

Erschütterungsschutz beim Tramverkehr: Praxisergebnisse aus Teststrecken



Verfasser:
C. Welter, E. Hübscher, J. Stolze, A. D'Amore
Juni 2013

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Mess-System SYSCOM MR2002	4
3. Teststrecke Carouge: rue St-Victor – place du Marché	5
3.1. Planung, Auslegung	5
3.2. Ausführung	5
3.3. Messungen bei Anregung durch den Shaker	6
3.4. Ergebnisse	7
4. Teststrecke TCOB an der Route de Chancy	8
4.1. Planung, Auslegung	8
4.2. Ausführung	8
4.3. Messungen	11
4.3.1. Messungen vom Dezember 2011 und Mai 2012	11
4.3.2. Messungen vom April 2013	12
4.4. Ergebnisse	15
5. Auswertung	16
5.1. Vergleich der Tramtypen Cityrunner und Tango	16
5.2. Dämmwirkung über einzelne Tramdurchfahrten	16
5.2.1. Tramdurchfahrt 12:58 Uhr, Cityrunner, Richtung Genf (Seite ISOPOL®).....	17
5.2.2. Tramdurchfahrt 13:22 Uhr, Cityrunner, Richtung Genf (Seite ISOPOL®).....	17
5.2.3. Tramdurchfahrt 13:00 Uhr, Cityrunner, Richtung Bernex (Seite Sylomer®)	17
5.2.4. Tramdurchfahrt 13:23 Uhr, Cityrunner, Richtung Bernex (Seite Sylomer®)	18
5.2.5. Kommentare zu den Abb. 18 bis Abb. 21	18
5.3. Dämmwirkung aus allen Tramdurchfahrten gemittelt.....	20
5.4. Messungen im Keller und in der Wohnung	23
5.5. Fehlerbetrachtung, Analyse	24
5.6. Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit anderen Messungen	25
5.7. DIN 45673-6 Labor-Prüfverfahren	26
6. Schlussfolgerung	27
7. Literaturverzeichnis	27

1. Einleitung

Beim Schienenverkehr entstehen durch das Zusammenwirken von Fahrzeug und Schienentrasse einerseits Luftschall und andererseits Erschütterungen. Bei den heutigen Geschwindigkeiten im Schienenverkehr, sei es bei Zügen oder Trams, dominiert das Rad-Schienen-Geräusch, wobei die dynamischen Vorgänge im Kontaktbereich Rad/Schiene für die Erschütterungen ausschlaggebend sind. Die entstehenden Erschütterungen sind im Wesentlichen abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, dem Zustand der Fahrflächen (Schienen- und Radraugigkeiten) sowie der Oberbaukonstruktion und dem Wartungszustand der Fahrzeuge. Erschütterungen breiten sich über das Erdreich aus und können in angrenzende Gebäude eingeleitet werden. Einzelne Gebäudeteile wie Decken und Wände können so zu Schwingungen angeregt werden, was schliesslich zu hörbarem abgestrahlten Körperschall aber auch zu spürbaren Schwingungen führen kann.

Seit vielen Jahren werden die verschiedensten Konzepte zur Dämmung der Erschütterungen aus dem Schienenverkehr entwickelt und getestet. Die Kombination aus dem verdichteten Bauen und dem dichten, stark befahrenem Bahnliniennetz, wie beispielsweise in der Schweiz, gibt diesen Studien und Entwicklungen immer grössere Wichtigkeit.

So gibt es Lösungsansätze, zwischen Schiene und Schwelle zu Entkoppeln oder die ganzen Schwellen in Formteile aus Elastomeren einzupacken. Aus Funktionsgründen (möglichst kleine Einfederung) müssen bei diesen Lösungen relativ steife, harte Werkstoffe mit einem nur kleinen Wirkungsgrad eingesetzt werden. Weitaus bessere Wirkungen werden mit weichen Materialien erzielt, wie sie zum Beispiel unter dem Schotter (Unterschottermatten) bzw. unter der Schienentragplatte eingesetzt werden. In diesem Bereich können die entstehenden Kräfte auf grosse Flächen verteilt werden, was wiederum nur kleine Flächenpressungen verursacht. Damit können weiche Dämmmatten mit hohen Isolier- bzw. Dämmwirkungen eingesetzt werden.

Im Zusammenhang mit der Suche nach optimalen Materialien für den Bau neuer Tramlinien in Genf konnte die Firma Résonance Ingénieurs-Conseils SA im Jahr 2011 in einem kreisrunden Prüfstand verschiedene Materialien wie Elastomerkornplatten, Steinwollplatten und Polyurethan-Platten prüfen. Die beiden erfolgreichsten Werkstoffe Elastomerkornplatten des Typs ISOPOL[®] und die Polyurethan-Schaumstoffplatten des Typs Sylomer[®] konnten anschliessend in einer Neubaustrecke in Genf eingebaut werden. Dieser Test sollte Antworten darauf geben, ob und mit welchem Material in den angrenzenden Gebäuden die Vorgaben aus BEKS¹ bzw. der DIN 4150-2 eingehalten werden und bei den gegebenen praxisnahen Bedingungen die besseren Dämmwerte resultieren. Die Erneuerung eines kurzen Gleisabschnittes im Stadtzentrum Carouge gab die Gelegenheit, mit Messungen vor und nach der Lagerung die Dämmwirkung mit einer Lagerung mit ISOPOL[®] zu ermitteln.

Die im vorliegenden Bericht dokumentierten Schwingungsmessungen wurden mit dem Mess-System SYSCOM MR2002 durchgeführt.

¹ BEKS: Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen, 1999, Herausgeber: Bundesamt für Umwelt BAFU (für die Beurteilung von Erschütterungen aus dem Schienenverkehr verweist die BEKS auf die DIN 4150)

2. Mess-System SYSCOM MR2002

Aufnehmer: Uniaxiale Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer (Geophone)
Abtastfrequenz: 800 Messwerte pro Sekunde
Messbereich: Frequenz: 1 bis 320 Hz / Amplitude: 0.0001 bis 100 mm/s



Abb. 1 Messgerät MR2002 (links) Schwinggeschwindigkeitssensoren MS2003 (rechts)

3. Teststrecke Carouge: rue St-Victor – place du Marché

3.1. Planung, Auslegung

Die rue St Victor durchquert den historischen Kern der Stadt Carouge. Zwischen zwei Häuserreihen aus dem 18. Jahrhundert verkehren mehrere Tramlinien auf zwei Gleisen. Der Trambetrieb im 2-3 Minutentakt verursacht erhebliche Störungen und die Bewohner setzen die öffentlichen Genfer Verkehrsbetriebe TPG (Transports Publics Genevois) unter permanenten Druck (siehe Abb. 2).

Es gibt jedoch kein Budget, weder für die Verlegung der Tramlinie noch für eine gesamthafte Sanierung. Im Rahmen der regulären Unterhaltsarbeiten sanieren die TPG nach und nach die bestehenden Gleise.



Abb. 2 Tramlinie auf der rue St Vicot in Carouge

Im Sommer 2011 wurden durch die TPG die 15 m langen und sehr abgenützten Gleise bei der Einmündung der rue St-Victor in die place du Marché ersetzt. Die bestehenden Tramschienen waren sehr stark ausgefahren und die Räder liefen stellenweise auf dem Schienengrund. Die Schlagstellen führten zu einem stark impulshaltigen Geräusch. Da die Schienen auch entkoppelt werden sollten, war es für HBT-ISOL eine Gelegenheit, die Wirksamkeit einer Lösung mit ISOPOL[®]-Matten zu demonstrieren. Eine Körperschallmessung vor und nach der Sanierung erschien wenig sinnvoll (kurze Strecke und stark ausgeschlagene Schienen). Um eine Aussage über die Wirkung der Lagerung zu machen, wurden im Sanierungsbereich die Tramgleise mit einem Shaker angeregt und die Schwinggeschwindigkeit vor und nach der Sanierung gemessen und verglichen. Messungen in den Wohnungen selber waren nicht möglich. Die Planung und Auslegung der Lagerung erfolgte zusammen mit der TPG.

3.2. Ausführung

Die Ausführung der Lagerung gestaltete sich äusserst schwierig. Der Trambetrieb durfte nicht unterbrochen werden, so dass die Sanierungsstrecke alle drei Minuten mit einem Tram befahren wurde. Zudem waren die Platzverhältnisse sehr eng. Im Sanierungsbereich wurden die Gleise nacheinander freigelegt und provisorisch abgestützt sowie seitlich gespiesst. Anschliessend wurde der U-förmige Geleistrog betoniert und mit ISOPOL[®] ausgekleidet. Nach dem Betonieren der Massenplatte wurden die abgenützten Schienen entfernt und neue eingebaut. Diese wurden nun auf der Massenplatte nivelliert. Die provisorischen Stützen konnten ausgebaut, in diesen Bereichen die ISOPOL[®]-Dämm-Matten eingebaut, und die verblei-

benden Öffnungen ausgegossen werden. Nach dem definitiven Ausrichten der Schienen wurde der Raum zwischen der Massenplatte und dem Schienenfuss ausbetoniert. Das Konzept von HBT-ISOL sah vor, das gesamte Masse-Feder-System der neuen Gleise vom Rest der Strasse akustisch komplett zu trennen, auch im Bereich des Strassenoberbelags. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Ausführung der Fugen gewidmet. Der gefederte Bereich soll sich bewegen können ohne beim Übergang zum starren Teil der Strasse Schäden am Oberbelag zu verursachen. Zudem müssen die Fugenabdichtungen den Ansprüchen des intensiven Verkehrs und der Witterung über Jahre hinaus gerecht werden. Um diese Anforderungen zu erfüllen, konnte HBT-ISOL in der breiten ISOPOL® Produktpalette die passenden Materialien finden (ISOPOL®-120-17-8, ISOPOL®-210-15, ISOPOL®-150-25) und die entsprechende Konstruktion mit TPG auslegen.

3.3. Messungen bei Anregung durch den Shaker

Interessant am Projekt in Carouge war die Möglichkeit, die Störungen vor und nach der Sanierung zu messen. Einschränkend war die Länge des zu sanierenden Streckenbereichs von lediglich 15 m. Mit Tramkompositionen von bis zu 40 m Länge waren Messungen mit dem Tram selber nicht sinnvoll. HBT-ISOL entschloss sich deshalb, die Messungen mit einem speziell für diesen Zweck konzipierten Shaker durchzuführen. Ein Vorteil des Einsatzes eines Shakers ist die Reproduzierbarkeit: Die Störenergien sind genau bekannt und können wiederholt werden.

Die Messungen durften den planmässigen Betrieb der TPG nicht stören. Gemessen wurde in der Nacht nach Betriebsschluss. Auch Stunden nach Betriebsschluss mussten die Messungen vereinzelt unterbrochen werden, da Trams in das Depot zurückfuhren.

Aufbau des Shakers:

Auf einer ausgesteiften Stahlgrundplatte ist ein Zusatzgewicht von 600 kg Masse, ebenfalls in Form von Stahlplatten montiert. Auf diese Stahlplatten überträgt der festgeschraubte Elektromotor mit entsprechenden Unwucht-Scheiben die Schwingungsenergie. Beim Motor handelt es sich um einen Drehstrom-Asynchron-Motor mit je einer Unwuchtscheibe auf jeder Seite. Der Motor zeigt eine Leistung von 1.1 kW bei 1'410 1/min. Die Stromversorgung läuft über einen Frequenzumrichter mit 230 V und 4.6 A. Mit dem Frequenzrichter kann die Drehzahl stufenlos verstellt werden. Die Unwuchtmasse liegt total bei 19.5 kg. Für die Messungen auf den Schienen wurde die Unwucht auf 2 kg eingestellt. Die Ankoppelung des Shakers erfolgte mit vier Hubmagneten.

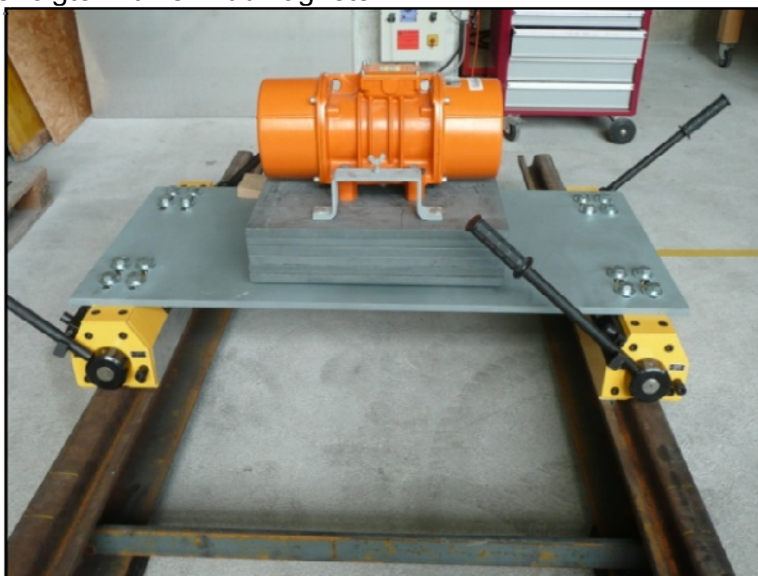


Abb. 3 Shaker zur Anregung der Gleise

3.4. Ergebnisse

Einen ersten Eindruck über die Funktion der Lagerung erhielt man durch die direkt auf den Schienen gemessene Schwinggeschwindigkeit. Vor der Sanierung waren die Schienen über Betonschwellen direkt im Schotterbett/Erdbreich eingebettet, also mit einer relativ hohen Dämpfung gelagert. Dies ergab bei der stärksten Anregung maximale Schwinggeschwindigkeiten von 0.378 mm/s. Nach der Sanierung und der Lagerung mit ISOPOL®-120 überhöhte sich die maximale Schwinggeschwindigkeit auf 0.683 mm/s. Vergleicht man die Schwinggeschwindigkeiten am Trottoir-Rand bei einer Distanz von 1.5 m zur Mittenachse des angeregten Gleises, so bewirkt die Lagerung mit ISOPOL® eine Reduktion der maximalen Schwinggeschwindigkeit von ca. 2.5 dB. Erhöht man die Entfernung der Sensoren auf 3 m, so zeigt sich eine Reduktion von ca. 4.5 dB und bei rund 6 m Entfernung gar um über 6 dB.

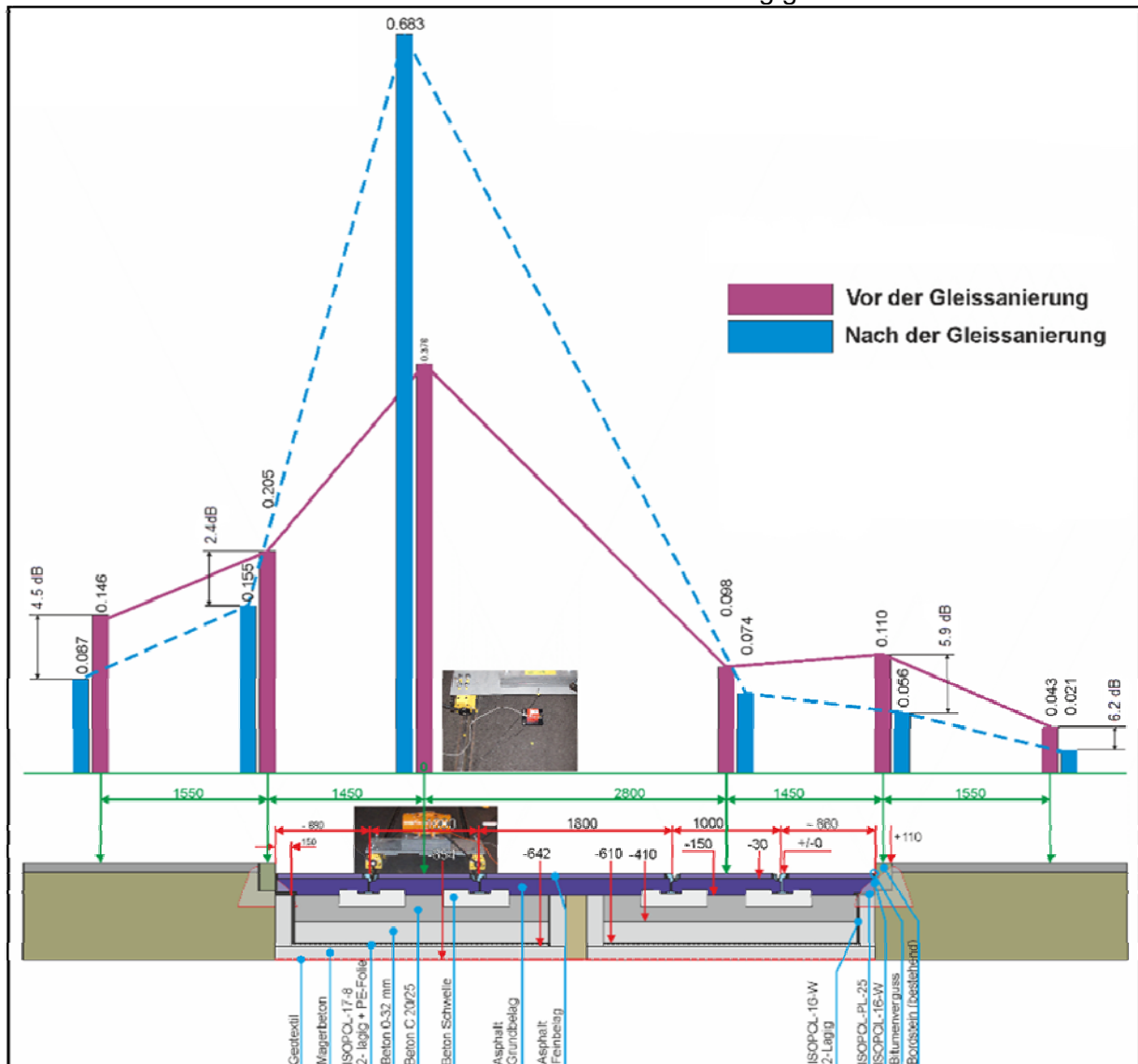


Abb. 4 Übersichtsgrafik – Ergebnisse aus der Teststrecke Carouge

4. Teststrecke TCOB an der route de Chancy

4.1. Planung, Auslegung

Das Projekt TCOB ist ein Teil der Ausbaupläne der Tramverbindungen von Kanton und Stadt Genf. Es verbindet den HB Cornavin mit dem Vorort Gemeinde Bernex. Die ganze Linie ist seit Dezember 2011 im Betrieb. An verschiedenen Orten sind Massnahmen zur Erschütterungs- und Körperschalldämmung getroffen worden. So wurden beispielsweise die Tramgleise auf einer schwimmenden Lastverteilplatte befestigt, welche auf elastischen Isoliermatten liegt. Gegen Ende der Bauphase wurde auf der Höhe der route de Chancy 136 eine Teststrecke definiert. Damit wollte man herausfinden, ob und mit welchem Material in den angrenzenden Gebäuden die Vorgaben aus der BEKS bzw. aus der DIN 4150-2 eingehalten werden können. Ebenso wollte man feststellen, welches Material bei den gegebenen praxisnahen Bedingungen bessere Dämmwerte liefert.

4.2. Ausführung

Die Teststrecke besteht aus zwei ca. 75 m langen, parallel verlaufenden, gelagerten Gleisen mit 5 m langen Übergangszonen an beiden Enden. Unter jedem Gleis befindet sich eine elastisch gelagerte Lastverteilplatte. In Fahrtrichtung Genf-Bernex wurde die Lastverteilplatte auf 25 mm dicken Polyurethan-Schaumstoffplatten des Typs Sylomer® R25 gelagert. In der Gegenrichtung lagert die Lastverteilplatte auf zwei Lagen Elastomerkornplatten des Typs ISOPOL®-SB-16/100, mit einer Gesamtdicke von 34 mm. Die elastischen vertikalen Fugen gehen bis zur Oberfläche des Oberbelags. Die Fugen im Oberbelag wurden für beide Strecken mit ISOPOL®-Platten realisiert. (Situationsplan siehe Abb. 5 und Abb. 6).

Die Tramgleise verlaufen in der Mitte der Strasse, mit einer Fahrbahn für den motorisierten Verkehr links und rechts. Am Ende der Teststrecke Richtung Genf befindet sich die Haltestelle Onex. Ca. 60-80 m nach dem Ende der Teststrecke in Richtung Bernex befindet sich ein Kreisell mit einem Lichtsignal, welcher dem Tramverkehr den Vortritt gibt. Gleichzeitig mit dem Bau der Gleise wurden alle Leitungen im Bereich der Strasse erneuert. Links und rechts des Tramtrassees wurden Wasserkollektoren mit grösserem Durchmesser verlegt. Man muss davon ausgehen, dass der Grund bis zu einer Tiefe von 2.5-3.0 m mehrmals aufgewühlt und neu aufgebaut wurde.

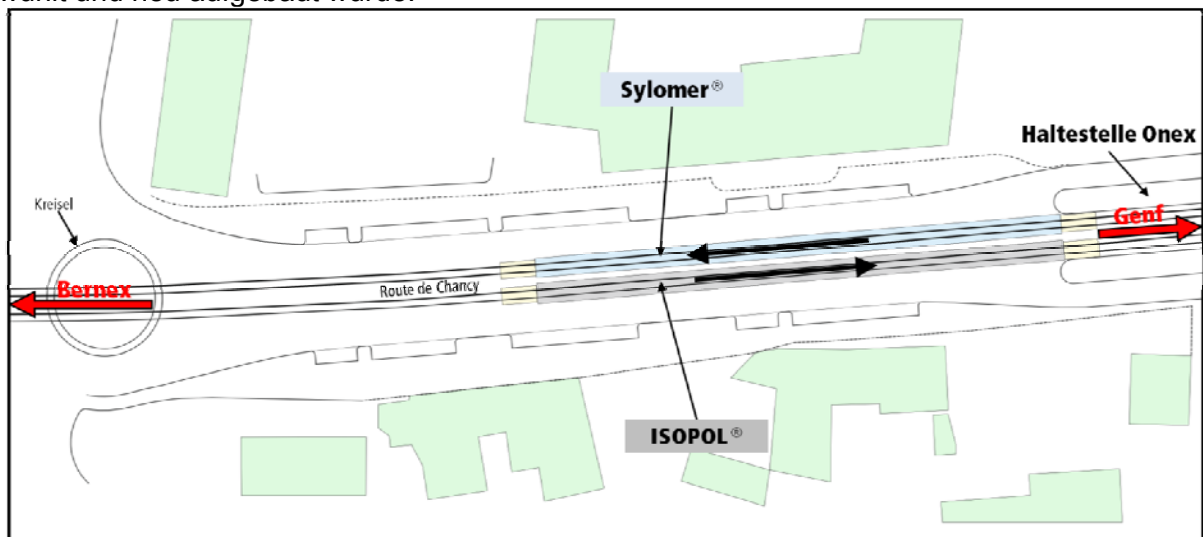


Abb. 5 Situation Teststrecke TCOB

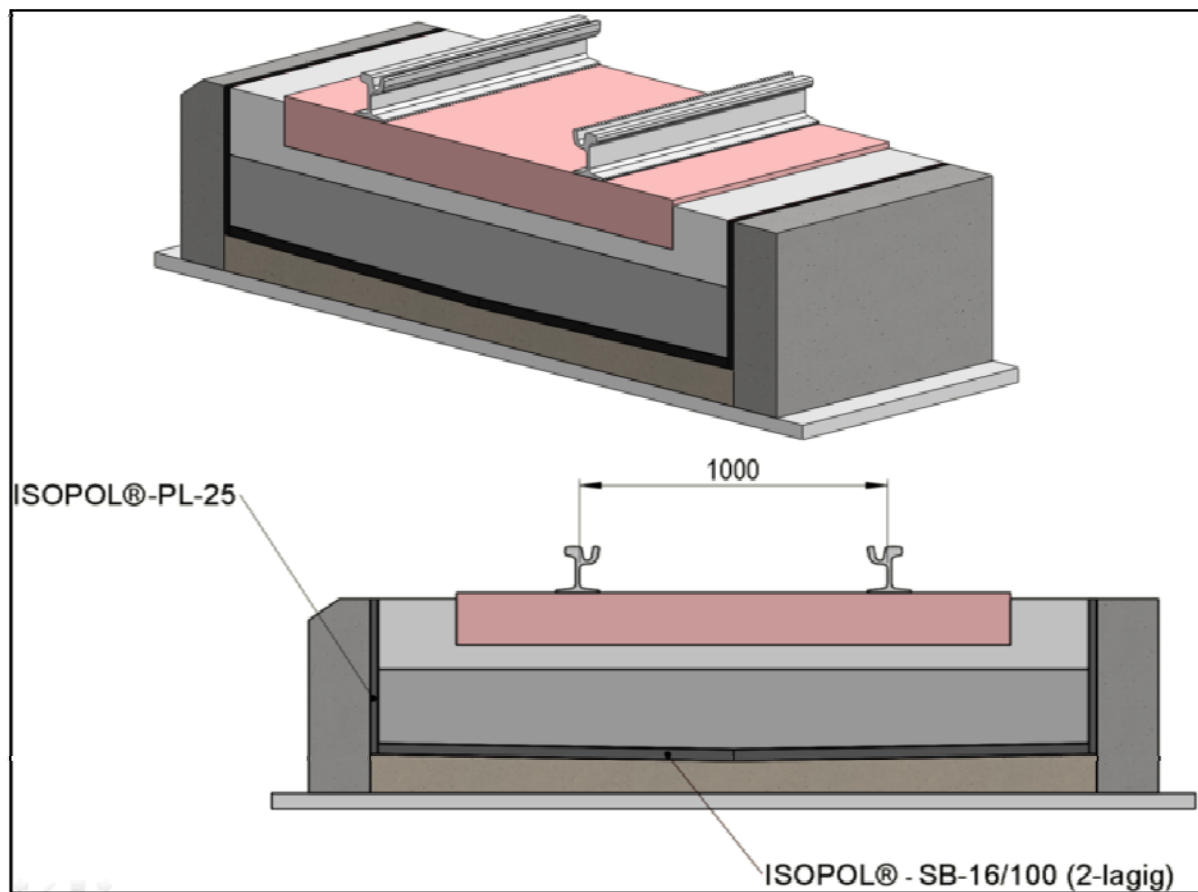


Abb. 6 Schnitt und 3D-Ansicht der elastisch gelagerten Lastverteilplatte auf der Seite ISOPOL®

Die route de Chancy ist ein stark befahrener Streckenabschnitt, der das Stadtzentrum von Genf mit Bernex verbindet. An der Abzweigung route de Chancy/Ch. de l'Auberge führt die Tramstrecke auf geradem Weg über einen Kreisverkehr. Auf Höhe des Kreisverkehrs befindet sich eine Lichtsignalanlage (siehe Abb. 7).

Auf der gegenüberliegenden Seite führt die Strecke in entgegengesetzter Richtung von Bernex ins Stadtzentrum von Genf (siehe Abb. 8).

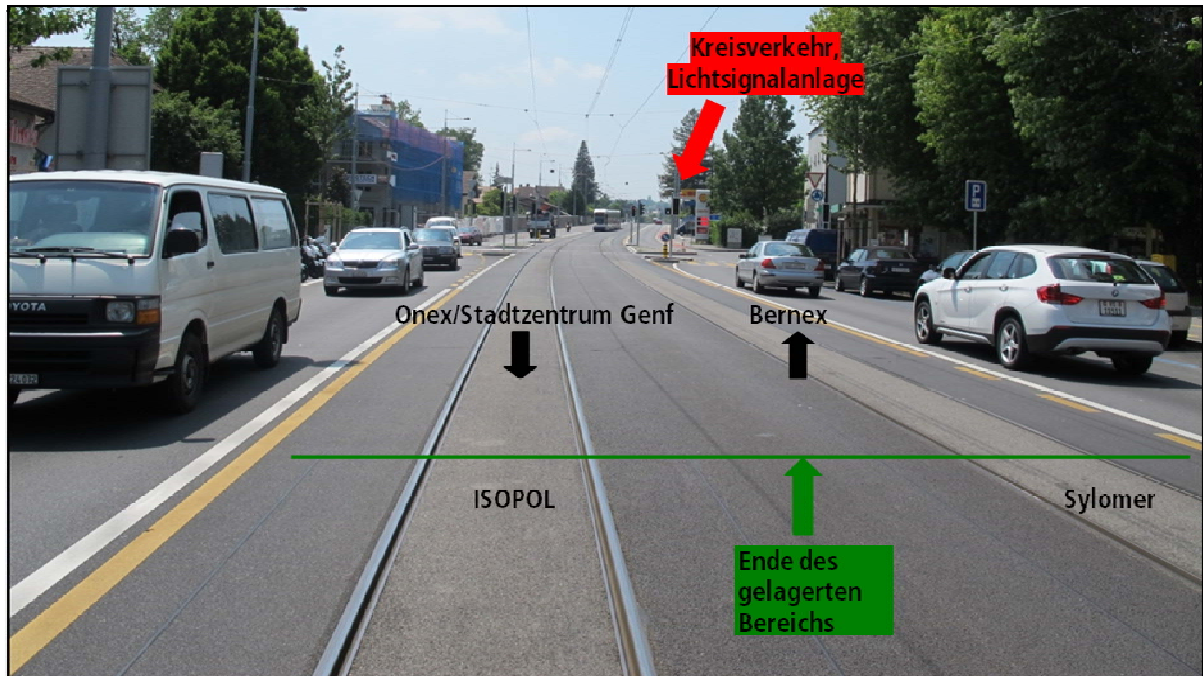


Abb. 7 Situation Teststrecke TCOB: Blick in Fahrtrichtung Bernex

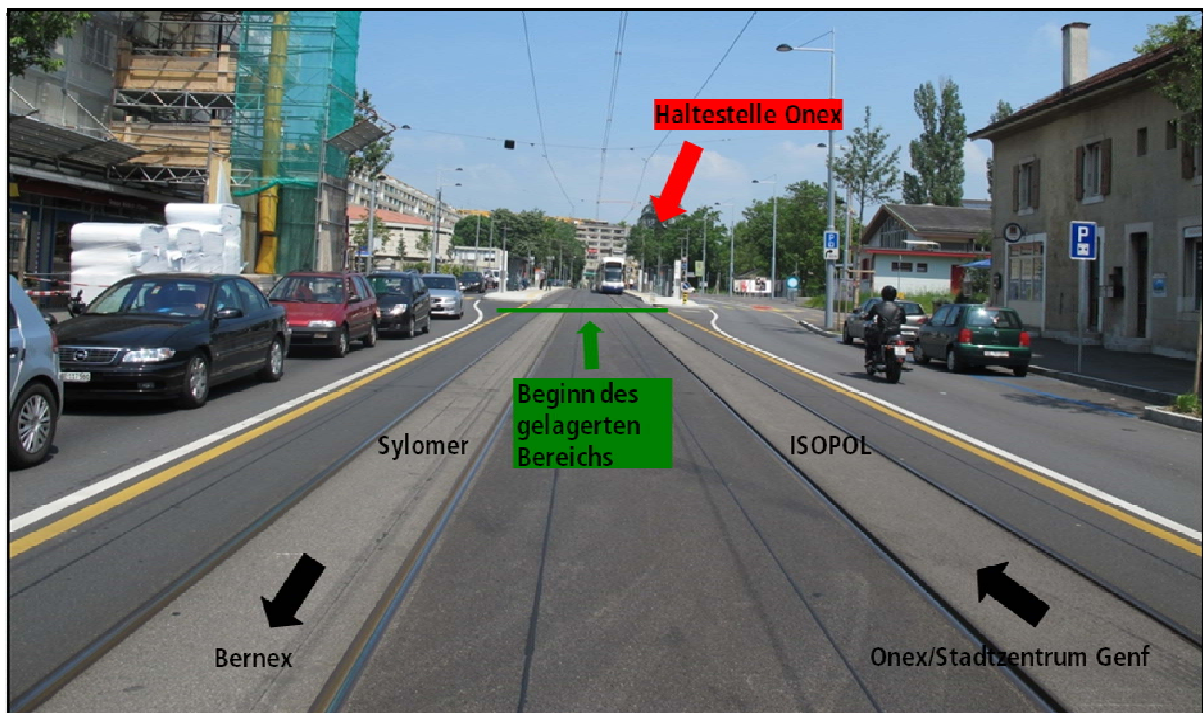


Abb. 8 Situation Teststrecke TCOB: Blick in Fahrtrichtung Genf

4.3. Messungen

4.3.1. Messungen vom Dezember 2011 und Mai 2012

HBT-ISOL führte im Dezember 2011 die ersten Messungen an dieser Teststrecke durch. Dabei wurden Schwingungen sowohl während Tramdurchfahrten selber als auch während der Anregung mit dem Shaker gemessen.

Die Sensoren wurden für die ISOPOL®- wie auch für die Sylomer®-Seite an 3 jeweils gegenüberliegenden Stellen entlang der Tramlinie positioniert: einmal im gelagerten Bereich und zweimal ausserhalb des gelagerten Bereichs. Das Ziel dieser Messungen mit der gewählten Sensoranordnung war ein Vergleich der Materialien.

Diese Messungen bedeuteten einen grossen Aufwand: teilweise musste die Strasse für PWs abgesperrt werden und die Messungen mit dem Shaker konnten nur in der Nacht durchgeführt werden.

Doch während der Auswertung der Ergebnisse kam dann die grosse Ernüchterung: wir beobachteten eine grosse Streuung der Einzelmessungen und teilweise unerklärliche Effekte. Dazu kamen unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten, Tramkompositionen, Zustand und Beladung der Fahrzeuge und Bodenbeschaffenheiten, welche eine gesicherte Aussage über den Vergleich der Funktion der eingebauten Lagerungen unmöglich machten.

Im Mai 2012 fanden erneut Messungen mit je einem Sensor im gelagerten und zwei Sensoren im ungelagerten Bereich statt. Es wurde wiederum sowohl während Tramfahrten als auch während der Anregung durch den Shaker gemessen.

Doch nach der Analyse der Ergebnisse wurde festgestellt, dass bereits die beiden Sensoren im ungelagerten Bereich sehr stark streuten. Daraus resultierten dementsprechende grosse Streuungen der Dämmwirkung. Aus diesem Grund wurde entschieden, eine weitere Messung mit mehr Sensoren, sowohl im ungelagerten als auch im gelagerten Bereich, durchzuführen.

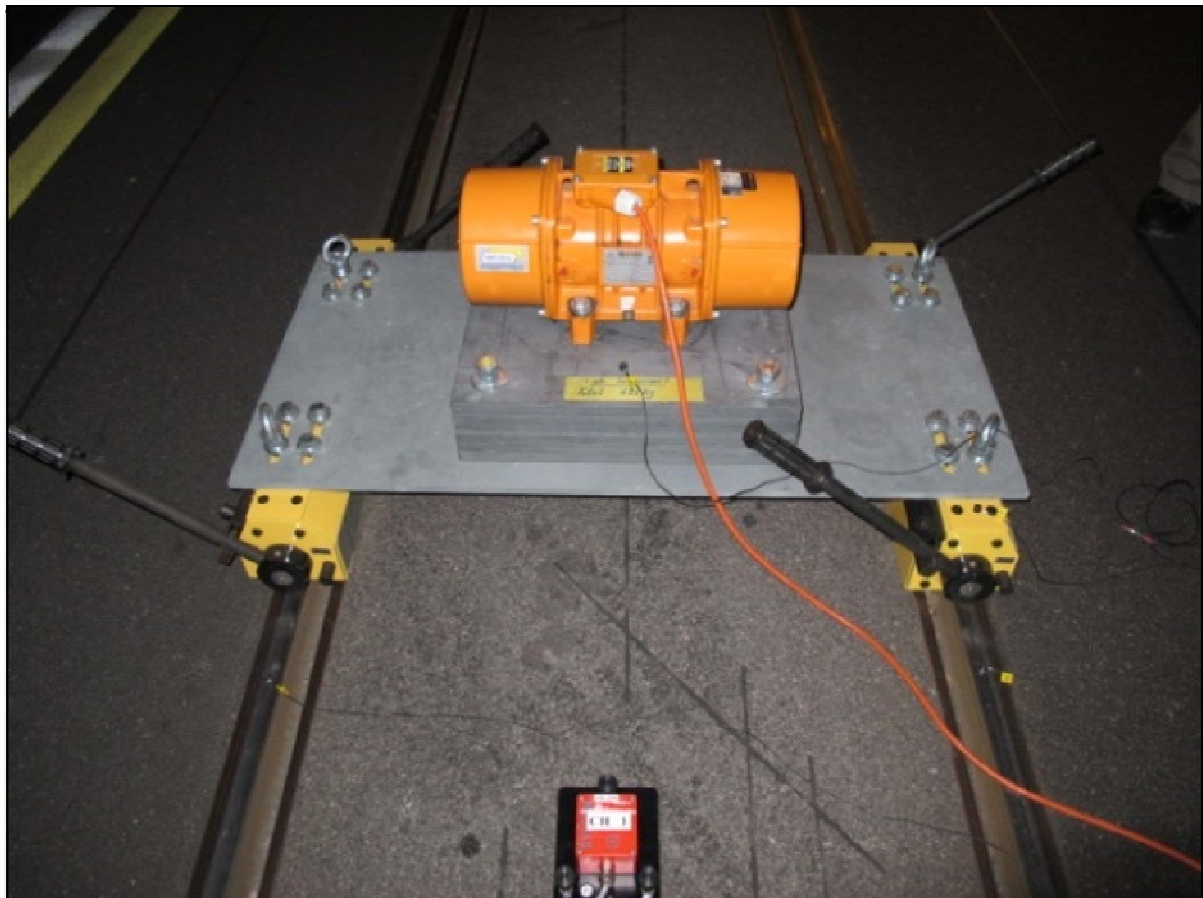


Abb. 9 Shaker gekoppelt auf dem Gleis (Messung vom Mai 2012)

4.3.2. Messungen vom April 2013

Mit der Erfahrung aus zwei Messungen fand schließlich im April 2013 die dritte Messkampagne statt. Es wurde dabei bewusst auf die Anregung durch den Shaker verzichtet. Im Gegenzug wurden entlang der Strecke, in ca. 7.5 m Entfernung vom Gleis, insgesamt 24 uniaxiale Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer positioniert, d.h. 12 pro Seite. Das Ziel dieser Vielzahl von Sensoren war es, einen besseren Eindruck über den Einfluss der Bodenhomogenität sowie der Fahrtrichtung / -geschwindigkeit zu erhalten. Die nachfolgende Abb. 10 gibt einen Überblick über die Positionen der insgesamt 8 Messketten (MK) mit jeweils 3 uniaxialen Sensoren.

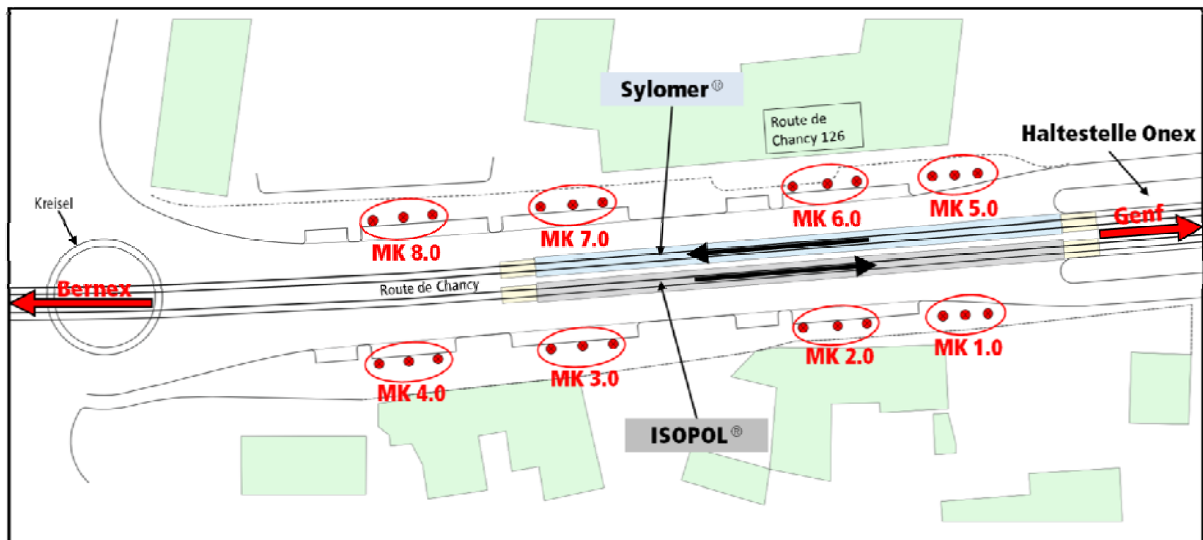


Abb. 10 Teststrecke TCOB – Positionen der Sensoren während der Messung vom April 2013

Für jede Fahrtrichtung und Tramdurchfahrt werden einzeln die Werte im gelagerten Bereich mit den Werten aus dem nicht gelagerten Bereich (MK4.0 und MK8.0) gegenübergestellt. Im Falle der Seite ISOPOL® werden die Werte aus den Messketten MK1.0 bis MK3.0 mit den Werten der Messkette MK4.0 verglichen und daraus die entsprechenden Dämmwirkungen ermittelt.

Auf der Seite Sylomer® werden dementsprechend die Werte aus den Messketten MK5.0 bis MK7.0 mit den Werten der Messkette MK8.0 verglichen und daraus die Dämmwirkungen ermittelt.

Das heisst also, dass ein Wert für die Dämmwirkung für eine Tramdurchfahrt gilt, zu der die Fahrtgeschwindigkeit und -richtung sowie der Tramtyp protokolliert wurde. Somit werden Unterschiede aufgrund des Fahrzeugsystems, des Fahrzeugzustands und der Betriebsart ersichtlich.

Die Berechnung der Dämmwirkung D_{MFS} wurde wie folgt durchgeführt:

$$D_{MFS,i,j} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{VRMS_Referenz,i,j}{VRMS_MFS,i,j} \right)$$

$VRMS_Referenz,i$	RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit im ungelagerten Bereich
$VRMS_MFS,i$	RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit im gelagerten Bereich (MFS: Masse-Feder-System)
i	Index für die Messung
j	Index für das Terzband

Die Geschwindigkeit der Tramdurchfahrten wurde mit einem Laser-Geschwindigkeitsmessgerät ermittelt. Da die Geschwindigkeit einer Tramdurchfahrt über die gesamte Teststrecke nicht konstant ist, wurde der Wert festgehalten, der ungefähr in der Mitte der Teststrecke vom Messgerät angezeigt wurde (ungefähr bei der Position der Messkette MK 2.0 bzw. MK 6.0). Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Geschwindigkeitsmessungen ist in Abb. 11 enthalten. In Richtung Genf, also auf Seite ISOPOL®, wurde eine mittlere Geschwindigkeit von 31.2 km/h für den Tramtyp Cityrunner und eine mittlere Geschwindigkeit von 31.8 km/h für den Tramtyp Tango ermittelt. Mit 29.6 km/h für den Tramtyp Cityrunner und 29.2 km/h für den Tramtyp Tango lag die mittlere Geschwindigkeit in Richtung Bernex, also auf der Seite Sylomer®, tiefer.

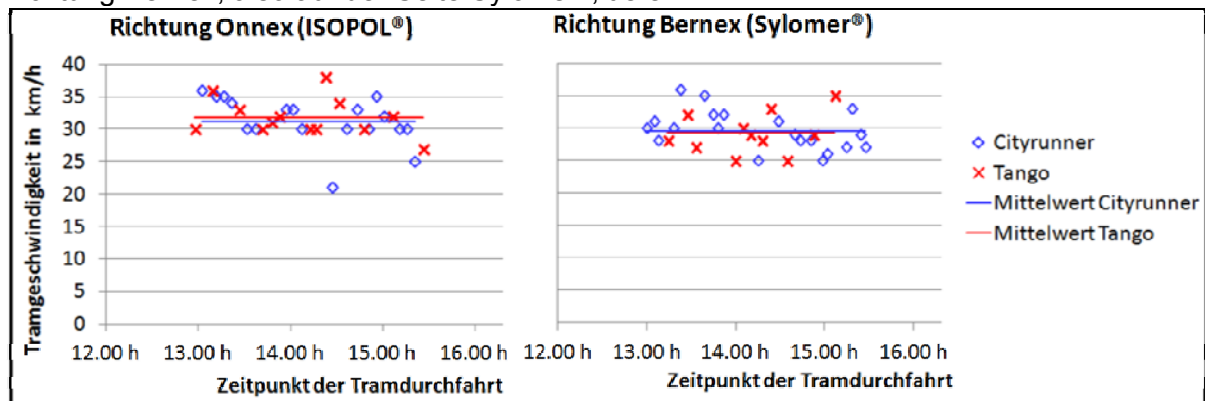


Abb. 11 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Geschwindigkeitsmessungen

Zusätzlich zu den Messungen am Strassenrand wurden auch Schwingungsmessungen im Keller und im Zimmer einer Wohnung des Wohnhauses Route de Chancy 126 durchgeführt (Position des Wohnhauses siehe Abb. 10):

Messungen im Wohnhaus Route de Chancy 126 – Keller (UG):

Die Situation im Keller ist in Abb. 12 ersichtlich. In diesem Kellerraum, welcher an die Route de Chancy angrenzt (Distanz zum Gleis ca. 10 m) wurden Schwinggeschwindigkeitsmessungen als auch Luftschallmessungen durchgeführt. Aufgrund der Lage (Eingang zur Wohnung bzw. Keller auf der der Strasse abgewandten Seite) war es nicht möglich, die Messungen im Keller mit den Messungen draussen entlang der Strasse hardwaremässig zu synchronisieren.

Messungen des abgestrahlten Körperschalls wurden mit 3 verschiedenen Mikrofonpositionen gemacht, wobei die Raumgrösse keine grosse Variation erlaubte.



Abb. 12 Messung im Keller (UG)

Messungen im Wohnhaus Route de Chancy 126 – Wohnung im 2. OG:

Die Sensoren in der Wohnung wurden im Wohnzimmer, welches ein Fenster mit Blick in Richtung Tramlinie beinhaltet, positioniert (siehe Abb. 13 und Abb. 14). Eine Messung des abgestrahlten Körperschalls war in der Wohnung aufgrund des dominanten Luftschallanteils nicht möglich.

Abb. 13 Erschütterungsmessung in der Wohnung
(1)

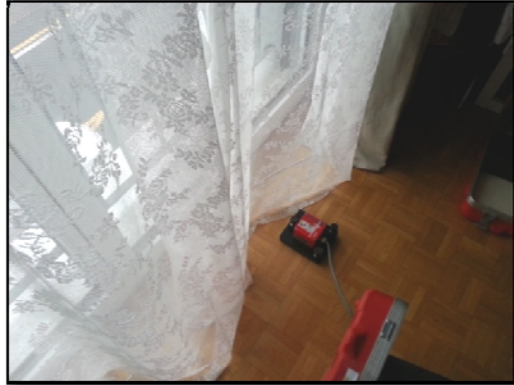


Abb. 14 Erschütterungsmessung in der Wohnung
(2)



4.4. Ergebnisse

Da die 8 Messketten mit einem vernünftigen Aufwand nicht hardwaremässig synchron ausgelöst werden konnten (insbesondere quer über die Strasse), erfolgte die Auslösung der Messungen automatisch durch die Vorgabe eines fixen, für alle Messketten gleichen Schwellwertes (Triggerlevel). Mit dieser Auslösemethode kann nicht vermieden werden, dass das eine oder andere Ereignis, wie z.B. Durchfahrt eines schweren LKWs, erfasst wird. Aus der Vielzahl von Messungen mussten deshalb zuerst die brauchbaren Ergebnisse ausgesucht werden. Aus der zeitlichen Abfolge der drei Messkurven einer jeweiligen Messkette, kann jedoch auch nachträglich sehr gut die Fahrtrichtung ermittelt werden. Als Beispiel ist nachfolgend die Durchfahrt von 14:07 Uhr vom 29.04.2013 dargestellt.

Im Tramdurchfahrten-Protokoll wurde diese Durchfahrt wie folgt festgehalten:

Messung Nr.	Uhrzeit	Richtung	Tramtyp	Geschwindigkeit
15	14:07	Genf	Cityrunner	30 km/h

Die entsprechenden Messkurven der drei Sensoren sind in der folgenden Abb. 15 dargestellt:

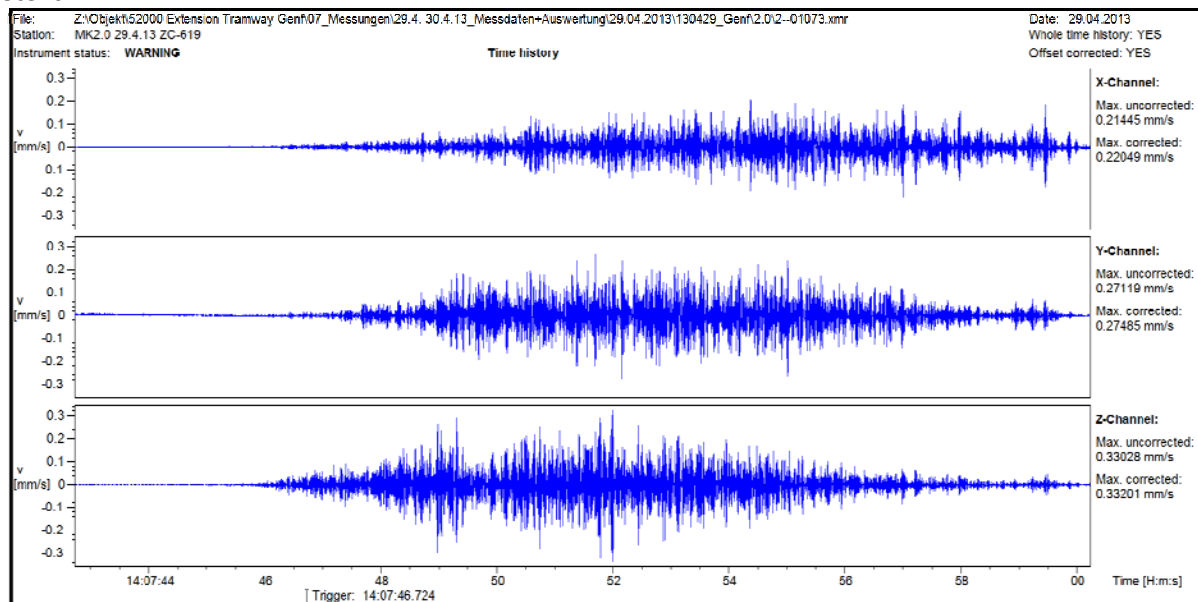


Abb. 15 Beispiel aus den Messkurven: MK 2.0, 14:07 (Schwinggeschwindigkeit)

Die drei Sensoren (1=X, 2=Y und 3=Z) einer Messkette waren jeweils alle in derselben Reihenfolge und Richtung positioniert, wie das in Abb. 16 bei der MK2.0 dargestellt ist. Entgegen der Bezeichnung in den Diagrammen mit X, Y und Z messen alle 3 Sensoren jeweils in vertikaler Richtung.

Die zeitliche Abfolge der drei Messkurven aus Abb. 15 stimmt also mit der protokollierten Durchfahrt um 14:07 Uhr überein, d.h. zuerst Sensor 3, dann Sensor 2 und schliesslich Sensor 1 → Fahrtrichtung Genf.

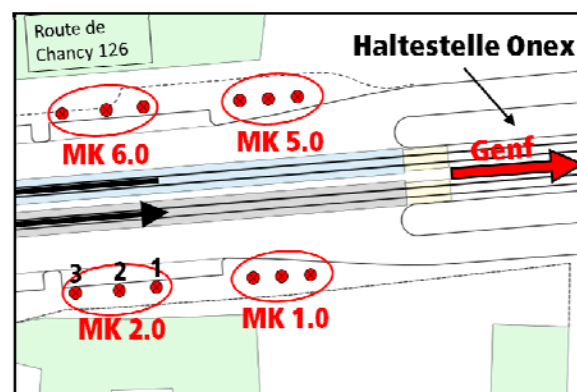


Abb. 16 Reihenfolge und Richtung der einzelnen Sensoren

5. Auswertung

Aus der Vielzahl von Ergebnissen aus den Messungen am Straßenrand, im Keller und in der Wohnung konnten die unterschiedlichsten Analysen, Berechnungen und Vergleiche gemacht werden. Dabei ging es einerseits um den Vergleich der resultierenden Dämmwirkung auf der Seite ISOPOL® mit der resultierenden Dämmwirkung auf der Seite Sylomer®. Andererseits ging es auch darum, die verschiedenen Einflussfaktoren zu verstehen und nach Möglichkeit zu quantifizieren. Dieser zweite Teil der Auswertung bereitete den weitaus grösseren Aufwand, war aber nicht weniger interessant. Da gewisse Teilarbeiten und Analysen noch nicht abgeschlossen sind bzw. noch weiter vertieft werden müssen und eine umfassende Darstellung aller Auswertungen den Rahmen des vorliegenden Berichtes sprengen würde, ist nachstehend lediglich ein Auszug aus den Ergebnissen dargestellt.

Um die Auswirkungen der Erschütterungen auf den Menschen in Gebäuden genauer zu untersuchen, ist zudem eine Prognose mit VIBRA geplant. Mit VIBRA können gelagerte und ungelagerte Gleise sowie verschiedene Gebäudetypen berücksichtigt werden.

5.1. Vergleich der Tramtypen Cityrunner und Tango

In der nachfolgenden Abb. 17 sind die Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit v_{RSS} dargestellt, links vom Tramtyp Cityrunner und rechts vom Tramtyp Tango, auf Seite ISOPOL®. Der RSS-Wert des Signals im Frequenzbereich entspricht dem RMS-Wert des Signals im Zeitbereich. Aus dem Vergleich der Schwinggeschwindigkeiten des Tramtyps Tango mit dem Tramtyp Cityrunner kann keine eindeutige Tendenz festgestellt werden. Aus den Messungen auf der Seite Sylomer® oder an anderen Positionen ist ebenfalls kein Trend erkennbar. Der Unterschied zwischen den beiden Tramtypen Tango und Cityrunner kann deshalb für die Schwingungsmessungen als unbedeutend bezeichnet werden.

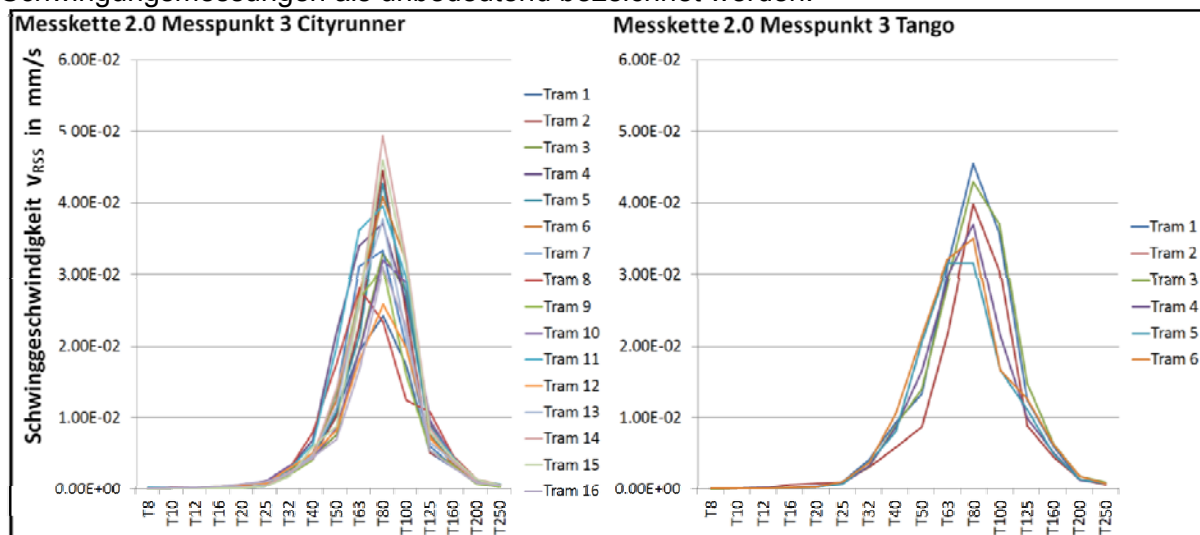


Abb. 17 Vergleich Terzspektren der Schwinggeschw. v_{RSS} zwischen Tango und Cityrunner (MK 2.0, Sensor 3), Seite ISOPOL®

5.2. Dämmwirkung über einzelne Tramdurchfahrten

Im Folgenden ist für ausgewählte Tramdurchfahrten die Dämmwirkung über dem Terzfrequenzbereich von 0 bis 250 Hz aufgetragen. Durch die Anordnung der einzelnen Diagramme pro Messkette ist qualitativ sehr gut der Unterschied in der Dämmwirkung ersichtlich, je nachdem welcher Sensor bzw. welche Messkette zur Berechnung der Dämmwirkung zugrundeliegt.

5.2.1. Tramdurchfahrt 12:58 Uhr, Cityrunner, Richtung Genf (Seite ISOPOL®)

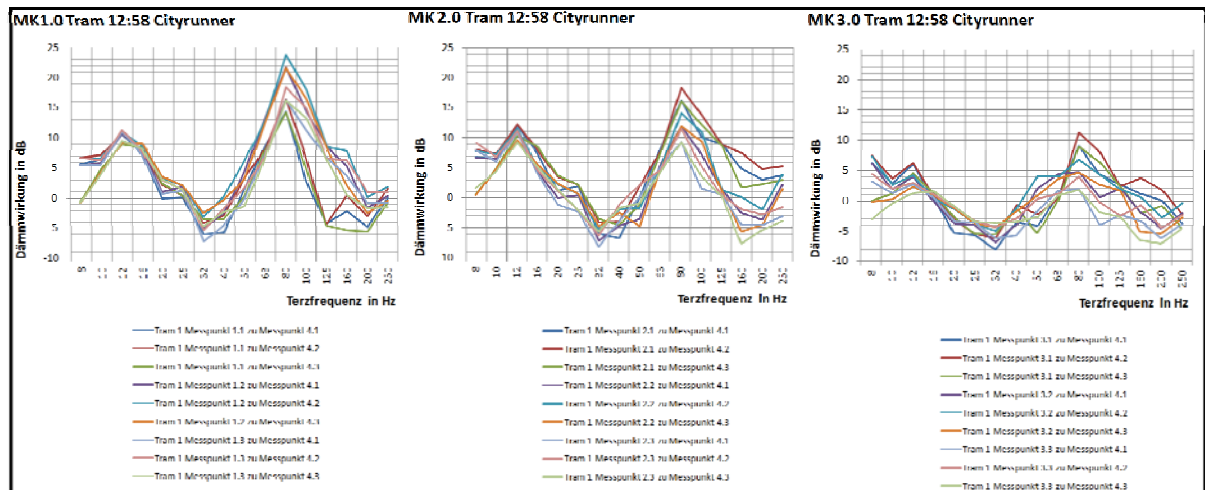


Abb. 18 Dämmwirkung ermittelt aus Tramdurchfahrt 12:58 Uhr, Cityrunner, Richtung Genf (Seite ISOPOL®)

5.2.2. Tramdurchfahrt 13:22 Uhr, Cityrunner, Richtung Genf (Seite ISOPOL®)

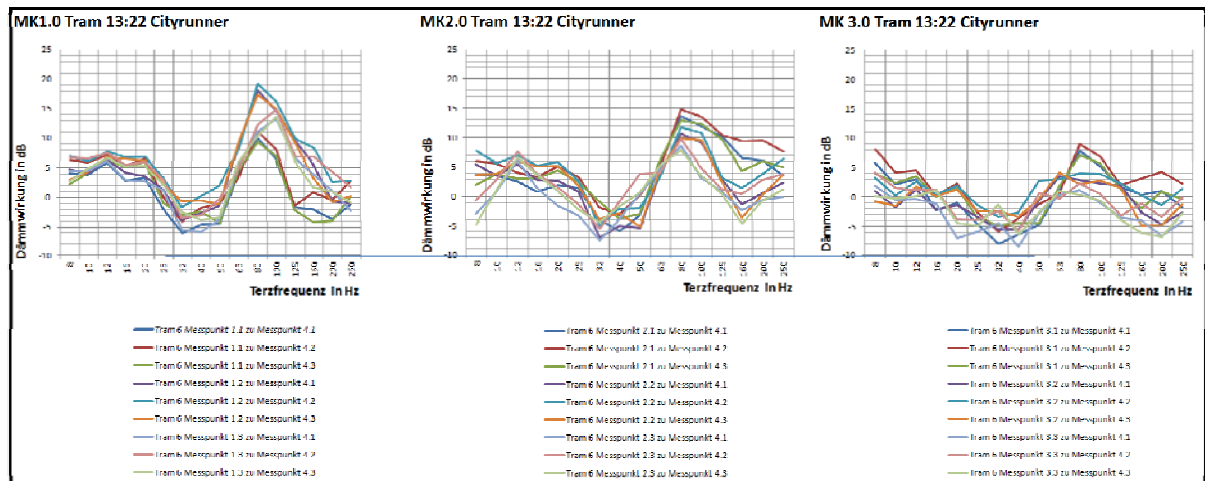


Abb. 19 Dämmwirkung ermittelt aus Tramdurchfahrt 13:22 Uhr, Cityrunner, Richtung Genf (Seite ISOPOL®)

5.2.3. Tramdurchfahrt 13:00 Uhr, Cityrunner, Richtung Bernex (Seite Sylomer®)

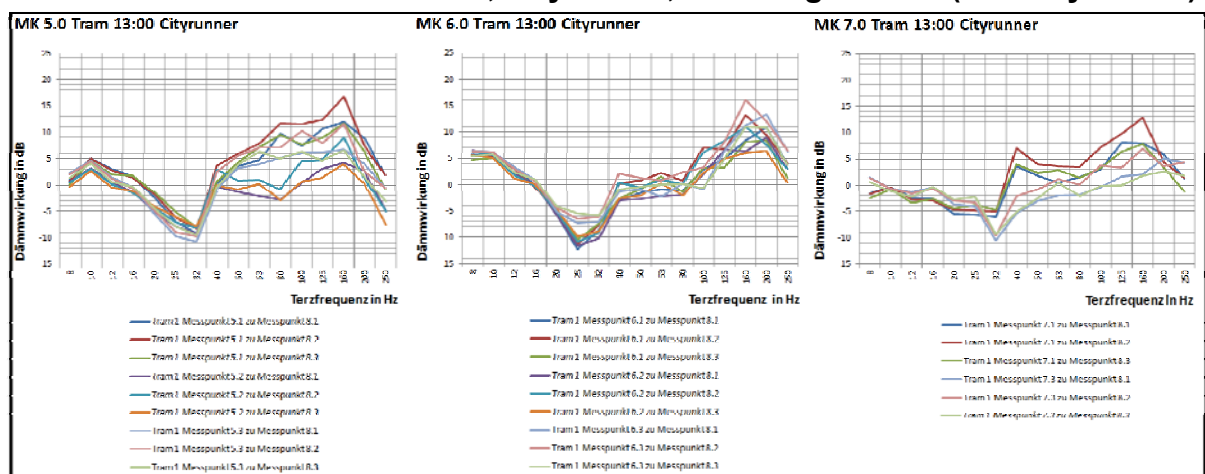


Abb. 20 Dämmwirkung ermittelt aus Tramdurchfahrt 13:00 Uhr, Cityrunner, Richtung Bernex (Seite Sylomer®)

5.2.4. Tramdurchfahrt 13:23 Uhr, Cityrunner, Richtung Bernex (Seite Sylomer®)

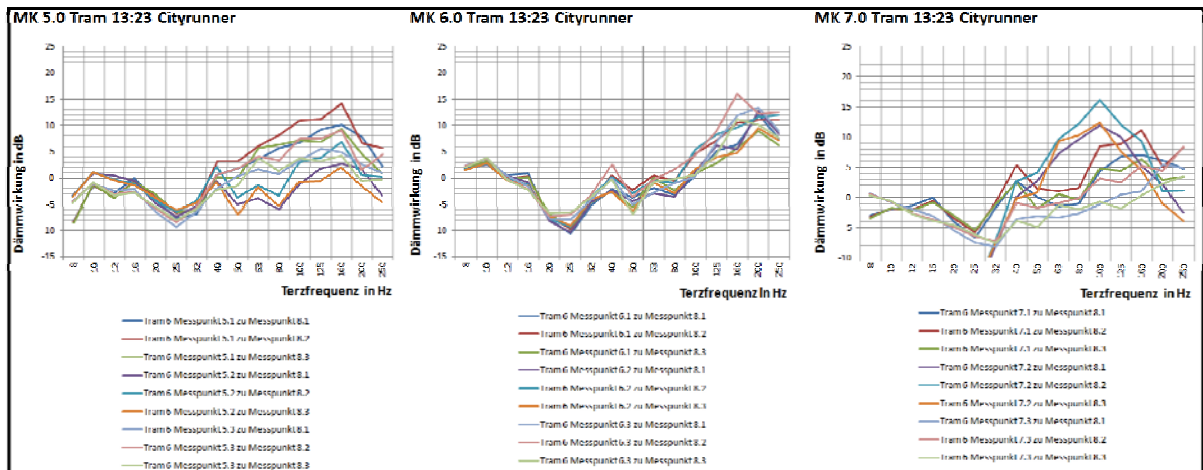


Abb. 21 Dämmwirkung ermittelt aus Tramdurchfahrt 13:23 Uhr, Cityrunner, Richtung Bernex (Seite Sylomer®)

5.2.5. Kommentare zu den Abb. 18 bis Abb. 21

- Bei der Durchfahrt des Trams 13:00 Uhr auf der Seite Sylomer® verunmöglichte ein Drift des Sensors 2 der Messkette MK7.0 die entsprechende Auswertung (für diesen einen Sensor) (siehe Abb. 20)
- Auf der Seite ISOPOL® ist eine klare Abhängigkeit der Dämmwirkung von der Distanz zu den Referenzsensoren der MK4.0 ersichtlich: aus den Messwerten der Messkette MK1.0 wurden die höchsten Dämmwirkungen ermittelt. Das ist plausibel, denn die Messkette MK1.0 löst dann aus, wenn sich die ganze Tramkomposition im gelagerten Bereich und meistens auch bereits in der Abbremsphase befindet. Die Messkette 2.0 ist bereits näher an der Referenz-Messkette und die Geschwindigkeit ist im Mittel an diesem Punkt am höchsten (→ geringfügig tiefere Dämmwirkungen als bei MK1.0). Wenn die Messkette MK3.0 auslöst ist die Tramkomposition nicht vollständig im gelagerten Bereich; das heisst die Sensoren erfassen in diesem Bereich einen Teil der Schwingungen, die aus dem ungelagerten Bereich über den Boden übertragen werden (→ tiefste Dämmwirkungen).
- Auf der Seite ISOPOL® ist ein deutlicher Einbruch der Dämmwirkung bei den Terzbändern 31.5 Hz und 40 Hz ersichtlich. In diesem Frequenzbereich tritt sogar eine Verstärkung auf, die auf die Eigenfrequenz des Lagerungssystems zurückzuführen ist. Der zweite Einbruch der Dämmwirkung auf der Seite ISOPOL® im Frequenzbereich von ca. 125 ... 160 Hz kann noch nicht erklärt werden und wird weiter analysiert.
- Auf der Seite Sylomer® können dieselben Effekte wie auf der Seite ISOPOL® beobachtet werden, wenn auch etwas weniger stark ausgeprägt. Wenn die Messkette MK5.0 auslöst, befindet sich die Tramkomposition noch nicht vollständig im gelagerten Bereich und noch in der Beschleunigungsphase, was wohl die Hauptgründe für die relativ grosse Streuung, insbesondere bei höheren Frequenzen ab ca. 50 Hz, darstellt (siehe Abb. 20 und Abb. 21 – Diagramme links). Wenn die Messkette MK 6.0 auslöst, ist die ganze Tramkomposition im gelagerten Bereich, weshalb die grösseren Dämmwirkungen daraus resultieren sollten. Im Mittel ist jedoch die Fahrgeschwindigkeit bei dieser Messkette höher als bei der Messkette MK5.0, so dass die aus der Messkette MK6.0 resultierende Dämmwirkung nicht besser ist. Die grosse Streuung bei der Messkette MK7.0 ist auf die stark variierende Fahrgeschwindigkeit in diesem Bereich (teilweise müssen die Trams vor dem Kreisel stark abbremsen) zurückzuführen.
- Vergleicht man nun die Dämmwirkung auf der Seite ISOPOL® bei der Messkette MK2.0 mit der Dämmwirkung auf der Seite Sylomer® bei der Messkette MK5.0 (auf beiden Seiten die ganze Tramkomposition auf dem gelagerten Bereich), so sind im ersten Moment vor allem die Unterschiede in den Einbrüchen der Dämmwirkung zu erkennen: die Lage-

rung mit Sylomer® weist eine tiefere Eigenfrequenz auf → Einbruch der Dämmwirkung bei ca. 25 Hz. Darüber hinaus ist auf der Seite Sylomer® der zweite Einbruch erst ab ca. 200 Hz vorhanden und auch weniger stark ausgeprägt als auf der Seite ISOPOL®. Weiter ist es auch interessant zu beobachten, dass auf der Seite ISOPOL® die Dämmwirkung im tiefen Frequenzbereich 0 ... ca. 25 Hz höher ist als auf der Seite Sylomer®.

5.3. Dämmwirkung aus allen Tramdurchfahrten gemittelt

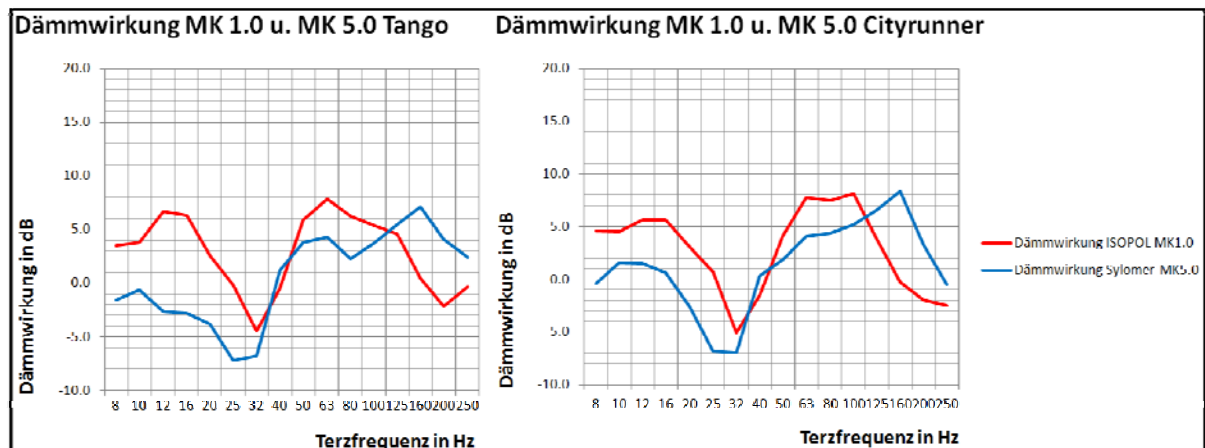


Abb. 22 Dämmwirkung aus allen Tramdurchfahrten gemittelt: für MK1.0 und MK5.0, links Tango / rechts Cityrunner

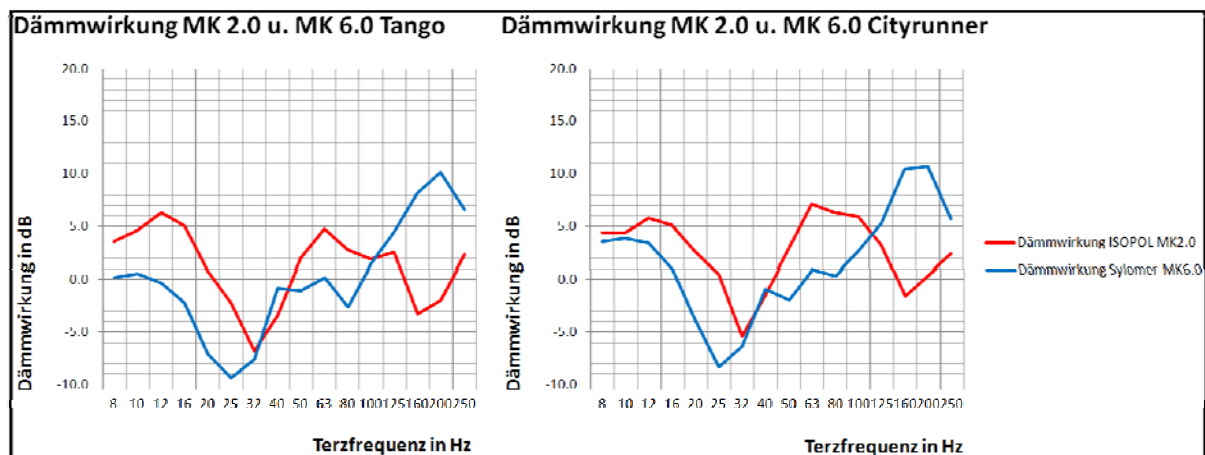


Abb. 23 Dämmwirkung aus allen Tramdurchfahrten gemittelt: für MK2.0 und MK6.0, links Tango / rechts Cityrunner

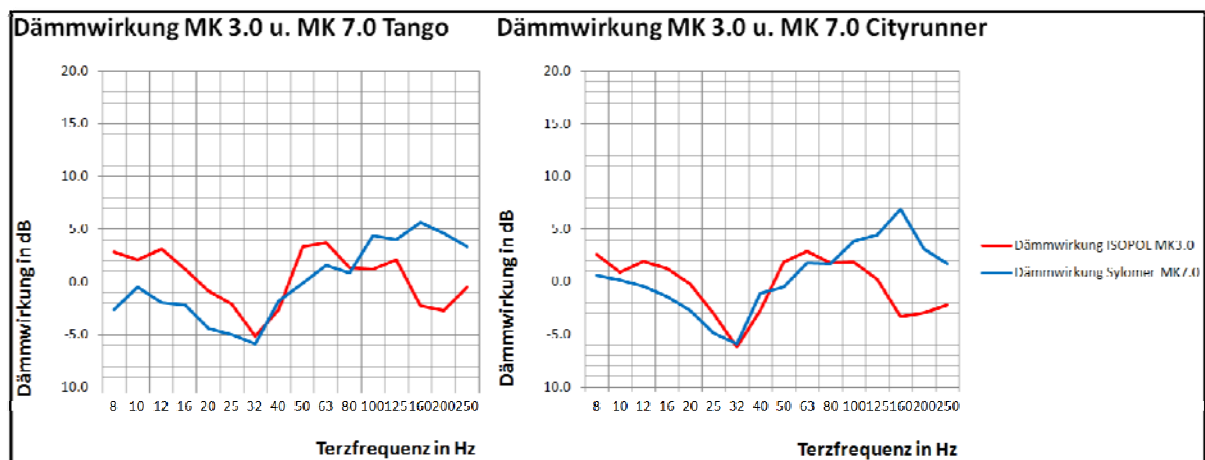


Abb. 24 Dämmwirkung aus allen Tramdurchfahrten gemittelt: für MK3.0 und MK7.0, links Tango / rechts Cityrunner

In Abb. 22 bis Abb. 24 sind in den Diagrammen jeweils die Ergebnisse von zwei quer über die Tramlinie gegenüberliegenden Messketten verglichen:

- MK1.0 mit MK5.0: Messketten mit der grössten Distanz zu den Referenz-Messketten (MK4.0 bzw. MK8.0)
- MK2.0 mit MK6.0: Messketten im Bereich, wo sich die Tramkompositionen in beiden Richtungen vollständig im gelagerten Bereich befinden
- MK3.0 mit MK7.0: Messketten mit der kleinsten Distanz zu den Referenz-Messketten (MK4.0 bzw. MK8.0)

Anhand der gemittelten Dämmwirkungen aus allen erfassten Tramdurchfahrten kann gesagt werden:

- ISOPOL[®] : Einbruch der Dämmwirkung bei 32 Hz und ab 125 Hz
- Sylomer[®] : Einbruch der Dämmwirkung bei 25 Hz (sowie ab 200 Hz, jedoch nicht stark ausgeprägt)
- Vergleich ISOPOL[®] / Sylomer[®] :
 - höhere Dämmwirkung im Frequenzbereich bis ca. 20 Hz mit ISOPOL[®]
 - höhere Dämmwirkung im Frequenzbereich ab ca. 100 Hz mit Sylomer[®]

Im Folgenden sind nun Vergleiche von Messketten diagonal über die Strasse dargestellt, d.h. MK2.0 mit MK7.0 und MK3.0 mit MK6.0. Dieser Vergleich ist sinnvoll, denn so erhält man einen besseren Eindruck über den Einfluss der Geschwindigkeit (die Geschwindigkeiten bei MK2.0 und MK7.0 sind bei vielen Tramdurchfahrten besser vergleichbar als die Geschwindigkeit von MK2.0 mit MK5.0). Analog ist auch ein Vergleich von MK3.0 mit MK6.0 interessant.

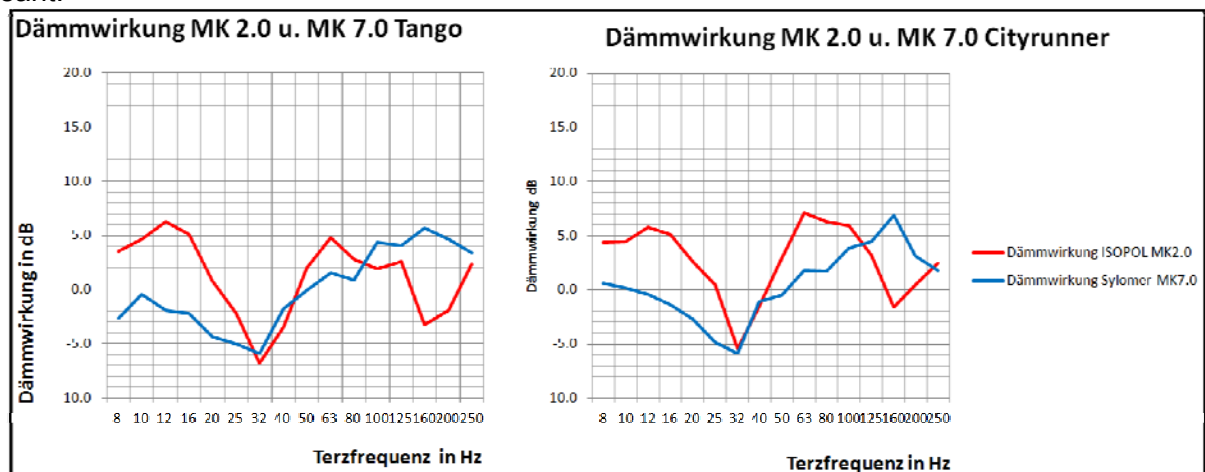


Abb. 25 Dämmwirkung aus allen Tramdurchfahrten gemittelt: für MK2.0 und MK7.0, links Tango / rechts Cityrunner

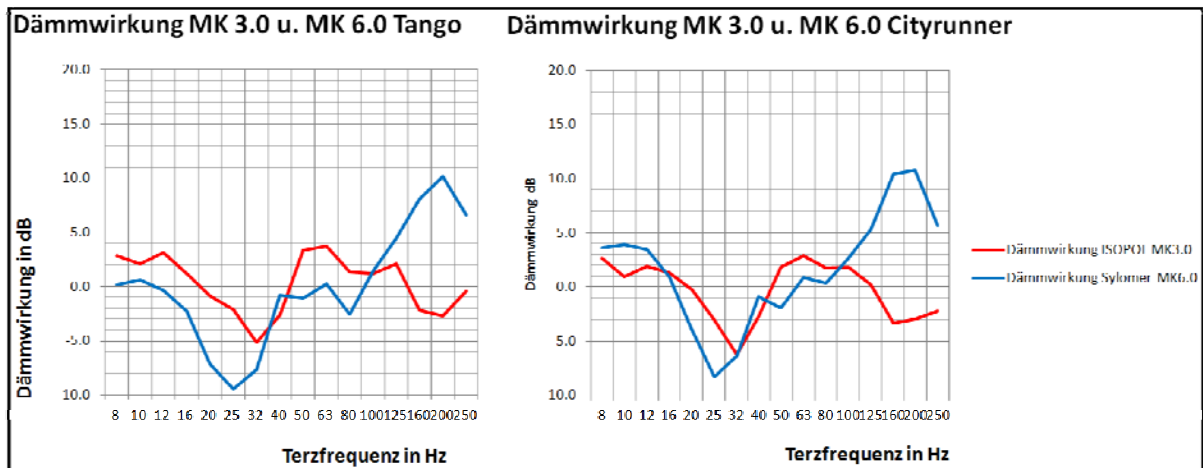


Abb. 26 Dämmwirkung aus allen Tramdurchfahrten gemittelt: für MK3.0 und MK6.0, links Tango / rechts Cityrunner

Die oben gemachten Aussagen zum Vergleich der Dämmwirkung auf der Seite ISOPOL[®] mit der Dämmwirkung auf der Seite Sylomer[®] werden in den Grundzügen durch die Vergleiche in Abb. 25 und Abb. 26 bestätigt.

5.4. Messungen im Keller und in der Wohnung

Bei der Interpretation der Ergebnisse aus den Messungen im Keller und in der Wohnung muss darauf hingewiesen werden, dass die Trams auf der Seite ISOPOL® eine grössere Distanz zum Messpunkt aufweisen (+ 3.6m).

Aus den Messungen im Keller konnte unter anderem der abgestrahlte Körperschall berechnet und ausgewertet werden. Der Ruhepegel bewegte sich im Mittel um 22 dB(A).

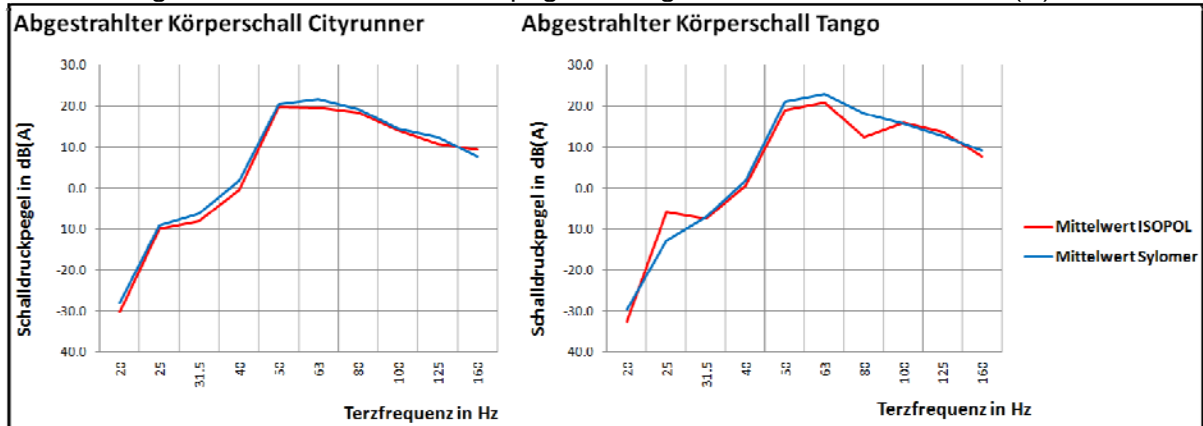


Abb. 27 Abgestrahlter Körperschall im Keller, links für Cityrunner und rechts für Tango (Schalldruckpegel über der Frequenz)

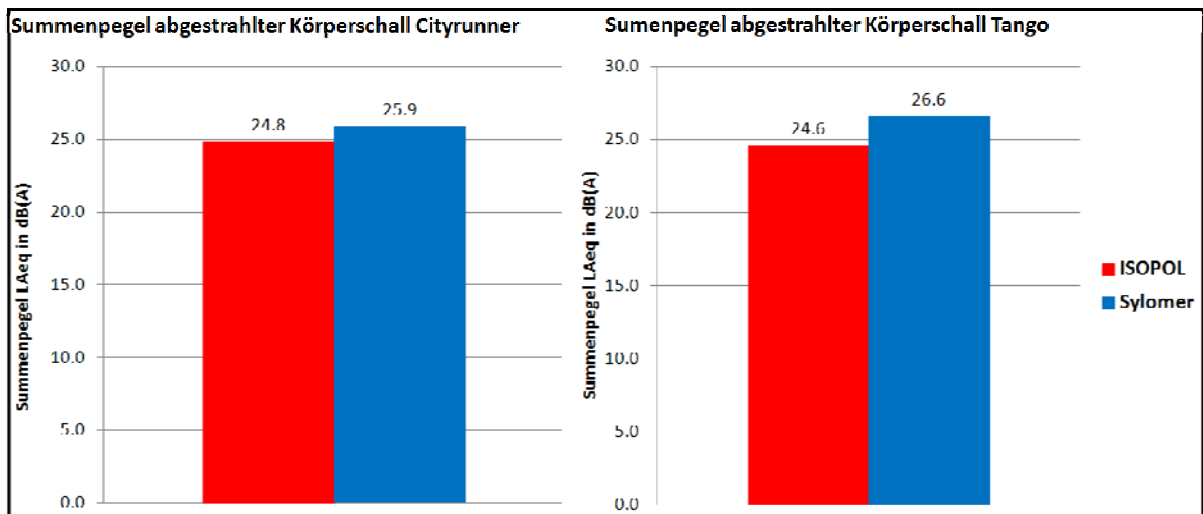


Abb. 28 Abgestrahlter Körperschall im Keller, links für Cityrunner und rechts für Tango (Summenpegel)

Im Keller liegen die K_{BFTI} -Werte bei ca. 0.01 und die Peak-Werte der Schwinggeschwindigkeit bei ca. 0.02 mm/s.

Damit liegen die K_{BFTI} -Werte Faktor 10 unterhalb des unteren Anhaltswerts A_u der DIN 4150-2 (DIN 4150-2, Tab. 1, Zeile 5). Die Peak-Werte der Schwinggeschwindigkeit liegen Faktor 10 unter der Wahrnehmungsgrenze durch den Menschen (0.2 mm/s). Dies gilt für beide Materialien.

Aus den Ergebnissen der Schwingungsmessungen in der Wohnung wurde unter anderem die Auswertung nach der DIN 4150-2 gemacht. Die daraus ermittelten KB_{FTi} -Werte sind in der folgenden Abb. 29 ersichtlich. Alle KB_{FTi} -Werte, unabhängig vom Tramtyp und von der Fahrtrichtung, liegen weit unterhalb des Anhaltswertes A_u von 0.1 (gemäss DIN4150-2, Tab. 1, Zeile 5, d.h. für die besonders schutzbedürftige Einwirkungsorte).

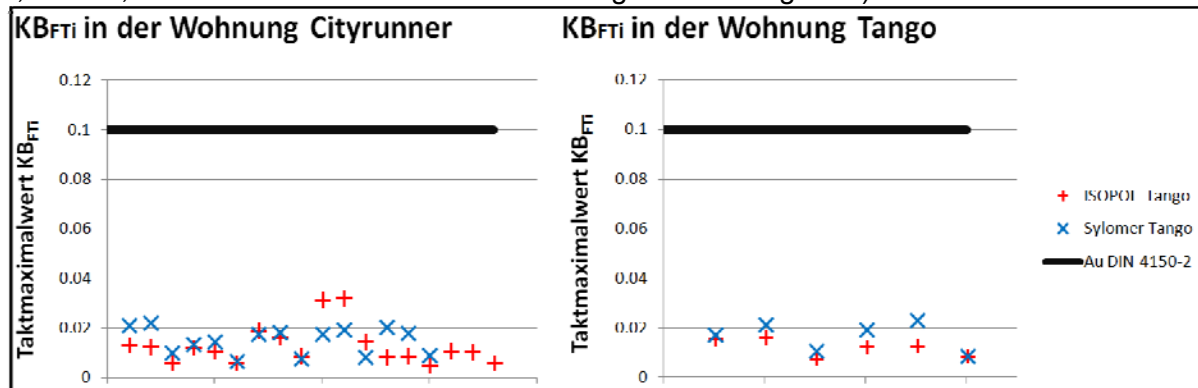


Abb. 29 KB_{FTi} -Werte nach DIN4150-2 ermittelt aus den Schwinggeschwindigkeitsmessungen in der Wohnung.

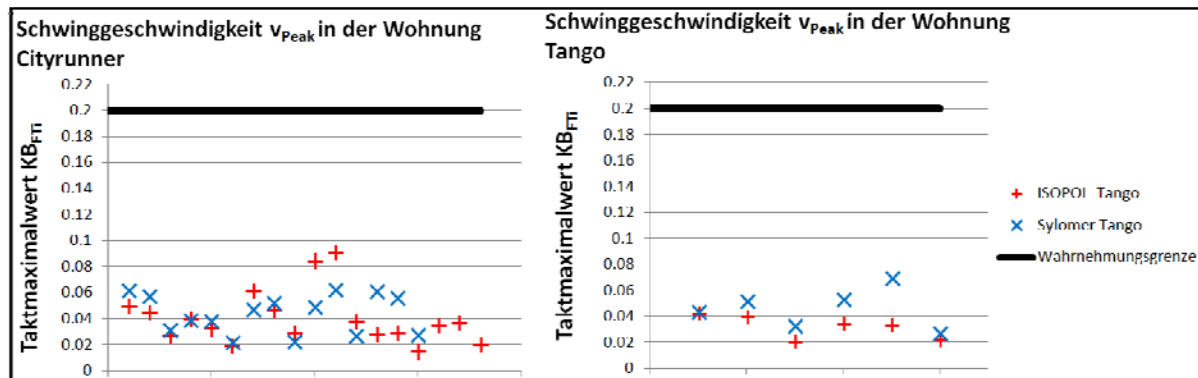


Abb. 30 Schwinggeschwindigkeit v_{Peak} in der Wohnung im Vergleich zur Wahrnehmungsgrenze für den Menschen

Die Wahrnehmung von Erschütterungen durch den Menschen beginnt in der Regel ab einer Schwinggeschwindigkeit von 0.2 mm/s. Anhand der Abb. 30 ist ersichtlich, dass in der Wohnung nicht nur die Norm DIN 4150-2 eingehalten ist, sondern die Erschütterungen weit unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegen.

5.5. Fehlerbetrachtung, Analyse

Bei den höheren Frequenzen ab 63 Hz ist in einzelnen Terzfrequenzen eine Standardabweichung bei der Dämmwirkung von bis zu 5 dB möglich. Bei den tieferen Frequenzen (< 63 Hz) ist die Streuung mit 3 dB in einzelnen Terzfrequenzen kleiner. Der Grund liegt unter anderem in den unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten und Zuständen der Fahrzeuge. Dies gilt für beide Materialien.

5.6. Diskussion der Ergebnisse und Vergleich mit anderen Messungen

Die Ergebnisse aus den Messungen in Carouge und an der Teststrecke TCOB in Genf zeigen, dass mit Masse-Feder-Systemen auf Basis von Elastomerkornplatten oder Polyurethan-Schaumstoffplatten gute Resultate bezüglich Erschütterungsdämmung zu erreichen sind. Insbesondere die Messungen an der Teststrecke TCOB in Genf zeigen aber auch, dass eine Vielzahl von Effekten das Messergebnis beeinflusst. Zu den wichtigsten Einflussgrössen gehören die Fahrzeuge selber mit der entsprechenden Fahrgeschwindigkeit und der Zustand der Räder. Weiterhin zählen der Zustand der Schienen, sowie der Bodenaufbau mit mehr oder weniger Inhomogenitäten, z.B. durch unterschiedliche Leitungen in der Nähe der Gleise, zu den wichtigsten Einflussgrössen.

Das ursprüngliche Ziel der Teststrecke TCOB in Genf war es, die beiden eingebauten Dämm-Materialien auf zwei nebeneinanderliegenden Gleisen zu prüfen und schliesslich quantitativ vergleichen zu können. Die in diesem Bericht dokumentierte Studie und die dargelegten Ergebnisse zeigen, dass durch Schwingungsmessungen die Funktion einer Lagerung gut beurteilt werden kann. Im Weiteren kann auch die Einhaltung von Vorgaben, wie z.B. aus der DIN 4150-2 sehr gut überprüft werden. Ein quantitativer Vergleich der eingesetzten Materialien ist jedoch nicht oder nur bedingt möglich.

Die wichtigsten Bedingungen, damit eine Teststrecke für einen solchen Materialvergleich geeignet ist, wären:

- identische Fahrgeschwindigkeiten auf beiden Seiten und konstant über die ganze Teststrecke
- identischer Zustand der Schiene sowie der Fahrzeuge (Räder) auf beiden Seiten
- keine Inhomogenitäten im Boden, wie z.B. Wasserkollektoren

Da solche Bedingungen an einer realen Strecke kaum anzutreffen bzw. einzuhalten sind, ist die Durchführung von solchen Vergleichsmessungen mit dem Zweck des quantitativen Vergleichs nicht empfehlenswert. Für solche Messungen eignen sich Labor-Prüfaufbauten viel besser, was auch in der DIN 45673 beschrieben ist.

Eine von Résonance Ingénieurs-Conseils SA im Jahr 2012 durchgeführte Messung führte zu den Dämmwirkungen gemäss Abb. 31 links (vergleiche dazu [1]). Ein Vergleich mit den Dämmwirkungen aus den Messungen vom April 2013 zeigt eine wesentliche Reduktion der Dämmwirkung auf der Seite Sylomer®. Bis zur Terzfrequenz von 25 Hz bewegt sich diese Reduktion zwischen 2 und 3 dB. Oberhalb von 25 Hz liegt die Reduktion sogar im Bereich zwischen 5 und 10 dB. Auf der Seite ISOPOL® unterscheidet sich die Dämmwirkung bei Terzfrequenzen bis 125 Hz lediglich im Bereich der Standardabweichung. Oberhalb von 125 Hz liegt die Reduktion im Bereich zwischen 3 und 5 dB. Die Sensoren der Messketten MK3.0 und MK7.0 sowie der Referenzmessketten im ungelagerten Bereich (MK4.0 und MK8.0) liegen in etwa an denselben Stellen wie bei der Messung in [1]. Die reduzierte Dämmwirkung auf der Seite Sylomer® im Vergleich zur Messung in [1] zeigt sich auch bei den anderen beiden Messketten MK5.0 und MK6.0. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus der Messung vom Mai 2012 zeigt ein ähnliches Bild, d.h. im Mai 2012 wurden für die Seite Sylomer® auch von HBT-ISOL höhere Dämmwirkungen gemessen.

Eine Erklärung der Reduktion der Dämmwirkung auf der Seite Sylomer® wurde noch nicht gefunden.

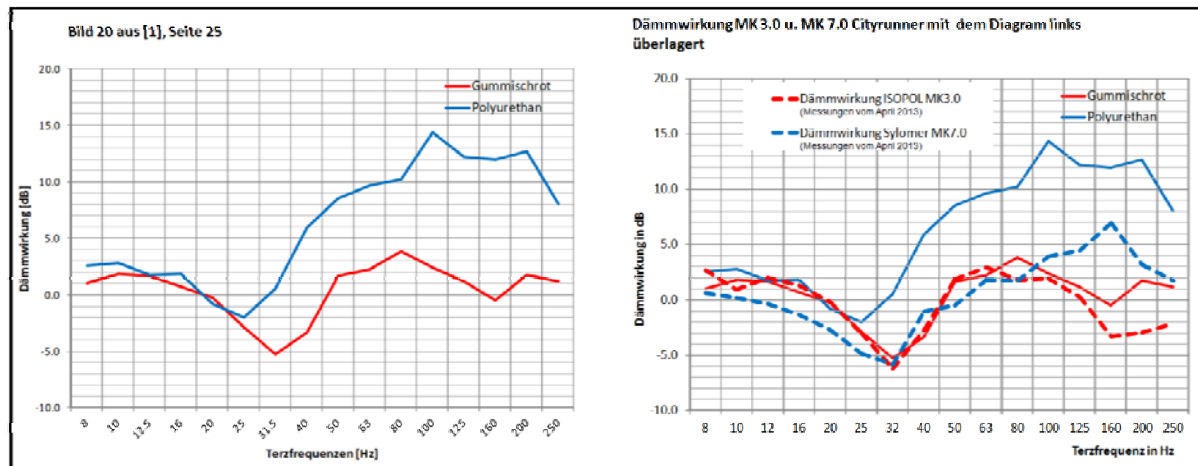


Abb. 31 Vergleich der Dämmwirkung von ISOPOL[®] und Sylomer[®] sowie Vergleich mit früheren Ergebnissen aus [1]

5.7. DIN 45673-6 Labor-Prüfverfahren

Zur Klassifizierungen von Werkstoffen, insbesondere wenn die Leistungswerte sehr nahe beieinander liegen, setzen die Normen voraus, dass die Prüfbedingungen soweit wie möglich identisch sind. In der Zwischenzeit gibt es eine ganze Anzahl von DIN-Normen mit Prüfvorgaben für elastische Elemente für den Schienenfahrweg:

- DIN45673-1 08/2010 Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
Teil 1: **Begriffe, Klassifizierung, Prüfverfahren**
- DIN45673-2 09/2008 Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
Teil 2: **Ermittlung statischer und dynamischer Kennwerte** im Betriebsgeleise
- DIN45673-3 09/2004 Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
Teil 3: **Ermittlung der Einfügungsdämmung** in eingebautem Zustand (Prüfaufbau und Betriebsgeleise) bei Ersatzanregung (Shaker)
- DIN45673-4 07/2008 Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
Teil 4: **Rechnerische Ermittlung der Einfügungsdämmung** in eingebautem Zustand
- DIN45673-5 08/2010 Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
Teil 5: **Laborprüfverfahren für Unterschottermatten**
- DIN45673-6 08/2010 Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
Teil 6: **Labor-Prüfverfahren für Besohlungen von Betonschwellen**
- DIN45673-7 08/2010 Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
Teil 7: **Labor-Prüfverfahren für elastische Elemente von Masse-Feder-Systemen**
- DIN45673-8 08/2010 Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
Teil 7: **Labor-Prüfverfahren für kontinuierliche elastische Schienenlagerungen**

6. Schlussfolgerung

- An Teststrecken mit praxisüblichen Bedingungen können quantitative Vergleiche von verschiedenen Lagerungssystemen nicht oder nur bedingt gemacht werden. Sie bieten weder konstante Bedingungen für die zu vergleichenden Systeme, noch sind die Einflussfaktoren aus der Umgebung (Untergrund, usw.) genau bekannt.
- Labor-Prüfaufbauten eignen sich für quantitative Materialvergleiche besser, weil dadurch reproduzierbare Anregungen möglich und die Einflussfaktoren stets dieselben sind.
- Die grundsätzliche Eignung einer Lagerung mit ISOPOL® konnte bestätigt werden.
(→ Messungen in Carouge vor und nach der Lagerung)
- Mit Masse-Feder-Systemen auf Basis von Elastomerkornplatten des Typs ISOPOL® und Polyurthan-Schaumstoffplatten des Typs Sylomer® können gute Dämmwirkungen erreicht werden.
(→ Messungen an der Teststrecke TCOB in Genf)
- Die Vorgaben aus BEKS bzw. DIN 4150-2 werden gut eingehalten.
Die Erschütterungen ausgehend vom Tram liegen weit unterhalb der Wahrnehmungsgrenze des Menschen.
(→ Messungen in Wohnung und Keller)
- Mit der Reduktion der Dämmwirkung auf der Seite Sylomer® an der Teststrecke TCOB, trat ein interessanter Effekt auf, der noch weiter untersucht wird.
(→ Vergleich der Messung vom April 2013 mit Messung vom Mai 2012 bzw. Messung aus [1])

7. Literaturverzeichnis

- [1] Koller, M., G., Thomassin, S., Lacave, C.: Messung der Wirksamkeit von Masse-Feder-Systemen für Trambahnen, Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge, Schweiz. 2012.
- [2] DIN-Normenreihe 4150 (Teil 1-3)
- [3] DIN-Normenreihe 45673 (Teil 1-8) (Vornorm)
- [4] VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung: VDI-Handbuch Schwingungstechnik
- [5] VDI 2062 Blatt 1 und 2 Schwingungsisolierung – Begriffe, Methoden, Schwingungsisolelemente
- [6] VDI 3837 Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen
- [7] BEKS: Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen, 1999, Herausgeber: Bundesamt für Umwelt BAFU
- [8] Hermann Henn, Gholam R. Sinambari, Manfred Fallen: Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Vieweg+Teubner Verlag, 2008. ISBN 3834802557.
- [9] Friedrich Krüger: Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr: Grundlagen der Schall- und Schwingungstechnik ; praxisorientierte Anwendung von Schall- und Erschütterungsschutzmaßnahmen. Expert Verlag, 2006. ISBN 3816924948.