

Messungen der Wirksamkeit von Masse-Feder-Systemen für Trambahnen

Martin G. Koller, Sylvette Thomassin und Corinne Lacave
Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge, Schweiz

1. Umfeld und Zielsetzung

1.1 Genf: vom Vorreiter zum Nachzügler

1862: Genf war die vierte Stadt Europas, die eine Trambahn in Betrieb nahm, dazumal noch gezogen von Pferden. 1878 wurde auf Dampftrieb, und 1894 bereits auf elektrischen Antrieb umgestellt. Das Netz wurde laufend ausgebaut; der Höhepunkt 1922 erreicht, als das gesamte Streckennetz, das bis weit hinaus in die Vororte reichte, 130 km umfasste. Bald darauf aber begann der Niedergang; 1969 blieb einzig noch die Linie 12, die auch heute noch besteht, mit 9 km Streckenlänge übrig. Fast alle Gleise wurden im Laufe der Zeit wieder aus den Straßen ausgebaut.

Anfangs der 90er-Jahre begann die Renaissance: nach und nach wurde das Tram-Streckennetz wieder ausgebaut, so dass dieses Ende 2011 wiederum eine Länge von 40 km (zweigleisig) aufwies. Betrieben wird es von den TPG (Transports Publics Genevois). Weitere Neubaustrecken sind geplant.

1.2 Schutz vor Körperschall und Erschütterungen

Im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen sind Prognosen von Erschütterungen und Körperschall anzustellen. Hierbei ist nachzuweisen, dass die Grenzwerte der BEKS (Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall) nicht überschritten werden. Diese Grenzwerte entsprechen bezüglich Erschütterungen im Wesentlichen denjenigen der deutschen Norm DIN 4150-2. Beim Körperschall ist in der Regel der äquivalente Schallpegel (L_{eq}), gemittelt über die am stärksten belastete Stunde zwischen 22:00 und 06:00 Uhr, maßgebend. Hier gilt z.B. für neue Strecken in sogenannten Misch- oder Kernzonen ein Grenzwert von $L_{eq} = 30$ dB(A).

Werden die Grenzwerte der BEKS ohne besondere Vorkehrungen nicht eingehalten, sind bauliche Maßnahmen zu ergreifen; in Genf werden in diesem Fall in der Regel Masse-Feder-Systeme (MFS) mit "schwimmender" Gleistragplatte gebaut.

1.3 Wirksamkeit von Masse-Feder-Systemen

Bis vor kurzem wurden für sogenannt "leichte" oder "mittelschwere" MFS Gleistragplatten mit Abstimmfrequenzen von etwa 15 bis 30 Hz auf flächigen Polyurethanen oder Steinwollplatten gebaut, mit seitlich vertikalen Fugen, die aber in Genf nicht bis an die Oberfläche durchgezogen wurden; der Straßenbelag mit einer Stärke von zirka 17 cm wurde "durchgezogen". Der Grund hierfür war, dass Fugen, die bis zur Oberfläche reichen, aufwändige Konstruktionen erfordern, oder aber schon innerhalb weniger Jahren mit Belagsschäden zu rechnen ist (Bild 1).



Bild 1: Belagsschäden bei Fugen, die bis zur Oberfläche reichen. Links: Fuge mit Bitumen ausgegossen; rechts: Fuge im Belag ohne besondere bauliche Massnahmen. Zustand nur wenige Jahre nach Inbetriebnahme der entsprechenden Gleise, in einer anderen Stadt.

Nur bei einem schweren MFS (rue du Stand) mit einer Abstimmfrequenz von 11 Hz wurden 1998 die Fugen bis an die Oberfläche geführt, wobei der Straßenbelag beidseitig der Fuge mit winkelförmigen Metallleisten geschützt wurde. Diese Fugen sind auch heute noch, nach 14 Jahren, in einem guten Zustand.

Für die "Feder" dieser MFS werden auf dem Markt unterschiedliche Produkte angeboten. Im Vordergrund stehen drei Produktfamilien:

- Matten aus geschäumtem Polyurethan
- Steinwollmatten
- Matten aus (typischerweise rezykliertem) Gummischrot

Unterschiedliche Preise dieser Produkte haben auf den Gesamtpreis der Erstellung eines MFS nur einen äußerst geringen Einfluss. Trotzdem wollte das Genfer Baudepartement, zuständig für den Bau der neuen Trambahngleise, abklären lassen, ob MFS mit Produkten dieser unterschiedlichen Produktfamilien gleichwertige Dämmwirkungen aufweisen, oder ob signifikante Qualitätsunterschiede zu erwarten sind.

Der hier vorliegende Beitrag stellt die Untersuchungen dar, die vorgenommen wurden, um eine Antwort auf diese Frage zu finden.

2. Erste Vergleichsmessungen: das böse Erwachen

Beim Bau der ersten Etappe der neuen Tramlinie "TCMC", im Jahr 2007, wurden zwei Testabschnitte gebaut: zwei unmittelbar hintereinander liegende MFS mit je 17 m Länge. Beim einen MFS wurden 100 mm Steinwolle, beim anderen 25 mm Polyurethan verwendet; die Mattenstärken wurden so gewählt, dass gemäß den Angaben der Hersteller ähnliche Dämmwirkungen zu erwarten waren (genau genommen hätten 75 mm Steinwolle die gleichen Dämmwirkungen ergeben sollen wie 25 mm des verwendeten Polyurethans; infolge kurzfristiger Lieferengpässe wurden aber 100 mm Steinwolle eingebaut). Beide Materialien waren Vertreter ihrer Produktfamilien mit hoher Qualität. Bei der Steinwolle handelte es sich um ein Produkt, das beim Herstellungsprozess deutlich höheren Drücken ausgesetzt worden war, als sie unter dem MFS zu erwarten waren. Beim Polyurethan handelte es sich um ein Produkt eines Herstellers mit langjähriger Erfahrung in der Entwicklung und Herstellung von geschäumten Polyurethanmatten.

Am 24. Oktober 2008, knapp ein Jahr nach Inbetriebnahme der Strecke, wurden Vergleichsmessungen für 15 Tramvorbeifahrten unter normalem Betrieb durchgeführt. Verwendet wurden pro Testabschnitt je zwei unidirektionale, vertikal orientierte, hochempfindliche piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer von Brüel&Kjær (Typ 4378). Gemessen wurde auch an zwei weiteren Punkten im Bereich des Standardoberbaus (in Gleistragplatte einbetonierte Zweiblockschwellen), einem Referenzabschnitt, unmittelbar vor den eigentlichen Testabschnitten (Bild 2), mit Aufnehmern von Endeco (Typ 7702A-300). Die Beschleunigungs-Zeit-Signale wurden zu Geschwindigkeits-Zeit-Signalen integriert.

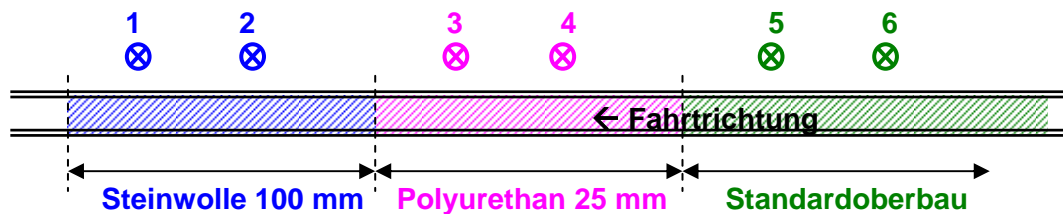


Bild 2: Schematische Darstellung der Messpunkte.

Die Aufnehmer wurden in einer Distanz von 3.1 m von der Gleisachse auf kleine metallische Sockel geschraubt, die auf den Straßenbelag geklebt worden waren. Um bis zu einem gewissen Grad zu erkennen, ob Abweichungen zwischen den Resultaten verschiedener Messpunkte auf die natürliche Streuung solcher Messungen oder auf systematische Unterschiede zurückzuführen sind, wurden für jeden Abschnitt zwei Aufnehmer verwendet, die theoretisch dieselben Resultate hätten ergeben müssen. Diese beiden Aufnehmer lagen je 4 m voneinander entfernt.

Die Tramzüge fahren im Bereich der Messpunkte etwa mit einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h. Da die Tramzüge 40 m lang waren, die Testabschnitte aber nur je 17 m, war anzunehmen, dass die an den einzelnen Messpunkten aufgezeichneten Erschütterungen nicht nur vom Abschnitt stammten, in dessen Bereich gemessen wurde, sondern auch von den benachbarten Abschnitten. Um den Einfluss dieser Signal"vermischung" möglichst gering zu halten, wurde jeweils ein Zeitfenster von nur 2 s Dauer betrachtet, das symmetrisch um den maximalen RMS-Wert der aufgezeichneten Erschütterungsgeschwindigkeit gelegt wurde. Für

diese Zeitfenster wurden Terzspektren berechnet und für jeden Messpunkt über alle 15 Vorbeifahrten geometrisch gemittelt.

Bild 3 zeigt die gemittelten Terzspektren für die sechs Messpunkte. Die Unterschiede zwischen zwei "gleichen" Messpunkten sind von derselben Größenordnung wie die Unterschiede zwischen den verschiedenen Oberbaukonfigurationen. Im Bereich der dominanten Terzbänder, 63, 80 und 100 Hz, konnte schlichtweg keinerlei Dämmwirkung der MFS nachgewiesen werden.

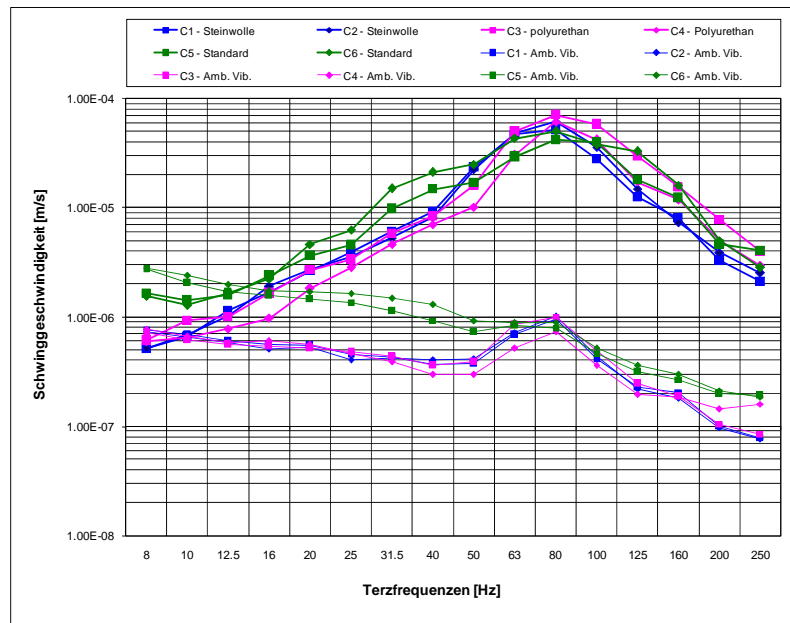


Bild 3: Terzspektren für die Vorbeifahrten an den sechs Messpunkten, im Vergleich zu den Terzspektren ohne Vorbeifahrten. Farbcode entsprechend Bild 2.

In der Folge wurden verschiedene Hypothesen diskutiert, welche diese ernüchternden Messresultate erklären könnten:

- Die Länge der Testabschnitte von nur 17 m ist im Vergleich zur Länge der Tramzüge nicht ausreichend; an allen Messpunkten vermischen sich die Wellen, die von den verschiedenen Abschnitten herkommen.
- Die Testabschnitte weisen Ausführungsmängel – Körperschallbrücken – auf, welche die Wirkung der MFS zunichtemachen.
- Wegen des durchgehenden Belags ist an der Oberfläche, in nur 3.1 m Entfernung zur Gleisachse, keine Dämmwirkung erkennbar; benachbarte Gebäude aber werden überwiegend über Wellen angeregt, die sich tiefer im Boden ausbreiten, deren "tiefe" Ausbreitung aber von den MFS weitgehend verhindert wird. Eine Dämmwirkung wäre also durchaus vorhanden, nur lässt sich diese an der Oberfläche in Gleisnähe nicht nachweisen.
- Der durchgehende Belag reicht als Körperschallbrücke aus, um jegliche Wirkung zunichtezumachen – die pessimistischste Hypothese.

Um abzuklären, ob die erste – gewissermaßen "harmloseste" – Hypothese zutrifft, wurden die Vergleichsmessungen am 5. Mai 2009 wiederholt; zur Anregung der Erschütterungen diente nun ein Schienenreinigungswagen (Bild 4), dessen Länge 8 m betrug und der sechsmal mit konstanten 25 km/h über die Testabschnitte fuhr.

Gemessen wurde an den gleichen Stellen wie am 24. Oktober 2008, mit der gleichen Messausrüstung; einzig beim Referenzabschnitt wurden die Endveco-Aufnehmer durch qualitativ höher stehende Aufnehmer von Brüel&Kjær (Typ 8340) ersetzt. Wiederum wurden Zeitfenster von 2 s Dauer verwendet. Während dieser Zeitfenster befand sich der Reinigungswagen nie gleichzeitig auf mehreren Testabschnitten.



Bild 4: Schienenreinigungswagen als Erschütterungsquelle.

Betrachtet man die Geschwindigkeits-Zeit-Signale, so ist nun eine gewisse Dämmwirkung erkennbar (Bild 5). Die Signale bei den MFS scheinen länger zu dauern, was auf eine stärkere Wellenausbreitung in Längsrichtung und damit indirekt auf eine gewisse Wirkung hinweist.

Eine Darstellung in Terzbandspektren (Bild 6) ist aber wiederum recht ernüchternd. In den Terzbändern von 25 bis 63 Hz ist eine bescheidene Dämmwirkung beider MFS in Bezug auf das Standardgleis sichtbar, in der Größenordnung eines Faktors 2 bis bestenfalls 3. Ab 80 Hz, im Bereich der maximalen Amplituden, die oft für den Körperschall in Gebäuden maßgebend sind, sind die Streuungen der über die sechs Vorbeifahrten gemittelten Messresultate für "gleiche" Messpunkte aber mindestens so groß wie die Unterschiede zwischen den Resultaten für die verschiedenen Oberbaukonfigurationen.

Die wichtigsten Fragen blieben offen:

- 1) Ist es möglich, mit Hilfe von Messungen an der Oberfläche, in Gleisnähe, ein zuverlässiges Bild der effektiven Dämmwirkung von MFS in Gebäuden zu erhalten?
- 2) Geht der größte Teil der theoretisch möglichen Wirkung eines MFS verloren, wenn die vertikalen seitlichen Fugen nicht bis ganz zur Oberfläche reichen,

sondern der Straßenbelag, in der Regel eine Heissmischtragschicht, "durchgezogen" wird?

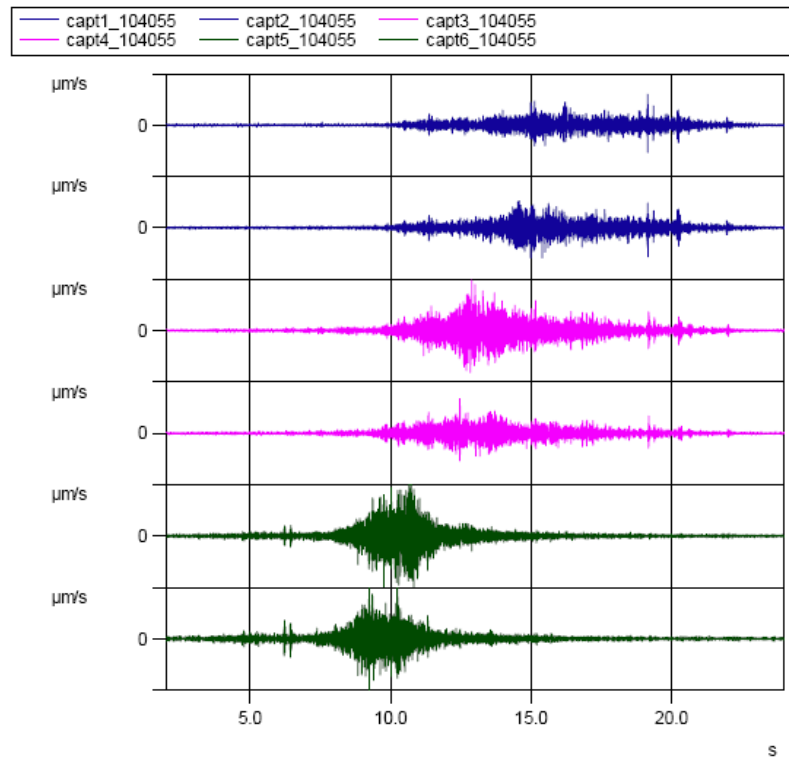


Bild 5: Geschwindigkeits-Zeit-Signale einer Vorbeifahrt des Reinigungswagens, mit identischen Massstäben für die Ordinate. Die Lage der Messpunkte und der verwendete Farbcode gehen aus Bild 2 hervor.

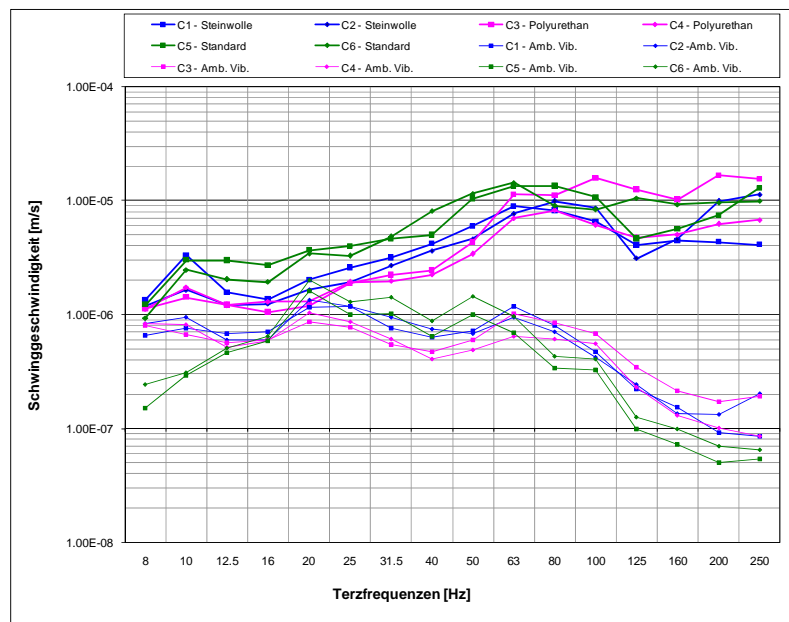


Bild 6: Über die Vorbeifahrten gemittelte Terzspektren des Reinigungswagens an den sechs Messpunkten, im Vergleich zu den Terzspektren ohne Vorbeifahrten. Die Lage der Messpunkte und der verwendete Farbcode gehen aus Bild 2 hervor.

3. Versuchsstand unter freiem Himmel

Um die Dämmwirkungen verschiedener Materialien unterschiedlicher Produktfamilien möglichst realitätsnah miteinander vergleichen zu können, wurde ein Versuchsstand unter freiem Himmel gebaut. Die Idee war, die Vergleichsmessungen an Gleisabschnitten mit MFS von je 2 m Länge durchzuführen, deren Querschnitte 1:1 dem Aufbau der MFS entsprachen, wie sie für Tramgeleise gebaut würden. Am Anfang und Ende der Gleisabschnitte, also quer zur Gleisachse, wurden extrem weiche Fugen vorgesehen, damit in erster Näherung die Situation einer unendlich langen Gleistragplatte simuliert werden konnte; diese Fugen wurden bei allen MFS gleich ausgeführt und mit einem sehr weichen Polyurethanschaum bestückt.

Um die von den früheren Vergleichsmessungen aufgeworfenen Fragen zu klären, sollte dieser Versuchsstand erlauben, die Erschütterungen nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in der Tiefe zu messen. Darüber hinaus sollte es möglich sein, die Dämmwirkungen der MFS mit und ohne bis zur Oberfläche reichender Fuge parallel zur Gleisachse messen zu können.

Vier verschiedene MFS-Konfigurationen sollten getestet werden, die alle eine Belagsstärke von 17 cm aufwiesen:

- eine 480 mm starke Gleistragplatte auf 25 mm starker Polyurethanmatte,
- eine 480 mm starke Gleistragplatte auf 75 mm starker Steinwollmatte,
- eine 580 mm starke Gleistragplatte auf 37.5 mm starker Polyurethanmatte,
- eine 580 mm starke Gleistragplatte auf zwei übereinander gelegten, je 17 mm starken Matten aus rezykliertem Gummischrot.

Alle MFS wurden mit vorfabrizierten seitlichen Wänden versehen, um das elastische Material der vertikalen Fugen vom seitlichen Erddruck abzusichern. Als Referenz sollte eine fünfte Konfiguration dienen, die dem Standardoberbau entsprach. Bild 7 zeigt einen Querschnitt durch einen Gleisabschnitt mit einem MFS und einen solchen mit Standardoberbau.

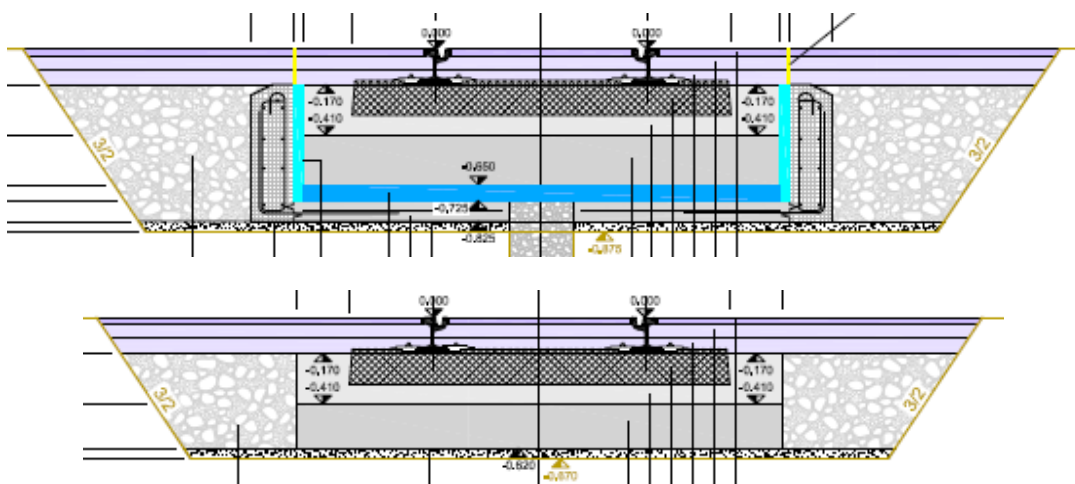


Bild 7: Gleisabschnitte des Versuchstandes: oben mit Steinwollmatte, unten mit Standardoberbau. Alle MFS waren analog aufgebaut, in der Mitte mit einem "verlorenen" Kiesbrunnen zur Entwässerung, mit 30 cm Durchmesser. Situation mit "durchgezogenem" Straßenbelag.

Alle verwendeten Materialien wurden von den jeweiligen Herstellern als Produkte bester Qualität aus der entsprechenden Produktfamilie gepriesen. Bei der Gummischrotmatte wurde beispielsweise betont, dass die Auswahl der rezyklierten Gummipartikel strengsten Qualitätskriterien unterstehen würde. Beim Polyurethan und bei der Steinwolle handelte es sich um dieselben Produkte, für welche bereits die unter Punkt 2 beschriebenen Versuche durchgeführt worden waren.

Da bei den früheren Vergleichsmessungen große Streuungen der Messresultate zwischen nominell identischen Messpunkten beobachtet worden waren, wurde beschlossen, für jede Konfiguration je zwei identische Gleisabschnitte zu bauen. Damit ergaben sich total zehn Gleisabschnitte. Diese wurden auf einem Kreis, mit einem Radius von 6.8 m bis zur Gleisachse, rund um einen zentralen Schacht angeordnet (Bild 8). Dieser Schacht, mit einem Durchmesser von 1 m und einer Tiefe von 4.15 m, erlaubte, die abgestrahlten Erschütterungswellen nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in der Tiefe zu messen. Die nominell identischen Gleisabschnitte lagen sich jeweils diametral gegenüber.

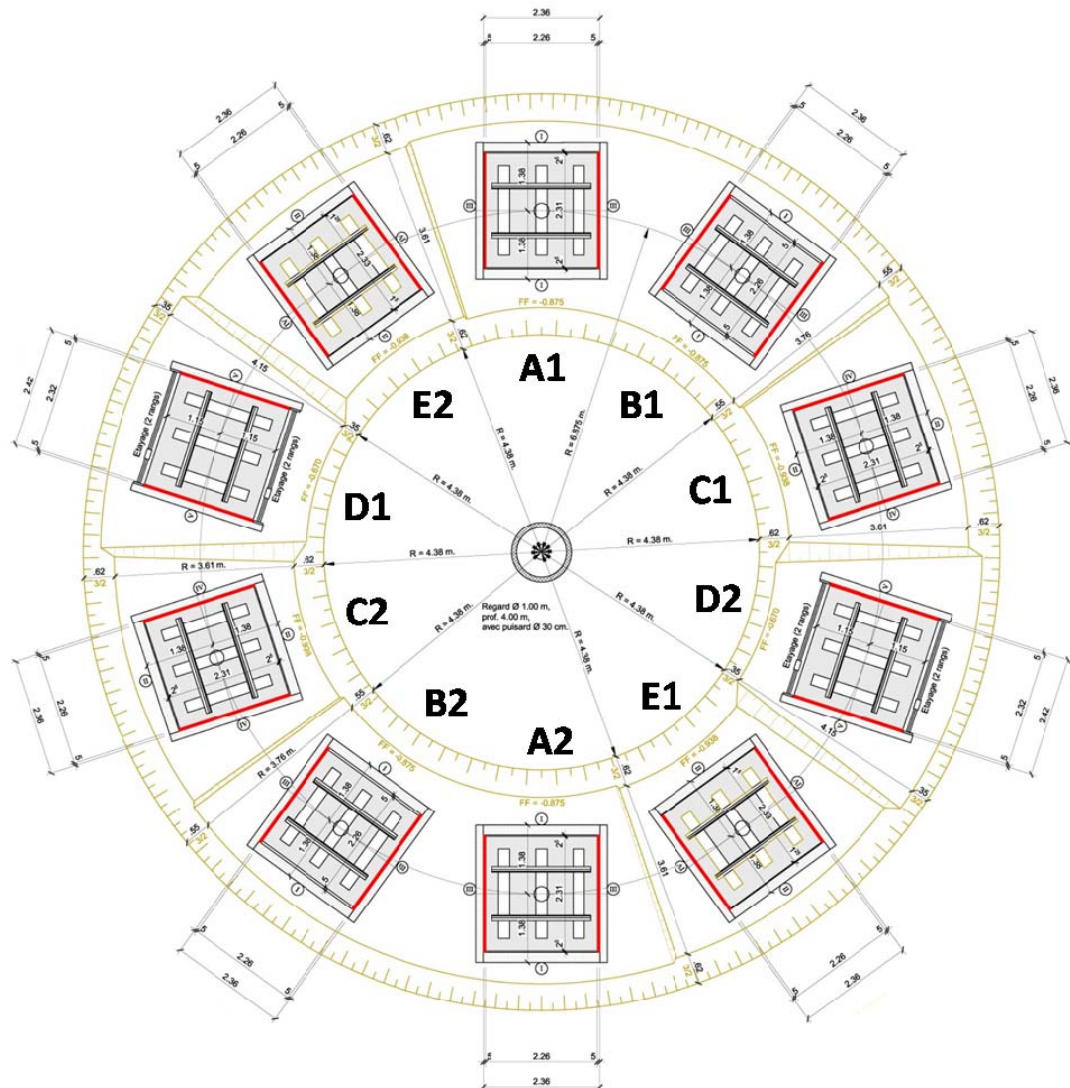


Bild 8: Anordnung und Bezeichnung der Gleisabschnitte auf einem Kreis mit einem Radius von 6.8 m.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Bezeichnungen der verschiedenen Gleisabschnitte, mit den Stärken der verwendeten elastischen Materialien. Zusätzlich enthält die Tabelle die berechneten Abstimmfrequenzen (Systemeigenfrequenzen) für die Situation mit bis zur Oberfläche reichenden Fugen. Diese Frequenzen wurden mit Hilfe der Steifigkeitsangaben ermittelt, welche aus den Prospekten hervorgingen, die im Jahr 2009 von den jeweiligen Herstellern zur Verfügung gestellt worden waren.

Tabelle 1: Übersicht über die Charakteristiken der getesteten Gleisabschnitte.

Bezeichnung	Produktfamilie	Stärke der horizontalen Matten	Stärke der vertikalen Längsfugen	Abstimmfrequenz berechnet
A1 / A2	Polyurethan	25 mm	25 mm	20 Hz
B1 / B2	Steinwolle	75 mm	50 mm	16 Hz
C1 / C2	Polyurethan	37,5 mm	25 mm	14 Hz
D1 / D2	Standardoberbau	-	-	-
E1 / E2	Gummischrot	2 x 17 mm	15 mm	16 Hz

Um realistische Vergleichsmessungen zu gewährleisten, waren einige Überlegungen zum nichtlinearen Materialverhalten der verwendeten elastischen Materialien anzustellen. Fährt ein Tramzug über ein MFS, wird die elastische Matte von der gesamten Achslast quasistatisch belastet; dynamisch aber wirkt nur die ungefederte Masse, die etwa 15 % der gesamten Zugmasse entspricht. Idealerweise hätten deshalb die Versuche an den Gleisabschnitten unter Vorbelastung durchgeführt werden sollen, wobei 85 % der vorbelastenden Masse hätten weich abgefedert werden müssen – analog zur Aufhängung eines Tramzuges. Dies aber hätte einen unverhältnismäßig hohen Aufwand erfordert.

Beim Polyurethan nimmt die Steifigkeit – im für die Anwendung empfohlenen Spannungsbereich – bei der Überfahrt eines Tramzuges ab. Eine Messung der Dämmwirkung ohne Vorbelastung wäre deshalb an einem System mit zu hoher Eigenfrequenz erfolgt und hätte deshalb zu ungünstigen Resultate ergeben. Würde aber der Versuchs-Gleisabschnitt mit der vollen, auf die Gleisabschnittslänge angepassten Achslast, z.B. mit Betonblöcken, vorbelastet, würden diese Blöcke dynamisch voll mitwirken, und die zu große dynamische Masse ergäbe damit eine zu geringe Eigenfrequenz; die Dämmwirkungen würden damit überschätzt. Aufgrund von – vom Hersteller gemessenen – Steifigkeits-Ganglinien in Abhängigkeit der Mattenpressung konnte berechnet werden, dass eine Vorbelastung mit etwa der halben Zuglast zu einer realistischen Eigenfrequenz führte. Die Gleisabschnitte mit Polyurethan wurden deshalb mit je 3,5 t vorbelastet. Bild 9 zeigt den Versuchsstand; deutlich sichtbar sind die Betonblöcke zur Vorbelastung der Gleisabschnitte mit Polyurethan.

Bei Steinwolle und Gummischrot nimmt die Steifigkeit der Matten – immer gemäß Hersteller – mit zunehmender Last zu. Gleichzeitig nimmt bei einer Überfahrt eines Tramzuges auch die effektive dynamische Masse wegen der ungefederten Masse

leicht zu. Was die resultierende Eigenfrequenz anbelangt, fällt die Zunahme der Steifigkeit zwar etwas stärker ins Gewicht als die Zunahme der Masse. Doch kompensieren sich die beiden Effekte weitgehend. Auf eine Vorbelastung der entsprechenden Gleisabschnitte konnte deshalb verzichtet werden; die Konsequenz war eine Unterschätzung der Eigenfrequenz von etwa 10 %, und damit eine tendenzielle Überschätzung der Dämmwirkung – angesichts der Modell- und Messungenauigkeiten aber in vernachlässigbarem Ausmaß.



Bild 9: Versuchsstand: Deutlich sichtbar sind die Betonblöcke, welche die Polyurethan-MFS quasistatisch belasten.

Die Erschütterungsmessungen erfolgten simultan mit fünf 1D-Beschleunigungsaufnehmern von Brüel&Kjær (4 x Typ 4378, 2 x Typ 8340), die wie in Bild 10 gezeigt angeordnet waren.

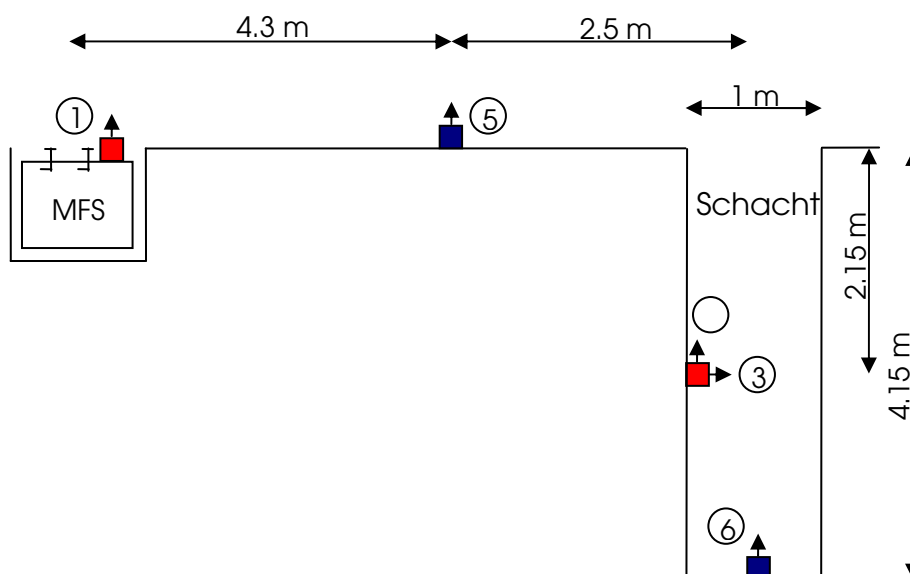


Bild 10: Anordnung der sechs Beschleunigungsaufnehmer.

Der Aufnehmer 1 diente der Kontrolle der Anregung. Die Aufnehmer 2 und 3 befanden sich in einer Tiefe von 2.15 m und maßen in vertikaler bzw. radialer (also horizontaler) Richtung (Bild 11a). Der Aufnehmer 5 befand sich an der Oberfläche in 4.3 m Abstand von der Gleisachse. Aufnehmer 6 schließlich maß in der Mitte des Schachts in 4.15 m Tiefe in vertikaler Richtung. Alle Aufnehmer waren mit einem metallischen Sockel verschraubt, der seinerseits mit der Unterlage verklebt oder verschraubt war.

Die Schwingungsanregung erfolgte mit Hilfe eines Shakers des Typs APS 400, mit einer vertikal bewegten Masse von 31 kg. Der Shaker war mit Schraubzwingen auf einem steifen metallischen Gestell befestigt, welches die Kraft direkt in die Schienen einleitete (Bild 11b). Die vom Shaker ausgeübte Kraft lag im Bereich von 100 bis 200 N und wurde für jede Testfrequenz konstant gehalten.

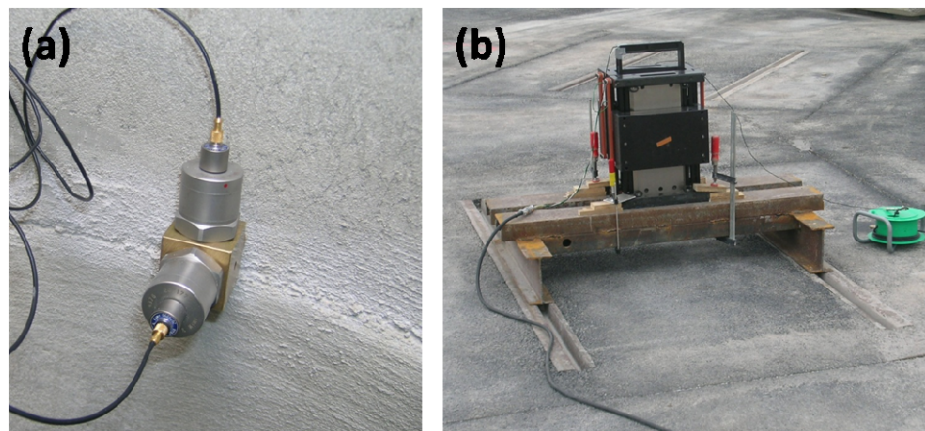


Bild 11: a) Aufnehmer 2 und 3, verschraubt mit der Schachtwand.
b) Shaker auf metallischem Gestell, das die Kraft in die Schienen einleitet.

Die Erschütterungsanregungen und -messungen erfolgten für die Terzmittenfrequenzen 31.5, 40, 63 und 80 Hz. Alle zehn Gleisabschnitte wurden für jede dieser Frequenzen während je einer Minute gemessen, und diese Messungen wurden je dreimal wiederholt.

Die Eigenfrequenzen der MFS wurden mit Hilfe eines hochempfindlichen 3D-Geschwindigkeitsaufnehmers vom Typ Lennartz LE-3D-5s gemessen. Dieser Aufnehmer befand sich auf dem Gleisabschnitt. Die Anregung erfolgte zuerst, indem eine Person auf dem Gleisabschnitt hüpfte, was jedoch keine sauber auswertbaren Signale ergab. Danach wurden mit dem Shaker sogenannte "Sweeps" gefahren, mit sinusoidaler Anregung, deren Frequenz um 1 Hz pro 3 s von 15 bis 40 Hz anstieg und anschliessend wieder bis 15 Hz abfiel. Die Frequenz der maximalen sich ergebenden Schwingungsamplitude des Gleisabschnittes wurde als die gesuchte Eigenfrequenz interpretiert. In einer späteren Phase (siehe unter Punkt 5) wurden Sandsäcke von 50 und 100 kg aus 1m respektive 2.5 m Höhe fallengelassen.

Die Haupt-Messkampagne erfolgte im Herbst 2009 für die folgenden Zustände:

1. Ausgangszustand mit "durchgezogenem" Belag (Belagstärke 17 cm),
2. Zustand mit offener, in den Belag eingefräster Fuge von 10 mm Breite,

3. Zustand mit offener, in den Belag eingefräster Fuge von 16 mm Breite,
4. Zustand mit 16 mm-Fuge, ausgegossen mit heissem Bitumen.

Die Erschütterungsmessungen für den Zustand mit offener, 10 mm breiter Fuge ergaben keine Unterschiede gegenüber dem Ausgangszustand mit durchgezogenem Belag. Eine anschließende Überprüfung ergab, dass der Belag, insbesondere in den Ecken, nicht überall vollständig durchgetrennt war. Deshalb wurden in einem zweiten Anlauf die Fugen auf 16 mm aufgeweitet, was eine bessere Kontrolle der Fugen erlaubte.

Es war nicht möglich, die Fugen ohne Wasser zu fräsen. Die elastischen Matten waren deshalb höchstwahrscheinlich weitgehend wassergesättigt, als die Messungen durchgeführt wurden, obwohl nach dem Fräsen jeweils mindestens 12 Stunden gewartet wurde, bis die Messungen starteten.

Die vollständig über die gesamte Höhe der MFS durchgehenden Fugen senkrecht zur Gleisachse, am "Anfang" und "Ende" der Gleisabschnitte, blieben selbstverständlich immer offen.

4. Erste Messkampagne im Versuchsstand

4.1 Gemessene Eigenfrequenzen

Tabelle 2 enthält einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen der Gleisabschnitte mit MFS. Da erst nach dem Fräsen der Fugen bemerkt wurde, dass die Messsignale für den Zustand mit durchgezogenem Belag kein ausreichendes Signal-zu-Rauschen-Verhältnis aufwiesen und deshalb nicht ausgewertet werden konnten, sind die Eigenfrequenzen für diesen Zustand leider nicht bekannt.

Tabelle 2: Eigenfrequenzen der verschiedenen Gleisabschnitte.

Gleisabschnitt	Gemessene Frequenzen		Berechnete Frequenzen (für offene Fugen)
	offene Fugen	bituminöse Fugen	
Polyurethan 25 mm			
A1	~20 Hz	24.5 Hz	20 Hz
A2	22.5 Hz	23 Hz	
Steinwolle			
B1	28.5 Hz	34 Hz	16 Hz
B2	36.5 Hz	37.5 Hz	
Polyurethan 37.5 mm			
C1	19.5 Hz	23 Hz	15 Hz
C2	20.5 Hz	22 Hz	
Gummischrot			
E1	33.5 Hz	33 Hz	16 Hz
E2	32.5 Hz	33 Hz	

Die gemessenen Eigenfrequenzen für die MFS mit Polyurethanmatten von 25 mm Stärke stimmen gut mit der berechneten Frequenz überein. Erstaunlicherweise aber wurden für die MFS mit Polyurethanmatten von 37.5 mm Stärke nur geringfügig niedrigere Eigenfrequenzen gemessen, obwohl sich rechnerisch eine deutlich unterschiedliche Eigenfrequenz ergäbe. Sowohl bei der Steinwolle wie auch beim Gummischrot wurden schließlich etwa doppelt so hohe Eigenfrequenzen gemessen, als rechnerisch erwartet wurde.

Grundsätzlich denkbare Gründe für die festgestellten Diskrepanzen waren:

- ein nichtlineares Materialverhalten von Steinwolle und Gummischrot in Bezug auf die Schwingungsamplituden – diese blieben bei den Sweep-Versuchen etwa 10 x kleiner, als diejenigen, die während der Vorbeifahrt eines Tramzuges auf einem entsprechenden MFS generell zu erwarten wäre,
- viel zu optimistische Angaben bezüglich dynamischer Steifigkeit (respektive "Weichheit") auf den Datenblättern der Hersteller; eine um einen Faktor 2 zu hohe Eigenfrequenz entspricht einer um den Faktor 4 (!) höheren Steifigkeit,
- Ausführungsfehler in Form signifikanter Körperschallbrücken.

Ausführungsfehler könnten die unterschiedlichen Messresultate für die Gleisabschnitte B1 und B2 erklären. Wären die Diskrepanzen zwischen Messung und Berechnung aber einzig auf Ausführungsfehler zurückzuführen, so müssten beide Abschnitte, B1 und B2, solche aufweisen, nur in etwas unterschiedlichem Ausmaß. Und bei den Abschnitten E1 und E2 müssten diese Ausführungsfehler schließlich genau gleich ausgefallen sein, oder zumindest die genau gleichen, aber bedeutenden Abweichungen der Eigenfrequenz hervorgerufen haben. Signifikante Ausführungsfehler schienen deshalb zumindest für die Abschnitte E1 und E2 als Haupt-Erklärung unwahrscheinlich, zumal die Gummischrotmatten von technisch besonders geschultem Personal des Schweizer Lieferanten dieser Matten eingebaut worden waren. Die Gründe für die beschriebenen Diskrepanzen blieben somit unklar, was einer der Gründe für eine spätere zusätzliche Messkampagne war (siehe Punkt 5).

Die aufgrund der Breite der gemessenen Resonanzübererhöhungen abgeschätzten Dämpfungen der MFS lagen bei gut 10 % bei offenen Fugen und bei etwa 14 % für den Zustand mit bituminösen Fugen.

4.2 Gemessene Dämmwirkungen

Die Dämmwirkung wurde für jeden Aufnehmer i und für jedes MFS mfs in Bezug auf das Referenzsystem ref – den Standardoberbau – mit Hilfe von Gleichung (1) bestimmt und in Dezibel ausgedrückt:

$$Dämmwirkung(mfs,i) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\text{Spektralampplitude}(ref,i)}{\text{Spektralampplitude}(mfs,i)} \right) \quad [dB]. \quad (1)$$

Unter "Spektralampplitude" wird die Amplitude für eine bestimmte Terzfrequenz verstanden. Für das Referenzsystem wurde jeweils das arithmetische Mittel für die beiden Gleisabschnitte D1 und D2 verwendet.

Bild 12 zeigt die beobachteten Dämmwirkungen für das Beispiel der Gleisabschnitte A1 und A2, also die MFS mit 25 mm starken Polyurethanmatten.

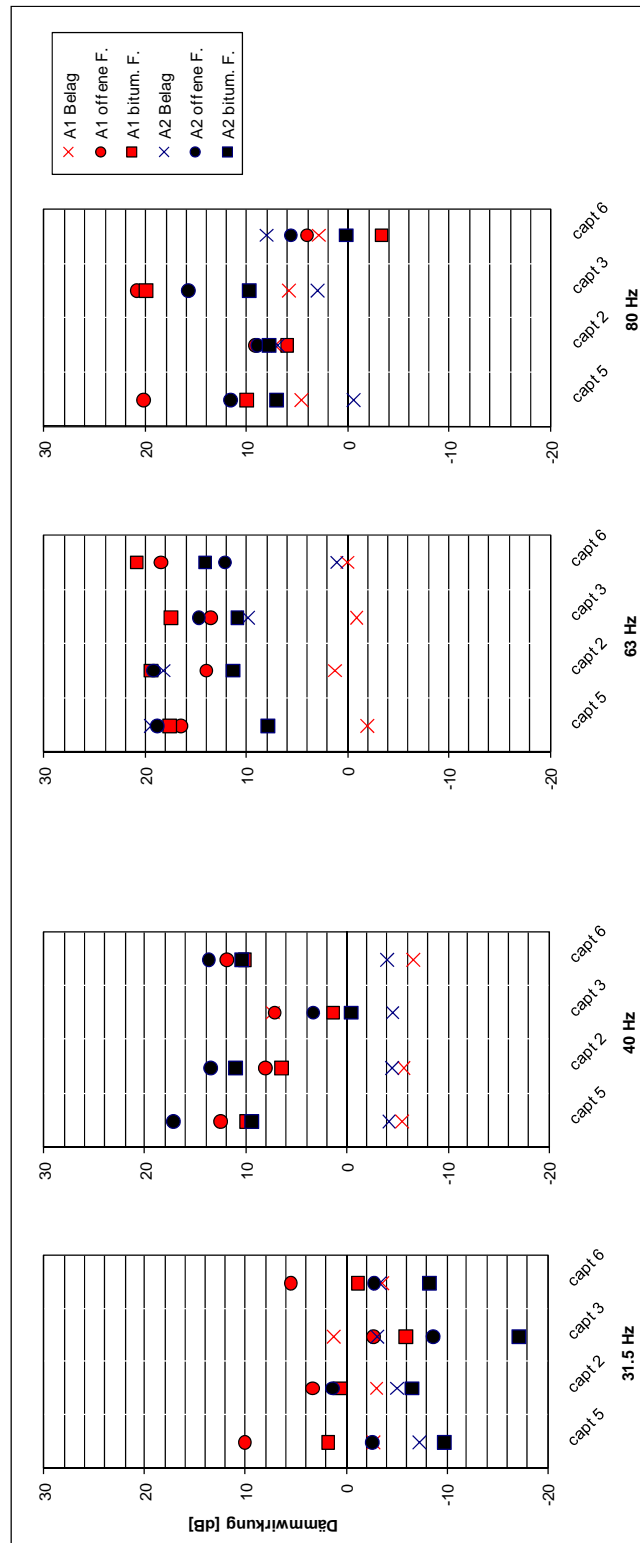


Bild 12: Dämmwirkungen der MFS A1 und A2 (25 mm Polyurethan): Kreuze stehen für durchgehenden Belag, Kreise für offene Fugen und Quadrate für bituminöse Fugen. Rote und blaue Symbole entsprechen den Abschnitten A1 bzw. A2.

Die Dämmwirkungen wurden gemäß Gleichung (1) aus den gemessenen Erschütterungsamplituden für die verschiedenen Aufnehmer berechnet und in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt; die roten Symbole stehen für den Abschnitt A1, die blauen für A2.

Als erstes fällt auf, dass sich für die beiden nominell identischen Abschnitte teilweise sehr unterschiedliche Dämmwirkungen ergaben. Am deutlichsten zu sehen ist dies für die Frequenz 31.5 Hz. Das MFS A1 weist für diese Frequenz bereits eine gewisse Dämmwirkung auf, während für A2 leicht negative Dämmwirkungen, also Verstärkungen der Erschütterungen, resultierten. Ein Vergleich mit Tabelle 2 zeigt, dass das MFS A1 eine etwas niedrigere Eigenfrequenz aufwies als das MFS A2; dies erklärt tendenziell, aber bei Weitem nicht im vollen Ausmaß, die unterschiedlichen Dämmwirkungen bei dieser Frequenz. Kaum nachvollziehbar sind die Unterschiede, die in Bild 12 bei 63 Hz für den Fall des durchgezogenen Belags zu sehen sind. Hier haben die Aufnehmer 2 und 5 für das MFS A2 eine Dämmwirkung von nahezu 20 dB ergeben, während die Dämmwirkung für das MFS A1 praktisch null war! Für den Aufnehmer 6 aber waren beide MFS gleichwertig, nämlich ohne jegliche Dämmwirkung.

Die Streuungen der Resultate waren für die übrigen Gleisabschnitte ähnlich. Selbst für die beiden Referenzsysteme, D1 und D2, wurden teilweise sehr unterschiedliche Erschütterungsamplituden für nominell identische Versuchsparameter gemessen. Dies zeigt, dass die Streuungen nicht oder nicht nur auf Ungenauigkeiten bei der – tendenziell heiklen – Ausführung der MFS zurückzuführen sind, sondern auf andere, unbekannte Ursachen. Eine dieser Ursachen dürfte die kleinräumige Inhomogenität des umliegenden Bodens sein; tatsächlich handelte es sich mindestens beim obersten Meter um Aufschüttungen. Leitungen im Boden, die als Wellenleiter hätten wirken können, lassen sich aber ausschließen – im Bereich des Versuchsstandes waren keine solchen Leitungen vorhanden.

Trotz der sehr starken Streuungen der Resultate lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die meisten Messungen (abgesehen von den oben erwähnten "Ausreißern") zeigen sehr deutlich, dass die Dämmwirkung bei durchgehendem Belag mit 17 cm Stärke praktisch verschwindend klein ausfällt – und dies nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in 4 m Tiefe!
- Für die verschiedenen Aufnehmer ergaben sich keine signifikant unterschiedlichen Resultate. Dies führte zu zwei Schlussfolgerungen:
 - Es ist grundsätzlich möglich, aufgrund von Messungen an der Oberfläche, in wenigen Metern Entfernung vom Gleis, auf die Dämmwirkung eines MFS zu schließen.
 - Die Versuchsergebnisse lassen sich ohne signifikanten Informationsverlust "kondensieren", indem über die Aufnehmer 2, 3, 5 und 6 gemittelt wird.

Um trotz der großen beobachteten Streuungen möglichst klare Resultate herauszuschälen zu können, wurde also über die Aufnehmer 2, 3, 5 und 6, sowie auch über die jeweils nominell identischen Gleisabschnitte, gemittelt. Das Resultat dieser Mittelungen, für alle MFS, ist in Bild 13 zu sehen.

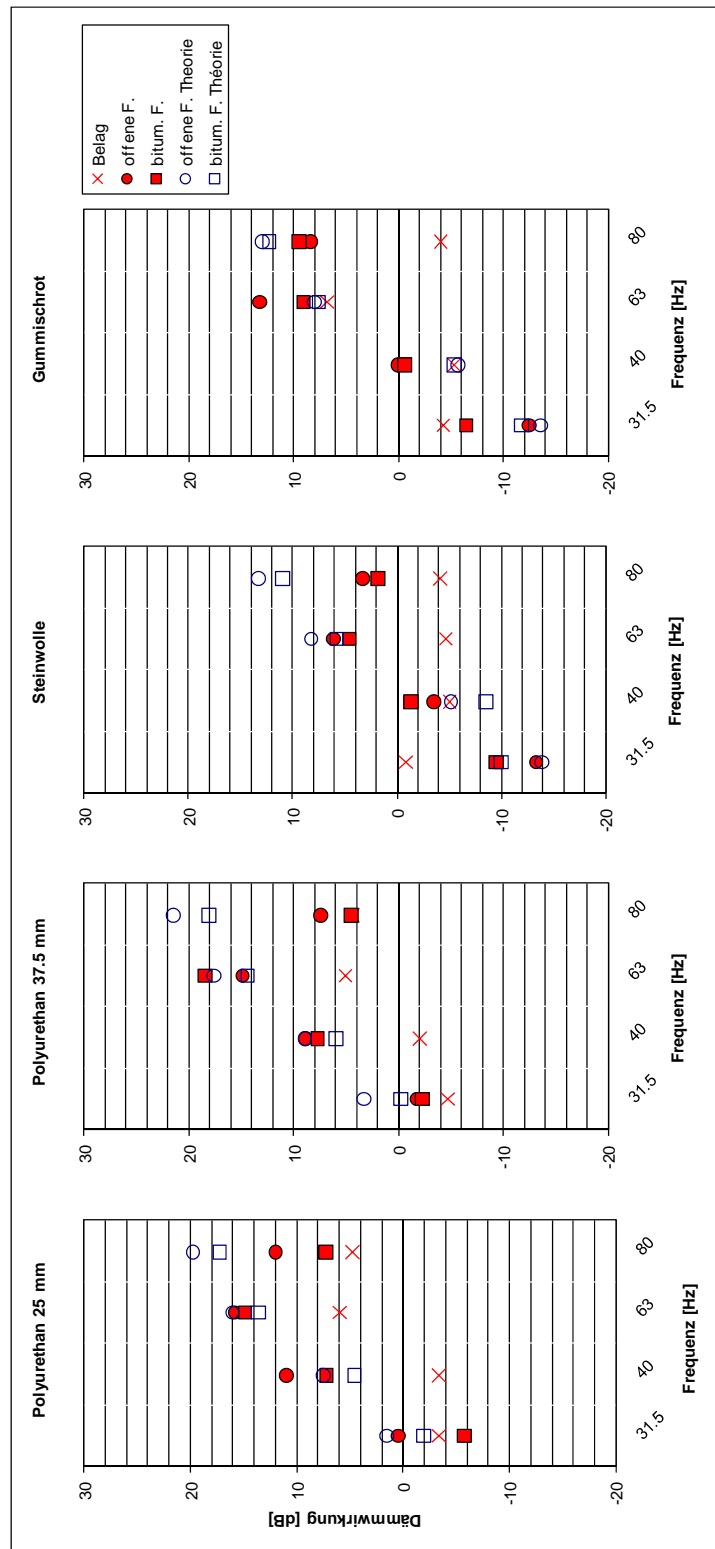


Bild 13: Gemessene mittlere Dämmwirkungen der vier getesteten MS. Kreuze stehen für durchgehenden Belag, volle Kreise für offene Fugen und volle Quadrate für bituminöse Fugen. Zum Vergleich sind auch Prognosen anhand eines Einmassenschwinger-Modells, basierend auf gemessenen Abstimmfrequenzen, eingetragen: hohle Kreise für offene Fugen und hohle Quadrate für bituminöse Fugen.

Zum Vergleich wurden auch theoretische Prognosen der Dämmwirkung mit Hilfe eines einfachen Einmassenschwinger-Modells erarbeitet und in Bild 13 eingetragen. Dabei wurden allerdings die gemessenen, in Tabelle 2 aufgeführten, und nicht etwa die aufgrund von Herstellerangaben berechneten Eigenfrequenzen verwendet.

Bei einem Einmassenschwinger bezeichnet man das Verhältnis der Kraft, die auf die Unterlage abgegeben wird, zur Kraft, die auf die Masse des Schwingers wirkt, als Transmissibilität TR . Deren Formel lässt sich in jedem Dynamik-Handbuch finden; sie lautet:

$$TR = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta(f/f_n))^2}{(1 - (f/f_n)^2)^2 + (2\zeta(f/f_n))^2}} \quad (2)$$

Hierin bedeuten ζ die Dämpfung, f_n die Eigenfrequenz und f die betrachtete Erregerfrequenz. In Analogie zu Gleichung (1) ergibt sich damit die theoretische Dämmwirkung des Einmassenschwingers zu

$$\text{Dämmwirkung}(mfs, i) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{1}{TR} \right) \quad [dB]. \quad (3)$$

Aus den gemessenen Dämmwerten, die in Bild 13 zu sehen sind, lassen sich bezüglich den betrachteten Terzmittenfrequenzen folgende Schlüsse ziehen:

- 31.5 Hz: die Polyurethan-MFS zeigen eine Dämmwirkung von ungefähr 0 dB, während die beiden MFS mit Steinwolle und Gummischrot negative Dämmwerte (Erschütterungsverstärkungen) in der Größenordnung von gut 10 dB aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Abstimmfrequenzen dieser MFS etwa im Bereich der Terzfrequenz von 31.5 Hz liegen.
- 40 Hz: Die Polyurethan-MFS weisen eine signifikante Dämmwirkung von 8 bis 10 dB auf, außer für den Fall mit durchgehendem Belag, für den die Dämmwirkung leicht negativ ist. Das Steinwolle- und das Gummischrot-MFS weisen keine Dämmwirkung auf.
- 63 Hz: Die Polyurethan-MFS weisen Dämmwirkungen im Bereich von 15 bis 18 dB auf. Beim Steinwolle-MFS beträgt die Dämmwirkung etwa 5 dB, beim Gummischrot-MFS 9 dB bei bituminöser und 13 dB bei offener Fuge.
- 80 Hz: Für die Polyurethan-MFS wurden für 80 Hz deutlich geringere Dämmwirkungen beobachtet als für 63 Hz: nur gerade zwischen 5 und 12 dB. Ähnliche Werte wurden von den Gummischrot-MFS erreicht: zwischen 8 und 10 dB. Für die Steinwolle-MFS wurden gerade mal 2 bis 3 dB Dämmwirkung festgestellt.

Für die Frequenzen 31.5, 40 und vor allem 63 Hz stimmten die gemessenen Dämmwerte recht gut mit den theoretisch prognostizierten überein. Für 80 Hz hingegen war dies nicht mehr der Fall. Während die Theorie des Einmassenschwingers für 80 Hz eine noch bessere Dämmwirkung als für 63 Hz vorhersagt, brachen die gemessenen Dämmwirkungen beim Übergang von 63 Hz zu 80 Hz geradezu ein. Dieser Einbruch war bei den Polyurethan-MFS am stärksten ausgeprägt, aber auch bei der Steinwolle und – in geringem Ausmaß – beim Gummischrot zu beobachten.

4.3 Offene Fragen nach der Messkampagne am Versuchsstand

Die beschriebenen Resultate der ersten Messkampagne warfen folgende Fragen auf:

- Wie lassen sich die hohen Eigenfrequenzen der MFS mit Steinwolle und mit Gummischrot erklären? Ergäben höhere Schwingungsamplituden niedrigere Eigenfrequenzen für diese Materialien?
- Weshalb liessen sich für die MFS mit Polyurethanmatten von 37.5 mm Stärke kaum stärkere Dämmleistungen nachweisen als für diejenigen mit einer Mattenstärke von 25 mm?
- Wie lässt sich erklären, dass für 80 Hz deutlich geringere Dämmwirkungen beobachtet wurden als bei 63 Hz, während die Theorie im Gegenteil höhere Dämmwirkungen voraussagt?
- Worauf sind die deutlich unterschiedlichen Eigenfrequenzen der beiden Steinwolle-MFS zurückzuführen?

Diese Fragen wurden mit einer Gruppe ausgewiesener Experten diskutiert. Diese Expertengruppe empfahl schließlich, ein zusätzliches Versuchsprogramm durchzuführen.

5. Zusätzliche Versuche

5.1 Programm der Zusatzversuche

Das zusätzliche Versuchsprogramm sah folgendermaßen aus:

- Wiederholung der Eigenfrequenzmessungen für den Zustand mit offenen Fugen (die bituminösen Fugen waren also neu zu fräsen):
 - Messung der Eigenfrequenzen für Erschütterungsamplituden in der Größenordnung, wie sie bei Überfahrten eines Tranzugs erreicht werden, also etwa 1 mm/s auf dem Standardoberbau. Solche Amplituden können mit dem Fallenlassen eines Sandsacks auf die Gleisabschnitte angeregt werden. Das Ziel war herauszufinden, ob größere Erschütterungsamplituden infolge nicht-linearen Materialverhaltens zu niedrigeren Eigenfrequenzen führen.
 - Erneute Messungen mit dem Shaker, aber mit einem Sweep bis zu 120 Hz, um zu sehen, ob im Bereich von 80 Hz eine sekundäre Eigenschwingung zu beobachten ist, etwa infolge der Nachgiebigkeit des Untergrundes. Eine solche sekundäre Eigenschwingung könnte unter Umständen den Einbruch der Dämmwirkung bei 80 Hz erklären.
- Vorsichtiges Entfernen des umliegenden Bodenmaterials und der vorgefertigten Betonmauern, welche die schwimmenden Gleistragplatten umgaben, um eventuelle Körperschallbrücken entdecken zu können. Erneutes Messen der Eigenfrequenzen an den freigelegten MFS, um herauszufinden, ob Körperschallbrücken oder vielmehr die Schubsteifigkeit der elastischen Materialien der vertikalen seitlichen Fugen verantwortlich waren für die gemessenen, teilweise unerwartet hohen Eigenfrequenzen.
- Vorsichtiges Abheben der schwimmenden Gleistragplatten, mit genauer Inspektion der Qualität der elastischen Matten, um eventuelle Ausführungsmängel (Körperschallbrücken) entdecken zu können.

Das angegebene Versuchsprogramm wurde in den Monaten März und April 2010 durchgeführt.

5.2 Erneute Eigenfrequenzmessungen

Die Resultate der erneuten Eigenfrequenzmessungen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Eigenfrequenzen, die im Rahmen der Zusatzversuche mit Hilfe fallender Sandsäcke und mit dem Shaker gemessen wurden, für offene Fugen sowie für die freigelegten MFS.

Gleisabschnitt	Polyurethan 25 mm		Steinwolle		Polyurethan 37.5 mm		Gummischrot	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	E1	E2
Berechnete Eigenfrequenzen (Hz) für offene Fugen								
	20		16		15		16	
Gemessene Eigenfrequenzen (Hz)								
Offene Fugen (März 10)								
Sandsack 50 kg Fallhöhe 1 m	20.5	19	21.5	37	22	16	34	33
Sandsack 100 kg Fallhöhe 2.5 m	20	19	19.5	35	20	16	33	31
Shaker Sweep	21	19.5	26	41	22.5	16.5	34.5	33
Freigelegte MFS (April 10)								
Sandsack 50 kg Fallhöhe 1 m	17.5	17.5	17 / 20.5	29	21.5	14	29	31
Sandsack 100 kg Fallhöhe 2.5 m	17.5	16.5	16.5 / 20.5	27.5	16 / 22.5	14	29	31
Shaker Sweep	17.75	17.5	18.5/ 22.5	31	19.5	14.5	31	31

Für die MFS mit Polyurethanmatten ergaben sich ähnliche Eigenfrequenzen, unabhängig von der Anregungsart. Die Eigenfrequenzen für die freigelegten MFS waren jeweils etwas niedriger, wie dies infolge der wegfallenden Steifigkeit der Matten in den vertikalen Längsfugen zu erwarten war. Beim MFS C2 ergaben sich nun, unabhängig von der Anregungsart, deutlich niedrigere Eigenfrequenzen als bei den früheren Messungen, nicht aber beim MFS C1 (vgl. mit den Werten in Tabelle 2). Dies war mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen perfekteren Fugenschnitt beim MFS C2 zurückzuführen, sowie auf kleine Körperschallbrücken beim MFS C1, die selbst im freigelegten Zustand noch vorhanden waren.

Bei den MFS mit Steinwollmatten ergaben sich für das MFS B1 bei offenen Fugen deutlich niedrigere Eigenfrequenzen als bei den früheren Messungen (Tabelle 2), und für das freigelegte System resultierten erwartungsgemäß nochmals tiefere Eigenfrequenzen. Nach wie vor deutlich höhere Eigenfrequenzen ergaben sich für das MFS B2. Die Eigenfrequenzen, die beim Aufprall der Sandsäcke gemessen wurden, waren systematisch niedriger als bei der – wesentlich schwächeren – Anregung mit dem Shaker, und dies sowohl beim MFS B1 wie auch beim MFS B2, bei dem der Verdacht auf namhafte Körperschallbrücken bestand. Die Eigenfrequenz beim MFS B1 war für Sandsackanregung praktisch identisch mit den Eigenfrequenzen der MFS A1 und A2. Die Steinwollmatten verhalten sich somit

deutlich nichtlinear in Bezug auf die Schwingungsamplitude. Dies bedeutet, dass die MFS mit Steinwolle bei den Messungen der Dämmwirkung infolge zu geringer Anregung benachteiligt worden waren und deshalb die ungünstigen Resultate, wie sie in Bild 13 zu sehen sind, relativiert werden müssen.

Im Gegensatz zu den Steinwollmatten war bei den Gummischrotmatten keine signifikante Material-Nichtlinearität in Bezug auf die Schwingungsamplituden festzustellen. Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, führte die Anregung über den Aufprall frei fallender Sandsäcke zu keiner Reduktion der Eigenfrequenz im Vergleich zur Anregung mit dem Shaker.

Bei den Messungen mit Hilfe von Sweeps von 10 bis 120 Hz konnten bei keinem Gleisabschnitt irgendwelche Hinweise auf eine sekundäre Eigenfrequenz in der Umgebung von 80 Hz gefunden werden, die etwa auf die Nachgiebigkeit des Bodens unter den Gleisabschnitten zurückzuführen gewesen wären. Damit blieb die Ursache für den Einbruch der Dämmwirkung bei 80 Hz ungeklärt.

5.3 Beobachtungen beim Abheben der Gleistragplatten

Nur die Gleistragplatten der Gleisabschnitte A1, B1, B2, C1, C2 und E2 konnten abgehoben werden. Da sich der Versuchstand in der Anflugschneise des Flughafens Genf befand und der eingesetzte Kran etwas zu hoch war, mussten die Abhebearbeiten auf Intervention der Flugsicherheit hin abgebrochen werden.

Beim Abheben der Gleistragplatten wurde festgestellt, dass die Polyurethan- und Steinwollmatten wie wassergesättigte Schwämme anzufassen waren, während die etwas gewellten Gummischrotmatten kaum Wasser zurückhielten und nur feucht waren. Da es zu diesem Zeitpunkt schon seit mehreren Tagen nicht mehr geregnet hatte, ist anzunehmen, dass der vorgefundene Zustand im Wesentlichen repräsentativ war für den Zustand der Matten während der Mehrheit der Messungen.

Sämtliche horizontalen und vertikalen Matten waren perfekt verlegt und wiesen keinerlei Verletzungen auf. Ein Problem bestand jedoch bei den Quertugen (die es beim reellen Gleis nicht gibt); hier waren bei allen MFS bituminöse Körperschallbrücken zwischen dem Rand der Gleistragplatte und dem Rand der Fundationsplatte vorhanden. Diese "Bitumenbrücken" waren auch bei den freigelegten MFS immer noch wirksam; sie waren an den meisten Orten kaum 1 mm stark, konnten aber vereinzelt lokale Stärken von bis zu 6 mm aufweisen (Bild 14).

Das MFS B2 wies etwas stärkere Bitumenbrücken auf als das MFS B1, was auf den ersten Blick die höheren Eigenfrequenzen des MFS B2 gegenüber dem MFS B1 zu erklären schien. Eine ähnliche Situation wurde aber auch für die MFS A2 und E1 beobachtet, die etwas stärkere Bitumenbrücken aufwiesen als ihre "Zwillingsabschnitte" A1 und E2. Trotzdem waren in diesen Fällen kaum signifikante Unterschiede in den Eigenfrequenzen gemessen worden! Es ist deshalb fraglich, ob die deutlich voneinander abweichenden Eigenfrequenzen bei den MFS mit Steinwollmatten, die einem Unterschied von einem Faktor 2 in der Steifigkeit entsprachen, allein auf unterschiedliche Stärken der Bitumenbrücken zurückzuführen waren. Trotzdem: Eine andere Erklärung konnte nicht gefunden werden; die verlegten Steinwollmatten stammten aus ein und derselben Lieferung!



Bild 14: Abheben der Gleistragplatte des MFS B2: Im Vorder- und Hintergrund sind bituminöse Körperschallbrücken bei den im realen Gleis nicht existierenden Querfugen zu sehen.

Bild 15 zeigt die stärkste aller beobachteten Bitumenbrücken; diese wurde beim MFS C1 vorgefunden. Da es sich bei den MFS C1 und C2 um die a priori weichsten Systeme handelte, dürfte die Bitumenbrücke hier tatsächlich für die unerwartet hohen Messwerte für die Eigenfrequenz verantwortlich sein.



Bild 15: Die stärkste bituminöse Körperschallbrücke wurde beim MFS C1 vorgefunden; diese dürfte die unerwartet hohen Messwerte für die Eigenfrequenz erklären.

Da die Bitumenbrücken bei den MFS mit 25 mm starken Polyurethanmatten (A1 und A2) sehr ähnliche Stärken aufwiesen wie bei den MFS mit den je zwei 17 mm starken Gummischrotmatten (E1 und E2), konnte schließlich gefolgert werden, dass die gemessenen, unerwartet hohen Eigenfrequenzen bei letzteren somit auf unrealistische Steifigkeitsangaben des Herstellers zurückzuführen waren, die – zumindest seinerzeit – etwa um den Faktor 4 zu gering waren.

6. Erneute Messungen an Teststrecken

Beim Bau der neuen Genfer Tramstrecke der Linie "TCOB" wurden die beiden Gleise eines geraden Streckenabschnitts von zirka 80 m Länge und ohne wesentliches Gefälle mit unterschiedlichen MFS versehen. In Richtung stadtauswärts liegt die Gleistrageplatte auf einer 25 mm starken Polyurethanmatte des gleichen Herstellers und gleichen Typs wie beim unter Punkt 3 beschriebenen Versuchsstand; auch die vertikalen Fugen über die Höhe der Gleistrageplatte wurden mit Matten desselben Typs und derselben Stärke bestückt. In Richtung stadteinwärts liegt die Gleistrageplatte auf zwei je 17 mm starken Gummischrotmatten, dem gleichen Produkt wie schon beim Versuchsstand; die vertikalen Fugen über die Höhe der Gleistrageplatte wurden hier jedoch mit einer 25 mm starken Gummischrotmatte versehen (beim Versuchsstand betrug deren Stärke nur 15 mm).

Sowohl der Einbau der Polyurethan- wie auch der Gummischrotmatten erfolgte unter technischer Aufsicht kompetenter Vertreter der Schweizer Lieferanten der entsprechenden Produkte.

Die erwähnten vertikalen Fugen reichen nur bis unter den 17 cm starken Belag. Über die Höhe des Belags wurde bei beiden MFS dieselbe neue Fugenkonstruktion umgesetzt, wie sie aus Bild 16 hervorgeht.

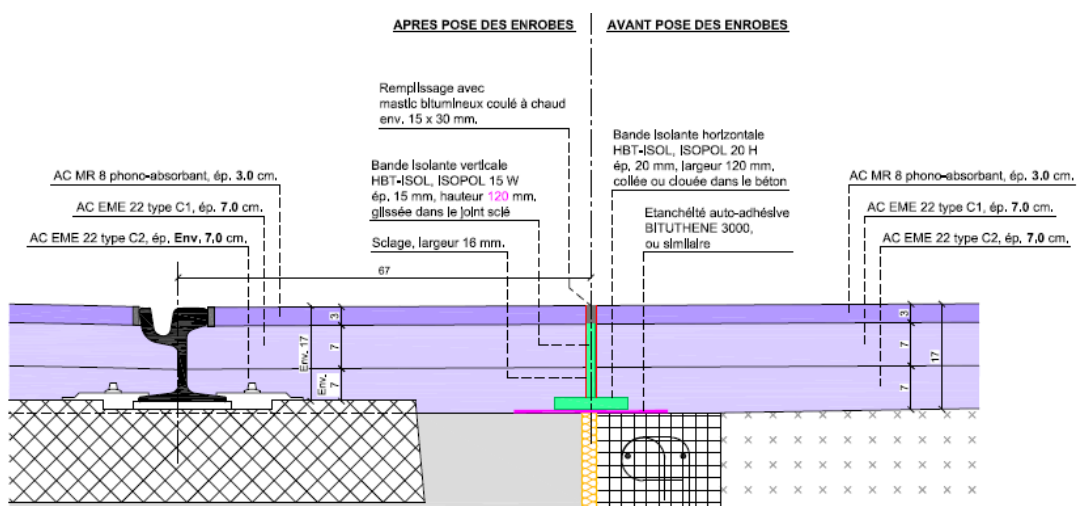


Bild 16: Aufbau der Fuge im Strassenbelag (violett) bei der Tramlinie TCOB (Details: siehe Text).

Über der eigentlichen vertikalen Fuge (gelb in Bild 16) wurde horizontal eine Abdichtung (rot in Bild 16) und darüber eine horizontale, 20 mm starke, 120 mm breite Gummischrotmatte (grün in Bild 16) eingelegt. Danach wurde der Belag in drei Schichten fugenlos eingebracht. Anschließend wurde eine vertikale Fuge von 16 mm Breite in den Belag gefräst und mit einer Gummischrotmatte von 15 mm Stärke, die bis 3 cm unter die Oberfläche reicht, bestückt. Die letzten 3 cm bis zur Belagsoberfläche wurden schließlich mit Bitumen ausgegossen.

Die horizontale, 120 mm breite Gummischrotmatte erfüllt zwei Aufgaben: Erstens schützt sie die tieferliegende Matte der vertikalen Fuge – sowohl beim Einbringen des Belags wie auch beim Fräsen der Fuge. Zweitens erlaubt sie eine namhafte

Toleranz bezüglich der Lagegenauigkeit beim Fräsen der Fuge, ohne dass eine Körperschallbrücke im Belag bestehen bleibt.

Die Traminie TCOB wurde im Dezember 2011 in Betrieb genommen. Am 25. Mai 2012 wurden vergleichende Messungen an den beiden beschriebenen MFS unter normalem Betrieb durchgeführt. Sowohl beim stadtauswärts wie beim stadteinwärts führenden Gleis wurden je drei Aufnehmer im Bereich der MFS und im benachbarten Bereich mit Standardoberbau verwendet, um in 7.8 m Distanz die abgestrahlten Erschütterungen zu messen. Da die Fahrgeschwindigkeit stadtauswärts etwas geringer war als stadteinwärts, wurde jeweils nur zwischen MFS und Standardoberbau, nicht aber direkt zwischen den beiden MFS verglichen.

Die drei Aufnehmer für die nominell gleiche Messung lagen jeweils etwa 3 bis 5 m, parallel zum Gleis, voneinander entfernt. Je drei Aufnehmer wurden verwendet, da erfahrungsgemäß große Streuungen nicht nur zwischen einzelnen Vorbeifahrten für den gleichen Messort, sondern auch zwischen verschiedenen Messorten für die gleiche Vorbeifahrt auftreten. Um diese Streuungen anschaulich darzustellen, wurde die Dämmwirkung nach Gleichung (1) in einem ersten Schritt auf zwei verschiedene Arten ermittelt:

- 1) Für den – als Beispiel gewählten – ersten Messpunkt A im Bereich des Polyurethan-MFS und den – ebenfalls als Beispiel gewählten – ersten Messpunkt D im Bereich des Standardoberbaus wurde für jede einzelne Vorbeifahrt die Dämmwirkung separat berechnet. Bild 17 zeigt die daraus resultierenden 20 Dämmwirkungen in Funktion der Terzfrequenz.

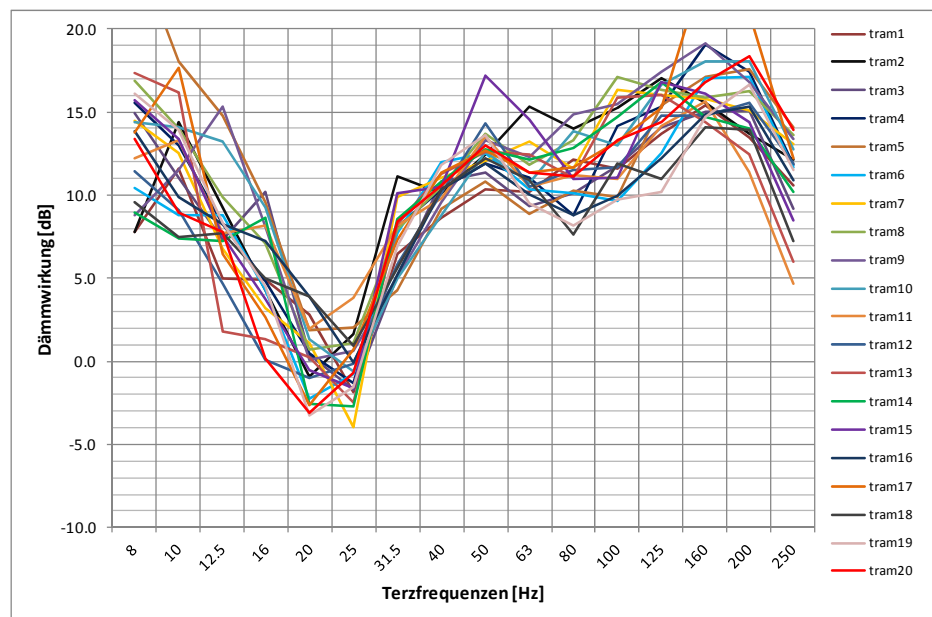


Bild 17: Streuung der Dämmwirkung bezüglich verschiedener Vorbeifahrten am Beispiel des Polyurethan-MFS, bei ausschließlicher Verwendung der Messpunkte A und D.

- 2) Für jeden Messpunkt wurde aus der Mittelung über die 20 Vorbeifahrten ein gemitteltetes Terzspektrum der Emission berechnet. Dies betrifft die Messpunkte A,

B und C im Bereich des Polyurethan-MFS sowie D, E und F im Bereich des Standardoberbaus. Danach wurde für jeden der Messpunkte A, B und C die Dämmwirkung in Bezug auf jeden einzelnen der Messpunkte D, E und F ermittelt. Bild 18 zeigt die 9 daraus resultierenden Dämmwirkungen in Funktion der Terzfrequenz. Wäre nur an je einem der Messpunkte im Bereich des Polyurethan-MFS und des Standardoberbaus gemessen worden, hätte also rein zufällig jede der in Bild 18 enthaltenen Kurven der Dämmwirkung resultieren können. Man hätte also z.B. bei 100 Hz je nachdem eine Dämmwirkung zwischen 9 dB und 19 dB nachweisen können.

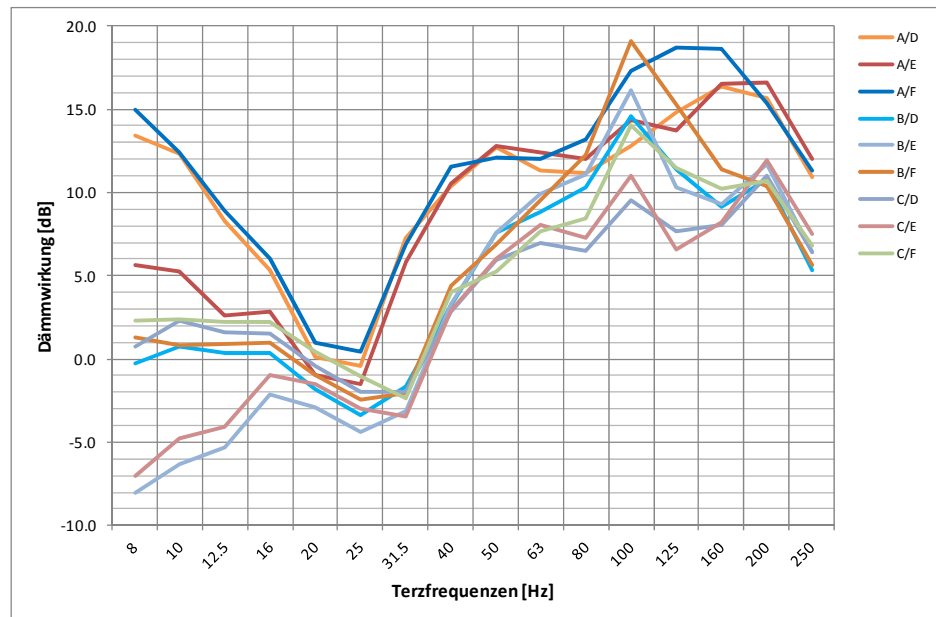


Bild 18: Streuung der Dämmwirkung bezüglich verschiedener Messpunkte für das Polyurethan-MFS.

Ein Vergleich der Bilder 17 und 18 lässt erkennen, dass die Streuung in Bezug auf verschiedene Messpunkte grösser ist als die Streuung bezüglich verschiedener Vorbeifahrten. Dies bedeutet, dass Messungen, die mit nur je einem Aufnehmer pro Oberbaukonfiguration durchgeführt werden, keine zuverlässige Bestimmung der Dämmwirkung ermöglichen! An drei Punkten pro Oberbaukonfiguration zu messen dürfte das absolute Minimum darstellen.

Bild 19 enthält die gleichen Informationen wie Bild 18, aber für das Gummischrot-MFS. Die Streuung der Resultate ist ähnlich wie bei Bild 18. Da die Messpunkte, die Bild 19 zugrunde liegen, alle verschieden sind von denjenigen, auf die sich Bild 18 abstützt, kann geschlossen werden, dass die beobachtete Streuung der Resultate nicht etwa auf einen einzelnen Ausreisser zurückzuführen ist, sondern vielmehr für diese Art von Messungen typisch ist.

Bild 20 schließlich vergleicht die resultierenden mittleren Dämmwirkungen für die beiden betrachteten MFS; bei den Kurven in Bild 20 handelt es sich also um die Mittelwerte der in den Bildern 18 und 19 zu sehenden Dämmwirkungen. Da es sich bei der Dämmwirkung um logarithmisch ausgedrückte Amplitudenverhältnisse

handelt, wurden diese geometrisch gemittelt; dies entspricht einer arithmetischen Mittelung der in Dezibel ausgedrückten Dämmwirkungen.

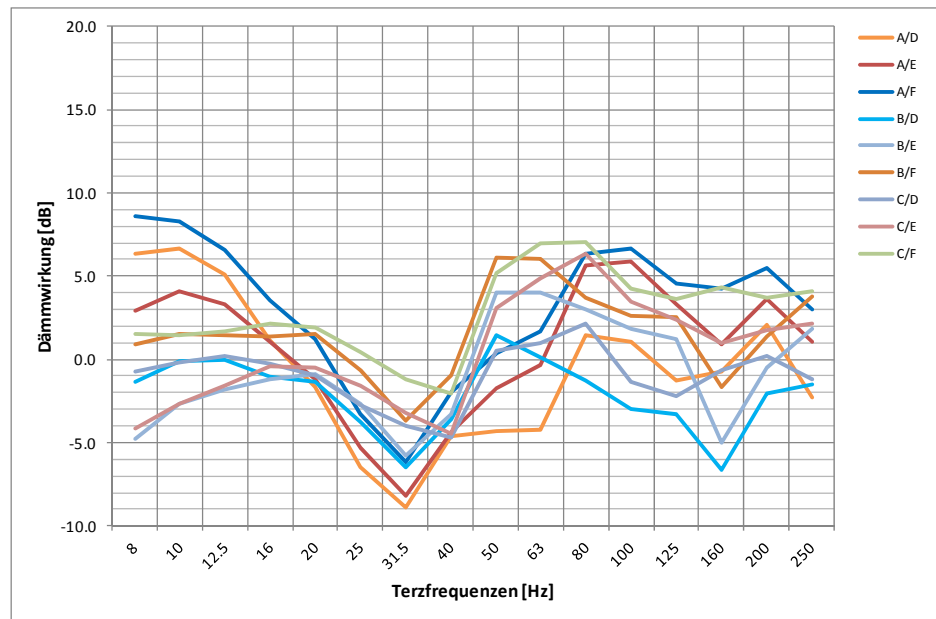


Bild 19: Streuung der Dämmwirkung bezüglich verschiedener Messpunkte für das Gummischrot-MFS.

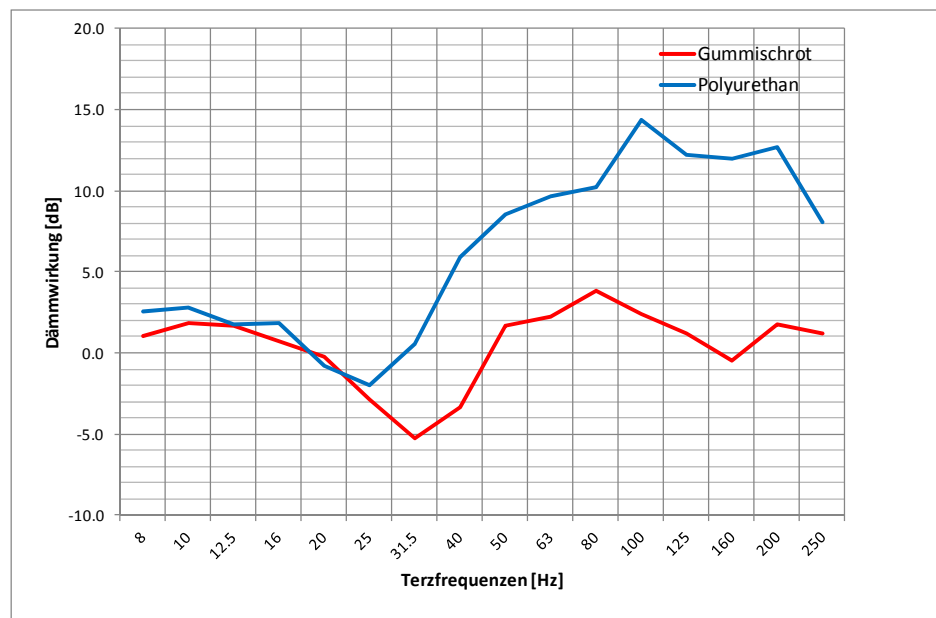


Bild 20: Vergleich der Dämmwirkungen der MFS mit Polyurethan und mit Gummischrot.

Das Polyurethan-MFS weist bei 40 Hz bereits eine Dämmwirkung von 5 dB auf. Von 80 bis 200 Hz liegt diese zwischen 10 und 15 Hz. Die Verstärkung der Erschütterun-

gen bei der effektiven Abstimmfrequenz, im Terzband von 25 Hz, bleibt mit 2 dB nahezu vernachlässigbar.

Das Gummischrot-MFS zeigt erwartungsgemäß erst ab 50 Hz eine dämmende Wirkung. Diese bleibt aber auch für höhere Frequenzen ausgesprochen bescheiden: Einzig bei 80 Hz konnte eine Dämmwirkung von 4 dB nachgewiesen werden; bei allen übrigen Frequenzen beträgt die Dämmwirkung maximal 2 dB! Im Umfeld der effektiven Abstimmfrequenz, in den Terzbändern von 25 bis 40 Hz, wurden Verstärkungen der Erschütterungen von 3 bis 5 dB festgestellt.

Das Polyurethan-MFS, welches im Rahmen der ersten Messkampagne überprüft worden war (siehe Bilder 3 und 6), war praktisch identisch aufgebaut wie dasjenige, für das die in Bild 20 gezeigte Dämmwirkung gemessen worden ist – bis auf den Unterschied, dass der Straßenbelag beim ersten MFS durchgehend war, während beim MFS von Bild 20 eine Fuge bis an die Belagsoberfläche gemäß Bild 16 vorhanden war. Der Vergleich dieser Messresultate bestätigt in eindrücklicher Weise, was schon beim Versuchsstand beobachtet worden ist, nämlich dass erst die Verwirklichung einer bis zur Oberfläche reichenden Fuge eine signifikante Erschütterungsabminderung ermöglicht!

7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die wichtigsten Schlussfolgerungen, die aus den hier beschriebenen Versuchen gezogen werden konnten, waren:

- MFS büßen den größten Teil ihrer potenziellen Wirksamkeit ein, wenn sie keine weichen Fugen aufweisen, die bis an die Belagsoberfläche reichen. "Durchgezogene" Asphalt- oder Heissmischtragschicht-Beläge sind deshalb auch bei leichten MFS zu vermeiden.
- Das Ei des Kolumbus für die Ausbildung der Fugen, die langlebig und gleichzeitig wirksam sein sollten, wurde bisher noch nicht gefunden – und gibt es wahrscheinlich auch nicht. Gute Erfahrungen wurden in Genf mit einem schweren MFS gemacht, dessen Fugen vor 14 Jahren mit metallischen Winkelleisten geschützt wurden und noch heute einen zufriedenstellenden Zustand aufweisen. Im Übrigen wurde in Genf in letzter Zeit ein Fugenaufbau verwendet, wie er in Bild 16 gezeigt ist; diese Fugen sind noch nicht lange genug im "Einsatz", als dass eine Beurteilung ihrer Langlebigkeit möglich wäre.
- Um sicherzustellen, dass die Eigenfrequenz eines MFS nicht ausgerechnet in den Bereich der Deckeneigenfrequenzen benachbarter Gebäude zu liegen kommt, ist es wichtig, dass diese Eigenfrequenz zuverlässig abgeschätzt werden kann. Deshalb sollten nur Matten, für die zuverlässige dynamische Steifigkeitswerte vorliegen, eingebaut werden; im Zweifelsfall sind besondere Eignungsprüfungen, etwa nach DIN 45673-7, zu verlangen.
- Der guten Entwässerung der MFS ist größte Beachtung zu schenken, insbesondere bei der Verwendung von Polyurethan- oder Steinwollmatten. "Verlorene" Kiesbrunnen ohne jegliches Drainagesystem sind ungenügend.
- Die Wirksamkeit eines MFS kann mit Hilfe von Erschütterungsmessungen an der Oberfläche, in wenigen Metern Entfernung vom Gleis, überprüft werden. Messungen in 4 m Tiefe ergaben ähnliche Resultate wie an der Oberfläche. Unerlässlich aber ist es, gleichzeitig an mehreren Orten zu messen und die Resultate zu mitteln, da von Messort zu Messort große Abweichungen in den Erschütterungsamplituden auftreten können.

Das Schweizer Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG) besagt in Artikel 11, Absatz 2: "Unabhängig von der bestehenden Umweltbelastung sind Emissionen im Rahmen der Vorsorge so weit zu begrenzen, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist." Beachtet man, dass die Kostenunterschiede zwischen etwas mehr oder weniger wirksamen elastischen Matten von MFS meist vernachlässigbar gering sind im Vergleich zu den gesamten Mehrkosten für den Bau eines MFS, so sollte in Anlehnung an den zitierten Gesetzestext in der Regel immer die wirksamste Matte eingesetzt werden.

8. Danksagung

Das vorgestellte Forschungsprojekt wurde vom Baudepartement (Département des constructions et technologies de l'information, DCTI) des Kantons Genf finanziert. Die Autoren danken in erster Linie Herrn Thierry Michel des DCTI, ohne dessen Initiative und aktive Förderung dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre. Der runde Versuchsstand mit zentralem Schacht sowie der Aufbau der Fuge im Straßenbelag basieren beide auf Ideen von Herrn Michel.

Dank gebührt im Weiteren allen direkt oder indirekt am Projekt beteiligten Firmen und Personen. Besonders verdankt seien hier die Bauunternehmung Induni, insbesondere Herr Stéphane Lacheré, für die sorgfältige Ausführung des Versuchsstandes, und das beteiligte Ingenieurbüro, SD Ingénierie Genève SA, mit Herrn Pascal Vincent, für die gute Planung. Der Dank der Autoren geht auch an die Hersteller und Lieferanten der eingesetzten elastischen Materialien sowie an die TPG für das Zur-Verfügung-stellen des Schienenreinigungswagens.

9. Quellen

- (1) DIN 45673-7:2010-08. Mechanische Schwingungen - Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen - Teil 7: Labor-Prüfverfahren für elastische Elemente von Masse-Feder-Systemen. Beuth Verlag GmbH.