Schotterloser Gleisbau: Lärmdämpfung dank elastischer Lagerung der Gleistragplatte

Autor(en): **Blaser, Urs / Sollberger, Ueli / Krummenacher, Josef / Rosa, Ercolino / Trefzer, Karl**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **112 (1994)**

Heft 47

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-78561

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

ASIC-Artikelreihe: Neuzeitliche Bauwerke

Schotterloser Gleisbau

Lärmdämpfung dank elastischer Lagerung der Gleistragplatte

Umweltschutz zwingt heute auch die Strassenbahnen zu immissionsmindernden Massnahmen, speziell auf dem Gebiet der Erschütterungen, des Körperschalls und des sekundären Luftschalls. Die städtischen Verkehrsbetriebe Bern (SVB) und die Basler Verkehrsbetriebe (BVB) haben zusammen 6 Teststrecken von insgesamt 1150 m Doppelgleise im Betrieb. Sie bestehen aus einem Oberbau nach dem Feder-Masse-System, wobei als Feder unter und neben der Gleistragplatte eine Mineralwollplatte eingesetzt wird. Oberhalb 45 Hz sind Immissionsreduktionen, bei 45 km/h Fahrgeschwindigkeit, von mindestens 12 dB realisierbar.

Die von Strassenbahnen verursachten Schwingungen können als Erschütterungen und/oder als tieffrequenter se-

VON URS BLASER UND HANS-UELI SOLLBERGER, BERN, JOSEF KRUMMENACHER, ERCOLINO ROSA, KARL TREFZER, BASEL

kundärer Luftschall in Anliegerbauten wahrgenommen werden. Sowohl die Schwingungen als auch der sekundäre Luftschall kann durch das Anregen von Wand-, Decken- und Raumeigenfrequenzen verstärkt werden (Bild 1). Resonanzeffekte wie etwa das Wandern von Ziergegenständen auf Möbeln oder ein Brummen im Konzertsaal lassen entweder leicht den Eindruck der Übermässigkeit der Einwirkung entstehen oder sie sind sogar störend. Eine seit Jahren zunehmende Sensibilisierung von Strassenbahnanwohnern und Nutzern von Anliegerbauten zwingt auch städtische Verkehrsbetriebe zu Minderungsmassnahmen.

Generelle Massnahmen zur Immissionsminderung

Zur Reduktion der Immissionen kommen verschiedene Massnahmen in Frage. Solche Massahmen werden seit längerer Zeit schon praktiziert und sind in den folgenden Abschnitten gegliedert und beschrieben

☐ *Massnahmen am Fahrzeug:*

- *die Betriebsweise betreffend:* Geschwindigkeitsreduktionen, insbesondere beim Befahren von Herzstücken auf bestimmten Oberbauarten erbringen nachweislich merkbare Immissionsreduktionen. Ebenfalls nachweisliche Reduktionen werden durch sanfteres Beschleunigen bzw. Bremsen erzielt.
- *den Betriebszustand betreffend:* Regelmässiges Schleifen der Bandagen führt zur Minderung unwuchterregter Schwingungen und Stösse.

☐ *Massnahmen im Rad/Schiene-Kontaktbereich:* Der zum Teil noch heute nicht vermeidbaren Bildung von immissionsverstärkenden Riffeln auf den Schienen wird durch regelmässiges Schleifen derselben Schienen begegnet.

☐ *Massnahmen am Übertragungsweg:* Der Oberbau bildet ein wesentlicher Teil des Übertragungsweges, zumal er am nächsten zur Quelle liegt. Er bietet sich aus physikalischen Gründen besonders für wirksame Minderungsmassnahmen an. Der nachfolgende Teil widmet sich speziell solchen Massnahmen.

☐ *Massnahmen am Immissionsort:* Im Stadium der Planung von Gebäuden besteht in besonders kritischen Fällen die Möglichkeit, durch Abfederung des Gebäudes (Feder-Masse-System) eine Passivisolierung zu erwirken. Massnahmen dieser Art sind in der Schweiz wohl ins Auge gefasst, aus Kostengründen aber fallengelassen und unseres Wissens erst im Ausland getroffen worden [1].

Massnahmen am Oberbau

In der städtischen Agglomeration, sowohl im Raum Bern wie im Raum Basel, bildet der Schotteroberbau bei Trambahnen den Regelfall. Immissionen beim Befahren dieser Oberbauart sind nicht sehr stark abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. So zeigen sich Zunahmen von nur 50% im Bereich von 10 bis 40 km/h als auch Zunahmen von 20% im Bereich von 25 bis 35 km/h und anschliessend wiederum Abnahmen von 20% im Bereich von 35 bis 45 km/h.

Als effektive Massnahme zur Immissionsminderung hat sich die Unterschottermatte, wo der gesamte Schotter auf einer Matte aus Polyurethanschaum bzw. Gummi/Regeneratgummi liegt, bewährt. So zeigt eine Ausführung im Raum Basel seit langem erstens eine drastische Senkung der Immissionen und zweitens keine Zunahme der Immissionen mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit. Nicht besonders be-

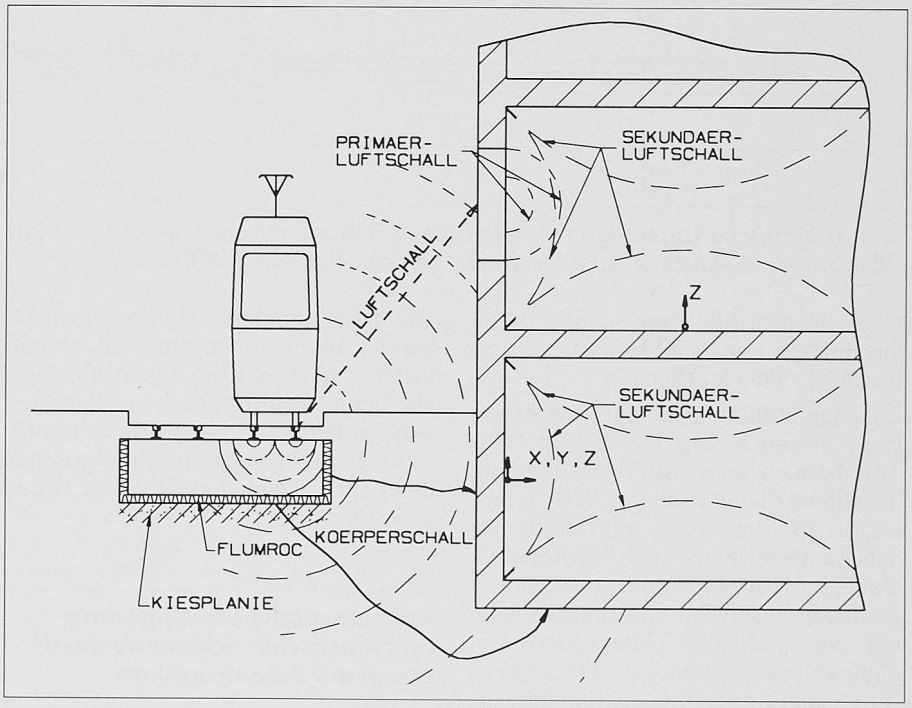

Bild 1. Veranschaulichung der in der Nachbarschaft einer Trambahn einwirkenden Immissionen

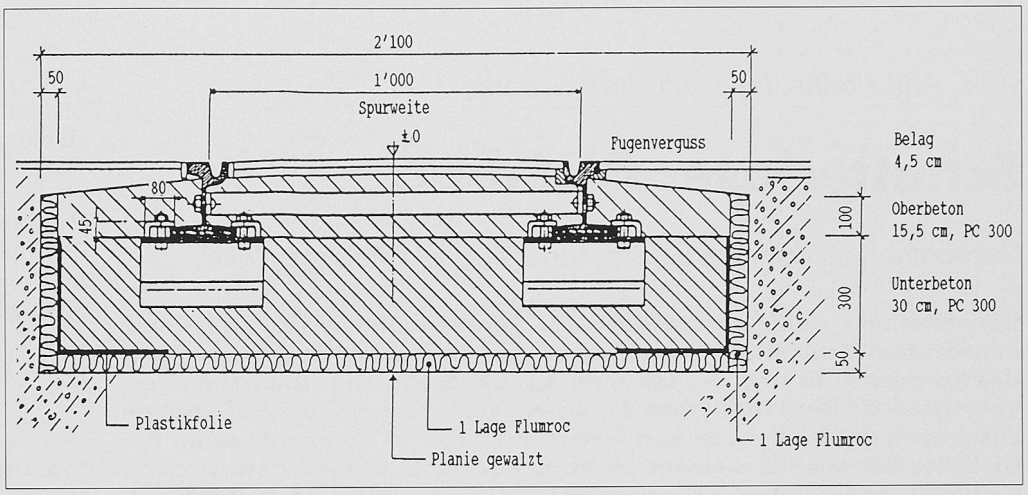

Bild 2. Elastische Lagerung im schotterlosen Gleisbau mittels einem Feder-Masse-System. Querschnitt des Oberbaus der Versuchsstrecken der städtischen Verkehrsbetriebe Bern (SVB)

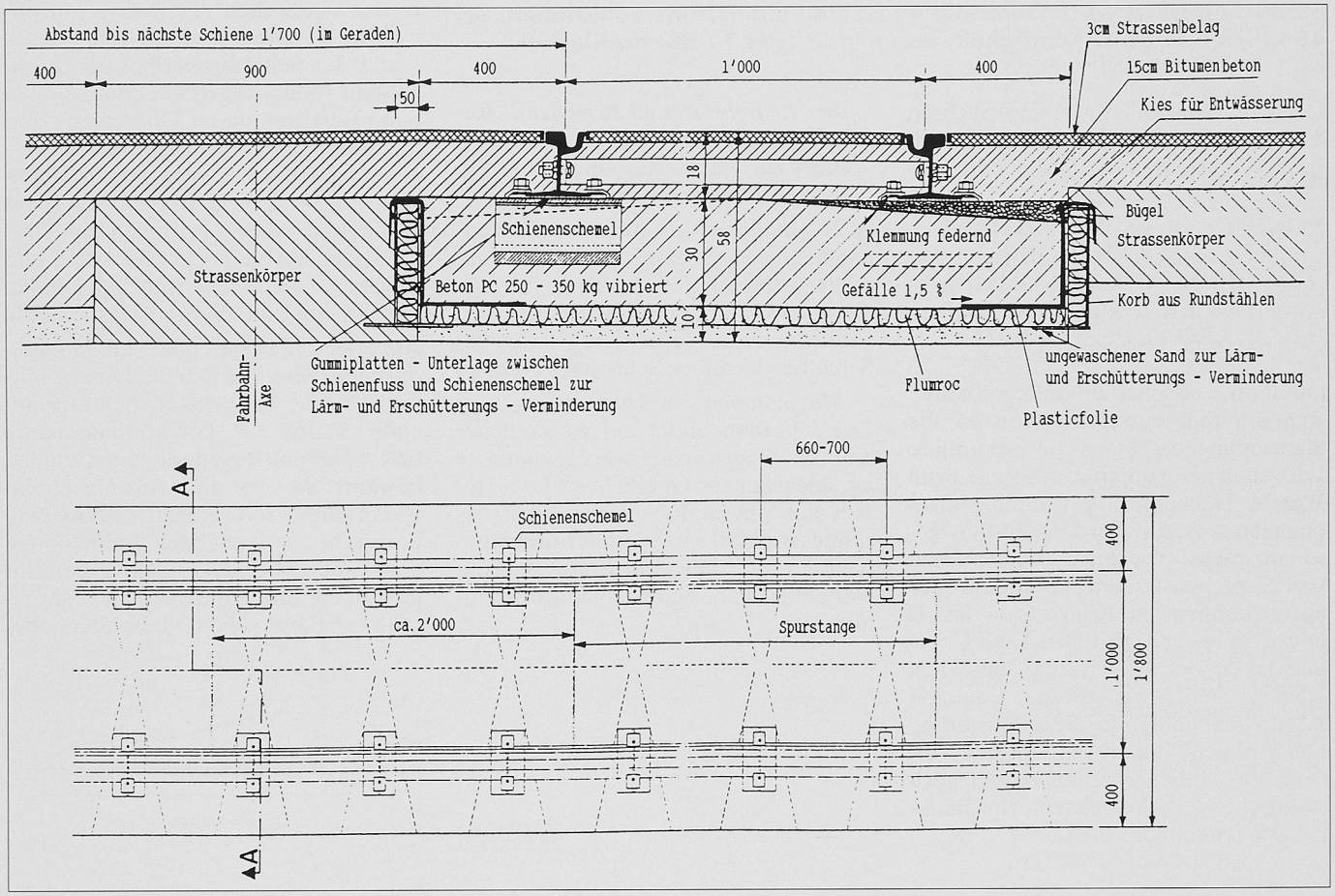

Bild 3. Elastische Lagerung im schotterlosen Gleisbau mittels einem Feder-Masse-System. Querschnitt und Draufsicht vom Oberbau der Versuchsstrecke der Basler Verkehrs-Betriebe (BVB)

währt hat sich eine Unterschottermatte aus aufbereiteten und kreuzweise verbundenen Pneulaufflächen.

Im innerstädtischen Gebiet, sowohl von Bern als auch von Basel, bildet für Trambahnen der schotterlose Oberbau, die auf die Planie verlegte Gleis-Betontragplatte ohne bzw. mit elastischer Schienenlagerung, den Normalfall. Dabei besteht zwischen den beiden Lagerungen, bezüglich von Immissionen, nur ein gradueller Unterschied. Ein Kurzschluss vom Erregungsort Rad/Schiene mit der Gleistragplatte erfolgt in beiden Fällen über die starre und kraftschlüssige Schienenbefestigung. Die dabei, durch das Befahren, entstehenden Immissionen sind weit wesentlicher fahrgeschwindigkeitsabhängig als beim Schotteroberbau. Ermittelt wurden beispielsweise in Basel Immissionserhöhungen bis zu 400% zwischen den Fahrgeschwindigkeiten von 25 und 45 km/h.

Hochelastische Gleislagerung (mit elastischer Schienenbefestigung) auf Betontragplatte

Bei dieser Art von Gleislagerung gibt es verschiedene Ausführungsformen, eine bekannte davon ist das «Kölner Ei». Variationen dazu sind ebenfalls bekannt [2] und [3]. Allerdings erfüllen bestimmte Ausführungsformen nicht alle Erwartungen. Bei einem Versuch in Basel zeigte sich, nach Ersatz des gesamten Oberbaus (Betontragplatte und Gleis) durch eine Tragplatte mit einer neu entwickelten, hochelastischen Gleislagerung, anfänglich eine sehr markante Immissionsminderung (Erschütterungen und sekundärer Luftschall). Nach 3 Jahren aber erreichten die Immissionen nahezu den Wert wie vor der Sanierung, obwohl die Emissionen, gemessen am Schienenfuss und auf

der Betontragplatte, in lotrechter Richtung, eine zusätzliche Verbesserung aufwiesen.

Aufgezeigt werden konnte dies eindeutig, sowohl mit einem Messzug bei konstanten Betriebs- und Betriebszustands-Bedingungen vor und nach der Sanierung sowie bei verschiedenen Geschwindigkeiten als auch mit den fahrplanmässigen Tramzügen, durch Messung der Erschütterungs- und Körperschallimmissionen in den 3 Raumrichtungen am Fundament des Immissionsortes. Die Zunahme innert 3 Jahren erfolgte durch einen starken Anstieg der Amplituden in der horizontalen Richtung, senkrecht zum Gleis. Dies zeigt die Wichtigkeit der dreidimensionalen Erfassung von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen. Weiter unten wird darauf näher eingegangen.

Bild 4. Baustelle Breitenrainplatz/Moserplatz in Bern. Absetzen des Gleises auf die Schienenschemel. Erkennbar sind die auch auf beiden Seiten der zukünftigen Gleistragplatte hochgezogenen Mineralwollplatten

Das Feder-Masse-System

Unter Feder-Masse-Systemen – in Zürich bereits seit einigen Jahren eingesetzt – versteht man im allgemeinen mittels Polyurethanschäumen oder Gummi/Gummiregeneraten auf Betonsohlen federnd gelagerte Gleistragplatten mit starr verbundenen Gleisen oder auch Betonwannen mit einer beliebigen Gleisbettung. Die Federung kann grundsätzlich sowohl streifenförmig als auch flächenförmig angeordnet sein. Die Gleistragplatte bzw. die Betonwanne übernimmt damit die zusätzliche Funktion einer abstimmfrequenzreduzierenden Zusatzmasse [4].

Angeregt durch ein seit 6 Jahren in Dänemark erprobtes Oberbausystem mit einer flächenförmig auf die Planie ausgelegten Federung aus Mineralwollplatten, haben die städtischen Verkehrsbetriebe Bern (SVB) seit 1990 und die Basler Verkehrsbetriebe (BVB) im Jahre 1993 Versuchsstrecken damit angelegt.

Messungen zum Nachweis von Immissionsminderungen

Die Erfahrungen der Baselland Transport AG (BLT) und der BVB aus Aufnahmen von Beweissicherungen beispielsweise in Enteignungsverfahren, aus Immissionsmessungen aufgrund von Anwohnerbeschwerden sowie aus Messungen zum Nachweis von Immissionsminderungen bei Versuchsstrecken vor und nach Sanierungsmassnahmen über 15 Jahre zeigen die Wichtigkeit auf, dass bestimmte Messbedingungen eingehalten werden, die sowohl von der SN 640 312a als auch beispielsweise von der DIN 45 672 vorgeschlagen werden.

Als Messgrösse zur Beschreibung von Schwingereignissen dient, gemäss internationaler Usanz, die Schwinggeschwindigkeit, sowohl als Effektivwert (V_{RMS}) als auch als Scheitelwert (V_{Peak}). Ersterer dient als Mass für den mit der Frequenz verknüpften Energieinhalt des Schwingereignisses, letzterer als Mass für die frequenzverknüpfte Stossimpulskraft des Ereignisses [5]. Beide Werte sind aus heutigen Mess- und Auswertegeräten gleichzeitig erhältlich.

Wesentlich bei einer Immissionsmessung ist die Art und Weise der An-

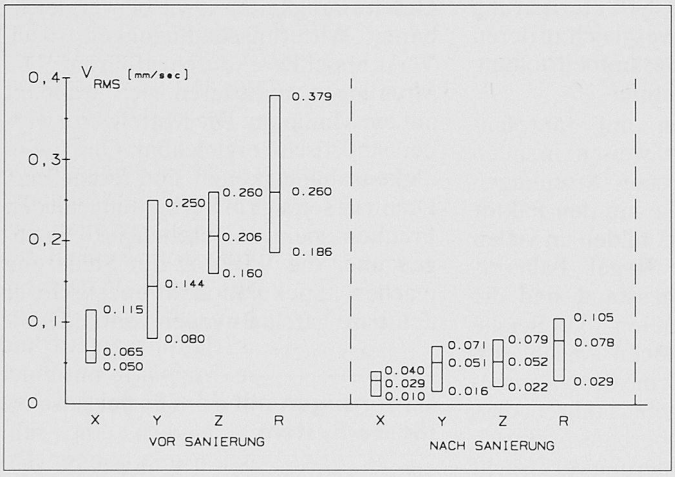

Bild 5. Grafische Darstellung der Mittelwerte und Streubereiche der Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden V_{RMS} der Immissionen von Kursfahrzeugen (Austrasse 29, Fahrrichtung Innerstadt) gemäss Tabelle 1

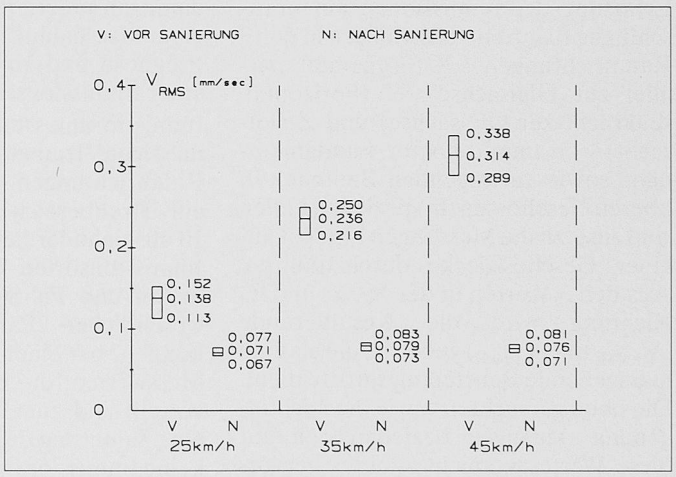

Bild 6. Grafische Darstellung der Mittelwerte gemäss Tabellen 2 und 3 und Streubereiche der Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden $V_{RMS,R}$ der Immissionen des Messzuges bei verschiedenen Geschwindigkeiten (Austrasse 29, Fahrrichtung Innerstadt)

Oberbauzustand	$V_{RMS,X}$ [mm/s]	$V_{RMS,Y}$ [mm/s]	$V_{RMS,Z}$ [mm/s]	$V_{RMS,R}$ [mm/s]
Vor der Sanierung				
Mittelwerte *(n=15)*	0,065	0,144	0,206	0,260
Maximalwerte	*0,115*	*0,250*	*0,260*	*0,379*
Minimalwerte	*0,050*	*0,080*	*0,160*	*0,186*
Nach der Sanierung				
Mittelwerte *(n=19)*	0,029	0,051	0,052	0,078
Maximalwerte	*0,040*	*0,071*	*0,079*	*0,105*
Minimalwerte	*0,010*	*0,016*	*0,022*	*0,029*
Reduktion				
in [%]	55	65	75	70
in [dB]	*7*	*9*	*12*	*10*

Tabelle 1. Mittelwerte und Streubereiche der Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden V_{RMS} der Immissionen von Kursfahrzeugen (Austrasse 29, Basel, Fahrrichtung Innerstadt)

Geschwindigkeit [km/h]	$V_{RMS,X}$ [mm/s]	$V_{RMS,Y}$ [mm/s]	$V_{RMS,Z}$ [mm/s]	$V_{RMS,R}$ [mm/s]
25				
Mittelwerte *(n=10)*	0,023	0,051	0,043	0,071
Standardabweichung	*0,002*	*0,001*	*0,004*	*0,004*
35				
Mittelwerte *(n=10)*	0,024	0,060	0,045	0,079
Standardabweichung	*0,001*	*0,003*	*0,002*	*0,003*
45				
Mittelwerte *(n=10)*	0,023	*0,057*	0,045	0,076
Standardabweichung	*0,002*	*0,003*	*0,002*	*0,003*

Tabelle 2. Mittelwerte und Standardabweichungen der Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden V_{RMS} der Immissionen des Messzuges bei verschiedenen Geschwindigkeiten (Austrasse 29, Basel, Fahrrichtung Innerstadt) vor der Sanierung

Geschwindigkeit [km/h]	$V_{RMS,X}$ [mm/s]	$V_{RMS,Y}$ [mm/s]	$V_{RMS,Z}$ [mm/s]	$V_{RMS,R}$ [mm/s]
25				
Mittelwerte *(n=10)*	0,036	0,065	0,016	0,138
Standardabweichung	*0,003*	*0,004*	*0,012*	*0,012*
35				
Mittelwerte *(n=10)*	0,050	0,107	0,204	0,236
Standardabweichung	*0,005*	*0,015*	*0,005*	*0,012*
45				
Mittelwerte *(n=10)*	0,086	0,198	0,227	0,314
Standardabweichung	*0,005*	*0,008*	*0,022*	*0,018*

Tabelle 3. Mittelwerte und Standardabweichungen der Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden V_{RMS} der Immissionen des Messzuges bei verschiedenen Geschwindigkeiten (Austrasse 29, Basel, Fahrrichtung Innerstadt) nach der Sanierung

Oberbauzustand	25 km/h $V_{RMS,R}$ [mm/s]	35 km/h $V_{RMS,R}$ [mm/s]	45 km/h $V_{RMS,R}$ [mm/s]
Vor Sanierung	0,138	0,236	0,314
nach Sanierung	0,071	0,079	0,076
Reduktion			
in [%]	49	67	76
in [dB]	*6*	*10*	*12*

Tabelle 4. Immissionsreduktionen, gemessen mit Hilfe des Messzuges

kopplung der Schwingungsaufnehmer. DIN 45 672 postuliert die gleichzeitige Erfassung der Immissionen mit kraftschlüssig fixierten Aufnehmern in den 3 Raumrichtungen – X (horizontal, parallel zur Gleisachse), Y (horizontal, senkrecht zur Gleisachse) und Z (lotrecht) – in unmittelbarer Fundamentnähe sowie an tragenden Bauteilen in oberen Geschossen. In speziellen Fällen sind zusätzliche Messungen lotrecht auf einer Geschossdecke durchzuführen. Aus den 3 Werten in der X-, Y- und Z-Richtung wird die Resultierende (V_{RMSR} und V_{PeakR}) gebildet, die als eine massgebende Beurteilungsgrösse dient. Die oben gemachten sowie die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf diese Werte, wo nicht anderes hervorgehoben wird.

Die gleichzeitige Pegelregistrierung erleichtert die Auswertung der Resultate, und vor allem die Bandaufzeichnung erlaubt eine FFT-Schmalbandfrequenzanalyse zur Ermittlung der Frequenzabhängigkeit der Amplituden und damit zur präziseren Charakterisierung einer Massnahme im Vergleich zu deren Prognose und zur Gesamtbeurteilung einer Immissionssituation.

Immissionsmessungen mit fahrplanmässigen Tramzügen weisen in allen Raumrichtungen grosse Streuungen auf. Streubereiche, die um den Faktor 10 auseinander liegen, bilden an vielen Immissionsorten die Regel. Fahrverhalten und Fahrzeugzustand sind die wesentlichen Parameter. Vergleiche können, bei einer kleinen Anzahl von Messwerten, die zudem nicht normalverteilt sind, zum Ergebnis führen, dass eine Sanierung des Oberbaus praktisch keine Immissionsminderung verursacht hat.

Aus diesem Grund sind Immissionsmessungen bei Trambahnen unbedingt zusätzlich mit einem Messzug, wie schon erwähnt, vor und nach einer Sanierungsmassnahme, mit ein und demselben Wagenführer, bei verschiedenen Geschwindigkeiten sowie bei vergleichbaren Witterungsbedingungen, nach Verkehrsschluss, durchzuführen. Die Streuungen reduzieren sich frappant auf ein Minimum. Die Mittelwerte werden statistisch vergleichbar, Geschwindigkeitsabängigkeiten sind feststellbar. Damit lassen sich in Verbindung mit den Frequenzspektren zusätzliche Aussagen über die Wirkung der Sanierung machen. Spekulationen über schwer deutbare Effekte werden vermieden.

Erfahrungen mit dem Feder-Masse-System

Oberbauprofile

Die in Bern (Kursaalstrasse: 50 m, 1990; Thunstrasse: 300 m, 1991; Breitenrainplatz: 100 m, 1992; Moserstrasse: 150 m, 1992; Monbijoustrasse: 200 m, 1993)

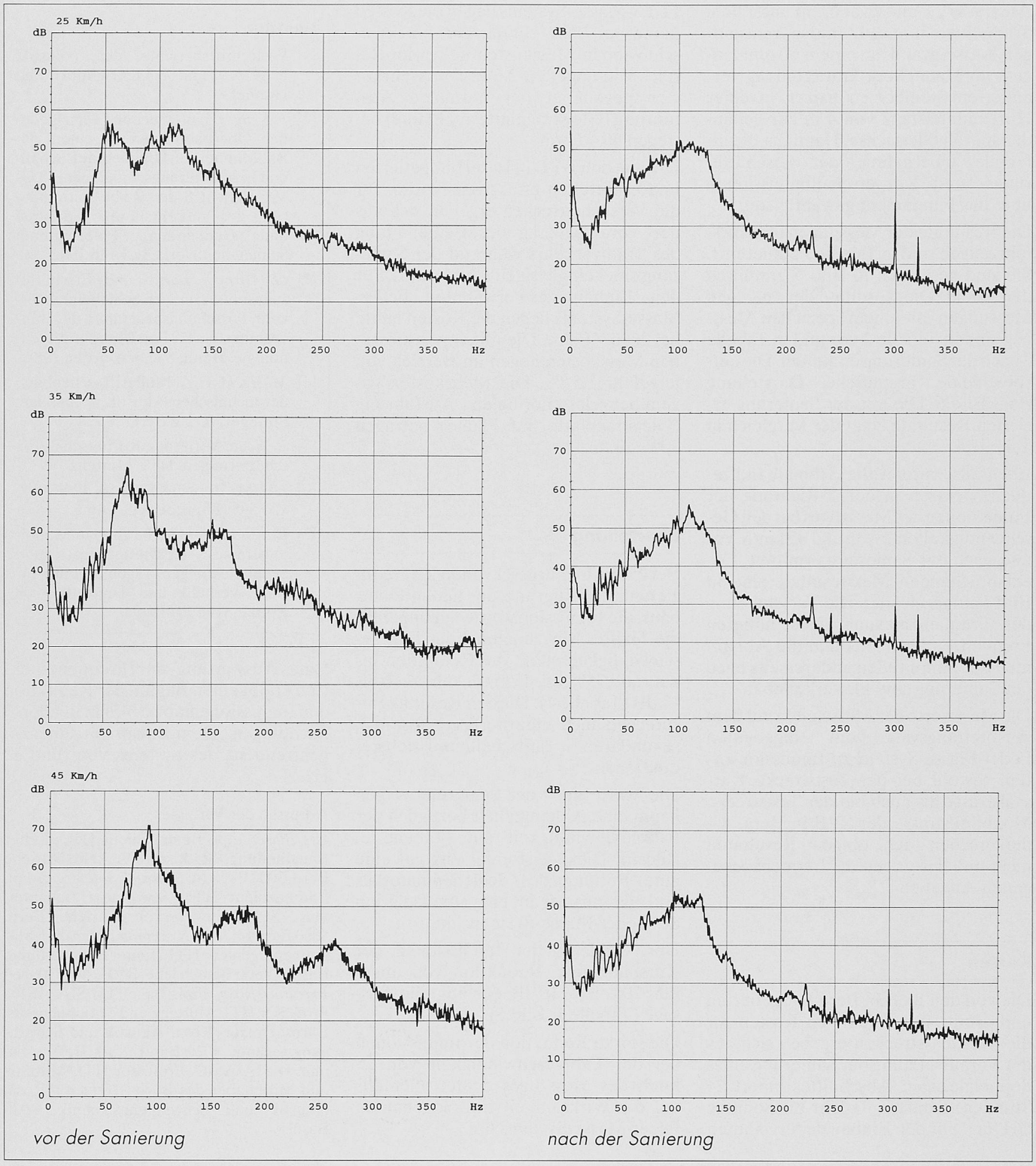

Bild 7. Schmalbandfrequenzspektren in der Y-Richtung der Immissionen des Messzuges bei den Geschwindigkeiten 25, 35 und 45km/h, vor und nach der Sanierung

und in Basel (Austrasse: 350 m, 1993) angelegten Teststrecken unterscheiden sich in ihren Oberbauprofilen nur in Details. Das wesentliche Moment bildet die 50 mm dicke Feder aus der Mineralwollplatte, beispielsweise «Flumroc», auf der Planie und an den beiden Seiten der Betontragplatte hochgezogen, wie es die Bilder 2 und 3 zeigen.

Vor dem Einbau wurde das Verhalten der dynamischen Steifigkeit der 50 mm dicken Platten an der EMPA geprüft. Unter einer Vorlast von 25 kN/m², bei Messung mit Sinusanregung von je 1mm/s Beanspruchung mit Wechsellast von 15 bis 35 kN/m² änderte sich die dynamische Steifigkeit nach 324 000 Lastwechseln nicht. Die dynamische Steifigkeit einer Platte mit einer Dichte von 180kg/m³ betrug durchwegs 35 MN/m³. Interessanterweise erhöhte sich diese, bei einem Wassergehalt von 23 l/m², lediglich um 20% [6]. In Dänemark gemachte Langzeitversuche werden damit bestätigt und Befürchtungen über ein Anheben der Immissionen durch mögliches Eindringen von Meteorwasser in das System reduziert.

Messresultate

In Basel befand sich die Messstelle im Keller der bahnparallelen Liegenschaft

Austrasse 29, und zwar 0,7 m unter dem Tramschienenniveau, an der tramseitigen Aussenwand, an einem 60 mm langen, im Mauerwerk kraftschlüssig verankerten Stahlbolzen fixiert, in einer Horizontaldistanz von 4 m zur gebäudenäheren Gleisachse. Damit ist die integrale Übernahme der Erschütterungs- und Körperschallimmissionen über das Fundament gewährleistet:

Die Resultate der Messungen mit Kursfahrzeugen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Sie sind zusätzlich in Bild 5 graphisch dargestellt. Die Resultate der analogen Messungen mit einem speziellen Messzug sind in Tabelle 2 vor und in Tabelle 3 nach der Sanierung enthalten. Die entsprechende graphische Darstellung zeigt Bild 6. Die mit der Sanierung erzielten Resultate zeigt der Vergleich in Tabelle 4.

Ebenfalls wurden die Schmalbandfrequenzspektren in der Y-Richtung der Immissionen des Messzuges bei den Geschwindigkeiten 25, 35 und 45 km/h, vor und nach der Sanierung ermittelt. Die entsprechenden Messresultate sind in Bild 7 aufgezeichnet. Die Verschiebung der Frequenzmaxima nach höheren Frequenzen einerseits und die Abnahmen der Amplituden andererseits nach der Sanierung sind klar erkennbar.

Die Messwerte der Messstellen auf dem Ausbreitungsweg vom eingebauten Feder-Masse-System zu Immissionsorten, sowohl bei der Teststrecke Kursaalstrasse als auch bei der Teststrecke Monbijoustrasse der SVB in Bern, widersprechen den obigen Resultaten nicht und bestätigen die frequenzbezogenen Angaben [7].

Kosten

Die von den SVB in Bern budgetierten und ermittelten effektiven Kosten für die Versuchsstrecken ergeben sich aus der Voraussetztung der Sanierung eines doppelgleisigen Abschnittes innert 24 Stunden (Samstag 03 Uhr bis Sonntag 06 Uhr). Für den Einbau des erwähnten Feder-Masse-Systems liegen die Kosten heute bei 1800.– Fr./m. Die miteingeschlossenen Messkosten liegen im Bereich von ungefähr 2,5%. Die Mehrkosten gegenüber der normalen Ausführung (Gleistragplatte auf Planie) betragen 60.– Fr./m.

Die von den BVB in Basel budgetierten und ermittelten effektiven Kosten für die Versuchsstrecken ergeben sich aus der Voraussetzung der Beibehaltung des Tramverkehrs während der Sanierung eines eingleisigen Abschnittes. Für den Einbau des erwähnten Feder-Masse-Systems liegen die Kosten heute bei 2600.– Fr./m. Die miteingeschlossenen Messkosten liegen im Bereich von ungefähr 1,5 %. Die Mehrkosten gegenüber der normalen Ausführung (Gleistragplatte auf Planie) betragen 300.– Fr./m.

Beurteilung

Bei 25 km/h Fahrgeschwindigkeit reduzieren sich, aufgrund des neuen Oberbaus, die Immissionswerte auf ungefähr die Hälfte. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit steigt die Reduktion bis auf rund 75% bei 45 km/h, d.h von 6 bis 12 dB (Tabelle 4). Diesem Resultat entsprechen auch andernorts gemessenen, sekundären Luftschallimmissionsreduktionen.

Die Werte nach der Sanierung zeigen kaum eine Abhängigkeit bezüglich der Fahrgeschwindigkeit auf (Tabelle 3, Bild 6). Dies weist einerseits auf eine gute Bettung des Schienenmaterials und andererseits auf eine gute Isolation des Feder-Masse-Systems hin.

Der Vergleich der Immissionen der Kursfahrzeuge, Reduktion von ungefähr 70% bzw. 10 dB, bestätigt die Aussage (Tabelle 1, Bild 5).

Die starke Reduktion der Immissionen bei der Fahrgeschwindigkeit von 25 km/h des Messzuges deutet ebenfalls auf die Wirksamkeit des eingebauten Feder-Masse-Systems hin.

Literatur

[1] Fortschrittsberichte der Akustik, DAGA 92 und 93, DPG-GmbH, Bad Honnef.

[2] *F. Krüger:* Untersuchung verschiedener Oberbauformen in einem U-Bahntunnel im Hinblick auf Schall- und Erschütterungsemissionen, STUVA Bericht 8 der Reihe Verminderung des Verkehrslärms in Städten und Gemeinden, Teilprogramm Schienennahverkehr, Köln 1982.

[3] *G. Girnau:* Lärm- und Erschütterungsminderung im Schienennahverkehr, Forschungsprogramm des Bundesministers für Forschung und Technologie, Bonn, STUVA Köln, 1984.

[4] *M. Heckl,* H.A. Müller: Taschenbuch der technischen Akustik, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin, 1994.

[5] *E. Rosa:* Vorlesung Körperschall/Erschütterungen, HTL Muttenz 1993.

[6] *EMPA:* Berichte 120'558, 120'558/2, 126'595 (Flumroc AG, Flums).

[7] *Rutishauser:* Bericht Umbau Monbijoustrasse, Erschütterungs- und Schallmessungen, Ingenieurbüro für Bau, Verkehr und Umwelt, 8008 Zürich, vom 21. 10. 93.

Eine Auswertung der Frequenzspektren ergibt einen Beginn der Reduktion der Immissionen ab ca. 45Hz in allen 3 Richtungen. Dem entspricht eine Eigenfrequenz des Systems von rund 32 Hz.

Adressen der Verfasser:

Urs Blaser, dipl. Bauingenieur HTL, Leiter Bauabteilung, Städtische Verkehrsbetriebe Bern, 3000 Bern 14; *Hansueli Sollberger,* dipl. Bauingenieur HTL, Stv. Leiter Bauabteilung, Städtische Verkehrsbetriebe Bern, 3000 Bern 14; *Josef Krummenacher,* dipl. Maschineningenieur HTL, Leiter Bauabteilung, Basler Verkehrsbetriebe BVB, 4005 Basel; *Ercolino Rosa,* dipl. Ing. ETH/SIA/ASIC, Professor HTL Muttenz und Mitinhaber des Büros Trefzer+Rosa, Akustik und Schwingungstechnik, 4020 Basel; *Karl Trefzer,* Dr. phil. II SIA/ASIC, Professor HTL Muttenz und Mitinhaber des Büros Trefzer + Rosa, Akustik und Schwingungstechnik, 4020 Basel.