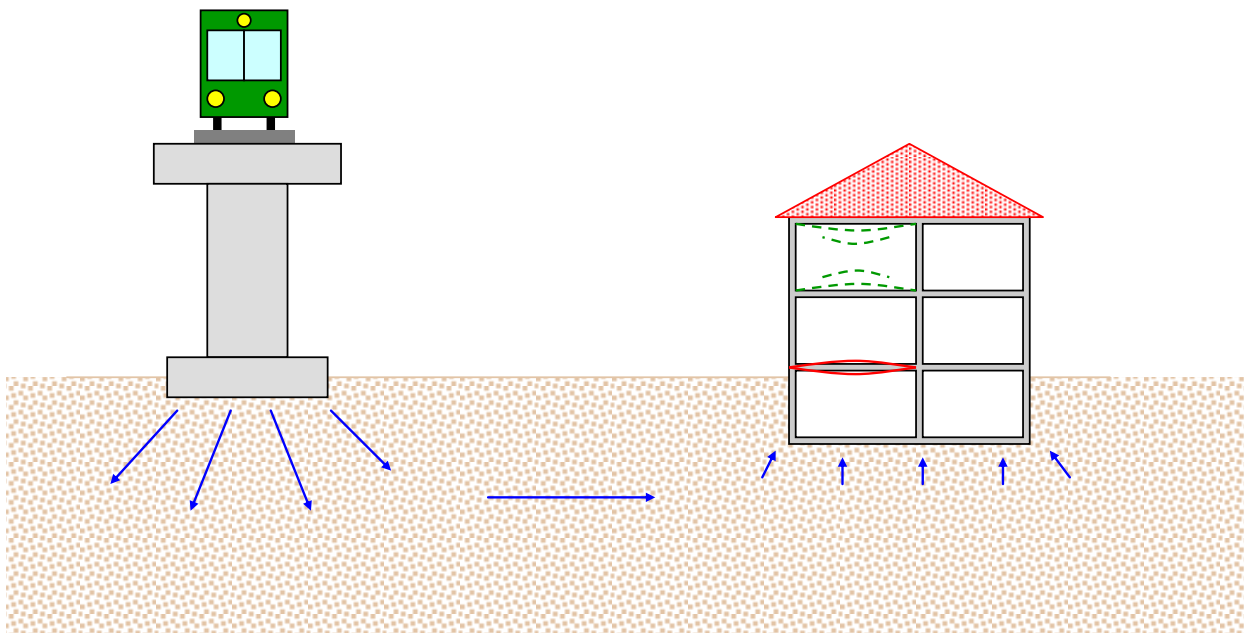


# Erschütterung und Körperschall

## 1 Einleitung

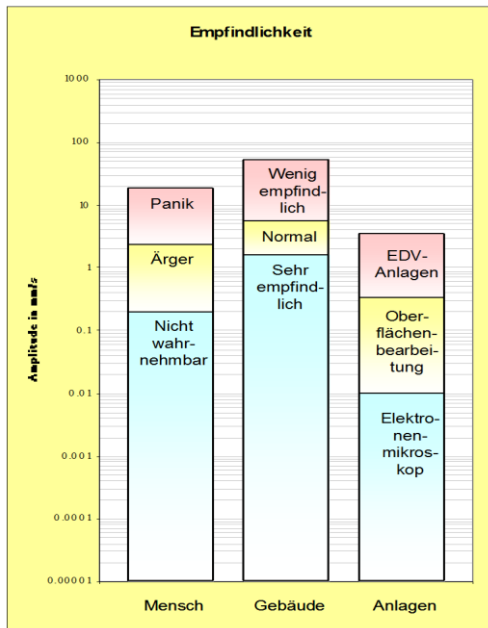
Abgestrahlter Körperschall wird durch die Vibrationen von Fussboden und Decke und zu einem geringeren Teil auch durch die Vibration der Wände verursacht. Ähnlich wie ein Lautsprecher durch Bewegung einer kreisförmigen Platte einen Schall erzeugt, verursachen Böden, Decken und Wände durch minimale Bewegungen, die oft gar nicht spürbar sind, einen teilweise gut hörbaren Schall (so genannter sekundär abgestrahlter Schall) der bei der Vorbeifahrt eines Zuges als tiefes Donnerrollen wahrgenommen wird.

Im Gegensatz zum direkten Schall lässt sich der Körperschall nicht durch eine Schallisolation reduzieren. Auch eine Verkleidung der Wände und Decken würde nur wenig Verbesserung bringen. Nur durch eine vollständige Isolation gegen Erschütterungen (z.B. Raum-in-Raum-Konstruktion) lässt sich der Körperschall eliminieren.



**Bild 1.1** Entstehung von Körperschall in einem Raum

Die Wahrnehmung von Erschütterungen ist zwar subjektiv, doch lassen sich - aufgrund statistischer Auswertungen - einige generelle Aussagen über die Störwirkung von Erschütterungen zusammenstellen. In Bild 1.2a sind grobe Bereiche für die Empfindlichkeit von Menschen, Gebäuden und Anlagen gegenüber Erschütterungen zusammengestellt. In Bild 1.2b ist die Beurteilung von 9 Wohnungen mit Eisenbahnerschütterungen zusammengestellt. Es scheint, dass Erschütterungen mit Peak-Werten über 1.2 mm/s generell als stark störend bewertet werden, während Erschütterungen unter 0.3 mm/s als nicht störend betrachtet werden.



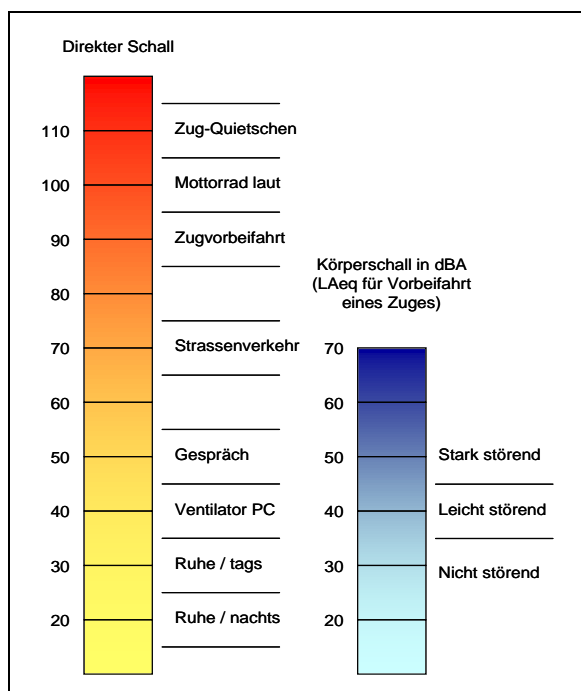
Wohnung	Messwert v-max in mm/s	Züge pro Stunde	Beurteilung
Kerland	1.3 mm/s	13	Stark störend
Schaufelb.	1.5 mm/s	13	Stark störend
Garmiswil	1.2 mm/s	8	Stark störend
Flawil	0.5 mm/s	5	Leicht störend
Küsnacht	0.7 mm/s	5	Leicht störend
Romansh.	0.9 mm/s	5	Leicht störend
Wolfwingert	0.3 mm/s	5	Nicht störend
Dietikon	0.25 mm/s	5	Nicht störend
Eng.Viertel	0.3 mm/s	10	Nicht störend

**Bild 1.2a** Empfindlichkeit von Menschen, Gebäuden und Anlagen gegen Erschütterungen

**Bild 1.2b** Beurteilung von Eisenbahnerschütterungen

Im Gegensatz zum direkten Schall ist Körperschall ein eher weniger bekanntes Phänomen. Dementsprechend existieren keine allgemein anerkannten Grenzen, die eine Einteilung in akzeptablen und nicht akzeptablen Körperschall erlauben. Vom direkten Schall ist bekannt, dass Schallpegel über 100 dBA als extrem laut bis schmerzhaft und Schallpegel unter 30 dBA als ruhig empfunden werden (vgl. Bild 1.3a). Allerdings kann ein Geräusch von 30 dBA in sehr ruhiger Umgebung vor allem nachts auch wieder als leicht störend empfunden werden. Der Schallpegel der Hintergrundgeräusche spielt hier eine wichtige Rolle.

In Bild 1.3b ist - wie in Bild 1.2b für Erschütterungen - die Beurteilung von 9 Wohnungen mit Körperschall zusammengestellt. Es scheint, dass Körperschall mit einem Vorbeifahrtspegel über 45 dBA generell als stark störend bewertet wird, während Vorbeifahrtspegel unter 35 dBA als nicht störend betrachtet werden.



Wohnung	Messwert Leq in dBA	Züge pro Stunde	Beurteilung
Kerland	50	13	Stark störend
Venez	48	8	Stark störend
Meier	60	5	Stark störend
Schleuniger	38	5	Leicht störend
Grau	34	8	Leicht störend
Schober	40	13	Leicht störend
Eng.viertel	35	8	Nicht störend
Waldpark	33	5	Nicht störend
Stäfa	32	5	Nicht störend

**Bild 1.3a** Beispiele von direktem Schall und Empfindlichkeit gegenüber Körperschall

**Bild 1.3b** Beurteilung von Körperschall infolge Eisenbahnerschütterungen

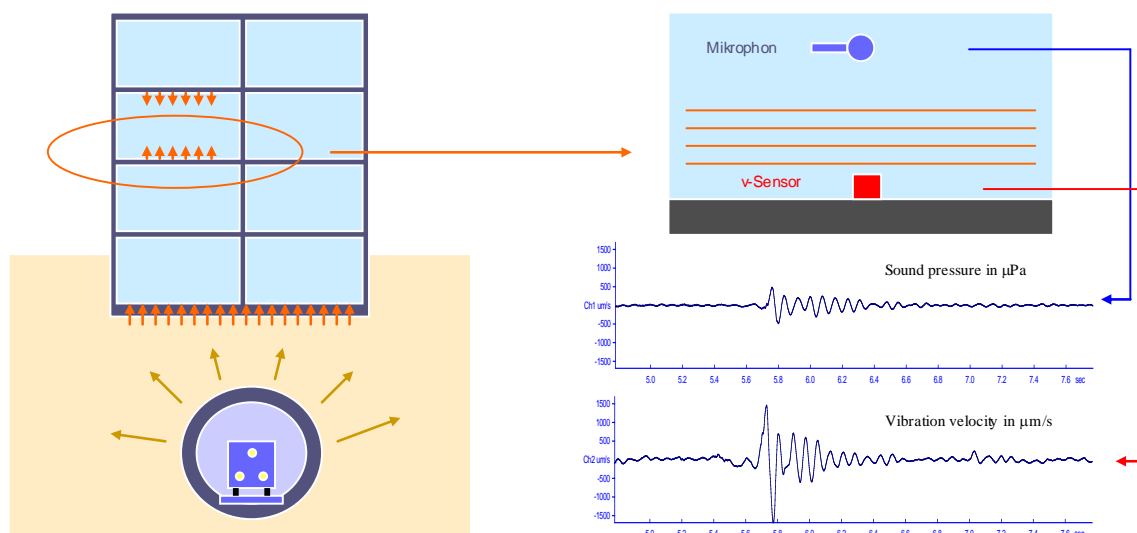
## 2 Grundlagen aus der Physik

### 2.1 Körperschall

Der sekundär abgestrahlte Schall (oder Körperschall) wird – wie oben erwähnt - durch die Schwingungen des Fussbodens, der Decke und der Wände erzeugt. Die vertikale Bewegung des Fussbodens erzeugt eine Druckwelle im Luftraum über dem Fussboden, welche – falls sie im hörbaren Frequenzbereich liegt – als Schall wahrgenommen wird.

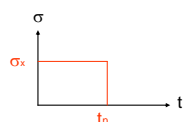
Wie in Bild 2.1 links dargestellt, verursacht der im Tunnel fahrende Zug Vibrationen im Erdreich, die sich auf das Gebäude übertragen und von den Geschossdecken verstärkt werden. Ein Beobachter im Freien vor dem Gebäude wird von der Durchfahrt des Zuges nichts hören. In einem Raum im Gebäude hingegen wird er die Durchfahrt des Zuges als mehr oder weniger lautes Dröhnen erleben.

Mit einem einfachen Experiment lässt sich das Phänomen des abgestrahlten Schalls veranschaulichen: Wir stellen ein Geophon auf den Fussboden und ein Mikrophon in Raummitte und hupfen kurz. Wie in Bild 2.1 rechts dargestellt, werden wir das Signal der Erschütterung und mit einer gewissen Verzögerung das Signal des Schalldruckes aufzeichnen können. Das Verhältnis der beiden Größen liegt in unserem Experiment bei 160  $\mu\text{m/s}$  zu 60  $\mu\text{Pa}$ , d.h. bei ca. 0.4 Pa/(mm/s).



**Bild 2.1** Sekundäre abgestrahlter Schall in einem Gebäude über einem Tunnel

Dieses Phänomen ist an sich nichts anderes als die Wellenausbreitung in einem Stab, der durch einen Impuls angeregt wird, wie in Bild 2.2 dargestellt. Der Impuls mit einer Dauer  $t_n$  und einer Spannung  $\sigma_x$  erzeugt eine komprimierte Zone der Länge  $x_n$  welche mit einer Geschwindigkeit  $c$  wandert. Die Verschiebung  $u$  ist durch Gl. (2.1) gegeben und dies kann umgewandelt werden in Gl. (2.2) und Gl. (2.3).



$$u = \frac{\sigma_x}{E} x_n = \frac{\sigma_x}{E} v_c t_n \quad (2.1)$$

$$\frac{u}{t_n} = \frac{\sigma_x v_c}{E} \quad (2.2)$$

$$v = \frac{\sigma_x v_c}{E} \quad (2.3)$$

**Bild 2.2** Druckwelle in einem Stab

Mit  $E = \rho \cdot v_c^2$  in Gl. (2.3) erhalten wir die Beziehung zwischen der aufgebrachten Spannung, welche auch den Druck in der komprimierten Zone darstellt, und der Partikelgeschwindigkeit:

$$\sigma_x = v \cdot \rho \cdot v_c \quad (2.4)$$

Mit  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  und  $v_c = 333 \text{ m/s}$  erhalten:

$$p \equiv \sigma_x = 0.4 \cdot v \cdot Pa \cdot \frac{1}{\text{mm/s}} \quad (2.5)$$

Dies bedeutet, dass – aufgrund der Theorie der Kompressionswellen im Stab – der Druck in der Luft über dem Fussboden aus der Schwinggeschwindigkeit des Bodens berechnet werden kann. Überdies gilt für normale Bedingungen ( $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  und  $v_c = 333 \text{ m/s}$ ), dass der Druck (ausgedrückt in Pa) zahlenmässig 40 % der Schwinggeschwindigkeit des Bodens (ausgedrückt in mm/s) entspricht.

Zahlreiche Untersuchungen zur Berechnung des Körperschalls empfehlen für die Berechnung des Körperschalls, die Schwinggeschwindigkeit des Bodens in dB umzuwandeln und 6 bis 10 dB zu addieren. Dies entspricht an sich der Korrelation:

$$p = 0.8 \cdot 1.2 \cdot v \cdot Pa \cdot \frac{1}{\text{mm/s}} \quad (2.6)$$

d.h. der effektive abgestrahlte Körperschall ist 2- bis 3-mal höher als der in Gl. 2.5 angegebene theoretische Wert. Dies lässt sich dadurch erklären, dass nicht nur der Boden sondern auch die Wände und die Decke einen Beitrag an den Körperschall leisten.

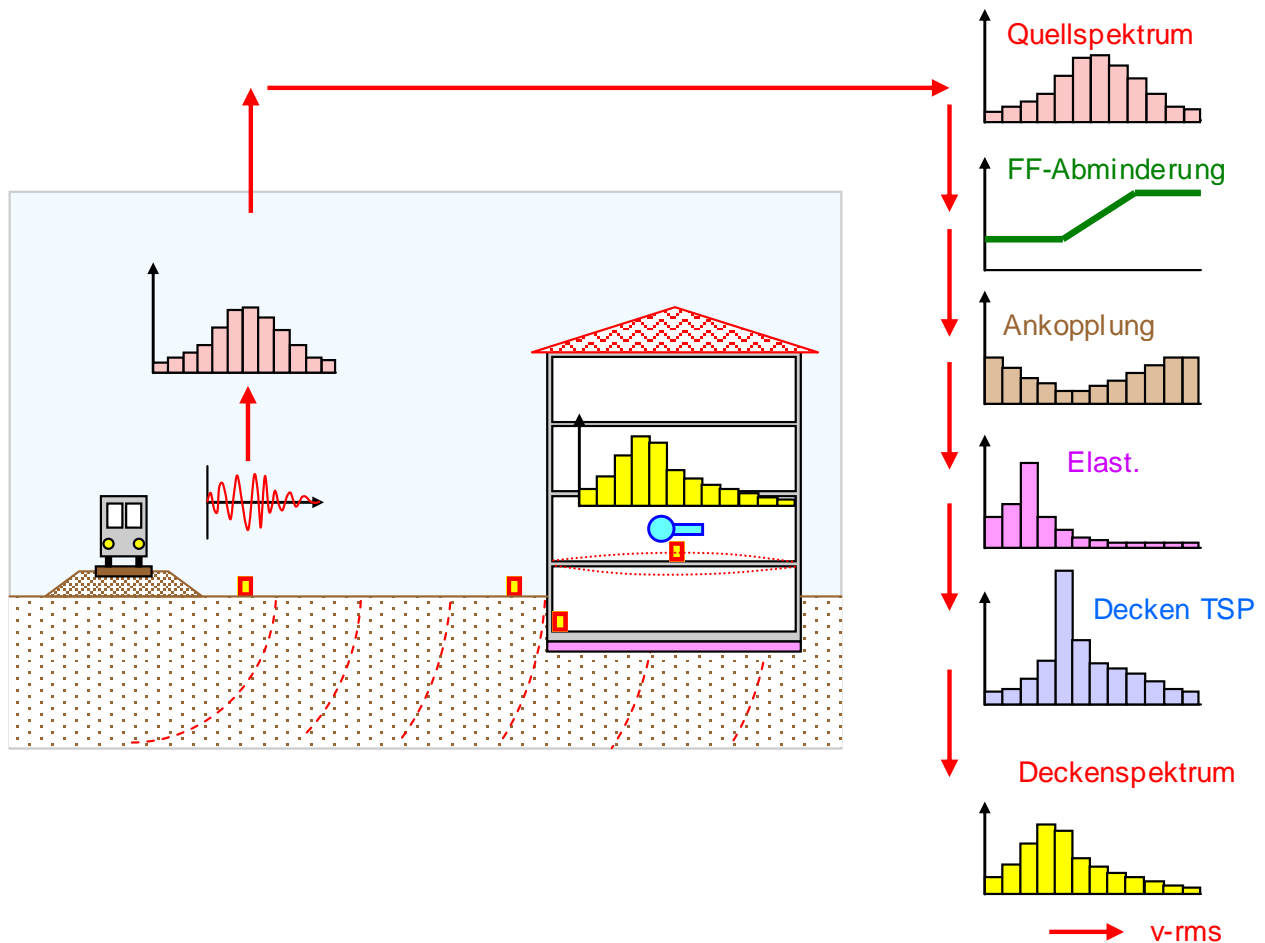
### 3 Berechnungsmodell für Erschütterung und Körperschall

Für die Berechnung von Erschütterungen und Körperschall in Gebäuden in der Nähe von Eisenbahnlinien wurde durch ZIEGLER CONSULTANTS gemeinsam mit den SBB das Programm VIBRA-1-2-3 entwickelt. Bild 3.1 veranschaulicht den Rechenvorgang in diesem Programm. Aus den im Frei-Feld neben dem Gleis gemessenen Erschütterungssignalen wird ein gemitteltetes Terzbandspektrum gebildet, das als Quellspektrum dient.

Die Abminderung im Frei-Feld zwischen dem Gleis und dem Gebäude wird durch den frequenz-abhängigen Abminderungs-Exponenten  $n$  in (Gl. 3.1) charakterisiert.

$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^n \quad (3.1)$$

Der Ankopplungseffekt bewirkt, dass die mittleren Frequenzen abgeschwächt werden, was durch das Ankopplungstransferspektrum berücksichtigt wird. Die elastische Lagerung des Gebäudes (falls vorhanden) ergibt eine Reduktion in den höheren Frequenzen und eine Verstärkung in der Eigenfrequenz. Dies wird durch das Transferspektrum für die elastische Lagerung erfasst. Die Eigenschwingung der Geschossdecke wiederum bewirkt eine Verstärkung im mittleren Frequenzbereich.



**Bild 3.1** Berechnungsablauf beim Terzspektralen-Modell

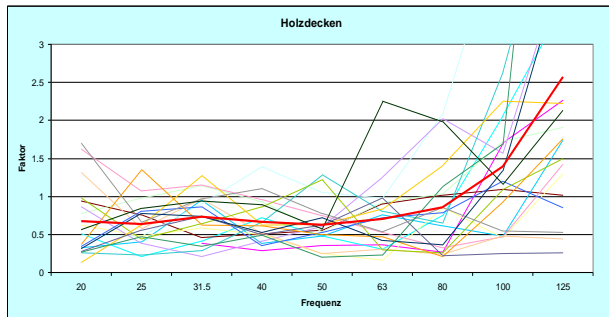
So erhalten wir durch Multiplikation des Quellspektrums mit allen erforderlichen Transferspektren das gesuchte Deckenspektrum. Damit haben wir zwar noch nicht das Erschütterungssignal auf der Geschossdecke aber wir können den RSS-Wert des Deckenspektrums bilden, der wiederum dem RMS-Wert des Erschütterungssignals entspricht. Aufgrund des RMS-Wertes können wir die gesuchten charakteristischen Größen wie  $v_{\max}$ ,  $KB_{\text{Ftr}}$  oder K-Wert berechnen.

Das gewählte Vorgehen ist bis zur Berechnung des RMS-Wertes mathematisch exakt. Die Berechnung der übrigen charakteristischen Größen wie  $v_{\max}$ ,  $KB_{\text{Ftr}}$  oder K-Wert ist allerdings eine Approximation. Sie basiert auf der Annahme, dass die Korrelationen zwischen den charakteristischen Größen, wie wir sie neben dem Gleis bestimmen, auch im Gebäude gelten. Umfangreiche statistische Untersuchungen zeigen, dass der hier eingeführte Fehler im Bereich von 5 bis 10 % liegt und somit neben den übrigen Unsicherheiten nicht ins Gewicht fällt.

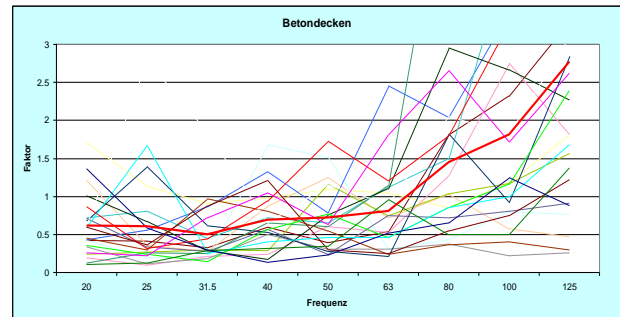
Um nun auch noch den Körperschall zu berechnen, wird das Verfahren weitergeführt mit einem Transferspektrum zwischen der Erschütterung auf der Geschossdecke und dem Schalldruck im Raum. Dieses Transferspektrum stellt die Beziehung her zwischen der Schwinggeschwindigkeit und dem Schalldruck und hat die Einheiten  $\text{Pa} / (\text{mm/s})$ . Wir erhalten auf diese Weise das unbewertete Schalldruck-Spektrum und können – mit Hilfe der A-Bewertung und der Summation der einzelnen Terzbänder – den bewerteten Schallpegel bestimmen.

Es ist zu beachten, dass dieser letzte Schritt des Transferspektren-Modells „nur“ eine Approximation darstellt, da der Körperschall nicht durch die Schwingung des Fussbodens allein erzeugt wird, sondern auch durch die Schwingungen der Zimmerdecke und der Wände. Deren Schwingverhalten wird bei diesem Vorgehen nicht explizit berücksichtigt.

Bild 3.2a zeigt die Transferspektren für Holzdecken und Bild 3.2b diejenigen für Betondecken. Der Unterschied der gemittelten Spektren ist – wie man in Bild 3.3 sieht – nicht sehr gross. Oberhalb 100 Hz steigen die Werte und auch die Streuung sehr stark an. Dies ist sicher zum Teil darauf zurückzuführen, dass in diesem Frequenzbereich die gemessenen Erschütterungsamplituden sehr klein sind und die Division von Schalldruck durch Erschütterung keine zuverlässigen Werte mehr ergibt.

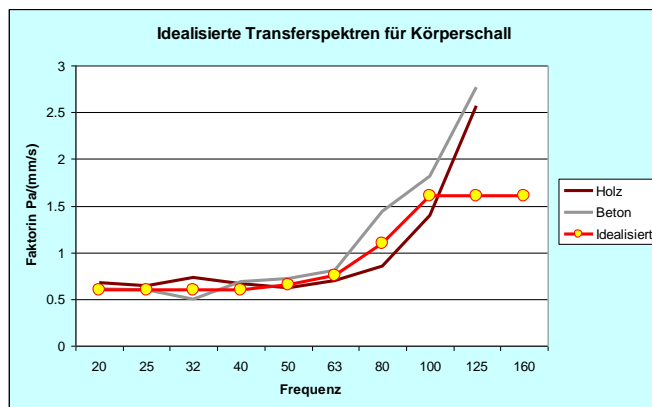


**Bild 3.2a** Transferspektren für 20 Holzdecken



**Bild 3.2b** Transferspektren für 20 Betondecken

Bild 4.9 zeigt das von den Mittelwertspektren für Holz- und Betondecken abgeleitete „Idealisierte Transferspektrum“. Oberhalb 100 Hz sind die Werte nicht mehr gesichert.



Freq.	Faktor
20	0.6
25	0.6
31.5	0.6
40	0.6
50	0.65
63	0.75
80	1.1
100	1.6
125	1.6

**Bild 3.3** Idealisierte Transferspektren

## 4 Körperschall-Untersuchungen im Toni-Areal

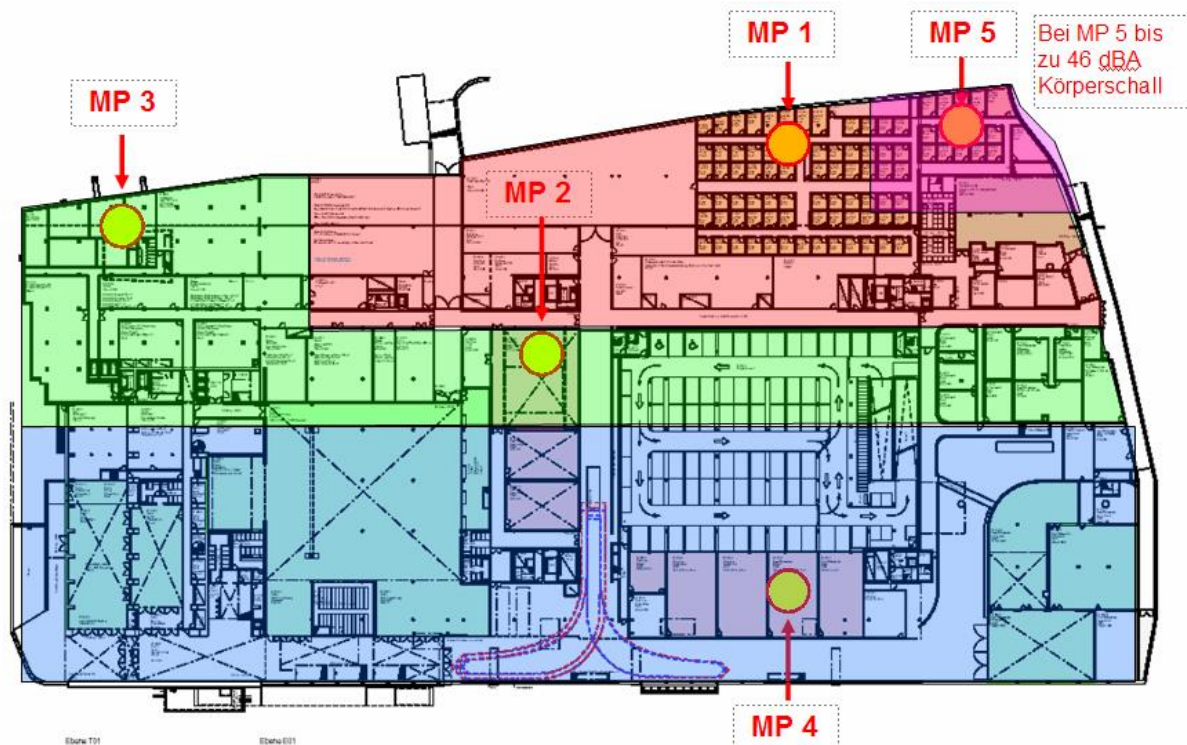
Wie man in Bild 4.1 erkennt befinden sich in unmittelbarer Nähe des Toni-Areals ein SBB-Viadukt und eine stark befahrene Strasse. Durch die vom Schienen- und Strassenverkehr erzeugten Vibrationen gelangen Schwingungen über das Erdreich in das Gebäude und führen zu Erschütterungen und zu störendem abgestrahlten Schall (sog. Körperschall). In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe von einfachen Messungen und Berechnungen grundsätzlich abgeklärt, ob diese Vibrationen zu störenden Schwingungen im Gebäude oder zu hörbaren Körperschall-Immissionen führen können und ob weitergehende Messungen erforderlich sind. Die Messungen zeigten, dass vor allem der Körperschall ein ernsthaftes Problem darstellt.

In einem zweiten Schritt wurden die Erschütterungen an 55 Messpunkten und der Körperschall an 21 Messpunkten aufgenommen. Aufgrund dieser Messungen wurde ein Zonenplan erstellt, wie er in Bild 4.2 für das Geschoss E1 dargestellt ist. Dieser Zonenplan erlaubte eine Anpassung der Nutzung und zeigte auch, dass für den Grossen Konzertsaal – wie in Kapitel 5 noch gezeigt wird – eine elastische Lagerung zur Reduktion des Körperschalls erforderlich ist.





**Bild 4.1** Toni-Areal vor dem Umbau



- Zone A mit LAeq < 30 dBA; Körperschall nicht wahrnehmbar
- Zone B mit LAeq 30 bis 35 dBA; Körperschall schwach wahrnehmbar
- Zone C mit LAeq 35 bis 40 dBA; Körperschall gut wahrnehmbar

**Bild 4.2** Messpunkte im Geschoss E1

## 5 Der Grosse Konzertsaal

Der grosse Konzertsaal der Zürcher Hochschule der Künste ist elastisch gelagert worden, damit die von den vorbeifahrenden Zügen erzeugten Erschütterungen keinen sekundär abgestrahlten Schall erzeugen. Nach Fertigstellung des Konzertsaals wurde durch eine kombinierte Erschütterungs- und Körperschall-Messung die Wirkung dieser elastischen Lagerung gemessen. In den nachstehenden Diagrammen sind die Ergebnisse dieser Messungen zusammengefasst.

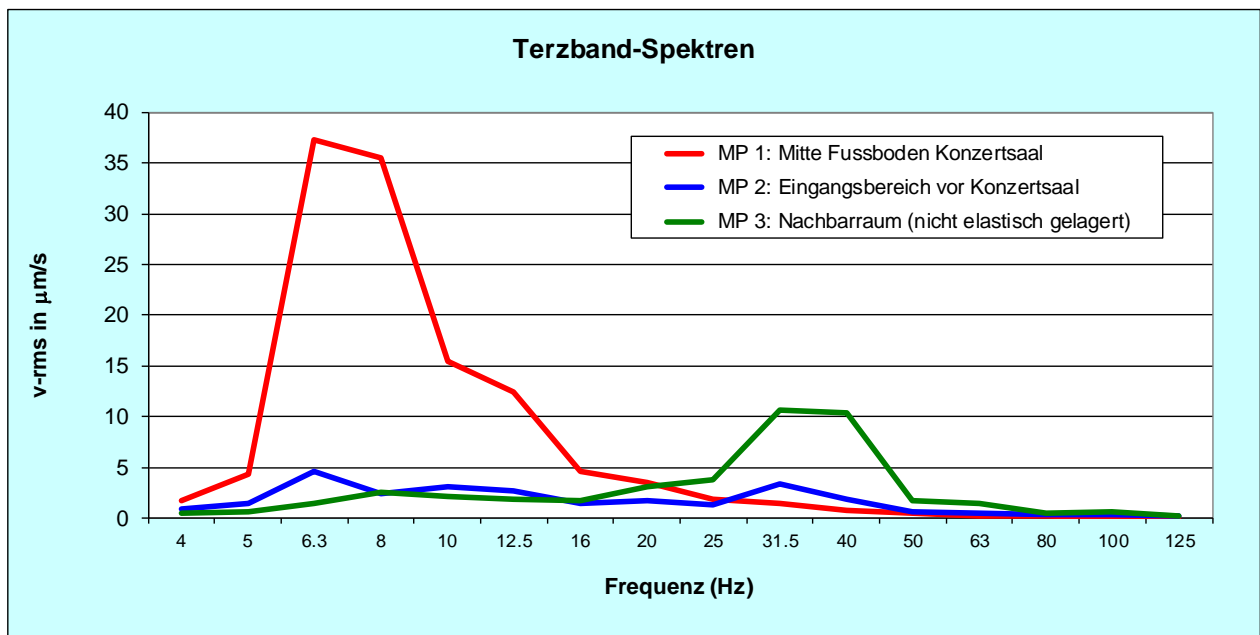


**Bild 5.1** Grosser Konzertsaal



**Bild 5.2** Elastisches Lager des Konzertsaals

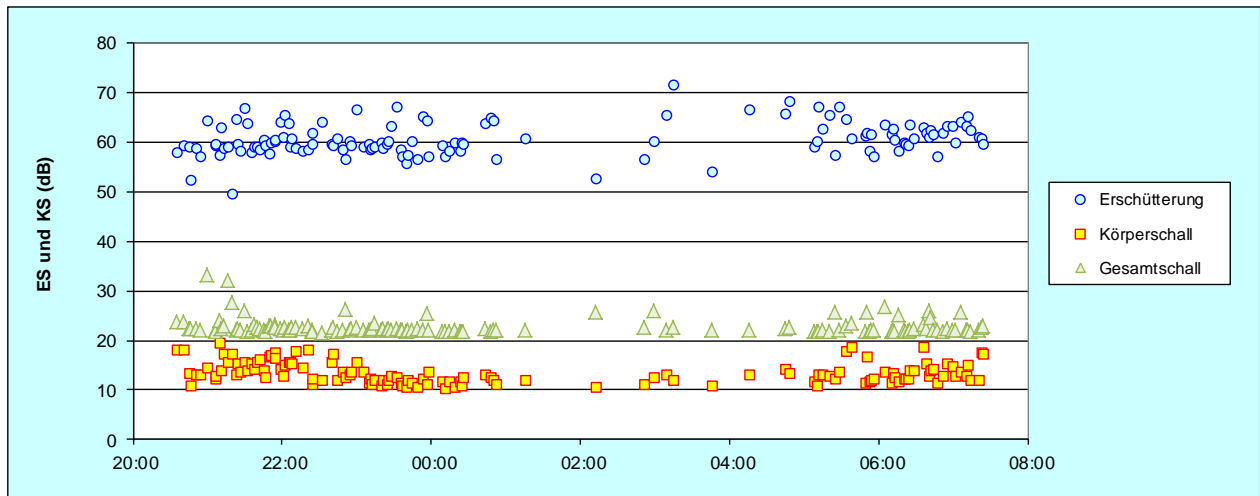
Bild 5.3 zeigt die Mittelwert-Terzbandspektren für die drei Messpunkte MP1 (Fussboden im Konzertsaal), MP2 (Fussboden vor dem Saal) und MP3 (Fussboden in benachbarten Raum). Im Konzertsaal liegt eine dominante Frequenz von 6 bis 8 Hz vor, die durch die Abstimmfrequenz der elastischen Lagerung von 7 Hz bedingt ist. Oberhalb von 30 Hz (d.h. im hörbaren Bereich) sind im Konzertsaal selbst nur noch ganz minime Schwingungsanteile vorhanden. Im benachbarten Raum, der nicht elastisch gelagert ist, sind im hörbaren Bereich wesentlich stärkere Anteile vorhanden.



**Bild 5.3** Mittelwert-Terzbandspektren für die drei Messpunkte MP1, MP2 und MP3 (gemittelt über alle Zugvorbeifahrten)



Bild 5.4 zeigt die Vorbeifahrtspegel für Erschütterung, für Körperschall und für den Gesamtschall. Der Körperschall, der als Anteil zwischen 25 und 125 Hz definiert ist, liegt zwischen 10 und 20 dBA und kann nicht mehr wahrgenommen werden. Auch der Gesamtschall liegt mit zumeist 22 dBA sehr tief. Man erkennt, dass der Körperschall primär durch die Stärke der Erschütterungen bestimmt wird, während der Gesamtschall zumeist einen konstanten Wert aufweist, was als Ursache eher eine Lüftungsanlage vermuten lässt.



**Bild 5.4** Erschütterungs- und Körperschallimmissionen

## 6 Schlusswort

Das Beispiel des Grossen Konzertsaals in der Zürcher Hochschule der Künste zeigt, dass durch eine elastische Lagerung mit einer Abstimmfrequenz von 7 Hz – auch in einem Gebäude unmittelbar neben einer Eisenbahnlinie – der Körperschall vollständig eliminiert werden kann. Allerdings lässt sich eine solche – doch recht aufwendige – elastische Lagerung nicht für alle Gebäude realisieren. Wir sind für die Planung von Gebäuden neben Eisenbahnlinien auf ein Berechnungsmodell angewiesen, das uns erlaubt, aus der im Raum vorhandenen Erschütterung den Körperschall zu berechnen.

Das Programm VIBRA-2 verwendet zu diesem Zweck ein empirisch ermitteltes Transferspektrum zwischen der Erschütterung des Fussbodens und dem Körperschall im Raum. Für durchschnittliche Wohnräume funktioniert das recht gut. Für grosse Räume wie Konzertsäle, Einkaufszentren oder Lagerhallen ist dieses Modell jedoch nur bedingt geeignet. Wir haben festgestellt, dass bei der Verwendung des VIBRA-2-Modells für grosse Räume mindestens 10 dB zugeschlagen werden müssen, um realistische Werte zu erhalten.

Es fehlt ein praxistaugliches Modell, das uns erlaubt für beliebige Raumgrössen eine zuverlässige Prognose für den Körperschall aufgrund der vorhandenen Erschütterungen zu erstellen.