorsehen, je nachdem wie groß der angekoppelte Raum und die Trennwand sei. Dies sei nicht praktikabel. Dem ist entgegenzuhalten, daß man dem Gleichbehandlungsprinzip beim Schallschutz nicht dann entspricht, wenn man gleiche Dämmungen vorsieht, sondern dann, wenn gleicher Schutz erreicht wird. Gleichem Schutz entspricht aber sicher eher die gleiche Schallpegeldifferenz zwischen den Räumen, und dies macht eben eine Anpassung an die von der Bauplanung vorgegebenen Bauabmessungen notwendig. In Bild 4 sieht man, welche Unterschiede der Schallpegeldifferenzen für unterschiedliche Kombinationen von Volumen und Trennwandfläche auftreten können.

Am Bau finden wir ohne weiteres Verhältnisse von  $(V_E/S_d)$  zwischen 2 und 5. Dies würde bei gleichbleibender Schalldämmung der Wand immerhin zu einem Unterschied der Schallpegeldifferenzen von 4 dB führen. Derartige Unterschiede sind aber sicher nicht mehr zu vernachlässigen. Dies geht allein schon daraus hervor, daß bei den hier zur Diskussion stehenden Lautstärken im häuslichen Bereich [20 bis 30 dB (A)] bereits Unterschiede von 4 bis 5 dB (A) zu einer Lautheitsverdoppelung oder -halbierung führen (siehe Bild 5 aus [7]).

#### 2.4. Nebenwegübertragungen

Nun ist aber leider bei der heutigen Bauweise keineswegs nur der Weg  $D_d$  hauptsächlich für die Schalldurchlässigkeit verantwortlich. Durch die Berücksichtigung weiterer Übertragungswege wird dann allerdings der Zusammenhang zwischen Schallpegeldifferenz und Dämmwerten sehr viel komplizierter.

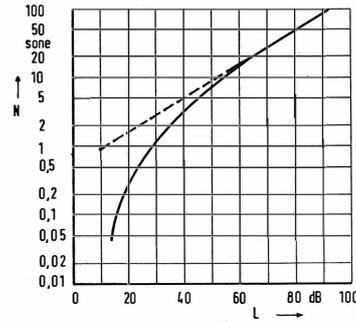


Bild 5

Lautheit N als Funktion des Schallpegels L bei Beschallung mit rosa Rauschen

Schon wenn man nur die (vier) Übertragungswege  $F_f$  berücksichtigen muß, sie aber immerhin noch als nicht beeinflusst durch die Art der Ankopplung der Trennwand annimmt, ist in Gleichung (7) statt R das resultierende Schalldämmmaß  $R_{res}$  gemäß Gleichung (8) und statt  $S_d$  die Gesamtoberfläche der Trennwand und der flankierenden Bauteile im Empfangsraum einzusetzen.

$$R'_{res} = -10 \lg \cdot \left\{ \frac{1}{S_Y} \cdot [S_d \cdot 10^{-0,1 R_d} + \sum_{i=1}^4 (S_{S_{fi}} \cdot 10^{-0,1 R_{fi}})] \right\} \text{ dB} \quad (8)$$

$S_{Sf}$  = Fläche der flankierenden Wand im Senderraum

$S_Y$  = Summe der Auftreffflächen im Senderraum.

Hierbei wurde für die Flankendämmung  $R_f$  gemäß der Definition für die Schalldämmung in Gleichung (1) die auf die flankierende Wand im Senderraum auftreffende Schalleistung  $N_{Sf}$  ins Verhältnis zur von der flankierenden Wand im Empfangsraum abgestrahlten Schalleistung  $N_{Ef}$  eingesetzt. Dies entspricht nicht den bisher benutzten Definitionen für die Flankenschalldämmung (siehe auch [3]), führt aber zu einheitlichen Betrachtungsweisen.

$$R_f = 10 \lg \left( \frac{N_{Sf}}{N_{Ef}} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

Im allgemeinen kann man aber die Kopplung zwischen flankierenden und trennenden Bauteilen keineswegs vernachlässigen. Auch hierzu hat der Jubilar schon sehr früh entscheidende Erkenntnisse beige-steuert [8]. In letzter Zeit ist dieses Thema aus Anlaß der Aufstellung von Anforderungen zum Schallschutz zwischen Räumen im Rahmen der DIN 4109 wieder aufgegriffen worden [9]. Frau Lang berechnet auch schon die Schallpegeldifferenz  $D_n$  bei unterschiedlichen Flankenanschlüssen [5].

Das schwierige Thema der Berücksichtigung von flankierenden Übertragungsweisen sei hiermit wieder in die Sorge der bauakustischen Forscher zurückgegeben. Die derzeitige Situation, daß den Baupraktikern gegenüber so getan wird, als ob durch die Vorgabe von Dämmwerten von Einzelbauteilen eine ausreichende Beschreibung für die notwendigen Maßnahmen zum Schallschutz zwischen Räumen gegeben ist, kann aber auf keinen Fall befriedigen.

Hier scheinen die Wege, die im Ausland besprochen werden, daß nämlich geeignete baukonstruktive Kombinationen von Flanken- und Trennbauteilen in die Informationsschriften für die Baupraxis beschrieben werden, besser geeignet [5]. Es wird hiermit angeregt, daß entsprechende Unterlagen auch für die in Deutschland üblichen Bauweisen erarbeitet werden.

### 2.5. Einzahlkriterien

Nun weiß man, daß die Schalldämmung einer Anordnung meist stark frequenzabhängig ist. Bei bauakustischen Kennzeichnungen kommt es aber darauf an, daß sie auch von Nichtakustikern einfach benutzt werden können. Deshalb hat man schon sehr früh versucht, statt der ausführlichen Information mittels Frequenzgangkurven eine Einzahlkennzeichnung vorzunehmen. Hierbei benutzte man anfangs „mittlere“ Schalldämmmaße (siehe **Bild 6**). Wie Cremer ausführlich in seinen Ausführungen „Sinn der Sollkurven“ beschreibt [10], ist es aber nicht sinnvoll, eine Einzahlangabe wie das „mittlere Schalldämmmaß  $R_m$ “ zu benutzen, bei der z. B. schlechter Schallschutz bei tiefen Frequenzen durch guten Schallschutz bei hohen Frequenzen kompensiert wird. Statt dessen hat man sich vor allem hier im deutschsprachigen Raum bemüht, diese gewünschte Einzahlangabe aus einem Vergleich der Wirksamkeit einer gegebenen Baukonstruktion mit einer bekannterweise guten Sollkonstruktion abzuleiten.

Hierzu wurde die „einstinstarke“ Vollziegelwand benutzt und daraus eine Sollkurve abgeleitet. Deren frequenzabhängige Dämmkurven werden in **Bild 7** gezeigt. Von dieser Wand sagt Cremer [10]: „Nun ist zweifellos die 25 cm dicke, verputzte Vollziegelwand eine schalltechnisch gute Wand, die früher als Wohnungstrennwand allgemein üblich war und dort nie zu Beanstandungen geführt hat. Man hat daher bei der Suche nach einer Vergleichs-, evtl. sogar Grenzkurve mit Recht diese Konstruktion zum Ausgangspunkt genommen.“ Dem ist heute nur noch hinzuzufügen, daß diese Wand ein bewertetes Bauschalldämmmaß (also mit „bauüblichen“ Nebenwegen!) von 54 dB hat.

In ähnlicher Weise wurde eine Sollkurve für den Trittschallschutz festgelegt. Der Einzahlwert wird nun so ermittelt, daß man die Bereiche aufsummiert, in denen die zu prüfende Konstruktion schlechter ist als die Sollkurve. Man verschiebt dann die Sollkurve so lange, bis der Mittelwert der Aufsummierung kleiner oder gleich 2 dB ist. Früher gab man direkt die vorgenommene Verschiebung der Sollkurve als Trittschall- oder Luftschallschutzmaß an. Heute geben wir bei der Luftschalldämmung als „bewertetes Schalldämmmaß“ den 500-Hz-dB-Wert der verschobenen Sollkurve an.

Die Verwendung des bewerteten Bauschalldämmmaßes  $R_w$  als Einzahlkriterium für die bauakustische Kennzeichnung von Bauteilen hat sich bewährt. Sie hat sich in der Baupraxis eingebürgert und sollte daher beibehalten werden.

Zur Kennzeichnung des Schallschutzes zwischen Räumen sollte aber eine Weiterentwicklung im Sinne der vorangegangenen Ausführungen erfolgen und daher die bewertete, nachhallzeitreduzierte Schall-

pegeldifferenz  $D_{nT,w}$  als Anforderungswert vorgegeben werden.

In Fällen, in denen alle Übertragungswege außer der jeweiligen Trennwand oder -decke zu vernachlässigende Beiträge zur Schallübertragung zwischen den betrachteten Räumen liefern, z. B. beim Wohnungsbau in schwerer Massivbauweise, läßt sich die erforderliche Dämmung  $R_{d,w}$  dieser Trennelemente einfach mittels Gleichung (10) bestimmen:

$$R_{d,w} = D_{nT,w} - 10 \lg \left( \frac{V_E}{S_d} \right) + 5 \text{ dB} \quad (10)$$

$R_{d,w}$  = bewertetes Bauschalldämmmaß der Trennwand oder -decke in dB

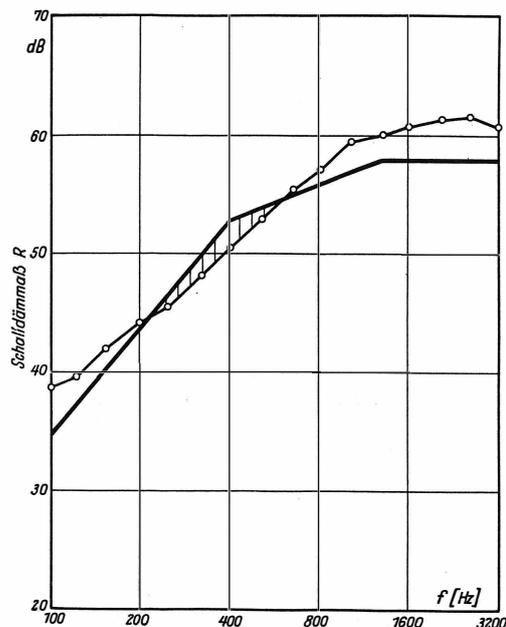
$D_{nT,w}$  = bewertete nachhallzeitreduzierte Schallpegeldifferenz in dB

$V_E$  = Volumen des Empfangsraumes in  $\text{m}^3$

$S_d$  = Trennfläche im Senderaum in  $\text{m}^2$ .

Bei einem Verhältnis ( $V_E/S_d$ ) von 3 ist das bewertete Bauschalldämmmaß  $R_{d,w}$  gleich der nachhallzeitreduzierten Schallpegeldifferenz, so z. B. bei einem Volumen von  $30 \text{ m}^3$  und einer Trennwandfläche von  $10 \text{ m}^2$ . Bei gleichem Volumen, aber unterschiedlichen Flächen der Wände bzw. Decken ist bei größeren Flächen mehr Dämmung nötig. Hierdurch würden z. B. die von vielen Experten für nötig gehaltenen höheren Dämmwerte der Decken gegenüber den Wänden resultieren.

In anderen Fällen, bei denen mehr als ein Übertragungsweg zu berücksichtigen ist, müßte der Beitrag jedes einzelnen der Wege berechnet werden und dann die resultierende Schallpegeldifferenz ermittelt werden. Dadurch, daß auch hierbei die einzelnen an der Übertragung beteiligten Flächen berücksichtigt werden müssen, ergeben sich interessante Optimie-



**Bild 6**

Schalldämmkurve einer 25 cm dicken, beiderseitig verputzten Vollziegelwand und Sollkurve nach DIN 4109,

Entwurf Januar 1959

(ohne bauübliche Nebenwege)

-o-o-o- = Schalldämmkurve

— = Sollkurve

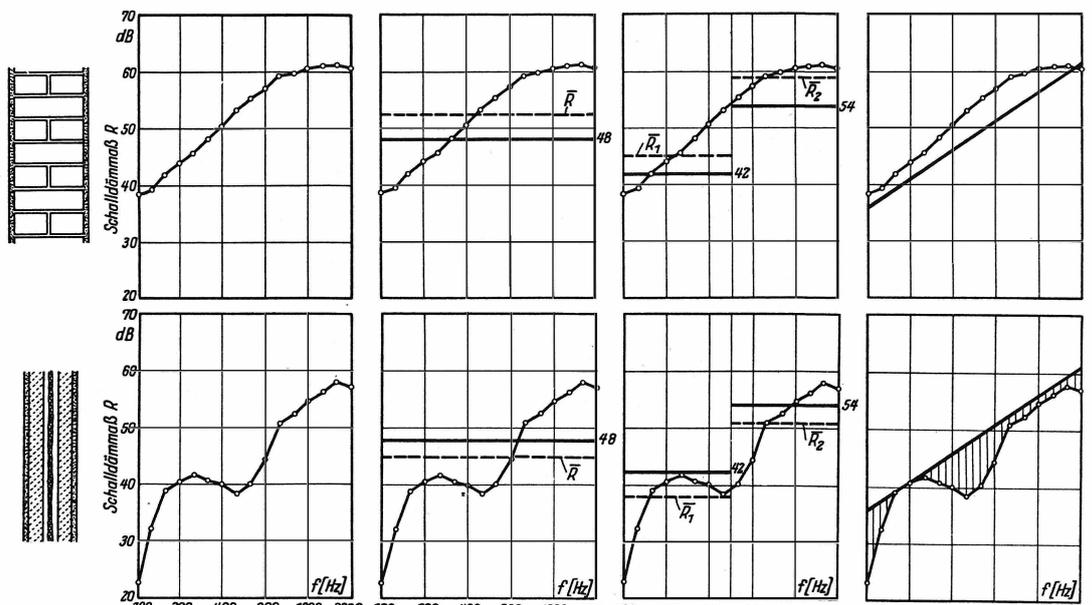


Bild 7

Beispiele für Luftschalldämmmaße in Abhängigkeit von der Frequenz

oben: 25 cm dicke, beiderseits verputzte Vollziegelwand  
unten: Doppelwand aus 5 cm dicken, außenseitig verputzten Ziegelsplittplatten  
von links nach rechts: Kurve allein, das gleiche mit gesamtem Mittelwert und Sollwert, das gleiche mit Teil-Mittelwerten und Sollwerten dazu, R-Kurve und Vergleichsgerade

rungsmöglichkeiten, deren Umsetzung allerdings in der Regel die Beratung durch akustische Sachverständige voraussetzt.

3. Schlußbemerkung und Ausblick

Die ursprüngliche Intention der Väter der heutigen bauakustischen Kriterien in Form von Schalldämmwerten war es, eine für die Bauausführenden einfach handhabbare Kenngröße vorzugeben.

Wägt man die Vor- und Nachteile einer Schallschutzbeschreibung durch Dämmwerte ab, so zeigt sich, daß die angestrebte einfache Handhabung nur dann zu den erwarteten Schallschutzwerten führt, wenn die den Laborbedingungen entsprechenden Randbedingungen auch am Bau gegeben sind. In anderen Fällen ist es notwendig, mittels teilweise aufwendiger Berechnungen entsprechende Korrekturen vorzunehmen. Vielfach führt dann jedoch die Verwendung von Schalldämmwerten sowohl für die Beschreibung von Bauelementen wie für den Schallschutz zwischen Räumen zu Unklarheiten bei der Bauausführungspraxis.

Dies kann dadurch vermieden werden, daß für die Bauteilkennzeichnung weiterhin das international auch aufgrund der Aktivitäten von Professor Lothar Cremer als Einzahlangabe gut eingeführte „bewertete Schalldämmmaß“ benutzt wird, während für die Beschreibung des baulichen Schallschutzes zwischen Räumen vorzugsweise die nachhallzeitreduzierte Schallpegeldifferenz verwendet werden sollte.

Zu prüfen wird aber sein, ob es dem Bürger zumuten ist, sich aus den vielen einzelnen Angaben zum baulichen Schallschutz in seiner Wohnung, wie z. B. zum Luftschall- und Trittschallschutz innerhalb des Gebäudes, zum Luftschallschutz gegenüber dem

Freien, zu den auftretenden Installationsgeräuschen usw., ein eigenes Bild darüber zu machen, welches Maß an Ruhe er in seinen vier Wänden wird finden können. Letztlich sind alle diese Anforderungen ja nicht unabhängig voneinander.

Es schien daher eine lohnende Aufgabe zu sein, eine Aussage über optimale Kombination unterschiedlicher Schallschutzniveaus für die o. g. verschiedenen bauakustischen Bereiche vorzunehmen. Dieser Aufgabe hat sich die VDI-Kommission Lärm-minderung gestellt. Hier wurde die VDI 4100 „Schallschutzklassen von Wohnungen“ unter der Obmannschaft des Autors bis zum Entwurfsstadium fertiggestellt. In dieser Richtlinie sollen drei Klassen von Wohnungen definiert werden: Klasse I mit Mindestanforderungen, die den öffentlich-rechtlichen Belangen genügen; Klasse II mit Anforderungen, die ein mittleres Ruhebedürfnis befriedigen; und Klasse III, in der auch hohe Ruheansprüche erfüllt sind.

Wir erkennen, daß wir auf den wohlausgewogenen und bewährten Überlegungen zur Kennzeichnung des Schallschutzes durch einzelne Bauelemente – für die auch Professor Cremer in hohem Maße verantwortlich zeichnet – aufbauen können, um dann weitergehende Vorgehensweisen den gewandelten Anforderungen sowohl des Baugeschehens wie auch der Gesellschaft anpassen zu können.

SCHRIFTTUM

- [1] Finke, H.-O.; Guski, R.; Rohrman, B.: Betroffenheit einer Stadt durch Lärm. Forschungsvorhaben Umweltbundesamt Nr. 10501 301 (1980).
- [2] Kürer, R.: Schallschutz im Wohnungsbau — sinnvolle Anforderungen. Z. für Lärmbekämpfung 31 (1984), S. 122 bis 127.
- [3] Mechel, F. P.: Über Definition und Gebrauch von Schalldämmmaßen. Teil 1 und 2. Z. für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz (wksb) 25 (1980), H. 10, S. 34 bis 40 und H. 11, S. 30 bis 38.

- [4] DIN 4109 (Entwurf): Schallschutz im Hochbau. Anforderungen. Teil 2, Abschnitt 3.1 vor Tabelle 1. Hrsg. v. Deutschen Normenausschuß, Berlin 1984. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin — Köln.
- [5] Lang, J.: Normanforderungen — Schallschutz von Bauteilen oder Schallschutz zwischen Räumen? Fortschritte der Akustik — DAGA 85, Stuttgart. DPG-GmbH, Bad Honnef 1985, S. 17 bis 28.
- [6] Buchta, E.: Bewertetes Bauschalldämm-Maß und Schallpegel-Differenz von Fenstern bei Verkehrsgeräuschen — Meßergebnisse. Fortschritte der Akustik — DAGA 80, München. VDE-Verlag, Berlin 1980, S. 331 bis 334.
- [7] Zwicker, E.; Feldtkeller, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.
- [8] Cremer, L.: Calculation of sound propagation in structures. *Acustica* 3 (1953), S. 317 bis 335.
- [9] Gösele, K.: Berechnung der Luftschalldämmung in Massivbauten unter Berücksichtigung der Schall-Längsleitung. *Bauphysik* 6 (1984), S. 79 bis 84 und S. 121 bis 126.
- [10] Cremer, L.: Sinn der Sollkurven. In: Schallschutz von Bauteilen. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1960.

### Der Autor



Dr.-Ing. Ralf Kürer (51) studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Berlin. Er war Mitarbeiter von Prof. Cremer von 1965 bis 1971. Anschließend war er bis 1974 Leiter der Fachbereichsverwaltung des FB „Umweltechnik“ der TU Berlin. Seitdem ist er im Umweltbundesamt tätig. Er ist dort Direktor und Professor im Bereich Lärmbekämpfung. Lehraufträge für Baulichen Schallschutz, Raumakustik und Städtebaulichen Lärmschutz am Institut für Technische Akustik der TU Berlin.

# EIN MODELL ZUR SPRACHLICHEN KOMMUNIKATION UNTER STÖRBEDINGUNGEN UND DEREN BEWERTUNG<sup>1</sup>

VON HANS LAZARUS

Manuskript eingegangen am 21. Oktober 1985

Sprachverständlichkeit

## Zusammenfassung

Es werden anhand eines einfachen Modells die physikalischen Zusammenhänge während einer sprachlichen Kommunikation entwickelt. Auf Grundlage des Artikulationsindex werden die Einflüsse des Sprechers, des Hörers, des Geräusches, der Sprechweise, der Entfernung der Gesprächspartner, des Gehörschutzes, des Hörverlustes, der Nachhallzeit diskutiert und qualitativ abgeschätzt. Die Anstrengung des Sprechers und die Belastung des Hörers wurden in Experimenten ermittelt und aus diesen Belastungsstufen für unterschiedliche Gesprächssituationen angegeben. Dargestellt werden für Gespräche, die durch Geräusche gestört werden, Kurven gleicher Belastungsstufen und Höchstwerte für Geräuschpegel.

## Summary Evaluation of a model for voice communication in poor conditions

A simplified model serves to determine the physical relationships occurring during voice communication. As a function of the articulation index, the author examines and qualitatively evaluates the influence of the speaker, the listener, noise, the speaker's elocution, the distance between the speaker and listener, the acoustic projection, the listener's auditory acuity and the reverberation time. The effort made by the speaker and the attention demanded of the listener are determined experimentally and indicated on this basis for different conversation situations. Curves relating the necessary attention on the part of the listener to equivalent maximum noise levels are given for conversations affected by noise.

## Sommaire Evaluation d'un modèle de communication verbale dans des conditions médiocres

Un modèle simplifié permet de déterminer les relations physiques intervenant au cours d'une communication verbale. A partir de l'indice d'articulation, l'auteur examine et évalue qualitativement l'influence du locuteur, de l'auditeur, du bruit, de l'élocution, de l'éloignement de l'interlocuteur, de la protection acoustique, de l'acuité auditive et du temps de réverbération. L'effort du locuteur et la sollicitation de l'auditeur sont déterminés expérimentalement et indiqués pour différentes situations de conversation. Des courbes d'équivalence entre le degré de sollicitation et les valeurs maximales de niveau de bruit sont données pour des conversations perturbées par du bruit.

## 1. Einleitung

Die Beschreibung der sprachlichen Kommunikation anhand physikalischer Parameter bezieht sich vor allem auf den Sprecher (u. a. Pearsons et al. 1977), die Schallausbreitung vom Sprecher zum Hörer (u. a. Houtgast et al. 1980) und den Hörer (u. a. Kryter 1962). Zusammenfassende Darstellungen der Gesprächssituation und deren Störung durch Geräusche wurden von Beranek (1947), Kryter (1962), Webster (1979, 1984), Lazarus et al. (1985), Lazarus (1986) vorgenommen. Bei der Beschreibung der Kommunikation unter Störbedingungen wurde zwar die Sprechweise des Sprechers und die Sprachverständlichkeit des Hörers erfaßt, jedoch wurde die Anstrengung bzw. die Behinderung der Gesprächspartner nur am Rande diskutiert.

Im folgenden wird versucht, anhand eines einfachen physikalischen Modells der Gesprächssituation

- a) die akustischen Parameter der sprachlichen Kommunikation sowie ihrer Beeinträchtigungen zu beschreiben und
- b) die Belastungen der Gesprächspartner unter unterschiedlichen Störbedingungen in das Modell mit einzubeziehen.

Dabei sollen auch Aktivitäten (Webster 1983, Lazarus 1983, Plomp et al. 1983) der letzten Jahre einbezogen werden, um gesicherte Erkenntnisse für die Erstellung von Standards vorzuschlagen (Lazarus 1986).

## 2. Sprecher-Hörer-Relation

Zur sprachlichen Kommunikation gehören ein Sprecher und ein Hörer, wobei beide Personen diese Rolle ständig wechseln. Das Gespräch wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst (Bild 1). Der Sprecher spricht unterschiedlich laut. Sein Sprachschall wird gestört durch Geräusche sowie durch Nachhall und erreicht so den Hörer. Das Verstehen der Sprache ist wesentlich vom Signal-Geräuschverhältnis beim Hörer abhängig, d. h. vom Pegel der Sprache beim Sprecher, von der Entfernung Sprecher - Hörer und vom Geräuschpegel. Aber man muß auch die Halligkeit und die Größe des Raumes, die Art der Kommunikation (intimes Gespräch, Schreiben, Vortrag), das Training des Sprechers, das Hörvermögen der Personen, das benutzte Sprachmaterial, die Sprachkompetenz (Zweitsprache), das Spektrum des Geräusches und das Tragen von Gehörschutz in Rechnung stellen.

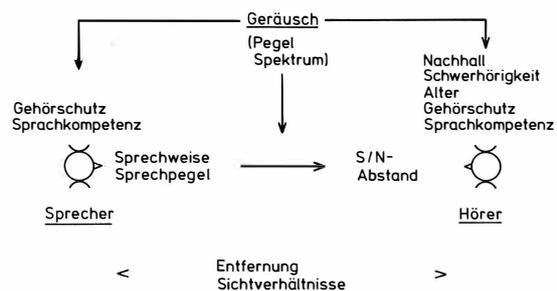


Bild 1

Einflussfaktoren der sprachlichen Kommunikation

<sup>1</sup> Aufsatz zum Kolloquium anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Lothar Cremer im IRT, München, 21. September 1985.

2.1. Der Sprecher

Der Sprecher spricht je nach Absicht oder Art des Gesprächs mit einer unterschiedlichen Sprechweise, d. h. er flüstert, spricht normal oder schreit (Tabelle 1). Die unterschiedliche Sprechweise bedingt einen verschieden hohen Schallpegel der Sprache ( $L_{SA}$ )<sup>2</sup>, der üblich in 1 m Entfernung vom Sprechermund gemessen bzw. angegeben wird.

Sprechweise		Schallpegel $L_{SA,m,1m}$
flüstern		36 dB
leise	sprechen	42 dB
entspannt (p)	sprechen	48 dB
entspannt, normal (p)	sprechen	54 dB
normal, angehoben (p)	sprechen	60 dB
angehoben	sprechen	66 dB
laut	sprechen	72 dB
sehr laut	sprechen	78 dB
schreien		84 dB
maximal schreien		90 dB
maximal schreien (in Einzelfällen)		96 dB

Tabelle 1

Schallpegel der Sprecher ( $L_{SA,m}$ ) in 1 m vor dem Sprechermund für angegebene Sprechweisen

p = im privaten Bereich

Spricht der Sprecher in einer geräuscherfüllten Umgebung, so spricht er automatisch lauter als in Ruhe. Dieser Effekt wird als Lombardeffekt bezeichnet (Bild 2). Eine Auswertung mehrerer Untersuchungen (u. a. Pearsons et al. 1977, Heusden et al. 1979, Lazarus et al. 1985) ergibt, daß bei steigenden Geräuschpegeln ( $L_{NA}$ ) die Person etwa um 0,4 bis 0,7 dB lauter spricht, wenn der Geräuschpegel an ihren Ohren um 1 dB ansteigt. Bis zu einem Geräuschpegel von  $L_{NA} = 30$  bis 40 dB (A) hat der Pegel des Störgeräusches kaum einen Einfluß auf die Höhe des Sprechpegels, er wird mit  $L_{SA,1m} = 45$  bis 55 dB angenommen. Bei steigenden Geräuschpegeln muß der Sprecher, um seine eigene Sprache noch hören zu können (ohne akustische Rückkopplung der eigenen Sprache kann man weniger genau artikulieren), den Pegel seiner eigenen Sprache erhöhen. Er hebt seinen Sprechpegel aber im Durchschnitt nur etwa halb soviel gegenüber der Zunahme des Geräuschpegels an ( $c = L_{SA}/L_{NA} \approx 0,5$  dB/1 dB). Das mag damit zusammenhängen, daß der Sprecher zwischen dem Verstehen der eigenen Sprache und der Anstrengung durch das laute Sprechen für sich selbst ein Optimum sucht. In einem Vergleich von Schulklassen (Pearsons et al. 1977) mit unterschiedlichen Störgeräuschpegeln konnte gezeigt werden, daß bei Lehrern der Anstieg des Sprechpegels pro Zunahme des Ge-

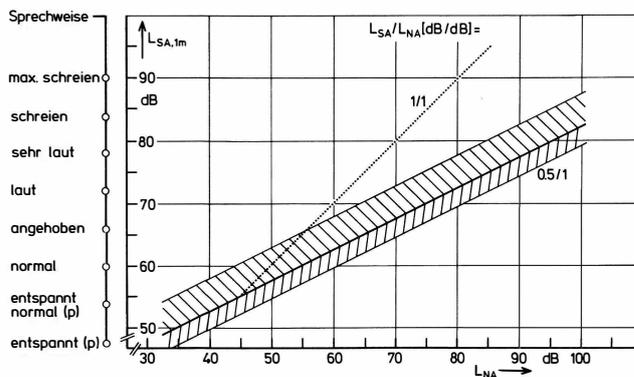


Bild 2

Der Sprechpegel (Mittelungspegel:  $L_{SA,1m}$ ) bzw. die Sprechweise des Sprechers in Abhängigkeit vom Geräuschpegel (Mittelungspegel:  $L_{NA}$ ) am Ohr des Sprechers für die mittlere Zunahme des Sprechpegels pro 1 dB Anstieg des Geräuschpegels

$$c = L_{SA}/L_{NA} = 0,5 \text{ dB/1 dB (Lombardeffekt) und } c = 1 \text{ dB/1 dB beispielsweise für Lehrer/-innen}$$

räuschpegels etwa  $c = 1$  dB/1 dB beträgt. Der Lehrer steuert seinen Sprechpegel so, daß auch in der letzten Stuhlreihe des Klassenraumes etwa ein Signal-Geräuschabstand von  $L_{SNA} = 10$  dB vorliegt; damit ist unabhängig von der Höhe des Geräuschpegels jeweils die gleiche Sprachverständlichkeit gewährleistet.

Berücksichtigt man diese Beobachtungen, kann man vermuten, daß durch einen weitgehend automatisierten Regelprozeß der Sprecher seinen Sprechpegel um etwa 0,5 dB pro 1 dB Störgeräusch anhebt ( $c = 0,5$ ), wenn an den Sprecher keine besonderen Anforderungen gestellt werden. Verstärkte Forderungen an den Sprecher (z. B. Vortrag vor mehreren Zuhörern in einem großen Raum) einerseits bzw. entspannte Situationen (intimes Gespräch, das Gespräch soll nicht von anderen gehört werden) andererseits können den Sprecher veranlassen, seinen Sprechpegel beim gleichen Geräuschpegel entweder zu erhöhen bzw. zu senken. Dieser Sachverhalt wird durch das schraffierte Feld in Bild 2 bzw. durch den Sprechpegelzuschlag  $\Delta L_S$  berücksichtigt. So beeinflussen zusätzlich auch andere Faktoren wie Größe und Halligkeit des Raumes, die Entfernung zum Hörer, das Tragen von Gehörschutz, die Art der Kommunikation (Vortrag, intimes Gespräch) die Art der Sprechweise.

2.2. Der Hörer

Die Sprachverständlichkeit ist im wesentlichen vom Signal-Geräuschabstand am Ohr des Hörers (Bild 3), aber auch von der Höhe des Sprechpegels (u. a. Kryter 1946, Lazarus-Mainka & Lazarus 1984) und dem Nachhall des Raumes (u. a. Houtgast 1980), von der Art des Sprachmaterials (Bild 3) und vom Hörvermögen der Person, dem benutzten Gehörschutz (u.a. Kryter 1970, Abel et al. 1982) abhängig; aber auch die Kompetenz (Zweitsprache, u. a. Gat & Keith 1978) und das Alter (Elliott 1979) des Hörers, das Training des Sprechers und das Spektrum des Geräusches bestimmen die Sprachverständlichkeit (zusammengefaßt von Lazarus et al. 1985). Häufig benutztes Sprachmaterial sind sinnlose Silben, ein-

<sup>2</sup> Da in der Regel der Mittelungspegel benutzt wird, wird der Index m meistens weggelassen.

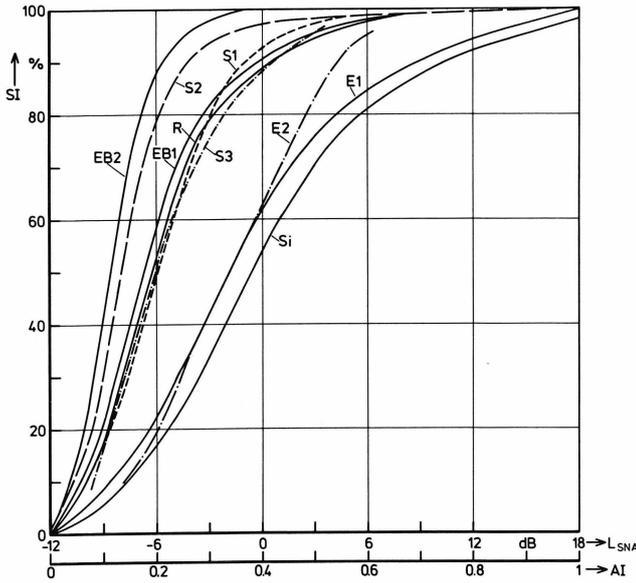


Bild 3

Sprachverständlichkeit (SI) für sinnlose Silben (Si), Einsilber (E), Sätze (S) für einen begrenzten Einsilbertext (EB), einen Reimtext (R) in Abhängigkeit vom Artikulationsindex (AI) oder, wenn dieser nicht bekannt ist, vom Signal-Geräuschabstand ( $L_{SNA}$ )

Die Kurven Si, E1, S1, S2, EB1, EB2, R gelten für Sprechpegel bei etwa  $L_{SA} = 65$  dB und wurden mit trainierten Personen durchgeführt

- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Si = Sinnlose Silben (Konsonant-Vokal-Konsonant)   | } ISO-4870 (1975)                 |
| E1 = Englische Einsilber (600 bis 1000 unterschiedliche Wörter, phonetisch ausbalanciert)                      |                                   |
| S1 = Schlüsselwörter in einfachen englischen Sätzen, erste Darbietung für den Hörer                            |                                   |
| R = Reimtext (50 Gruppen von 6 englischen Einsilbern)  | } Kryter (1970)                   |
| EB1 = Einsilbertext begrenzten Umfangs (256 englische Einsilber, die dem Hörer bekannt sind und ihm vorliegen) |                                   |
| S2 = Schlüsselwörter in einfachen englischen Sätzen, die dem Hörer bekannt sind                                | } Kryter (1970)                   |
| EB2 = Einsilbertext begrenzten Umfangs (32 englische Einsilber, die dem Hörer bekannt sind und ihm vorliegen)  |                                   |
| E2 = Deutsche Einsilber nach DIN 45 621  | } Lazarus & Lazarus-Mainka (1979) |
| S3 = Deutsche Sätze, erste Darbietung für den Hörer  |                                   |

silbige Worte, Reimworte, Zahlwörter, Sätze. Sinnlose Silben werden nur zur akustischen Prüfung von Auditorien benutzt. Für die Verständlichkeit am Arbeitsplatz und im Wohnbereich ist es üblich und zweckmäßig, diese auf der Grundlage von einsilbigen Worten (DIN 45 621) zu bestimmen: Die Verständlichkeit von Einsilbern ist gut reproduzierbar, für die Praxis leicht vorstellbar und gut zu interpretieren. Dagegen ist die Verständlichkeit von Sätzen für die Praxis nur schlecht nutzbar, da durch die sehr unterschiedliche Art von Sätzen diese teilweise so leicht verständlich sein können wie Zahlwörter, aber auch so schwer verständlich sein können wie Einsilber (Kalikow et al. 1977). Reimworte eignen sich zur differenzierten Analyse des Konsonant- bzw. Vokalverstehens (Sotscheck 1982).

### 3. Ein einfaches physikalisches Modell zur Beschreibung der sprachlichen Kommunikation

Im folgenden wird versucht, die Parameter der sprachlichen Kommunikation, deren Einflußfaktoren und Wirkungsweise quantitativ zu beschreiben. Dabei soll versucht werden, das Modell so zu gestalten, daß die wesentlichen Bedingungen der sprachlichen Kommunikation, d. h. das Sprechen, die Schallausbreitung zum Hörer und das Hören beschreibbar werden.

#### 3.1. Der Schallpegel des Sprechers

Ist das Störgeräusch beim Sprecher bekannt [ $L_{NA}(S)$ ], kann mit Hilfe des Lombardeffektes der Sprechpegel ( $L_{SA, 1m}$ ) abgeschätzt werden (Pearsons et al. 1975, Lazarus et al. 1985). Der Einfachheit halber wird hier näherungsweise eine lineare Beziehung angenommen (Bild 2):

$$L_{SA, 1m} = c (L_{NA} - 44 \text{ dB}) + 54 \text{ dB} + \Delta L_S, c = 0,5 \quad (1)$$

wobei  $\Delta L_S = (-3 \text{ bis } +6) \text{ dB}$  ist. Der Korrekturwert  $\Delta L_S$  beschreibt die Möglichkeit des Sprechers, in gewissen Grenzen unabhängig von der Höhe des Störgeräusches, seine Sprechweise individuell zu verändern und seinen Sprechpegel damit den gegebenen Bedingungen anzupassen. Geschrieene Sprache ( $L_{SA, 1m} > 75 \text{ dB}$ ) hat bei einem gleichen Signal-Geräuschverhältnis eine geringere Verständlichkeit als normal laut gesprochene Sprache (Pickett 1956, Rostolland & Parant 1973, Lazarus-Mainka & Lazarus 1984, Lazarus-Mainka & Raschdorf 1985, Rostolland 1982 und 1985). Deswegen wird der Sprechpegel um eine entsprechende Korrektur ( $K_{S2}$ ) verringert:

$$K_{S2} = \max [0,4 (L_{SA, 1m} - K_{S1} - 75 \text{ dB}); 0 \text{ dB}] \quad (2)$$

Trägt der Sprecher Gehörschutz, liegt sein Sprechpegel um

$$K_{S1} = 4 \text{ dB} \quad (3)$$

niedriger (Kryter 1946, Howell & Martin 1975, Hörmann et al. 1984). Es ergibt sich somit ein effektiver Sprechpegel von

$$L_{SA, 1m(1)} = L_{SA, 1m} - K_{S1} - K_{S2} \quad (4)$$

#### 3.2. Modell der Störung von Sprache durch Geräusche und Nachhall

Die Sprache wird auf dem Übertragungsweg durch Geräusche und Nachhall gestört. Nimmt man den Sprachschall als eine amplitudenmodulierte Schwingung an, lassen sich diese Störungen innerhalb dieser Schwingung als Verringerung des Modulationsgrades berücksichtigen.

Der Sprachschall kann als eine amplitudenmodulierte Schwingung aufgefaßt werden, wobei der Träger der Schwingung eine Sinusschwingung ist, deren Frequenzen gleich der Mittenfrequenzen der Oktaven im Hörschallbereich sind ( $f_i = 125 \text{ Hz}, 250 \text{ Hz}, 500 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}, 2 \text{ kHz}, 4 \text{ kHz}, 8 \text{ kHz}$ ) und die Modulationsschwingungen bei Frequenzen von  $f_j = 0,25$  bis  $25 \text{ Hz}$  liegen. Die Modulationsschwingung wird als Hüllkurve des Sprachschalls bezeichnet, in der die wesentliche Information übermittelt wird. Messungen des Modulationsgrades von Sprachschall (Houtgast & Steeneken 1972) ergaben, daß in den Oktaven von  $250 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}, 4 \text{ kHz}$  der Modulationsgrad ( $m$ ) einen ähnlichen Verlauf hat: Bei 2 bis 6 Hz liegt er

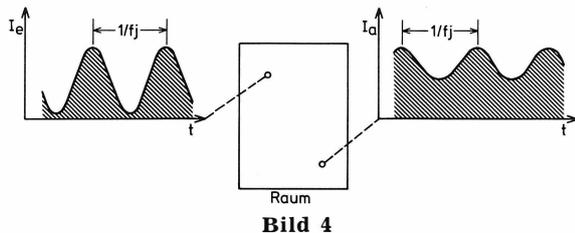


Bild 4

Das gesendete Intensitätssignal ( $I_e$ , sprachähnliches Spektrum, Modulationsgrad 1) und das empfangene Intensitätssignal ( $I_a$ , Modulationsgrad  $< 1$ ) mit der Modulationsfrequenz ( $f_j < 50$  Hz) für einen Raum

bei  $m = 0,5$  bis 1 und fällt nach hohen und tieferen Frequenzen ab und liegt bei 0,25 Hz und 25 Hz bei etwa 0,05. Der Modulationsgrad von Sprache liegt etwa zwischen  $m = 0,01$  bis 0,99, d. h. die Dynamik der Hüllkurve (Envelope) der Sprache umfaßt etwa 30 dB (Beranek 1947) bis 40 dB. Die Störung des Sprachschalls durch Geräusche und Nachhall bewirkt, daß die modulierte Schwingung des Sprechers mit einem maximalen Modulationsgrad von  $m = 1$  beim Hörer mit einem niedrigeren Modulationsgrad ankommt (Bild 4). Dieser Modulationsgrad von gestörter Sprache liegt bei  $m = 0,03$  bis 0,97 und entspricht einem Signal-Geräuschabstand von  $L_{SN} = (-15$  bis  $+15)$  dB. Diese beschriebene amplitudenmodulierte Schwingung der Sprache kann für jede einzelne Oktave (i) des Spektrums angenommen werden. Innerhalb einer Oktave kann durch eine Mittelung des Signal-Geräuschabstandes über den Bereich der Modulationsfrequenzen ( $f_j = 0,25$  bis 25 Hz) ein mittlerer Signal-Geräuschabstand ( $L_{SN(i)}$ ) für jede Oktave ermittelt werden. Wird der Sprechschall auf seinem Übertragungsweg zum Hörer nicht nur durch Geräusche, sondern auch durch Nachhall gestört, spricht man von einem effektiven Signal-Geräuschabstand ( $L_{SN(T)}$ ).

Steeneken & Houtgast (1980) haben den Sprachübertragungsindex (Speech Transmission Index, STI) entwickelt, der alle relevanten physikalischen Einflußgrößen wie den Einfluß des Raumes (Nachhall, Echo), die Entfernung Sprecher-Hörer, den Pegel und das Spektrum des Geräusches berücksichtigt. Der STI, der zwischen 0 und 1 liegt, ist ein Maß für die Sprachverständlichkeit. Sind die geometrischen Abmessungen, die akustischen Eigenschaften und das Störgeräusch im Raum bekannt, läßt sich der STI berechnen oder in realen Räumen auch meßtechnisch bestimmen.

Die sprachliche Kommunikation als interpersonelle Interaktion, die uns hier vor allem interessiert, findet am Arbeitsplatz und im Wohnbereich im wesentlichen bei Entfernungen von 0,5 bis 5 m statt. Die Berechnung der Sprachverständlichkeit für größere Räume und Entfernungen wie für Auditorien soll hier nicht betrachtet werden. Somit ist es vertretbar, den Einfluß des Raumes (Nachhall, Echo) vorerst zu vernachlässigen.

Als vereinfachtes Modell wird für die Schallausbreitung bis zum Hörer somit nur der Pegel der Sprache beim Sprecher ( $L_{SA, 1m}$ , Gl. 1, 2, 3) und eine Schallausbreitung vom Sprechermund bis zum Hörer wie im ungestörten Schallfeld mit 6 dB pro Abstandsverdopplung vorausgesetzt:

$$L_{SA(1)} = L_{SA, 1m(1)} - DL_r, \text{ mit } DL_r = 20 \lg r/1 \text{ m} . \quad (5)$$

Um die Schallausbreitung den realen Bedingungen besser anzupassen, wird teilweise angenommen, daß bei Entfernungen zwischen Sprecher und Hörer von  $r \geq 2$  m ein Flachraum mit der Höhe von  $h = 4$  m vorliegt. In solchen Flachräumen muß aber ab einer Entfernung von der Schallquelle von  $r \geq h/2$  mit einer geringeren Schallpegelabnahme als im ungestörten Schallfeld gerechnet werden, je nach Schallabsorption im Raum liegt sie bei  $DL_r = 2$  bis 6 dB pro Abstandsverdopplung (siehe Lazarus et al. 1985).

### 3.3. Signal-Geräuschabstand beim Hörer

#### 3.3.1. Der Artikulationsindex

Der Signal-Geräuschabstand am Ohr des Hörers bestimmt im wesentlichen die Sprachverständlichkeit. Der Artikulationsindex (AI), ein von Kryter (1962) entwickeltes Maß zur Beschreibung der Sprachverständlichkeit mit Hilfe physikalischer Parameter, besteht aus dem Mittelwert von gewichteten Signal-Geräuschabständen ( $L_{SNi} = L_{Si} - L_{Ni}$ ) in jeder Oktave (i), (siehe Tabelle 2):

$$AI = \sum_{250}^{4k} q_i (L_{SNi} + 12 \text{ dB}) ; [0 \text{ dB} \leq (\dots) \leq 30 \text{ dB}] . \quad (6)$$

Da die Pegeldynamik der Sprache in jedem Frequenzbereich etwa 30 dB beträgt, wird angenommen, daß die Sprache nur zwischen den Pegelspitzen der Sprache  $L_{Simax} = L_{Sim} + 12$  dB und den minimalen Werten der Sprache ( $L_{Simin} = L_{Sim} - 18$  dB) gestört werden kann, wobei  $L_{Sim}$  den Mittelungspegel des Sprechschalls darstellt. Das Signal-Geräuschverhältnis kann in jeder Oktave zwischen  $L_{SNi} = (-12$  bis  $+18)$  dB liegen, d. h. die Grenze, oberhalb der eine Störwirkung des Geräusches einbezogen wird, ergibt sich zu  $\max(L_{Ni}; L_{Si} - 18 \text{ dB})$ . Die Gewichtungsfaktoren sind so gewählt, daß die mittleren Frequenzen des Sprachbereiches ( $f_i = 1$  kHz, 2 kHz) einen höheren Beitrag liefern als die am Rande liegenden (Tabelle 2). Der Artikulationsindex liegt zwischen  $AI = 0$  bis 1 und gibt damit den Grad der Sprachverständlichkeit an (Bild 5).

Weitere Einflußfaktoren (wie Sprechweise, Nachhall, Schwerhörigkeit, Gehörschutz), die den Signal-Geräuschabstand und somit die Sprachverständlichkeit

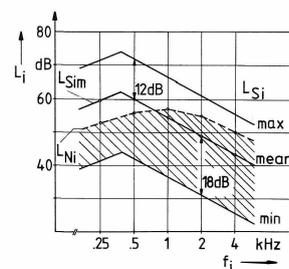


Bild 5

Bestimmung des Artikulationsindex (AI) aus dem idealisierten Oktavschallpegel der Sprache ( $L_{Sim}$ ) und dem Geräuschpegel ( $L_{Ni}$ ). Angegeben ist der idealisierte Dynamikbereich der Sprache mit dem höchsten (max) und dem niedrigsten (min) Wert des Sprechpegelverlaufs mit dem Mittelungspegel der Sprache von  $L_{SA, 1m} = 60$  dB (mean). Im schraffierten Bereich ist die Sprache durch das Geräusch ( $L_{NA} = 61$  dB) verdeckt

$f_i$	in Hz	125	250	500	1 k	2 k	4 k	
$L_{Ni}(S)/L_{NA}$	in dB	-	-	-	-	-	-	93
$L_{Ni}(H)/L_{NA}$	in dB	88	92	94	87	73	72	93
$L_{HSTO_i}$	in dB	-	11	6	4	0	-4	-
$L_{HVT_i}/\bar{L}$	in dB	-	10	10	15	30	60	28,8
$L_{HST_i}$	in dB	-	21	16	19	30	56	-
$d_i$	in dB	10	15	20	23	30	39	-
$L_{Si}'/L_{SA}'$	in dB	-	-0,5	0	-5,5	-11	-16,5	0,1
$L_{SA, 1m}$	in dB							78,5
$\Delta L_S$	in dB							3,0
$K_{S1}$	in dB							4,0
$K_{S2}$	in dB							1,0
$DL_r (10 \text{ cm})$	in dB							-20,0
$K_{S3}$	in dB							-
$K_{S4}$	in dB							4,3
$L_{Si}/L_{SA}$	in dB	-	91,6	92,1	86,6	81,1	75,6	92,2
$L_{Si}''$	in dB	-	76,6	72,1	63,6	51,1	36,6	-
$L_{Ni}''$	in dB	78	77	74	64	43	33	-
$L_{MT_i}$	in dB	78	77	74	64	49	34	-
$L_{Si}'' + 12 \text{ dB}$		-	88,6	84,1	75,6	63,1	48,6	-
$L_{Si}'' - 18 \text{ dB}$		-	58,6	54,1	45,6	33,1	18,6	-
$L_{Ni}^*$	in dB	-	77,0	74,0	64,0	49,0	48,6	-
$q_i$	in 1/dB	-	0,0024	0,0048	0,0074	0,0109	0,0078	-
AI		-	-	-	-	-	-	0,32

Die Bezeichnungen nach dem / beschreiben die Werte in der letzten Spalte

**Tabelle 2**

**Berechnung des Artikulationsindex anhand eines Beispiels**

Der Geräuschpegel beim Sprecher (Oktavpegel  $L_{Ni}(S)$  bei den Oktavmittenfrequenzen ( $f_i$ ), A-bewertet  $L_{NA}$ ) und beim Hörer ( $L_{Ni}(H)$ ,  $L_{NA}$ ) sind  $L_{NA} = 93$  dB. Die Hörschwelle des Hörers ( $L_{HST_i}$ ) ergibt sich aus der Hörschwelle der Normalhörenden ( $L_{HSTO_i}$ ) und seinem gemessenen Tonhörverlust ( $L_{HVT_i}$ ,  $\bar{L}$  ist der Mittelwert aus den Hörverlusten bei den Frequenzen 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz). Der Sprecher spricht (Gl. 1, Bild 2) mit  $L_{SA, 1m} = 78,5$  dB. Es wird angenommen, daß der Sprecher — um sich bei dem hohen Geräuschpegel noch verständlich zu machen — seinen Sprechpegel zusätzlich um  $\Delta L_S = 3$  dB erhöht. Das idealisierte Sprachspektrum ist durch  $L_{Si}'$  gegeben. Der Hörer ist 10 cm vom Sprecher entfernt [ $DL_r (10 \text{ cm}) = -20$  dB], beide Gesprächspartner tragen Gehörschutz. Die Sprechpegelkorrekturen ( $K_{S1}$  bis  $K_{S4}$ , Gl. 2, 3, 7, 11d) sind in dem Beispiel bedingt durch das Tragen von Gehörschutz, die Verzerrungen der Sprechstimme und die Hörverluste  $K_{S1} = 4$  dB,  $K_{S2} = 1$  dB,  $K_{S4} = 4,3$  dB. Der Sprechpegel beim Hörer ist  $L_{SA} = 92,2$  dB. Aus dem Oktavspektrum der Sprache ( $L_{Si}''$ ) und des Geräusches ( $L_{Ni}''$ ) unter dem Gehörschutz bzw. aus der Mithörschwelle ( $L_{MT_i}$ ) wird der äquivalente Geräuschpegel ( $L_{Ni}^*$ ) bestimmt und der Artikulationsindex (AI, Gl. 6) berechnet

keit beeinflussen, können in das Konzept des Artikulationsindex einbezogen werden. Es wird entsprechend ihrer Störwirkungen dann ein äquivalenter Geräuschpegel ( $L_{Ni}^*$ ) bzw. ein äquivalenter Signal-Geräuschabstand ( $L_{Si}^* = L_{Si} - L_{Ni}^*$ ) gebildet und mit diesem der Artikulationsindex AI bestimmt.

**3.3.2. Der Sprechpegel beim Hörer**

Der Sprechpegel beim Hörer ergibt sich aus Gl. (1 bis 5). Ist der Sprechpegel am Ohr  $L_{SA(1)} > 80$  dB, so nimmt — jeweils beim gleichen Signal-Geräuschverhältnis gemessen — die Sprachverständlichkeit um so mehr ab, je höher der Sprechpegel ist (Kryter 1946, Martin et al. 1976, Pickett & Pollack 1958). Die

Verminderung der Sprachverständlichkeit wird mit der Übersteuerung des Gehörs erklärt. Ein weiterer Korrekturfaktor  $K_{S3}$  berücksichtigt diesen Übersteuerungseffekt:

$$K_{S3} = \max [0,1 (L_{SA(1)} - d_{0,5} - 80 \text{ dB}) ; 0 \text{ dB}] , \quad (7)$$

wobei die Schalldämmung des Gehörschutzes ( $d_{0,5}$ ) gleich Null gesetzt wird, wenn kein Gehörschutz benutzt wird ( $d_{0,5} = d_i$  bei 500 Hz). Der effektive Schallpegel am Ohr der Person ergibt sich somit zu ( $K_{S4}$  siehe in Abschnitt 3.3.3.)

$$L_{SA} = L_{SA(1)} - K_{S3} - K_{S4} . \quad (8)$$

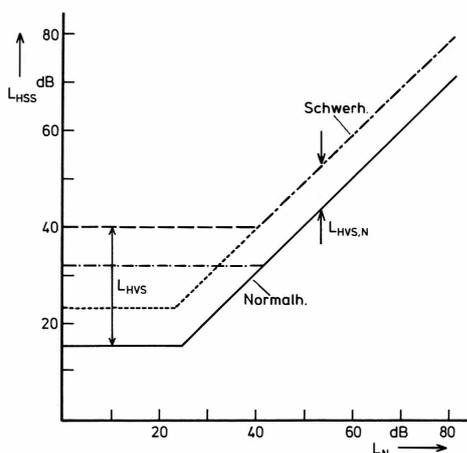


Bild 6

Hörschwelle für Sprache ( $L_{HSS}$ ) dargestellt über dem Geräuschpegel ( $L_N$ ) für Personen ohne (—) und mit Hörverlusten

Angegeben ist für schwerhörige Personen die Hörschwelle ( $L_{HSS}$ ) und der Hörverlust ( $L_{HVS}$ ) für Sprache in Ruhe ( $L_{HVS}$ ) und bei Geräuschen ( $L_{HVS,N}$ )

Das Spektrum der Sprache ( $L_{Si}$ ) wird mit Hilfe des idealisierten Sprachspektrums (Kryter 1962, ANSI 1969, Lazarus et al. 1985) bestimmt (siehe **Tabelle 2**):

$$L_{Si} = L_{SA} + L_{Si}' \quad (9)$$

### 3.3.3. Hörverluste

Falls keine Geräusche vorhanden sind, ist die Hörbarkeit von Sprachlauten durch die Hörschwelle begrenzt. Diese Hörschwelle wird hier nicht für Sinustöne, sondern für Oktavrauschen angegeben, das ist die Hörschwelle für Normalhörende ( $L_{HSTO}$ ). Für schwerhörige Personen (u. a. lärmbedingte, altersbedingte Schwerhörigkeit) muß noch der Hörverlust für Töne ( $L_{HVT}$ ) hinzugefügt werden. Somit ergibt sich ein äquivalenter Geräuschpegel ( $L_{Ni}^*$ ), bedingt durch eine Schwerhörigkeit oder ein Geräusch ( $L_{Ni}$ ), zu

$$L_{Ni}^* = \max(L_{HSTO_i} + L_{HVT_i}; L_{Ni}; L_{Si} - 18 \text{ dB}) \quad (10)$$

Von Plomp et al. wurde 1983 ein Modell für das Sprachverstehen von Schwerhörigen entwickelt, das es gestattet, die Beeinträchtigung der Sprachverständlichkeit durch eine Ruheshwelle (ohne Geräusche) und durch eine Veränderung der Mithörschwelle (mit Geräuschen) getrennt zu betrachten (**Bild 6**). Die Hörschwelle in Ruhe ( $L_{HST} = L_{HSTO} + L_{HVT}$ ) begrenzt die Wahrnehmung von Sprachlauten, wie sie oben beschrieben wurde. Aber auch oberhalb der Ruheshwelle vermindert sich die Verständlichkeit von Sprache bei schwerhörigen Personen im Vergleich zu normalhörenden, wenn die Sprache durch Geräusche verdeckt wird (u. a. Suter 1980, Aniansson 1980, Lazarus et al. 1985). Diese Verschiebung der Mithörschwelle von Sprache (**Bild 6**:  $L_{HVS,N}$ ) wird in Verbindung mit einer Veränderung der dynamischen Eigenschaften des geschädigten Gehörs gesehen, wie z. B. der Verminderung der Frequenzselektivität oder der verminderten Erkennung von schnellen Frequenz- und Intensitätsänderungen (u. a. Spreng 1983, Niemeyer 1983). Der Zusammenhang zwischen dem Hörverlust für Sprache in Ruhe ( $L_{HVS}$ ) und bei Geräuschen ( $L_{HVS,N}$ ) wird für ältere Personen mit etwa

$$L_{HVS,N} \approx (0,13 \text{ bis } 0,28) L_{HVS} + (0,43 \text{ bis } 0,99) \text{ dB} \quad (11)$$

angegeben (Plomp 1978, Plomp & Mimpen 1979, Duquesnoy 1982). Berücksichtigt man die Beziehung zwischen der Hörschwelle für Sprache in Ruhe und zwischen dem Tonhörverlust (Plomp & Mimpen 1979, Duquesnoy 1982),

$$L_{HVS} \approx (0,85 \text{ bis } 0,9) L_{HVT 0,5/1/2} + 1 \text{ dB} \quad (11a)$$

und die Beziehung zwischen den mittleren Hörschwellen für Töne (Lazarus et al. 1985),

$$L_{HVT 0,5/1/2/4} \approx L_{HVT 1/2/3} \approx L_{HVT 0,5/1/2} + 10 \text{ B} \quad (11b)$$

ergibt sich folgende Beziehung zwischen der Hörschwelle für Sprache bei Geräuschen ( $L_{HVS,N}$ ) und dem mittleren Tonhörverlust ( $L_{HVT 0,5}$  bis 4):

$$L_{HVS,N} \approx 0,18 L_{HVT 0,5/1/2/4} - 1 \text{ dB} \quad (11c)$$

Smooenburg et al. (1982) hat für 22 Lärmschwerhörige mit Hörverlusten von  $L_{HVT 1/2/3} = 0$  bis 50 dB die Hörschwelle für Sprache bei Geräuschen ermittelt. Die Hörschwelle für Sprache bei Geräuschen zeigt nur eine geringe Abhängigkeit von der mittleren Tonhörschwelle bei den Frequenzen 0,5 bis 2 kHz, dagegen läßt sich eine Beziehung zu der mittleren Tonhörschwelle bei den Frequenzen 1 bis 3 kHz herstellen:

$$L_{HVS,N} \approx 0,18 L_{HVT 1/2/3} \quad (11d)$$

Um den Verlust an Sprachverständlichkeit durch Geräusche bei Personen mit Hörverlust zu berücksichtigen, wird der Sprechpegel am Ohr des Hörers korrigiert zu

$$K_{S4} = 0,15 L_{HVT 0,5/1/2/4} \quad (11d)$$

### 3.3.4. Tragen von Gehörschutz

Trägt der Hörer Gehörschutz, so muß der für das Gehör wirksame Sprechpegel ( $L_{S''}$ ) und Geräuschpegel ( $L_{N''}$ ) berechnet werden. In jeder Oktave wird der Sprech- und Geräuschpegel um die mittlere Schalldämmung ( $d_i$ ) des Gehörschutzes vermindert:

$$L_{Si}'' = L_{Si} - d_i, L_{Ni}'' = L_{Ni} - d_i \quad (12)$$

### 3.3.5. Mithörschwelle

Für die Verständlichkeit von Sprache können nur die Sprachlaute beitragen, die gehört werden. Wird Sprache durch Geräusche gestört, ist die Hörbarkeit von Sprachlauten nicht durch den Oktavpegel ( $L_{Ni}$ ) des Geräusches begrenzt, wie in Abschnitt 3.3.1. angenommen wurde. Zur Sprachverständlichkeit tragen nur die Sprachlaute bei, die durch das Geräusch nicht verdeckt werden. Statt des Oktavpegels des Geräusches ( $L_{Ni}$ ) wird deswegen die Verdeckungsschwelle, die Mithörschwelle ( $L_{MTi}$ ) zur Bestimmung des äquivalenten Geräuschpegels herangezogen:  $L_{Ni}^* = L_{MTi}$ . Bei der Ermittlung der Mithörschwelle muß zwischen der direkten Verdeckung und der Weitabverdeckung unterschieden werden. Für die direkte Verdeckung, das ist die Verdeckung innerhalb eines Frequenzbandes, kann näherungsweise angenommen werden, daß die Mithörschwelle ( $L_{MTi}$ ) gleich dem Oktavpegel ( $L_{Ni}$ ) ist:  $L_{MTi} = L_{Ni}$ . Die Weitabverdeckung ist im wesentlichen abhängig vom Schallpegel des Geräusches (Zwicker & Feldtkeller 1967) und dem Grad der

Schwerhörigkeit der Person (Rittmanic 1962). Sie liegt bei geringen Schallpegeln ( $L_N \approx 50$  dB) und normalhörenden Personen bei 30 dB/Oktave, bei leicht schwerhörigen ( $L_{HVT\ 0,5\ bis\ 4} = 20$  bis 50 dB) und hohen Geräuschpegeln ( $L_N \approx 100$  dB) bei 5 dB/Oktave. Nimmt man an, daß die Sprachverständlichkeit vor allem bei Geräuschpegeln von  $L_N = 40$  bis 90 dB und für Personen mittleren Alters mit leichten Hörverlusten abgeschätzt werden soll, so wird für die Berechnung des AI eine Weitabverdeckung mit 15 dB/Oktave vorgeschlagen. Das Oktavspektrum ( $L_{Ni}$ ) des Geräusches, und falls Gehörschutz getragen wird, abzüglich der Schalldämmung des Gehörschutzes ( $d_i$ ) für die Frequenzen  $f_i = 125$  Hz bis 4 kHz, muß für die Berechnung der Mithörschwelle ( $L_{MT}$ ) bekannt sein. Die Mithörschwelle berechnet sich dann wie folgt:

1. Schritt:

$$L_{MT1} = L_{N1} \quad (i = 1; f_1 = 125 \text{ Hz}) , \quad (13)$$

2. und folgende Schritte

$$(i = 2 \text{ bis } 6, f_2 = 250 \text{ Hz bis } f_6 = 4 \text{ kHz} :$$

$$L_{MTi} = \max(L_{Ni}; L_{MTi-1} - 15 \text{ dB}) .$$

### 3.3.6. Nachhall

Die Berücksichtigung des Nachhalls bei der Bestimmung eines äquivalenten Störgeräuschpegels ist besonders aufwendig. Es müssen zwei Aspekte beachtet werden. Zum einen wird die Schallausbreitung beeinflusst: Die Schallpegelabnahme wird bei größeren Entfernungen von der Schallquelle sehr gering. Zum anderen wird beim Hörer durch den Nachhall der Sprache der Modulationsgrad (siehe Abschnitt 3.2.) der vom Hörer empfangenen Sprache geringer, was als Zunahme eines effektiven Geräuschpegels ( $L_{N(T)}$ ) aufgefaßt werden kann. Bei der Berechnung des STI werden beide Aspekte berücksichtigt. Hier soll nur der zweite Aspekt näherungsweise abgeschätzt werden.

Der Einfluß der Nachhallzeit darf nur berücksichtigt werden, wenn der Abstand ( $r$ ) zwischen Sprecher und Hörer größer als der Hallradius ( $r_H$ ) ist. Für kleinere Räume gilt dann

$$r > r_H = \sqrt{0,0032 V/m^3/T/s} ; \quad (14)$$

für Flachräume muß gelten

$$r > r_H = h/2 , \quad (14a)$$

wobei  $V$  das Volumen des Raumes,  $h$  die Höhe des Flachraumes und  $T$  die Nachhallzeit ist. Der Hallradius liegt bei Wohn-, Unterrichts- und Büroräumen bei 1 bis 3 m.

Houtgast (1980) gibt eine Näherungsformel für den Zusammenhang zwischen dem STI und der Nachhallzeit an. Der Zusammenhang zwischen dem STI, dem Geräuschpegel und der Nachhallzeit, wie er aus der Raumantwortfunktion berechnet wurde (Houtgast et al. 1980), kann näherungsweise durch die Multiplikation der jeweiligen STIs, die getrennt den Einfluß des Geräusches ( $STI_N$ ) und des Nachhalls ( $STI_T$ ) berechnen, ersetzt werden:  $STI = STI_N \cdot STI_T$ . Man erhält dann die Beziehung für einen effektiven Geräuschabstand ( $L_{SN(T)} = L_S - L_{N(T)}$ )

$$(L_{SN(T)} + 15 \text{ dB}) = \frac{1}{30} (-15 \lg T/1,5 \text{ s} + 15 \text{ dB}) (L_{SN} + 15 \text{ dB}) , \quad (15)$$

wobei die Nachhallzeit nur zwischen 0,15 s und 5 s liegen darf. Ist die Nachhallzeit  $T = 0$ , wird sie durch  $T = 0,15$  s ersetzt; es wird dann  $L_{SN(T)} = L_{SN}$ . Der effektive Geräuschpegel ( $L_{N(T)}$ ) ergibt sich somit zu

$$L_{N(T)} = -0,5 ([\lg(T/1,5 \text{ s}) + 1] L_S + [\lg(T/1,5 \text{ s}) - 1] L_N) . \quad (15a)$$

Es sei noch einmal betont, daß der Einfluß der Nachhallzeit, d. h. die Berechnung eines effektiven Geräuschpegels ( $L_{N(T)}$ ), nur dann berücksichtigt werden darf und zu richtigen Ergebnissen des STI führt, wenn der Hörer im diffusen Feld ist, d. h. die Entfernung der Gesprächspartner  $r \geq 5 \cdot r_H$  ist (Duquesnoy 1982). Bei Abständen zwischen Sprecher und Hörer von  $r \leq (1 \text{ bis } 2) r_H$  und einem Signal-Geräuschabstand von  $L_{SN} = (-10 \text{ bis } 0)$  dB liegt bei einer Vervielfachung der Nachhallzeit ( $T =$  von 0,5 s auf 2 s) die Veränderung des effektiven Geräuschpegels bei  $\Delta L_{N(T)} = (0,2 \text{ bis } 2)$  dB, bei einem Signal-Geräuschabstand von  $L_{SN} = 10$  dB liegt die Veränderung des effektiven Geräuschpegels bei  $\Delta L_{N(T)} \leq 4$  dB. So ist es für die Entwicklung eines einfachen Modells berücksichtigt, für übliche Entfernungen der Gesprächspartner ( $r < 5$  m) den Einfluß der Nachhallzeit zu vernachlässigen.

### 3.3.7. Äquivalenter Signal-Geräuschabstand

Der Artikulationsindex berechnet sich nach Gl. (6), indem dort der äquivalente Signal-Geräuschpegel ( $L_{SNi}^* = L_{Si} - L_{Ni}^*$ ) eingesetzt wird, wobei sich der effektive Oktavpegel der Sprache aus Gl. (9) ergibt. Der äquivalente Geräuschpegel ( $L_{NA}^*, L_{Ni}^*$ ) ergibt sich wie folgt: Ist das Oktavspektrum des Geräusches bekannt, ergibt sich  $L_{Ni}^*$  einerseits aus dem Maximum der Hörschwelle ( $L_{HSTO_i} + L_{HVT_i}$ ) der am Gehör wirksamen Mithörschwelle ( $L_{MT}$ ) und des minimalen Sprechpegels beim Hörer ( $L_{Si} - 18$  dB); andererseits darf  $L_{Ni}^*$  den Spitzenpegel der Sprache ( $L_{Si} + 12$  dB) nicht übersteigen, da er nicht mehr weiter zur Verdeckung des Sprachschalls beiträgt. Somit gilt

$$L_{Ni}^* = \min [\max(L_{HSTO_i} + L_{HVT_i}; L_{MT_i}; L_{Si} - 18 \text{ dB}); L_{Si} + 12 \text{ dB}] . \quad (16)$$

Soll die Nachhallzeit mit einbezogen werden, muß die Mithörschwelle nicht aus dem Geräuschpegel ( $L_{Ni}$ ), sondern aus dem effektiven Geräuschpegel ( $L_{N(T)_i}$ ) bestimmt werden.

Falls nur der A-bewertete Geräuschpegel ( $L_{NA}$ ) bekannt ist, kann man den Artikulationsindex auch näherungsweise zu

$$AI = 1/30 (L_{SA} - L_{NA} + 12 \text{ dB}) \quad (17)$$

berechnen, wobei sich  $L_{SA}$  aus Gl. (8) ergibt.

### 3.4. Das vereinfachte Modell

Das hier benutzte einfache Modell für die physikalischen Zusammenhänge während eines Gespräches benutzt im wesentlichen

a) den Sprechpegel in 1 m Abstand ( $L_{SA, 1m}$ ) entsprechend dem Geräuschpegel beim Sprecher und die Sprechpegelkorrekturen,

- b) die Schallausbreitung im ungestörten Schallfeld ( $DL_r = 20 \lg(r/1\text{ m})$ ),
- c) den Geräuschpegel ( $L_{Ni}$ ,  $L_{NA}$ ) bzw. auch den äquivalenten Geräuschpegel ( $L_{Ni}^*$ ,  $L_{NA}^*$ ) und den Signal-Geräuschabstand beim Hörer ( $L_{SNI}$ ,  $L_{SNA}$ ), aus dem sich der Artikulationsindex (AI) berechnen läßt.

Dieses Modell entspricht in etwa dem von Beranek (1947) vorgeschlagenen, bei dem statt des Geräuschpegels der Sprach-Störschallpegel (Speech-Interference-Level,  $L_{SIL}$ ) benutzt wird. Der Sprach-Störschallpegel ist gleich dem arithmetischen Mittelwert von vier Oktavpegeln des Geräusches ( $L_{Ni}$ ,  $f_i = 0,5$  bis  $4$  kHz). Näherungsweise läßt sich der Sprach-Störschallpegel auch aus dem A-bewerteten Geräuschpegel bestimmen ( $L_{NA} \approx L_{SIL} + 8$  dB, Lazarus 1986). Bei der Konstruktion der SIL-Kurven wird eine bestimmte Sprachverständlichkeit (SI für Einsilber 70 %) bzw. ein bestimmter Signal-Geräuschabstand ( $L_{SNA} = 1,5$  dB) oder Artikulationsindex (AI = 0,45) beim Hörer vorgegeben. Bei einer vorgegebenen Sprechweise des Sprechers und bekanntem Abstand Sprecher – Hörer kann der gerade noch zulässige Schallpegel für das Störgeräusch angegeben werden, um mindestens die vorgegebene Sprachverständlichkeit zu gewährleisten. Die SIL-Kurven (Bild 7) wurden in den letzten 10 Jahren wesentlich verbessert (z. B. Webster 1979 und 1983, Lazarus 1983, Lazarus et al. 1985, Lazarus 1986) und sind in den einzelnen Ländern zur Abschätzung der Sprachverständlichkeit in Normen eingearbeitet worden (AFNOR 1975, ANSI 1977, DIN 33 410 [1981], ISO TC 159/SC 7/WG 3).

#### 4. Bewertung der sprachlichen Kommunikation

##### 4.1. Rahmenbedingungen

Will man für einen Arbeitsplatz oder einen Wohnraum und für die dort ausgeführte Tätigkeit das

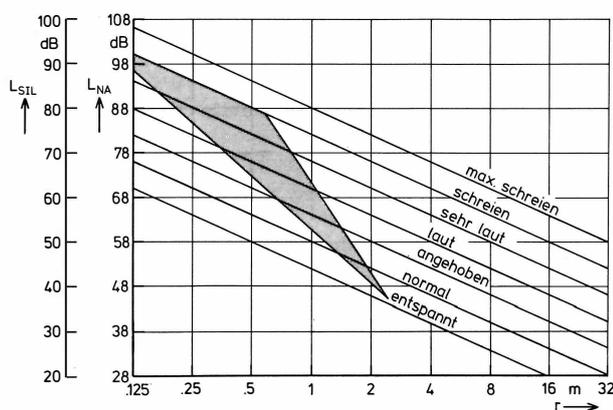


Bild 7

##### SIL-r-Diagramm

Zusammenhang zwischen dem Geräuschpegel ( $L_{SIL}$ ,  $L_{NA}$ ) und der maximal möglichen Entfernung Sprecher – Hörer ( $r$ ) für befriedigende Sprachverständlichkeit (SVE = 70 %, vorgegeben ist AI = 0,45 bzw.  $L_{SNA} = 1,5 \approx 2$  dB) und für Sprechweise entspannt bis maximal schreien (Warnrufe, bei normaler Sprechweise ist  $L_{SA, 1m} = 60$  dB, siehe Tabelle 1). Der Geräuschpegel wird gemessen als Sprech-Störschallpegel ( $L_{SIL}$ ) aus 4 Oktaven ( $f_i = 0,5$  bis  $4$  kHz) oder als A-Schallpegel ( $L_{NA}$ ). Das schraffierte Feld gibt die korrigierte bzw. zu erwartende Sprechweise an, Nachhallzeit  $T \leq 1$  s

mögliche oder notwendige Ausmaß der entsprechenden sprachlichen Kommunikation beurteilen, so müssen eine Reihe von Gegebenheiten berücksichtigt werden:

- die Häufigkeit der sprachlichen Kommunikation,
- die Notwendigkeit der sprachlichen Kommunikation,
- die Mindest-Sprachverständlichkeit (Belastung für den Hörer),
- die gerade akzeptable Sprechweise (Belastung für den Sprecher),
- der Mindestabstand zwischen Sprecher und Hörer.

Zieht man das oben skizzierte einfache Modell der Gesprächssituation heran (Abschnitt 3.4.), so können die beiden Gesprächspartner innerhalb der dargestellten Variabilitäten, wie Veränderung des Abstandes innerhalb der vorgegebenen Möglichkeiten und Regulierung des Sprechpegels, ihre Belastungen in ihrem Niveau verändern.

Bisher ist im wesentlichen das Ausmaß der Sprachverständigung bzw. der mit diesem eng verbundene Signal-Geräuschabstand (AI, STI,  $L_{SNA}$ ) zur Beurteilung der sprachlichen Kommunikation herangezogen worden. In Tabelle 3 sind Bewertungen der Sprachverständigung, die von Beranek (1947), Görlich (1975), Houtgast & Steeneken (1978), Kryter (1970), ISO 4870, May (1978) angegeben wurden, zusammengefaßt (Lazarus et al. 1985). Es muß aber zusätzlich auch die Belastung des Sprechers durch ständiges lautes Sprechen oder Schreien beachtet werden. Das erwähnte SIL-Verfahren berücksichtigt die Sprechweise in gewissem Umfang.

Eine kurzfristige oder auch ständige Überlastung der Stimmorgane kann zu organischen Schäden und funktionellen Störungen im Kehlkopf führen (Klingholz et al. 1976). Diese Stimmstörungen sind bei Berufen mit sprechintensiven Tätigkeiten und höheren Geräuschpegeln zu beobachten, wie bei Lehrern, Kindergärtnerinnen, Lärmarbeitern mit sprachintensiven Tätigkeiten (Vorarbeiter, Meister). Pathologische Abweichungen in der Stimmgebung treten beim Sprechen in Geräuschen mit Pegeln von mehr als  $L_{NA} = 85$  dB bei 40 bis 50 % der Personen auf. Im folgenden sollen aber auch die Belastungen und Belästigungen des Sprechers bei niedrigeren Geräuschpegeln einbezogen werden.

##### 4.2. Versuche zur Bewertung der Belastung des Sprechers und des Hörers

In zwei Experimenten zur sprachlichen Kommunikation wurden u. a. die Gesprächspartner gebeten, ihre Belastung beim Sprechen und Hören selbst einzuschätzen. Der Sprecher und der Hörer saßen sich in dieser Gesprächssituation in einem reflexionsarmen Raum gegenüber. Über einen offenen Kopfhörer wurden die beiden Gesprächspartner mit rosa Rauschen mit den Schallpegeln  $L_{NA} = 45$  dB, 67,5 dB und 90 dB beschallt. Der Schallpegel des Geräusches wurde am künstlichen Ohr kalibriert. Das Gesprochene wurde 3 bis 6 cm vor dem Mund mit einem Mikrofon gemessen und auf Tonband aufgenommen. Die Kalibrierung des Sprechpegels erfolgte mit einem Minilautsprecher, der an die Stelle des Sprechermundes gesetzt wurde. Der Sprecher hatte u. a.

SI in %	0	10	20	40	65	75	85	90	95	98	100
AI	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
STI	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0
$L_{SNA}$ in dB	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18
	ungenügend		unbefriedigend		ausreichend bis befriedigend		gut		sehr gut		ausgezeichnet

Tabelle 3

Die Bewertung der Sprachverständlichkeit für unterschiedliche Sprachverständlichkeit (Verständlichkeit von einsilbigen Worten SI) bzw. für entsprechenden Signal-Geräuschabstand (AI, STI,  $L_{SNA}$ )

Die Bewertung der Sprachverständlichkeit wurde entsprechend der Autoren ermittelt und zusammengefaßt (Lazarus et al. 1985)

die Aufgabe, 20 Einsilber und 20 Sätze dem Hörer vorzulesen; der Hörer sollte die Wörter und Sätze nachsprechen. Ausgewertet wurde der Prozentsatz der vom Hörer richtig erkannten Einsilber und Sätze. Zusätzlich erzählte der Sprecher dem Hörer eine Bildgeschichte; der Hörer sollte sie stückweise wiedererzählen.

Die Fragen nach der Belastung während der sprachlichen Kommunikation enthielten u. a. auch die Fragen

1. F1 – Das Sprechen war anstrengend?
2. F2 – Die Sprache war zu verstehen?
3. F3 – Die sprachliche Kommunikation war beeinträchtigt?

Sowohl der Sprecher als auch der Hörer sollten auf diese Frage eine von 10 möglichen Antworten ankreuzen. Die 10 möglichen Antworten und der Mittelwert der Antworten bei drei Geräuschpegeln sind für Frage 1 und 2 in den Bildern 8 und 9 angegeben.

Für die Frage 1 sind nur die Antworten der Sprecher, für die Frage 2 die der Hörer dargestellt. Die Ergebnisse stammen aus zwei unterschiedlichen Versuchen, in denen aber nur die Struktur der Sätze

etwas differierte. An jedem Versuch nahmen 18 Sprecher-Hörer-Paare teil. Die Einschätzung der eigenen Sprechanstrengung (Bild 8) ist über dem gemessenen Sprechpegel (bezogen auf 1 m Abstand vom Sprechermund) aufgetragen. In Bild 9 ist die Einschätzung der verstandenen Sprache über der gemessenen Sprachverständlichkeit (Prozentsatz richtig verstandener Einsilber) dargestellt. Dabei wurde der Prozentsatz der Einsilber mit Hilfe von Tabelle 3 in ein Signal-Geräuschverhältnis umgerechnet. In dem Versuch ergeben sich beim Anstieg des Geräusches von  $L_{NA} = 45$  dB auf 90 dB Antworten, die für die Anstrengung beim Sprechen von unerheblich bis stark laut, für das Ausmaß der Verständlichkeit geben die Hörer gut bis kaum an.

Man kann aus diesen Versuchen schließen, daß sowohl der Sprecher wie auch der Hörer seine jeweilige Tätigkeit (Sprechen oder Hören) einschätzen kann und die Anstrengung bzw. Belastung für die Gesprächspartner gleichermaßen mit dem Geräuschpegel zunimmt. Unterstützt wird diese Betrachtungs-

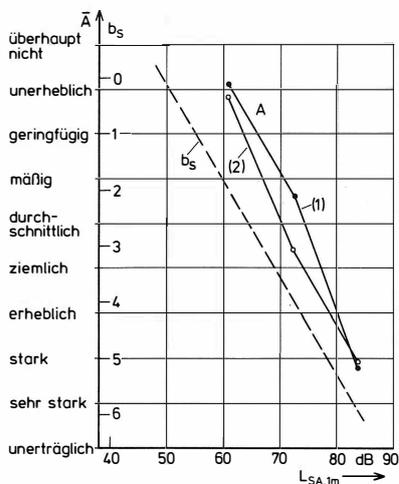


Bild 8

Antworten des Sprechers ( $\bar{A}$  = Mittelwert über  $V_p$ ) auf die Frage „Das Sprechen war anstrengend“ für zwei gleiche Versuchssituationen (1, 2), in der einsilbige Worte und Sätze gesprochen und Bildgeschichten erzählt wurden, dargestellt über dem Mittelungspegel der Sprache in 1 m Abstand von der  $V_p$  ( $L_{SA,1m}$ )

Die im Modell benutzten Bewertungsstufen ( $b_s$ ) für den Sprecher sind über dem Sprechpegel ( $L_{SA,1m}$ ) aufgetragen

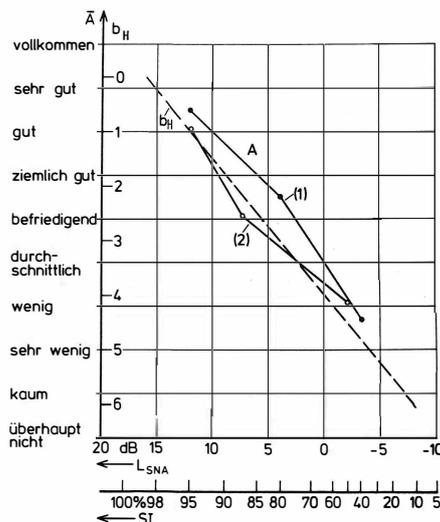


Bild 9

Antworten des Hörers ( $\bar{A}$  = Mittelwert über  $V_p$ ) auf die Frage „Die Sprache war zu verstehen“ für zwei gleiche Versuchssituationen (1, 2), in der einsilbige Worte und Sätze verstanden werden mußten, dargestellt über der Verständlichkeit von Einsilbern (SI)

Diese Verständlichkeit von Einsilbern wurde in ein Signal-Geräuschverhältnis ( $L_{SNA}$ ) nach Tabelle 3 umgerechnet (siehe auch Tabelle 3). Die im Modell benutzten Bewertungsstufen ( $b_H$ ) für den Hörer sind über dem Signal-Geräuschabstand ( $L_{SNA}$ ) aufgetragen

Fragen	F1 (S)			F2 (H)			F3 (S)			F3 (H)		
	45	67,5	90	45	67,5	90	45	67,5	90	45	67,5	90
$L_{NA}$ in dB												
F1 (S)	-	-	-	-0,11	-0,49	0,09	0,72	0,80	0,49	0,08	0,40	-0,09
F2 (H)	0,15	-0,30	-0,26	-	-	-	-0,41	-0,48	-0,27	-0,77	-0,85	-0,79
F3 (S)	0,48	0,43	0,34	-0,55	0,18	-0,54	-	-	-	0,17	0,34	0,48
F3 (H)	-0,10	0,13	0,21	-0,79	-0,69	-0,77	0,42	0,35	0,43	-	-	-

Tabelle 4

Korrelationskoeffizienten zwischen den Antworten für die Frage 1 für den Sprecher [F1 (S)], die Frage 2 für den Hörer [F2 (H)] und die Frage 3 für den Sprecher und den Hörer [F3 (S), F3 (H)], getrennt für einsilbige Wörter (oben rechts) und Sätze (unten links)

Korrelationskoeffizienten über 0,43 sind signifikant

weise, wenn man die Antworten auf die Frage 3 hinzunimmt. Die Beeinträchtigung der sprachlichen Kommunikation nimmt mit steigendem Geräuschpegel sowohl beim Sprecher wie auch beim Hörer gleichermaßen zu. Für den Versuch (1) wurden Korrelationen zwischen den Antworten der drei Fragen getrennt für den Hörer und den Sprecher ermittelt. Besieht man sich die Korrelationskoeffizienten (Tabelle 4), so erkennt man, daß diese besonders hohe Werte annehmen, wenn man die Antworten auf die Frage nach dem Ausmaß der Sprachverständigung [F2 (H)] und der Beeinträchtigung der sprachlichen Kommunikation [F3 (H)] beim Hörer in Beziehung zueinander setzt. Für die Beziehung zwischen der Sprechanstrengung [F1 (S)] und der Beeinträchtigung der sprachlichen Kommunikation [F3 (S)] gilt das nur für einsilbige Wörter bei mittleren und niedrigeren Geräuschpegeln.

Bei vergleichbaren Experimenten konnte anhand von Faktorenanalysen mit Ergebnissen von Befragungen nach der selbst eingeschätzten Belastung der Gesprächspartner gezeigt werden, daß für den Sprecher und den Hörer im Gespräch unterschiedliche Belastungseinschätzungen existieren (Lazarus-Mainka 1983). Die in Tabelle 4 angegebenen Korrelationskoeffizienten unterstützen die Annahme, daß bei einer Beurteilung der Belastung innerhalb eines Gespräches die Anstrengung des Sprechers und die Be-

hinderung des Hörers gleichermaßen getrennt einbezogen werden muß.

#### 4.3. Belastung der Gesprächspartner, Qualität der Kommunikation

Ein Teil dieser Gegebenheiten am Arbeitsplatz und im Wohnbereich ist durch die dort notwendige, übliche oder erwünschte Kommunikation und die räumlichen Bedingungen gegeben. Die Qualität der Kommunikation ergibt sich bei der Vorgabe dieser Bedingungen am Arbeitsplatz und im Wohnbereich dann im wesentlichen aus zwei Belastungsfaktoren:

- der Beeinträchtigung des Hörers durch eine mehr oder weniger gute Sprachverständlichkeit,
- der Anstrengung des Sprechers durch ein mehr oder weniger lautes Sprechen entsprechend der gewählten Sprechweise.

Es wurde gezeigt, daß beide Belastungsgrößen direkt wie bei der Sprachverständlichkeit (Bild 3) oder indirekt wie beim Lombardeffekt (Bild 2) durch die Höhe des Geräuschpegels bestimmt sind und von den Gesprächspartnern auch entsprechend bewertet werden. Die Festlegung der Qualität der sprachlichen Kommunikation muß also beide Faktoren in gleicher Weise berücksichtigen. Der Versuch, die Anstrengung des Sprechers entsprechend seiner Sprechweise bzw. seines Sprechpegels und die Beeinträchtigung des Hörers entsprechend des dort vorhandenen Signal-Geräuschabstandes zu bewerten, ist in Tabelle 5

Sprecher		Hörer		Sprachliche Kommunikation	
Sprechpegel bei 1 m in dB	Anstrengung	Signal-Geräuschabstand in dB	Behinderung	Anstrengung	Qualität
84	hoch	< -6	hoch	hoch	mangelhaft
78	↑	-6 ... -3	↑	↑	unbefriedigend
72		-3 ... 0			ausreichend
66		0 ... 3			befriedigend
60		3 ... 9			gut
54	↓	9 ... 18	↓	↓	sehr gut
48		> 18			keine

Tabelle 5

Bewertung der sprachlichen Kommunikation, wie sie sich aus der Anstrengung für den Sprecher und der Behinderung für den Hörer ergibt

Maßgebende Meßgrößen sind der Sprechpegel ( $L_{SA,1m}$ ) und der Signal-Geräuschabstand ( $L_{SNA}$ ) beim Hörer

gemacht. Die sprachliche Kommunikation kann nicht besser sein als die Belastung eines der Gesprächspartner. Soll z. B. eine ausreichende Kommunikation sichergestellt werden, so müssen sowohl die Anstrengungen für den Hörer als auch die für den Sprecher etwa ausreichend sein. Man kann versuchen, die vorliegenden Ergebnisse (Bild 8 und 9) in ein quantifiziertes Modell zur sprachlichen Kommunikation (Abschnitt 3.4.) zu integrieren. Dabei wird entsprechend der Belastung der Gesprächspartner die Bewertung der Kommunikation von ausgezeichnet (0), sehr gut (1) bis ungenügend (5), mangelhaft (6) festgelegt, wobei die Bewertung (0) keine, die Bewertung (6) die stärkste Belastung für die Gesprächspartner darstellt. Der Zusammenhang zwischen der Bewertung ( $b_S$ ) der Sprechanstrengung und dem Sprechpegel wird so angenommen, daß die Bewertung (0) bis (6) zwischen den Sprechweisen entspannt (privat,  $L_{SA, 1m} = 48$  dB) und schreien ( $L_{SA, 1m} = 84$  dB) liegt; er ergibt sich somit zu

$$L_{SA, 1m} = (6 b_S + 48) \text{ dB} \quad (18)$$

Die Beziehung zwischen der Bewertung ( $b_H$ ) für die Belastung des Hörers und dem Signal-Geräuschabstand wird auch vereinfachend linear angenommen und so festgelegt, daß sich die Bewertung  $b_H = (0)$  bis (6) für einen Signal-Geräuschabstand von  $L_{SNA} = (16$  bis  $-8)$  dB ergibt; es gilt dann

$$L_{SNA} = (-4 b_H + 16) \text{ dB} \quad (19)$$

Beide Beziehungen zwischen dem Bewertungsmaßstab des Sprechers und dem Sprechpegel sowie die zwischen dem Bewertungsmaßstab des Hörers und dem Signal-Geräuschabstand sind in die Bilder 8 und 9 eingetragen und liegen in der Größenordnung der empirischen Ergebnisse. Eine etwas stärkere Bewertung für die Anstrengung des Sprechers scheint gerechtfertigt, da im Gegensatz zu dem halbstündigen Experiment eine längerfristige Sprechaktivität beurteilt werden soll. Der Festlegung solcher Belastungsstufen liegt die Annahme zugrunde, daß die Gesprächspartner je nach Vertrautheit einen möglichst großen Abstand zwischen sich wählen (Hall 1969, Lazarus-Mainka 1984).

Mit Hilfe des angegebenen Modells (Abschnitt 3.4.) und einer vorzugebenden Belastung läßt sich die Gesprächssituation quantitativ beschreiben. Setzt man den äquivalenten Signal-Geräuschabstand ( $L_{SNA}^* = L_{SA} - L_{NA}^*$ ) beim Hörer (Gl. 17) und den Sprechpegel beim Sprecher (Gl. 8) in Beziehung zueinander und ersetzt den äquivalenten Geräuschpegel ( $L_{SNA}^*$ ) und den Sprechpegel ( $L_{SA, 1m}$ ) durch die beiden oben angegebenen Bewertungen (Gl. 18, 19), erhält man den Zusammenhang zwischen den Bewertungsstufen des Sprechers ( $b_S$ ) sowie des Hörers ( $b_H$ ) und den entsprechenden Abstand ( $r$ ) der Gesprächspartner:

$$20 \lg r/1m \text{ dB} = - \left[ 6 b_S \left( \frac{1}{c} - 1 \right) - 4 b_H \right] \text{ dB} + \frac{1}{c} (54 \text{ dB} + \Delta L_S) - 48 \text{ dB} \left( \frac{1}{c} - 1 \right) - 60 \text{ dB} - \Delta L_{NA}^* \quad (20)$$

Die Pegeldifferenz  $\Delta L_{NA}^*$  gibt dabei die Differenz zwischen dem äquivalenten Geräuschpegel beim Hö-

rer [ $L_{NA}^*(H)$ ] und dem Geräuschpegel beim Sprecher an:  $\Delta L_{NA}^* = L_{NA}^*(H) - L_{NA}(S)$ . Wir nehmen im folgenden an, daß die Störung des Gespräches nur durch ein Geräusch erfolgt und dieses beim Sprecher und beim Hörer gleich ( $\Delta L_{NA}^* = 0$ ) ist und daß die Steigung  $c = 0,5$  (Bild 2) ist. Sprechpegelkorrekturen ( $K_{S1}$  bis  $K_{S4}$ ) werden dabei im gesamten Pegelbereich (wie auch Geräuschspektrum, Hörverluste und Gehörschutz) bisher nicht berücksichtigt. Zusätzlich wollen wir annehmen, daß die Gesprächspartner (d. h. der Sprecher und der Hörer) bei Vorgabe eines bestimmten Geräuschpegels versuchen, ihre Gesprächsbedingungen (Sprechpegel, Signal-Geräuschabstand, Entfernung Sprecher-Hörer) so zu beeinflussen, daß ihre Beeinträchtigung jeweils gleich ist ( $b_S = b_H$ ). Der Sprecher wird aufgrund des vorgegebenen Geräusches ( $L_{NA}$ ) die entsprechende Sprechweise wählen (Bild 2); wie angenommen, kann er aufgrund der Gesprächssituation den Sprechpegel noch um  $\Delta L_S$  variieren. So ergibt sich bei einem vorgegebenen Geräuschpegel jeweils ein Bewertungsspielraum von  $b_S = -0,5$  bis 1. In einer Entfernung vom Sprecher ergibt sich für den Hörer bei dem vorgegebenen Geräuschpegel ein bestimmtes Signal-Geräuschverhältnis, woraus sich die Beeinträchtigung für den Hörer ergibt. Er kann diese nur beeinflussen, wenn er den Abstand zum Sprecher verändert. Für die Annahme gleicher Beeinträchtigung für Sprecher und Hörer ( $b_S = b_H$ ) läßt sich die Beziehung zwischen dem Störgeräuschpegel ( $L_{NA}$ ) und dem Abstand ( $r$ ) der Gesprächspartner berechnen und darstellen (Bild 10). Im Gegensatz zu den SIL-Kurven (Bild 7), die Kurven gleicher Sprachverständlichkeit ( $SI = 70\%$ , AI

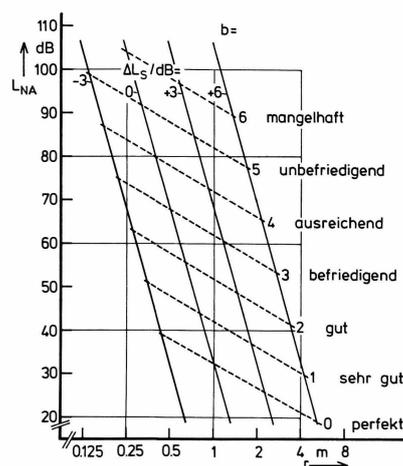


Bild 10

Qualität der sprachlichen Kommunikation ( $b$ ) für maximal zulässige Geräuschpegel ( $L_{NA}$ ) und maximal mögliche Entfernung ( $r$ ) zwischen den Gesprächspartnern

Als Parameter ist die mögliche Anhebung des Sprechpegels durch den Sprecher [ $\Delta L_S = (-3$  bis  $+6)$  dB] bei dem jeweiligen Geräuschpegel angegeben. Die Qualität entspricht den Belastungsstufen ( $b = b_S = b_H$ ) für den Sprecher und den Hörer. Voraussetzungen für diese Kurven ist das in Abschnitt 3.4. angegebene vereinfachte Modell, wobei Sprechpegelkorrekturen, Geräuschspektren, Hörverluste und Gehörschutz bisher nicht einbezogen worden sind. Die Ergebnisse dieser Abbildung sind deswegen insbesondere bei hohen Pegeln ( $L_{NA} \geq 80$  dB) nur sehr begrenzt aussagefähig

Raum/ Tätigkeit	Art der sprachlichen Kommuni- kation	Häufigkeit der sprachl. Kommuni- kation	gerade noch vertretbare Sprechweise	$L_{SA, 1m}$ in dB	Qualität der Sprach- verstän- digung	AI	$L_{SNA}$ in dB	Bewert- stufen		max. Entfer- nung r in m	Höchstw. d. Geräuschpeg. $L_{NA,m}$ in dB	Bemer- kungen
								$b_S$	$b_H$			
Wohnung innen  außen	entspanntes Gespräch	sehr hoch sehr hoch	entspannt (p) entspannt (p)	48	ausgez.	1,00	18	0	0	2	28	
				48	sehr gut	0,80	12	0	1	2	30	
	entspanntes Gespräch	hoch hoch hoch	normal (p) normal (p) angehob. (p) angehob. (p) angehob. (p)	54	sehr gut	0,80	12	1	1	4	30	
				54	sehr gut	0,80	12	1	1	2	36	
				60	sehr gut	0,80	12	2	1	2	42	
60	sehr gut	0,80	12	2	1	4	36					
60	gut	0,60	6	2	2	8	36					
Gaststätten Diskotheken	Gespräch kurze Gespräche	mäßig selten	normal laut laut	60	gut	0,60	6	2	3	2	48	
				72	ausreich.	0,35	-2	4	4	1	73	
				72	ausreich.	0,35	-2	4	4	0,5	79	
Kaufhaus Geschäft	kurze Gespräche	hoch hoch	normal normal	60	gut	0,60	6	2	2	1	54	
				60	gut	0,60	6	2	2	2	48	
Sitzungs- raum	längere Gespräche	hoch	normal normal normal	60	sehr gut	0,80	12	2	1	4	38	Flach- raum h = 4 m DL <sub>r</sub> = 4 dB/AV
				60	sehr gut	0,80	12	2	1	8	34	
				60	sehr gut	0,80	12	2	1	16	30	
Einzelbüro Mehrper- sonenbüro	Gespräche Gespräche kurze Gespräche	sehr hoch mäßig selten	normal normal normal normal angehoben	60	sehr gut	0,80	12	2	1	2	42	
				60	gut	0,60	6	2	2	2	48	
				60	befried.	0,45	2	2	3	2	52	
				60	befried.	0,45	2	2	3	1	58	
				66	befried.	0,45	2	3	3	1	64	
Büroraum	Phonodiktat (diktieren) Phonodiktat (abhören)	mäßig mäßig	normal $L_{SA,m} \leq 80$ dB	60	ausgez.	1,00	18	2	0	0,06	55	} $L_{SNA}$ $\geq 30$ dB
				-	ausgez.	1,00	18	2	0	-	50	
Unterrichts- raum	sprachl. Mitteilung. Gespräche	sehr hoch sehr hoch	normal angehoben	60	sehr gut	0,80	12	2	1	8	36	Flach- raum h = 4 m DL <sub>r</sub> = 3 dB/AV
				66	sehr gut	0,80	12	3	1	8	40	
Montage- arbeiten	kurze Mitteilung.	mäßig mäßig mäßig	laut sehr laut sehr laut	72	befried.	0,45	2	4	3	1	70	
				78	befried.	0,45	2	5	3	1	76	
				78	befried.	0,45	2	5	3	0,5	82	
Sozial- räume	Gespräche	mäßig mäßig	normal normal	60	befried.	0,45	2	2	3	2	52	
				60	gut	0,60	6	2	2	2	48	
Verkehrs- mittel	kurze Gespräche	mäßig mäßig mäßig	normal normal angehoben	60	befried.	0,45	2	2	3	1	58	
				60	befried.	0,45	2	2	3	0,5	64	
				66	befried.	0,45	2	3	3	1	64	
Lehr- werkstatt	Gespräche	mäßig mäßig mäßig mäßig	laut laut sehr laut sehr laut	72	befried.	0,45	2	4	3	1	70	
				72	gut	0,60	6	3	2	1	66	
				78	befried.	0,45	2	5	3	1	76	
				78	befried.	0,45	2	5	3	0,5	82	

Tabelle 6

Höchstwerte von Geräuschpegeln (Spalte 11,  $L_{NA,m}$ ) für die sprachliche Kommunikation

Vorgegeben sind die Art der Tätigkeit (Spalte 1), Art (2) und Häufigkeit (3) der sprachlichen Kommunikation, seitens des Sprechers die vertretbare Sprechweise (4), der Sprechpegel (Spalte 5,  $L_{SA, 1m}$ ), seitens des Hörers die Qualität der Sprachverständigung (6), der Artikulationsindex (Spalte 7, AI) bzw. der Signal-Geräuschabstand (Spalte 8,  $L_{SNA}$ ), die entsprechenden Bewertungsstufen für den Sprecher (Spalte 9,  $b_S$ ) und den Hörer (Spalte 9,  $b_H$ ) und die maximale Entfernung der Gesprächspartner (10)

= 0,45) für vorgegebene Sprechpegel darstellen, sind die Kurven in **Bild 10** jeweils Kurven für gleiche Belastung beim Sprecher und beim Hörer ( $b_S = b_H$ ). Bei einem vorgegebenen Geräuschpegel ( $L_{NA}$ ) ergibt sich so eine maximale Entfernung ( $r$ ) zwischen Sprecher und Hörer, bei der eine bestimmte Belastungsstufe ( $b = b_S = b_H$ ) nicht überschritten wird.

Für ein vorgegebenes  $\Delta L_S$  gibt eine Kurve in **Bild 10** an, welche maximale Entfernung die Gesprächspartner bei einem vorhandenen Geräuschpegel wählen werden, wobei sich dann die für die beiden Gesprächspartner als gleich angenommene Belastung entsprechend der angegebenen Bewertungsstufen ergibt. Vermutlich wird der Sprecher dort, wo eine sehr sichere Sprachverständigung erforderlich ist (z. B. bei kurzen Warnrufen) oder dort, wo es notwendig ist, die Sprachverständigung zu erhöhen (z. B. bei hohen Geräuschpegeln oder großen Entfernungen), eher seinen Sprechpegel zusätzlich erhöhen [ $\Delta L_S = (0 \text{ bis } 6) \text{ dB}$ ], jedoch dort, wo die Sprachverständigung schon ausgezeichnet ist oder bei längeren Sprechphasen (um die Sprechanstrengung zu vermindern), eher leiser sprechen [ $\Delta L_S = -(0 \text{ bis } 3) \text{ dB}$ ].

#### 4.4. Geräuschhöchstwerte für bestimmte Gesprächssituationen

Folgt man dem Bewertungsprinzip, das in **Tabelle 5** für das Sprechen und Verstehen angegeben ist, und benutzt das angegebene Modell (Abschnitt 3.4.), kann man für bestimmte Situationen, in denen sprachliche Kommunikation erforderlich ist, und unter Berücksichtigung der räumlichen Situation Geräuschhöchstwerte ableiten. Die Beeinträchtigung des Gespräches soll bei den gewählten Beispielen nur durch Geräusche erfolgen, weitere Faktoren (wie Nachhall, Gehörschutz, Schwerhörigkeit, Sprechpegelhöhe) werden vorerst nicht berücksichtigt, ließen sich aber entsprechend den Ausführungen des Abschnittes 3. einbeziehen. In **Tabelle 6** werden je nach den Anforderungen an die Kommunikation für verschiedene Bewertungsstufen der am Gespräch Beteiligten die Geräuschhöchstwerte für einige Tätigkeiten und Räume (wie Wohnungen, Büros, Unterrichtsräume, Diskotheken) beispielhaft angegeben. Je nach Gesprächssituation wurde der Sprechpegel ( $L_{SA, 1m}$ ) bzw. die Belastung des Sprechers, der Signal-Geräuschabstand ( $L_{SNA}$ ) bzw. die Belastung des Hörers und der Abstand der Gesprächspartner beispielhaft so vorgegeben, daß die Bewertungsstufen für den Sprecher ( $b_S$ ) und den Hörer ( $b_H$ ) möglichst gleich sind, in einigen Fällen sind sie um 2 Stufen verschieden. Der für den Sprecher frei wählbare Pegelwert aus Gl. (1) liegt bei den gewählten Beispielen, bei denen der Abstand der Gesprächspartner  $r \leq 2 \text{ m}$  ist, bei  $\Delta L_S = (-4 \text{ bis } +8) \text{ dB}$ . Bei größerer Entfernung ( $r = 4 \text{ bis } 16 \text{ m}$ ), z. B. außerhalb von Wohnungen, in Sitzungsräumen und in Unterrichtsräumen, muß der Sprecher noch lauter sprechen ( $\Delta L_S = 14 \text{ dB}$ ), um beim Hörer einen entsprechenden Signal-Geräuschabstand zu erzielen.

### 5. Schlußbemerkung

Wird ein einfaches Modell für die physikalischen Zusammenhänge im Gespräch benutzt und werden Belastungsstufen für den Sprecher und den Hörer eingeführt, so lassen sich unterschiedliche Gesprächs-

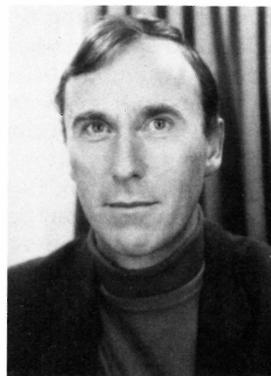
situationen auf übersichtliche Weise beschreiben. Die Vermutung, daß der Sprecher und der Hörer – sie wechseln ihre Rolle im Gespräch ständig – ihre Belastungen im Gespräch möglichst gleich halten wollen, wurde anhand von einigen dargestellten Beispielen erläutert.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Ab'el, S. H. M.; Alberti, P. W.; Haythornthwaite, C.; Riko, K.: Speech intelligibility in noise: Effects of fluency and hearing protector type. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 71 (1982), S. 708 bis 715.
- [2] AFNOR NF S 31-047: Acoustique évaluation des distances d'intelligibilité de la parole dans une ambiance bruyante. Association Française de Normalisation, Paris 1975. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin.
- [3] Aniansson, G.: Traffic noise speech interference levels for normal and hearing-impaired listeners. In: Tobias, J. V.; Jansen, G.; Ward, W. D. (Eds.): Noise as a public health problem. Proc. of the 3rd Intern. Congress. ASHA Rep. No. 10 (1980), Rockville/Maryland 1980, S. 192 bis 202.
- [4] ANSI S 3.5: Methods for the calculation of the articulation index. American National Standard Institute, New York 1969. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin.
- [5] ANSI S 3.14: American national standard for rating noise with respect to speech interference. American National Standard Institute, New York 1977, Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin.
- [6] Beranek, L. L.: Airplane quieting II specification of acceptable noise levels. *Trans. on Am. Soc. Mech. Eng.* 69 (1947), S. 97 bis 100.
- [7] DIN 33 410: Sprachverständigung in Arbeitsstätten unter Einwirkung von Störgeräuschen. Begriffe, Zusammenhänge. Hrsg. v. Deutschen Normenausschuß, Berlin 1981. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin – Köln.
- [8] DIN 45 621: Wörter für Gehörprüfung. Hrsg. v. Deutschen Normenausschuß, Berlin 1973. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin – Köln.
- [9] Duquesnoy, A. J. H. M.: Speech intelligibility of the hearing impaired. *Academisch Proefschrift. Universiteit Amsterdam* 1982.
- [10] Elliott, L. L.: Performance of children aged 9 to 17 years on a test of speech intelligibility in noise using sentence material with controlled word predictability. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 66 (1979), S. 651 bis 653.
- [11] Gat, I. B.; Keith, R. W.: An effect of linguistic experience. *Audiology* 17 (1978), S. 339 bis 345.
- [12] Görlich, R.: Beurteilung der Geräuschmission. In: Heckl, M.; Müller, H. A. (Hrsg.): Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York 1975, S. 87 bis 136.
- [13] Hall, E. T.: The hidden dimension. Doubleday & Comp., New York 1969.
- [14] van Heusden, E.; Plomp, R.; Pols, L. C. W.: Effect of ambient noise on the vocal output and the preferred listening level of conversational speech. *Applied Acoustics* 12 (1979), S. 31 bis 43.
- [15] Hörmann, H.; Lazarus-Mainka, G.; Lazarus, H.: The effect of noise and the wearing of ear protectors on verbal communication. *Noise Control Eng. J.* 23 (1984), S. 69 bis 77.
- [16] Houtgast, T.: Indoor speech intelligibility and indoor noise level criteria. In: Tobias, J. V.; Jansen, G.; Ward, W. D. (Eds.): Noise as a public health problem. Proc. of the 3rd Intern. Congress. ASHA Rep. No. 10 (1980), Rockville/Maryland 1980, S. 172 bis 183.
- [17] Houtgast, T.; Steeneken, H. J. M.: Envelope spectrum and intelligibility of speech in enclosures. Conf. on Speech Communications and Processing, Newton/Mass., April 1972, S. 392 bis 395.
- [18] Houtgast, T.; Steeneken, H. J. M.: Applications of the modulation transfer function in room acoustics. *Institute for Perception, Eindhoven* 48 (1978), S. 1 bis 29.
- [19] Houtgast, T.; Steeneken, H. J. M.; Plomp, R.: Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. I. General room acoustics. *Acustica* 46 (1980), S. 60 bis 72.
- [20] Howell, K.; Martin, A. M.: An investigation of the effects of hearing protectors on vocal communication in noise. *J. of Sound and Vibration* 41 (1975), S. 181 bis 196.

- [21] ISO DP 4870: Acoustics recommended methods for measuring the intelligibility of speech. International Organization for Standardization, Genf 1975. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin.
- [22] ISO TC 159/SC 7/WG 3: Danger signals and communication in noisy environment. International Organization for Standardization, Genf. Alleinverkauf: Beuth Verlag, Berlin.
- [23] Kalikow, D. N.; Stevens, K. N.; Elliott, L. L.: Development of a test of speech intelligibility in noise using sentence materials with controlled word predictability. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 61 (1977), S. 1337 bis 1351.
- [24] Klingholz, F.; Maerz, H.; Siegert, C.: Die Belastung des Stimmorgans bei Phonation in Lärm. *Z. Gesundheit und Hygiene* 22 (1976), S. 812 bis 815.
- [25] Kryter, K. D.: Effects of ear protective devices on the intelligibility of speech in noise. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 18 (1946), S. 413 bis 417.
- [26] Kryter, K. D.: Methods for the calculation and use of the articulation index. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 34 (1962), S. 1689 bis 1997.
- [27] Kryter, K. D.: The effect of noise on man. Academic Press, New York — London 1970.
- [28] Lazarus, H.: Literature Review 1978 — 1983 in German language on noise and communication. In: Rossi, G. (Ed.): Noise as a public health problem. Proc. of the 4th Intern. Congress, Turin, Edizione Tecnica a cura del CRSA, Milano 1983.
- [29] Lazarus, H.: Prediction of verbal communication in noise — a review. Part 1 (in Vorbereitung 1986).
- [30] Lazarus, H.: Prediction of verbal communication in noise — a development of generalized SIL curves and the quality of communication. Part 2 (in Vorbereitung 1986).
- [31] Lazarus, H.; Lazarus-Mainka, G.; Schubeius, M.: Sprachliche Kommunikation unter Lärm. F. Kiehl Verlag, Ludwigshafen 1985.
- [32] Lazarus-Mainka, G.: Subjektive Befindlichkeit von Sprecher und Hörer bei sprachlicher Kommunikation unter Lärm. In: Schick, A.; Walcher, K. P. (Hrsg.): Beiträge zur Bedeutungslehre des Schalls. P. Laug, Bern 1983.
- [33] Lazarus-Mainka, G.: Sprecher-Hörer-Interaktion unter Geräuscheinwirkung. In: Engelkamp, J. (Hrsg.): Psychologische Aspekte des Verstehens. Springer-Verlag, Berlin — Heidelberg — New York 1984.
- [34] Lazarus-Mainka, G.; Lazarus, H.: Der Einfluß der Sprechweise auf die Sprachverständlichkeit. *Fortschritte der Akustik — DAGA 84*, Darmstadt. DPG-GmbH, Bad Honnef 1984, S. 865 bis 868.
- [35] Lazarus-Mainka, G.; Raschdorf, P.: Sprachverständlichkeit abhängig von der Prosodie. *Archiv für Psychologie* 1985 (erscheint demnächst).
- [36] Martin, A. M.; Howell, K.; Lower, M. C.: Hearing protection and communication in noise. In: Stephens, S. D. G. (Ed.): Disorders of auditory function — II. Academic Press, London 1976.
- [37] May, D. N.: Handbook of noise assessment. Van Nostrand Reinhold Company, New York 1978.
- [38] Niemeyer, W.: Wie hört ein Lärmschwerhöriger? In: Pfeiffer, B. H. (Bearb.): Lärm-Arbeitsmedizinische Gehörvorsorge. Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften, Bonn 1983, S. 129 bis 139.
- [39] Pearsons, K. S.; Bennett, R. L.; Fidell, S.: Speech levels in various noise environments. EPA-600/1-77-025, 1977.
- [40] Pickett, J. M.: Effects of vocal force on the intelligibility of speech sounds. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 28 (1956), S. 902 bis 905.
- [41] Pickett, J. M.; Pollack, I.: Prediction of speech intelligibility at high noise levels. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 30 (1958), S. 955 bis 963.
- [42] Plomp, R.: Auditory handicap of hearing impairment and the limited benefit of hearing aids. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 63 (1978), S. 533 bis 549.
- [43] Plomp, R.; Duquesnoy, A. J.; Smoorenburg, G. F.: Effects of noise and reverberation on the speech-reception threshold of hearing-impaired listeners. In: Rossi, G. (Ed.): Noise as a public health problem. Proc. of the 4th Intern. Congress, Turin. Edizione Tecnica a cura del CRSA, Milano 1983.
- [44] Plomp, R.; Mimpfen, A. M.: Speech-reception threshold for sentences as a function of age and noise level. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 66 (1979), S. 1333 bis 1342.
- [45] Rittmanic, P.: Pure-tone masking by narrow-noise bands in normal and impaired ears. *J. Aud. Research* 2 (1962), S. 287 bis 304.
- [46] Rostolland, D.: Phonetic structure of shouted voice. *Acustica* 51 (1982), S. 80 bis 89.
- [47] Rostolland, D.: Intelligibility of shouted voice. *Acustica* 57 (1985), S. 103 bis 121.
- [48] Rostolland, D.; Parant, C.: Distortion and intelligibility of shouted voice. Symposium Speech Intelligibility, Liège 1973.
- [49] Smoorenburg, G. F.; de Laat, J. A. P. M.; Plomp, R.: The effect of noise-induced hearing loss on the intelligibility of speech in noise. In: Borchgrevink, H. M. (Ed.): Hearing & hearing prophylaxis. *Scand. Audiol. Suppl.* 16 (1982), S. 123 bis 133.
- [50] Sotscheck, J.: Ein Reimtest für Verständlichkeitsmessungen mit deutscher Sprache als verbessertes Verfahren zur Bestimmung der Sprachübertragungsgüte. *Der Fernmelde-Ingenieur* 36 (1982), Heft 4/5, S. 1 bis 84.
- [51] Spreng, M.: Weiterführende Untersuchungen und Beurteilungen des Gehörs. In: Arbeitsmedizinisches Kolloquium des Hauptverbandes der Gewerblichen Berufsgenossenschaften, Göttingen 1983. Schriftenreihe des Hauptverbandes der Gewerblichen Berufsgenossenschaften, Bonn 1983.
- [52] Steeneken, H. J. M.; Houtgast, T.: A physical method for measuring speech-transmission quality. *J. of the Acoust. Soc. Am.* 67 (1980), S. 318 bis 326.
- [53] Suter, A. H.: Hearing level and speech discrimination in noise. In: Tobias, J. V.; Jansen, G.; Ward, W. D. (Eds.): Noise as a public health problem. Proc. of the 3rd Intern. Congress. ASHA Rep. No. 10 (1980), Rockville/Maryland 1980, S. 203 bis 209.
- [54] Webster, J. C.: Effects of noise on speech. In: Harris, C. M.: Handbook of noise control. McGraw-Hill, New York 1979.
- [55] Webster, J. C.: Communication in noise 1978 — 1983. In: Rossi, G. (Ed.): Noise as a public health problem. Proc. of the 4th Intern. Congress, Turin. Edizione Tecnica a cura del CRSA, Milano 1983.
- [56] Webster, J. C.: Noise and communication. In: Jones, D. M.; Chapman, A. J. (Eds.): Noise and Society. John Wiley & Sons, New York — London 1984.
- [57] Zwicker, E.; Feldtkeller, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967.

#### Der Autor



Dr.-Ing. Hans Lazarus (47) studierte Nachrichtentechnik an den Technischen Universitäten in Dresden und Berlin. Er promovierte bei Prof. Cremer am Institut für Technische Akustik der TU Berlin und ist seit 1973 Leiter der Gruppe Lärmschutz, Vibrationen in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 4600 Dortmund 1, Postfach 170202.