

## Sekundär abgestrahlter Körperschall

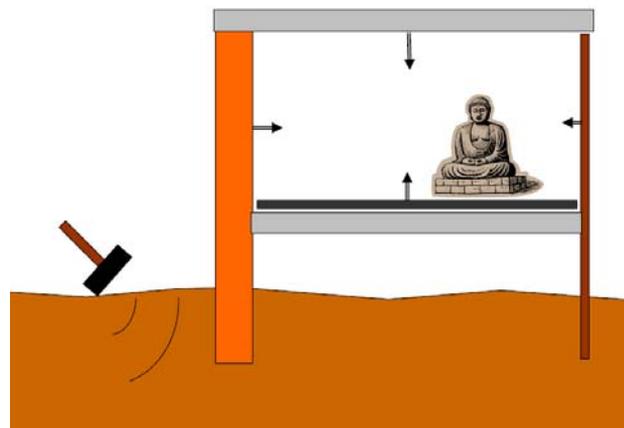
R. Bütikofer, Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf

### Zusammenfassung:

Als Körperschall werden Schwingungen in festen Bauteilen bezeichnet. Der Vortrag beschreibt, wie schwingende Wandelemente Luftschall abstrahlen, wie sich der Luftschall im Raum bei wenig vorhandener Absorption erhöht, und schliesslich wie der Luftschall je nach Frequenz (Tonhöhe) besser oder schlechter vom Gehör des Menschen wahrgenommen wird. In gewissen Fällen erzeugen auch Schwingungs-Immissionen unterhalb der Fühlschwelle bereits einen hörbaren Luftschallpegel.

## 1 Einleitung

Wenn Erschütterungen in ein Gebäude eingeleitet werden, kann sich neben der taktilen Wahrnehmung auch eine Wahrnehmung über das Gehör ergeben. In diesem Falle spricht man von „sekundär abgestrahltem Körperschall“. Die klassische Situation ist eine Zugsvorbeifahrt in einem Tunnel, d.h. wo es nur eine Schwingungsimmersion gibt, aber keine direkte Luftschallübertragung durch die Luft und durch die Gebäudehülle (Fenster).



Figur 1: Schematische Darstellung a) der Übertragung von externen Schwingungen auf die Raumwände, die aus Beton, Backstein, Holz etc. bestehen können, b) deren Luftschall-Abstrahlung in den Raum und schliesslich c) die Wahrnehmung durch den Menschen.

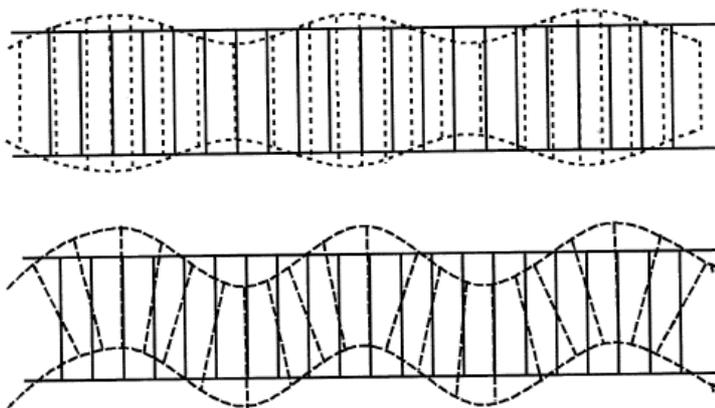
Figur 1 stellt die Situation schematisch dar. Im vorliegenden Vortrag wird *nicht* darauf eingegangen, wie die von aussen in das Gebäude eindringenden Schwingungen die Wände anregen (Schwingungsübertragung im Gelände, Ankopplung an das Gebäude, Bauteilresonanzen, ..). Sondern es werden die akustischen Auswirkungen diskutiert, ausgehend vom Körperschall, d.h. von den gemessenen Schwingungsgeschwindigkeiten senkrecht zu den Wandoberflächen.

Analog zur Musik wo eine Frequenzverdoppelung einer Oktave entspricht, werden hier alle Betrachtungen in den in der Akustik üblichen Terzbändern durchgeführt. Existieren Messungen mit Schmalband (FFT) Spektren, so sind diese in die entsprechenden Terzbänder zusammenzufassen.

## 2 Ankopplung der Wandschwingung an die Luft

Die Oberfläche der Wand wird als eine Platte betrachtet. Bei den folgenden Betrachtungen konzentrieren wir uns bei mehrschaligen Wandaufbauten auf die oberste, dem Raum zugewandte Schicht. Beim Fussboden ist dies z.B. der (meistens vorhandene) schwimmende Estrich von etwa 5 cm Beton.

### 2.1 BiegeWellen



Figur 2: oben: Longitudinal (Kompressions-) Welle; unten: Biege-Wellen (aus [10])

Figur 2 zeigt zwei Wellentypen. Die Longitudinalwellen haben eine hohe Schallgeschwindigkeit von über 1000 m/s, erzeugen aber keinen Luftschall. Zur Schwingungsübertragung an die Luft sind die Biege-Wellen entscheidend.

### 2.2 Die Koinzidenzfrequenz

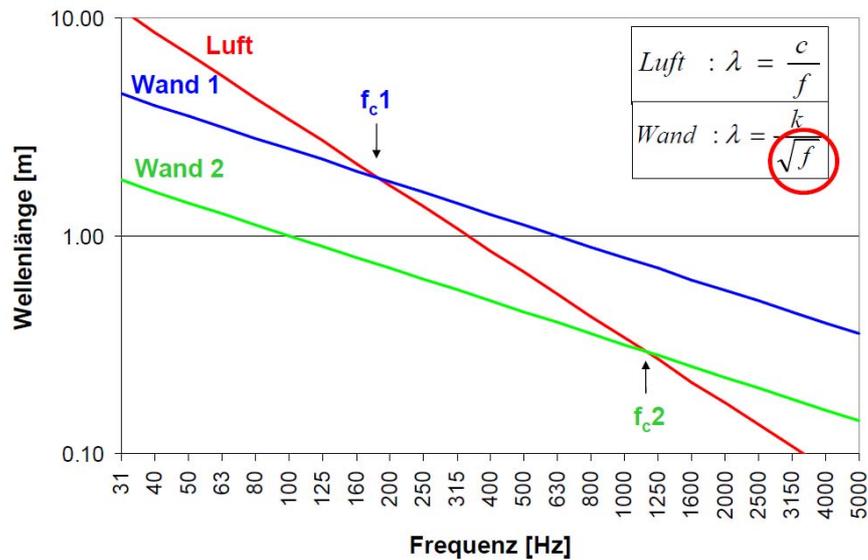
Für die Abstrahlung von Luftschall ist die durch die Biege-Wellen erzeugte Schwinggeschwindigkeit  $v$  senkrecht zur Plattenoberfläche (oft auch „Schnelle“ genannt) von Bedeutung. Bei der Biege-Wellenlänge auf der Platte und der Wellenlänge in der Luft gibt es einen fundamentalen Unterschied:

$$\boxed{\text{Wand : } \lambda = \frac{k}{\sqrt{f}}} \quad \boxed{\text{Luft : } \lambda = \frac{c}{f}}$$

Bei der Platte (Wand) hängt die Biege-Wellenlänge von der „Wurzel aus der Frequenz“ ab. Der Faktor  $k$  ist durch Materialeigenschaften (besonders durch den Elastizitätsmodul), aber auch durch die Dicke der Platte bestimmt. Im Unterschied dazu hängt die Wellenlänge in der Luft direkt von der Frequenz (und der konstanten Schallgeschwindigkeit  $c$ ) ab.

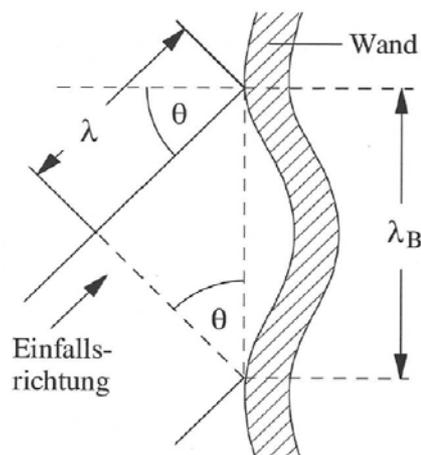
Figur 3 zeigt zwei Beispiele von Wänden: Bei Wand 1 wird die Wellenlänge auf der Wand oberhalb  $f_{c,1}$  bei ca. 200 Hz länger als die in der Luft, und bei Wand 2 erst oberhalb  $f_{c,2}$  bei ca. 1200 Hz. Die Frequenz, bei

welcher die Wellenlängen in der Luft und auf der Wand gleich lang sind, heisst *Koinzidenzfrequenz*  $f_c$ . Die Luftschall-Welle streicht hier mit schleifendem Schalleinfall entlang der Oberfläche.



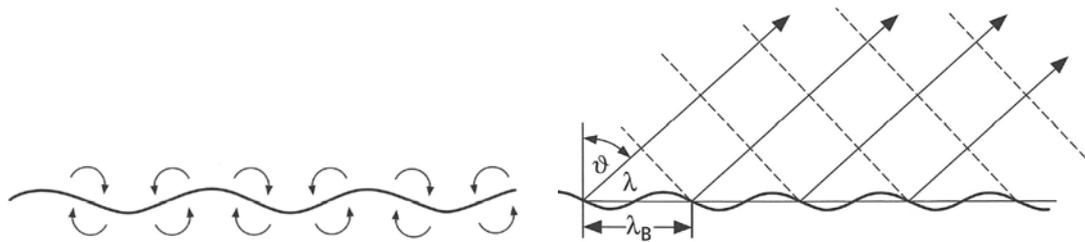
Figur 3: Doppelt-logarithmische Darstellung der Wellenlänge der Luft und von zwei Platten in Funktion der Frequenz

**Oberhalb** der Koinzidenzfrequenz ist für die kürzere Luftschallwelle eine *Spuranpassung* an die Biege- wellenlänge möglich, wenn die Luftschallwelle in einem entsprechenden Winkel einfällt. Siehe Figur 4.



Figur 4: Spuranpassung der Luftschallwelle an die Biege wellenlänge durch schrägen Schalleinfall (aus [8])

**Unterhalb** der Koinzidenzfrequenz ist die Wellenlänge in der Luft länger als die Biege wellenlänge. Die Schwingungsübertragung an die Luft funktioniert nur noch schlecht. Die auf der Plattenoberfläche entstehenden Druckmaxima und – Minima kompensieren sich durch einen lokalen Druckausgleich, den so genannten hydrodynamischen Kurzschluss. Figur 5 illustriert die beiden Fälle.



Figur 5: Keine Luftschall-Abstrahlung ins „Fernfeld“ unterhalb der Koinzidenzfrequenz (aus [11])

Die Koinzidenzfrequenz  $f_c$  hängt vom Material und der Wanddicke ab:

Beispiele zur Größenordnung der Koinzidenzfrequenz:

■ Betonwand 20 cm	80 Hz
■ Schwimmender Estrich 5 cm Beton	400 Hz
■ Backsteinwand 15 cm	200 Hz
■ Sperrholzplatte 2 cm	900 Hz
■ Glasscheibe 6 mm	1500 Hz
■ Gipskarton-Vorsatzschale 12.5 mm	2000 Hz

## 2.3 Schallintensität

Die Schallintensität  $I$  ist die Schalleistung pro Flächeneinheit. Sie wird in Watt pro Quadratmeter gemessen.

Bei einer ebenen, fortschreitenden Schallwelle gilt:

$$I = p \cdot v = \frac{p^2}{Z_0} = v^2 \cdot Z_0 \quad [\text{W} / \text{m}^2]$$

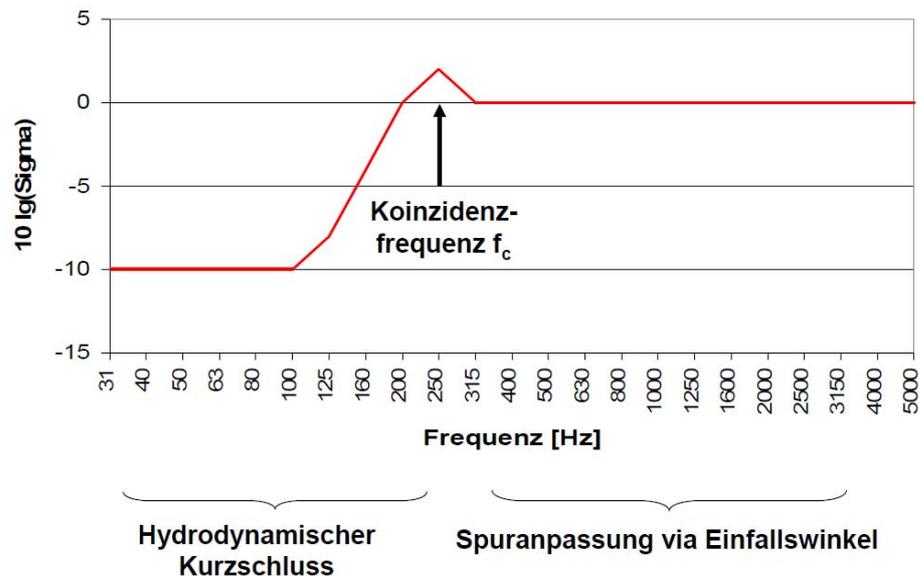
mit:	$p$	Schalldruck [ $\text{N}/\text{m}^2$ bzw. Pa]
	$v$	Schallschnelle (Schwinggeschwindigkeit) [m/s]
	$Z_0$	Impedanz der Luft = $400 \text{ Ns}/\text{m}^3 = \text{Luftdichte} \cdot \text{Schallgeschwindigkeit}$

In der Akustik möchte man die Schallintensität messen. Die Messung der Schallschnelle  $v$  in der Luft ist aufwendig (z.B. 2-Mikrophon-Gradienten-Methode bei Schalleistungsmessungen oder spezielle Schnelle-Sensoren). Da die Schnelle  $v = p/Z_0$  ist, genügt bei entsprechender Skalierung die Messung des Schalldrucks mit einem Mikrophon. Andererseits kann die Intensität bei entsprechender Skalierung auch aus der Schallschnelle alleine berechnet werden, wie das bei der Schallabstrahlung der Wand der Fall ist.

## 2.4 Das Abstrahlmass "10lg( $\sigma$ )"

Die Ankopplung an die Luft ist unterhalb der Koinzidenzfrequenz nicht mehr optimal, was durch den Abstrahlgrad beschrieben wird.

Der Abstrahlgrad  $\sigma$  bezeichnet das Verhältnis zwischen der tatsächlich abgestrahlten Schallintensität zur möglichen Schallintensität, berechnet aus der Oberflächen-Schwinggeschwindigkeit. Der entsprechende Pegel ( $10 \lg(\sigma)$ ) heisst *Abstrahlmass*. Figur 6 zeigt einen schematischen Verlauf.



Figur 6: Schematisierter Verlauf des Abstrahlmasses in Funktion der Frequenz für eine angenommene Koinzidenzfrequenz von 250 Hz.

Der genaue Kurvenverlauf des Abstrahlmasses ist sehr variabel und hängt von vielen Faktoren ab. Der dargestellte Verlauf mit -10 dB unterhalb der Koinzidenzfrequenz ist eine vorsichtige Verallgemeinerung. Die verbleibende Abstrahlung unterhalb der Koinzidenzfrequenz hängt von den Randbedingungen an den Plattenrändern ab (siehe z.B. [9], Kapitel 6.6.1). Oft sinken die Kurven zu den tiefen Frequenzen auf -15 dB oder tiefer ab. Um die Koinzidenzfrequenz herum kann es zu einer kleinen Abstrahlungsverstärkung kommen. Oberhalb der Koinzidenzfrequenz ist das Abstrahlmass in der Regel 0 dB, d.h. dank der Spuranpassung durch variablen Einfallswinkel der Luftschallwelle findet - zumindest im diffusen Schallfeld mit Schalleinfall aus allen Richtungen - eine optimale Kopplung statt.

Bei anderen Werten für die Koinzidenzfrequenz verschiebt sich der schematische Kurvenverlauf von Figur 6 entsprechend zu höheren oder tieferen Frequenzen hin, ändert aber seine Form nicht.

Während schwere, dicke Mauerwerke mit tiefer Koinzidenzfrequenz bereits ab relativ tiefen Frequenzen optimal an die Luft ankoppeln, ist dies bei den so genannten „biegeweichen Vorsatzschalen“ wie z.B. Gipskartonplatten erst oberhalb 1000 Hz der Fall. Deshalb können solche Vorsatzschalen verwendet werden, um eine schwere, abstrahlende Wand schalltechnisch zu sanieren.

### 3 Abgestrahlte Schalleistung

#### 3.1 Abgestrahlte Schalleistung $L_W$ einer Teilfläche

Die von einer Teilfläche der Grösse  $S$  in die Luft abgestrahlte Schalleistung ist proportional zum Quadrat der Schwinggeschwindigkeit, proportional zur Fläche  $S$  und berücksichtigt den Abstrahlgrad  $\sigma$ .

Als Pegel in Dezibel ergibt dies:

$$L_W(f) = 10 \cdot \lg \left( \frac{v^2(f)}{v_0^2} \right) + 10 \cdot \lg(\sigma(f)) + 10 \cdot \lg \left( \frac{S}{S_0} \right)$$

mit:

$v(f)$  = gemessener, über mehrere Messorte gemittelter Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit senkrecht zur Wandoberfläche für die Frequenz  $f$

$\sigma(f)$  = Abstrahlgrad bei der Frequenz  $f$

$S$  = Fläche der Wand bzw. Teilfläche

$v_0$  = 50 nm/s (nm/s = Nanometer/Sekunde =  $10^{-9}$  m/s)

$S_0$  = 1 m<sup>2</sup>

Die Schwinggeschwindigkeit  $v$  wird dabei senkrecht zur Wandoberfläche an mehreren Stellen innerhalb der Fläche  $S$  gemessen und gemittelt. Man beachte, dass die Bezugs-Schwinggeschwindigkeit  $v_0$  hier den Wert 50 nm/s hat, so dass sie über die Impedanz der Luft mit dem Schalldruckpegel verknüpft ist. Für die Messungen oberhalb etwa 200 Hz sind Erschütterungsmessgeräte ungeeignet. Hier werden vorzugsweise kleine, leichte Beschleunigungsaufnehmer zusammen mit elektrischer Integration in einem Konditionierverstärker verwendet, oder ein Laservibrometer.

### 3.2 Total abgestrahlte Schalleistung

Die gesamte in einen geschlossenen Raum hinein abgestrahlte Schalleistung ist die energetische Summe aller Schalleistungen  $L_{w,i}$  der individuellen Wand-, Boden- und Deckenflächen. Die Beiträge können sehr unterschiedlich sein, einerseits weil die Schwingungsübertragung im Gebäude auf verschiedenen Wänden unterschiedlich grosse Schwingungsamplituden verursachen kann, andererseits weil bei der akustischen Abstrahlung das Material, die Dicke und die Grösse der Teilflächen das Resultat beeinflussen.

$$L_{W,tot} = 10 \cdot \lg \left[ \sum_i 10^{0.1 \cdot L_{W,i}} \right]$$

## 4 Resultierender Luftschallpegel $L_p$ im Raum

Der Luftschallpegel  $L_p$  im geschlossenen Raum ergibt sich aus der Energiebilanz: Er wird so gross werden, bis die eingebrachte Schalleistung im Gleichgewicht ist mit der durch Absorption dem Raum entzogenen Schalleistung.

Es sind drei Situationen zu unterscheiden: a) diffuses Schallfeld bei hohen Frequenzen b) einzelne Raummoden bei tiefen Frequenzen und c) erzwungene Pegel unterhalb des tiefsten Raummod. Die folgenden Betrachtungen gelten immer für die einzelnen Frequenzbänder der Terzbandspektren.

### 4.1 Diffuses Schallfeld

Wenn die Wellenlänge der Luftschallwellen klein ist im Vergleich zu den Abmessungen des Raumes, so entsteht im Raum ein diffuses Schallfeld, wo dank den vielfältigen Reflexionen an den Wänden die Schallenergie gleichmässig im Raum verteilt ist. Dies ist für normal grosse Wohnräume für Frequenzen oberhalb etwa 300 Hz der Fall. Im diffusen Schallfeld gilt:

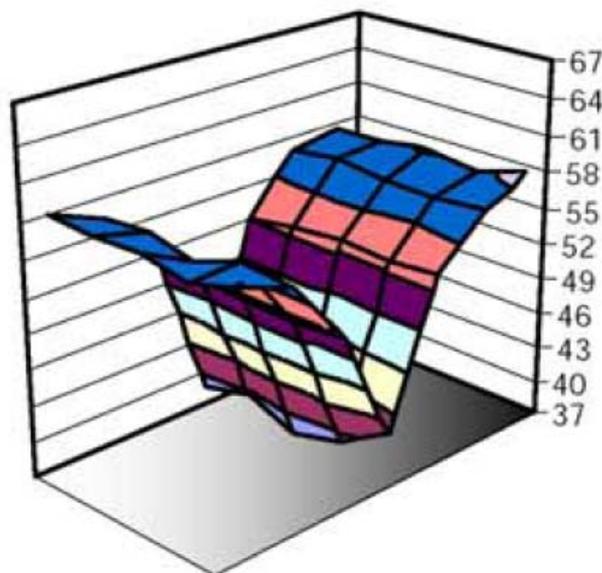
$$L_p = L_{W,tot} + 6 + 10 \cdot \lg \left( \frac{1 \text{ m}^2}{A} \right)$$

Da im diffusen Schallfeld der Schall aus allen Richtungen beim Hörer ankommt, ergibt sich eine Pegelerhöhung um 6 dB. Je stärker der Raum bedämpft ist, d.h. je grösser die vollständig absorbierende Fläche  $A$  ist, desto kleiner wird  $L_p$ . Allerdings ist die Wirkung begrenzt: eine Verdoppelung der Absorptionsfläche  $A$  bewirkt eine Pegelverminderung um nur 3 dB.

## 4.2 Stehende Wellen

Bei tiefen Frequenzen (unter etwa 200 Hz) bilden sich in einem üblichen Wohnraum wegen den langen Wellenlängen der Schallwellen bei bestimmten Frequenzen so genannte *stehende Wellen* aus. (Mit den hier besprochenen "stehenden Wellen" werden die tiefsten, in einem Raum mit gegebener Länge, Breite und Höhe auftretenden Raummoden bezeichnet).

Eine Schallwelle wird beschrieben durch den Schalldruck und durch die Schwinggeschwindigkeit („Schnelle“) der Luftmoleküle. Das menschliche Gehör reagiert aber nur auf den Schalldruck. Eine stehende Welle bildet sich z.B. für eine bestimmte Frequenz zwischen zwei parallelen Wänden aus. In der Nähe der Wände befindet sich das Druckmaximum und der Luftschall ist gut hörbar. An anderen Stellen, z.B. in der Zimmermitte befindet sich dann das Schnellemaximum, so dass dort der (mit den normalerweise auf Schalldruck empfindlichen Mikrofonen) gemessene Schalldruckpegel bis zu 15 dB kleiner sein kann. Figur 7 zeigt ein Beispiel.



Figur 7: Beispiel der Druckverteilung in einem rechteckigen Raum bei einer stehenden Welle (aus [6])

Stehende Wellen können sich auch durch Mehrfachreflexionen an Wänden und Decken ergeben. Für den in Figur 7 gezeigten Fall für die tiefste mögliche Frequenz  $f$  ergibt sich die Frequenz aus dem Wandabstand  $d$  und der Schallgeschwindigkeit von 340 m/s:

$$f = \frac{340}{2 \cdot d} \quad [\text{Hz}]$$

Als praktisches Beispiel sei hier die Immission eines schnell drehenden Motors beschrieben. Der Motor drehe mit 2950 U/min, d.h. mit knapp 50 Hz. Für eine stehende Welle genügt eine halbe Wellenlänge, was bei 50 Hz 3.4 m entspricht. Dies ist ein typischer Wandabstand in einem Schlafzimmer, so dass sich hier eine stehende Welle optimal ausbilden kann. Dummerweise ist der Kopf der schlafenden Person in den allermeisten Fällen in der Wandnähe, d.h. dort, wo es am lautesten wird!

Eine andere stehende Welle bildet sich zwischen dem Boden und der Decke aus. Bei einer Raumhöhe von 2.2 m ist die Frequenz 77 Hz. Die Pegel sind hoch am Boden und nahe der Decke, und klein in der halben Höhe. Die Grösse des resultierenden Luftschallpegels ist schwierig abzuschätzen. Die starken örtlichen Schwankungen wurden erwähnt. Die stehende Welle ist eine Resonanzerscheinung. Der maximale Luftschallpegel bei der Resonanzfrequenz hängt von der wirksamen Bedämpfung (Absorption) ab.

### 4.3 Erzwungene Schallpegel

Für Frequenzen unterhalb des tiefsten Raummod (d.h. je nach Raumgrösse unterhalb etwa 30 bis 50 Hz) reagiert der Raum nur noch auf die erzwungenen Schallpegel. Die Schallfeldverteilung im Raum ist in der Regel eher gleichmässig ([12] S. 65). Anhaltspunkte zu den zu erwartenden Pegeln werden im Abschnitt 4.5 angegeben.

### 4.4 Die Wirkung von Absorbern

Eine Möglichkeit, um den resultierenden Schallpegel zu vermindern, ist die Erhöhung der wirksamen Absorption.

Es gibt verschiedene Typen von Luftschall-Absorbern: poröse Materialien, mikroperforierte Platten, Helmholz-Resonatoren, Membranabsorber, Plattenresonatoren, ... Bei Frequenzen unterhalb 100 Hz ist die Wellenlänge grösser als 2 Meter. Damit der Absorber auf die Luftschallwellen dieser Dimensionen einwirken kann, muss er relativ grosse Abmessungen aufweisen, d.h. er wird grossflächig und voluminös. Bei der Anordnung des Absorbers im Raum spielt es bei stehenden Wellen auch eine Rolle, wo er in Bezug auf die zu dämpfende Schwingungsform ist. So bewirkt ein Absorber an der Decke wenig bei einer stehenden Welle von Wand zu Wand. Deshalb ist es oft aus räumlichen oder gestalterischen Gründen nicht möglich, einen Tieftonabsorber in einem Zimmer zu montieren.



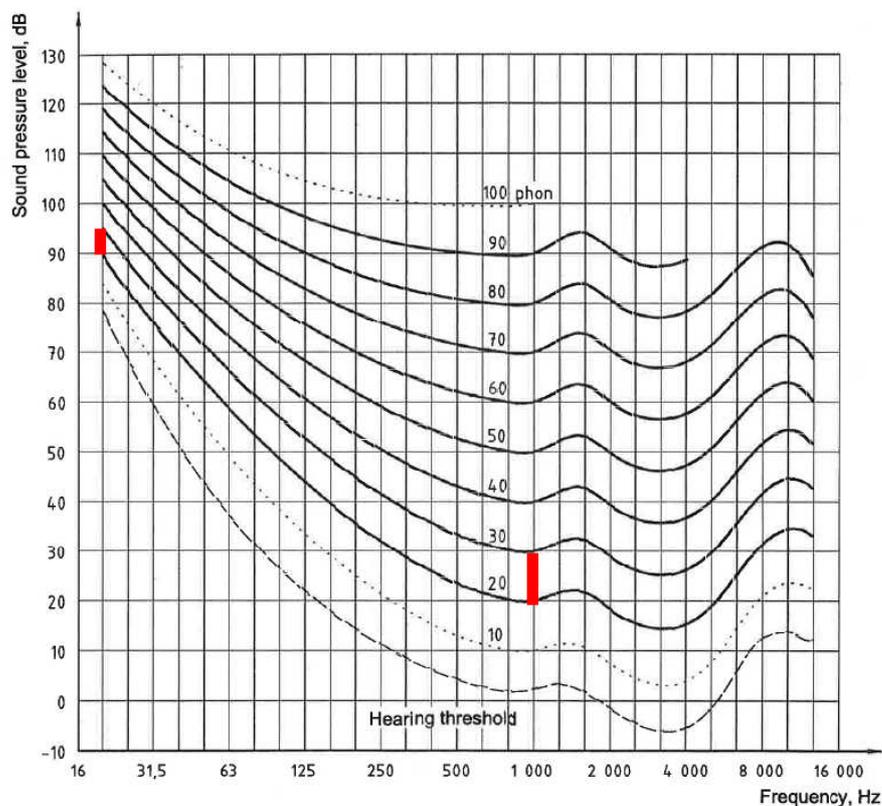
Figur 8: Beispiele von Tiefton-Verbundplatten-Absorbern, die in Raumecken von Prüfständen in der Empa montiert sind

## 4.5 Erfahrungswerte aus der Literatur

Im Buch "Railway Noise and Vibration" [13] wird im Kapitel 13.5.7 eine Faustformel aus der Praxis hergeleitet. Ausgehend vom diffusen Schallfeld, mit Abstrahlmass 0 dB ergibt sich für einen üblich möblierten Wohnraum die Faustformel:  $L_p \approx L_v + 7 \text{ dB}$ , wenn der Schnellepegel  $L_v$  (re 50 nm/s) auf dem Boden gemessen wurde. (Dieser Wert ergibt sich auch mit den oben angegebenen Formeln wenn das Verhältnis von Wandfläche  $S$  zu Absorption  $A$ :  $S/A = 1.26$  ist). Der Autor des Buches meint, dass trotz dem Ignorieren von Abstrahlgrad, Raummoden und fehlender Diffusität sich diese Näherung in seiner Praxis als robustes Prognose-Werkzeug bewährt habe. (Hinweis: In [13] wird  $L_v$  auf 1 nm/s statt auf 50 nm/s bezogen, deshalb ist  $L_v$  dort um  $20 \lg(50) = 34 \text{ dB}$  höher als hier angegeben).

## 5 Frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehörs

Die entscheidende Frage ist nicht der Luftschallpegel im Raum, sondern wie dieser Pegel von einer Person wahrgenommen wird. Dies wird in der Regel durch die Gewichtung mit dem „A-Filter“ berücksichtigt. Eine detailliertere Abschätzung, insbesondere bei sehr leisen Geräuschen in der Nähe der Hörschwelle, kann auf Grund von Lautheitskurven erfolgen. In den USA sind solche Verfahren unter dem Namen „Noise Curves (NC)“ und in Europa unter dem Namen „Noise Rating (NR)“ bekannt. Einen Überblick geben die standardisierten Kurven aus der Norm ISO 226 „Normal equal-loudness-level contours“ in Figur 10. Gemäss ISO 28961 [3] muss man bei der Hörschwelle mit einer Variation (Standardabweichung) bei normalhörenden, jungen Personen von etwa  $\pm 5 \text{ dB}$  gegenüber den Angaben aus Figur 10 rechnen.



Figur 10: Kurven gleicher Lautstärke (aus ISO 226)

Zwei Eigenschaften fallen auf:

- Zu den tiefen Frequenzen hin wird das Gehör immer unempfindlicher, d.h. es braucht z.B. bei 20 Hz einen Luftschallpegel von 90 dB, um einen gleich lauten Ton wahrzunehmen wie bei 1000 Hz mit einem Pegel von nur 20 dB.
- Umgekehrt reagiert aber das Gehör empfindlicher auf eine geringfügige Pegelzunahme: 5 dB mehr bei 20 Hz entsprechen rund 10 dB mehr bei 1000 Hz. Als Faustregel gilt, dass 10 dB (bei 1000 Hz) einer deutlich wahrnehmbaren Veränderung entsprechen. Bei 20 Hz ist dies somit bereits bei einer Veränderung um 5 dB der Fall.

Das normalerweise verwendete „A-Filter“ entspricht einem Kurvenverlauf bei mittlerer Lautstärke in Figur 10.

## 6 Beispiel zur Wahrnehmung

Eine Wand von  $S = 20 \text{ m}^2$  schwinde mit  $v = 0.1 \text{ mm/s}$ , d.h. mit einer Amplitude bei der Föhlschwelle. Wie gross ist der gehörte Luftschall, wenn die Anregung a) bei 30 Hz oder b) bei 50 Hz ist?

Das Abstrahlmass  $10 \lg(\sigma)$  sei -10 dB. Die Absorption  $A$  im Raum betrage  $5 \text{ m}^2$ . Stehende Wellen werden nicht berücksichtigt.

Der Luftschallpegel  $L_p$  im Raum ist:

$$L_p = 20 \lg \left( \frac{0.1 \text{ mm/s}}{50 \text{ nm/s}} \right) + 10 \lg(\sigma) + 10 \lg \left( \frac{20}{1} \right) + 6 + 10 \lg \left( \frac{1}{5} \right)$$

$$L_p = \quad \quad 66 \quad \quad -10 \quad \quad + 13 \quad \quad + 6 \quad \quad - 7 \quad \quad = 68 \text{ dB}$$

Beträgt die Frequenz 30 Hz, so ist die Gehörempfindlichkeit etwa -60 dB, d.h. die Immission liegt mit etwa 8 dB nahe bei der Hörschwelle. Ist die anregende Frequenz aber 50 Hz, so ist die Gehörempfindlichkeit etwa -42 dB, d.h. die Immission wird als Ton mit etwa 26 dB wahrgenommen, was schon gut wahrnehmbar ist und bei lange anhaltender Immission als sehr störend empfunden werden kann.

## 7 Zusammenfassung

Die besprochene Wirkkette ist:



Und die Folgerungen daraus sind:

- Auch Schwinggeschwindigkeiten unterhalb der Fühl-Schwelle können hörbaren Luftschall erzeugen (→ „Rumpeln“)
- Eine schwingende Wand strahlt tiefe Frequenzen weniger gut ab als hohe, je nach Material (Beton, Holz, ...) und je nach Dicke. (→ Abstrahlgrad, Koinzidenzfrequenz)
- Bei tiefen Tönen (unter ca. 200 Hz) gibt es in einem Raum laute und leise Orte. Laut ist es in der Nähe der Wand. (→ stehende Wellen)

## Literatur

- [1] DIN 45680 (1997) Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft  
neuer Entwurf wurde 2011 veröffentlicht
- [2] ISO 226 (2003), Acoustics – Normal equal-loudness-level contours
- [3] ISO 28961 (2012) Akustik - Statistische Verteilung von Freifeld-Normalhörschwellen
- [4] ISO 7029 (2000) Akustik - Statistische Verteilung von Hörschwellen als eine Funktion des Alters
- [5] ISO/TS 7849 – 2 (2009) Acoustics — Determination of airborne sound power levels emitted by machinery using vibration measurement — Part 2: Engineering method including determination of the adequate radiation factor
- [6] C. Hopkins, P. Turner, Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies.
- [7] VDI 2716 (2001) Luft- und Körperschall bei Schienenbahnen des öffentlichen Personennahverkehrs
- [8] R. Lerch, G. Sessler, D. Wolf, Technische Akustik, Springer 2009
- [9] L. Cremer, M. Heckl (neu bearbeitet von M. Möser, W. Kropp), Körperschall - Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, 2010, Springer Verlag
- [10] T. E. Vigran, Building Acoustics, Taylor & Francis 2008
- [11] H. Kuttruff, Akustik - Eine Einführung, 2004, S. Hirzel, Stuttgart
- [12] C. Hopkins, Sound Insulation, Elsevier, 2007
- [13] D. Thompson, Railway Noise and Vibration, Elsevier, 2009