

Die Wirksamkeit von Unterschottermatten im eingebauten Zustand

Peter Billeter

ehem. Mitarbeiter Gruner AG

und

Wolfram Berger, Dr. rer. nat., dipl. Physiker

Abteilungsleiter, Gruner AG, CH-4020 Basel

1. Einleitung

Im neu erstellten Adlertunnel zwischen Liestal und Muttenz wurden vor Inbetriebnahme im Auftrag der SBB Schwingungsmessungen am Ober- und im Unterbau vorgenommen. Die Schwingungsanregung geschah durch einen Bauzug mit schlechtem Rollmaterial. Da sich im Unterbau direkt unter der Fahrbahn ein Entwässerungskanal befindet, konnte neben der Schwingungsübertragung in seitlicher Richtung gegen die Bankette hin auch die Übertragung in vertikaler Richtung, d.h. in Richtung der massgebenden Lastabtragung, erfasst werden (Abb. 1). Das Ziel der Messungen bestand darin, detaillierte Kenntnisse über die Dämmwirkung des Schotter-Oberbaus mit und ohne Unterschottermatten (USM) zu gewinnen. Die im Adlertunnel streckenweise eingesetzten USM unter dem Schotterbett sind vom Typ Sylodyn DN 622, als seitliche Matten gegen die Bankette hin wurde Sylomer SM319 verwendet. Aufgrund der besonderen Situation mit einem Zugang unterhalb der Fahrbahn bot sich die seltene Möglichkeit, die Wirksamkeit – d.h. die physikalische Dämm- bzw. Dämpfungswirkung – der USM im eingebauten Zustand direkt und zuverlässig messtechnisch zu überprüfen. Die Messresultate liefern bestmögliche Erfahrungswerte für die zukünftige Verwendung von USM.

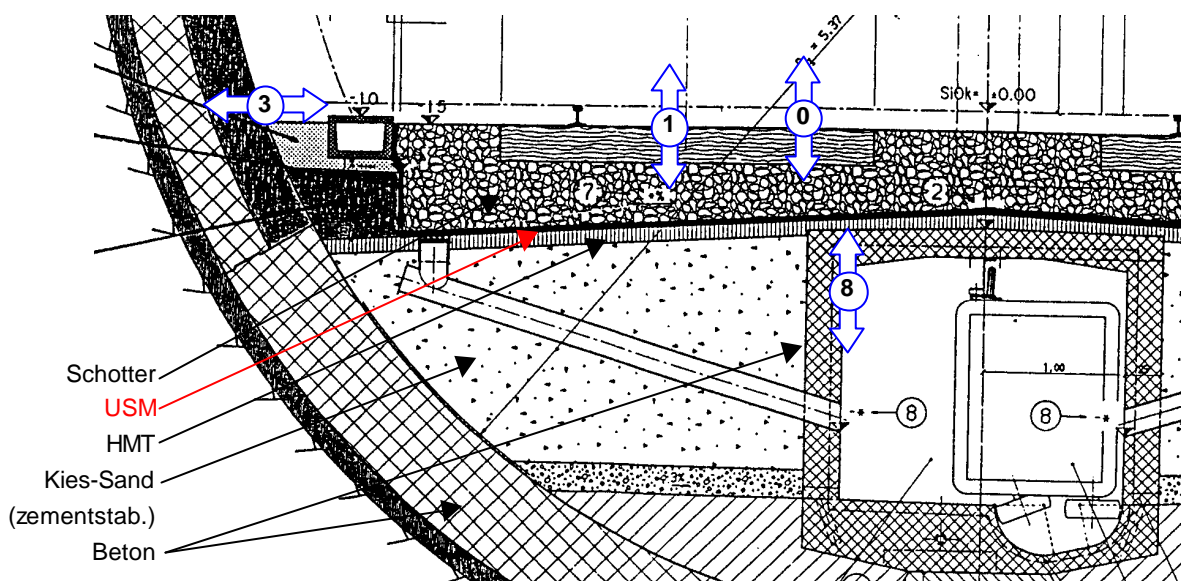


Abb. 1: Tunnelquerschnitt: Ober- und Unterbau, Messpunkte mit den relevanten Schwingrichtungen

2. Messkonzept und Datenanalyse

Für die Erschütterungsmessungen am Emissionsort und im unmittelbaren Nahfeld nach dem Gleisoberbau wurden Schwinggeschwindigkeitssensoren einerseits an den Schienen und auf den Schwellen (Emissionsmessungen) und andererseits an den Wänden des Kabelkanals direkt unterhalb des Oberbaus sowie bei der Tunnelwand (Bankett) in zwei bezüglich Längsachse und Untergrund vergleichbaren Tunnel-Querschnitten mit und ohne USM montiert. Die Messpunkte in den Tunnelquerschnitten sowie die dominanten Schwingungsrichtungen infolge der massgebenden radialen Abstrahlung sind in Abbildung 1 dargestellt. Gesamthaft wurden pro Messquerschnitt 4 Messpunkte installiert, die entweder mit uniaxialen (Schienen und Schwellen) oder triaxialen Geschwindigkeitssensoren besetzt waren. Emission und übertragene Schwingungen wurden mit total 12 Kanälen erfasst. Im folgenden werden nur die Messresultate der Kanäle mit dominantem Schwingverhalten analysiert. Es sind dies:

Kanal	Ort / Lage	Messrichtung
0	Am Schienenflansch im Messquerschnitt	vertikal
1	Schwellenmitte im Messquerschnitt	vertikal
2	Am Schienenflansch 9 m vor dem Messquerschnitt	vertikal
3	Im Messquerschnitt beim Übergang Bankett-Tübbing	horizontal in Querrichtung
8	Im Messquerschnitt knapp unter der Decke des Kanals	vertikal

Mit der Anordnung der Sensoren an der Schiene (Kanäle 0 und 2) konnte über die Kreuzkorrelation der Messdaten die effektive Fahrgeschwindigkeit des Testzuges ermittelt werden (vgl. unten). Als Testzug für die Schwingungsanregung wurde ein Bauzug mit einem Dieselfahrzeug Tm 2/2, dem Fahrleitungs-Montagewagen, einem geschlossenen und zwei offenen Güterwagen eingesetzt. Die Fahrgeschwindigkeit war auf rund 47 km/h in Richtung Muttenz und auf rund 25 km/h in Richtung Liestal beschränkt. Die Rundlaufqualität der Räder der Güterwagen war äusserst schlecht (starke Schläge infolge Flachstellen der Räder), so dass auch bei begrenzten Fahrgeschwindigkeiten eine stärkere Schwingungsanregung vorhanden war, als bei der Durchfahrt moderner Personenzüge. Es wurden rund 30 Zugdurchfahrten bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten ausgewertet

Die Messkette bestand aus vier Schwingungsmessgeräten Syscom/Bartek MR2002 mit drei triaxialen und drei uniaxialen Geschwindigkeitssensoren MS2003 sowie aus einer Netzwerkzentrale NCC2002 Syscom/Bartek zur Steuerung und Synchronisierung der MR2002. Die Signale wurden mit einer Samplerate von 400 Hz digitalisiert und ab 160 Hz gefiltert. Bedingt durch Sensor- und Filtertyp ist eine zuverlässige Signalanalyse beinahe bis zur Nyquistfrequenz von 200 Hz möglich. Zur Auswertung wurden spezifische Signalverarbeitungsprogramme eingesetzt, die auf den Methoden der Signalanalyse zufälliger Signale (Random data) basieren und nachfolgend kurz beschrieben sind. Detailliertere Angaben sind z.B. bei Bendat & Piersol (1986) und Newland (1993) zu finden.

Das Messsignal am Oberbau, das Eingangssignal, wird im folgenden als $x(t)$, das Messsignal im Unterbau, das Ausgangssignal, als $y(t)$ bezeichnet. Es wird vorausgesetzt, dass die Signale synchron und ohne nennenswerte Digitalisierungsfehler mit fester Samplerate abgetastet wurden. Verwendet wird primär die Verknüpfung des Zeit- und des Frequenzraums via die Fourier-Transformation. Zur Trennung von deterministischen und stochastischen Signalanteilen wird eine blockweise Signalbearbeitung und die anschliessende Mittelung eingesetzt. Mit dem Begriff deterministisch werden diejenigen Signalanteile bezeichnet, die aus dem angenommenen physikalischen Prozess der Signalübertragung vom Oberbau bzw. den Gleisen auf den Unterbau bzw. den Tunnel-Tübbing entstehen. Als stochastisch werden alle

anderen, zufälligen und nicht prozessrelevanten Anteile (Rauschen, Nebenwege) betrachtet. Es werden die folgenden Operationen eingesetzt:

1.) Die normierte Kreuzkorrelation:
$$R_{xy}(t) = \frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^{+T} \frac{x(t) \cdot y(t+t)}{s_x \cdot s_y} dt = F^{-1}\{S_{xy}(f)\}$$

($F^{-1}\{\}$ ist die inverse Fourier-Transformation). Die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{xy}(?)$ gibt an, wie stark zwei Signale zum Zeitpunkt $?_i$ korreliert sind. Mit der Versatzzeit $?_{max}$ des Maximalwerts von $R_{xy}(?)$ lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen $x(t)$ und $y(t)$ bestimmen. Die Funktion wurde auf die Messsignale an den Gleisen zur Bestimmung der effektiven Zuggeschwindigkeit angewandt. Es ist dann die Fahrgeschwindigkeit v des Zuges: $v = L/?_{max}$ mit $L = 9 \text{ m}$ = Abstand der beiden Messpunkte.

2.) Die Fourier-Transformierte $X(f)$ von $x(t)$:
$$X(f) = F\{x(t)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^{+T} x(t) e^{-i(2\pi f)t} dt$$

3.) Die einseitigen (Auto-)Leistungsspektren $S_{xx}(f)$ bzw. $S_{yy}(f)$:
$$S_{xx}(f) = (1/T) \cdot X(f) \cdot X^*(f)$$

4.) Das Kreuzleistungsspektrum $S_{xy}(f)$:
$$S_{xy}(f) = (1/2T) \cdot X^*(f) \cdot Y(f) = |S_{xy}(f)| \cdot e^{-i\varphi_{xy}(f)}$$

Für die Analyse der gemessenen Signale $x(t)$ und $y(t)$ – also z.B. der Schwinggeschwindigkeiten auf dem Oberbau und im Unterbau – wird wie folgt vorgegangen:

Das Gesamtsignal der Dauer T und der Anzahl Messwerte N wird in n_B -Blöcke der Dauer T_B mit N_B Messwerten zerlegt, wobei sich die Blöcke überlappen dürfen. Die Signale der einzelnen Blöcke der Dauer T_B werden im Zeitraum mit Hamming-Fenstern gewichtet. Die oben genannten spektralen Operationen werden auf die einzelnen Blöcke angewandt. Die Größen $S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$ und $S_{xy}(f)$ der einzelnen Blöcke werden addiert, anschliessend mit der Blockanzahl n_B gemittelt und letztlich varianztreu normiert. Daraus entstehen die gemittelten Größen $\overline{S_{xx}(f)}$, $\overline{S_{yy}(f)}$ und $\overline{S_{xy}(f)}$. Durch die blockweise Mittelung werden zufällige Signalanteile gedämpft und signifikante Spektralwerte verstärkt. Die Methode ist streng genommen nur bei stationären Signalen zulässig. Es wird jedoch angenommen, dass die Messsignale innert der Segmentdauer T_B näherungsweise stationär sind und dass sich Fehler aus instationärem Verhalten einzelner Blöcke bei grosser Blockanzahl ausmitteln. Die Zulässigkeit der Annahme wurde auf zwei unabhängige Arten überprüft.

Die Übertragung von der Eingangsgrösse $x(t)$ auf die Ausgangsgrösse $y(t)$ lässt sich durch die als linear angenommene Übertragungsfunktion $h_{xy}(\tau)$ beschreiben. Im Frequenzraum sind die Leistungs- und Kreuzleistungsspektren von $y(t)$ und $x(t)$ über die komplexe (Frequenz-) Übertragungsfunktion $H_{xy}(f)$ multiplikativ miteinander verknüpft, wobei $H_{xy}(f) = F\{h_{xy}(\tau)\}$ die Fourier-Transformierte von $h_{xy}(\tau)$ ist. Damit lassen sich die folgenden realen Größen bestimmen, die die Übertragung vom Signal $x(t)$ auf das Signal $y(t)$ quantifizieren:

5.) Der Betrag $|H_{xy}(f)|$ der Übertragungsfunktion:
$$|H_{xy}(f)| = \frac{|\overline{S_{xy}(f)}|}{\sqrt{\overline{S_{xx}(f)}}} \approx \sqrt{\frac{\overline{S_{yy}(f)}}{\overline{S_{xx}(f)}}}$$

6.) Die Kohärenz $\gamma_{xy}^2(f)$ der Signalübertragung:
$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|\overline{S_{xy}(f)}|^2}{\overline{S_{xx}(f)} \cdot \overline{S_{yy}(f)}}$$

Zu 5.) Der Betrag $|H_{xy}(f)|$ der Übertragungsfunktion zwischen $x(t)$ und $y(t)$ gibt an, um welchen Faktor der Spektralwert des Signals $x(t)$ bei einer bestimmten Frequenz f_i in $y(t)$ verstärkt bzw. abgeschwächt wird. Zwischen dem Betrag $|H_{xy}(f)|$ der Übertragungsfunktion zwischen zwei Schwingungsgeschwindigkeits-Signalen und dem (Einfüge-)Dämmmass ΔL_e der Schicht (bzw. des Übertragungsmediums) zwischen den beiden Messsignalen besteht der folgende Zusammenhang:

$$7.) \quad \Delta L_e = 10 \cdot \log \left| \frac{v_{1+}}{v_{3+}} \right|^2 = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{|H_{xy}(f)|^2} \right)$$

v_{1+} ist die Amplitude einer in positiver Richtung in die Schicht einlaufenden Welle beliebiger Frequenz bzw. Wellenzahl, v_{3+} die Amplitude der entsprechenden aus der Schicht auslaufenden Welle gleicher Fortbewegungsrichtung, siehe dazu Cremer & Heckl (1996).

Im vorliegenden Fall setzt sich die Übertragungsfunktion $H_{xy}(f) = H_{OU}(f)$ zwischen den Messpunkten auf dem Oberbau (Gleis, Schwelle) und im Unterbau (Entwässerungskanal, Bankett) aus dem Übertragungsverhalten des Oberbaus (Schwellen und Schotterbett), des Unterbaus (mehrere Schichten) sowie, wenn vorhanden, der Unterschottermatte zusammen. Die Übertragungsfunktion $H_{USM}(f)$ und damit das Einfügedämmmass $\Delta L_e = \Delta L_{USM}$ der Unterschottermatten wird aus den Messungen wie folgt ermittelt:

$$8.) \quad \Delta L_e = \Delta L_{USM} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{|H_{USM}(f)|^2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{|H_{OUo}(f)|}{|H_{OUm}(f)|} \right)$$

mit $H_{OUo}(f)$ = Übertragungsfunktion Oberbau – Unterbau **ohne** Unterschottermatten und $H_{OUm}(f)$ = Übertragungsfunktion Oberbau – Unterbau **mit** Unterschottermatten. Die Übertragungsfunktionen $H_{OUo}(f)$ und $H_{OUm}(f)$ werden aus den Leistungs- und Kreuzspektren der Messsignale auf dem Oberbau (Gleis, Schwelle) und im Unterbau (Entwässerungskanal, Bankett/Tübbing) bestimmt. Die eingesetzten Operationen zur Analyse der Schwingungsübertragung sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

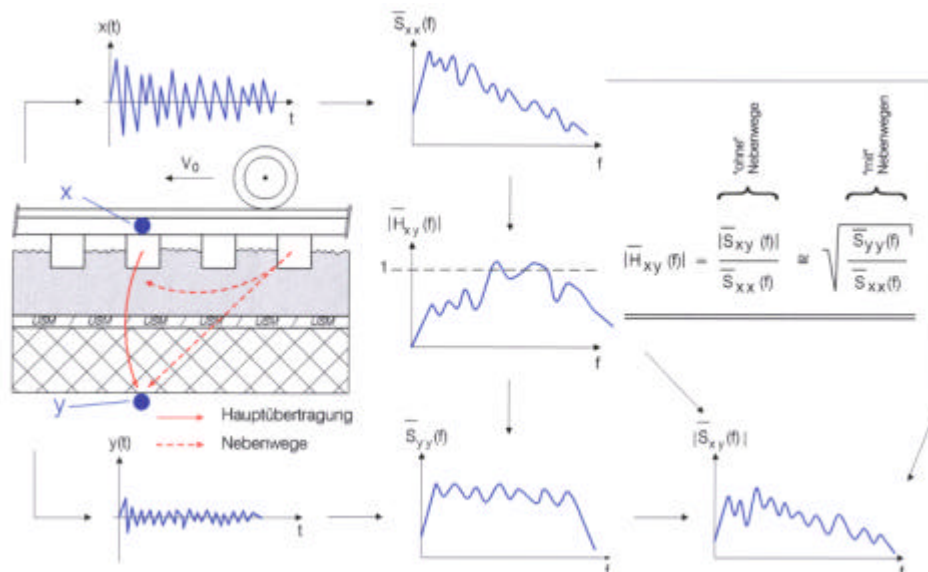


Abb. 2: Prinzipskizze der Signalanalyse und der verwendeten Operationen.

Bei der Bestimmung der Übertragungsfunktionen und Dämmmasse ist folgende Ergänzung anzubringen: Wie aus der Formel (5) hervorgeht, kann die Übertragungsfunktion auf zwei Arten bestimmt werden. Wurden $x(t)$ und $y(t)$ synchron gemessen, so gilt korrekt $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{xy}(f)/S_{xx}(f)}$. Dieser Berechnungsgang wird bei den vorliegenden Messungen angewandt. Er hat den Vorteil, dass nicht kohärente Signalanteile in $y(t)$, d.h. Anteile, die nicht aus der linearen Übertragung von $x(t)$ auf $y(t)$ stammen, ausgeschlossen werden können (Rauschen, Nebenwege: vgl. Abb. 2). Wurden die Signale $x(t)$ und $y(t)$ nicht synchron gemessen, so kann die Übertragung näherungsweise aus $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{yy}(f)/S_{xx}(f)}$ bestimmt werden. Dieser Berechnungsgang führt beim betrachteten System, das eine Übertragungen via Nebenwege zulässt (Multiple-Input / Single-Output System), zu etwas zu grossen Werten von $|H_{xy}(f)|$ (viele der bis heute gemessenen Übertragungsfunktionen wurden nach diesem zweiten Berechnungsgang vorgenommen). Wird das Dämmmass ΔL_e aus dem Quotient zweier Übertragungsfunktionen bestimmt, so kompensieren sich die überschätzten $|H_{xy}(f)|$ teilweise. Bei der Berechnung von ΔL_e via $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{yy}(f)/S_{xx}(f)}$ führen die verbleibenden Rauschanteile aber zu einer Glättung der Funktion $\Delta L_e(f)$ mit dem Nachteil, dass Resonanzstellen und Signalauslöschungen weniger deutlich hervortreten. In Abbildung 9 werden die Dämmmasse ΔL_e aus beiden Berechnungsgängen abgebildet.

Zu 6.) Die Kohärenz $\gamma_{xy}^2(f)$ der Signalübertragung zwischen $x(t)$ und $y(t)$ gibt an, welcher Signalanteil bei einer Frequenz f_i effektiv aus der Übertragung von $x(t)$ nach $y(t)$ stammt. Die Funktion $\gamma_{xy}^2(f)$ liegt im Bereich $0 < \gamma_{xy}^2(f) < 1$. Ist $\gamma_{xy}^2(f) < 1$, so wird entweder das Signal $y(t)$ durch Rauschen und Nebenweg-Übertragungen beeinflusst, oder die Übertragung $x(t) \rightarrow y(t)$ ist nicht linear. Die Kohärenz ist somit ein Qualitätsfaktor, der angibt, ob und wie gut Signalanteile von $x(t)$ nach $y(t)$ übertragen werden. Mittels der Kohärenz kann somit beurteilt werden, ob eine gemessene Übertragung signifikant ist.

3. Resultate

In Abbildung 3 sind als Beispiel typische Zeitreihen der Schwinggeschwindigkeiten auf der Schwelle (3a), auf dem Bankett (3b) und unter der Fahrbahn (3c) für eine Zugdurchfahrt mit 38 km/h in Richtung Müttenz dargestellt. Die schlechte Qualität des Rollmaterials und die dadurch sehr starke Schwingungsanfachung ist deutlich sichtbar. In Abbildung 3d ist zudem ein Beispiel für die zur Bestimmung der Zuggeschwindigkeit verwendete Kreuzkorrelationsfunktion $R_{xy}(\tau)$ zwischen den Messkanälen 0 und 2 am Gleis zu sehen.

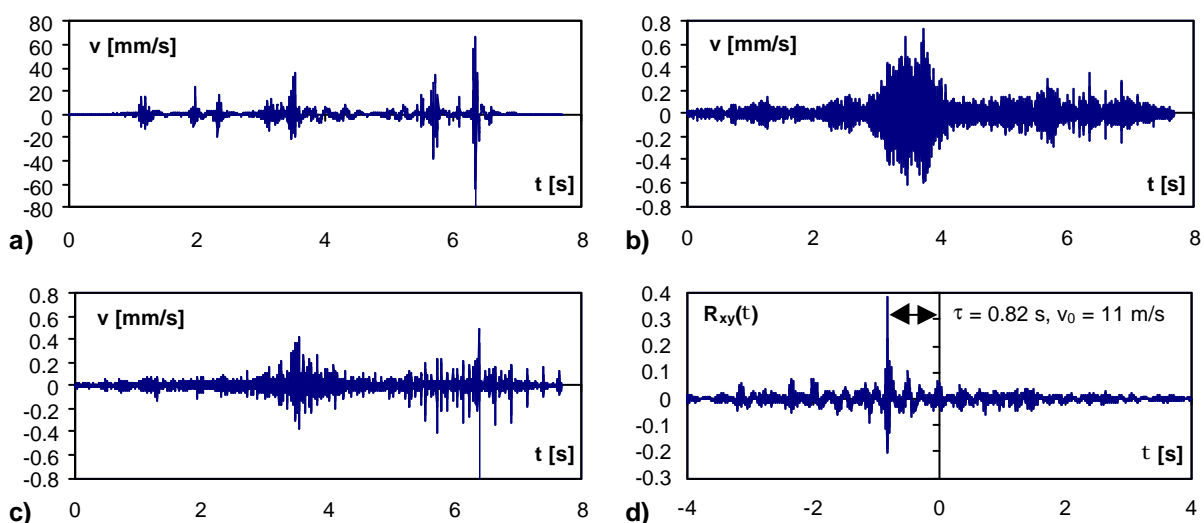


Abb. 3: Schwinggeschwindigkeiten während einer typischen Zugdurchfahrt: **a)** auf der Schwelle, **b)** am Bankett und **c)** im Unterbau. **d)** Kreuzkorrelation der Signale der Kanäle 0 und 2 an den Schienen.

Die gemessenen Leistungsspektren, Übertragungsfunktionen und Dämmmasse wurden vorerst auf die dominante Abstrahlrichtung und auf den Einfluss der Zuggeschwindigkeit untersucht. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Abstrahlung und die Übertragung in radialer Richtung immer dominant ist (siehe Abb. 1) und dass die Resultate der Übertragungsfunktionen und Dämmmasse von der Zuggeschwindigkeit praktisch unabhängig sind. Damit ist die Annahme einer in erster Näherung linearen Schwingungsübertragung zulässig. Die dargestellten Übertragungsfunktionen und Dämmmasse konnten folglich aus der Mittelung einer grossen Anzahl Zugdurchfahrten bestimmt werden.

Abbildung 4 zeigt typische Beispiele von Leistungsspektren der Schwinggeschwindigkeiten auf dem Ober- und im Unterbau der Tunnelquerschnitte ohne (4a) und mit (4b) USM. Die Wirkung der USM auf die Schwinggeschwindigkeiten im Unterbau (Kanäle 3 und 8) ist gut erkennbar: die spektrale Leistung sinkt im Tunnelquerschnitt mit USM über weite Frequenzbereiche um ein bis zwei Dekaden.

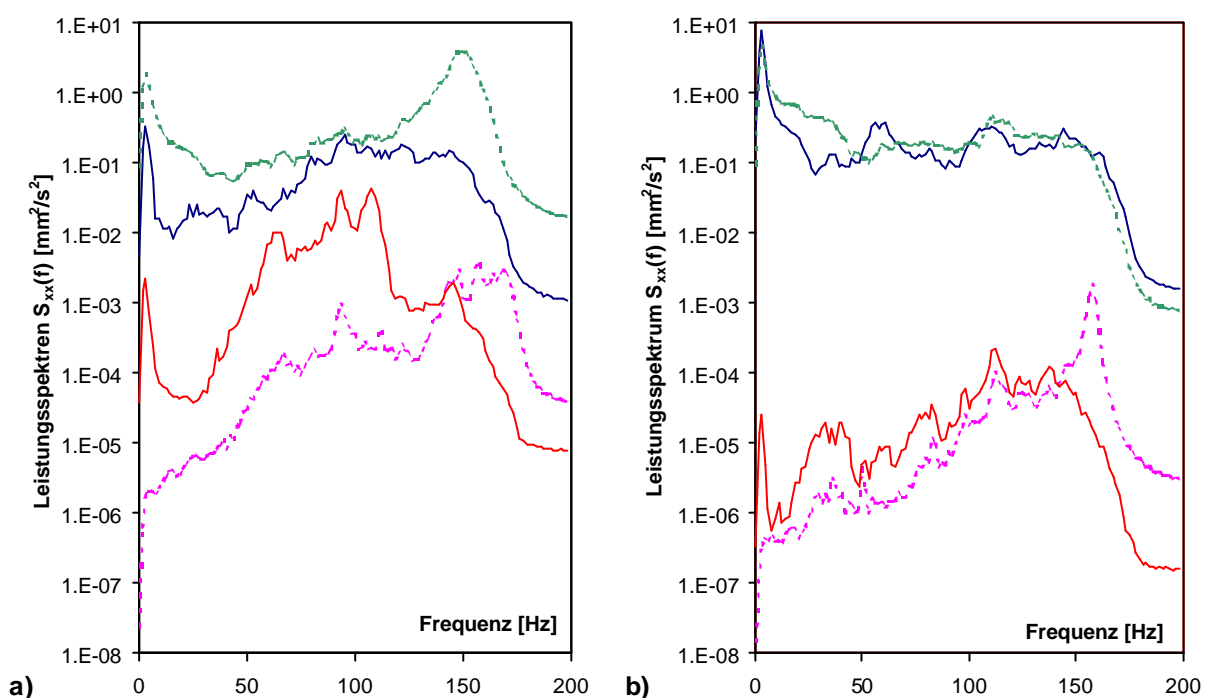


Abb. 4: Mittlere Leistungsspektren der Schwinggeschwindigkeiten infolge Zugdurchfahrten: (3/4) an der Schiene, (---) auf der Schwelle, (3/4) in der Sohle und (---) am Bankett. **a)** ohne, **b)** mit USM.

Äusserst aufschlussreich ist der Effekt der USM auf das Verhalten des Oberbaus, d.h. der Schienen und Schwellen. Tieffrequente Schwingungen, u.a. infolge der vergrösserten Einsenkung und des Sinuslaufs des Zuges, treten bei der Verwendung von USM leicht verstärkt auf. Dafür werden höherfrequente Schwingungen deutlich gedämpft. Bei der Fahrbahn mit USM führt die Abminderung der Anschlussimpedanz unter den Schwellen zu einem gleichmässigeren Schwingungsverhalten von Schienen und Schwellen. Die Anfachung der Schwellen bei 150 Hz beim Oberbau ohne USM, die infolge der Resonanz des Systems "Schiene mit Radsatzmasse + Gummimatte zwischen Schiene und Schwelle" entsteht, verschwindet beim Oberbau mit USM. Die Schwellen sind damit dynamisch geringer beansprucht. Dieses Verhalten geht auch aus Abbildung 5 hervor, in der die Übertragungsfunktionen $|H_{01}(f)|$ zwischen Schiene und Schwelle dargestellt sind: die Schwingungsübertragung von der Schiene auf die Schwelle wird bei der Fahrbahn mit USM vermindert. Es stellt sich damit die interessante Frage nach den Auswirkungen der beiden Effekte der USM (leichte Erhöhung der Rollbewegung des Zuges und Minderung der Gleisbeanspruchung) auf Fahrdynamik und Oberbaubeanspruchung.

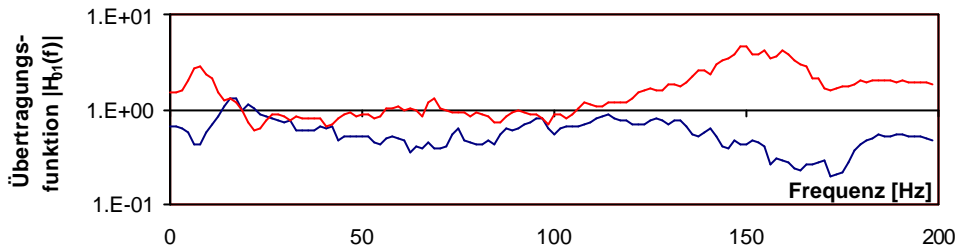


Abb. 5: Übertragungsfunktion $|H_{01}(f)|$ von Schiene auf Schwelle: (3/4) ohne USM, (3/4) mit USM.

In Abbildung 6 sind Beispiele der Kohärenzfunktionen $\gamma^2_{13}(f)$ und $\gamma^2_{18}(f)$ der Schwingungsübertragung zwischen den Schwellen und dem Bankett bzw. dem Untergrund für den Oberbau ohne (6a) und mit USM (6b) dargestellt. Beim Oberbau ohne USM findet die signifikante Übertragung bei beiden Übertragungswege im Frequenzbereich zwischen ca. 60 Hz bis 80 Hz statt, was auf eine hauptsächliche Schwingungsübertragung bei der Resonanzfrequenz des Systems "Radlast + Schotterbett" hindeutet. Es treten zudem auch bei höheren Frequenzen über 150 Hz noch signifikante Kohärenzwerte auf. Beim Oberbau mit USM findet eine signifikante Übertragung (hohe Kohärenz) im Bereich von ca. 20 – 120 Hz statt. Bei hohen Frequenzen wird die Kohärenz der Schwingungsübertragung sehr klein. Die Spitzenwerte treten für beide Übertragungswege bei ca. 25 Hz auf, was der Übertragung bei der Resonanzfrequenz des Systems "Oberbau mit Radlast auf elastischer USM" entspricht.

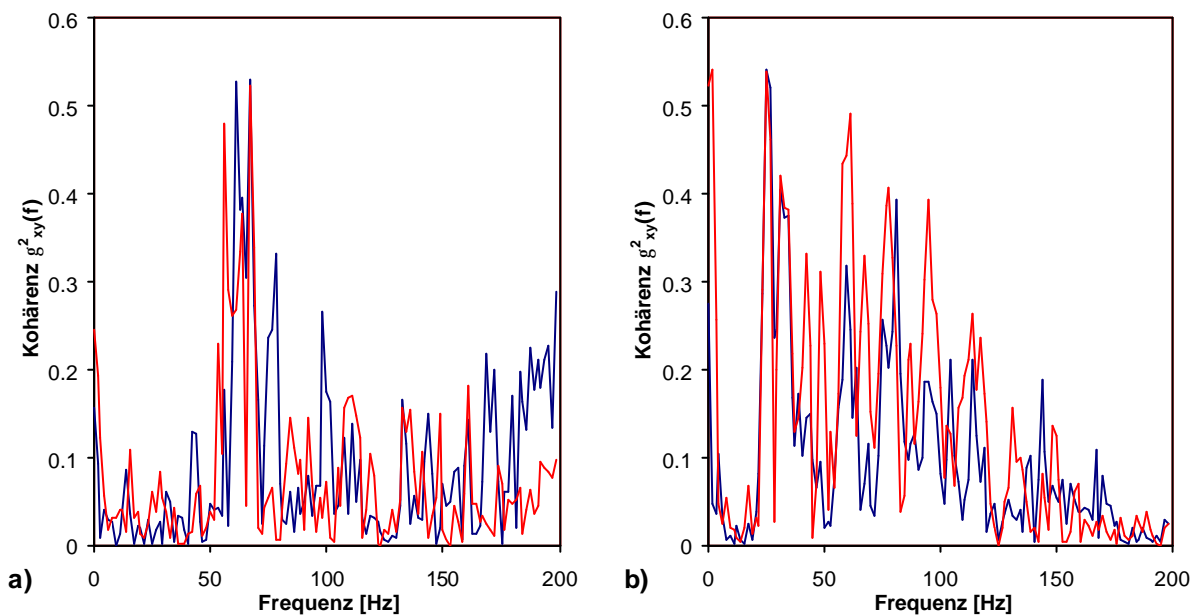


Abb. 6: Kohärenz $g_{xy}^2(f)$ der Übertragungen von der Schwelle auf das Bankett (g_{13}^2 : 3/4) und von der Schwelle in die Tunnelsohle (g_{18}^2 : 3/4). **a)** ohne USM, **b)** mit USM.

Die Abbildung 7 illustriert die Schwingungsübertragung vom Oberbau in den Unterbau bei den Tunnelquerschnitten mit und ohne USM. Bei den Übertragungsfunktionen für die Schwingungsübertragung vom Oberbau auf die massgebenden Messorte bzw. -richtungen unterhalb der Fahrbahn (Abb. 7b) und am Bankett (Abb. 7a) ist eine deutliche Wirkung der USM festzustellen: Die Maximalwerte von $|H_{xy}(f)|$ beim Querschnitt ohne USM liegen typischerweise für die meisten Übertragungswege in der Größenordnung von 10^{-1} , was einer Amplitudenminderung um einen Faktor 10 bei gewöhnlichem Oberbau entspricht. Beim Querschnitten mit USM liegen die Maximalwerte von $|H_{xy}(f)|$ in der Größenordnung von 10^{-2} , ent-

sprechend einer Amplitudenminderung um einen Faktor 100. Bereits daraus lässt sich ein typisches Einfügedämmmass ΔL_e von ca. 20 dB auf die Maximalamplituden ableiten. Die deutlichsten Unterschiede der Übertragungsfunktionen $|H_{xy}(f)|$ beim Oberbau mit und ohne USM treten im Frequenzbereich zwischen ca. 40 und 110 Hz auf. In diesem Bereich vermindert die USM die Schwingungsübertragung in den Unterbau um rund eine Dekade (d.h. um 20 dB).

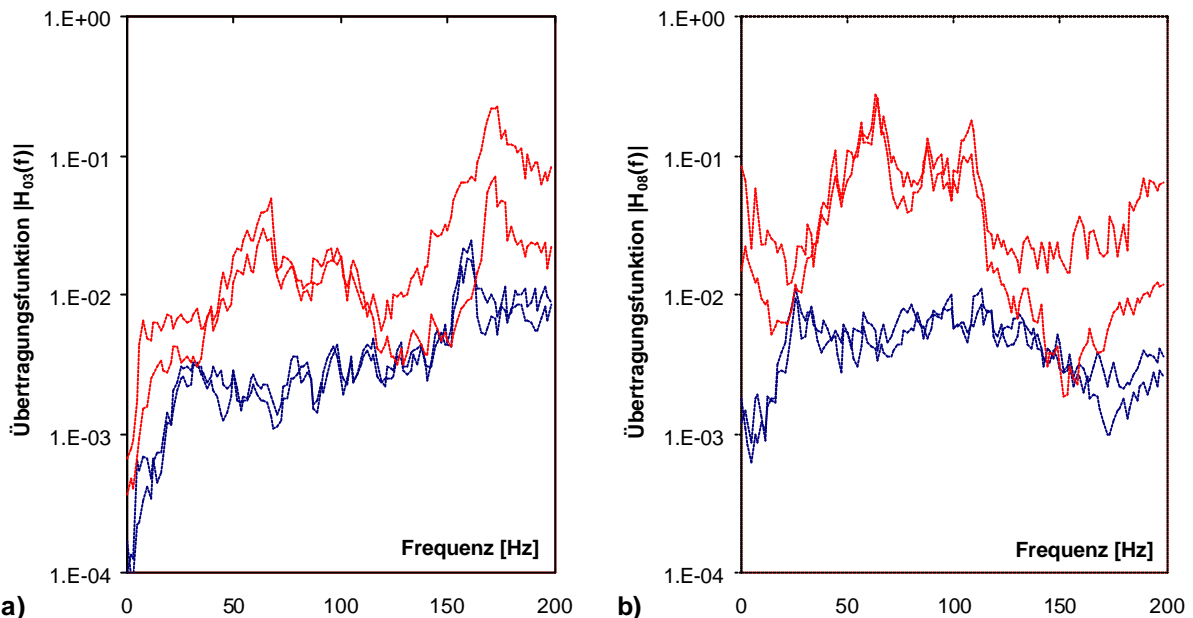


Abb. 7: Übertragungsfunktionen $|H_{xy}(f)|$ zwischen Ober- und Unterbau mit (3/4/---) und ohne (3/4/----) USM. Übertragungsweg Schiene - Unterbau fett ausgezogen, Schwelle - Unterbau fein gestrichelt. **a)** Übertragung Oberbau - Bankett (Kanäle 0/1@3), **b)** Übertragung Oberbau - Sohle (Kanäle 0/1@8).

Die aus den Übertragungsfunktionen in den Abschnitten mit und ohne USM nach Gleichung 8 bestimmten Dämmmasse ΔL_e der USM sind für die massgebenden radialen Übertragungswege in Abbildung 8 dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet sind die berechneten Dämmmasse nach Kurze & Wetschureck (1985a, b) für eine USM des Typs Sylodyn DN 622 und die hier vorhandene Oberbauform sowie zwei Steifigkeiten s des Untergrunds ($s = 5 \times 10^8$ N/m und $s = 2 \times 10^9$ N/m, entsprechend einem weichen und einem mittelharten Untergrund). Das theoretische Rechenmodell bestimmt die Schwingungsübertragung eines 3-Schichtmodells mit unterschiedlichen Impedanzen der einzelnen Schichten und einer sehr weichen mittleren Schicht (USM). Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

1. Unterschottermatten haben im eingebauten Zustand hauptsächlich im Bereich von ca. 40 Hz bis 120 Hz eine signifikante Dämmwirkung in einer Größenordnung von 10 bis 30 dB. Die Grösse und der qualitative Verlauf des Dämmmasses stimmen bei zuverlässig geschätzten Parametern recht gut mit den Rechenwerten eines 3-Schichtmodells überein.
2. Bei der Resonanzfrequenz des Systems "Radsatzmasse + elastische Lagerung (Unter- und Oberbau inkl. USM)" im Bereich von ca. 25 Hz bis 35 Hz ist ein deutlicher Einbruch des Dämmmasses festzustellen. Jedoch treten im Gegensatz zur Berechnung keine Resonanzverstärkungen auf.
3. Das Berechnungsmodell unterschätzt die Einbrüche der Dämmwirkung bei Frequenzen über ca. 120 Hz. In diesem Bereich können Resonanzeffekte im und zusammen mit dem Untergrund (ungünstige Werte der Anschlussimpedanz des Unterbaus) zu einer deutlichen Minderung der Dämmmasse

oder gar zu einer leichten Resonanzverstärkung führen. Es kann zudem festgestellt werden, dass das mittlere (rechnerische) Dämmmass einer USM immer von Resonanzeffekten (Verstärkungen und Auslöschungen) überlagert wird, die als Folge der dreidimensionalen, durch Reflexionen und Interferenzen beeinflussten Wellenausbreitung in Medien mit endlichen Schichtstärken und Steifigkeiten auftreten. Diese Auswirkungen der realen Einbausituation können das mittlere Dämmmass einer USM meist nur lokal, d.h. in engen Frequenzbereichen, in der Grössenordnung von ± 5 dB bis ± 10 dB vergrössern bzw. vermindern.

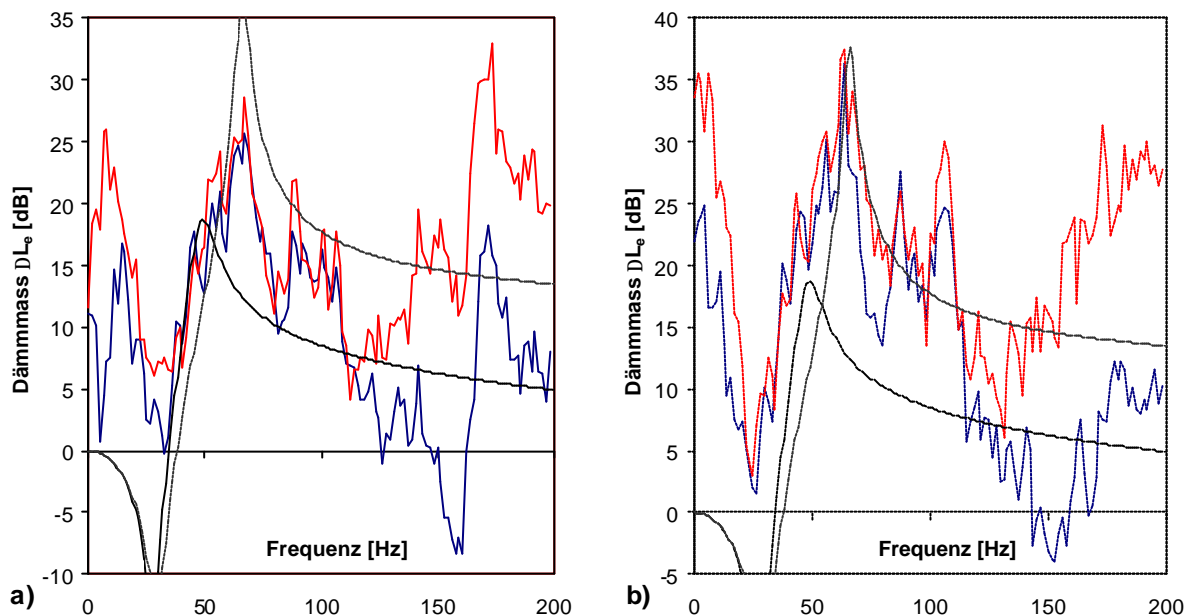


Abb. 8: Dämmmasse DL_e der USM bei radialer Übertragung von *der Schiene* ($\frac{3}{4}$) bzw. *der Schwelle* ($\frac{3}{4}$) auf **a)** das Bankett, **b)** die Tunnelsohle. Berechnete DL_e : ($\frac{3}{4}$) $s = 5 \cdot 10^8$ N/m, (---) $s = 2 \cdot 10^9$ N/m.

Abschliessend wird auf die Auswirkungen der Methoden bei der Messung und Analyse von Schwingungsübertragungen eingegangen. In Abbildung 9 sind die ermittelten Dämmmasse für verschiedene Berechnungswege dargestellt. Einerseits sind die effektiven Spektren mit konstantem Frequenzabstand der Stützstellen, einmal für den Berechnungsweg $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{xy}(f)/S_{xx}(f)}$ über die Kreuz- und Autospetren und einmal für den Berechnungsweg $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{xx}(f)/S_{xx}(f)}$ nur über die Autospetren dargestellt. Andererseits sind die Terzband-Dämmmasse eingezeichnet, die aus den Terzbandspektren für die beiden Wege $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{xy}(f)/S_{xx}(f)}$ und $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{xx}(f)/S_{xx}(f)}$ bestimmt wurden.

Es zeigen sich deutliche Unterschiede der Dämmmasse, die je nach Frequenzbereich und Analyse-methode ebenfalls in der Grössenordnung von ± 5 dB bis ± 10 dB variieren können. Der Berechnungsweg $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{yy}(f)/S_{xx}(f)}$ über die Autospetren führt infolge der Überschattung durch Rauscheffekte i.a. zu glatten Verläufen der Dämmmasse. Er kann aber, im Gegensatz zum Berechnungsweg $|H_{xy}(f)| = \sqrt{S_{xy}(f)/S_{xx}(f)}$ über die Kreuz- und Autospetren, die in der Realität immer auftretenden Resonanzverstärkungen und Auslöschungen nur ungenügend erfassen. Die Bestimmung von Übertragungsgrössen in Terzbändern mag zulässig sein, wenn an einem Immissionsort (um dessen Exposition es ja beim Erschütterungsschutzmassnahmen letztlich geht) nur die groben Frequenzbereiche und der Gesamtpegel der Schwingungsbeeinträchtigung wichtig sind. Sind aber am Immissionsort Resonanzeffekte zu erwarten, treten also z.B. Schwingungen der Bausubstanz mit engen Frequenzbereichen der Resonanzspitzen

auf, so sind die Übertragungsfunktionen und Dämmmasse auf alle Fälle aus effektiven Spektren mit konstantem, engem Frequenzabstand der Stützstellen zu berechnen. Aus signaltechnischer Warte gewährleistet der Berechnungsweg $|H_{xy}(f)| = \sqrt{f\{S_{xy}(f)/S_{xx}(f)\}}$ über die frequenzäquidistanten Kreuz- und Autospektren die zuverlässigste messtechnische Bestimmung der Schwingungsübertragung beim Systems "Zugsanfachung + Bahnoberbau und angrenzender Unterbau (Halbraum)".

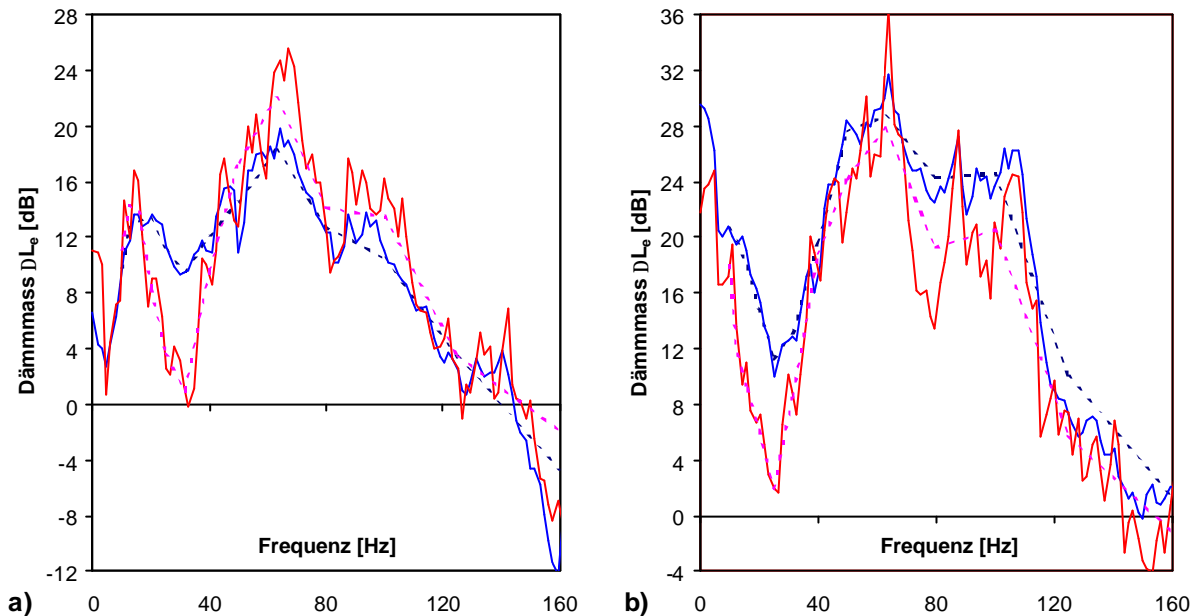


Abb. 9: Verschiedene Berechnungen der Dämmmasse DL_e für die Übertragung von den Schwellen auf das Bankett (a) bzw. in die Tunnelsohle (b). Frequenzäquidistante Spektren: (3/4) via $f\{S_{xy}(f)/S_{xx}(f)\}$, (3/4) via $f\{S_{yy}(f)/S_{xx}(f)\}$, Terzbandspektren: (----) via $f\{S_{xy}(f)/S_{xx}(f)\}$, (----) via $f\{S_{yy}(f)/S_{xx}(f)\}$.

4. Folgerungen

Anhand von detaillierten Schwingungsmessungen am Gleisoberbau und im Unterbau des Adlertunnels konnte die effektive Dämmwirkung eines Unterschottermattentyps zuverlässig ermittelt werden. Die Messungen haben gezeigt, dass Unterschottermatten im eingebauten Zustand, d.h. in einer realen Umgebung im Frequenzbereich von ca. 40 bis 120 Hz eine Dämmwirkung im Bereich von 10 dB bis 30 dB aufweisen. Bei der Systemeigenfrequenz von ca. 25 bis 35 Hz treten Einbrüche des Dämmmass auf, die aber zu keiner Resonanzverstärkung führen. Weitere Resonanzeffekte der realen Einbausituation können das mittlere, rechnerisch gut bestimmbare Dämmmass einer USM in der Größenordnung von ± 5 dB bis ± 10 dB verändern. In dieser Größenordnung liegt auch die Variation messtechnisch bestimmter Dämmmasse, je nach dem, welche Methoden angewandt werden. Auf die sorgfältige und korrekte Wahl der Mess- und Analysemethoden ist daher ein besonderes Augenmerk zu richten.

Literatur

- Bendat, J. & Piersol, A.** (1986) *Random Data – Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons, N. Y.
Cremer, L. & Heckl, M. (1996). *Körperschall*. Springer, Berlin.
Kurze, U.J. & Wettschureck, R. (1985a) Erschütterungen in der Umgebung von flach liegenden Eisenbahntunneln im Vergleich mit freien Strecken. (1985b) Einfügedämmmass von Unterschottermatten *Acustica*, Vol. **58**, pp.170–182.
Newland, D.E (1993) *Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis*. Longman Science & Technology, Harlow.