

# **BAM-BERICHT Nr. 6**

DER BUNDESANSTALT FÜR  
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung  
des Luftschallschutzes von Bauelementen  
bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

**von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider**



Die vorliegende Arbeit wurde entwickelt aus den besonderen, zum Teil noch offenen Problemen bei der Beurteilung des Schallschutzes von Außenfenstern. Die Betrachtungen zum Außen-Schallschutz im Vergleich zum Schallschutz zwischen zwei Räumen sind jedoch allgemeiner Art und betreffen somit gleichermaßen auch Außenfassaden und Fassadenelemente, wie sie in neuen Bauarten (z. B. Skelettbauarten, Schottenbauarten, Bauarten aus großformatigen Bauteilen) zur Anwendung kommen und sind damit von allgemeiner Bedeutung. Die Ausführungen über den Zusammenhang von Gesamtwirkungen und Einzelwirkungen der Schalldämmung zusammengesetzter Flächen sind z. T. für Einzelprobleme bereits anlässlich früherer Arbeiten für den jeweiligen Spezialfall abgeleitet jedoch bisher nie zusammengefaßt worden. In dieser Arbeit wird versucht, aus einer allgemeinen Betrachtung von  $n$ -Teilflächen unterschiedlicher Größe und Transmission alle Probleme bei der Prüfung und Wertung der Luftschalldämmung in der Bauakustik durch jeweils modifizierte Zusatzbedingungen geschlossen abzuleiten. Diese Ausführungen haben somit ebenfalls über das Fensterproblem hinaus ihre allgemeine Bedeutung, also auch z. B. bei Türen, Glaswänden, Lichtbändern, Montagewänden und deren Elemente. Dies

gilt insbesondere auch für neu abgeleitete Auswertgleichungen, Fehlerbetrachtungen und Korrekturfunktionen.

Schließlich werden auch die Einflüsse der akustischen Dichtungen von Fugen (z. B. Schließfugen, Stoßfugen, Randfugen) behandelt, die ebenfalls über das Fensterproblem hinaus von allgemeinem Interesse sind.

Wegen der besseren Anschauung bei der Fülle sonstiger Einflußparameter bei den ja auch stets frequenzabhängigen Größen liegt jedoch der Schwerpunkt der Darstellungen beim speziellen Problem hochschalldämmender Fenster, z. B. gekennzeichnet durch entsprechende Indices. Die Ergebnisse und Formeln sind jedoch sinngemäß jeweils auch auf andere Bauteile und Bauteilkombinationen anwendbar.

Da die Größen der Schalldämmung, des Schallschutzes, der Anforderungen und des Störschalls in der Regel in der Einheit dB vorliegen und hierbei für diese Größen und ihre Differenzen in der bauakustischen Praxis urteilsbildende Vorstellungen vorliegen, wurden alle Lösungen und Ableitungen in Form von Pegelbilanzen bzw. Gleichungen der logarithmischen Größen beschrieben.

Berlin-Dahlem

Januar 1970

P. Schneider



	Seite
1. Einleitung	1
2. Die möglichen Arten von Schallfeldern vor und hinter einem Fenster und ihr Einfluß auf das Luftschalldämm-Maß und den Luftschallschutz	2
3. Zusammenhang von R-Messungen und $\Delta L$ -Messungen bei Fensterprüfungen	11
4. Allgemeine Zusammenhänge zur resultierenden Luftschalldämmung von mehreren Teilflächen unterschiedlicher Transmission	13
5. Exakte Lösungen zur resultierenden Schalldämmung von zwei Teilflächen unterschiedlicher Einzeldämmungen	15
6. Näherungslösungen bzw. exakte Lösungen der Schalldämmung bei der Annahme definierter Grenzbedingungen	17
7. Fehlerfunktionen zur Bestimmung realer Luftschalldämm-Maße $R_F$ nach einfachen Auswertungen mit der klassischen Definitionsgleichung $R = D + 10 \lg S/A$	20
8. Zum Einfluß der akustischen Dichtung von Schließfugen und der Nebenwegübertragung zwischen Fenster und Wand	24
9. Die Maßnahmen im BAM-Fensterprüfstand zur Messung hochschalldämmender Fenster	33
10. Die Anwendung von Prüfergebnissen in der planenden Bauakustik	35
11. Die Ursachen möglicher Abweichungen $\Delta L \leq R$ bei der experimentellen Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes von Fenstern	36
12. Zusammenfassung	44
13. Zusammenstellung benutzter Symbole und Indices	47
14. Schrifttum	49



Versucht man nach dem heutigen Erkenntnisstand der Bauakustik in Forschung, Normung und Baupraxis in einer allgemeinen, zugleich programmatischen Form den Begriff der "Bauakustischen Prüfung" zu definieren, so läßt sich folgendes aussagen:

Eine bauakustische Prüfung ist der jeweilige Versuch, die Wirkungen physikalischer Phänomene (z. B. wellentheoretischer Phänomene in der Wechselwirkung von Luftschall und Körperschall) an bautechnischen Objekten (z. B. Decken, Wände, Fenster) in statistischen Schallfeldern (Wohn- und Arbeitsräume, Meßräume) unter gegebenen bzw. definierten Randbedingungen (Einbaubedingungen, Flankenübertragung, Nebenwegübertragung) mit objektiven Meßverfahren (definierte Schallanregung, Messung mittlerer absoluter Schallpegel im zeitlich und räumlich komplexen Wellenfeld) zu bestimmen, gegebenenfalls durch raumakustische Ergänzungsmessungen (Nachhallzeiten) auf geeignete vergleichbare bauteilkennzeichnende Größen zu normieren (z. B. Norm-Schallpegeldifferenz  $D_n$ , Luftschalldämm-Maß  $R$ , Norm-Trittschallpegel  $L_n$ ), hörphysiologisch zweckmäßig zu bewerten (z. B. Sollkurvenprinzip, Schallschutzmaße) und gestellten Anforderungen gemäß zu beurteilen und einzustufen.

Während die Definitionsgleichungen als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Meßtechnik zunächst aus der Theorie der statistischen Raum- und Bauakustik entwickelt wurden, also unter der Voraussetzung von Meßräumen mit idealer statistischer Energieverteilung (im Sinne hinreichender Diffusität) vor und hinter dem Prüfgegenstand, erfolgten die ersten wellentheoretischen Berechnungen unter der Annahme senkrechten Schallein- und -austritts, wie z. B. die klassische Ableitung des Massegesetzes zur Luftschalldämmung einschaliger Bauteile sowie die ersten Berechnungen zur Dämmung zweischaliger Bauteile zeigen [1-3]. Das heißt, die ersten wellentheoretischen Berechnungen erfolgten im Gegensatz zu möglichen Messungen unter der Annahme gerichteter Schallfelder. Die Berücksichtigung der Biegesteifigkeit einschaliger Bauteile unter Einschluß

der Biegewellentheorie führte dann zu Berechnungen mit gerichteten Schallfeldern unterschiedlicher Schalleinfallrichtungen, wie dies u. a. an dem von L. Cremer zuerst beschriebenen Koinzidenzeffekt (Spuranpassungseffekt) deutlich wird [4]. Mit der Integration der Einzelwirkungen über alle Schalleinfallswinkel, z. B. über die Paris'sche Formel, erfolgte die erste Verknüpfung mit der statistischen Betrachtungsweise also - jetzt gegenüber oben etwas anders ausgedrückt - der Betrachtung bei allseitigem Schalleinfall bzw. allseitiger Schallabstrahlung. In der Folgezeit wurden dann die wellentheoretischen Betrachtungen durch modifizierte und der Baupraxis gerechter werdende Berücksichtigungen der Randbedingungen (z. B. Art der Randeinspannung der Bauteile, Flankenübertragung) [5-8] und Einbeziehung weiterer technologischer Einflüsse (z. B. Berücksichtigung des Verlustfaktors der Baustoffe) verfeinert [3, 9-12], wie auch andererseits der Gültigkeitsbereich bzw. die Grenzen der statistischen Theorien neu überdacht wurden, z. B. im Hinblick auf die Auswirkungen der Eigentonichte und Eigentonverteilung in den Meßräumen [13-15] sowie im Hinblick auf eine geeignete "Dosierung der Statistik" in Bezug auf die Art des Prüfschalles (z. B. Filterbreite bei der Anregung und Messung mit Rauschen als "statistischer Prüfschall") und die Zahl und Verteilung der Mikrofonorte zur Bestimmung repräsentativer Werte mittlerer Schallpegel in den Meßräumen in einem für jede Einzelfrequenz ja anders aufgebauten zeitlich und örtlich komplexen Wellenfeld [16-18].

Für Bauteile, die grundsätzlich zwischen zwei Räumen, also in der Regel zwei statistischen Schallfeldern wirken (z. B. Decken und Wände) sind damit meßtechnisch die Probleme bauakustischer Prüfungen im Sinne der eingangs gegebenen Definition weitgehend geklärt. Für die Probleme der Luftschalldämmung von Fenstern sind die Auswirkungen unterschiedlicher Schallfeldervor und hinter dem Fenster erneut zu erörtern, wenn man bedenkt, daß beim normalen Außenfenster vor dem Fenster gerichtete Schallfelder und hinter dem Fenster statistische Schallfelder vorhanden sind.

**2. Die möglichen Arten von Schallfeldern vor und hinter einem Fenster und ihr Einfluß auf das Luftschalldämm-Maß und den Luftschallschutz**

Die allgemeine Definitionsgleichung des Luftschalldämm-Maßes  $R$  ist für alle Arten von Schallfeldern vor und hinter einem Fenster gleich mit

$$R = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

wenn  $P_1$  die auf das Fenster auffallende und  $P_2$  die vom Fenster durchgelassene Schalleistung bedeuten. Die Auswertgleichungen und die Ergebnisse für  $R$  sind jedoch von den Arten dieser Schallfelder abhängig, die sich wie folgt systematisieren lassen.

	vor dem Fenster	hinter dem Fenster
a)	statistisches Schallfeld	statistisches Schallfeld
b)	freies Schallfeld	statistisches Schallfeld
c)	statistisches Schallfeld	freies Schallfeld
d)	freies Schallfeld	freies Schallfeld

Die Zeile a) entspricht der üblichen Prüfung nach der Doppel-Hallraummethode, also nach DIN 52 210 [18] (siehe auch Bild 6 u. 7). Das Schalldämm-Maß  $R$  wird unter der Voraussetzung, daß die Dämmung der Trennwand, in der das Fenster eingesetzt ist, sehr viel größer ist als die Fensterdämmung, mit den mittleren Schallpegeln im Senderraum  $L_1$  und im Empfangsraum  $L_2$  der äquivalenten Absorptionsfläche des Empfangsraumes  $A_2$  und der Prüffläche (Fensterfläche)  $S$  nach der üblichen Auswertgleichung

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A_2} \quad (2)$$

bestimmt.

In der Praxis sind beidseitig statistische Schallfelder jedoch nur gegeben bei Innenfenstern, also z. B. Glaswänden zwischen Büroräumen, Lichtbändern gegenüber Fluren, Glastüren usw.

Die Zeile b) kennzeichnet die Situation beim üblichen Einbau von Außenfenstern. Bei der Schallanregung sei angenommen, daß ebene Schallwellen

senkrecht oder in definierten Einfallrichtungen des Winkels  $\vartheta$  auf das Fenster einwirken. Von Eisenberg wurde hierzu eine von Gleichung (2) abweichende Auswertgleichung angegeben [19]. Stammt die ebene Schallwelle von einer Punktschallquelle (Strahler 0-ter Ordnung) hinreichender Entfernung  $d$  gegenüber dem Fenster und wird im Abstand  $d'$  von der Punktschallquelle der Schalldruckpegel  $L_1'$  gemessen, so ist mit  $L_2$  und  $A_2$  im Empfangsraum bei gegebener Fensterfläche  $S$

$$R_{\vartheta} = L_1' - L_2 + 10 \lg \frac{4S \cos \vartheta}{A_2} + 20 \lg \frac{d'}{d} \quad (3)$$

Anmerkung: Eisenberg benutzte bei seinen Messungen einen halbkreisförmig zum Fenster bewegten Richtstrahler mit 25 auf einer Fläche von  $1 \text{ m}^2$  angeordneten, offenbar konphas schwingenden Einzelsystemen. Für diese Schallquelle ist die Gleichung nicht gültig wegen eines anderen Entfernungsgesetzes, also der hierbei nicht zutreffenden Größe  $20 \lg \frac{d'}{d}$ , die nur für Punktschallquellen gilt.

Ergebnisse solcher Messungen sind also gekennzeichnet durch eine Schar unterschiedlicher Diagramme des Schalldämm-Maßes  $R_{\vartheta}$  als Funktion der Frequenz  $f$  mit dem Einfallswinkel  $\vartheta$  als Parameter.

Dieser Fall b) ist in der Praxis gegeben, wenn z. B. Straßenverkehrsgeräusche bei einseitiger Bebauung auf Fenster in verschiedenen Geschossen einwirken oder Flugzeuge Gebäude überfliegen. Erste systematische Untersuchungen mit einem Vergleich von Meßergebnissen für  $R$  nach Zeile a) und b) wurden ebenfalls von Eisenberg ausgeführt [19, 20]. Bild 1 zeigt hierzu auszugsweise Beispiele, die die unterschiedlichen Ergebnisse am gleichen Prüfgegenstand deutlich machen.

Anmerkung: Dem Frequenzverlauf der Diagramme ist besonders eindrucksvoll der Einfluß des Koinzidenzeffektes zu entnehmen. Die unterschiedlichen Lagen

der Minima im oberen Frequenzbereich sind den unterschiedlichen Frequenzen der Spuranpassung bei verschiedenen Einfallswinkeln zuzuordnen (Biegewellenlänge  $\lambda_B$  der Glasplatte identisch der Spurwellenlänge  $\lambda_0/\sin \vartheta$  der ebenen Welle des aus unterschiedlicher Einfallrichtung auffallenden Luftschalles).

Die Zeile c) kennzeichnet ebenfalls den Einbau von Außenfenstern, wird jedoch bauakustisch interessant vorwiegend beim Schallschutz von Industrieräuschen (z.B. Maschinengeräusche), die von einem Betriebsraum in die freie Nachbarschaft (Randbebauung) einwirken.

Die Zeile d) hat in der Praxis nur geringe Bedeutung, allenfalls bei Fenstern zwischen extrem gedämpften Räumen (Räumen extrem niedriger Nachhallzeit T), also z.B. bei Regiefenstern zwischen einem Sprecher-Studio und einem Regieraum im Rundfunkbetrieb.

Im Rahmen dieses Berichtes sind die Fälle a) und b) von besonderer Bedeutung. Wenn auch der Fall b) (freies Schallfeld - statistisches Schallfeld) meßtechnisch zunächst dem praktischen Einsatz besser angepaßt zu sein scheint, so entsteht schon allgemein die Frage, ob der hierzu erforderliche Aufwand von  $R_{\vartheta}$ -Messungen bei verschiedenen Einfallswinkeln lohnt und, da in der Praxis in der Regel bei der gleichen Fensterkonstruktion alle Winkel  $\vartheta$  auftreten können, welche Größe hieraus dem Fenster im Sinne einer bauteilkennzeichnenden Größe zweckmäßig zuzuordnen und zu bewerten ist, besonders wenn man bedenkt, daß jeweils auch noch andere Zustandsgrößen mit zu prüfen sind (z.B. akustische Dichtung der Schließfugen, also der Unterschied der Dämmung von Fensterverglasung und Fensterkonstruktionen). Weiterhin gibt es auch bei Außenfenstern Übergänge vom Fall b) zu Fall a) dadurch, daß vor dem Fenster Räume mit quasistatistischen Schallfeldern auftreten können. Solche "Räume" sind z.B. enge Straßen mit zweiseitiger geschlossener Bebauung, Höfe mit allseitiger geschlossener Bebauung oder Loggien. In solchen Quasi-Räumen werden, wie frühere eigene Messungen (1952) mit Geräuschen von Testfahrzeugen zeigten, nicht nur unter sonst gleichen Bedingungen (z.B. Geschoßhöhe) die lokalen Schalldruckpegel vor dem Fenster um 3 bis 8 dB höher. Durch die Wirkung von Mehrfachreflexionen geht auch die eindeutige Richtwirkung gegenüber den Schallquellen mehr oder weniger verloren, was z.B. subjektiv gut an einem am Hof liegenden Außenfenster beim Überfliegen von Flugzeugen beobachtbar ist. Die Praxis liegt häufig zwischen den extremen Fällen a) und b). Selbst wenn man zunächst am Extremfall b) festhält, so kennzeichnen die unterschiedlichen Diagramme von  $R_{\vartheta}$  nur das Schalldämm-Maß der Fenster im Sinne von auffallender zu durchgelassener Schallleistung. Maßgeblich ist jedoch letztlich der durch ein Fenster bewirkte Schallschutz gegenüber einer Außenschallquelle, deren Störschall mit bestimmter Einfallrichtung auf das Fenster einwirkt, also

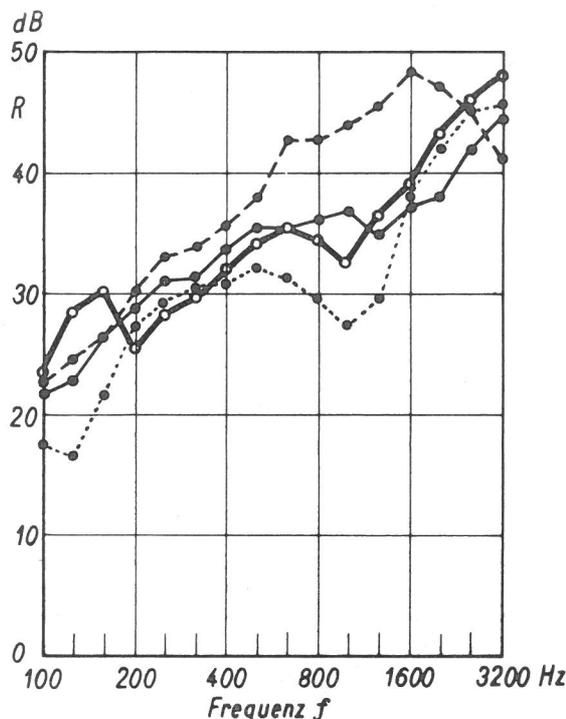


Bild 1  
Beispiel von Vergleichsversuchen zur Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes  $R$  eines Fensters (Stahlprofil-Fenster mit 13,2 mm Verglasung) bei

1. Schallanregung im statistischen Schallfeld  $\circ-\circ$
2. Schallanregung im freien Schallfeld
  - a)  $\text{---}\bullet\text{---}$  bei  $\vartheta = 0^\circ$
  - b)  $\text{—}\bullet\text{—}$  bei  $\vartheta = 45^\circ$
  - c)  $\text{...}\bullet\text{...}$  bei  $\vartheta = 75^\circ$

nach Versuchen von A. Eisenberg

die gesamte Wirkungskette vom Ort der äußeren Störschallquelle der abgestrahlten Leistung  $P$  bis zum Ort eines Bewohners, gekennzeichnet durch den mittleren Schallpegel im Raum  $L_2$ .

Es erscheint daher zweckmäßig, im folgenden den Einfluß des Schalleinfallswinkels auf den Schallschutz zu untersuchen.

In Bild 2 ist links der Fall a) (statistisches/statistisches Schallfeld) und rechts der Fall b) (freies/

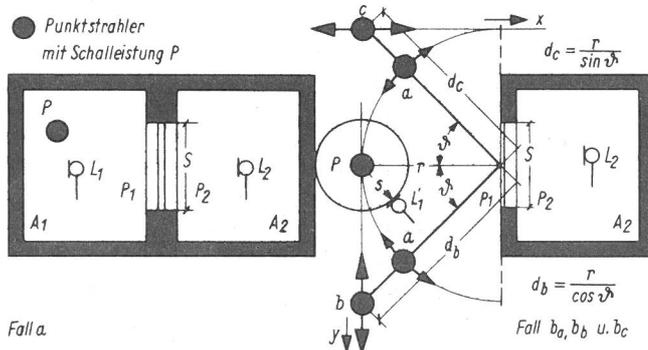


Bild 2  
Übersicht zur Ableitung der Gleichungen für den Schallschutz von Fenstern bei Schallquellen konstanter Schalleistung  $P$

- Fall a): Bei Schallanregung des Fensters im statistischen Schallfeld  
 Fall b): Bei Schallanregung des Fensters im freien Schallfeld und einer Bahnbewegung der Schallquelle
- $b_a$ ) auf einem Halbkreis mit dem Radius  $r$
  - $b_b$ ) parallel zum Fenster mit dem Spurbestand  $r$  ( $y$ -Richtung)
  - $b_c$ ) senkrecht zum Fenster mit dem Spurbestand  $r$  ( $x$ -Richtung)

statistisches Schallfeld) dargestellt. In beiden Fällen ist vor dem Fenster eine Punktschallquelle der abgestrahlten Schalleistung  $P$  angenommen, die durch Normierung auf die in ISO TC 43 - R 321 festgelegte Bezugsschalleistung  $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$  durch den Schalleistungspegel

$$L_P = 10 \lg \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

gekennzeichnet sei.

In allen Fällen ist üblicherweise der Schalldruckpegel im Empfangsraum definiert mit dem Bezugsschalldruck  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$  als

$$L_2 = 20 \lg \frac{p_2}{p_0} \quad (5)$$

Zur Kennzeichnung des Schallschutzes sei - erstmals in dieser Arbeit unter Bezug auf frühere Veröffentlichungen [17, 21] - eine neue Größe  $D_P$  eingeführt mit der Definitionsgleichung

$$D_P = L_P - L_2 \quad (6)$$

Diese den Schallschutz kennzeichnende Größe erfährt alle Wirkungen vom Ort einer Schallquelle des Schalleistungspegels  $L_P$  bis zum Ort eines lärmgeschützten bzw. lärmgestörten Menschen, gekennzeichnet durch den lokalen Schalldruckpegel  $L_2$  im Empfangsraum.

Anmerkung: Es wird sich zeigen, daß diese neue Definitionsgleichung des Schallschutzes für die vergleichende Beurteilung resultierender Schallschutzwirkungen allgemein in der Bauakustik und Lärmbekämpfung - auch über den Rahmen dieser Arbeit hinaus - zweckmäßig ist.

Als Symbol wurde grundsätzlich das einer Pegeldifferenz  $D$  gewählt, da zum gleichen Zeitpunkt für einen gleichen Zustand der den Schallschutz bewirkenden Maßnahmen eine Differenz von Schallpegeln am Anfang und Ende der gesamten Wirkungskette gemeint ist, im Gegensatz zu einer Pegeldifferenz  $\Delta L$ , die zu verschiedenen Zeiten für unterschiedliche Zustände der den Schallschutz bewirkenden Maßnahmen (z.B. ohne und mit Maßnahme) eine Differenz allein am Ende einer Wirkungskette bei konstanter Schallanregung am Anfangsort kennzeichnet. (Z.B.  $\Delta L$  von Deckenauflagen,  $\Delta L$  aus Pegeln bei offenem und geschlossenem Fenster).

Der Index  $P$  (also  $D_P$ ) wurde gewählt,

- a) um eine Gegenkennzeichnung gegenüber der Norm-Schallpegeldifferenz  $D_n = L_1 - L_2 + 10 \lg A_0/A = D + 10 \lg A_0/A$  zu erreichen.
- b) um zur Erleichterung einer evtl. internationalen Einführung von  $D_P$  hinzuweisen auf den Charakter des Schall-Schutzes (protection)

bzw. zugleich auf eine Differenz gegenüber einem Schall-Leistungspegel (sound-power-level).

Die Anwendung einer Differenz zwischen Schalleistungs- und Schalldruckpegel mag ungewohnt erscheinen. Sie existiert jedoch - wenn auch umgekehrt - bereits bei der Norm-Schallpegeldifferenz, wenn man anstelle

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \lg A_0/A \quad \text{schreibt}$$

$$\begin{aligned} D_n &= L_1 - (L_2 - 10 \lg A_0/A) \\ &= L_1 - (L_P - 4 \text{ dB}) \quad (\text{siehe Gl. (26) a) also} \end{aligned}$$

$$D_n = L_1 - L_P + 4 \text{ dB}$$

Diese Norm-Schallpegeldifferenz bedeutet also auch eine Differenz zwischen einem Schalldruckpegel und einem um 4 dB verschobenen Schalleistungspegel  $L_P$  bzw. einem Schalleistungspegel  $L'_P$ , der nicht einer Fläche von  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ , sondern  $S'_0 = 2,5 \text{ m}^2$  entspricht. (Allgemein  $P = \int IdS$ ; hier  $P = IS_0 = E \cdot c \cdot S_0$ ).

Während die auf das Fenster der Fläche  $S$  auffallende Schalleistung  $P_1$  für den Fall a) nur von der äquivalenten Absorptionsfläche  $A_1$  des Senderraumes vor dem Fenster abhängt, also vom Ort unabhängig ist, ist für den Fall b) die auffallende Schalleistung  $P_1$  vom Abstand der Schallquelle zum Fenster und vom Einfallswinkel  $\vartheta$  abhängig. Für die Bewegung der Schallquelle im Falle b) seien 3 typische Bahnen angenommen, nämlich

- ba) Bewegung auf einer Kreisbahn mit dem Radius  $r$ .  
Diese Bahn wird zweckmäßig bei Messungen von  $R_{\vartheta}$  benutzt, entspricht jedoch in der Regel nicht den Bahnbewegungen von Verkehrsobjekten als Störschallquelle.
- bb) Bewegung auf einer Geraden in Y-Richtung im Spure Abstand  $r$ .  
(Bewegung parallel zum Fenster).  
Diese Bahn ist von Bedeutung bei der Bewegung von Verkehrsobjekten (z.B. Fahrzeugen) auf einer Straße bei einseitiger Randbebauung.
- bc) Bewegung auf einer Geraden in x-Richtung im Spurb Abstand  $r$ .  
(Bewegung senkrecht zum Fenster)  
Diese Bahn ist - wenn man die Skizze des Empfangsraumes als Aufriß auffaßt - von Bedeutung bei der Bewegung von Verkehrsobjekten (z.B. Flugzeugen) über einem Gebäude, wobei bei Flugzeugen der Spurb Abstand  $r$  der Flughöhe entsprechen würde. Diese Bahn ist - wenn man die Skizze des Empfangsraumes als Grundriß auffaßt - von Bedeutung bei der Bewegung von Verkehrsobjekten (z.B. Fahrzeugen) auf Straßen, die parallel zur Flächennormalen des Fensters verlaufen (z.B. offene Bebauung mit senkrecht zur Straße angeordneten Häuserzeilen).

Zur Vereinfachung sei für diese 3 typischen Bahnbewegungen eine zweidimensionale Betrachtung angenommen, d.h. daß die Bahnebenen in der x-y-Ebene liegen, also  $z = 0$  ist. Dies entspricht für Straßenverkehrsobjekte einer gleichen Höhe von Fahrbahn und Geschoßhöhe (bei Flachstraßen also Fenstern im Erdgeschoß, bei Hochstraßen: Fahrbahnhöhe gleich Geschoßhöhe) bzw. bei Flugzeugen einem Überfliegen senkrecht zum Fenster genau über dem Empfangsraum.

In allen 4 Fällen (a, ba, bb und bc) ist für den hier im Prinzip gleichen Empfangsraum die vom Fenster durchgelassene Schalleistung zu bestimmen als

$$P_2 = \frac{E_2 \cdot c A_2}{4} = \frac{p_2^2}{\rho c} \cdot \frac{A_2}{4} \quad (7)$$

Für die auf das Fenster der Fläche  $S$  auffallende Schalleistung  $P_1$  und die in Verbindung mit Gleichung (7) ableitbaren Gleichungen für das Schalldämm-Maß  $R$ , den Empfangsraumpegel  $L_2$  und den Schallschutz  $D_p$  ergeben sich folgende Gleichungen:

Fall a) (statistisches Schallfeld vor und hinter dem Fenster)

$$P_1 = P \cdot \frac{S}{A_1} \quad (8)$$

$$10 \lg \frac{P_1}{P_2} = R = 10 \lg \frac{P}{p_2^2} \cdot \frac{S \cdot 4 \rho c}{A_1 \cdot A_2} \quad (9)$$

und bei Normierung auf  $P_0$  und  $p_0$  in Verbindung mit Gleichung (4), (5) und (6) als Pegelbilanz

$$R = L_p - L_2 - 10 \lg \frac{A_2}{S} - 10 \lg A_1 + 6 \text{ dB} \quad (10)$$

bzw.

$$L_2 = L_p - R - 10 \lg \frac{A_2}{S} - 10 \lg A_1 + 6 \text{ dB} \quad (11)$$

und

$$D_p = R + 10 \lg \frac{A_2}{S} + 10 \lg A_1 - 6 \text{ dB} \quad (12)$$

(mit  $A_1$ ,  $A_2$  und  $S$  in  $m^2$ )

Fall b) (freies Schallfeld vor, statistisches Schallfeld hinter dem Fenster und Schallquelle auf Bahn a, b oder c)

Fall ba)

$$P_1 = \frac{P \cdot S}{4 \pi r^2} \cdot \cos \vartheta \quad (13)$$

Fall bb)

$$P_1 = \frac{P \cdot S}{4 \pi d_b^2} \cdot \cos \vartheta$$

und mit

$$d_b = \frac{r}{\cos \vartheta}$$

$$P_1 = \frac{P \cdot S}{4 \pi r^2} \cdot \cos^3 \vartheta \quad (14)$$

Fall bc)

$$P_1 = \frac{P \cdot S}{4 \pi d_c^2} \cdot \cos \vartheta$$

und mit  $d_c = \frac{r}{\sin \vartheta}$  und  $\sin^2 \vartheta = 1 - \cos^2 \vartheta$

$$P_1 = \frac{P \cdot S}{4 \pi r^2} \cdot (\cos \vartheta - \cos^3 \vartheta) \quad (15)$$

Die 3 Gleichungen (13), (14) und (15) für  $P_1$  unterscheiden sich nur durch einen den Einfluß des Schalleinfallswinkels  $\vartheta$  kennzeichnenden Faktor. Für die folgenden Pegeldarstellungen wird zweckmäßig eingeführt eine Korrekturgröße  $K(\vartheta)$ , die für die 3 typischen Bahnen nach Gleichung (13), (14) und (15) lauten soll

Fall ba):

$$K(\vartheta) = -10 \lg \cos \vartheta \quad (16)$$

Fall bb):

$$K(\vartheta) = -30 \lg \cos \vartheta \quad (17)$$

Fall bc):

$$K(\vartheta) = -10 \lg (\cos \vartheta - \cos^3 \vartheta) \quad (18)$$

Damit ergibt sich für

$$10 \lg \frac{P_1}{P_2} = R_{\vartheta} = 10 \lg \frac{P}{p_2^2} \cdot \frac{S \cdot \rho c}{\pi r^2 A_2} - K(\vartheta) \quad (19)$$

und bei Normierung auf  $P_0$  und  $p_0$  in Verbindung mit Gleichung (4), (5) und (6) als Pegelbilanz

$$R_{\vartheta} = L_p - L_2 - 10 \lg \frac{A_2}{S} - 20 \lg r - 5 \text{ dB} - K(\vartheta) \quad (20)$$

bzw.

$$L_2 = L_P - R_{\vartheta} - 10 \lg \frac{A_2}{S} - 20 \lg r - 5 \text{ dB} - K(\vartheta) \quad (21)$$

und

$$D_P = R_{\vartheta} + 10 \lg \frac{A_2}{S} + 20 \lg r + 5 \text{ dB} + K(\vartheta) \quad (22)$$

(mit  $A_2$  und  $S$  in  $\text{m}^2$  sowie  $r$  in  $\text{m}$ )

$R$  und  $L_2$  sind in dieser Schreibweise in den drei ersten Gliedern beim Vergleich von Fall a) mit b) (Gleichung (10) mit (20) bzw. (11) mit (21)) gleich. Die Restglieder kennzeichnen die Auswirkungen der unterschiedlichen Schallfelder bzw. "Räume" vor dem Fenster und für die Fälle ba), bb) und bc) zusätzlich die unterschiedlichen Bahnbewegungen der Schallquelle. Für die hier interessierende Beurteilung des Schallschutzes seien die Gleichungen (12) und (22) nochmals gegenübergestellt.

Fall a)

$$D_P = R + 10 \lg \frac{A_2}{S} + 10 \lg A_1 - 6 \text{ dB}$$

Fall b)

$$D_P = R_{\vartheta} + 10 \lg \frac{A_2}{S} + 20 \lg r + 5 \text{ dB} + K(\vartheta)$$

Auch hier sind die beiden ersten Glieder im Aufbau gleich. (Sie sind jedoch mit den unterschiedlichen Werten für  $R$  nach Bild 1 beim gleichen Fenster verschieden, beispielsweise darstellbar als  $\Delta R_{\vartheta} = R_{\vartheta} - R_1$  oder als  $\Delta R = R - R_{\vartheta}$ ). Das Restglied der Gleichung Fall a) zeigt nochmals, daß - mit gewissen Einschränkungen (siehe [17]) - der Schallschutz vom Ort der Schallquelle unabhängig ist und nur von der äquivalenten Absorptionsfläche des Raumes vor dem Fenster abhängt. Das Restglied der Gleichung Fall b) hängt neben einem Unterschied der Konstanten von 11 dB (dies entspricht dem Wert  $10 \lg 4\pi$ ) ab vom Spurbstand  $r$  der jeweiligen Bahn (Entfernungsgesetz) und einem vom jeweiligen Schalleinfallswinkel abhängigen Glied  $K(\vartheta)$  (siehe Gleichungen (16), (17) und (18)). Die folgende Tabelle kennzeichnet nun die Größe für  $K(\vartheta)$  bei verschiedenen Einfallswinkeln für die verschiedenen Bahnen a, b und c (Fall ba), bb) und bc)).

Bewegung der Schallquelle auf	K(ϑ) in dB beim Einfallswinkel ϑ				
	15°	30°	45°	60°	75°
a) Kreisbahn mit r $K(\vartheta) = -10 \lg \cos \vartheta$	0,1	0,6	1,5	3,0	6,0
b) Gerade parallel im Abstand r $K(\vartheta) = -30 \lg \cos \vartheta$	0,4	1,8	4,5	9,0	18,0
c) Gerade senkrecht im Abstand r $K(\vartheta) = -10 \lg (\cos \vartheta - \cos^3 \vartheta)$	11,9	6,6	4,5	4,3	6,1

Einer Verschlechterung von  $R_{\vartheta}$  bei schrägem Schalleinfall (gegenüber  $R_{\vartheta=0}$  bei senkrechtem Schalleinfall) wirkt also  $K(\vartheta)$  bei schrägem Schalleinfall im Sinne eines Kompensationseffektes für den Gesamtschallschutz entgegen, so daß der Einfluß des Schalleinfallswinkels ϑ auf den Schallschutz geringer ist als der auf das Schalldämmmaß.

Anmerkung: Für die Bewegung einer Punktschallquelle auf Geraden verschiedenen Spurbstandes wurden für einen konstanten Bezugspunkt im freien Schallfeld vom Autor [22] im Rahmen von Untersuchungen über die Ausbreitung von Verkehrsgeräuschen u.a. Gleichungen abgeleitet für die Pegel-Ortsfunktionen (siehe auch Bild 3) und bei konstant angenommenen Fahrzeuggeschwindigkeiten auch für die Pegel-Zeitfunktionen, deren Abhängigkeiten vom jeweiligen Spurbstand von besonderer Bedeutung sind, insbesondere beim Übergang zur theoretischen Behandlung der Geräuschstatistik von Verkehrsgeräuschen bei Fahrzeugketten unterschiedlichen Fahrzeugabstandes und verschiedener Geschwindigkeit. Diese Pegel-Zeitfunktionen wurden dann durch Messungen mit einem geeignet präparierten Testfahrzeug mit dem weiteren Parameter der Mittenfrequenz verschiedener Oktavbereiche auf einer mit einem Quadratraster versehenen Großversuchsfläche (Vorplatz zum Olympiastadion Berlin) experimentell bestätigt. Im Vergleich mit den obigen Ableitungen werden für  $L_2$  (Pegel im Empfangsraum) bei gleich angenommenen Fahrzeuggeschwindigkeiten bezogen auf jeweils gleiche Bahnabstände diese Pegel-Zeitfunktionen verändert. Folgerichtig muß sein bei einer Fahrzeugkette konstanter Geschwindigkeit auch eine Änderung der Steilheit der Summenhäufigkeitsdiagramme (Geräuschstatistik aufgetragen in einem "Wahrscheinlichkeitsnetz") bei Messungen im freien Schallfeld gegenüber Messungen in einem über ein Fenster angekoppelten Raum ( $L_2$ ) bei jeweils gleichem Bahnabstand. Messungen zu diesem Problem, die dies bestätigen sollen, sind z. Z. im Gange.

Charakteristisch und für beide geradlinigen Bahnbewegungen gleich (Fall bb) und bc)) ist  $K(\vartheta)$  für den Schalleinfallswinkel  $\vartheta = 45^\circ$ . Dieser sollte also bei Außenmessungen auf Baustellen zugrunde gelegt werden.

Die Messung von  $R$  nach Fall a) erfaßt nun mit dem allseitigen Schalleinfall alle, also auch die sich ungünstig auswirkenden Schalleinfallrichtungen. Die Ergebnisse von  $R$  sind in der Regel denen

von  $R_{\vartheta}$  unter  $45^\circ$  ähnlich und im Mittelwert (Vergleich von  $\bar{R}$  und  $\bar{R}_{\vartheta}$ ) sogar fast gleich (siehe z. B. Bild 1). Daher sollte bei Baumusterprüfungen von Fenstern im Laboratorium der Fall a), also die Messung nach der Doppelraummethode nach DIN 52 210 zugrunde gelegt werden.

Anmerkung: Der starke Einfluß von  $K(\vartheta)$  und  $R_{\vartheta}$  kennzeichnet ohnehin die Problematik von bauakustischen Fenstermessungen auf Baustellen und erklärt u. a. die starken Streuungen solcher Prüfungen, deren Ergebnisse ohne ergänzende Angabe des jeweiligen Schalleinfallswinkels, der zur Anwendung gekommenen Schallquelle und evtl. des vorhandenen quasistatistischen Schallfeldes vor dem Fenster durch eine oder mehrere Reflexionsflächen kaum beurteilbar sind.

Die oben im Prinzip erwähnte, bei schrägem Schalleinfall sich auf den resultierenden Schallschutz  $D_P$  nach Gleichung (22) auswirkende "Kompensation" eines verminderten Schalldämm-Maßes  $R_{\vartheta}$  gegenüber einem erhöhten Schallschutz bei zunächst konstant angenommenem  $R$  (z. B.  $R = 0$  dB bei offenem Fenster) sei im folgenden noch quantitativ näher untersucht für die 3 Bahnbewegungen  $b_a$ ,  $b_b$  und  $b_c$  nach Bild 2.

Für das Luftschalldämm-Maß einer einschaligen Platte (z. B. Verglasung) gilt unter Vernachlässigung des Koinzidenzeffektes (z. B. Glasdicke  $< 4$  mm, Koinzidenzfrequenz  $f_c > 3000$  Hz) nach dem Massegesetz für senkrechten Schalleinfall

$$R_{\perp} = 10 \lg \left[ 1 + \left( \frac{\omega m}{2 \rho c} \right)^2 \right]$$

Hierbei sind

- die Plattenschnellen auf der Vorder- und Rückseite, also auf der Sende- und Empfangsraumseite gleich
- Luftschnelle und Plattenschnelle auf der Empfangsraumseite gleich (Stetigkeitsbedingung)
- die Richtungsvektoren aller Luft- und Plattenschnellen auf der Sende- und Empfangsraumseite gleich.

Diese Voraussetzungen sind bei schrägem Schalleinfall nicht mehr erfüllt. Hier sind Luftschnelle und Plattenschnelle verschieden gerichtet und verschieden groß, und zwar ist jetzt die Plattenschnelle um den Faktor  $\cos \vartheta$  kleiner als die Luftschnelle, was dazu führt, daß auch der wirksame Massenwiderstand  $j\omega m$  um den Faktor  $\cos \vartheta$  kleiner wird, so daß aus Gleichung (1) (Näheres z. B. [9, 10, 11]) wird

$$R_{\vartheta} = 10 \lg \left[ 1 + \left( \frac{\omega m}{2 \rho c} \cdot \cos \vartheta \right)^2 \right] \quad (23)$$

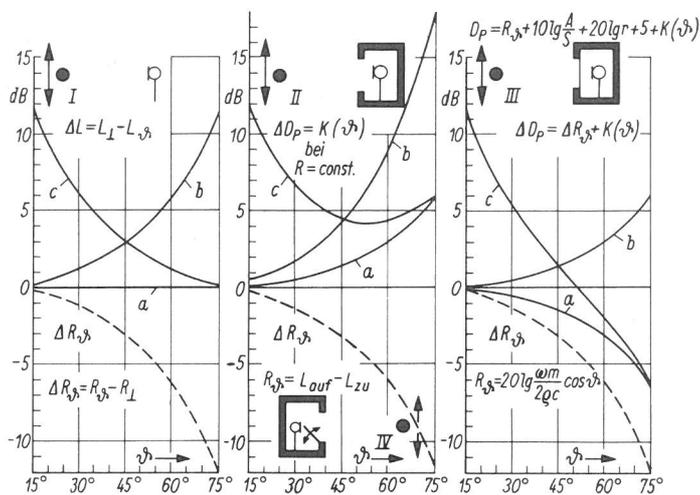


Bild 3

Zur unterschiedlichen Bedeutung des Schalleinfallswinkels  $\vartheta$  beim Schallschutz  $D_P = L_P - L_2$  und beim Schalldämm-Maß  $R$  von Fenstern, dargestellt als Änderung der Größen in dB gegenüber senkrechtem Schalleinfall bei Schallquellen-Bahnbewegungen  $a$ ,  $b$  und  $c$  nach Bild 2 bei verschiedenen Einfallswinkeln I im völlig freien Schallfeld; II in einem Raum mit konstantem  $R$  (z. B.  $R = 0$  dB eines offenen Fensters), III in einem Raum mit geschlossenem Fenster, jeweils im Vergleich mit IV, der Minderung des theoretischen Schalldämm-Maßes  $R_{\vartheta}$  eines einschaligen Fensters (ohne Koinzidenzeffekt) unter der Annahme gleicher Abstände „Schallquelle-Mikrofon“ für die Beispiele I bis IV

bzw. in sehr guter Näherung

$$R_{\vartheta} = 20 \lg \frac{\omega m}{2 \rho c} \cdot \cos \vartheta$$

$$R_{\vartheta} = 20 \lg \frac{\pi f m}{\rho c} + 20 \lg \cos \vartheta \quad (23a)$$

was sich mit

$$R_{\perp} = 20 \lg \frac{\pi f m}{\rho c}$$

auch ausdrücken läßt zu

$$R_{\vartheta} = R_{\perp} + 20 \lg \cos \vartheta \quad (23b)$$

so daß die Minderung des Luftschalldämm-Maßes  $R_{\vartheta}$  gegenüber dem bei senkrechtem Schalleinfall als

$$\Delta R_{\vartheta} = R_{\vartheta} - R_{\perp} \quad \text{wird}$$

$$\Delta R_{\vartheta} = 20 \lg \cos \vartheta \quad (23c)$$

Diese Reduktion des Schalldämm-Maßes in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel ist in Bild 3 dargestellt und jeweils anderen Wirkungen zum Vergleich gegenübergestellt.

Anmerkung: Diese Gesetzmäßigkeit ist die Hauptursache der mit wachsendem Einfallswinkel  $\vartheta$  im tiefen und mittleren Frequenzbereich reduzierten Schalldämm-Maße in Bild 1. Diese Reduktion wird lediglich im oberen Frequenzbereich zusätzlich durch die Phänomene des Koinzidenzeffektes erhöht (siehe z. B. [4, 9, 10]).

Das Ergebnis von  $R_{\vartheta}$  und damit  $\Delta R_{\vartheta}$  ist natürlich allein vom Einfallswinkel abhängig, also von den unterschiedlichen Bahnen  $b_a$ ,  $b_b$  und  $b_c$  völlig unabhängig. Um diesen Verlauf (Fall IV) von  $R_{\vartheta}$  bzw.  $\Delta R_{\vartheta}$  den anderen Vergleichsfällen I, II und III sinngemäß auch in Prinzipskizzen der Meßsituation gegenüberstellen zu können, wurde im Vorgriff zum folgenden Abschnitt die R-Messung als  $\Delta L$ -Messung von Empfangsraumschallpegeln bei offenem und geschlossenem Fenster dargestellt.

Im linken Diagramm I ist zum Vergleich das völlig freie Schallfeld angenommen, d. h. auch das Meßmikrofon steht nicht in einem Raum, sondern im Freien, bzw. anders ausgedrückt, bei jeweils gleicher relativer Anordnung von Schallquelle und Meßmikrofon in den Fällen I, II m. III u. IV sind Verglasung und Empfangsraum weggedacht. Auch hierbei werden nun die Bahnbewegungen  $b_a$ ,  $b_b$  und  $b_c$  des Bildes 2 angenommen und die allein aus dem Entfernungsgesetz resultierenden Pegeldifferenzen aufgetragen. Erwartungsgemäß ist diese bei der Bahnbewegung a wegen der ja bei der Kreisbewegung konstant bleibenden Entfernung bei allen Winkeln gleich 0 und für die Bahnen b und c sind die  $\Delta L$ -Kurven symmetrisch (für b ist  $\Delta L = -20 \lg \cos \vartheta$ ; für c ist  $\Delta L = -20 \lg \sin \vartheta$ ).

Im mittleren Diagramm Fall II sind die Kurven  $K(\vartheta)$  für die 3 Bahnbewegungen  $b_a$ ,  $b_b$  und  $b_c$  nach Gleichung (16), (17) und (18) aufgetragen, die im Prinzip auch kennzeichnen die Differenzen des Gesamtschallschutzes  $\Delta D_P = D_P(\vartheta) - D_P(0^\circ)$  der Gleichung (22) bei zunächst konstant angenommenem R. Da diese letzte Bedingung gut vorstellbar wird beim offenem Fenster mit  $R = 0 \text{ dB}$ , ist auch als Prinzip der Meßsituation der Empfangsraum mit offenem Fenster dargestellt. Bei den verschiedenen Einfallswinkeln wird, wie schon oben erläutert, jeweils die effektive Fensterfläche gegenüber S um den Faktor  $\cos \vartheta$  kleiner, was sich entsprechend auf die Kurven a, b und c auswirkt.

Der Vergleich der Kurven in I und II ist neben den numerischen Werten nach den Einzelformeln auch geometrisch als Superposition deutbar.

Die Gerade Ia (Kreisbahn) wird mit dem  $\cos \vartheta$ -Effekt durch den "Raum" auf Iia erhöht.

Die Kurve Iib ist eine Superposition der Kurve Ib und Iia, also der Wirkung des Entfernungsgesetzes bei Bahn b mit der des  $\cos \vartheta$ -Effektes durch den "Raum".

Die Kurve Iic ist entsprechend eine Superposition von Ic und Iia.

Iic ist im Anfang bei kleinem  $\vartheta$  der Kurve Ic ähnlich und geht, wie auch Bild 2 verdeutlicht, bei großem  $\vartheta$  in die Voraussetzungen für die Kurve Iia über. Das Minimum der zunächst fallenden dann wieder ansteigenden Kurve Iic läßt sich leicht durch Differenzieren von Gleichung (18) nach  $d\vartheta$  bestimmen, als

$$K'(\vartheta) = - \frac{\sin \vartheta (3 \cos^2 \vartheta - 1)}{\cos \vartheta - \cos^3 \vartheta} \cdot 10 \lg e$$

mit

$$K'(\vartheta) = 0$$

Diese Bedingung ist erfüllt mit  $3 \cos^2 \vartheta = 1$ , also  $\cos \vartheta = \sqrt{\frac{1}{3}}$  für  $\vartheta = 55^\circ$ . Hierfür wird  $K(\vartheta) = 4,15 \text{ dB}$ .

Anmerkung: Dieser kritische Winkelbereich läßt sich auch subjektiv in einem Raum mit offenem Fenster bei überfliegenden Maschinen als Maximalpegel beobachten.

Im rechten Diagramm (Fall III) ist nun die resultierende Wirkung von  $\Delta R_{\vartheta}$  aus dem Massegesetz bei schrägem Einfall und  $K(\vartheta)$  auf den resultierenden Schallschutz nach Gleichung (22) dargestellt wieder als

$$\Delta D_P = D_P(\vartheta) - D_P(0^\circ)$$

wobei sich Gleichung (22) durch Einsetzen von (23) auch schreiben läßt zu

$$D_P = R_{\perp} + 10 \lg \frac{A_2}{S} + 20 \lg r + 5 \text{ dB} + 20 \lg \cos \vartheta + K(\vartheta) \quad (24)$$

Entsprechend ist das Prinzip der Meßsituation durch einen Raum mit geschlossenem Fenster dargestellt, wobei jeweils wieder angenommen ist, daß die ersten 4 Glieder beim Vergleich konstant bleiben. Für Bahn a wird  $\Delta D_P = 10 \lg \cos \vartheta$ , für Bahn b wird  $\Delta D_P = -10 \lg \cos \vartheta$  sowie für Bahn c wird  $\Delta D_P = -10 \lg \left( \frac{1}{\cos \vartheta} - \cos \vartheta \right)$ .

Auch hier ist der Vergleich der Kurven in II und III in Verbindung mit IV neben den numerischen Werten nach den Einzelformeln geometrisch als Superposition deutbar. Die Kurve Iia wird durch IV auf IIIa reduziert. Bei der Bahnbewegung a auf einem Kreis wird in der Tat auch der resultierende Schallschutz bei schrägem Schalleinfall reduziert gegenüber dem bei senkrechtem Schalleinfall. Bezogen auf gleiche Winkel  $\vartheta$  beträgt jedoch die Minderung des Schallschutzes  $D_P$  jeweils nur die Hälfte der Minderung des Schalldämm-Maßes in dB. Diese Bahnbewegung  $b_a$  ist jedoch in der Praxis nicht aktuell.

Bei der Bahnbewegung b wird die Kurve Iib durch IV auf IIIb reduziert.

Bei dieser Bahnbewegung b (Schallquelle auf einer Geraden parallel zum Fenster) ist also bei wachsendem Schalleinfallswinkel  $\vartheta$  trotz der Minderung des Schalldämm-Maßes  $R_{\vartheta}$  der Schallschutz  $D_P$  stetig ansteigend. Hier ist also der eingangs erwähnte "Kompensationseffekt" voll erreicht, sogar mit einem positiven Verlauf bei großen Schalleinfallswinkeln, wo sich bei dickeren Scheiben die zusätzlich negativen Wirkungen des Koinzidenzeffektes stärker bemerkbar machen.

Bei der Bahnbewegung c wird die Kurve IIc durch IV auf IIIc reduziert.

Im Gegensatz zur Bahnbewegung b verschlechtert sich bei der Bahnbewegung c bei sehr großen Winkeln (berechnet für  $\vartheta \geq 52^\circ$ ) auch der resultierende Schallschutz etwas, allerdings weniger als bei Bahn a (Kreisbahn) und wesentlich weniger, als es der Reduktion des Schalldämm-Maßes entspricht.

Anmerkung: Wenn man  $\vartheta$  auf den Überflugwinkel von Flugzeugen  $\alpha = 90 - \vartheta$  umrechnet (das entspricht einer reziproken Winkelskala auf der Abszisse), so bedeutet dies, daß

- für den gleichen Winkelbereich, der Gesamtumfang der Schallschutzänderung größer ist als für die Linearbewegung b (ca. 17 dB gegenüber 6 dB),
- die Steilheit dieser Schallschutzänderung sehr viel größer ist als bei b, was sich bei hohen Geschwindigkeiten in zugleich niedrigen Flughöhen zusätzlich zum hohen Gesamtpegel subjektiv negativ auswirkt wegen des zu erwartenden extrem ungünstigen Pegel-Zeitverlaufes,
- bei  $\vartheta \gg 75^\circ$  also  $\geq 90^\circ$  bzw.  $\alpha \ll 15^\circ$  also  $\leq 0^\circ$  ein Störschallpegel im Empfangsraum abrupt extrem klein wird.

Diese 3 Gründe wirken offenbar zusätzlich mit, daß subjektiv selbst bei hochschalldämmenden Fenstern in der Nähe von Flughäfen Überfluggeräusche besonders lästig wirken.

Abschließend seien noch einige Hinweise zur Bestimmung der Schalleistungspegel  $L_P$  gegeben. Die Schalleistung  $P$  einer Schallquelle kann in einem Hallraum (z. B. auch Meßraum vor dem Fenster im Fall a)) bestimmt werden nach

$$P = \frac{p_1^2}{\rho c} \cdot \frac{A}{4} \quad (25)$$

also bei Normierung auf  $P_0$  und  $p_0$  in Verbindung mit Gleichung (4) und (5) als

$$L_P = L_1 + 10 \lg A_1 - 6 \text{ dB} \quad (26)$$

(mit  $A_1$  in  $\text{m}^2$ )

Gleichung (26) in Gleichung (10) eingesetzt, ergibt wieder die Auswertgleichung für  $R$

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A_2}$$

die als Gleichung (2) bereits angegeben sonst auf andere Weise abgeleitet wird.

$L_P$  läßt sich aus Gleichung (26) auch schreiben mit dem in der Bauakustik üblichen auf  $A_0 = 10 \text{ m}^2$  bezogenen Schallpegel

$$L_P = (L - 10 \lg \frac{A_0}{A}) + 4 \text{ dB} \quad (26a)$$

$$L_P = L_{10} + 4 \text{ dB} \quad (26b)$$

Da für viele Geräte und Einrichtungen der Haustechnik sowie für viele Haushaltsgeräte  $L_{10}$ -Werte gemessen wurden und werden, [23] ist die Gleichung (26b) auch sehr geeignet den in anderen Räumen zu erwartenden Störschallpegel  $L_2$  mit Gleichung (11) exakt vorauszuberechnen.

Umgekehrt ist mit Gleichung (10) bei gegebenem  $L_P$  und geforderten Grenzwerten  $L_2$  (z. B.  $L_2 \leq 30 \text{ dB (A)}$ ) bei gegebenen Werten für  $A_1$  und  $A_2$  (in möblierten Wohnräumen etwa  $A = 10$  bis  $15 \text{ m}^2$ ) ein erforderlicher Grenzwert für  $R'$  zu berechnen bzw. bei gegebenen Werten von  $R'$  (z. B. Sollkurve oder Schallschutzmaß LSM bei Wohnungstrennwänden oder -decken) der zulässige Höchstwert für  $L_P$ .

Dies ist zusammenfassend in Bild 4 gezeigt in einer Darstellung, die im Prinzip mit der damals noch gültigen Grenzkurve für 30 DIN-Phon (Bewertungskurve 3 nach DIN 5045) vom Autor bereits 1959 angewandt wurde [24]. Es zeigt sich, daß die Grenzwerte für  $L_2$  mit 30 dB (A) sich innerhalb der zulässigen Toleranzen nach JEC Publ. 123 [25] bzw. DIN 45633 [26] darstellen lassen als inverse Kurve zur Sollkurve für  $R'$  nach DIN 4109, Blatt 2 [27] mit der Folge, daß bei angenommenen annähernd konstanten äquivalenten Absorptionsflächen  $A$  der Räume, die Sollwerte für  $L_1$  bzw.  $L_P$  praktisch frequenzunabhängig werden. Folge hiervon ist, daß bei überschlägigen Berechnungen in der bauakustischen Planung Schalleistungspegel  $L_P$  nicht - wie bisher in dB (A) - sondern in dB (C) einzusetzen sind bzw. auch Grenzwerte von  $L_P$  für Geräte und Anlagen in dB (C) festzulegen sind.

Die Schalleistung  $P$  einer Schallquelle im freien Schallfeld kann bestimmt werden nach

$$P = \frac{1}{\rho c} \oint p^2 dS \quad (27)$$

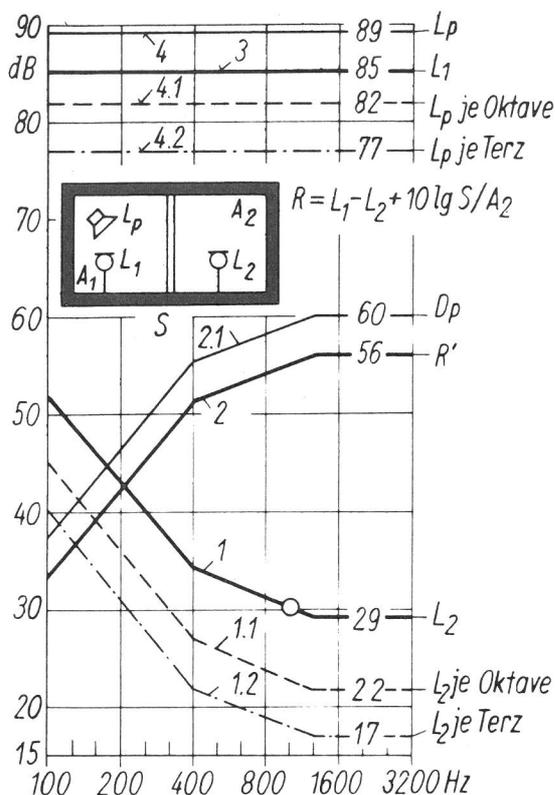


Bild 4  
Anforderungen an den Schalleistungspegel  $L_P$  von Störschallquellen in Wohngebäuden zur Gewährleistung zulässiger Grenz-Schallpegel in dB(A) in Nachbarwohnräumen bei Einhaltung der Sollkurve für das Schalldämm-Maß  $R'$

Für einen Punktstrahler (Strahler 0-ter Ordnung, also Schallquelle mit Kugelcharakteristik) ergibt sich bei Messung des Schalldruckes  $p_1$  im Abstand  $s$  (siehe Bild 2)

$$P = \frac{p_1^2}{\rho c} 4 \pi s^2 \quad (27a)$$

Bei Normierung auf  $P_0$  und  $p_0$  in Verbindung mit Gleichung (4) und (5) ergibt sich

$$L_P = L_1' + 20 \lg s + 11 \text{ dB} \quad (28)$$

Gleichung (28) in Gleichung (20) eingesetzt, ergibt mit  $K(\vartheta)$  bei Bewegung auf einer Kreisbahn (Fall ba)) die Gleichung

$$R_{\vartheta} = L_1' - L_2 + 20 \lg \frac{s}{r} + 20 \lg \frac{S}{A_2} + 10 \lg \cos \vartheta + 6 \text{ dB} \quad (29)$$

$$L_2 = L_P - R - 10 \lg \frac{A_1 \cdot A_2}{S} + 6 \text{ dB}$$

$$D_P = L_P - L_2 ; \quad L_P = L + 10 \lg A - 6 \text{ dB}$$

1.  $L_2$ -Grenzwerte für 30 dB(A)
2. Sollkurven in dB
3.  $L_1$ -Grenzwerte in dB(C)
4.  $L_P$ -Grenzwerte in dB(C)

Größe	Grenzwert <sup>1)</sup> dB(C)	Bedingung	gültig für
$L_1$	$\leq 83$	$A_2 / S \approx 1$	alle Senderäume (Zimmerlautstärke)
$L_P$	$\leq 87$	$\frac{A_1 \cdot A_2}{S} \approx 10$	Wohnräume
$L_P$	$\leq 92$	$A_1 / 10 \approx 3$	gr. Räume, hohe Absorption <span style="float: right;">1)</span>
$L_P$	$\leq 82$	$A_1 / 10 \approx \frac{1}{3}$	Räume kleiner Absorption <span style="float: right;">2)</span>

- <sup>1)</sup> Bei Nur-Tagebetrieb 10 dB höher  
 1) z.B. Gaststätten (hier  $L_P + 10$  dB)  
 2) z.B. Maschinen- u. Anlagenräume

die in etwas anderer Schreibweise bereits vorn als Gleichung (3) angegeben ist, jedoch von Eisenberg auf andere Weise abgeleitet wurde [19].

Die Kenntnis des Schalleistungspegels nach Gleichung (28) ist auch hier sehr geeignet, bei Vorhandensein von Störschallquellen im Außenraum vor Fenstern den zu erwartenden Störschallpegel  $L_2$  mit Gleichung (21) exakt vorauszuberechnen.

Auch hier können wieder - wie im Fall a) - mit Gleichung (20) bei gegebenen Werten von  $L_P$  erforderliche Grenzwerte für  $R$  bzw. umgekehrt bei gegebenem  $R$  zulässige Höchstwerte für  $L_P$  berechnet werden, wobei auch hierbei bei überschlüssigen Berechnungen wieder  $L_2$  in dB (A) und  $L_P$  dagegen in dB (C) einzusetzen sind.

Die hiermit deutlich werdende allgemeine Bedeutung des Schalleistungspegels  $L_P$  bei bauakustischen Berechnungen, insbesondere auch im Hinblick auf den Zusammenhang von Messungen frequenzbewerteter Schallpegel der Störschallquellen in dB (A), dB (B) und dB (C) und den Sollkurven für Schalldämm-Maße  $R$  sowie den Luftschallschutzmaßen LSM ist in einer anderen Arbeit des Autors behandelt [28].

### 3. Zusammenhang von R-Messungen und $\Delta L$ -Messungen bei Fensterprüfungen

Die Messung der Luftschalldämm-Maße  $R$  bzw.  $R_{\mathcal{F}}$  erfolgt nach Gleichung (2) und (3) bzw. (10), (20) und (29) im Prinzip durch Messungen lokaler Schalldruckpegel  $L_1$  vor und  $L_2$  hinter dem Fenster. Schon vor mehr als 10 Jahren wurden zur Bestimmung der Schalldämmung von Fenstern und Türen vom Autor im FNM - B8 - Ausschuß Messungen bei konstanter Schallquelle vor dem Fenster als  $\Delta L$ -Messungen bei offenem Fenster mit  $L_2^{\circ}$  und geschlossenem Fenster mit  $L_2$  vorgeschlagen nach der Beziehung

$$\Delta L = L_2^{\circ} - L_2 \quad (30)$$

Der Zusammenhang wurde für den im Laboratorium interessierenden Fall a) nach Abs. 2 abgeleitet und in zahlreichen BAM-Prüfungszeugnissen seit 1962 experimentell bestätigt (siehe auch [29] und Beispiele in Bild 5). Dieser Zusammenhang läßt sich für beide Fälle a) und b) auch aus den obigen Gleichungen leicht ableiten.

Geht man für den Fall a) bei geschlossenem Fenster von Gleichung (11) aus in etwas anderer Schreibweise

$$L_2 = L_P - R - 10 \lg A_1 \cdot A_2 + 10 \lg S + 6 \text{ dB} \quad (31)$$

und bezeichnet man bei offenem Fenster mit  $R = 0$  dB den Empfangsraumpegel mit  $L_2^{\circ}$  sowie die dann meßbaren geänderten äquivalenten Absorptions-

flächen mit  $A_1^{\circ}$  und  $A_2^{\circ}$ , so ergibt sich

$$L_2^{\circ} = L_P - 10 \lg A_1^{\circ} \cdot A_2^{\circ} + 10 \lg S + 6 \text{ dB} \quad (32)$$

weiter  $\Delta L$  aus der Differenz der Gleichung (32) und (31) zu

$$L_2^{\circ} - L_2 = \Delta L = R - 10 \lg \frac{A_1^{\circ} \cdot A_2^{\circ}}{A_1 \cdot A_2} \quad (33)$$

Da in der Sabineschen Formel  $A = \frac{0,163 V}{T}$  die Volumina  $V_1$  und  $V_2$  konstant bleiben, wird mit den Nachhallzeiten  $T$

$$R = \Delta L + 10 \lg \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1^{\circ} \cdot T_2^{\circ}} \quad (34)$$

Sorgt man durch eine ausreichende Grunddämpfung der Meßräume ( $A_1 \gg S$  und  $A_2 \gg S$ ) dafür, daß sich  $A_1$  und  $A_2$  bzw. dann  $T_1$  und  $T_2$  beim Öffnen des Fensters praktisch nicht ändern, so wird

$$R \cong \Delta L \quad (35)$$

Diese Bedingung ist im BAM-Fensterprüfstand durch schallabsorbierende Flächen realisiert und experimentell nachgewiesen (siehe auch Beispiele in Bild 19).

Geht man für den Fall b) bei geschlossenem Fenster von Gleichung (20) aus und bezeichnet man wieder bei offenem Fenster mit  $R = 0$  dB den Empfangsraumpegel mit  $L_2^{\circ}$  sowie die dann meßbare geänderte äquivalente Absorptionsfläche mit  $A_2^{\circ}$ , so ergibt wie oben aus der Differenz der entsprechenden Gleichungen

$$\Delta L = R_{\mathcal{F}} - 10 \lg \frac{A_2^{\circ}}{A_2} \quad (36)$$

bzw.

$$R_{\mathcal{F}} = \Delta L + 10 \lg \frac{T_2}{T_2^{\circ}} \quad (37)$$

Mit diesen Auswertgleichungen wird grundsätzlich meßtechnisch die Bestimmung von  $R_{\mathcal{F}}$  stark

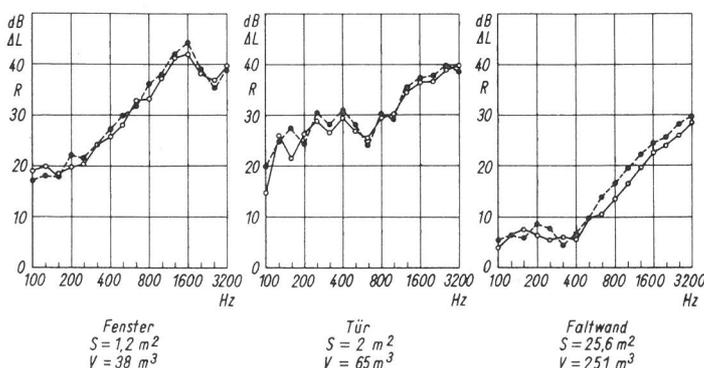


Bild 5  
Beispiele zur Bestimmung der Luftschalldämmung mit dem  $\Delta L$ -Verfahren (○—○) nach Gleichung 34 und dem R-Verfahren (●—●) nach Gleichung 2

vereinfacht gegenüber der sonst anzuwendenden Auswertgleichung (3) bzw. (29). Diese neue Gleichung (37) ist grundsätzlich sogar von der Art und Richtcharakteristik der Prüfschallquelle (Punktstrahler z. B. Einzelfahrzeug, Linienstrahler z. B. Fahrzeugkette hoher Dichte oder langer Zug, Flächenstrahler), ihrer Entfernung vom Fenster (außer im Nahbereich) und dem jeweils gültigen Entfernungsgesetz unabhängig. Der Schalleinfallswinkel  $\vartheta$  ist nur noch zur Kennzeichnung des Ergebnisses von  $R_{\vartheta}$  zu bestimmen. Auch diese Methode wurde in BAM-Prüfungszeugnissen vergleichend bei Baustellenmessungen erfolgreich erprobt.

Diese Methode der  $R_{\vartheta}$ -Bestimmung durch  $\Delta L$ -Messungen sollte grundsätzlich bei Baustellenmessungen jedem sonstigen Verfahren aus Messungen mit Schalldruckpegeln  $L_1$  vor und  $L_2$  hinter dem Fenster vorgezogen werden.

Aus Gründen einer Vereinheitlichung und besseren Vergleichbarkeit sollten dann sogar grundsätzlich sowohl Laboratoriumsprüfungen in entsprechend präparierten Prüfständen als auch Baustellenprüfungen durch  $\Delta L$ -Messungen bestimmt werden. (Lediglich bei festen Verglasungen oder Fassaden sollten Prüfungen durch Messungen von  $L_1$  und  $L_2$  erfolgen).

Wegen der in der Regel großen äquivalenten Absorptionsfläche möblierter Räume ( $A_2 > 10 \text{ m}^2$ ) kann in vielen Fällen bei nicht zu großen Fensterflächen ( $S \ll A_2$ ) erwartet werden, daß auch hier die Änderung von  $A_2$  zu  $A_2^0$  bzw.  $T_2$  zu  $T_2^0$  beim Öffnen des Fensters vernachlässigbar ist. Auch hierbei wird dann Gleichung (37) zu

$$R_{\vartheta} \cong \Delta L \quad (38)$$

und damit eine Baustellenmessung besonders vereinfacht.

Bei hochschalldämmenden Fenstern kann, besonders wenn zugleich das Fenster relativ klein ist, also das Flächenverhältnis der Gesamtaußenwand  $S_0$  zur Fensterfläche  $S_F$  groß wird (z. B.  $S_0/S_F > 3$ ), das Ergebnis von  $\Delta L$ -Messungen ein zu niedriges Schalldämm-Maß des Fensters vortäuschen (siehe auch Abschnitte 5 und 7). Hierbei wird zwar beim offenen Fenster der Schallpegel im Raum  $L_2^0$  ausschließlich durch die Schalltransmission über die Fensterfläche bestimmt, beim geschlossenen Fenster dagegen  $L_2$  bestimmt aus der resultierenden Schalltransmission über das geschlossene Fenster und zugleich über die Restfläche. In solchen Fällen kann also das "wahre Schalldämm-Maß"  $R_F$  des Fensters  $R_F \geq \Delta L$  sein. Es läßt sich jedoch exakt das resultierende Schalldämm-Maß  $R_{\text{res}}$  der Außenwand mit Fenster bestimmen. Setzt man in die obigen Gleichungen (31), (32) bzw. (20) zur Differenzbildung bei  $L_2^0$  für  $R = 0 \text{ dB}$ ,  $A = A_2^0$ ,  $S = S_F$  (Fensterfläche) ein, sowie bei  $L_2$  für  $A = A_2$  und  $S = S_0$  (Gesamtfläche der Außenwand mit Fenster), so ergibt sich für das resultierende Schalldämm-Maß

$$R_{\text{res}} = \Delta L + 10 \lg \frac{T_2}{T_2^0} + 10 \lg \frac{S_0}{S_F} \quad (37a)$$

bzw.

wenn  $T_2^0 \approx T_2$  bleibt

$$R_{\text{res}} = \Delta L + 10 \lg \frac{S_0}{S_F} \quad (38a)$$

Diese Werte sollten in Zweifelsfällen stets zusätzlich ausgewertet und angegeben werden zusammen mit dem konstruktiven Aufbau der Restfläche.

Aus dem Vergleich mit dem zu erwartenden Schalldämm-Maß  $R_0$  dieser Restfläche und diesem resultierenden Schalldämm-Maß  $R_{\text{res}}$  kann häufig die Größenordnung eines möglichen Fehlers  $\Delta R_F$  nach Abschn. 7 und Bild 8 abgeschätzt werden bzw. geklärt werden, ob ein niedriges Dämm-Maß anderen Ursachen zuzuordnen ist (z. B. akustisch schlechte Schließfugen, siehe Abschn. 8).

Dieser mögliche Fehler  $\Delta R_F$  würde unter gleichen Baubedingungen in gleicher Größe auch auftreten bei Messungen von Schallpegeln vor und hinter dem geschlossenen Fenster und Auswertung nach Gleichung (3) bzw. Gleichung (29).

Anmerkung: Will man bei Vorhandensein eines breitbandigen Außengeräusches (z. B. mittleres Verkehrsgeräusch bei gleichmäßigem Verkehrsfluß hoher Verkehrsdichte, Testfahrzeuge definiert konstant abgestrahlter Schallleistung, Lautsprecher mit Breitbandrauschen hoher Intensität) näherungsweise für eine erste Übersicht das mittlere Schalldämm-Maß eines Fensters bestimmen durch Schallpegelmessungen über den gesamten Frequenzbereich mit frequenzbewerteten Schallpegeln, so ist die üblicherweise ausgewertete Differenz von "lauten" und "leisen" Schallpegeln allein in dB (A) bzw. allgemeiner als Schallpegel gleicher Frequenzbewertung unzureichend. In Gleichung (20) und (21) bestimmen die wesentlichen die Frequenzcharakteristik von  $L_p$  und  $R$  die von  $L_2$ , da die Restglieder in der Praxis bewohnter Räume als weitgehend frequenzunabhängig anzusehen sind. Aus ähnlichen Gründen, wie sie in Bild 4 exakt aus dem inversen Frequenzverlauf der  $R'$ -Sollkurve und von  $L_2$  in dB (A) erörtert wurden, empfiehlt es sich, den mittleren "lauten" Schallpegel z. B.  $\overline{L_2^0}$  in dB (C) zu werten, dagegen den mittleren "leisen" Schallpegel  $\overline{L_2}$  in dB (A) und hieraus zu bestimmen

$$\Delta L = \overline{L_2^0} - \overline{L_2}$$

Bei derartigen vereinfachten Prüfungen ist besonders auf einen hinreichenden Abstand von evtl. Fremdgeräuschen gegenüber  $\overline{L_2}$  zu achten (Fremdgeräusche aus dem Gebäude, durch Eigengeräusche, Nachbargeräusche sowie Geräusche von haustechnischen Anlagen).

#### 4. Allgemeine Zusammenhänge zur resultierenden Luftschalldämmung von mehreren Teilflächen unterschiedlicher Transmission

Bei der bisherigen Diskussion der Luftschalldämmung zu Bild 2 und zu Gleichung (2) war vorausgesetzt, daß die Luftschalldämmung der Trennwand, in die das Fenster eingesetzt ist, sehr viel größer ist als die Fensterdämmung. Diese Voraussetzung ist bei hochschalldämmenden Fenstern nicht mehr erfüllt, selbst bei schweren Wänden ( $>400 \text{ kg/m}^2$ ) vor allem auch als Folge der durch Flankenübertragung begrenzten maximal möglichen Luftschalldämmung der "Einbauwände". Die Folge hiervon ist, daß sich mit Gleichung (2) nicht mehr Fenster-Dämm-Maße im Sinne bauteilkennzeichnender Größen ermitteln lassen, d.h. daß wir bei gleichen Fensterkonstruktionen von der Fenstergröße  $S$  abhängige Ergebnisse erhalten bzw. anders ausgedrückt, daß die mit Gleichung (2) ermittelten Luftschalldämm-Maße vor allem bei kleinem  $S$  kleiner sein können als die "wahren Luftschalldämm-Maße" der gleichen Fenster.

Aus anderen Gründen waren bereits in [30, 31] vom Autor die Gesetzmäßigkeiten einer resultierenden Schalldämmung  $R_{\text{res}}$  in Abhängigkeit unterschiedlicher Einzeldämm-Maße von Wand und Fenster und ihres Flächenverhältnisses abgeleitet und in geeigneten Diagrammen dargestellt worden. Diese Zusammenhänge wurden dann auch in DIN 4109, Blatt 5, Abs. 2.1.4 und Bild 3 aufgenommen und in der Folgezeit von anderen Autoren in Veröffentlichungen und Büchern zitiert [32, 9 (S. 310), 33, 34].

Andererseits können bei Fenstern geringerer Schalldämmung mit der Auswertgleichung (2) Fehler dadurch auftreten, daß die Schalltransmission meßtechnisch zweimal erfaßt wird, nämlich einmal bei der Bestimmung der Pegeldifferenz  $D = L_1 - L_2$ , zum anderen bei der Bestimmung der äquivalenten Absorptionsfläche  $A_2$  zum Korrekturglied  $10 \lg \frac{S}{A_2}$ . Als Folge hiervon können sich - im Gegensatz zu oben - vor allem bei der Prüfung großer Fenster gegenüber "wahren Schalldämm-Maßen" zu große Werte von  $R$  ergeben.

Im folgenden sollen aus einer verallgemeinerten Betrachtung diese Zusammenhänge erneut abgeleitet werden. Es wird sich zeigen, daß mit je-

weils modifizierten Grenzbedingungen sich hieraus in Abs. 5, 6 und 7 alle Spezialfälle elementar ableiten lassen und z.B. das Fensterdämm-Maß nach Gleichung (2) nur einen Spezialfall unter bestimmten Bedingungen darstellt.

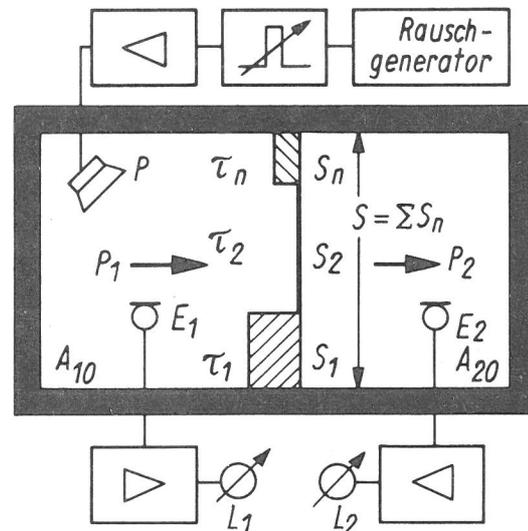


Bild 6  
Übersicht zur Ableitung der resultierenden Luftschalldämmung einer Trennfläche  $S$  aus  $n$  Teilflächen unterschiedlicher Flächengrößen  $S_n$  und Einzeldämmungen  $R_n$

In Bild 6 ist die Situation im Prinzip für  $n$  - Teilflächen der Flächen  $S_n$  und der Transmissionsgrade  $\tau_n$  dargestellt. Im Gegensatz zu den meßbaren Absorptionsflächen  $A_1$  des Senderraumes und  $A_2$  des Empfangsraumes seien  $A_{10}$  und  $A_{20}$  die entsprechenden Absorptionsflächen abzüglich der ja auch bei den Messungen enthaltenen Wirkungen der "Transmissionsflächen", also  $\sum \tau_n \cdot S_n$ . Es ergeben sich im Ansatz folgende Beziehungen bzw. Definitionsgleichungen.

Für die von der Prüfschallquelle abgestrahlte Schalleistung:

$$P = \frac{E_1 \cdot c}{4} \cdot A_1 \quad (39)$$

$$\text{bzw.} \quad P = \frac{E_1 \cdot c}{4} \left[ A_{10} + \sum \tau_n \cdot S_n \right] \quad (40)$$

Für die auf die Gesamtfläche auffallende Schallleistung:

$$P_1 = \frac{E_1 \cdot c}{4} \sum S_n \quad (41)$$

Für die von der Gesamtfläche durchgelassene Schalleistung:

$$P_2 = \frac{E_2 \cdot c}{4} \cdot A_2 \quad (42)$$

bzw.

$$P_2 = \frac{E_2 \cdot c}{4} \left[ A_{20} + \sum \tau_n \cdot S_n \right] \quad (43)$$

Der resultierende Transmissionsgrad  $\tau_{res}$  ist definiert als

$$\tau_{res} = \frac{P_1}{P_2} \quad (44)$$

und mit den Einzel-Transmissionsgraden darzustellen als

$$\tau_{res} = \frac{\sum \tau_n \cdot S_n}{\sum S_n} \quad (45)$$

die Pegeldifferenz  $D$  ist gegeben durch

$$10 \lg \frac{E_1}{E_2} = L_1 - L_2 = D \quad (46)$$

und die Gesamtschalldämmung definiert als

$$R_{res} = 10 \lg \frac{1}{\tau_{res}} \quad (47)$$

Die Gleichung (43) und (41) in (44) eingesetzt gibt

$$\tau_{res} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{(A_{20} + \sum \tau_n \cdot S_n)}{\sum S_n} \quad (48)$$

und mit Gleichung (46) und (47)

$$R_{res} = D + 10 \lg \frac{\sum S_n}{(A_{20} + \sum \tau_n \cdot S_n)} \quad (49)$$

Gemessen wird üblicherweise diese Gesamtdämmung mit

$$R_{res} = D + 10 \lg \frac{S}{A_2} \quad (50)$$

Der Zusammenhang von Gesamtdämmung und Einzeldämmung läßt sich durch Einsetzen von (45) in (47) auch schreiben als

$$R_{res} = -10 \lg \sum_1^n \tau_n \cdot \frac{S_n}{S} \quad (51)$$

bzw.

$$R_{res} = -10 \lg \sum_1^n \frac{S_n}{S} \cdot 10^{-R_n/10} \quad (52)$$

Diese Gleichung stellt eine Schlüsselgleichung dar für viele der folgenden Erörterungen.

Eine Einzeldämmung  $R_1$  läßt sich aus einer nach Gleichung (50) gemessenen Gesamtdämmung im Prinzip wie folgt bestimmen

$$R_1 = -10 \lg \left[ \frac{S}{S_1} \left( 10^{-\frac{R_{res}}{10}} - \sum_2^n \frac{S_n}{S} \cdot 10^{-\frac{R_n}{10}} \right) \right] \quad (53)$$

bzw.

$$R_1 = 10 \lg \frac{S_1}{S} - 10 \lg \left( 10^{-\frac{R_{res}}{10}} - \sum_2^n \frac{S_n}{S} \cdot 10^{-\frac{R_n}{10}} \right) \quad (54)$$

und mit (50) in (54)

$$R_1 = 10 \lg \frac{S_1}{S} - 10 \lg \left[ 10^{-\frac{1}{10}(D+10 \lg S/A_2)} - \sum_2^n \frac{S_n}{S} \cdot 10^{-\frac{R_n}{10}} \right] \quad (55)$$

Zur Bestimmung einer Teildämmung nach (55) sind also erforderlich

a) Messung von  $D$  und  $A_2$  bzw. hieraus  $R_{res}$

b) Kenntnis aller Teildämm-Maße  $R_2$  bis  $R_n$

Sind die Teildämm-Maße  $R_2$  bis  $R_n$  nicht bekannt, so ergeben sich grundsätzlich experimentell zwei Möglichkeiten

1) Abdecken aller Restteilflächen zur Bedingung

$$\sum_2^n \tau_n \cdot S_n \ll \tau_1 \cdot S_1 \quad (56)$$

bzw.  $\sum_2^n \tau_n$  gegen 0

Dann ergibt sich aus (55)

$$R_1 = 10 \lg \cdot \frac{S_1}{S} + D + 10 \lg \frac{S}{A_2} \quad (57)$$

also eine Gleichung, die erwartungsgemäß mit Gleichung (2) identisch ist.

2) Abdecken der Teilfläche  $S_1$  zur Bestimmung der resultierenden Schalldämmung der Restfläche zur Bedingung

$$(\tau_1 \cdot S_1) \text{ abgedeckt} \ll \sum_2^n \tau_n \cdot S_n \quad (58)$$

bzw.  $(\tau_1)$  abgedeckt gegen 0;

auch hier ergibt sich dann ähnlich wie in (57)

$$R_{n-1} = D + 10 \lg \frac{S - S_1}{A_2} \quad (59)$$

Die weitere Auswertung erfolgt dann im Prinzip wie bei dem im folgenden Absatz beschriebenen Problem zur Gesamtschalldämmung von 2 Teilflächen.

5. Exakte Lösungen zur resultierenden Schalldämmung von zwei Teilflächen unterschiedlicher Einzeldämmungen

Aus dem Gesamtproblem des Bildes 6 wird als Teilproblem in Bild 7 die Lösung für zwei Teilflächen behandelt. Dieses Problem ist z. B. für bauakustische Prüfstände zur Bestimmung der Luftschalldämmung von Türen, Fenstern und Fassadenelementen aktuell.

Aus der Schlüsselgleichung (52) ergibt sich unmittelbar für den Spezialfall von 2 Teilflächen

$$R_{res} = -10 \lg \left[ \frac{S_1}{S} \cdot 10^{-R_1/10} + \frac{S_2}{S} \cdot 10^{-R_2/10} \right] \quad (60)$$

Im Bild 7 entsprechen gegenüber der allgemeinen Darstellung in Bild 6

$$S \hat{=} S_0 ; \quad R_1 \hat{=} R_0 ; \quad S_1 \hat{=} S_0 - S_F$$

$$R_2 \hat{=} R_F ; \quad S_2 \hat{=} S_F$$

wobei der Index F bei  $R_F$  und  $S_F$  die entsprechenden Größen des Fensters bedeuten sollen.

Dies eingesetzt in Gleichung (60) ergibt sofort

$$R_{res} = -10 \lg \left[ \frac{S_0 - S_F}{S_0} \cdot 10^{-R_0/10} + \frac{S_F}{S_0} \cdot 10^{-R_F/10} \right] \quad (61)$$

sowie nach einigen Schritten

$$\frac{S_F}{S_0} = \frac{10^{-R_{res}/10} - 10^{-R_0/10}}{10^{-R_F/10} - 10^{-R_0/10}} \quad (62)$$

bzw. nach Erweitern mit  $10^{R_0/10}$

$$\frac{S_F}{S_0} = \frac{10^{\frac{R_0 - R_{res}}{10}} - 1}{10^{\frac{R_0 - R_F}{10}} - 1} \quad (63)$$

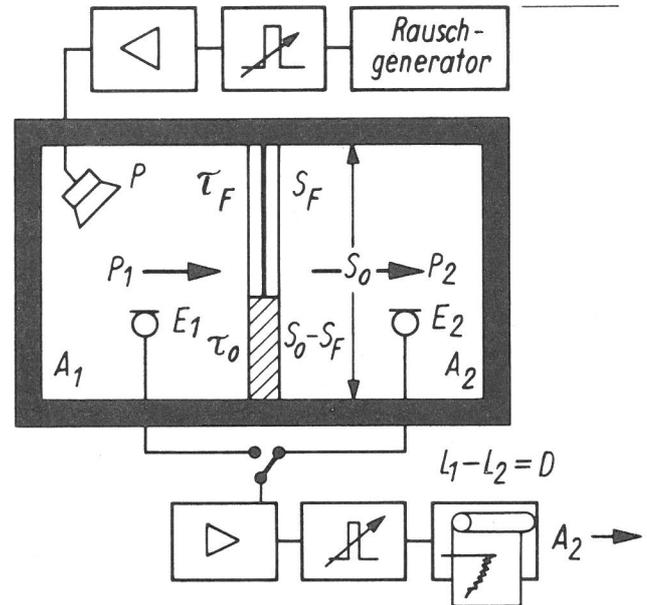


Bild 7

Übersicht zur Ableitung der Zusammenhänge zwischen der Fensterdämmung  $R_F$ , der Wanddämmung  $R_0$ , der resultierenden Dämmung  $R_{res}$  und der Minderung der Wanddämmung  $R_0 - R_{res}$  in Abhängigkeit von der Gesamtfläche  $S_0$  und der Fensterfläche  $S_F$ .

Aus dieser symmetrisch aufgebauten Gleichung lässt sich in wenigen Schritten ableiten

$$R_{res} = f(S_0, S_F, R_0, R_F)$$

zu

$$R_{res} = R_0 - 10 \lg \left[ 1 + \frac{S_F}{S_0} \left( 10^{\frac{R_0 - R_F}{10}} - 1 \right) \right] \quad (64)$$

sowie

$$R_F = f(S_0, S_F, R_0, R_{res})$$

zu

$$R_F = R_0 - 10 \lg \left[ 1 + \frac{S_0}{S_F} \left( 10^{\frac{R_0 - R_{res}}{10}} - 1 \right) \right] \quad (65)$$

Die drei Gleichungen (63), (64) und (65) waren auf anderem Wege in anderem Zusammenhang bereits abgeleitet [30, 31].

Diese Gleichungen sind für Berechnungen in der Praxis gut geeignet, die mit der auch in DIN 4109 übernommenen graphischen Methode leicht durchführbar sind.

Zur Bestimmung der Fensterdämmung aus Messungen ist die Gleichung (65) durch Einsetzen von (50) darzustellen als

$$R_F = f(S_O, S_F, R_O, D, A_2)$$

zu

$$R_F = R_O - 10 \lg \left[ \frac{S_O}{S_F} \cdot 10^{\frac{1}{10}(R_O - D - 10 \lg S_O / A_2)} - \left( \frac{S_O - S_F}{S_F} \right) \right] \quad (66)$$

Dies ist die exakte Auswertgleichung zur Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes  $R_F$  von Fenstern. Sie ist von besonderer Bedeutung bei der Prüfung von hochschalldämmenden Fenstern relativ kleiner Flächenabmessungen.

Diese Gleichung weicht nicht nur erheblich ab von Gleichung (2), sie ist leider auch in dieser Form unhandlich bei der numerischen Auswertung von Meßdaten, vor allem wenn man bedenkt, daß diese Auswertung jeweils bei allen Terzmittenfrequenzen des Frequenzbereiches 100 Hz bis 3200 Hz durchzuführen ist.

Einfacher wird die Bearbeitung, wenn man die klassische Gleichung für  $R$  als neue Definitionsgleichung einführt, mit

$$R'_F = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2} \quad (67)$$

Der Beistrich soll - ähnlich wie beim Bauschalldämm-Maß  $R'$  in DIN 4109, Blatt 1 [35] - bedeuten, daß zunächst ein Fensterdämm-Maß bestimmt wird einschließlich der Transmissionswirkungen der Restfläche. Diese Größe weicht also zunächst

vom "wahren Schalldämm-Maß  $R_F$ " ab, und zwar im Sinne

$$R'_F \leq R_F$$

Schreibt man Gleichung (48) um zu

$$E_1 \cdot \sum \tau_n \cdot S_n = E_2 \cdot A_2 \quad (68)$$

und setzt die Kennzeichen im Spezialfall des Bildes 7 ein, so ergibt sich

$$E_1 \cdot \left[ \tau_F \cdot S_F + \tau_o (S_O - S_F) \right] = E_2 \cdot A_2 \quad (69)$$

und hieraus

$$\tau_F = \frac{E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot S_F} - \tau_o \frac{(S_O - S_F)}{S_F} \quad (70)$$

sowie mit

$$\frac{E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot S_F} \hat{=} \tau'_F \quad (70a)$$

$$\tau_F = \tau'_F - \frac{S_O - S_F}{S_F} \cdot \tau_o \quad (71)$$

Hieraus ergibt sich

$$R_F = -10 \lg \left[ 10^{-R'_F/10} - \left( \frac{S_O}{S_F} - 1 \right) \cdot 10^{-R_O/10} \right] \quad (72)$$

Diese Gleichung (72) bedeutet wie (66) ebenfalls eine exakte Auswertgleichung zur Bestimmung von  $R'_F$  bei bekanntem  $R_O$  (im BAM-Fensterprüfstand ist  $R_O \hat{=} R_{\max}$  in Bild 16) und gemessenem  $R'_F$ . Diese Auswertgleichung (72) ist nicht nur einfacher zu handhaben als (66), sie hat noch den Vorteil, daß auch rückwirkend leicht aus älteren Prüfungen (auch anderer Institute) Korrekturen möglich sind.

6.1 Bedingung  $\tau_o = 0$  bzw.  $\tau_o \cdot S_o \ll \tau_F \cdot S_F$

$$\text{oder } R_o \gg R_F$$

(idealer Fensterprüfstand)

6.11 Zusatzbedingung  $\tau_F S_F \ll A_{20}$

(Fenster hoher Dämmung  
etwa 15 dB  $\leq R_F \leq 35$  dB  
Einfluß  $\tau_F \cdot S_F$  auf  $A_2$  vernachlässigbar)

Aus Gleichung (71)

$$\tau_F = \tau'_F - \frac{S_o - S_F}{S_F} \cdot \tau_o$$

mit  $\tau_o = 0$

$$\tau_F \cong \tau'_F$$

also

$$R_F = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2} \quad (73)$$

Diese Gleichung ist erwartungsgemäß identisch Gleichung (2).

6.12 Zusatzannahme  $\tau_F \cdot S_F \leq A_{20}$

(Einfluß  $\tau_F \cdot S_F$  auf  $A_2$   
nicht vernachlässigbar)

Aus Gleichung (69) mit  $\tau_o = 0$  und  $A_2 = A_{20} + \tau_F \cdot S_F$

$$\tau_F = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{A_{20} + \tau_F \cdot S_F}{S_F} \quad (74)$$

$$\tau_F = \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{A_{20}}{S_F} + \frac{E_2}{E_1} \cdot \tau_F$$

Hieraus nach einigen Schritten

$$\frac{1}{\tau_F} = \frac{\frac{E_1}{E_2} - 1}{A_{20}/S_F} \quad (74a)$$

$$R_F = 10 \lg \left[ 10^{D/10} - 1 \right] + 10 \lg \frac{S_F}{A_{20}} \quad (75)$$

Diese Gleichung ist im Prinzip in etwas anderer Schreibweise auch angegeben von T. Mariner in [36] und enthalten in ASTM - E 90-55 [37, 38].

Diese Gleichung gibt, wie Fehlerrechnungen (siehe Bild 9) zeigen, an die exakte Fensterdämmung  $R_F$  bei kleinem  $R_F$  (etwa  $R_F \leq 15$  dB) bei großem  $R_o$  (also  $R_o \gg R_F$ )

6.2 Bedingung  $S_F = S_o$

(vollflächiges Fenster oder Fassadenwand ohne Fenster)

6.21 Zusatzbedingung  $\tau_F S_F \ll A_{20}$

(Einfluß  $\tau_F S_F$  auf  $A_2$  vernachlässigbar)

Aus Gleichung (71) ist sofort abzulesen

$$\tau_F \cong \tau'_F$$

Also

$$R_F = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2}$$

Diese Lösung ist also erwartungsgemäß identisch mit Gleichung (73)

6.22 Zusatzbedingung  $\tau_F \cdot S_F \leq A_{20}$

(Einfluß  $\tau_F \cdot S_F$  auf  $A_2$   
nicht vernachlässigbar)

Aus Gleichung (69) ergibt sich wieder sofort Gleichung (74) und hieraus erwartungsgemäß wieder Gleichung (75)

$$R_F = 10 \lg \left[ 10^{\frac{D}{10}} - 1 \right] + 10 \lg \frac{S_F}{A_{20}}$$

$$R_{res} = 10 \lg \frac{S_O}{S_F} \quad (82)$$

### 6.3 Bedingung $\tau_F = \tau_O$ bzw. $R_F = R_O$

(absolute Meßgrenze eines Prüfstandes für Messungen an hochschalldämmenden Fenstern)

(nur interessant für  $\tau_F S_F \ll A_{20}$ )

Es gilt

$$R_F = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2}$$

$$R_F = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_O}{A_2} + 10 \lg \frac{S_F}{S_O}$$

$$R_F = R_O - 10 \lg \frac{S_O}{S_F}$$

Ist  $R_O$  identisch der Maximaldämmung des Prüfstandes  $R_{max}$ , so gilt also

$$R_F = R_{max} - 10 \lg \frac{S_O}{S_F} \quad (76)$$

Diese Lösung ist eigentlich trivial. Die Gleichung (76) ist jedoch von Bedeutung für die Ermittlung der oberen Meßgrenze eines Prüfstandes. (Siehe auch Bild 16)

### 6.4 Bedingung $\tau_F = 1$

(offenes Fenster in einer Wand mit großem  $R_O$ )

#### 6.41 Zusatzbedingung $S_F \ll A_{20}$

(Fensterfläche gegenüber  $A_2$  vernachlässigbar)

Mit Gleichung (45) in Verbindung mit den Merkmalen im Spezialfall des Bildes 7 läßt sich schreiben

$$\tau_{res} = \frac{\tau_F \cdot S_F + \tau_O (S_O - S_F)}{S_O} \quad (79)$$

und mit  $\tau_F = 1$

$$\tau_{res} = \frac{S_F}{S_O} + \tau_O \frac{S_O - S_F}{S_O} \quad (80)$$

über Gleichung (47)

$$R_{res} = -10 \lg \left[ \frac{S_F}{S_O} + \left(1 - \frac{S_F}{S_O}\right) 10^{-R_O/10} \right] \quad (81)$$

und mit der weiteren Zusatzbedingung  $\tau_O = 0$  aus Gleichung (80) in (47)

Dies ist die meßbare Gesamtdämmung einer Wand hoher Schalldämmung  $R_O$  der Fläche  $S_O$  mit einer Öffnung der Fläche  $S_F$ .

#### 6.42 Zusatzbedingung $S_F \leq A_{20}$

( $S_F$  gegenüber  $A_2$  nicht vernachlässigbar)

Aus Gleichung (48) in Verbindung mit den Merkmalen des Spezialfalles in Bild 7 läßt sich schreiben

$$\tau_{res} = \frac{E_2}{E_1} \left( \frac{A_{20} + \sum \tau_n \cdot S_n}{\sum S_n} \right)$$

$$\tau_{res} = \frac{E_2}{E_1} \left( \frac{A_{20}}{S_O} + \frac{\tau_F \cdot S_F}{S_O} + \tau_O \frac{S_O - S_F}{S_O} \right) \quad (83)$$

sowie mit der Hauptbedingung dieses Abschnittes  $\tau_F = 1$  (offenes Fenster)

$$R_{res} = D - 10 \lg \left( \frac{A_{20}}{S_O} + \frac{S_F}{S_O} + \frac{S_O - S_F}{S_O} 10^{-R_O/10} \right) \quad (84)$$

Mit der weiteren Zusatzbedingung  $\tau_O = 0$

( $R_O$  extrem groß)

vereinfacht sich Gleichung (84) zu

$$R_{res} = D - 10 \lg \frac{A_{20} + S_F}{S_O} \quad (85)$$

Fehlerabschätzung bei Auswertungen ohne und mit Berücksichtigung einer Rückwirkung auf den Senderraum ( $A_2$  gegenüber  $A_{20}$ )

Es sei das Ergebnis einer üblichen Auswertung gekennzeichnet mit

$$R'_{res} = D - 10 \lg \frac{A_2}{S_O} \quad (86)$$

In Wirklichkeit gilt Gleichung (85)

Die Differenz von Gleichung (86) und (85) ist

$$\Delta R = R'_{res} - R_{res} = 10 \lg \frac{A_{20} + S_F}{S_O} - 10 \lg \frac{A_2}{S_O}$$

$$\Delta R = 10 \lg \frac{A_{20} + S_F}{A_2}$$

Nimmt man nun bei üblichen Auswertungen nach Gleichung (86) fälschlicherweise an, es sei  $A_{20} = A_2$ , so entsteht also der Fehler

$$\Delta R = 10 \lg \left( 1 + \frac{S_F}{A_2} \right) \quad (87)$$

Die Größen dieser Fehler lassen sich mit folgenden Bereichen kennzeichnen

Bedingung	Fehler $\Delta R$
$S_F \leq A_2$	$0 < \Delta R \leq 3 \text{ dB}$
$S_F = A_2$	$\Delta R = 3 \text{ dB}$
$S_F \geq A_2$	$\Delta R \geq 3 \text{ dB}$

Anmerkung: Die Ansätze, Gleichungen und Lösungen dieses Abschnittes 6.4 mit der Hauptbedingung  $\tau_F = 1$  (Öffnung in einer Wand) haben ihre besondere Bedeutung nicht nur in der Bauakustik sondern auch in der statistischen Raumakustik in der Theorie gekoppelter Räume, also z.B. bei der Betrachtung von Schallpegeln zwischen einem Bühnenraum und dem Auditorium in einem Theater oder zwischen einem Zuschauerraum und einem Lo-

genbereich. Die Theorie gekoppelter Räume wurde umfassend von L. Cremer dargestellt in seinem Werk "Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band II", Kap. 3 "Gekoppelte Räume", § 14 "Der stationäre Zustand bei offener Kopplungsfläche". Es erscheint bemerkenswert, daß auch diese Probleme, die dort für die Raumakustik modifiziert weitergehend behandelt sind, sich letztlich auch ableiten lassen aus den allgemeinen Zusammenhängen des Abs. 4 und des Bildes 6 und der dort abgeleiteten Schlüsselgleichung (52) über den Spezialfall des Bildes 7 mit zwei Trennflächen und dem weiteren Spezialfall des Abschn. 6.4 mit der Bedingung  $\tau_F = 1$ , also der Annahme einer offenen Kopplungsfläche.

**7. Fehlerfunktionen zur Bestimmung realer Luftschalldämm-Maße  $R_F$  nach einfachen Auswertungen mit der klassischen Definitionsgleichung  $R = D + 10 \lg S/A$**

Die exakten Auswertgleichungen zur Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes  $R_F$  von Fenstern nach Gleichung (66) bzw. (72) oder bei kleiner Fensterdämmung nach Gleichung (75) sind einmal für die Praxis unhandlich, zum anderen lassen sie nicht deutlich erkennen, unter welchen Bedingungen die dortigen Gleichungen in die klassische Auswertgleichung (2)  $R = D + 10 \lg S_F/A_2$  übergehen bzw. unter welchen Bedingungen z. B. der Fehler zwischen den verschiedenen Auswertgleichungen  $\Delta R \leq 1$  dB wird. Im folgenden soll versucht werden, das "wahre Luftschalldämm-Maß eines Fensters  $R_F$ " in Verbindung mit der Definitionsgleichung (67) für  $R'_F$  darzustellen mit einer Korrekturfunktion  $\Delta R_F$

$$R_F = R'_F + \Delta R_F \quad (88)$$

Diese Fehlerfunktionen  $\Delta R_F$  sollen in geeigneter Weise graphisch dargestellt werden und damit die Auswertung wahrer  $R_F$ -Werte erleichtern. Zunächst werden hierzu diese Fehlerfunktionen in verschiedenen Parameterdarstellungen abgeleitet.

7.1  $\Delta R_F = f(S_O, S_F, R_O, R'_F)$

In Gleichung (71) war abgeleitet

$$\tau_F = \tau'_F - \frac{S_O - S_F}{S_F} \cdot \tau_O \quad (89)$$

Division durch  $\tau'_F$  ergibt

$$\frac{\tau_F}{\tau'_F} = 1 - \frac{S_O - S_F}{S_F} \cdot \frac{\tau_O}{\tau'_F} \quad (90)$$

Es ist zu erwarten  $\tau_F < \tau'_F$  bzw.  $R_F > R'_F$

Aus Gleichung (88) mit

$$\Delta R_F = R_F - R'_F$$

läßt sich Gleichung (90) schreiben

$$10 \lg \frac{\tau'_F}{\tau_F} = \Delta R_F = -10 \lg \left[ 1 - \left( \frac{S_O - S_F}{S_F} \right) \cdot 10 \frac{R'_F - R_O}{10} \right] \quad (91)$$

bzw.

$$\Delta R_F = -10 \lg \left[ 1 - \frac{\frac{S_O - S_F}{S_F}}{\frac{R_O - R'_F}{10}} \right] \quad (92)$$

7.2  $\Delta R_F = f(S_O, S_F, R_O, R_F)$

Ähnlich wie in Abs. 7.1 läßt sich ableiten aus Gleichung (89) mit Division durch  $\tau_F$

$$\Delta R_F = 10 \lg \left[ 1 + \frac{\frac{S_O - S_F}{S_F}}{\frac{R_O - R_F}{10}} \right] \quad (93)$$

7.3  $\Delta R_F = f(S_O, S_F, R_O, R_{res})$

Es ist

$$\tau'_F = \frac{E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot S_F} = \frac{E_2 \cdot A_2}{E_1 \cdot S_O} \cdot \frac{S_O}{S_F}$$

$$\tau'_F = \tau_{res} \cdot \frac{S_O}{S_F}$$

Eingesetzt in Gleichung (90) ergibt sich

$$\frac{\tau_F}{\tau'_F} = 1 - \frac{S_O - S_F}{S_O} \cdot \frac{\tau_O}{\tau_{res}} \quad (94)$$

und somit

$$\Delta R_F = -10 \lg \left[ 1 - \frac{\frac{S_O - S_F}{S_O}}{\frac{R_O - R_{res}}{10}} \right] \quad (95)$$

und mit  $R_{max} - R_{res} \hat{=} R_O - R_{res} = \Delta R$

etwas umgeschrieben

$$\Delta R_F = -10 \lg \left[ 1 + \frac{\frac{S_F}{S_O} - 1}{\frac{\Delta R}{10}} \right] \quad (96)$$

Diese Fehlergleichung ist für die praktische Anwendung besonders geeignet in Bild 8 dargestellt als Diagramm

$$\Delta R_F = f\left(\frac{S_F}{S_O}\right); \text{ Parameter } \Delta R$$

**Anmerkung:** Zur numerischen Auswertung wird wie folgt verfahren: Man bestimmt durch Messung das Diagramm  $R'_F = g(f)$ , addiert hierzu  $10 \lg \frac{S_O}{S_F}$ , erhält so  $R_{res}$ , (es ist  $R_{res} = R'_F + 10 \lg \frac{S_O}{S_F}$ ) und vergleicht dieses Diagramm mit dem einmalig für den Prüfstand bestimmten Diagramm für  $R_{max} = g(f)$ . (Siehe für BAM-Prüfstand Bild 16 Kurve b). Dieser Vorgang ist leicht zu realisieren, indem man ein auf Transparentpapier gezeichnetes Diagramm für  $R_{max}$  relativ zum Diagramm für  $R'_F$  um  $10 \lg \frac{S_O}{S_F}$  (siehe  $\Delta R$  Bild 16) verschiebt. Mit der für jede Frequenz nun leicht ablesbaren Differenz  $\Delta R = R_O - R_{res}$  kann man im Fehlerdiagramm Bild 8 bei bekanntem  $S_F/S_O$  leicht den Fehler  $\Delta R_F$  bestimmen. (In der Praxis zeigt sich in der Regel, daß bei hochschalldämmenden Fenstern nur einige Terzbereiche zu korrigieren sind.) Mit dem nun bekannten Fehler wird bestimmt  $R_F$  als

$$R_F = R'_F + \Delta R_F$$

Für den BAM-Prüfstand ist mit  $S_O = 10 \text{ m}^2$  diese Auswertung noch weiter dadurch vereinfacht, daß die Ziffern der Abzisse unmittelbar der geprüften Fensterfläche  $S_F$  entsprechen. Dieses Diagramm zeigt, daß im BAM-Fensterprüfstand für alle möglichen Fensterflächen  $S_F$  der Fehler  $\Delta R_F \leq 1 \text{ dB}$  bleibt, wenn

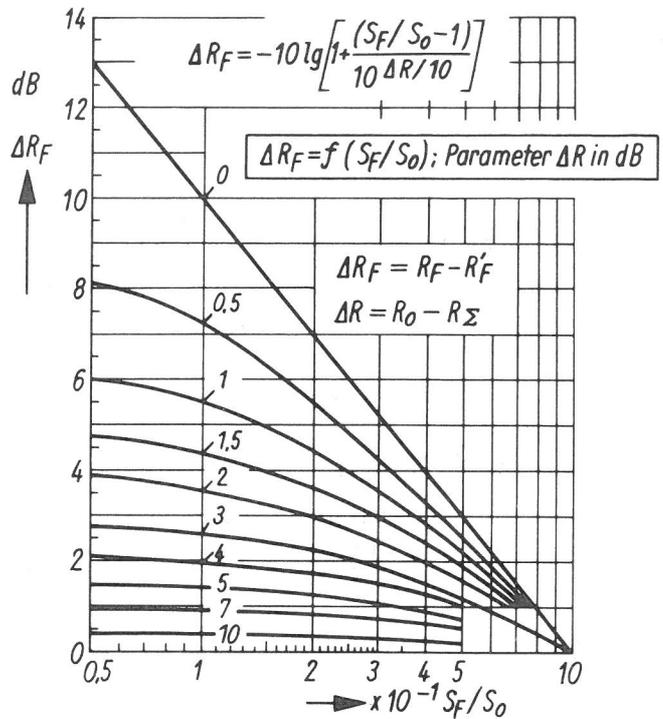


Bild 8

Korrektur  $\Delta R_F$  in Abhängigkeit vom Flächenverhältnis  $S_F/S_O$  und der Differenz zwischen der Maximaldämmung eines Prüfstandes und der resultierenden Dämmung

$\Delta R = R_{max} - R_{res}$  zur Bestimmung realer Schalldämm-Maße  $R_F$  aus Messungen von  $R'_F = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2}$  bei Fenstern hoher Luftschalldämmung ( $R'_F \geq 35 \text{ dB}$ )

$$R_{max} - R_{res} = \Delta R \geq 7 \text{ dB ist.}$$

Diese Bedingung ist durch Erhöhung von  $R_{max}$  um ca. 10 dB gegenüber üblichen bauakustischen Wandprüfständen zur Bestimmung von Bau-Schalldämm-Maßen  $R'$  nach DIN 52 210 leicht erfüllt (siehe auch Abs. 9 und Bild 16).

#### 7.4 Fehler bei kleinem $R'_F$ und großem $S_F$

Die folgende Fehlerfunktion soll die Phänomene der Abschn. 6.12 bzw. 6.22 mit der Lösungsgleichung (75) erfassen. Da die Größe und der Anwendungsbereich dieser neuen Fehlerfunktionen sich von der für  $\Delta R_F$  in den vorigen Abschnitten 7.1, 7.2 und 7.3 unterscheidet, sei sie mit  $[\Delta R_F]$  bezeichnet

##### 7.41 1. Lösungsweg

Es ist hier zu erwarten  $R_F \leq R'_F$

$$\text{Also } [\Delta R_F] = R'_F - R_F \quad (97)$$

Hierbei bedeutet wieder nach Gleichung (67)

$$R'_F = D + 10 \lg \frac{S_F}{A_2}$$

und aus Gleichung (75)

$$R_F = 10 \lg \left[ 10^{D/10} - 1 \right] + 10 \lg \frac{S_F}{A_2}$$

also

$$[\Delta R_F] = D - 10 \lg (10^{D/10} - 1) \quad (98)$$

bzw. nach einigen Umformungen

$$[\Delta R_F] = -10 \lg (1 - 10^{-D/10}) \quad (99)$$

und wenn man Gleichung (67) nach D auflöst und in (99) einsetzt

$$[\Delta R_F] = -10 \lg \left[ 1 - 10^{-\frac{1}{10}(R'_F - 10 \lg \frac{S_F}{A_2})} \right] \quad (100)$$

#### 7.42 2. Lösungsweg

Es ist nach Gleichung (74a)

$$\frac{1}{\tau_F} = \frac{E_1/E_2 - 1}{A_{20}/S_F} \quad (101)$$

und nach Gleichung (70a)

$$\frac{1}{\tau'_F} = \frac{E_1/E_2}{A_2/S_F} \quad (102)$$

Aus Gleichung (101) und (102) ergibt sich mit

$$[\Delta R_F] = 10 \lg \frac{\tau_F}{\tau'_F} \quad (103)$$

$$[\Delta R_F] = 10 \lg \frac{E_1/E_2 \cdot A_{20}}{(E_1/E_2 - 1) \cdot A_2}$$

Nimmt man wieder bei üblichen Auswertungen fälschlicherweise an, es sei  $A_{20} = A_2$ , so entsteht also der Fehler

$$[\Delta R_F] = -10 \lg \left( \frac{10^{D/10} - 1}{10^{D/10}} \right)$$

$$[\Delta R_F] = -10 \lg (1 - 10^{-D/10})$$

Diese Gleichung ist identisch der Lösung (99). Damit ergibt sich als Endlösung auch wieder Gleichung (100).

#### 7.43 Fehlerdiagramm $[\Delta R_F] = f(S_F, A_2)$ Parameter $R'_F$

Dieses Fehlerdiagramm ist nach der Gleichung (100) zusammen mit einem Hilfsdiagramm zur graphischen Bestimmung von  $10 \lg \frac{S_F}{A_2}$  in Bild

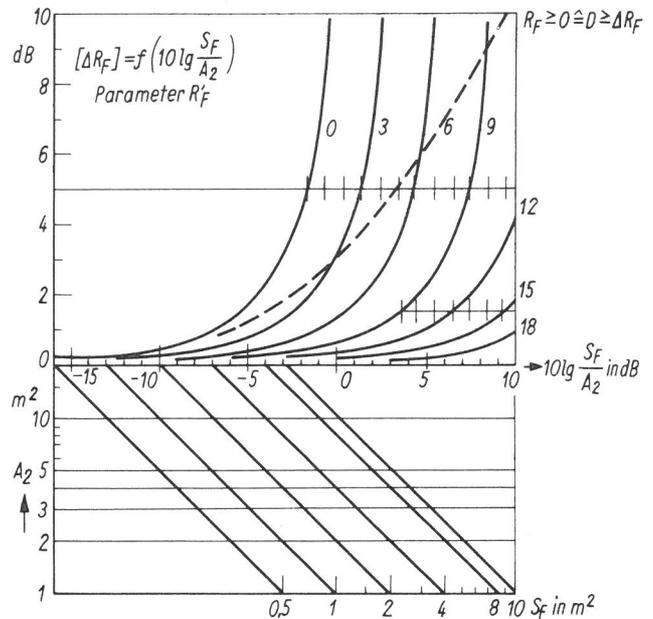


Bild 9

Korrektur  $[\Delta R_F]$  in Abhängigkeit von der Prüffläche  $S_F$  und der äquivalenten Absorptionsfläche des Empfangsraumes  $A_2$  zur Bestimmung realer Schalldämm-Maße  $R_F$  aus Messungen

$R'_F = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2}$  bei Fenstern niedriger Luftschalldämmung ( $R_F \leq 15$  dB) mit Gültigkeitsgrenze (- - -)

9 dargestellt. Das Hauptdiagramm

$$[R_F] = f(10 \lg \frac{S_F}{A_2})$$

mit  $R'_F$  als Parameter weist 2 Besonderheiten auf.

1) Polstellen der Parameterkurven außerhalb derer es überhaupt keine Lösung gibt (da Logarithmen negativer Zahlen nicht existieren).

2) Einen abgrenzbaren Bereich oberhalb dessen negative  $R_F$ -Werte, also falsche Ergebnisse entstehen.

#### 1. Kriterium (Polstellenkriterium)

In Gleichung (100) sind nur Lösungen zu erwarten für

$$10 \lg \frac{S_F}{A_2} < R'_F$$

Für  $10 \lg \frac{S_F}{A_2} = R'_F$  treten Polstellen auf.

Die Bedingung  $10 \lg \frac{S_F}{A_2} \leq R'_F$  ist identisch mit  $D \geq 0$  dB

Die Einhaltung dieser Bedingung

$$\left[ 10 \lg \frac{S_F}{A_2} \leq R'_F \right] \hat{=} \left[ D \geq 0 \text{ dB} \right] \quad (104)$$

ist eine notwendige Voraussetzung dafür, überhaupt Lösungen zu erhalten, jedoch keine hinreichende Voraussetzung dafür, richtige Lösungen ( $R_F \geq 0$  dB) zu erhalten.

## 2. Kriterium (Grenzkriterium)

Aus dem Ansatz zur Gleichung (74)

$$A_{20} + \tau_F \cdot S_F = A_2$$

folgt die Ungleichung

$$\tau_F \cdot S_F \leq A_2$$

bzw.

$$\frac{1}{\tau_F} \geq \frac{S_F}{A_2}$$

und

$$10 \lg \frac{1}{\tau_F} = R_F \geq 10 \lg \frac{S_F}{A_2} \quad (105)$$

Aus Gleichung (97) mit

$$R_F = R'_F - [\Delta R_F]$$

wird Gleichung (105)

$$R'_F - [\Delta R_F] \geq 10 \lg \frac{S_F}{A_2}$$

und durch Einsetzen der Definitionsgleichung (67) für  $R'_F$

$$D \geq [\Delta R_F] \quad (106)$$

Die Ungleichung (104) mit  $D \geq 0$  dB ist also eine notwendige und die Ungleichung (106) mit  $D \geq [\Delta R_F]$  ist dann eine notwendige und zugleich hinreichende Bedingung für die Bestimmung realer  $[\Delta R_F]$ - Korrekturen. Diese Bedingung (106), die, wie Überlegungen zeigen, bei ordnungsgemäß durchgeführten Messungen von  $R'_F$  immer erfüllt ist, wurde im Bild 9 als Grenzwert eingetragen. Sie führt stets zu Lösungen

$$0 \leq R_F \leq R'_F$$

Anmerkung: Zur numerischen Auswertung wird wie folgt verfahren: Man wählt im unteren Hilfsdiagramm an der Abzisse die erforderliche Parametergerade für  $S_F$  und an der Ordinate den gemessenen Wert für  $A_2$  und erhält an der Hauptabzisse des oberen Diagrammes den Wert  $10 \lg \frac{S_F}{A_2}$  (den man natürlich auch rechnen kann). Für den jeweiligen Meßwert von  $R'_F$  (Parameter) ergibt sich dann der Fehler  $[\Delta R_F]$ . Die Zusammenhänge in Bild 9 lassen erkennen, daß bei großem  $S_F$  (etwa  $S_F > 2 \text{ m}^2$ ) und zugleich kleinem  $A_2$  (etwa  $A_2 < 2 \text{ m}^2$ , also sehr halligem Empfangsraum) bei kleinem  $R'_F$  (etwa  $R'_F < 15$  dB) erhebliche Fehler auftreten können. Diese Fehler sind jedoch für Messungen mit  $R'_F \geq 15$  dB praktisch in allen Fällen vernachlässigbar. Im BAM-Fensterprüfstand wurde der Empfangsraum mit  $A_2 > 10 \text{ m}^2$  gedämpft. Damit wird dort selbst bei großen Objekten extrem niedriger Dämmung grundsätzlich dieser Fehler  $[\Delta R_F]$  vernachlässigbar.

Die Fehlerbetrachtungen dieses Abschnittes 7 lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Als exakte Lösung für  $R_F$  gilt

wahrer Wert für  $R_F$

$$R_F = \underbrace{\underbrace{R'_F}_{\text{gemessener Wert für } R'_F} + \underbrace{\Delta R_F}_{\text{wahrer Wert für } R_F} - \underbrace{[\Delta R_F]}_{\text{Fehler}}}_{\text{exakte Lösung für } R_F} = D + 10 \lg \frac{S_F}{A_2} \quad (107)$$

Aus Bild 8 bestimmter Fehler bei großem  $R'_F \geq 35$  dB

Aus Bild 9 bestimmter Fehler bei kleinem  $R'_F \leq 15$  dB

## 8. Zum Einfluß der akustischen Dichtung von Schließfugen und der Nebenwegübertragung zwischen Fenster und Wand

Bei der Bestimmung der Luftschalldämmung von Fenstern ist grundsätzlich zu unterscheiden

- a) die Luftschalldämmung der Fensterverglasung
- b) die Luftschalldämmung der Fensterkonstruktion.

Gleiches gilt sinngemäß bei Türen (a Türblatt, b Türkonstruktion) Fassaden (a Fassadenelemente, b Gesamtfassade mit Stoßfugen) und auch Montagewänden (a Montagewandelement, b gesamte Montagewand mit Stoßfugen).

Anmerkung: Bei Fassaden und Montagewänden ist sogar noch zu unterscheiden zwischen Stoßfugen und Randfugen (Randabdichtung) sowie bei Türen zwischen Schließfugen und Bodendichtung (z. B. Schwelle, Schleifdichtung, Fugenabsorption).

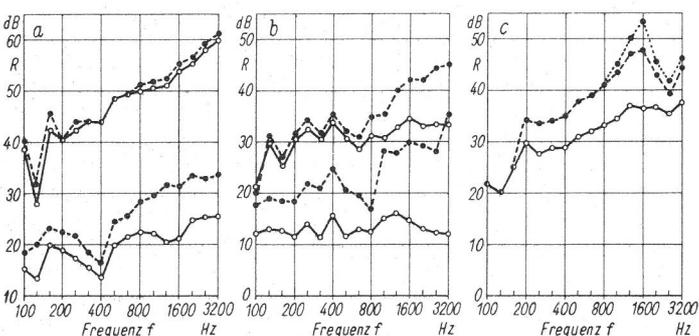


Bild 10

Beispiele von guten und schlechten akustischen Dichtungswirkungen bei Fenstern und Türen verschiedener Luftschalldämmung sowie bei einer zweischaligen Montagewand, dargestellt durch Vergleiche von Luftschalldämm-Maßen

1. ○—○ der Gesamtkonstruktion im Nutzungszustand
  2. ●--● der Hauptfläche (Verglasung, Türblatt, Wandelement) nach zusätzlicher Abdichtung aller Schließfugen
- a) bei Fensterkonstruktionen  
 b) bei Türkonstruktionen  
 c) bei einer Montagewand
- im Nutzungszustand  
 ●--● nach Dichten aller Randfugen  
 ●••● nach Dichten aller Rand- und Stoßfugen

Diese für eine Gesamtbeurteilung wesentlichen Einflüsse lassen sich leicht dadurch ermitteln, daß zunächst die gesamte Konstruktion im normalen Einbauzustand gemessen wird und danach die gleiche Konstruktion nach zusätzlicher Abdichtung aller Schließfugen (bzw. Stoßfugen und danach Randfugen). In Bild 10 sind auszugsweise derartige Ergebnisse dargestellt bei

- 1) Fenstern mit schlechter und guter Dichtung
- 2) Türen mit schlechter und guter Dichtung
- 3) bei einer Montagewand nach Schließen der Stoßfugen und dann zusätzlich der Randfugen.

Diese Einflüsse sind in der Regel gekennzeichnet durch eine mit höherer Frequenz größer werdende Differenz von Luftschalldämm-Maßen nach a) und b).

Anmerkung: Bei hochschalldämmenden Fenstern mit guter Dichtung durch Mehrfachzargen und Lippendichtungen aus Gummi oder Kunststoff kann sich, wie auf Baustellen nachgewiesen wurde, zusätzlich noch auswirken eine Nebenwegübertragung zwischen Fensterrahmen und Wand (z. B. durch unsachgemäßen Einbau). Bei hochschalldämmenden Fenstern mit Fensterverglasung und einstellbarer Zu- und Ablüftung kann sich, wie bei Laboruntersuchungen nachgewiesen wurde, erheblich auswirken die Nebenwegübertragung über die Zu- und Ablufteinrichtungen, so daß häufig eine ganze Reihe von Zustandsparametern bei solchen Messungen zu berücksichtigen sind.

Die für die Messungen erforderlichen Zusatzdichtungen werden in der BAM realisiert durch beidseitige Abdichtung aller Schließfugen mit einem elastischen Kitt. Vor der Durchführung der Messungen zu a) sind jedoch die Wirkungen der Dichtung zu überprüfen.

Dies geschieht zweckmäßig mit Nahfeldmessungen



Bild 11

Akustische Kontrolle der zusätzlichen Dichtung von Schließfugen bei Fenstern durch Nahfeldmessungen mit 1000 Hz-Oktavbandrauschen vor der Durchführung der Hauptmeßreihen zur Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes der Fensterverglasung

Anmerkung: Unter dem Fenster befindet sich ein Lüftungsschlitz hoher Schalldämpfung, der für diese Versuche ebenfalls zusätzlich verschlossen wurde. Im Fenster ist der Meßlautsprecher im Senderraum sichtbar. Im Vordergrund steht das mit dem akustischen Meßplatz im Laboratorium verbundene Meßmikrofon für die Durchführung der Hauptmeßreihen. Weiter sind auch die Akustikdecken im Sende- und Empfangsraum sowie die Wandvorsatzschalen im Senderraum erkennbar (s. Abs. 9). Die vereinzelt schräg aufgestellten HWL-Platten dienen der Erhöhung der Diffusität und Absorption der Meßräume

durch allseitiges Umfahren der Schließfugen mit einem Meßmikrofon im Abstand von  $d \leq 5$  cm, bei Oktavrauschen mit einer Mittenfrequenz von 1000 Hz (siehe Bild 11).

In einem normalen Hallraum ist bekanntlich gegenüber dem mittleren Schallpegel in Raummitte der lokale Schalldruckpegel an der Wandmitte um 3 dB, an einer Raumkante um 6 dB und in einer Raumecke um 9 dB höher. [39, 40, 41, 42] Bild 12 zeigt hierzu die Bestätigung im Experiment. Sind nun die Differenzen der Schalldruckpegel zwischen Raummitte und Schließfugen bereits erheblich größer als die theoretisch zu erwartenden Werte (z. B.  $D = 3$  dB zwischen Raummitte und Wandmitte) so ist vor der Hauptmessung die Dichtung zu verbessern. (Bei Laboruntersuchungen wurden zunächst Differenzen  $D > 10$  dB in Teilbereichen der Fuge gemessen).

Über den Einfluß der Fugendichtigkeit auf das Luftschalldämm-Maß von Fenstern, oder allge-

mein auf in Wandflächen eingebaute Platten, liegen bereits umfangreiche theoretische und experimentelle Arbeiten vor. Die ersten Arbeiten hierzu [43-46] versuchten diesen Einfluß in Abhängigkeit einer strömungstechnisch bestimmten Fugendurchlässigkeit zu bestimmen. Diese Ergebnisse konnten mit praktischen Versuchen nur unvollkommen übereinstimmen, da

- 1) die gleiche Fugendurchlässigkeit bezogen auf eine gleich große Platte bei unterschiedlichen Fugenabmessungen (Fugentiefe und -breite) und Verteilungen der Fugenlängen (eine lange Fuge oder mehrere Teilfugen unterschiedlicher Länge) auftreten kann.
- 2) die wellentheoretischen Phänomene (z. B. Resonanzen bei der Fugentiefe  $t = \lambda/2$ ) in Abhängigkeit der Frequenz nicht richtig erfaßt werden.
- 3) die Lage der Fugen (Wandmitte, Raumkante, Raumecke) nicht berücksichtigt ist.

Erste theoretische Untersuchungen in Abhängigkeit der Fugenabmessungen liegen vor von Cremer [47], von Ingerslev und Nielsen [48] und jetzt in umfassender Form auch unter Berücksichtigung der Lage im Meßraum (Wandmitte, Raumkante und Raumecke) von Comperts [49, 50]. K. Gösele hat diese Gesetzmäßigkeiten in [51] ausführlich für die praktische Anwendung bei Türkonstruktionen diskutiert und in einer Reihe von Versuchen experimentell bestätigt.

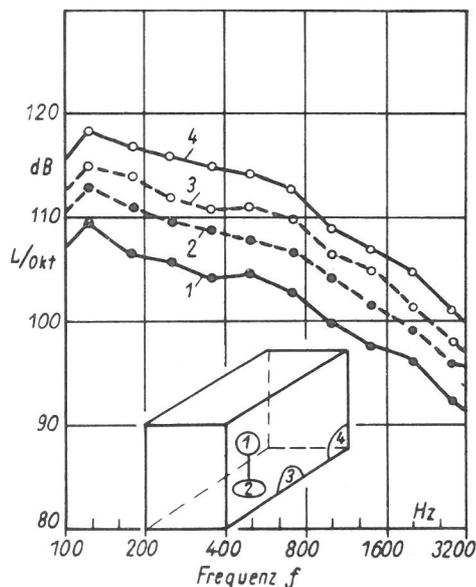


Bild 12

Gemessene lokale Schalldruckpegel je Oktave an definierten Meßorten (1. Raummitte; 2. Flächenmitte; 3. Raumkante; 4. Raumecke) bei konstanter Schallanregung eines Meßraumes ( $V = 50 \text{ m}^3$ ) mit Breitband-Rauschen

Für die folgenden Erörterungen, insbesondere für den Vergleich verschiedener Meßergebnisse zum Problem der Fugendämmung mit den wellentheoretischen Zusammenhängen nach Comperts, seien 3 Definitionsgleichungen zugrunde gelegt.

$$a) \quad R_S = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{b \cdot l}{A_2} \quad (108)$$

Schlitzdämmung bezogen auf die Schlitzfläche der Breite  $b$  und der Länge  $l$  im Sinne einer Meßgröße  $R_S = 10 \lg P_1/P_2$  aus der auf die Schlitzfläche auffallenden Schalleistung  $P_1$  zur vom Schlitz durchgelassenen Schalleistung  $P_2$ .

$$b) \quad R_{S_n} = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_0}{A_2} + 10 \lg \frac{1}{l_0} \quad (109)$$

Normierte Schlitzdämmung mit der Bezugsfläche  $S_0 = 1 \text{ m}^2$  und der Bezugslänge des Schlitzes  $l_0 = 1 \text{ m}$  bei Messung eines Schlitzes der Länge  $l$  als Meßgröße zum Vergleich verschiedener Fugendichtungen im Sinne bauteilkennzeichnender Größen auch bei Prüfungen mit unterschiedlichen Längen  $l$ . Ist bei der Prüfung von  $R_{S_n}$  die Schlitzbreite  $b$  bekannt, so besteht zwischen den Gleichungen (108) und (109) der Zusammenhang

$$R_S = R_{S_n} + 10 \lg \frac{l_0 \cdot b}{S_0} \quad (110)$$

$$c) \quad R_{S,F} = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2} \quad (111)$$

Fensterbezogene Schlitzdämmung im Sinne einer als Fensterdämm-Maß der Fläche  $S_F$  gekennzeichneten Wirkung eines Schlitzes unter der Annahme einer extrem hohen Dämmung der Fläche  $S_F$  ( $\tau_F = 0$ ).

Ist bei der Prüfung von  $R_{S,F}$  die Schlitzlänge  $l$  bekannt, so besteht zwischen den Gleichungen (109) und (111) der Zusammenhang

$$R_{S_n} = R_{S,F} + 10 \lg \frac{S_0}{S_F} + 10 \lg \frac{1}{l_0} \quad (112)$$

Aus den von Comperts [49, 50] wellentheoretisch im diffusen Schallfeld mit normierten dimensionslosen Größen abgeleiteten Transmissionsgrad eines Schlitzes  $\tau_S$  ergibt sich für einen Schlitz der Tiefe  $t$  und der Breite  $b$  mit  $2a$  als Mündungskorrektur nach einigen Umformungen für die Schlitzdämmung  $R_S$  allgemein

$$R_S = 10 \lg \frac{1}{4} \left[ \frac{z \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{c} f(t+2a)}{\frac{2\pi}{c} f b} + \frac{2\pi}{c} f b \right] \quad (113)$$

sowie als normierte Schlitzdämmung nach Gleichung (109) und (110)

$$R_{S_n} = 10 \lg \frac{1}{4} \frac{S_0}{l_0} \left[ \frac{z \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{c} f(t+2a)}{\frac{2\pi}{c} f b^2} + \frac{2\pi}{c} f \right] \quad (114)$$

Der Faktor  $z$  in den Gleichungen (113) und (114) berücksichtigt dabei die Lage des Schlitzes in der

Prüfwand. Liegt der Schlitz in der Wandmitte, so ist  $z = 1$ ; liegt er im Bereich der Wandkante, so ist  $z = 1/4$ . Die Mündungskorrektur ergibt sich nach Ingerslev und Nielsen [48] und Comperts [50] zu

$$2a = \frac{2b}{\pi} \left[ \ln \frac{4c}{\pi f b} - 0,58 \right] \quad (115)$$

Sie ist in Bild 13a als  $\frac{a}{b} = g\left(\frac{2\pi f}{c} \cdot b\right)$  dargestellt.

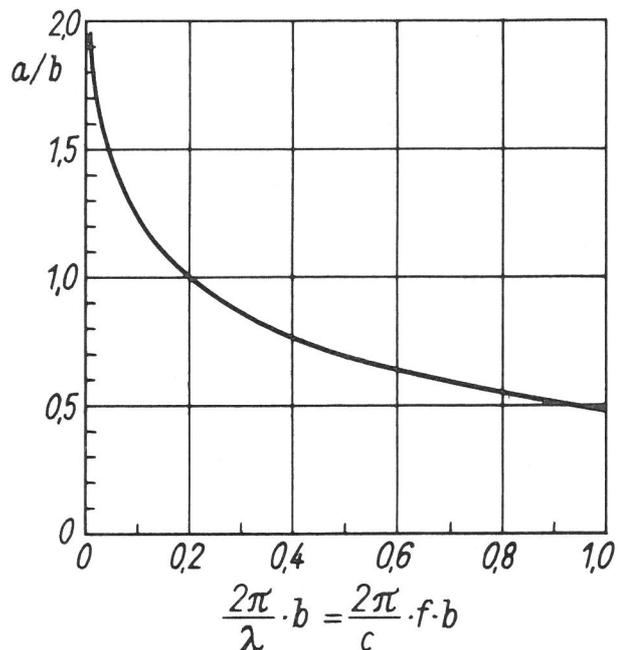


Bild 13 a

Diagramm zur Bestimmung der Mündungskorrektur  $a$  von Fugen der Breite  $b$  nach Gleichung 115 zur Berechnung der Luftschalldämmung von Fugen gegebener Abmessungen nach Gleichung 113 a bis d sowie 114 a bis d

Die Gleichungen (113) und (114) lassen sich für einige typische Bereiche bzw. Bedingungen vereinfachen, und zwar

a) bei sehr kleinem Argument der Sinusfunktion mit

$$\sin \frac{2\pi}{c} f(t+2a) \approx \frac{2\pi}{c} f(t+2a)$$

also für den Bereich  $t \ll \lambda = c/f$

b) wie a) mit der Zusatzbedingung  $\frac{t+2a}{b} \gg 1$

also bei gegenüber der Schlitzbreite  $b$  großer Schlitztiefe  $t$

c) bei  $\sin \frac{2\pi}{c} f(t+2a) = 0$

also für die Minima der Dämmung bei Resonanz

d) bei  $\sin \frac{2\pi}{c} f(t+2a) = 1$

also für die Maxima der Dämmung bei Antiresonanz.

Die jeweiligen Näherungslösungen für  $R_S$  und  $R_{S_n}$  sind zusammen mit den kennzeichnenden Berei-

chen bzw. Bedingungen in der folgenden Tabelle

Näherungslösungen zur Berechnung der Schlitzdämmung  $R_S$  sowie der normierten Schlitzdämmung  $R_{S_n}$  aus den Schlitzabmessungen bei definierten Näherungsbedingungen.

(Lageeinfluß: Wandmitte  $z = 1$  ; Raumkante  $z = 1/4$  Mündungskorrektur  $2a = \frac{2b}{\pi} \left( \ln \frac{4\lambda}{\pi b} - 0,58 \right)$ )

		Bedingung	$R_S$ (aus Gl. 113)	$R_{S_n}$ (aus Gl. 114)
unterer Frequenzbereich	a	$t + 2a \ll \lambda$	$10 \lg \frac{\pi f}{2c} \cdot b + 10 \lg \left[ z \cdot \left( \frac{t + 2a}{b} \right)^2 + 1 \right]$	$10 \lg \frac{\pi f}{2c} \cdot \frac{S_o}{l_o} + 10 \lg \left[ z \cdot \left( \frac{t + 2a}{b} \right)^2 + 1 \right]$
	b	$t + 2a \ll \lambda$ und $\frac{t + 2a}{b} \gg 1$	$10 \lg \frac{\pi f}{2c} \cdot b + 20 \lg \frac{(t + 2a)}{b} + 10 \lg z$	$10 \lg \frac{\pi f}{2c} \cdot \frac{S_o}{l_o} + 20 \lg \frac{(t + 2a)}{b} + 10 \lg z$
Resonanz	c	$t + 2a = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ mit $n = 1, 2, 3 \dots$ bzw. $f_o = \frac{n \cdot c}{2(t + 2a)}$	$10 \lg \frac{\pi \cdot f_o}{2c} \cdot b$  $10 \lg n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{b}{(t + 2a)}$	$10 \lg \frac{\pi f_o}{2c} \cdot \frac{S_o}{l_o}$  $10 \lg n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{S_o}{l_o(t + 2a)}$
Antiresonanz	d	$t + 2a = n \cdot \frac{\lambda}{4}$ mit $n = 1, 3, 5 \dots$ bzw. $f'_o = \frac{n \cdot c}{4(t + 2a)}$	$10 \lg \left[ \frac{\pi \cdot f'_o}{2c} \cdot b + \frac{z \cdot c}{8 \pi f'_o \cdot b} \right]$  $10 \lg \left[ n \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{b}{(t + 2a)} + \frac{z}{2n \pi} \cdot \frac{(t + 2a)}{b} \right]$	$10 \lg \left[ \frac{\pi f'_o}{2c} \cdot \frac{S_o}{l_o} + \frac{z \cdot c}{8 \pi f'_o \cdot b^2} \cdot \frac{S_o}{l_o} \right]$  $10 \lg \left[ n \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{S_o}{l_o(t + 2a)} + \frac{z}{2n \pi} \cdot \frac{(t + 2a)}{b^2} \cdot \frac{S_o}{l_o} \right]$

zusammengestellt. Der prinzipielle Verlauf von  $R_{S_n}$  ist hieraus in Bild 13b dargestellt. Hiernach steigt im unteren Frequenzbereich ( $t \ll \lambda$ ) die Fugendämmung  $R_{S_n}$  um 3 dB je Oktave an. Bezogen auf eine gleiche Frequenz nimmt  $R_{S_n}$  bei den Bedingungen in Zeile b um 6 dB je Verdopplung der Fugenbreite  $b$  ab. Gegenüber der Fugenlage in Wandmitte wird hierbei in der Wandkante die Dämmung  $R_{S_n}$  einer gleichen Fuge bei der gleichen Frequenz um 6 dB reduziert.

Diesem Verhalten im unteren Frequenzbereich folgen bei  $(t + 2a) = \lambda/4$  und den höheren Moden ungeradzahligter Vielfacher von  $\lambda/4$  die Maximalwerte der Dämmung (Zeile d) sowie im jeweiligen

Wechsel hierzu bei  $(t + 2a) = \lambda/2$  und den höheren Moden geradzahligter Vielfacher von  $\lambda/4$  die Minimalwerte der Dämmung (Zeile c).

Bei den Fugen geschlossener Fenster liegen die Resonanzphänomene wegen der geringen Fugentiefen ( $t \ll \lambda$ ) in der Regel weit über 2000 Hz. Hierbei ist weiterhin meist auch die Zusatzbedingung  $\frac{t + 2a}{b} \gg 1$  erfüllt, so daß vor allem die Lösung für  $R_{S_n}$  der Zeile b interessiert, die unter der Annahme einer Fugenlage in der Wandmitte ( $z = 1$ ) auch als Zahlenwertgleichung zu schreiben ist zu

$$R_{S_n} = 20 \lg \frac{t + 2a}{b} + 10 \lg f - 23 \text{ dB} \quad (116)^{+)}$$

bei einer mittleren Frequenz  $f = 500 \text{ Hz}$  wird hieraus

$$R_{S_n}(500 \text{ Hz}) = 20 \lg \frac{t + 2a}{b} + 4 \text{ dB} \quad (116a)$$

+) Diese Gleichung stimmt in etwas anderer Schreibweise überein mit einer in [51] S. 12 auch für  $t \ll \lambda$  abgeleiteten Zahlenwertgleichung, für die jedoch dort die Zusatzbedingung b)  $\frac{t + 2a}{b} \gg 1$  nicht angegeben ist. Auch eine in [49] von Comperts für  $t \ll \lambda$  abgeleitete Näherungslösung für den Transmissionsgrad  $\tau_S$  (Gleichung 70) gilt exakt nur in Verbindung mit dieser Zusatzbedingung, also den Bedingungen in Zeile b der Tabelle

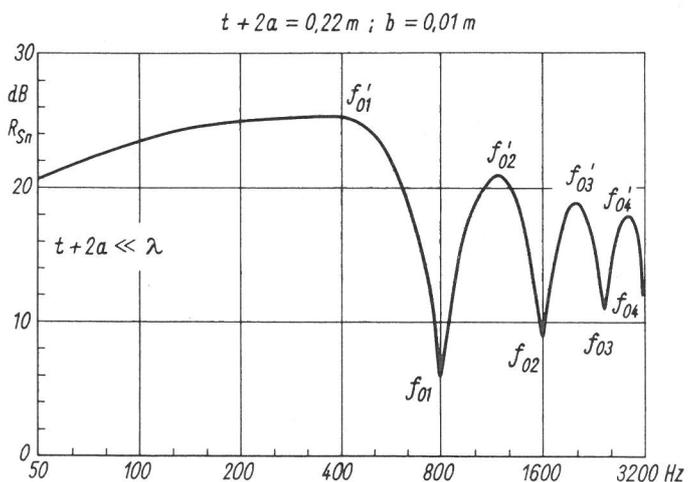


Bild 13 b  
Prinzipieller wellentheoretischer Verlauf der normierten Schlitzdämmung  $R_{S_n}$  von Fugen gegebener Abmessungen nach Gleichung 114

sowie bei vernachlässigbarer Mündungskorrektur  $2a$  als Näherungslösung einer nach Gleichung (111) auf die Fensterfläche  $S_F$  in  $m^2$  bezogenen "mittleren Dämmung" einer Fuge der Länge  $l$ , der Breite  $b$  und der Tiefe  $t$  in  $m$

$$R_{S,F}(500 \text{ Hz}) \approx 20 \lg \frac{t}{b} + 10 \lg \frac{S_F}{l} + 4 \text{ dB} \quad (116b)^{++}$$

Comperts befaßt sich in prinzipiell gleicher Art auch mit dem Transmissionsgrad eines Loches  $\tau_L$ . Obwohl die Bedeutung der Schalldämmung von Löchern im Rahmen dieser Arbeit geringer ist als die der Dämmung von Fugen, seien der Vollständigkeit halber in der gleichen Form wie oben die Schalldämm-Maße  $R_L$  und  $R_{L_n}$  abgeleitet. Mit der Lochtiefe  $t$  und dem Lochradius  $r$  sowie der Mündungskorrektur  $2a$  ergibt sich hierbei im diffusen Schallfeld allgemein

$$R_L = 10 \lg \frac{1}{4} \left[ z \cdot \frac{\sin^2 \frac{2\pi}{c} f(t+2a)}{\left(\frac{2\pi}{c} f r\right)^2} + \left(\frac{2\pi}{c} f r\right)^2 \right] \quad (117)$$

sowie als auf  $S_0 = 1 m^2$  normierte Lochdämmung mit

$$R_{L_n} = R_L + 10 \lg \frac{S_0}{\pi r^2}$$

$$R_{L_n} = 10 \lg \frac{S_0}{4\pi} \left[ z \cdot \frac{\sin^2 \frac{2\pi}{c} f(t+2a)}{\left(\frac{2\pi}{c} f\right)^2 \cdot r^4} + \left(\frac{2\pi}{c} f\right)^2 \right] \quad (118)$$

Der Faktor  $z$  in den Gleichungen (117) und (118) berücksichtigt dabei wieder den Einfluß der Lage des Loches in der Prüfwand (Wandmitte:  $z = 1$ ;

Näherungslösungen zur Berechnung der Lochdämmung  $R_L$  sowie der normierten Lochdämmung  $R_{L_n}$  aus den Lochabmessungen bei definierten Näherungsbedingungen.

(Lageeinfluß: Wandmitte  $z = 1$ ; Raumkante  $z = 1/4$ ; Raumecke  $z = 1/16$ )

		Bedingung	Mündungs-korrektur	$R_L$ (aus Gl. 117)	$R_{L_n}$ (aus Gl. 118)
unterer Frequenzbereich	a	$t + 2a \ll \lambda$	$2a$ $\frac{\pi}{2} r$	$10 \lg \frac{1}{4} \left[ z \cdot \left(\frac{t+2a}{r}\right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c} \cdot r\right)^2 \right]$ $10 \lg \frac{1}{4} \left[ z \cdot \left(\frac{t}{r} + \frac{\pi}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c} r\right)^2 \right]$	$10 \lg \frac{S_0}{4\pi} \left[ z \cdot \left(\frac{t+2a}{r^2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \right]$ $10 \lg \frac{S_0}{4\pi} \left[ z \cdot \left(\frac{t}{r^2} + \frac{\pi}{2r}\right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \right]$
	b	$t + 2a \ll \lambda$ und $\frac{t+2a}{r} \gg 1$	$2a$ $\frac{\pi}{2} r$	$20 \lg \left(\frac{t+2a}{2r}\right) + 10 \lg z$ $20 \lg \left(\frac{t}{2r} + \frac{\pi}{4}\right) + 10 \lg z$	$20 \lg \left(\frac{t+2a}{2r^2}\right) + 10 \lg \frac{S_0}{\pi} + 10 \lg z$ $20 \lg \left(\frac{t}{2r^2} + \frac{\pi}{4r}\right) + 10 \lg \frac{S_0}{\pi} + 10 \lg z$
Resonanz	c	$t + 2a = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ mit $n = 1, 2, 3 \dots$ bzw. $f'_0 = \frac{n \cdot c}{2(t+2a)}$	- $2a$	$20 \lg \frac{\pi \cdot r}{c} \cdot f_0$ $20 \lg \frac{n \cdot \pi \cdot r}{2(t+2a)}$	$20 \lg \frac{f_0}{c} + 10 \lg S_0 \cdot \pi$ $20 \lg \frac{n}{2(t+2a)} + 10 \lg S_0 \cdot \pi$
		$\hat{=} \frac{n \cdot c}{2t + \pi r}$	$\frac{\pi}{2} r$	$- 20 \lg \frac{1}{n} \left(\frac{2t}{\pi r} + 1\right)$	$20 \lg \frac{n}{2t + \pi r} + 10 \lg S_0 \cdot \pi$
Antiresonanz	d	$t + 2a = n \cdot \frac{\lambda}{4}$ mit $n = 1, 3, 5 \dots$ bzw. $f'_0 = \frac{n \cdot c}{4(t+2a)}$	- $2a$	$10 \lg \frac{1}{4} \left[ \left(\frac{2\pi f'_0 \cdot r}{c}\right)^2 + z \cdot \left(\frac{c}{2\pi f'_0 \cdot r}\right)^2 \right]$ $10 \lg \frac{1}{4} \left[ \left(\frac{n\pi r}{2(t+2a)}\right)^2 + z \left(\frac{2(t+2a)}{n\pi r}\right)^2 \right]$	$10 \lg \frac{S_0}{4\pi} \left[ \left(\frac{2\pi f'_0}{c}\right)^2 + z \cdot \left(\frac{c}{2\pi f'_0 r^2}\right)^2 \right]$ $10 \lg \frac{S_0}{4\pi} \left[ \left(\frac{n \cdot \pi}{2(t+2a)}\right)^2 + z \left(\frac{2(t+2a)}{n\pi r^2}\right)^2 \right]$
		$\hat{=} \frac{n \cdot c}{4t + 2\pi r}$	$\frac{\pi}{2} r$	$10 \lg \frac{1}{4} \left[ \left(\frac{n\pi r}{2t + \pi r}\right)^2 + z \left(\frac{2t + \pi r}{n\pi r}\right)^2 \right]$	$10 \lg \frac{S_0}{4\pi} \left[ \left(\frac{n \cdot \pi}{2t + \pi r}\right)^2 + z \left(\frac{2t + \pi r}{n\pi r^2}\right)^2 \right]$

++) Von den Autoren in [19] S. 32 und [51] S. 20 wurde zur gleichen Größe bei  $f = 1000 \text{ Hz}$  neben der aus der anderen Bezugshöhe zu erwartenden konstanten Erhöhung von 3 dB ein um  $10 \lg \frac{S_F}{l} \cdot \frac{l_0}{S_0}$  höheres Korrekturglied abgeleitet bzw. angegeben.

Raumkante:  $z = 1/4$ ; Raumecke:  $z = 1/16$ ). Für die Mündungskorrektur ergibt sich in guter Näherung

$$2a = \frac{\pi}{2} r \quad (119)$$

Auch hier lassen sich für die Gleichungen (117) und (118) für die typischen Bereiche und Bedingungen a bis d Näherungslösungen angeben, die in einer weiteren Tabelle zusammengestellt sind. Wegen der einfachen Mündungskorrektur (Gleichung (119)) sind dabei auch jeweils die vollständigen Lösungen mit  $2a = \frac{\pi}{2} r$  in geeigneter Form dargestellt.

Der prinzipielle Verlauf der Schalldämmung ist dem in Bild 13b weitgehend ähnlich. Bemerkenswert ist in Zeile b der Lageeinfluß eines gleich großen Loches mit einer Minderung für  $R_L$  und  $R_{Ln}$  von 12 dB in der Raumecke gegenüber der Wandmitte. Hieraus folgt, daß vor allem bei Wänden mit Montageelementen die Dichtung im Bereich der Raumecken besonders kritisch ist, also Löcher durch Verbindungselemente, beschädigte Ecken oder Leitungsdurchführungen in diesen Bereichen sorgfältig zu schließen sind.

Zum Lageeinfluß eines Loches gleicher Abmessung auf die Gesamtdämmung einer Wand wurden in anderem Zusammenhang in der BAM [41] Vergleichsversuche durchgeführt, deren Ergebnisse in Bild 13c dargestellt sind zusammen mit den theoretisch erwarteten Werten.

Eine kritische Betrachtung aller bisherigen theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur Schalldämmung von Fugen in Abhängigkeit der Fugenabmessungen zeigt, daß eine wesentliche Bedingung vorausgesetzt war nämlich, daß die Transmission der Prüffläche  $\tau_F$  als vernachlässigbar klein angenommen wurde gegenüber der auf die gleiche Prüffläche  $S_F$  (z.B. Fenster, Tür) bezogenen Transmission der Fuge  $\tau_S$ . (Der Index S bedeutet auch hier Schlitz (slit), da der Index F bereits vergeben ist.) Diese Voraussetzung bedeutet

$$\tau_F \cdot S_F \ll \tau_S \cdot S_F \quad (120)$$

bzw. noch eindeutiger  $\tau_F = 0$

Die Voraussetzungen der Gleichung (120) sind nun bei der praktischen Prüfung von Fenstern nicht gegeben, wenn man - wie zu Beginn dieses Abschnittes angegeben - ermittelt

- die Luftschalldämmung der Fensterverglasung, die im folgenden mit  $R_F$  bezeichnet sei, und
- die Luftschalldämmung der Fensterkonstruktion, die im folgenden mit  $R_{Fres}$  bezeichnet sei im Sinne einer resultierenden Wirkung des Fensters.

Zwischen  $R_F$ ,  $R_{Fres}$  sowie  $R_{S,F}$  und damit  $R_{Sn}$  zusammen mit  $S_F$  und  $l$  muß es wieder einen Zusammenhang geben, wenn man bedenkt, daß die resultierende Fensterdämmung  $R_{Fres}$  ja durch die Wirkungen der Einzeldämmungen  $R_F$  und  $R_{S,F}$  bestimmt ist. Dieser für praktische Untersuchungen und für die Aufgabenstellung dieser Ar-

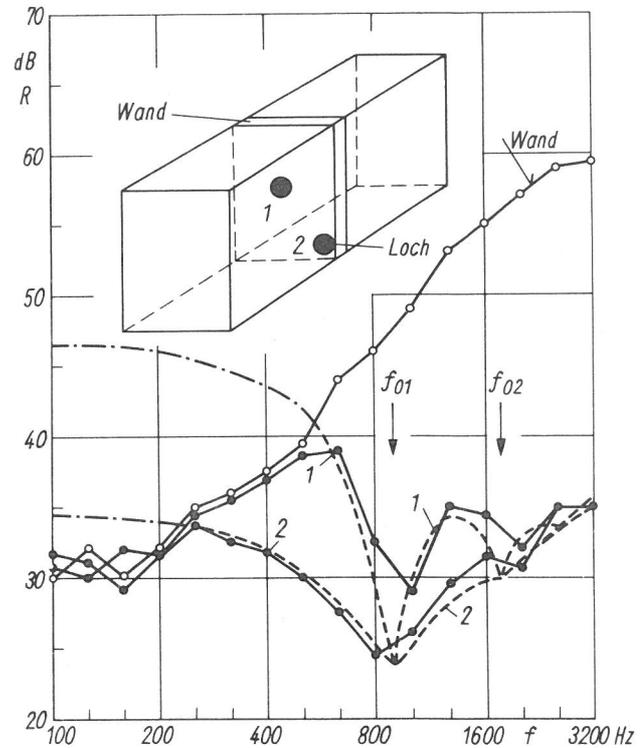


Bild 13 c

Untersuchungen zum Lageeinfluß eines Loches (60 mm Durchmesser) auf das Luftschalldämm-Maß einer Halbssteinwand bei Anordnung des Loches 1. in der Wandmitte, 2. in der Raumecke

--- Theoretischer Verlauf nach Gl. 118 bei  $S = 12 \text{ m}^2$

●—● Meßergebnisse mit Terzbandrauschen

Bei tiefen Frequenzen liegen die theoretischen Werte der Lochdämmung (---) über denen der Wänddämmung (○—○) mit der Folge eines dort vernachlässigbaren Locheinflusses auf die gemessenen resultierenden Schalldämm-Maße

beit wesentliche Zusammenhang läßt sich leicht wieder aus der Schlüsselgleichung (52) ableiten, wenn man die Problemstellung ausschließlich auf die Fensterfläche  $S_F$  bezieht im Sinne von

$$\tau_{Fres} \cdot S_F = \tau_F \cdot S_F + \tau_{S,F} \cdot S_F$$

also in Gleichung (52) zugrunde legt

$$S_n \hat{=} S \hat{=} S_F \quad \text{sowie} \quad R_{res} \hat{=} R_{Fres} ; R_1 \hat{=} R_F$$

$$\text{und} \quad R_2 \hat{=} R_{S,F}$$

Es ergibt sich dann

$$R_{Fres} = -10 \lg \left( 10^{-\frac{R_F}{10}} + 10^{-\frac{R_{S,F}}{10}} \right) \quad (121)$$

Diese Gleichung (121) gibt also an die resultierende Luftschalldämmung der Fensterkonstruktion  $R_{Fres}$  nach b, wenn die Luftschalldämmung der Fensterverglasung  $R_F$  nach a und, evtl. aus separaten Untersuchungen an anderer Stelle, die Luftschalldämmung der Fugenwirkung  $R_{S,F}$  bekannt sind.

Umgekehrt kann man, und dies ist für die Auswertung von Versuchen im Laboratorium und auf Bau-

stellen bedeutungsvoller, auch aus Messungen nach a) und b) die Fugendämmung bestimmen, in dem Gleichung (121) nach  $R_{S,F}$  aufgelöst wird zu

$$R_{S,F} = -10 \lg \left[ 10 \begin{array}{cc} -\frac{R_{Fres}}{10} & -\frac{R_F}{10} \\ & -10 \end{array} \right] \quad (122)$$

Hieraus läßt sich weiter mit  $S_F$  in  $m^2$  und der Fugenlänge  $l$  in  $m$  auch das "normierte Schlitzdämmmaß"  $R_{S_n}$  bestimmen zu

$$R_{S_n} = -10 \lg \left[ 10 \begin{array}{cc} -\frac{R_{Fres}}{10} & -\frac{R_F}{10} \\ & -10 \end{array} \right] + 10 \lg \frac{l}{S_F} \quad (123)$$

Mit der Anwendung des  $\Delta L$ -Verfahrens für die Bestimmung von  $R_F$  nach Abs. 3 Definitionsgleichung (30) und den Bedingungen zu (35) mit  $\Delta L \hat{=} R$  wird die Durchführung und Auswertung der Untersuchungen durch den Fortfall von Messungen der Nachhallzeiten noch wesentlich vereinfacht. Ergänzt man die Symbole für den Empfangsraumpegel  $L_2$  gemäß den Prüfstandsparametern a) und b) zu

$L_2^0$  Schallpegel im Empfangsraum bei offenem Fenster

$L_2^c$  Schallpegel im Empfangsraum bei normal geschlossenem Fenster (Hochindex  $c$  bedeutet closed)

$L_2$  Schallpegel im Empfangsraum bei zusätzlich abgedichteten Schließfugen,

so ergeben sich folgende einfache Auswertgleichungen

$$R_F = L_2^0 - L_2 \quad (124)$$

$$R_{Fres} = L_2^0 - L_2^c \quad (125)$$

und mit Gleichung (124) und (125) aus (122) ableitbar

$$R_{S,F} = L_2^0 - 10 \lg \left( 10 \frac{L_2^c}{10} - 10 \frac{L_2}{10} \right) \quad (126)$$

sowie wieder mit  $l$  in  $m$  und  $S_F$  in  $m^2$

$$R_{S_n} = L_2^0 + 10 \lg \frac{l}{S_F} - 10 \lg \left( 10 \frac{L_2^c}{10} - 10 \frac{L_2}{10} \right) \quad (127)$$

Diese Formeln (124) bis (127) sind auch bei Baustellenmessungen unmittelbar anwendbar, wenn sich in möblierten Räumen, wie in der Praxis gegeben, die Nachhallzeit  $T_2$  im Empfangsraum durch das Öffnen des Fensters nicht bzw. nur geringfügig verändert. Trifft dies nicht zu, z. B. bei einer Baustellenmessung in einem noch unmöblierten Raum, so sind die Gleichungen lediglich um ein Korrekturglied entsprechend Gleichung (37) zu ergänzen, also mit  $10 \lg \frac{T_2}{T_2^0}$ , so daß sich ergibt

$$R_F = L_2^0 - L_2 + 10 \lg \frac{T_2}{T_2^0} \quad (124a)$$

$$R_{Fres} = L_2^0 - L_2^c + 10 \lg \frac{T_2}{T_2^0} \quad (125a)$$

$$R_{S,F} = L_2^0 + 10 \lg \frac{T_2}{T_2^0} - 10 \lg \left( 10 \frac{L_2^c}{10} - 10 \frac{L_2}{10} \right) \quad (126a)$$

$$R_{S_n} = L_2^0 + 10 \lg \frac{T_2}{T_2^0} + 10 \lg \frac{l}{S_F} - 10 \lg \left( 10 \frac{L_2^c}{10} - 10 \frac{L_2}{10} \right) \quad (127a)$$

mit  $l$  in  $m$  und  $S_F$  in  $m^2$

Anmerkung: Es erscheint bemerkenswert, daß unter der Voraussetzung  $T_2 \approx T_2^0$  die Größen für  $R_F$ ,  $R_{Fres}$ ,  $R_{S,F}$ ,  $R_{S_n}$  sowie  $\Delta R_{Fres}$  (Gleichung 128, 129) aus nur 3 Oktavpegelmeßreihen (Oktavpegel bei 3 Zustandsparametern<sup>+) elementar bestimmbar sind.</sup>

Abschließend erscheint noch interessant eine Betrachtung zur Differenz der Schalldämm-Maße von Fensterverglasung und Fensterkonstruktion als Folge der Fugendämmung gekennzeichnet durch

$$\Delta R_{Fres} = R_F - R_{Fres} \quad (128)$$

die sich aus den Gleichungen (124) und (125) bzw. (124a) und (125a) experimentell leicht ermitteln läßt zu

$$\Delta R_{Fres} = L_2^c - L_2 \quad (129)$$

Betrachtet man die normierte Fugendämmung  $R_{S_n}$  als eine die konstruktive Ausführung der Schließfuge kennzeichnende Größe für die z. B. theoretisch oder experimentell Ergebnisse vorliegen oder ermittelt werden, so ist die Frage einer optimalen Anpassung von Bedeutung. Eine zu hohe Fugendurchlässigkeit würde eine hohe Schalldämmung der Verglasung unzulässig verschlechtern. Eine besonders gute konstruktive Ausbildung der Schließfugen würde sich bei niedriger Luftschalldämmung der Verglasung nicht lohnen und nicht auswirken. Eine solche optimale Anpassung läßt sich wie folgt kennzeichnen.

Setzt man Gleichung (121) in Gleichung (128) ein, so ergibt sich

$$\Delta R_{Fres} = R_F + 10 \lg \left( 10 \frac{R_F}{10} + 10 \frac{R_{S,F}}{10} \right)$$

und nach einigen Schritten

$$\Delta R_{Fres} = 10 \lg \left( 1 + 10 \frac{R_F - R_{S,F}}{10} \right) \quad (130)$$

<sup>+</sup>) bzw. Terzpegelmeßreihen

Mit dieser Gleichung läßt sich also leicht die zu erwartende Minderung der Luftschalldämmung der Verglasung  $R_F$  in Abhängigkeit von  $R_{S,F}$  bestimmen. Zur Ermittlung einer optimalen Anpassung ist eine Auflösung der Gleichung (130) nach  $R_{S,F}$  sinnvoll, die sich ergibt zu

$$R_{S,F} = R_F - 10 \lg \left( 10^{\frac{\Delta R_{Fres}}{10}} - 1 \right) \quad (131)$$

Anmerkung: Bei  $\Delta R_{Fres} = 3$  dB wird erwartungsgemäß  $R_{S,F} \hat{=} R_F$ .

Diese Gleichung macht deutlich, daß die zu wählende Fugendämmung  $R_{S,F}$  (und damit deren Konstruktion) von der zuzulassenden Minderung der Dämmung  $\Delta R_{Fres}$  und der Dämmung der Verglasung  $R_F$  abhängig ist.

Setzt man im Sinne einer optimalen Anpassung für eine gute Fensterkonstruktion voraus als zulässige Differenz

$$R_F - R_{Fres} = \Delta R_{Fres} \leq 1 \text{ dB} \quad (132)$$

und setzt man in Gleichung (131) die Gleichung (112) ein, so ergibt sich als Anforderung an das die Schließfugenkonstruktion kennzeichnende "normierte Schlitz-Dämm-Maß"  $R_{S_n}$

mit  $l$  in m und  $S_F$  in  $m^2$

$$R_{S_n} = R_F + 10 \lg \frac{1}{S_F} - 10 \lg \left( 10^{\frac{\Delta R_{Fres}}{10}} - 1 \right) \quad (133)$$

also mit Ungleichung (132)

$$R_{S_n} \geq R_F + 10 \lg \frac{1}{S_F} + 10 \lg \left( \frac{1}{10^{\frac{\Delta R_{Fres}}{10}} - 1} \right) \quad (134)$$

$$R_{S_n} \geq R_F + 10 \lg \frac{1}{S_F} + 5,9 \text{ dB} \quad (134a)$$

bzw. in sehr guter Näherung die einfache Beziehung

$$R_{S_n} \geq R_F + 10 \lg \frac{4 \cdot l}{S_F} \quad (135)$$

Diese wichtige Anpassungsregel besagt also, daß mit

$$R_{S_n} = R_F + 10 \lg \frac{4 \cdot l}{S_F}$$

Fugenlänge  $l$  in m, Fensterfläche  $S_F$  in  $m^2$ , die Minderung der Schalldämmung der Konstruktion gegenüber der der Verglasung  $\Delta R_{Fres} < 1$  dB ist.

Anmerkung: Sind mehr als zwei Zustandsparameter vorhanden, so ist im Prinzip die Gleichung (121) in der allgemeinen Darstellung gemäß Gleichung (52) anzuwenden als

$$R_{Fres} = -10 \lg \left( \sum_{n=1}^n 10^{-\frac{R_n}{10}} \right) \quad (136)$$

wobei  $R_n$  jeweils die auf die Prüffläche  $S_F$  bezogenen Zustandsparameter bedeuten. Als Beispiel sei hingewiesen auf eine Fensterkonstruktion, die

Bild 14

Prüfschema für hochschalldämmende Fenster mit zusätzlicher Lüftungseinrichtung bei Untersuchungen nach dem  $\Delta L$ -Verfahren

Pegel im Empf.-raum Meßreihe	Zustandsparameter						$R_F$		$\Delta R_F$		$R_{S,F}$			wichtig für Beurteilung der 1. Gesamtkonstruktion 2. Lüftung 3. Fugendichtungen (1. Übersicht) 4. Fugendichtungen (abs. Wertung)
	1. Fenster			2. Lüftung			$L_a - L_b$		$L_c - L_d$		$L_a - 10 \lg \left( \frac{L_c}{10} \frac{L_d}{10} \right)$			
	auf	zu	dicht	auf	zu	dicht	$L_a$	$L_b$	$L_c$	$L_d$	$L_a$	$L_c$	$L_d$	
Hauptmessungen	1	x			x		-	-	-	-	-	-	-	$L_1$ Bezugspegel
	2		x		x		$L_1$	$L_2$	-	-	-	-	-	1 $R_F$ Nutzungszustand Lüfter auf
	3		x		x		$L_1$	$L_3$	$L_2$	$L_3$	$L_1$	$L_3$	$L_4$	1 $R_F$ Ges. Konstr. Lüfter zu 2 $\Delta R_F$ Einfluß Lüfter auf/zu 3 $R_{S,F}$ Gesamtdichtung Fenster + Lüfter
	4		x	x	x	x	$L_1$	$L_4$	$L_2$	$L_4$	$L_3$	$L_4$		1 $R_F$ Verglasung 2 $\Delta R_F$ Minderung Lüfter auf 2 $\Delta R_F$ Minderung Lüfter zu
Ergänzungsmessungen	5		x		x	x	$L_1$	$L_5$	$L_5$	$L_4$	$L_1$	$L_5$	$L_4$	1 $R_F$ Fenster mit Fugenwirkung allein 3 $\Delta R_F$ Fugeneinfluß Fenster allein 4 $R_{S,F}$ Schließfuge Fenster allein
	6		x	x	x		$L_1$	$L_6$	$L_6$	$L_4$	$L_1$	$L_6$	$L_4$	1 $R_F$ Lüfter mit Fugenwirkung auf $S_F$ bezogen 3 $\Delta R_F$ Fugeneinfluß Lüfter allein 4 $R_{S,F}$ Schließfuge Lüfter allein
	7		x	x	x		$L_1$	$L_7$	-	-	-	-	-	2 $R_F$ Lüfter auf, allein auf $S_F$ bezogen

bei geschlossenem Fenster eine zusätzliche Lüftungseinrichtung besitzt (z. B. Lüftung über einem verschließbaren Spaltdämpfer der Länge  $l$  oder über einem Lüftungsschacht der Länge  $l$ . Bild 14 zeigt in einer Tabelle als Übersicht ein Prüfschema für Untersuchungen an einer solchen Fensterkonstruktion nach dem  $\Delta L$ -Verfahren. Hierbei sind die erforderlichen Zustandsparameter und Meß-

größen sowie die wichtigsten Prüfgrößen und Auswertgleichungen (124, 125, 126 u. 129) angegeben, wobei zusätzlich jeweils  $R_{SF}$  auf  $R_{Sn}$  nach Gleichung (127) normiert werden kann. Es zeigt sich, daß auf einfache Weise durch sukzessive Änderung der Zustandsparameter alle erforderlichen Prüfgrößen bis hin zur normierten Fugendämmung durch einen Fenstereinbau bestimmbar sind.

## 9. Die Maßnahmen im BAM-Fensterprüfstand zur Messung hochschalldämmender Fenster

Der BAM-Fensterprüfstand ist Teil einer Gruppe von Sonderprüfständen für Messungen der Luftschalldämmung, die vom übrigen Bauwerk körperschallisoliert zweigeschossig aufgebaut sind und deren Geschosgrundrisse in Bild 15 dargestellt sind. Die Flächengewichte der Flankenflächen im Fensterprüfstand entsprechen den Empfehlungen in DIN 52 210 für Prüfstände mit bauüblichen Nebenwegen. Diese Flankenflächen haben folgenden Aufbau:

- Außenwand: 240 mm MZ
- Innenwand : 240 mm MZ/360 mm MZ
- Decke : 150 mm Vollbeton
- Boden : 150 mm Vollbeton auf verdichtetem Erdreich

Die Trennwand zum Einbau der Fenster zwischen den 2 Hallräumen ( $V_S = 42,5 \text{ m}^3$ ;  $V_E = 42 \text{ m}^3$ ) hat eine Prüffläche  $S_0 = 10 \text{ m}^2$  und besteht aus 360 mm MZ mit einem Prüfausschnitt  $2 \text{ m} \times 1,75 \text{ m}$ .

Alle Wände sind raumseitig mit 15 mm Kalkzementmörtel verputzt.

Die in diesem Prüfstand durch Ausmauern des Prüfausschnittes zunächst ermittelte Maximaldämmung  $R_{\text{max}}$  ist dargestellt in Bild 16 (s.a. [52]). In Verbindung mit dem linken Diagramm  $\Delta R = f(S_F)$  läßt sich entsprechend Gleichung (76) die für jede Fensterfläche  $S_F$  prüfbare maximale Fensterdämmung  $R_{F\text{max}}$  bestimmen als

$$R_{F\text{max}} = R_{\text{max}} - \Delta R$$

Diese Meßgrenze wird praktisch bestimmt durch die Flankenübertragung, deren Einzeldämm-Maße mit ihren Zusammenhängen als Einzelwirkungen, Summenwirkungen und Gesamtwirkung im Prinzip dem Bild 17 zu entnehmen sind (siehe auch [53, 54, 55]).

Für alle Komponenten der Flankenübertragung wurden in [55] Auswertgleichungen abgeleitet, nach denen die Einzelkomponenten  $R_{fi}$  aus der Kombination von Luftschalldämmungen im Senderraum und Körperschallmessungen an den Flankenflächen im Empfangsraum bestimmt wurden.

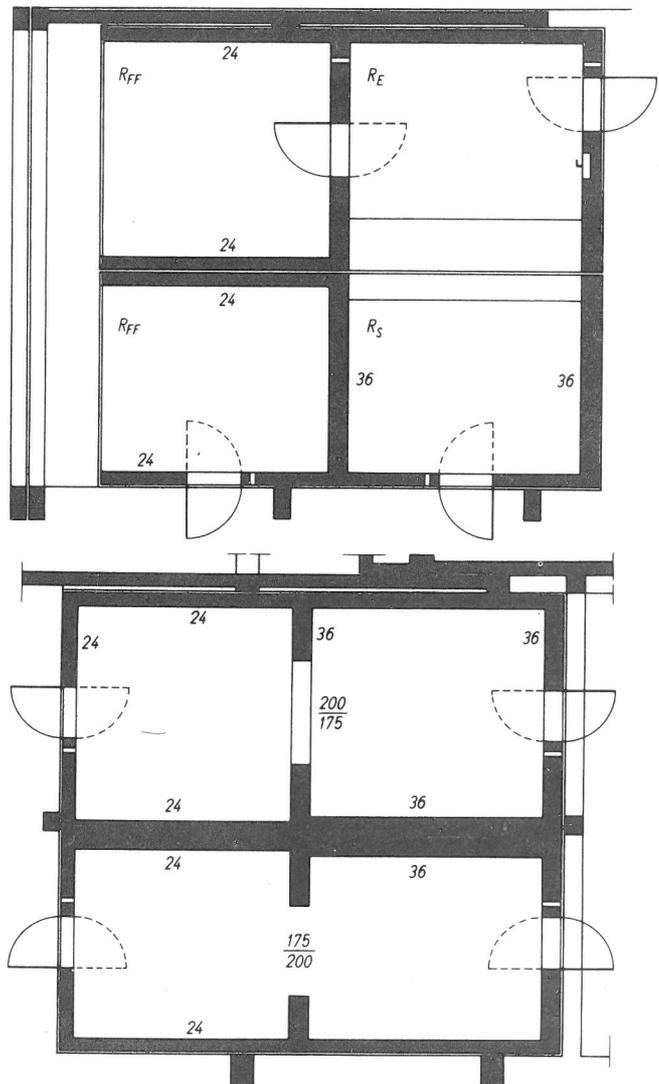
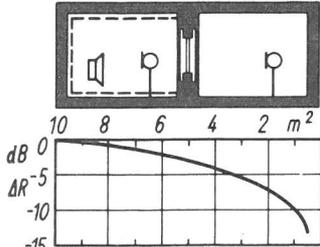


Bild 15

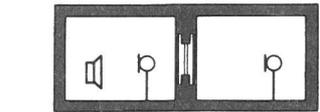
Grundrisse der BAM-Sonderprüfstände zur Messung der Luftschalldämmung vertikal angeordneter Bauteile

- oben: links: Prüfstand zur Untersuchung von bauakustischen Nebenwegen
  - Erdgeschoß rechts: Prüfstand mit unterdrückter Flankenübertragung vorwiegend für Sonderversuche an zweischaligen Bauteilen
  - unten: oben: Prüfstand für Fenstermessungen
  - Kellergeschoß unten: Prüfstand für Türmessungen
- Anmerkung: Die Zahlen geben die jeweiligen Wanddicken in cm an

b) Neuaufbau mit abgedeckten Flankenflächen im Senderraum

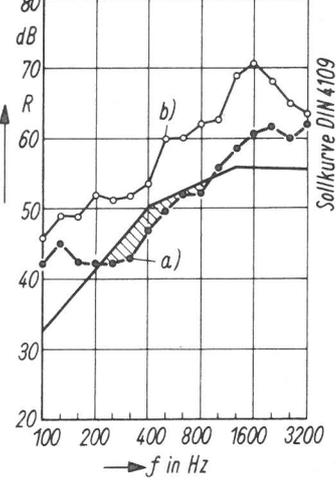


Reduktion von a) und b) durch Fensterfläche



a) Normalaufbau mit bauüblichen Nebenwegen nach DIN 52210

Trennwand für Fenstereinbau 360 mm Mz



stikplatten wurden teilgelochte Mineralfaserplatten mit rückseitigem Porenschluß gewählt, die früher hier entwickelt und gemessen, zugleich eine Erhöhung der Flankendämmung bewirken.

Das Ergebnis der nach diesem Umbau bestimmten Maximaldämmung ist ebenfalls dem Bild 16 zu entnehmen.

Bild 16 Meßgrenzen zur Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes von Fenstern im BAM-Fensterprüfstand

- a) vor dem Umbau
- b) nach dem Umbau zur Prüfung hochschalldämmender Fensterkonstruktionen

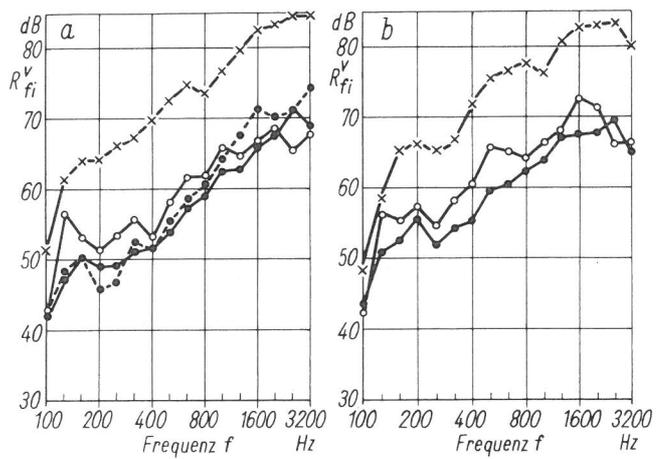
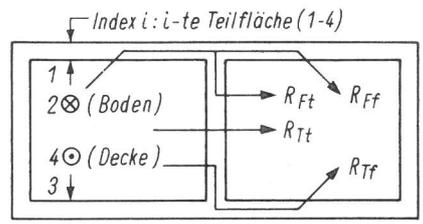
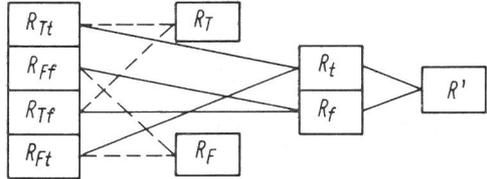


Bild 18 Aus Luftschalldmessungen im Senderraum und Körperschallmessungen an den flankierenden Bauteilen im Empfangsraum berechnete Summenwirkungen  $R_{fi}^v$  der Nebenwegübertragung

- a) vor dem Umbau, b) nach dem Umbau des BAM-Fensterprüfstandes
- 1. Seitenwand (360 mm MZ)
- 2. Seitenwand (240 mm MZ)
- x—x Boden (150 mm Vollbeton auf verdichtetem Erdreich)
- - ● Decke (150 mm Vollbeton) (nur gemessen vor dem Umbau, da nach dem Umbau durch Akustikplatten abgedeckt)



Index v: Ergebnis aus KS-Schnellemessung



Einzelwirkung	Summenwirkung	Gesamtwirkung
$R_{Tt}$	$R_T$	$R'$
$R_{Ff}$	$R_F$	
$R_{Tf}$		
$R_{Ft}$		

Bild 17 Systematik zur Kennzeichnung der verschiedenen Schalldämm-Maße R bei der Nebenwegübertragung

Es kennzeichnen:  
 F und f die Flankenflächen  
 T und t die Trennfläche \*)  
 F und T den Schalleintritt im Senderraum (großer Schallpegel)  
 f und t den Schallaustritt im Empfangsraum (kleiner Schallpegel)  
 \*) in DIN 52217 E inzwischen ersetzt durch D und d (Direct Transmission)

Bild 18 zeigt hierzu die Ergebnisse, die u. a. zeigen, daß die Seitenwände und die obere Decke maßgeblich die Maximaldämmung bestimmen. Alle Wandflächen im Senderraum wurden nunmehr mit biegeweichen Vorsatzschalen (Gipskartonplatten) bei Zwischenraumdämpfung durch Mineralfaserplatten abgedeckt. Die Decken im Senderraum und Empfangsraum erhielten eine mit Luftabstand angebrachte schallabsorbierende Unterdecke zur Erhöhung von  $A_1$  und  $A_2$

- a) als Voraussetzung für eine korrekturlose Anwendung des  $\Delta L$ -Prüfverfahrens nach Abs. 3
- b) als Voraussetzung für korrekturlose Prüfungen kleiner Schalldämm-Maße nach Abs. 6.4 und Bild 9.

In Bild 19 sind  $A_1$  und  $A_2$  im jetzigen Zustand in Abhängigkeit der Frequenz angegeben. Als Aku-

Diese Anordnung entspricht jetzt auch den günstigsten Verhältnissen in der Baupraxis bei Außenwänden mit Fenstern. Auch dort fehlen ja für den Bereich vor dem Fenster die flankierenden Flächen (jetzt abgedeckt), also ihre Einflüsse auf die Maximaldämmung. In einem Empfangsraum im Gebäudeinneren ist der günstigste Fall durch zwei schwere Seitenwände gegeben (z.B. Wohnungstrennwände in Einzimmer-Appartements) und eine Decke mit Unterdecke sowie einen Boden mit schwimmendem Estrich. Diese günstige Bau-situation ist in dem jetzigen Endzustand des BAM-Fensterprüfstandes realisiert.

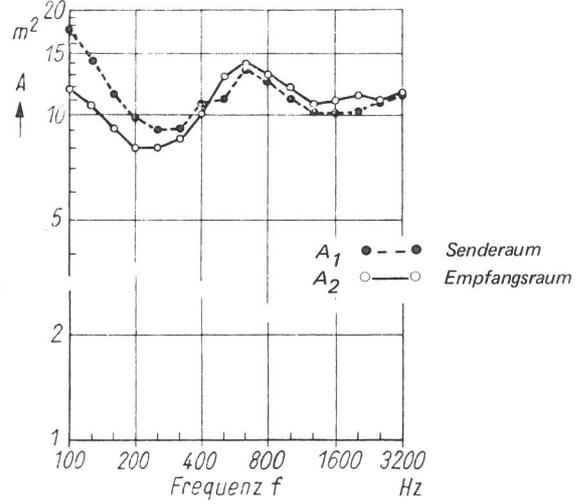


Bild 19 Äquivalente Absorptionsflächen A der Meßräume des BAM-Fensterprüfstandes nach dem Umbau

## 10. Die Anwendung von Prüfergebnissen in der planenden Bauakustik

In Abs. 5 war die Gleichung (64) für die resultierende Schalldämmung einer Wand mit einem eingebauten Fenster abgeleitet in Abhängigkeit von den Einzeldämm-Maßen  $R_O$  und  $R_F$  und dem Flächenverhältnis  $\frac{S_O}{S_F}$ . Hierbei war auf ein Diagramm hingewiesen, das für die Problemstellung der Bau- praxis entwickelt in DIN 4109 aufgenommen wurde und der Vollständigkeit halber in der Originaldar- stellung dem Bild 20 zu entnehmen ist, wobei die damals verwendeten Symbole (F anstelle S) und alten Indices für R beibehalten wurden.

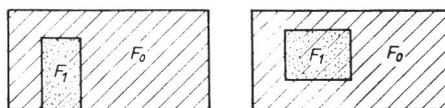
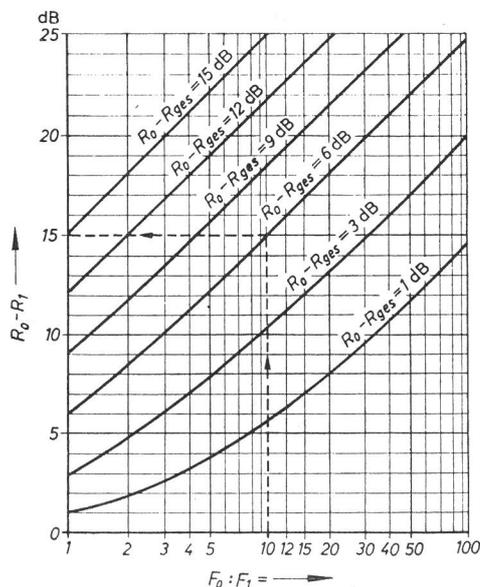
In der planenden Bauakustik interessiert primär nicht die resultierende Schalldämmung bei gege- benen Einzelgrößen, sondern folgende Fragestel- lung: Bei gegebener Dämmung  $R_O$  der Außenwand und einer aus Anforderungen zulässigen Minde- rung dieser Dämmung zur resultierenden Däm- mung  $R_{res}$  ist bei den vom Architekten bestimm- ten Fensterflächen die erforderliche Fensterdäm- mung  $R_F$  zu bestimmen. Diese kann aus der For- derung  $R_O - R_{res}$  bei gegebenem  $\frac{S_O}{S_F}$  als  $R_O - R_1$  im Diagramm abgelesen und als

$$R_F = R_O - [R_O - R_1]$$

bestimmt werden. In der Regel ist die Berechnung für die arithmetischen Mittelwerte von R nach DIN 52 210, Abs. 2.5.2. also  $\bar{R}_O$ ,  $\bar{R}_{res}$  und  $\bar{R}_F$  bzw.  $\bar{R}_1$  ausreichend. In DIN 4109, Bl. 5 ist hierzu ein Rechenbeispiel angegeben. Für genaue Rechnungen sei auf Gleichung (65) im Abschn. 5 verwiesen.

Bild 20

Diagramm zur Bestimmung erforderlicher Schalldämm-Maße von Fenstern und Türen bei gegebenem Flächenverhältnis und Schalldämm-Maß der Wände in Verbindung mit einer zulässigen Minderung der Wanddämmung zur Gesamtdämmung nach dem Einbau von Fenstern und Türen (Auszug aus DIN 4109, Blatt 5, Abschnitt 2.1.4, Bild 5)



- $F_0 : F_1$  Verhältnis der gesamten Wandfläche  $F_0$  einschließlich der Tür- oder Fensterfläche zur Tür- oder Fensterfläche  $F_1$
- $R_O - R_1$  Unterschied zwischen dem Schalldämm-Maß der Wand  $R_O$  und dem Schalldämm-Maß von Tür oder Fenster  $R_1$
- $R_O - R_{ges.}$  Unterschied zwischen dem Schalldämm-Maß der Wand allein  $R_O$  und dem Gesamtschalldämm-Maß  $R_{ges.}$  der Wand mit Tür oder Fenster.

$$R_{ges.} = R_O - 10 \lg \left[ 1 + \frac{F_1}{F_0} \cdot \left( 10^{\frac{R_O - R_1}{10}} - 1 \right) \right]$$

## 11. Die Ursachen möglicher Abweichungen $\Delta L < R$ bei der experimentellen Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes von Fenstern

Im Abschnitt 3 waren die theoretischen Voraussetzungen zur Anwendung des  $\Delta L$ -Verfahrens bei Laboratoriumsuntersuchungen und bei Baustellenmessungen abgeleitet und die prüftechnischen Vorteile erörtert, die besonders deutlich werden bei den Untersuchungen nach Abs. 8 über den Einfluß der akustischen Dichtung. Im Abschnitt 3 wurde außerdem diskutiert, daß in bestimmten Fällen, nämlich wenn  $R_O$  gegenüber  $R_F$  in gleicher Größenordnung liegt, also  $\tau_O \cdot S_O$  nicht vernachlässigbar klein wird gegenüber  $\tau_F \cdot S_F$ , sich zu niedrige  $\Delta L$ -Werte ergeben können. Hierbei wurde jedoch hingewiesen, daß auch in gleicher Größenordnung  $R_F$ -Werte zu niedrig werden und dann nach den Fehlerfunktionen in Abs. 7 zu korrigieren sind.

Bei laufenden Untersuchungen an Fenstern und Türen im Prüfstand wurden bei jeweils gleichen Aufbauparametern Prüfungen sowohl nach dem  $\Delta L$ -Verfahren als auch nach dem  $R_F$ -Verfahren durchgeführt. Vergleiche der Ergebnisse zeigten, daß in der Regel die Ergebnisse von  $\Delta L$ -Messungen etwas niedriger liegen als die von  $R_F$ -Messungen im Sinne von

$$\Delta L \leq R_F \quad (137)$$

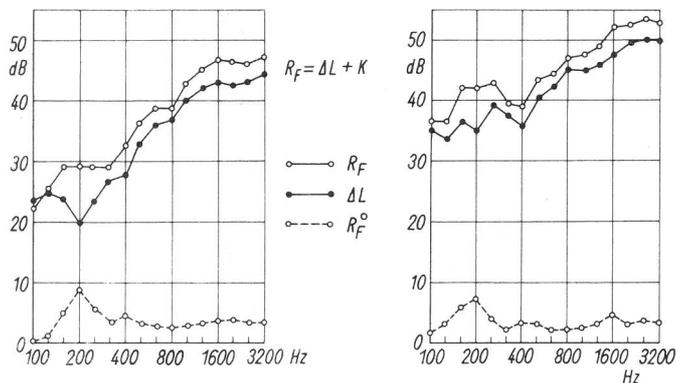


Bild 21  
Beispiele anomaler Differenzen von Schalldämm-Maßen, die mit dem  $R$ -Verfahren nach Gleichung 2 ( $\circ$ — $\circ$ ) und dem  $\Delta L$ -Verfahren nach Gleichung 34 ( $\bullet$ — $\bullet$ ) ermittelt wurden im Vergleich mit einer nach Gleichung 2 durch Ergänzungsmessungen bestimmten Luftschalldämmung des offenen Fensters ( $\circ$ — $\circ$ ) bei Bezug auf die lichte Fensteröffnung  $S_F$  (theoretisch 0 dB)

Diese Abweichungen sind u. a. von der Größe der Prüfflächen abhängig, und zwar werden sie mit kleiner werdender Prüffläche größer (ca. 1 bis 4 dB). Sie treten dabei auch dann auf, wenn die Dämmung der Prüfflächen in mittlerer Größenordnung liegt, d. h. die oben erwähnte Bedingung  $\tau_O \cdot S_O \ll \tau_F \cdot S_F$  erfüllt ist. In Bild 21 sind hierzu einige Beispiele zu entnehmen, die die Größenordnung dieser Abweichungen kennzeichnen und bis auf ein resonanzähnliches Phänomen, das noch erörtert wird, weitgehend frequenzunabhängig sind.

Zunächst sei festgestellt, daß nach Gleichung (137) die Ergebnisse aus  $\Delta L$ -Messungen stets im Bereich sicherer Beurteilungen liegen. In Gesprächen in bauakustischen FNM-Arbeitskreisen zu diesem Phänomen wurde die Vermutung geäußert, daß die Ursachen in einer nicht vollständigen Berücksichtigung der Kopplungsprobleme zwischen den 2 Hallräumen liegen könnten. Im folgenden Absatz wird nachgewiesen werden, daß dies bei den im BAM-Fensterprüfstand gegebenen Prüfbedingungen nicht die Ursache der festgestellten Abweichungen sein kann. In einem weiteren Absatz wird eine Hypothese entwickelt, die diese Abweichungen und ihre Gesetzmäßigkeiten erklärt und damit zu korrigieren gestattet.

### 11.1 Zum möglichen Fehler beim $\Delta L$ -Verfahren bei Anwendung der Theorie der gekoppelten Räume

Unter Bezug auf die Darstellung in Bild 7 und der Voraussetzung  $\tau_O \cdot S_O \ll \tau_F \cdot S_F$  (bzw.  $\tau_O = 0$ ) ergeben sich in Anlehnung an [47 S. 57] aus den Leistungsbilanzen im Send- und Empfangsraum für das offene und geschlossene Fenster in der üblichen Darstellung linearer Kopplungsgleichungen folgende Zusammenhänge:

#### a) Offenes Fenster

$$\frac{4P}{c} = A_1^0 \cdot E_1^0 - S_F \cdot E_2^0 \quad (138)$$

$$0 = -S_F \cdot E_1^{\circ} + A_2^{\circ} \cdot E_2^{\circ} \quad (139)$$

b) Geschlossenes Fenster

$$\frac{4P}{c} = A_1 \cdot E_1 - \tau_F \cdot S_F \cdot E_2 \quad (140)$$

$$0 = -\tau_F \cdot S_F \cdot E_1 + A_2 \cdot E_2 \quad (141)$$

Aus Gleichung (141) ergibt sich zunächst üblicherweise in Übereinstimmung mit der Lösung (73) in Abs. 6.11

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau_F} = 10 \lg \frac{E_1 \cdot S_F}{E_2 \cdot A_2} = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2}$$

$E_1^{\circ}$  aus Gleichung (138) ergibt eingesetzt in Gleichung (139) und aufgelöst nach  $E_2^{\circ}$

$$E_2^{\circ} = \frac{4P \cdot S_F}{c(A_1^{\circ} \cdot A_2^{\circ} - S_F^2)} \quad (142)$$

$E_1$  aus Gleichung (140) ergibt entsprechend eingesetzt in Gleichung (141) und aufgelöst nach  $E_2$

$$E_2 = \tau_F \frac{4P \cdot S_F}{c(A_1 \cdot A_2 - \tau_F^2 S_F^2)} \quad (143)$$

Die Gleichung (142) dividiert durch Gleichung (143) gibt den Quotienten der Energiedichten im Empfangsraum bei offenem  $E_2^{\circ}$  und geschlossenem Fenster  $E_2$

$$\frac{E_2^{\circ}}{E_2} = \frac{1}{\tau_F} \cdot \frac{A_1 \cdot A_2 - \tau_F^2 \cdot S_F^2}{A_1^{\circ} \cdot A_2^{\circ} - S_F^2} \quad (144)$$

Hierbei bedeuten aus dem Ansatz der Leistungsbilanzen für das offene Fenster (Gleichung 138 und 139):

$$A_1^{\circ} = A_{10} + S_F ; A_2^{\circ} = A_{20} + S_F$$

für das geschlossene Fenster (Gleichung 140 und 141):

$$A_1 = A_{10} + \tau_F \cdot S_F ; A_2 = A_{20} + \tau_F \cdot S_F$$

Dies eingesetzt in Gleichung (144) ergibt

$$\frac{E_2^{\circ}}{E_2} = \frac{1}{\tau_F} \cdot \frac{(A_{10} + \tau_F \cdot S_F) \cdot (A_{20} + \tau_F \cdot S_F) - \tau_F^2 S_F^2}{(A_{10} + S_F) \cdot (A_{20} + S_F) - S_F^2} \quad (145)$$

$$\frac{E_2^{\circ}}{E_2} = \frac{1}{\tau_F} \cdot \frac{A_{10} \cdot A_{20} + \tau_F S_F (A_{10} + A_{20})}{A_{10} \cdot A_{20} + S_F (A_{10} + A_{20})} \quad (146)$$

Anmerkung: Setzt man für das offene Fenster  $\tau_F = 1$  in Gleichung (146) ein, so wird - wie auch experimenteller erwartet -  $\Delta L = 10 \lg \frac{E_2^{\circ}}{E_2} = 0$  dB

In der Regel ist in Gleichung (146)  $\tau_F \cdot S_F (A_{10} + A_{20}) \ll A_{10} \cdot A_{20}$ . Damit vereinfacht sich Gleichung (146) und ergibt in sehr guter Näherung mit  $R_F = 10 \lg \frac{1}{\tau_F}$  sowie  $\Delta L = 10 \lg \frac{E_2^{\circ}}{E_2}$

$$R = \Delta L + 10 \lg \left( 1 + S_F \frac{A_{10} + A_{20}}{A_{10} \cdot A_{20}} \right) \quad (147)$$

Bezeichnet man

$$\frac{A_{10} \cdot A_{20}}{A_{10} + A_{20}} = A'$$

als resultierende Wirkung der reinen Absorptionsflächen im Sende- und Empfangsraum, so ist in Gleichung (147) der zweite Summand im Korrekturglied aufzufassen als Quotient aus der Prüffläche und einer Parallelwirkung  $A'$  dieser Absorptionsflächen (im Gegensatz zu einer Serienwirkung).

$$R = \Delta L + 10 \lg \left( 1 + \frac{S_F}{A'} \right) \quad (148)$$

Hierbei ist also  $A'$  stets kleiner als die kleinere Absorptionsfläche von  $A_{10}$  oder  $A_{20}$ .

Die Gleichung (147), die also exakt den Einfluß der Kopplungsphänomene auf die Differenz  $R - \Delta L$  erfaßt, ist im Prinzip bereits enthalten in der auf anderem Wege in Abschnitt 3 abgeleiteten Auswertgleichung für  $R$  aus  $\Delta L$ -Messungen.

Setzt man nämlich dort in Gleichung (33)

$$R = \Delta L + 10 \lg \frac{A_1^{\circ} \cdot A_2^{\circ}}{A_1 \cdot A_2}$$

wie oben ein für  $A_1^{\circ} = A_{10} + S_F$  und  $A_2^{\circ} = A_{20} + S_F$  sowie wegen  $\tau_F S_F \ll A_{10}$  bzw.  $\tau_F \cdot S_F \ll A_{20}$  für  $A_1 = A_{10}$  und  $A_2 = A_{20}$  so ergibt sich

$$R = \Delta L + 10 \lg \left( 1 + S_F \frac{A_{10} + A_{20}}{A_{10} \cdot A_{20}} + \frac{S_F^2}{A_{10} \cdot A_{20}} \right) \quad (149)$$

Im BAM-Prüfstand ist wegen  $S_F^2 \ll A_{10} \cdot A_{20}$  dann das Teilglied  $\frac{S_F^2}{A_{10} \cdot A_{20}}$  ebenfalls vernachlässigbar, womit die Gleichungen (147) und (149) übereinstimmen.

Das bedeutet also, daß praktisch auch in der Auswertgleichung für  $R$  aus  $\Delta L$ -Messungen die Kopplungsphänomene erfaßt sind.

Für den Spezialfall eines im Hinblick auf die äquivalenten Absorptionsflächen symmetrisch aufgebauten Prüfstandes vereinfacht sich Gleichung (147) mit  $A_{10} \approx A_{20} \approx A_0$  zu

$$R = \Delta L + 10 \lg \left( 1 + 2 \frac{S_F}{A_0} \right) \quad (147a)$$

sowie Gleichung (149) zu

$$R = \Delta L + 10 \lg \left( 1 + 2 \frac{S_F}{A_0} + \frac{S_F^2}{A_0^2} \right) \quad (149a)$$

Die Werte für R sind danach im BAM-Fensterprüfstand mit  $A_0 = 10 \text{ m}^2$  nach der Auswertgleichung (33) entsprechend Gleichung (149a) nur geringfügig höher als nach Gleichung (147a) mit folgenden Differenzen  $\Delta R$  in Abhängigkeit von  $S_F$

$S_F$ in $\text{m}^2$	0,5	1	2	4	5
$\Delta R$ in dB	0	0,05	0,15	0,4	0,5

Hieraus folgt, daß die bei Versuchen festgestellten oben erörterten Abweichungen zwischen R und  $\Delta L$ -Messungen nicht den Phänomenen gekoppelter Räume bei Schallanregung im stationären Zustand zuzuordnen sind.

Anmerkung: Bei Räumen mit extrem unterschiedlichen Absorptionsflächen von  $A_{10}$  und  $A_{20}$ , z.B.  $A_{10} \rightarrow \infty$ , entsprechend den Eigenschaften im freien Schallfeld, wird mit

$$\lim_{A_{10} \rightarrow \infty} S_F \frac{A_{10} + A_{20}}{A_{10} \cdot A_{20}} = \frac{S_F}{A_{20}}$$

aus Gleichung (147) und (149)

$$R = \Delta L + 10 \lg \left( 1 + \frac{S_F}{A_{20}} \right) \quad (150)$$

Diese Gleichung stimmt überein mit der in Abschn. 3 für die Schallanregung im freien Schallfeld abgeleitete Auswertgleichung (36) (bzw. 37)

$$R = \Delta L + 10 \lg \frac{A_2^0}{A_2}$$

wenn man wieder dort wie oben einsetzt

$$A_2^0 = A_{20} + S_F; \quad A_2 = A_{20},$$

wobei sich auch ergibt

$$R = \Delta L + 10 \lg \left( \frac{A_{20} + S_F}{A_{20}} \right) = \Delta L + 10 \lg \left( 1 + \frac{S_F}{A_{20}} \right)$$

11.2  $S_{F\text{eff}} \leq S_F$  als Deutung  $\Delta L \leq R$  und Ableitung der Ursachen.

Die Beobachtungen bei Vergleichen aus  $\Delta L$ - und R-Messungen mit Differenzen trotz berücksichtigter Korrekturglieder nach Gleichung (33) bzw. (34) in Abschn. 3 sowie nach Gleichung (147) in Abschn. 11.1 lassen sich kennzeichnen als

$$R = \Delta L + K_1 \quad (151)$$

mit  $K_1 \geq 0$  dB

Bei zusätzlichen Auswertungen mit geöffnetem Fenster ergab sich einschließlich Kontrollmes-

sungen von  $T_1^0$  und  $T_2^0$  sowie dem experimentellen Nachweis  $L_1^0 \hat{=} L_1$  als Dämmung der offenen Fensterfläche gegenüber dem theoretisch mit  $\tau_F = 1$  aus  $R = 10 \lg \frac{1}{\tau_F}$  mit  $R = 0$  dB erwarteten Wert das anomale Ergebnis

$$L_1 - L_2^0 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2} = K_2 \quad (152)$$

Anmerkung: Dieses anomale Ergebnis wäre auch nicht erklärbar bei Nichtberücksichtigung einer möglichen Änderung von  $A_2$  durch das Öffnen des Fensters. Der hierbei mögliche Fehler  $\Delta R$  war in Gleichung (87) in Abschn. 6.42 abgeleitet und würde bei  $A_2 \geq 10 \text{ m}^2$  und  $S_F \leq 2 \text{ m}^2$   $\Delta R \leq 0,8$  dB sein.

Der Vergleich von Ergebnissen nach Gleichung (151) und (152) zeigt nun, daß praktisch im gesamten Frequenzbereich wird

$$K_1 = K_2 = K$$

wie dies u.a. den Beispielen in Bild 21 zu entnehmen ist.

Dieser beobachtete Zusammenhang  $K_1 = K_2 = K$  ergibt sich auch theoretisch, wenn dem anomalen Ergebnis nach Gleichung (152) gegenübergestellt wird das Schalldämm-Maß bei geschlossenem Fenster

$$L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S_F}{A_2} = R_F$$

und hiervon Gleichung (152) subtrahiert wird mit dem Ergebnis

$$L_2^0 - L_2 = R_F - K$$

wobei mit  $\Delta L = L_2^0 - L_2$  wird

$$R_F = \Delta L + K$$

Die somit für die Anomalie (R einer Fläche aus Luft  $R \neq 0$  dB) ursächliche Gleichung (152) läßt sich auch schreiben

$$10 \lg \frac{A_2}{S_F} = L_1 - (L_2^0 + K) \quad (153)$$

Da  $L_1$  bei offenem und geschlossenem Fenster nachweisbar konstant bleibt und  $L_2$  beim geschlossenen Fenster offenbar exakt bestimmt wird, liegt also die Ursache der Abweichungen bei der Bestimmung von  $L_2^0$ , und zwar nach Gleichung (153) im Sinne eines um K zu groß gemessenen Wertes. Die Überprüfung der Einzelwerte von  $L_2^0$  bei den nach DIN 52 210 üblichen 6 verschiedenen Mikrofonstellungen ergab keine anomalen Abweichungen, wodurch als mögliche Ursache ausschied, daß einige  $L_2^0$ -Werte evtl. durch das direkte Schallfeld des Meßlautsprechers über die offene Fensterfläche bestimmt, also zu hoch sein könnten.

Anmerkung: Eine solche Möglichkeit wird auch ausgeschlossen bei Berücksichtigung des sog. kritischen Radius der Meßräume als dem Radius, bei dem die Energiedichte des direkten Schalles der des statistischen Schallfeldes gleich ist. (Siehe Ableitungen, Berechnungen, Zahlenbeispiele und Meßergebnisse in [17]).

Man kann nun das anomale Ergebnis der Gleichung (152) so deuten, daß dort die akustisch wirksame Fensterfläche - im folgenden als effektive Fensterfläche  $S_{F\text{eff}}$  bezeichnet - kleiner ist als die der geometrischen Abmessungen von  $S_F$  im Sinne einer lichten Öffnung. Dies würde bedeuten, daß der Gleichung (152) gegenübergestellt wird im Sinne des mit  $\tau = 1$  zu erwartenden Ergebnisses  $R = 0$  dB

$$L_1 - L_2^0 + 10 \lg \frac{S_{F\text{eff}}}{A_2} = 0 \quad (154)$$

Die Differenz von Gleichung (152) und Gleichung (154) ergibt als Grundlage für eine Deutung von K

$$K = 10 \lg \frac{S_F}{S_{F\text{eff}}} \quad (155)$$

Ordnet man zunächst ganz allgemein eine diese Verkleinerung von  $S_F$  auf  $S_{F\text{eff}}$  bewirkende Ursache einer begrenzten, in der Breite  $w$  konstanten Zone zu, die gleichmäßig den Gesamtumfang  $U$  des Fensters erfaßt, so müßte sich  $K$  in Abhängigkeit vom Quotienten  $\frac{U}{S_F}$  darstellen lassen, womit bereits erklärbar würde, daß - wie eingangs erwähnt -  $K$  mit kleiner werdender Fläche ansteigt.

Setzt man  $K$  für Fensterflächen  $S_F$  im Bereich  $\frac{\lambda}{2} < \sqrt{S_F}$  also für Frequenzen  $f > \frac{c}{2} \cdot (\sqrt{S_F})^{-1}$  als frequenzunabhängig an (also unter Ausschluß evtl. Wirkungen von Querresonanzen  $f_0$  zwischen den Leibungen z. B. bei  $\frac{\lambda}{2} = B$  (Breite) bzw.  $\frac{\lambda}{2} = H$  (Höhe)), so läßt sich der Ansatz nach Gleichung (155) mit Bild 22 wie folgt formulieren.

$$\frac{S_{F\text{eff}}}{S_F} = \frac{(B - 2w)(H - 2w)}{B \cdot H}$$

$$\frac{S_{F\text{eff}}}{S_F} = 1 - w \frac{U}{S_F} + \frac{4w^2}{S_F} \quad (156)$$

Da  $w \ll B$  bzw.  $H$  ist, kann das Glied  $\frac{4w^2}{S_F}$  in der logarithmischen Darstellung beim Einsetzen von Gleichung (156) in Gleichung (155) vernachlässigt werden, so daß sich schreiben läßt

$$K = 10 \lg \frac{S_F}{S_{F\text{eff}}} = -10 \lg (1 - w \frac{U}{S_F}) \quad (157)$$

Diese die Anomalie kennzeichnende Größe  $K$  könn-

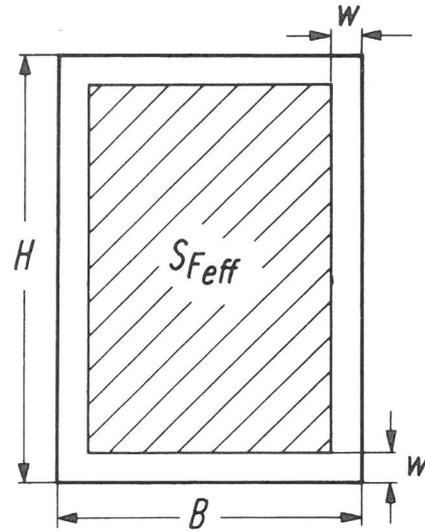


Bild 22

Prinzipbild zur Ableitung des Einflusses der effektiven Fensterfläche auf die Differenz von  $R$ - und  $\Delta L$ -Messungen bei Fenstern

te als  $K = f(\frac{U}{S_F})$  sofort dargestellt werden, wenn  $w$  bekannt wäre. Da mehrere Messungen von  $K$  bei verschiedenem  $S_F$  und  $U/S_F$  vorliegen, kann diese Größe  $w$  zunächst elementar auf experimentellem Wege bestimmt werden, indem Gleichung (157) nach  $w$  aufgelöst wird, wobei sich ergibt

$$w = \frac{S_F}{U} \left( 1 - 10^{-\frac{K}{10}} \right) \quad (158)$$

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen wurden zunächst 2 Beispiele extremer  $S_F$ - und  $\frac{U}{S_F}$ -Werte ausgewählt und hieraus  $w$  bestimmt.

Größe	Versuch a)	Versuch b)
$S_F$ in $m^2$	0,4	2
$U$ in $m$	2,6	5
$\frac{U}{S_F}$ in $m^{-1}$	6,67	2,5
$\bar{K}$ in dB	3	1
$w$ in $m$	0,077	0,0739

Der Mittelwert für  $w = 0,075$  wurde in Gleichung (157) eingesetzt und in Bild 23 als theoretischer Verlauf  $K = f(\frac{U}{S_F})$  dargestellt. In das gleiche Diagramm wurden die weiteren Versuchsergebnisse eingetragen. Die Übereinstimmung zwischen den Meßwerten und dem theoretischen Verlauf bestätigt weitgehend den formalen Ansatz. Bei praktischen Untersuchungen ist das Verhältnis  $\frac{U}{S_F}$  begrenzt in einem Bereich

$$2 \text{ m}^{-1} < \frac{U}{S_F} < 8 \text{ m}^{-1}$$

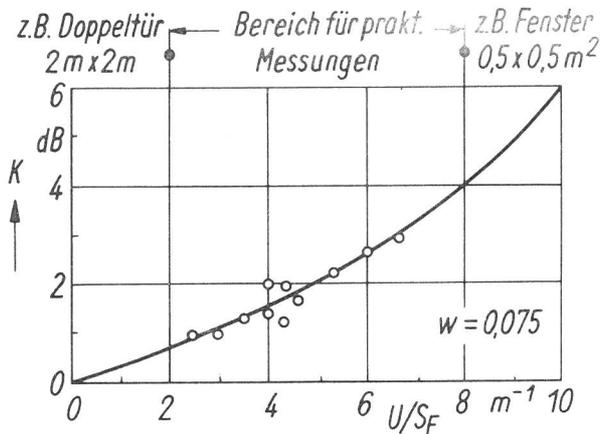


Bild 23  
Theoretischer Verlauf von  $K$  in Abhängigkeit vom Verhältnis Umfang zur Fläche im Vergleich mit Meßergebnissen aus den Mittelwerten der Schalldämm-Maße nach dem R- und  $\Delta$ -L-Verfahren

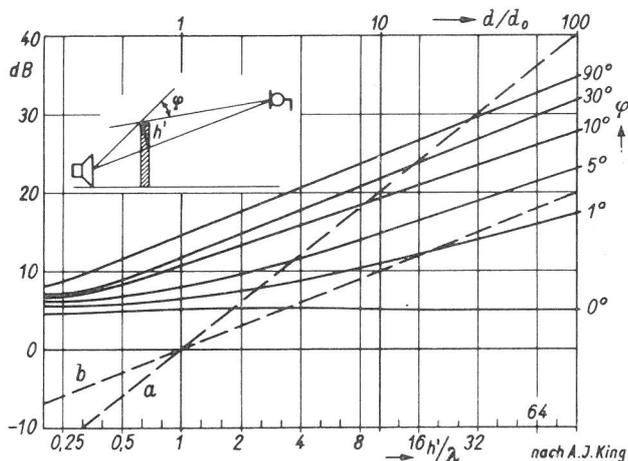


Bild 24  
Pegeldifferenz  $\Delta L$  im freien Schallfeld durch Schallbeugung in Abhängigkeit von  $h'/\lambda$  und  $\varphi$  ( $\circ$ — $\circ$ ) sowie durch Abstandsänderung in Abhängigkeit von  $d/d_0$  (---)

- a) für Punktschallquellen (z. B. Einzelfahrzeuge)
- b) für Linienschallquellen (z. B. Fahrzeugkette hoher Verkehrsdichte)

Worin liegt nun die Ursache dieser Minderung zur effektiven Fensterfläche  $S_{\text{eff}}$  beim offenen Fenster?

Spekulativ könnte man als physikalische Ursache zunächst Beugungsphänomene vermuten. Über Beugungsphänomene liegen bisher nur Untersuchungen im freien Schallfeld vor, also gewissermaßen für den Fall  $d$  in Tabelle 1 des Abschn. 2, und zwar von S.W.Redfearn [56], als Diagramm dargestellt von A. J. King [57] und in zahlreichen Versuchen bestätigt von Maekawa [58] sowie mit eigenen Untersuchungen in [22]. Die Beugungswirkungen nach A. J. King sind in Bild 24 dargestellt als Pegelminderung in Abhängigkeit von  $h'/\lambda$  und einem Winkelparameter, der den Winkel  $\varphi$  eines "Schallschattens" darstellt. Mit  $\lambda = \frac{c}{f}$  kann dabei die Abszisse als normierte Frequenz aufgefaßt werden. Wird hierbei der Winkel  $\varphi = 0^\circ$ , d. h. liegen Schallquelle, Kante der Wand und Mikrofon in einer Ebene, so ergibt sich eine frequenzunabhängige Pegelminderung von ca. 5 dB, die für eine hier nicht entnehmbare Zone bei weiterer Parallelverschiebung von Schallquelle und Mikrofon nach oben gegen 0 dB reduziert

wird. Quantitative Ergebnisse sind all diesen Darstellungen selbst im freien Schallfeld nicht entnehmbar. In statistischen Schallfeldern liegen hierzu bisher überhaupt keine Untersuchungen vor.

Im folgenden sei versucht, die Vorgänge an den Begrenzungen eines offenen Fensters exakt zu erfassen und in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel  $\vartheta$  darstellen. Durch Integration der Wirkungen über alle Winkel  $\vartheta$  seien abschließend die die Anomalie bewirkenden Phänomene im statistischen Schallfeld beschrieben.

In Bild 25 sei vereinfachend eine quadratische Fensteröffnung der Kantenlänge  $C$  mit einer Leibungstiefe  $q$  angenommen. Erfolgt die Änderung des Einfallswinkels  $\vartheta$  zunächst in einer Ebene normal zur Fensterdiagonalen, so ergibt sich die effektive Fensteröffnung zu

$$S'_{\text{F eff}} = \left( C - q \frac{\tan \vartheta}{\sqrt{2}} \right)^2 \cos \vartheta \quad (159)$$

und mit  $S'_F = C^2 \cdot \cos \vartheta$  der interessierende Flächenquotient

$$\frac{S'_{\text{F eff}}}{S'_F} = \left( 1 - \sqrt{2} \frac{q}{C} \tan \vartheta + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C^2} \tan^2 \vartheta \right) \quad (160)$$

sowie nach der Definitionsgleichung (155)

$$\text{mit } C^2 = S_F \quad \text{und} \quad \frac{1}{C} = \frac{U}{4 S_F}$$

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{\sqrt{2}}{4} \frac{q}{S_F} \tan \vartheta + \frac{1}{2} \frac{q^2}{S_F^2} \tan^2 \vartheta \right) \quad (161)$$

Mit dieser Gleichung läßt sich also beim jeweils gegebenen Einfallswinkel  $\vartheta$  die Größe  $K = R - \Delta L$  ermitteln als Folge des Einflusses der Leibungstiefe  $q$  bei der Schalltransmission durch die offene Fensterfläche. Diese Gleichung gilt, wie sich ableiten läßt, auch in guter Näherung bei unterschied-

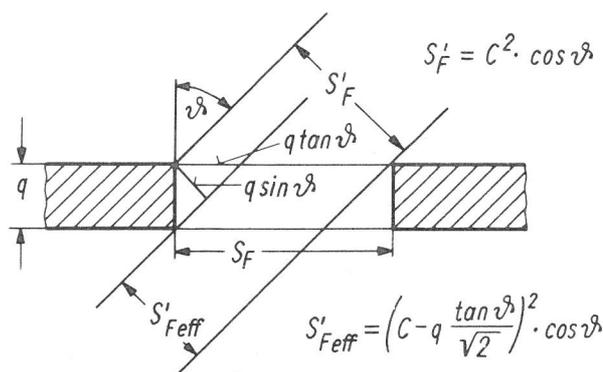


Bild 25  
Prinzipbild zur Ableitung des Einflusses der Leibungstiefe  $q$  auf die Verringerung der Öffnungsfläche  $S'_F$  zur effektiven Öffnungsfläche  $S'_{\text{F eff}}$  bei schrägem Schalleinfall mit dem Einfallswinkel sowie auf die Größe  $K$  nach Gleichung 162 und 163

lichem Kantenverhältnis im Gebiet des für praktische Untersuchungen oben abgegrenzten  $\frac{U}{S_F}$ -Bereiches.

Bei dem auch für eine erste Beurteilung im statistischen Schallfeld [s. Abs. 2] wichtigen Hauptwinkel  $\vartheta = 45^\circ$  ergibt sich aus Gleichung (161) mit  $\tan \frac{\pi}{4} = 1$

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{\sqrt{2}}{4} q \frac{U}{S_F} + \frac{1}{2} \frac{q^2}{S_F} \right) \quad (162)$$

sowie bei üblichen Fensterabmessungen wegen  $q^2 \ll S_F$  als Näherung

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{\sqrt{2}}{4} q \frac{U}{S_F} \right) \quad (163)$$

Diese Lösung der Gleichung (163) entspricht der Gleichung (157) mit

$$w = \frac{\sqrt{2}}{4} q = 0,354 q \quad (164)$$

Erfolgt gegenüber den bisher abgeleiteten Gleichungen die Änderung des Einfallswinkels  $\vartheta$  in einer Ebene normal zu den Hauptachsen des Fensters, so ergibt sich anstelle der Gleichung (161) über den Ansatz

$$S_{F\text{eff}}^1 = (C^2 - C q \tan \vartheta) \cos \vartheta \quad (159a)$$

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{1}{4} q \frac{U}{S_F} \tan \vartheta \right) \quad (165)$$

sowie für den Hauptwinkel  $\vartheta = 45^\circ$

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{1}{4} q \frac{U}{S_F} \right) \quad (166)$$

**Anmerkung:** Für einen ersten Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen im statistischen Schallfeld im Prüfstand (Bild 23) wird man den Numerus der Logarithmen in Gleichung (163) und (166) mitteln, da beide Gleichungen jeweils nur Winkeländerungen in extremen Lagen, nämlich in Ebenen normal zur Hauptdiagonalen bzw. zur Hauptachse der Fensterfläche erfassen. Hierbei ergibt sich

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{\sqrt{2} + 1}{8} q \frac{U}{S_F} \right) \quad (167)$$

wobei sich der Wert für  $w$  aus Gleichung (164) reduziert auf

$$w = \frac{\sqrt{2} + 1}{8} q = 0,302 q \quad (164a)$$

Bei üblichen Prüfungen von Fenstern in der BAM erfolgt der Einbau in einem Rahmen aus einer Vollziegel-

wand mit  $q = 0,24$  m, so daß sich aus Gleichung (164a) ergibt

$$w = 0,073 \text{ m}$$

Der oben experimentell aus Gleichung (158) gefundene Wert weicht nur um 2,7 % von diesem errechneten Wert ab.

Will man die Größe von  $K$  aus dem oben in Gleichung (159) bzw. (160) angegebenen Ansatz exakt im statistischen Schallfeld bestimmen, so ist im Prinzip die Wirkung von  $K$  über alle Winkel  $\vartheta$  zu integrieren. Nimmt man als den wahrscheinlichsten Fall einer idealen statistischen Energieverteilung nach L. Cremer [47] an, daß  $E$  an allen Raumpunkten gleich groß und außerdem auf Wellen aller Raumrichtungen gleichmäßig verteilt ist, so verhält sich nach Bild 26 der auf den Winkelbereich  $d\vartheta$  entfallende Anteil  $dE$  zur Gesamtenergie  $E$  wie die von  $d\vartheta$  gebildete Kugelzone zur Gesamt-Kugeloberfläche, also

$$\frac{dE}{E} = \frac{2 \pi \sin \vartheta d\vartheta}{4 \pi} = \frac{1}{2} \sin \vartheta d\vartheta \quad (168)$$

Mit  $J = E \cdot c$ , also  $dJ = cdE$  ergibt sich für die aus diesem Winkelbereich auf  $S_F$  auffallende Schalleistung

$$c S_F \cos \vartheta d\vartheta \quad (169)$$

also in Verbindung mit Gleichung (168)

$$\frac{E c}{2} S_F \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta \quad (170)$$

sowie über alle  $\vartheta$  von 0 bis  $\pi/2$  integriert als gesamte auf  $S_F$  auffallende Schalleistung  $P_1$

$$P_1 = \frac{E_1 c}{2} S_F \int_0^{\pi/2} \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta \quad (171)$$

also

$$P_1 = \frac{E_1 c}{4} S_F \quad (172)$$

Diese Lösung stimmt erwartungsgemäß im Prinzip überein mit Gleichung (41).

Im Ansatz (170) ist jedoch anstelle  $S_F \cdot \cos \vartheta$  die Gleichung (159) einzusetzen

$$\frac{E c}{2} \left( C - q \frac{\tan \vartheta}{\sqrt{2}} \right)^2 \cos \vartheta \sin \vartheta d\vartheta \quad (173)$$

Die gesamte auf die effektive Fläche auffallende Schalleistung  $P_1$  erhält man wieder durch Integration über alle möglichen Winkel  $\vartheta$ , wobei jetzt jedoch im Gegensatz zu Gleichung (171) als obere Grenze der maximal mögliche direkte Einfallswinkel, hier  $\vartheta_{\text{max}} = \arctan \sqrt{2} \frac{C}{q}$  einzusetzen ist, also bereits etwas umgeformt

$$P_1' = \frac{E_1 c}{2} S_F \int_0^{\arctan \sqrt{2} \frac{C}{q}} (\cos \psi \sin \psi - \sqrt{2} \frac{q}{C} \sin^2 \psi + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C^2} \frac{\sin^3 \psi}{\cos \psi}) d\psi \quad (174)$$

$$P_1' = \frac{E_1 c}{4} S_F \left[ \sin^2 \psi - \sqrt{2} \frac{q}{C} \left( \psi - \frac{\sin 2\psi}{2} \right) - \frac{1}{2} \frac{q^2}{C^2} (\sin^2 \psi + \ln|1 - \sin^2 \psi|) \right] \Big|_0^{\arctan \sqrt{2} \frac{C}{q}} \quad (175)$$

$$\text{Mit } \sin^2 \psi = \frac{\tan^2 \psi}{1 + \tan^2 \psi} \quad ; \quad \frac{\sin 2\psi}{2} = \frac{\tan \psi}{1 + \tan^2 \psi}$$

$$\text{und } 1 - \sin^2 \psi = \frac{1}{1 + \tan^2 \psi}$$

ergibt sich dann für das bestimmte Integral

$$P_1' = \frac{E_1 c}{4} S_F \left( 1 - \sqrt{2} \frac{q}{C} \arctan \sqrt{2} \frac{C}{q} + \frac{1}{2} \frac{q^2}{C^2} \ln|1 + 2 \frac{C^2}{q^2}| \right) \quad (176)$$

Die Lösungsgleichungen (172) und (176) ergeben wiederum K als  $K = 10 \lg \frac{P_1}{P_1'}$ , jetzt jedoch im Gegensatz zu Gleichung (162) als Lösung im ideal statistischen Schallfeld, die auch hier zugleich auf den Quotienten  $\frac{U}{S_F}$  umschrieben sei

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{\sqrt{2}}{4} \frac{q}{S_F} \arctan \sqrt{\frac{2 S_F}{q^2}} + \frac{q^2}{2 S_F} \ln|1 + \frac{2 S_F}{q^2}| \right) \quad (177)$$

Diese Lösung ist noch nicht vollständig, weil sie im Ansatz allein  $\psi$ -Änderungen in Ebenen normal zu den Hauptdiagonalen von  $S_F$  erfaßt, d.h. wieder wie oben durch den Ansatz von  $\psi$ -Änderungen in Ebenen normal zu den Hauptachsen von  $S_F$  zu ergänzen ist. Anstelle von Gleichung (174) ergibt sich mit  $\psi_{\max} = \arctan \frac{C}{q}$  als oberer Integrationsgrenze über den Ansatz von  $S_{F\text{eff}}$  in Gleichung (159a)

$$P_1' = \frac{E_1 c}{2} S_F \int_0^{\arctan \frac{C}{q}} \left( 1 - \frac{q}{C} \tan \psi \right) \cos \psi \sin \psi d\psi \quad (178)$$

sowie als Lösung für K nach Umformen auf den Quotienten  $U/S_F$

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{1}{4} \frac{q}{S_F} \arctan \sqrt{\frac{S_F}{2}} \right) \quad (179)$$

Bildet man ähnlich wie bei Gleichung (167) den Mittelwert der Gleichungen (177) und (179) und grenzt man den Anwendungsbereich auf  $0 < \frac{q}{C} < 1$  ein, so ergibt sich als Näherung

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{q}{3} \frac{U}{S_F} + \frac{q^2}{2 S_F} \right) \quad (180)$$

sowie bei üblichen Fensterabmessungen wegen  $q^2 \ll S_F$

$$K = -10 \lg \left( 1 - \frac{q}{3} \frac{U}{S_F} \right) \quad (181)$$

Anmerkung: Diese Lösung (181) entspricht wieder der Gleichung (157) mit

$$w = \frac{1}{3} q = 0,33 q$$

Setzt man wie bei Gleichung (164a) wieder für  $q = 0,24$  m ein, so ergibt sich

$$w = 0,08 \text{ m}$$

Der oben experimentell aus Gleichung (158) gefundene Wert weicht nur um  $-6,25\%$  von diesem errechneten Wert ab.

Die Darstellung einer Korrekturfunktion  $K = f\left(\frac{U}{S}\right)$  in Bild 23 ist also letztthin bestimmt durch eine konstante, sich allenfalls geringfügig ändernde Leibungstiefe  $q$  bei Prüfungen von Fenstern unterschiedlicher Abmessungen.

In prinzipiell gleicher Art lassen sich gegenüber diesen speziellen Ansätzen bei quadratischen Öffnungen die Lösungen bei jeweils anderem Kantenverhältnis  $\varepsilon$  der Öffnungsflächen bestimmen.

Für den Quotienten  $U/S_F$  läßt sich ableiten

$$\frac{U}{S_F} \approx \frac{2}{\sqrt{S_F}} \left( \sqrt{\varepsilon} + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \right) \quad (182)$$

Anmerkung: Begrenzt man das Kantenverhältnis  $1 < \varepsilon < 4$ , so ändert sich - bezogen auf die gleiche Flächengröße - der  $U/S_F$  bestimmende Faktor nur um  $1 : 1,25$  aus

$$2 < \left( \sqrt{\varepsilon} + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \right) < 2,5$$

Es läßt sich zeigen, daß bei dieser Begrenzung von  $\varepsilon$  mit der Zusatzbedingung  $\frac{q}{B} < 1$  ( $B =$  Breite im Sinne der kleineren Kantenlänge der Öffnungsfläche) die Gleichung (180) weiterhin als Näherung gültig ist. Für die praktische Anwendung wird Gleichung (180) mit Gleichung (182) als  $K = f(q, S_F, \varepsilon)$  umgeschrieben zu

$$K = -10 \lg \left[ 1 - \frac{2}{3} \frac{q}{\sqrt{S_F}} \left( \sqrt{\varepsilon} + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \right) + \frac{q^2}{2 S_F} \right] \quad (183)$$

Diese Größe K ist abschließend in Bild 27 dargestellt als  $K = f(q)$  mit  $S_F$  als 1. Parameter und  $\varepsilon$  als 2. Parameter für die den obigen Bedingungen entsprechenden Bereiche

- $0,05 \text{ m} < q < 1 \text{ m}$
- $0,5 \text{ m}^2 < S_F < 4 \text{ m}^2$
- $1 < \varepsilon < 4$

Anmerkung: Der Bereich a) erfaßt die üblichen Wanddicken von der Dicke einer einfachen Plattenwand bis zu großen Leibungstiefen, wie sie z.B. in Blumenfenstern sowie bei Türen in Schrankwänden auftreten können.

Der Bereich b) erfaßt Flächen extrem kleiner Fensterkonstruktionen ( $0,5 \text{ m}^2$ ) bis zu Flächen von Doppeltüren ( $4 \text{ m}^2$ ). Der Bereich c) erfaßt die Seitenverhältnisse  $\epsilon = 1$  bis 4. Die neben dem Diagramm in Bild 27 für konstante Flächen  $S_F$  dargestellten Seitenverhältnisse lassen erkennen, daß der überwiegende Bereich von Prüfgegenständen in der Praxis zwischen  $\epsilon = 1$  bis 2 liegt, also mit Wirkungsänderungen im Verlauf von  $K$  gegenüber  $\epsilon = 1$ , die erheblich geringer sind als der Einfluß der Flächenchengröße  $S_F$ .

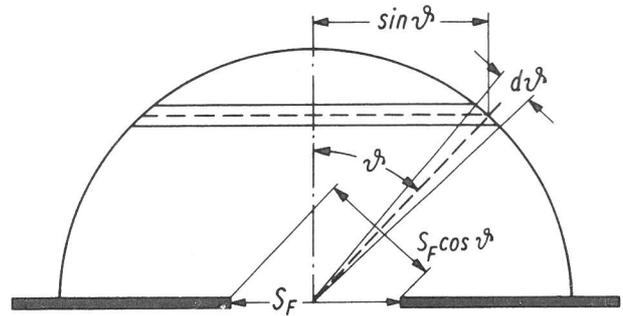


Bild 26  
Prinzipbild zur Ermittlung von  $K$  nach Gleichung 180 und 183 bei allseitig gleichmäßiger Verteilung des einfallenden Schalles

Die Überlegungen dieses Abschnittes sollten die Größenordnung und Ursachen möglicher Differenzen zwischen  $R$ - und  $\Delta L$ -Messungen kennzeichnen. Die Kenntnis solcher Abweichungen hat praktische Bedeutung, wenn exakte Ergebnisse aus Laboratoriumsmessungen für das Schalldämmmaß  $R$  verglichen werden müssen mit Baustellenuntersuchungen an den gleichen Objekttypen, bei denen der Einbaubedingungen wegen nur Versuche nach dem  $\Delta L$ -Verfahren möglich sind. Sind dabei die Abweichungen größer als die nach Bild 27, so liegen in der Regel einbaubedingte Nebenwege (siehe Abschnitt 8) vor, die dann jeweils näher zu untersuchen sind.

Bei den Ableitungen in Abschnitt 11.2 wurden die Einflüsse der Änderungen der äquivalenten Absorptionsflächen  $A$  der Meßräume vernachlässigt.

Allgemein, d. h. bei nicht vernachlässigbaren  $A$ -Änderungen der Meßräume gilt abschließend gemäß Gleichung (148) und (180) zusammenfassend

$$R = \Delta L + 10 \lg \left( \frac{S_F}{A'} + 1 \right) - 10 \lg \left( 1 - \frac{q}{3} \frac{U}{S_F} + \frac{q^2}{2 S_F} \right) \quad (184)$$

und damit bei Ausschluß extremer Bedingungen näherungsweise

$$R = \Delta L + 10 \lg \frac{T_2}{T_2^0} - 10 \lg \left( 1 - \frac{q}{3} \frac{U}{S_F} \right) \quad (185)$$

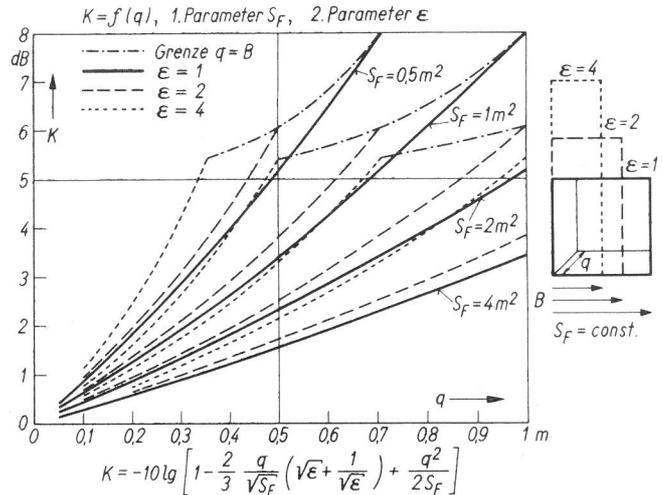


Bild 27  
Nach Gleichung 183 berechnete Korrektur  $K$  von Schalldämm-Maßen an Fenstern (u. Türen) nach der Einraummethode ( $\Delta L$ ) gegenüber Ergebnissen nach der Zweiraummethode ( $R_F$ ) als  $K = R_F - \Delta L$  in Abhängigkeit von der Leibungstiefe  $q$  (Einfluß beim offenen Fenster), der Prüffläche  $S_F$  und dem Seitenverhältnis  $\epsilon$  für Prüfungen zwischen zwei statistischen Schallfeldern  
(Rechts: Darstellung  $\epsilon = 1$  bis 4 für  $S_F = \text{const.}$ )

wobei in der Regel bei großen Prüfflächen das erste, bei kleinen das zweite Korrekturglied überwiegt. Für die Bestimmung des 2. Korrekturgliedes läßt sich auch das Diagramm in Bild 27 anwenden.

Aus einer Übersicht zur Erkenntnisentwicklung im Problembereich der Luftschalldämmung von Bauteilen und zu den grundsätzlich möglichen Kombinationen von Schallfeldarten (gerichtetes oder statistisches Schallfeld) vor und hinter einem Prüfgegenstand werden die besonderen, zum Teil offenen Fragen zum Schallschutz von Bauteilen in Außenwänden (Fenster, Türen, Fassaden) erörtert und hierbei zunächst die unterschiedlichen Wirkungen des Schalleinfallswinkels von Außenschall auf das Luftschalldämm-Maß und den Luftschallschutz abgeleitet. Während bei schrägem gegenüber senkrechtem Schalleinfall das winkelabhängige Luftschalldämm-Maß  $R_{\vartheta}$  im Sinne einer Größe aus auffallender zu durchgelassener Schalleistung um  $\Delta R_{\vartheta} = 20 \lg \cos \vartheta$  reduziert wird, erhöht sich - bei zunächst winkelunabhängig angenommenem  $R$  (z. B.  $R = 0$  dB eines offenen Fensters) - der Schallschutz im Sinne einer Gesamtwirkungskette vom Ort einer äußeren Störschallquelle der abgestrahlten Schalleistung  $L_P$  bis zum Ort des Empfangsraumpegels  $L_2$ , ausgedrückt durch eine neue Größe  $D_P = L_P - L_2$ , um eine Größe  $K(\vartheta)$ . Diese Funktion  $K(\vartheta)$  wird für drei charakteristische Bahnbewegungen einer Schallquelle vor einem Fenster (Halbkreisbahn, sowie gerade Bahn parallel und senkrecht zum Fenster im Spurabstand  $r$ ) abgeleitet, dargestellt und in die Hauptgleichungen eingefügt. Durch einen qualitativ und quantitativ nachgewiesenen Kompensationseffekt zwischen  $\Delta R_{\vartheta}$  und  $K(\vartheta)$  ist der Gesamtschallschutz eines Fensters weniger winkelabhängig und - im Gegensatz zur Reduktion des Schalldämm-Maßes - bei parallel zum Fenster erfolgenden Bahnbewegungen mit wachsendem Einfallswinkel sogar erhöht. Aus dem Vergleich mit dem entsprechenden Verhalten von Fenstern zwischen statistischen Schallfeldern wird für Baumaßnahmen die Zwei-Hallraum-Methode vorgeschlagen. Im gleichen Abschnitt werden ergänzend mit einigen Ableitungen die Bedeutung des Schalleistungspegels  $L_P$  in der Bauakustik zusammen mit einfachen Auswertgleichungen zu seiner Bestimmung erörtert.

Hieraus werden zulässige Höchstwerte für den Schalleistungspegel von Störschallquellen in Gebäuden abgeleitet, die bei der Anwendung von Bau-

teilen mit eingehaltenen Sollkurvenbedingungen für das Schalldämm-Maß  $R$  in Nachbarwohnungen hinreichend niedrige Geräusche ( $L_2 \leq 30$  dB(A), entsprechend DIN-Forderung) gewährleisten. Wegen des inversen Verlaufes der  $R$ -Sollkurve zur dB(A)-Bewertungskurve ist dabei der Schalleistungspegel  $L_P$  frequenzbewertet in dB(C) zu bestimmen. Das Ergebnis dieser Ergänzung kann u. a. zur Grundlage einer Typenprüfung und -bewertung aller Störschallquellen der Haustechnik werden.

Aus abgeleiteten Zusammenhängen zwischen  $R$ -Messungen (normierte Differenz von Schallpegeln vor und hinter dem Fenster) und  $\Delta L$ -Messungen (bei konstanter Schallquelle: Differenz von Schallpegeln hinter dem offenen und geschlossenen Fenster) werden dann die Korrekturen bzw. die für Meßräume einzuhaltenden Bedingungen erörtert, bei denen die einfacheren  $\Delta L$ -Messungen repräsentative Ergebnisse für  $R$ -Diagramme darstellen.

Da mit der klassischen Auswertgleichung  $R = D + 10 \lg S/A$  nach DIN 51 210 bzw. ISO-R 140 bei Fenstern nur exakte Ergebnisse im Bereich etwa 15 dB  $< \bar{R}_F < 35$  dB zu erwarten sind, d. h. also insbesondere bei der Prüfung hochschalldämmender Fenster, bei denen sich das Fensterdämm-Maß dem der Einbauwand nähert, unsichere Prüfergebnisse möglich sind, werden zunächst die allgemeinen Zusammenhänge zur resultierenden Schalldämmung  $R_{res}$  von  $n$ -Teilflächen der Größen  $S_n$  mit unterschiedlichen Einzeldämm-Maßen  $R_n$  abgeleitet mit dem Ergebnis

$$R_{res} = -10 \lg \sum_1^n \frac{S_n}{S} \cdot 10^{-R_n/10}$$

Mit dieser Schlüsselgleichung und den Definitionsgleichungen für den Ansatz werden alle Teil- bzw. Spezialprobleme bei der Bestimmung von Luftschalldämm-Maßen durch Einsetzen verschiedener Grenzbedingungen ableitbar u. a. auch die früher bereits anders abgeleitete resultierende Dämmung bei 2 Teilflächen unterschiedlicher Transmission. Hieraus werden dann auch exakte Auswertgleichungen für die kritischen Bereiche  $R_F < 15$  dB und  $R_F > 35$  dB entwickelt.

Wegen der für praktische Untersuchungen unhandlichen Auswertgleichungen werden weiter Korrekturfunktionen  $\Delta R_F$  abgeleitet und dargestellt, mit denen üblich ausgewertete Schalldämm-Maße  $R'_F$  als

$$R_F = R'_F + \Delta R_F$$

bestimmbar werden, und zwar für den Bereich  $R_F < 15$  dB als

$$[\Delta R_F] = f(S_F, A_2, R'_F)$$

sowie für den Bereich  $R_F > 35$  dB als

$$\Delta R_F = f(S_0, S_F, R_0, R_{res})$$

mit Ergänzungen über den Gültigkeits- bzw. Anwendungsbereich. Diesen Fehlerfunktionen sind u. a. auch die Soll-Eigenschaften von Prüfräumen zur Erweiterung der Meßgrenzen entnehmbar.

Es werden weiter die theoretischen und experimentellen Zusammenhänge zwischen der Dämmung der Verglasung und der der Fensterkonstruktion mit dem Einfluß akustischer Wirkungen der Schließfugen behandelt und geeignete Normierungen vorgeschlagen, mit denen Dichtungswirkungen im Sinne einer die Konstruktion einer Schließfuge kennzeichnenden Größe bestimmbar, aus den Zusammenhängen von Einzel- und Summenwirkungen prüfbar sowie für die planende Bauakustik anwendbar sind. Bei Anwendung des  $\Delta L$ -Verfahrens lassen sich dabei einfache Auswertgleichungen für alle interessierenden Größen wie  $R_F$  (Dämmung der Verglasung),  $R_{Fres}$  (Dämmung der Fensterkonstruktion),  $R_{S,F}$  (auf die Fensterfläche bezogene Schlitzdämmung der Schließfuge),  $R_{Sn}$  (normierte Schlitzdämmung) und  $\Delta R_{Fres}$  (Differenz der Dämmung von der Verglasung und der Fensterkonstruktion) ableiten. All diese auch über die obige Schlüsselgleichung abgeleiteten Größen werden danach bei einem Fenstereinbau mit nur 3 Schallpegelmeßreihen 1. beim offenen, 2. beim normal geschlossenen, 3. beim zusätzlich im Schließfugenbereich gedichteten Fenster elementar bestimmbar. Als wichtiges Randproblem wird eine Formel abgeleitet, mit der eine durch  $R_{Sn}$  gekennzeichnete Konstruktion einer Schließfuge akustisch optimal an die Dämmung einer Fensterverglasung bei einer zugelassenen Minderung von 1 dB angepaßt ist. Diese Anpassungsformel

$$R_{Sn} \geq R_F + 10 \lg \frac{4l}{S_F}$$

( $S_F$  Fensterfläche in  $m^2$ ;  $l$  Länge der Schließfuge in m)

wird die bei laufenden Untersuchungen an Fensterkonstruktionen häufig beobachteten Fehlanspassungen im Sinne nicht ausgenutzter Verglasungsdämmung reduzieren helfen. Diese Angaben sind noch ergänzt durch theoretisch berech-

nete Dämmungen einfacher Gebilde von "Dichtungen" (Fugen und Löcher) insbesondere im Hinblick auf den Zusammenhang von Abmessungen und Frequenzverlauf der Schalldämmung.

Nach Erörterung der Umbau-Maßnahmen im BAM-Fensterprüfstand zur Erweiterung des Meßbereiches mit Angaben über die Endigenschaften sowie Hinweisen zur Anwendung von Ergebnissen akustischer Fensterprüfungen für die planende Bauakustik werden abschließend die Ursachen von kleinen Abweichungen diskutiert, die trotz Einhaltung aller Bedingungen und Berücksichtigung von Korrekturen zwischen  $\Delta L$ -Messungen und  $R_F$ -Messungen zunächst bei ausgeführten Prüfungen an gleichen Objekten aufgetreten waren (mittlere Abweichung 2,5 dB). Mit Ableitungen aus der Theorie gekoppelter Räume wird nachgewiesen, daß die Ursachen hierbei nicht Kopplungsphänomenen zuzuordnen waren.

Diese Differenzen werden zunächst einer Verkleinerung der geometrischen Abmessungen einer offenen Fensterfläche  $S_F$  zu einer akustisch wirksamen Fensterfläche  $S_{Feff}$  zugeordnet. Die hierzu zunächst formal abgeleiteten und mit dem Quotienten Fensterumfang  $U$  zur Fensterfläche  $S_F$  als Diagramm

$$K = -10 \lg \left[ 1 - w \frac{U}{S_F} \right]$$

dargestellten Gesetzmäßigkeiten erklären u. a. die für das offene Fenster vom theoretisch erwarteten Wert  $R = 0$  dB abweichenden Schalldämm-Maße, deren Größen - wie ebenfalls abgeleitet wird - identisch sind mit den kritischen Differenzen  $K = R_F - \Delta L$ . Der theoretische Verlauf  $K = f\left(\frac{U}{S_F}\right)$  wird durch mehrere Versuche unterschiedlicher  $K$ - sowie  $U/S_F$ -Werte bestätigt. Schließlich wird nachgewiesen, daß die Ursache dieser Gesetzmäßigkeiten, insbesondere die Größe  $w$  (Rahmenbreite zwischen  $S_F$  und  $S_{Feff}$ ) den endlichen, gegenüber den Werten von  $S_F$  bei schrägem Schalleinfall nicht mehr vernachlässigbaren Leibungstiefen  $q$  zuzuordnen ist, deren Einfluß sowohl bei der Theorie gekoppelter Räume als auch bei allen Ansätzen und Ableitungen der entsprechenden bauakustischen Probleme mit gerichteter oder statistischer Schallanregung bisher unberücksichtigt blieben. Diese Korrektur  $K$  wird in Abhängigkeit von der Leibungstiefe sowie der Größe und dem Seitenverhältnis der Prüffläche dargestellt. Abschließend werden die Korrekturen für  $\Delta L$ -Messungen auch für allgemeine Prüfbedingungen (beliebige Schallabsorption der Prüfräume) zusammengefaßt als

$$R = \Delta L + K_1(S_F, A') + K_2(q, U, S_F)$$

wobei in der Regel bei großen Prüfflächen  $K_1$ , bei kleinen  $K_2$  überwiegt.

Die umfassende Behandlung und Darstellung aller

mit dem Thema dieser Arbeit zusammenhängenden Probleme soll einen Beitrag darstellen für die weitere theoretische und experimentelle Bearbeitung von Einzelfragen der Luftschalldämmung, insbesondere zum exakteren Vergleich wellentheoretisch ermittelter Lösungen mit experimentellen Ergebnissen, zur genaueren Bestimmung von Prüfgrößen und einer zweckmäßigeren Beurteilung, zur

Entwicklung geeigneterer, den jeweiligen Anforderungen auch in Detailbereichen besser angepaßter Bauteile und Konstruktionsmerkmale sowie für eine bessere Beurteilung und Anwendung von Prüfergebnissen in der planenden Bauakustik vorwiegend im Anwendungsbereich vorgefertigter Bauteile und Bauelemente vor allem für den Schallschutz im Hochbau gegenüber Außengeräuschen.

13.1 Bedeutung der Symbole

A	äquivalente Absorptionsfläche in $m^2$
B	lichte Breite eines Fensters in m
D	Schallpegeldifferenz aus Schallpegeln vor und hinter einem Prüfgegenstand in dB
E	mittlere Schallenergiedichte in $N \cdot m^{-2}$
H	lichte Höhe eines Fensters in m
J	Schallintensität in $N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
K	Korrekturglied in einer Pegelbilanz in dB
L	Schalldruckpegel in dB
P	Schalleistung in $W \hat{=} N \cdot m \cdot s^{-1}$
R	Luftschalldämm-Maß in dB
S	Prüffläche in $m^2$
T	Nachhallzeit in s
U	Umfang einer Prüffläche in m
V	Volumen des Meßraumes in $m^3$
a	Mündungskorrektur $2a$ bei Fugen und Schlitzfenstern in m
b	Fugenbreite in m
c	Schallausbreitungsgeschwindigkeit in $m \cdot s^{-1}$
d	Abstand zwischen Schallquelle und Prüfgegenstand in m
e	Basis des natürlichen Logarithmensystems
f	Frequenz in $Hz \hat{=} s^{-1}$
k	Kopplungsfaktor zwischen 2 Hallräumen mit der Öffnung $S_F$
l	Fugenlänge in m
m	Masse je Flächeneinheit in $kg \cdot m^{-2}$
p	Schalldruck in $N \cdot m^{-2}$
q	Leibungstiefe eines Fensters in m
r	Spurabstand bewegter Schallquellen in m
s	Abstand "Schallquelle - Mikrofon" im freien Schallfeld in m

t	Fugentiefe in m
v	Schallschnelle in $m \cdot s^{-1}$
w	Wirkungszone (Streifen) in m im Rahmenbereich eines offenen Fensters der lichten Öffnungsfläche $S_F$ zur Kennzeichnung anomaler Eigenschaften
z	Faktor zur Lagekennzeichnung von Fugen und Löchern in der Prüfwand (Mitte, Kante, Ecke)
$\alpha$	Schallabsorptionsgrad
$\vartheta$	Schalleinfallswinkel in Grad
$\epsilon$	Seitenverhältnis der Prüffläche
$\lambda$	Wellenlänge in m
$\rho$	Dichte der Luft in $kg \cdot m^{-3}$
$\tau$	Schalltransmissionsgrad
$\omega$	$= 2\pi f$ Kreisfrequenz in $s^{-1}$
$\Delta L$	Schallpegeldifferenz aus Schallpegeln ohne und mit Prüfgegenstand in dB
$\Delta R$	Differenz aus Schalldämm-Maßen in dB
$\rho_c$	Schallkennimpedanz der Luft in $N \cdot s \cdot m^{-3}$

13.2 Bedeutung der Indices

$A_0$	Bezugsabsorptionsfläche $A_0 = 10 m^2$
$S_0$	Bezugsfläche $S_0 = 1 m^2$ (in besonders gekennzeichneten Fällen bedeutet die Bezugsfläche die Gesamtfläche, in der ein Fenster eingebaut ist)
$l_0$	Bezugslänge $l_0 = 1 m$
$P_0$	Bezugs-Schalleistung $P_0 = 10^{-12} W$
$p_0$	Bezugs-Schalldruck $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} N \cdot m^{-2}$
$R_0$	Luftschalldämm-Maß der Bezugswand, in der ein Fenster eingebaut ist
$A_1$	sowie $E_1, L_1, P_1, T_1, V_1, p_1$ Größen im Senderraum 1
$A_2$	sowie $E_2, L_2, P_2, T_2, V_2, p_2$ Größen im Empfangsraum 2

- $A_{10}$  sowie  $A_{20}$  äquivalente Absorptionsflächen im Senderaum 1 bzw. Empfangsraum 2 abzüglich der scheinbaren Absorption durch die Transmissionsflächen (z. B.  $\tau \cdot S$ )
- $R_n$  sowie  $\tau_n, S_n$  Größen der n-ten Teilflächen
- $R_F$  sowie  $\tau_F, S_F$  Größen für das untersuchte Fenster
- $R_{res}$  sowie  $\tau_{res}, R_{Fres}$  resultierende Wirkungen
- $L_2^o$  sowie  $A_2^o, T_2^o$  Größen im Empfangsraum bei offenem Fenster
- $L_2^c$  Empfangsraumpegel bei normal geschlossenem Fenster (c = closed) ohne zusätzliche Dichtung der Schließfugen
- $R_S$  Schlitzdämmung allgemein, bezogen auf die Schlitzfläche
- $R_{S,F}$  Schlitzdämmung, bezogen auf die Fensterfläche
- $R_{S_n}$  auf  $S_o$  und  $l_o$  normierte Schlitzdämmung
- $R'$  sowie  $R'_F, \tau'_F$  Wirkungen einschließlich Flanken- oder/und Nebewegübertragung
- $R_{\perp}$  Schalldämm-Maß bei senkrechtem Schalleinfall
- $R_{\psi}$  Schalldämm-Maß beim Schalleinfallswinkel  $\psi$
- $L_P$  Schalleistungspegel bezogen auf  $P_o = 10^{-12} W$
- $D_P = L_P - L_2$  Schallschutz als Summenwirkung einer Pegelbilanz
- $L_{10}$  mittlerer Schalldruckpegel eines Raumes bezogen auf  $A_o = 10 m^2$
- $K(\psi)$  Korrekturglied in dB in Abhängigkeit vom Einfallswinkel bei verschiedenen Bahnbewegungen einer Schallquelle
- $\bar{L}$  sowie  $\bar{R}, \bar{R}_{res}$  usw. arithmetische Mittelwerte im bauakustischen Frequenzbereich 100 Hz bis 3200 Hz
- $f_o$  Eigenfrequenz von Resonanzphänomenen
- $f_g$  Grenzfrequenz des Koinzidenzeffektes (Spuranpassungseffekt)
- $S_F^{eff}$  von den geometrischen Abmessungen  $S_F$  eines offenen Fensters für die Transmission  $\tau = 1$  abweichende effektive Fensterfläche
- dB Einheit Dezibel für alle Arten von Schallpegeln, Pegeldifferenzen, Schalldämm-Maßen, Differenzen von Schalldämm-Maßen und Korrekturgliedern in Pegelbilanzen
- dB(A) sowie dB(B) und dB(C) Einheiten frequenzbewerteter Schallpegel entsprechend den Bewertungskurven A, B und C nach DIN 45 633

Anmerkung: In alle Größen- und Zahlenwertgleichungen sind die Einheiten im MKS-System einzusetzen.

- 1) E. Wintergerst      Zur Theorie der Schall-  
durchlässigkeit von einfa-  
chen und zusammengesetz-  
ten Wänden. Die Schall-  
technik, 4 [193] S. 85
- 2) A. Schoch            Die physikalischen Grund-  
lagen der Schalldämmung  
im Bauwesen. Hirzel-Ver-  
lag, Stuttgart [1937]
- 3) L. Cremer            Die wissenschaftlichen  
Grundlagen der Raumaku-  
stik, Bd. III. Wellentheore-  
tische Raumakustik. Hir-  
zel-Verlag, Stuttgart [1950]  
S. 171 u. 204
- 4) L. Cremer            Theorie der Schalldämmung  
dünner Wände bei schrägem  
Einfall. Akustische Zeit-  
schrift [1942] S. 81
- 5) E. Meyer, P.H.      A tentative method for the  
Parkin, H. Oberst      measurement of indirect  
und H. J. Parkis      sound transmission in buil-  
dings. Acustica [1951] S. 17
- 6) K. Gösele            Der Einfluß der Hauskon-  
struktion auf die Schall-  
Längsleitung bei Bauten  
Ges. Ing. [1954] S. 282
- 7) M. Heckl            Die Schalldämmung von ho-  
mogenen Einfachwänden  
endlicher Fläche. Acustica  
[1960] S. 98
- 8) A. Kost              Modelluntersuchungen zur  
Theorie der Einfachwand.  
Acustica [1967] S. 342
- 9) G. Kurtze            Physik und Technik der  
Lärmbekämpfung. Braun-  
Verlag, Karlsruhe [1960]  
S. 97
- 10) L. Cremer            Körperschall  
M. Heckl              Springer-Verlag, Berlin  
[1967] S. 489
- 11) R. Josse            Transmission du son par  
C. Lamure            une paroi simple. Acustica  
[1964] S. 266
- 12) K. Gösele            Zur Luftschalldämmung von  
einschaligen Wänden und  
Decken  
Acustica [1968] S. 334
- 13) M. Heckl            Untersuchungen über den  
K. Seifert            Einfluß der Eigenresonan-  
zen der Meßräume auf die  
Ergebnisse von Schall-  
dämm-Messungen.  
Acustica [1958] S. 212
- 14) D. Reichow        Die Amplitudenverteilungen  
des Schalldrucks in ge-  
schlossenen Räumen. Dis-  
sertation TH Braunschweig  
[1960]
- 15) K. Gösele            Über Prüfstände zur Mes-  
sung der Luftschalldäm-  
mung von Wänden und Dek-  
ken. Acustica [1965] S. 317
- 16) R. Klapdor        Die Genauigkeit raum- und  
bauakustischer Messungen.  
Dissertation, TH Karlsruhe  
[1955]
- 17) P. Schneider      Zusammenhänge zwischen  
dem Luftschalldämm-Maß  
und dem Luftschallschutz  
bei verschiedenen Bedin-  
gungen im Hochbau. Die  
Schalltechnik 39/40 [1960]
- 18) DIN 52 210        Bauakustische Prüfungen -  
Messungen zur Bestimmung  
des Luft- und Trittschall-  
schutzes [1960]

- 19) A. Eisenberg Schalldämmung von Fenstern. Berichte aus der Bauforschung, Heft 63 [1969] S. 25, Verlag W. Ernst u. Sohn, Berlin
- 20) A. Eisenberg Über die Luftschalldämmung von Fenstern. Proceedings 3<sup>rd</sup> International Congress on Acustics, Elsevier-Verlag Amsterdam [1960]
- 21) P. Schneider  
W. Böckl Kommentar zur Neufassung von DIN 4109 Schallschutz im Hochbau. Hrsg.: Bundesministerium für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung [1964] S. 20
- 22) P. Schneider Akustische Untersuchungen zur Wirkung lärmmindender Stützwandverkleidungen bei Stadtautobahnen. BAM-Forschungsbericht 2.43/10120 [1964] Anlage 41
- 23) E. Lübecke  
H. Heller Zur Geräuschbildung bei elektrischen Hausgeräten. Berichte aus der Bauforschung, Heft 63 [1969] S. 75, Verlag W. Ernst u. Sohn, Berlin
- 24) P. Schneider Schallschutz bei haustechnischen Anlagen. Werner-Verlag, Düsseldorf [1959]
- 25) JEC - Publication 123 - Recommendation for sound level meters
- 26) DIN 45 633, Bl. 1 Präzisionsschallpegelmessers - Allgemeine Anforderungen
- 27) DIN 4109 Schallschutz im Hochbau - Blatt 2 Anforderungen [1962] Bild 1
- 28) P. Schneider Zur Bedeutung des Schallleistungspegels in der Bauakustik z. Zt. noch unveröffentlicht
- 29) Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) [1965] S. 40, Bild 10
- 30) P. Schneider Praktische Erfahrungen mit Schallschutzmaßnahmen. Die Bautechnik 3 [1957] S. 97
- 31) P. Schneider Bauakustik im gegenwärtigen Baugeschehen. Erkenntnisse der Baunormung und -forschung [1960], Commerzia-Verlag, Berlin
- 32) DIN 4109 Schallschutz im Hochbau - Blatt 5 Erläuterungen [1963] Bild 3
- 33) J. Walsdorf Verminderung der Schalldämmung von Trennelementen durch Schlitze und Löcher. Wärme, Kälte, Schall [1967] Heft 2, S. 32
- 34) W. Furrer Raum- und Bauakustik - Lärmabwehr Birkhäuser-Verlag, Basel [1961] S. 205
- 35) DIN 4109 Schallschutz im Hochbau - Blatt 1 Begriffe [1962] Abs. 5.4
- 36) T. Mariner Comments on the reverberent room method of measuring transmission loss Proceedings 3<sup>rd</sup> International Congress on Acustics Elsevier-Verlag, Amsterdam [1960]
- 37a) ASTM Designation E 90 - 55 Recommended Practice for Laboratory Measurement of Airborne-sound Transmission loss of Building Floors and Walls
- 37b) ASA Z 24.19-1957 American Standard Recommended Practice for Laboratory Measurement of Airborne-sound Transmission Loss of Building Floors and Walls
- 38) P. Schneider Schallschutz im amerikanischen Hochbau. Die Schalltechnik 44/45 [1961] S. 1-25
- 39) R.V. Waterhouse Interference patterns inreverberent sound fields J. acoust. Soc. Amer. [1955] S. 247
- 40) W. Wöhle Zum Schallpegel in Ecken, Kanten und an den Wänden geschlossener Räume bei Rauschen. Hochfrequenztechnik und Elektroakustik [1956] S. 158
- 41) Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) [1966] S. 49, Bild 43
- 42) P. Schneider Bauakustische Untersuchungen an Lüftungsschächten und -kanälen. BAM-Forschungsbericht 2.43/9423 [1969] z. Zt. im Druck für "Berichte aus der Bauforschung", Verlag W. Ernst und Sohn

- 43) G. Venske  
A. Panceram Schalldichte Türen, Konstruktion und Meßergebnisse VDI-Zeitschrift [1950] Nr. 28
- 44) F. Bruckmayer Handbuch der Schalltechnik im Hochbau, Deuticke-Verlag, Wien [1962] S. 287
- 45) J. Lang Schalldämmung von Fenstern und Türen mit verschiedener Luftdurchlässigkeit Congress-Report I (IV ICA-Congress) [1962] Kopenhagen
- 46) E. Seifert Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Fugendichtigkeit und Schalldämmvermögen von Fenstern. Kurzberichte aus der Bauforschung [1965] Nr. 7
- 47) L. Cremer Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd. II Statistische Raumakustik, Hirzel-Verlag, Stuttgart [1961] S. 164
- 48) F. Ingerslev  
A. Nielsen On the transmission of sound through small apertures and narrow slits. Ingeniorvidenskablige skrifter [1944] Nr. 5
- 49) M.C. Comperts The sound insulation of circular and slit-shaped apertures Acustica [1964] S. 1
- 50) M.C. Comperts  
T. Kihlman The sound transmission loss of circular and slit-shaped apertures in walls. Publication Nr. 263 of the Research Instituts for Public Health Engineering TNO Acustica [1967] S. 144
- 51) K. Gösele Schalldämmung von Türen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 63 [1969] S. 12, Verlag W. Ernst und Sohn, Berlin
- 52) Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) [1968] S. 70, Bild 62
- 53) Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) [1967] S. 70, Bild 43 und 44
- 54) DIN 52 217 E Bauakustische Prüfungen - Schall-Längsleitung-Begriffe, erscheint in Kürze
- 55) P. Schneider Bauakustische Untersuchungen an gemauerten Wänden aus Dezimetersteinen im Prüfstand mit bauüblichen Nebenwegen und auf Baustellen BAM-Forschungsbericht 2.43/13039 [1968] z. Zt. im Druck
- 56) S.W. Redfearn Phil. Mag. (Ser. 7) Vol 30 [1940] S. 223
- 57) C.M. Harris Handbook of Noise Control, Chapt. 3, S. 4, Fig. 33 Mc-Graw-Hill, New York [1957]
- 58) Z. Maekawa Noise reduction by screens (Kobe, Univ. Japan) 5<sup>e</sup> congrès international d'acoustique Rapports Ia [1965] F 13

