

Einige praktische Aspekte bei der Bestimmung des Körperschalls

1 Einleitung

Der Körperschall ist in den letzten Jahren zu einem zentralen Thema bei der Diskussion um die Immissionen beim Schienenverkehr geworden. Sowohl bezüglich Art und Weise wie er gemessen werden soll als auch bezüglich Zumutbarkeit (d.h. zulässige Immissionswerte) sind noch viele Fragen offen. Da es sich beim wahrgenommenen Schall (in einem Haus neben einer Eisenbahnlinie) zumeist um ein Gemisch von direktem und abgestrahltem Schall handelt, ist die Aufteilung in die beiden Anteile in der Regel nicht ohne weiteres möglich.

Methoden zur approximativen Trennung der beiden Anteile sind in der Praxis gut bekannt. Im Folgenden sollen zwei häufig verwendete Methoden, ihre Eignung für verschiedene Anwendungen und die dabei auftretenden Probleme und Unsicherheiten diskutiert werden.

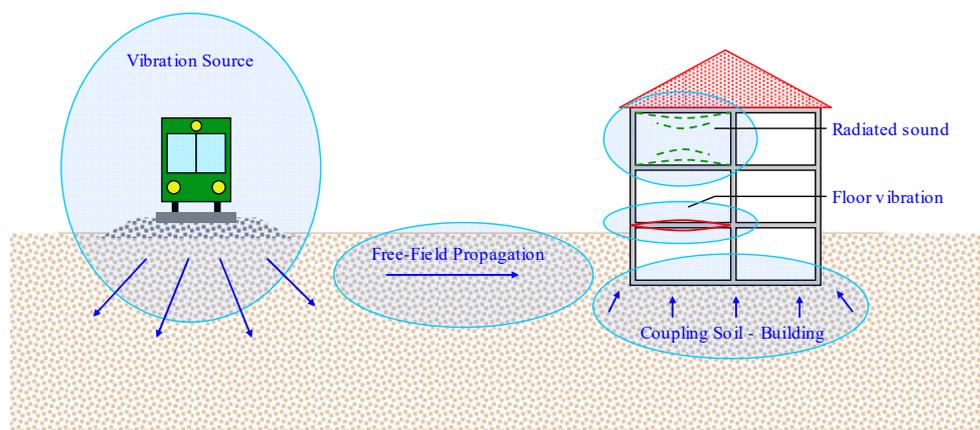


Bild 1.1 Entstehung von Erschütterungen und Körperschall

2 Entstehung von Körperschall

Sekundärer abgestrahlter Schall (sog. Körperschall) wird durch die Vibrationen von Fussboden und Decke und zu einem gewissen Teil auch durch die Vibrationen der Wände verursacht. Die vertikale Bewegung des Fussbodens erzeugt in der Luft eine Druckwelle, die – falls sie im richtigen 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. $0.4 \text{ Pa}/(\text{mm/s})$.

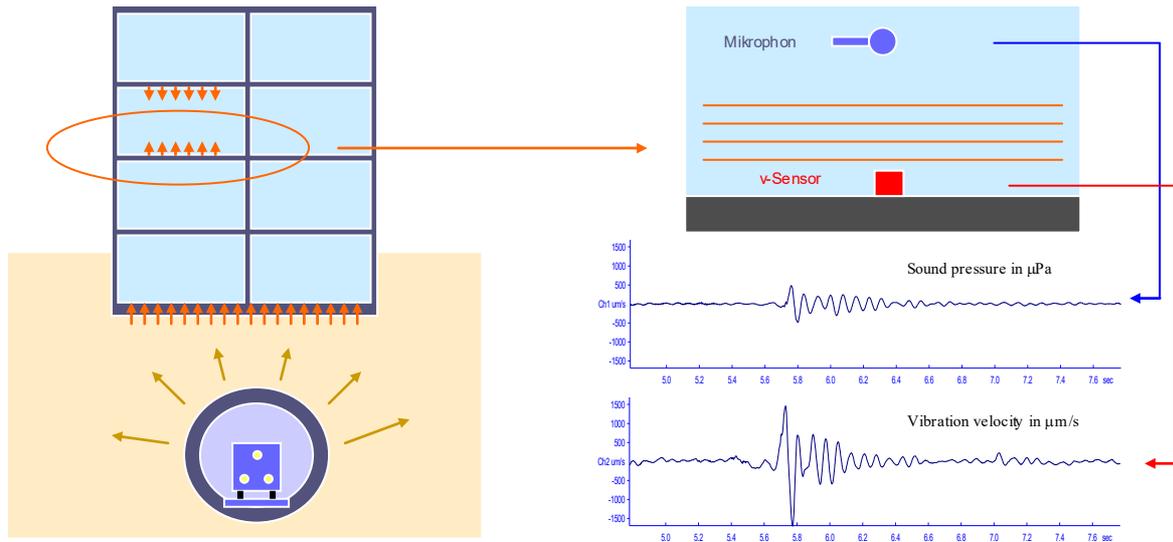
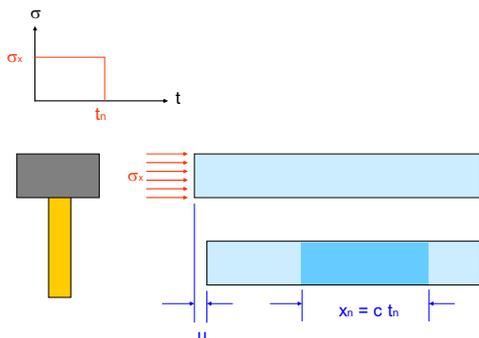


Bild 2.1 Entstehung von Körperschall

Dieses Phänomen ist an sich nichts anderes als die bekannte Wellenausbreitung in einem Stab, der mit einem Schlag angeregt wird (siehe Bild 2.2). Der Impuls mit einer Dauer t_n und einer Druckspannung σ_x erzeugt eine komprimierte Zone der Länge x_n , die mit einer Geschwindigkeit c im Stab wandert. Die Verschiebung u berechnet sich mit Hilfe von Gleichung (2.1) und diese kann umgewandelt werden in Gleichung (2.2) und (2.3), um die Partikelgeschwindigkeit zu berechnen.



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

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

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

Bild 2.2 Druckwelle in einem Stab

Unter Verwendung der Beziehung $E = \rho v_C^2$ in Gleichung (2.3) erhalten wir die Beziehung zwischen der aufgetragenen Spannung und der Partikelgeschwindigkeit:

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

Die aufgetragene Spannung entspricht dem Schalldruck in der Luft und die Partikelgeschwindigkeit der Schwinggeschwindigkeit des Fussbodens. Mit $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^2$ und $v_C = 333 \text{ m/s}$ erhalten wir:

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

Dies bedeutet, dass – aufgrund der Theorie der Longitudinalwellen in einem Stab – der Druck der Luft über dem Boden sich berechnen lässt aus der Schwinggeschwindigkeit des Fussbodens. Für normale Bedingungen ($\rho = 1.2 \text{ kg/m}^2$ und $v_C = 333 \text{ m/s}$) beträgt somit der Schalldruck (in Pa) zahlenmässig 40 % der Schwinggeschwindigkeit (in mm/s) des Fussbodens. Wie man in Bild 2.1 (rechts) sieht, wird dies durch das einfache Experiment mit Hüpfen bestätigt.

In der Literatur findet sich häufig die Empfehlung, zur Bestimmung des Körperschalls die Schwinggeschwindigkeit des Fussbodens zu verwenden, diese in dB umzuwandeln und 6 bis 10 dB zu addieren. Dies entspricht an sich der Korrelation in Gleichung (2.6):

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

d.h. der effektive abgestrahlte Körperschall ist 2- bis 3-mal höher als beim theoretischen Fall in Gleichung (2.5). Dies lässt sich leicht durch den Umstand erklären, dass nicht nur der Fussboden sondern auch die Decke und die Wände einen Beitrag an den Körperschall leisten.

3 Probleme bei der Messung von Körperschall

Bei der Bestimmung des Körperschalls unterscheiden wir zwischen der Situation, bei der sich das Gebäude über einem Tunnel befindet, und der Situation, bei der das Gebäude neben dem Gleis oder über einem Tunnelportal liegt. Bei Gebäuden über dem Tunnel lässt sich der Körperschall relativ problemlos durch Messung des Schallpegels im Raum bestimmen, da in der Regel der gemessene Schall zu 100% durch den abgestrahlten Schall verursacht wird. Trotzdem sind folgende Problempunkte zu beachten:

- Der abgestrahlte Schall ist nicht homogen im Raum verteilt. Durch eine vernünftige Platzierung des Mikrophons lässt sich dieses Problem jedoch sicherlich befriedigend lösen.
- Der Schall kann durch Fremdgeräusche - z.B. durch Vibrationen verursachtes Klirren von Gläsern, durch Haustechnik oder auch durch das Singen der Vögel im Garten - erhöht sein. Fremdgeräusche müssen eliminiert werden.

Bei Gebäuden neben dem Gleis oder über einem Tunnelportal ist die Bestimmung des Körperschalls immer problematisch, da wir immer eine Kombination von direktem und abgestrahltem Schall vorfinden. Auch bei Gebäuden über Tunnelportalen können direkte Schallanteile – auch wenn sie vom Menschen nicht wahrgenommen werden – eine erhebliche Erhöhung des Gesamtschalls bewirken. Eine exakte Trennung zwischen direktem Schall und Körperschall ist nicht möglich, doch stehen verschiedene Näherungsverfahren zur Verfügung.

4 Methoden zur Bestimmung des Körperschalls

Für die Bestimmung des Körperschalls stehen grundsätzlich die Methoden der Beschallung, der Frequenztrennung und der Transferspektren zur Verfügung. Im Folgenden werden diese drei Verfahren kurz skizziert.

Beschallung

Schritt 1: Messung des Schalls bei Zugdurchfahrt, d.h. direkter Schall und abgestrahlter Schall werden gemessen.

Schritt 2: Messung bei Simulation mit Schallquelle. Da bei der Beschallung keine Vibrationen verursacht werden, wird hier nur der direkte Schall gemessen.

Schritt 3: Durch Differenzbildung zwischen den Messungen aus Schritt 1 und Schritt 2 wird der Körperschall ermittelt.

Frequenztrennung

Schritt 1: Messung des Schalls bei Zugdurchfahrt, d.h. direkter Schall und abgestrahlter Schall werden gemessen.

Schritt 2: Frequenztrennung indem nur die Anteile zwischen 20 und 125 Hz berücksichtigt werden.

Die Anteile unter 20 Hz sind insofern nicht relevant, da das menschliche Ohr erst ab 30 bis 35 Hz Luftschwingungen als Schall wahrnimmt. Bei der Frequenztrennung wird vorausgesetzt, dass im Bereich zwischen 20 und 125 Hz der gesamte abgestrahlte Schall enthalten ist und dass in diesem Frequenzbereich kein direkter Schall vorhanden ist. Oder zumindest, dass sich die dabei begangenen Fehler kompensieren!

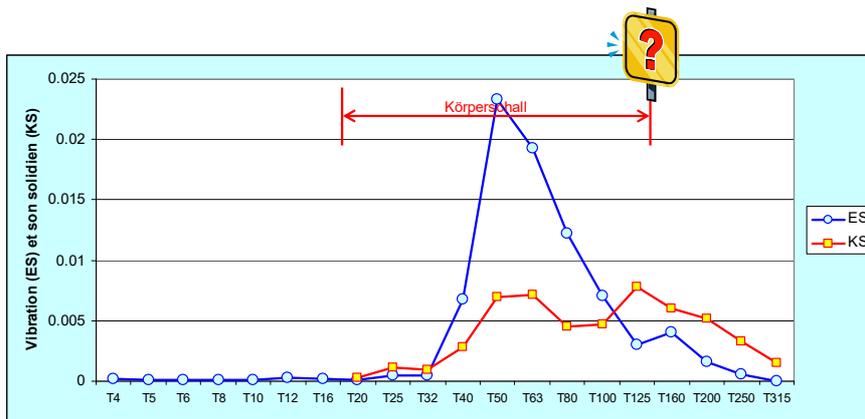


Bild 4.1 Bestimmung des Körperschalls mittels Frequenztrennung

Transferspektren

Schritt 1: Messung der Erschütterungen bei Zugdurchfahrt.

Schritt 2: Berechnung des Körperschalls aufgrund der Erschütterungen des Fussbodens, d.h. Multiplikation des Fussboden-Terzbandspektrums mit dem Transferspektrum zwischen Fussboden und Schalldruck in Raummitte.

Die Methode der Transferspektren setzt voraus, dass allgemeingültige Transferspektren zwischen der Erschütterung des Fussbodens und dem Schalldruck in Raummitte existieren oder ermittelt werden können. Sie setzt auch voraus, dass der Körperschall in einem Raum primär durch den Fussboden und die Decke verursacht wird und dass die Decke die gleichen Schwingungen wie der Boden aufweist.



Bild 4.2 Messanordnung für ES und KS

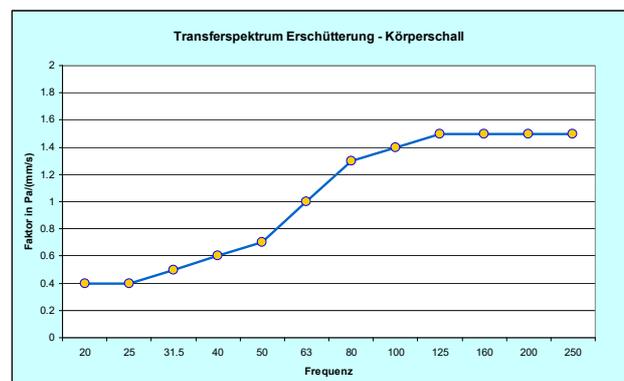
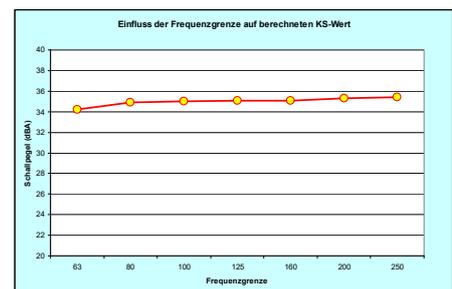
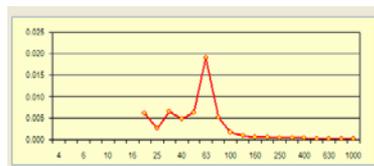


Bild 4.3 Aus 20 Wohnungen empirisch ermitteltes Transferspektrum

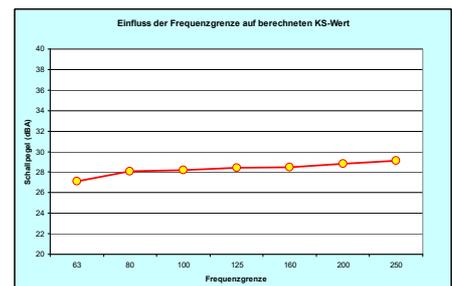
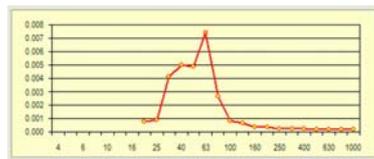
5 Frequenzgehalt des Körperschalls

In den nachstehenden Bildern sind vier Beispiele von Körperschallmessungen und die dabei festgestellten Frequenzgehalte dargestellt. Die ersten beiden Beispiele sind reine Tunnelsituationen, Beispiel 3 ist ein Tunnelportal und Beispiel 4 ist eine offene Strecke. Das Diagramm in der Mitte gibt das über alle Zugdurchfahrten (ca. 100 pro Gebäude) gemittelte (unbewertete) Terzbandspektrum für Schalldruck wieder. Das Bild rechts zeigt den mittleren Körperschallpegel bei unterschiedlicher Festlegung der Frequenzgrenze.

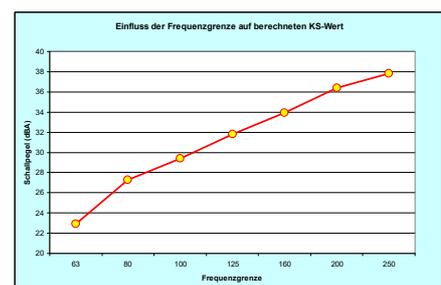
Offensichtlich steigt der Wert für den Körperschall bei Tunnelsituationen ab 80 Hz nicht mehr stark an während er bei offener Strecke wegen des Direktschallanteils stetig ansteigt. Als adäquate Frequenzgrenze würde man aufgrund der ersten beiden Beispiele 80 oder 100 Hz wählen. Die in der Praxis oft verwendete Frequenzgrenze von 125 Hz liegt somit auf der konservativen Seite.



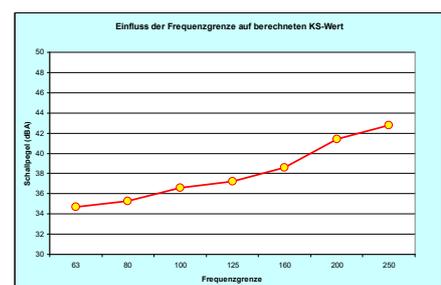
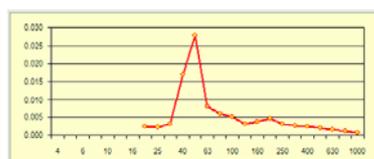
Beispiel 1: Filmsaal im UG des Kunsthaus Zürich / Zug im Tunnel



Beispiel 2: Wohnzimmer in einem älteren Wohnhaus in Zürich / Zug im Tunnel



Beispiel 3: Schlafzimmer in einem Wohnhaus über Tunnelportal in Leuk

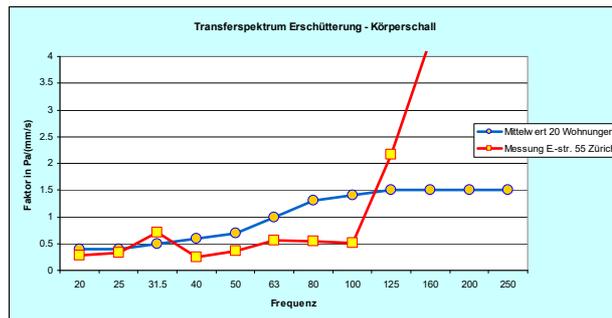


Beispiel 4: Schlafzimmer (auf Gleis-abgewandter Seite) in einem neuen Wohnhaus in Wettingen / Zug auf offener Strecke

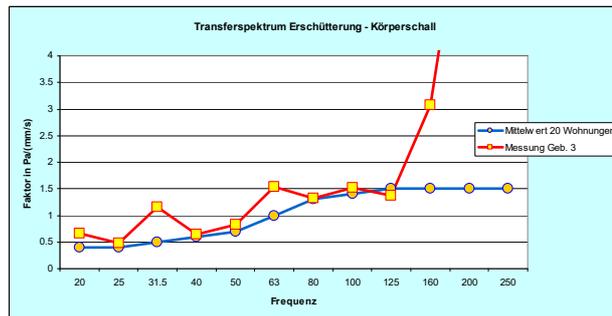
6 Transferspektrum Erschütterung → Körperschall

In den nachstehenden Bildern sind sechs Beispiele von Körperschallmessungen und die dabei ermittelten Transferspektren dargestellt. Die Diagramme rechts geben (in rot) das mittlere Transferspektrum von Erschütterung zu Schalldruck wieder. Als Orientierungshilfe ist (in blau) das aus 20 Wohnungen ermittelte Transferspektrum eingezeichnet.

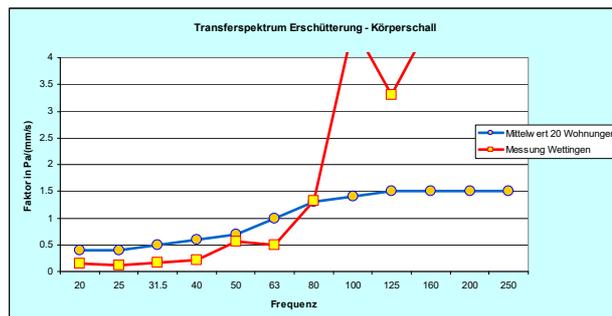
Bei den Beispielen 1 bis 3 erkennt man eine gewisse Ähnlichkeit zwischen den beiden Spektren. Die Abweichungen sind erheblich. In den Beispielen 4 bis 6 sind die Unterschiede jedoch extrem gross und man kann sich mit Recht fragen, ob die Erschütterung, die man an einem Punkt gemessen hat, eine genügend zuverlässige Grundlage für die Berechnung des Körperschalls darstellt.



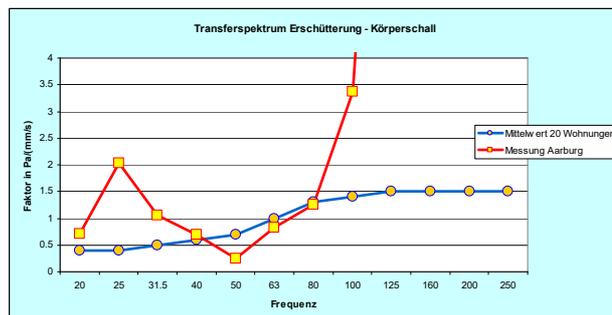
Beispiel 1: Wohnzimmer in einem älteren Wohnhaus in Zürich



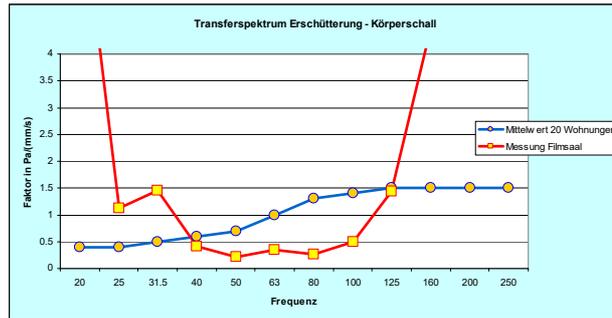
Beispiel 2: Wohnzimmer in einem älteren Wohnhaus in Sierre



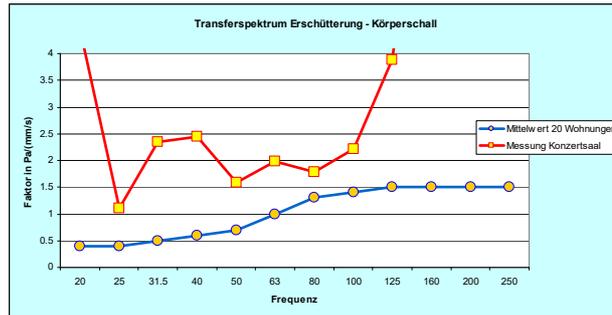
Beispiel 3: Schlafzimmer in einem neuen Wohnhaus in Wettingen



Beispiel 4: Wohnzimmer in einem neueren Wohnhaus in Aarburg



Beispiel 5: Filmsaal im UG des Kunsthaus Zürich



Beispiel 6: Konzertsaal im Konservatorium Zürich

7 Schlussfolgerungen

Grundsätzlich ist die Bestimmung des Körperschalls sowohl mit Beschallung als auch nach der Methode der Frequenztrennung oder nach der Methode der Transferspektren möglich. Die Methode der Beschallung kommt aus Kostengründen häufig nicht in Frage. Bei den anderen beiden Methoden, die kostenmässig nicht weit auseinander liegen, stellt sich die Frage, mit welcher Methode die Unsicherheiten geringer gehalten werden können. Gegenwärtig sind umfangreiche Auswertungen im Gange, um diese Frage beantworten zu können.

Von der Methodik her gesehen haben beide Verfahren ihre Vor- und Nachteile. Bei der Methode der Frequenztrennung wird die zu bestimmende Grösse *direkt* gemessen. Es verbleibt jedoch eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Wahl der Grenzfrequenz. Für Tunnelsituationen ist die direkte Messung des Körperschalls sicher die ideale Lösung. Bei der Transferspektrenmethode wird die zu bestimmende Grösse *indirekt* gemessen. Das Problem der Frequenztrennung tritt hier nicht auf, doch haben wir hier das Problem der richtigen Definition des Transferspektrums. Hier dürften wegen den verschiedenen Einflüssen auf den Körperschall und wegen den sehr unterschiedlichen Bauwerkstypen erhebliche Unsicherheiten verbleiben. Für Prognosen bei neu zu erstellenden Gebäuden ist diese Methode natürlich die einzige, die uns zur Verfügung steht.