

NACHRÜSTUNG VON UNTERSCHOTTERMATTEN IN EINEM S-BAHTUNNEL IM ZENTRUM VON BERLIN¹

Rüdiger G. Wettschureck⁺⁾ und Wolfgang Daiminger⁺⁺⁾

<sup>+) Getzner Werkstoffe GmbH, Nördliche Münchner Straße 27a, D-82031 Grünwald bei München
Email: ruediger.wettschureck@getzner-werkstoffe.de / web page: <http://www.getzner.at/werkstoffe></sup>

<sup>++) Müller-BBM GmbH, Robert-Koch-Straße 11, D-82152 Planegg bei München
Email: dai@mbbm.de / web page: <http://www.mbbm.de></sup>

Schlüsselwörter:

Verkehrserregte Schwingungen, Eisenbahnerschütterungen, Minderung von Körperschall und Sekundärluftschall, Einfügdungsmaß, Unterschottermatten

Zusammenfassung

Es wird über Maßnahmen berichtet, die zum Schutz des Bauvorhabens "Dorotheen Höfe" vor den vom unterirdischen S-Bahnbetrieb verursachten Körperschallimmissionen durchgeführt wurden. Die Gebäude, die zum Teil direkt über den Tunneln der Nord/Süd-S-Bahn, nahe dem Bahnhof Friedrichstrasse im Zentrum von Berlin, liegen, werden zur Zeit der historischen Baulinie folgend wieder errichtet. Zur Reduzierung der aus dem S-Bahnbetrieb in den Gebäuden zu erwartenden Körperschall- und Sekundärluftschall-Immissionen wurden in beiden S-Bahngleisen auf der gesamten Länge des Gebäudekomplexes hoch wirksame Unterschottermatten eingebaut. Aus statischen Gründen wurde in diesem Zusammenhang auch die Abdeckplatte des Unterfahrbauwerkes, die z. T. als Fundamentplatte der Gebäude dient, erneuert. Die Wirksamkeit der Maßnahme, d.h. deren Einfügdungsmaß, wurde mit Hilfe eines einfachen und bewährten Rechenmodells prognostiziert und durch Körperschallmessungen im Tunnel und auf dem Baugelände nachgewiesen.

Die Messungen wurden an identischen Meßpunkten vor und nach dem Umbau während Vorbeifahrten von S-Bahnzügen durchgeführt. Im vorliegenden Beitrag wird zunächst die Situation auf dem Baugelände, insbesondere hinsichtlich der vom S-Bahnbetrieb verursachten Körperschall-Immissionen, erläutert, und es werden die maßgeblichen Eigenschaften der eingebauten Unterschottermatte vorgestellt. Sodann werden die Durchführung und Auswertung der Körperschallmessungen beschrieben. Die wesentlichen Meßergebnisse, aus denen die Wirksamkeit der Maßnahme abgeleitet wird, werden angegeben. Danach ist festzustellen, daß das prognostizierte Einfügdungsmaß der Unterschottermatten durch die Messungen in guter Übereinstimmung bestätigt wird und damit die in die Maßnahme gesetzten Erwartungen in vollem Umfange erfüllt werden und damit die in die Maßnahme gesetzten Erwartungen in vollem Umfange erfüllt werden.

¹ Das vorliegende Manuskript basiert auf einem Beitrag in englischer Sprache, der erstmals auf der Tagung 4th European Conference on Noise Control, EURO-NOISE 2001, 14 – 17 January 2001, Patras, vorgetragen wurde [1].

1. EINLEITUNG

Beim Bau der Nord/Süd S-Bahn in Berlin zu Beginn der 40er Jahre wurden die damaligen Gebäude an der Ecke Georgen-/ Neustädtische Kirchstraße südlich des Bahnhofs Friedrichstraße unterfahren. Dabei wurde ein eigenes Unterfahrbauwerk mit einem baulich getrennten S-Bahntunnel errichtet. Das Grundstück ist derzeit unbebaut, die Gebäude sollen den historischen Baulinie folgend wieder errichtet werden. Entsprechend der örtlichen Situation und der angestrebten hochwertigen Nutzung waren aus dem S-Bahnbetrieb erhebliche Überschreitungen der anzustrebenden Anhaltswerte für Körperschallimmissionen zu befürchten. Dies wurde durch Messungen im Bereich des S-Bahntunnels, des Unterfahrbauwerks und durch Prognoserechnungen für die geplanten Gebäude bestätigt.

Die zu erwartenden Überschreitungen machten eine erhebliche Verminderung der Immissionen erforderlich, was jedoch durch zunächst beabsichtigte Maßnahmen am Gebäude wegen des vorliegenden statischen Konzeptes nicht erreichbar erschien.

Aufgrund der gegebenen Situation wäre eigentlich der Einbau eines Masse-Feder-Systems notwendig gewesen, was jedoch aus baulichen und betrieblichen Gründen nicht möglich war.

Daher wurde als Maßnahme der Einbau einer hoch wirksamen Unterschottermatte des Typs Sylodyn CN 235 empfohlen. Der Einbau der Unterschottermatte erfolgte Anfang des Jahres 1999, gleichzeitig wurde auch das Unterfahrbauwerk teilweise erneuert und den statischen Erfordernissen angepaßt.

Durch Messungen nach Abschluß der Sanierungsmaßnahmen im Tunnel wurde die erreichte Minderung des Körperschalls dokumentiert.

Es zeigte sich, daß die zuvor rechnerisch ermittelte Einfügungsdämmung der Unterschottermatte auch in Realität erreicht wurde und somit ein ausreichender Schutz der geplanten Gebäude bzw. der späteren Nutzer der Gebäude vor schädlichen bzw. störenden Körperschall-Immissionen aus dem S-Bahnbetrieb im Tunnelbauwerk gegeben ist.

2. SITUATION

Im Eckbereich des Bauvorhabens "Dorotheen Höfe", an der Georgenstraße / Neustädtische Kirchstraße, nahe dem S-Bahnhof Friedrichstraße, liegt der S-Bahntunnel der Nord/Süd-Linien S1, S2 und 25, der entsprechend dem früheren Zustand vor der Zerstörung im Zweiten Weltkrieg wieder überbaut werden soll.

In Abb. 1 ist eine Draufsicht der Lage des Gebäudes in Relation zum Verlauf der S-Bahntunnel dargestellt, während Abb. 2 die bauliche Situation im Querschnitt zeigt.

Die Abdeckplatte des Unterfahrbauwerks (Gleis 2, Fahrtrichtung Nord), die in diesem Bereich praktisch das Fundament der zu errichtenden Gebäude darstellt, wurde aus statischen Gründen erneuert, und es wird in den Bereichen, wo dies möglich ist, unmittelbar an den Tunnel angrenzend eine bauliche Erweiterung um zwei Geschosse einer Tiefgarage vorgenommen (siehe Abb. 2).

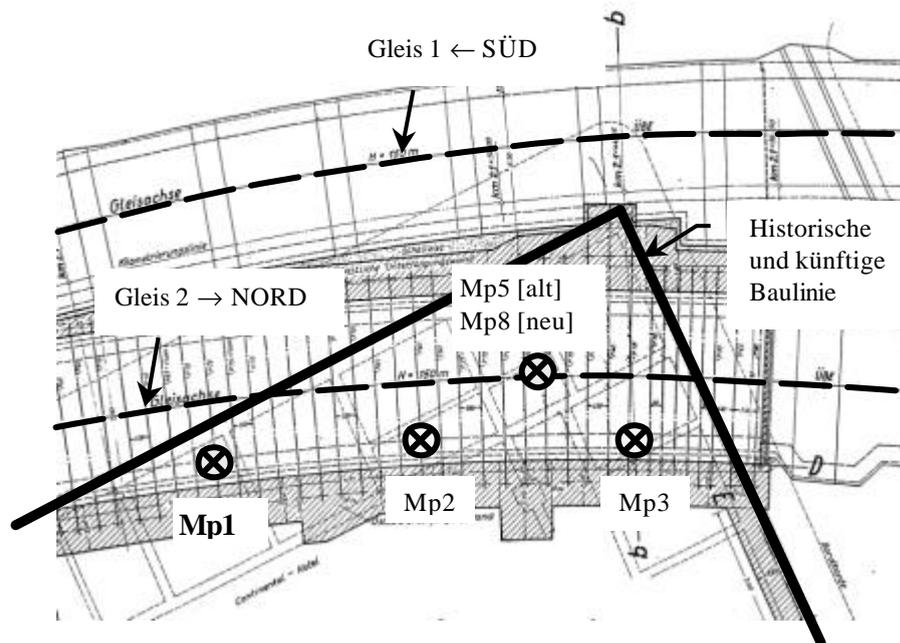


Abb. 1: Draufsicht des Gebäudes “Dorotheen Höfe” und der S-Bahntunnel, Gleis 1 und Gleis 2, mit der Position von Meßpunkten Mp.

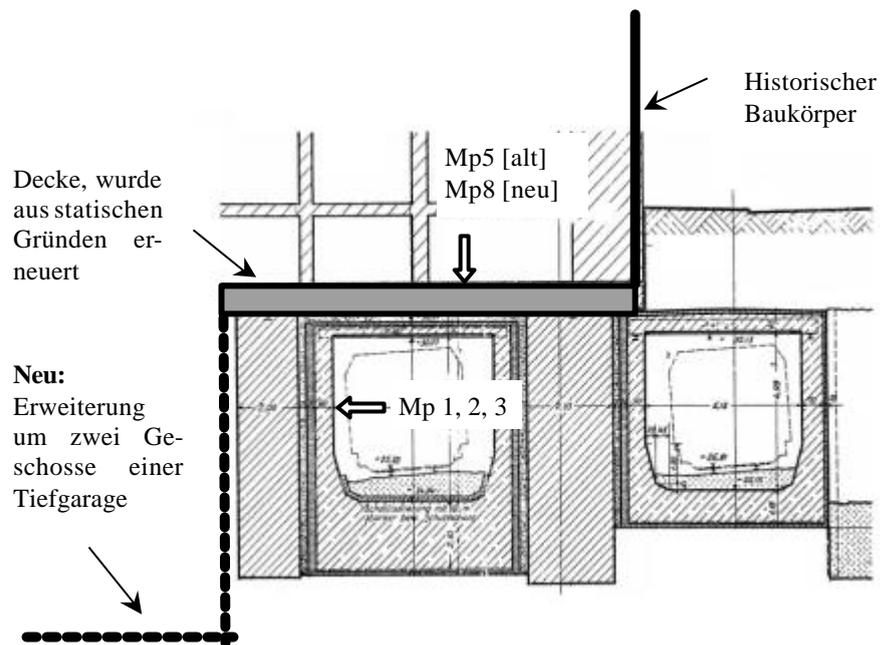


Abb. 2: Querschnitt des Gebäudes “Dorotheen Höfe” und der S-Bahntunnel, Gleis 1 und Gleis 2, mit der Position von Meßpunkten Mp..

Die Abb. 3 und Abb. 4 sollen einen bildlichen Eindruck von den örtlichen Gegebenheiten in der Umgebung der Baustelle vermitteln.

Man sieht im Vordergrund der Abb. 3 die Spree und dahinter den oberirdischen Teil des Bahnhofs Friedrichstraße, an dem sich die auf Viadukten verlaufende Ost/West-Strecke der



Abb. 3: Oberirdischer Teil des S-Bahnhofs Friedrichstraße (Blickrichtung Süd-Ost) und im Vordergrund die Spree.

Berliner Stadtbahn mit der in diesem Bereich unterirdisch verlaufenden Nord/Süd-Strecke kreuzt.

Rechts im Abb. 4 erkennt man die im Bau befindlichen Gebäude, die durch Maßnahmen im Tunnel vor den von der S-Bahn verursachten Körperschallimmissionen geschützt werden sollen.

Meßtechnische Untersuchungen im Herbst 1998, die auf dem Baugrundstück und in den Tunnels der S-Bahn durchgeführt wurden, führten zu dem Ergebnis, daß die aus dem S-Bahnbetrieb in den zukünftigen Gebäuden zu erwartenden Körperschall- und Sekundärluftschall-Immissionen ohne Minderungsmaßnahmen deutlich über den angestrebten Richtwerten liegen würden.

Wie bereits eingangs erwähnt wurde, wäre zur sicheren Einhaltung dieser Richtwerte eigentlich der Einbau eines tief abgestimmten Masse-Feder-Systems in beiden Gleisen des S-Bahntunnels wünschenswert bzw. erforderlich gewesen.

Dies war jedoch sowohl aus baulichen als auch aus betrieblichen Gründen nicht möglich, so daß man sich dafür entschied, die notwendi-

ge elastische Entkopplung des Schotteroberbaus vom Tunnelbauwerk in beiden S-Bahngleisen auf der gesamten Gebäudelänge durch den Einbau von hoch wirksamen Unterschottermatten herzustellen.



Abb. 4: S-Bahnhof Friedrichstraße (im Vordergrund links, Blickrichtung Nord-Ost) und die Baustelle „Dorotheen Höfe“ (rechts).

3. EIGENSCHAFTEN DER EINGEBAUTEN UNTERSCHOTTERMATTEN

Wegen der extrem hohen Anforderungen kamen nur Unterschottermatten in Frage, die bei der nach [2] vorgegebenen statischen Steifigkeit dynamisch so weich wie möglich sind. Diese Anforderungen wurden nur von der Unterschottermatte des Typs Sylodyn® CN 235 erfüllt. Mit einem statischen Bettungsmodul von $0,02 \text{ N/mm}^3$ nach [2] ist diese für den hier vorliegenden Anwendungsbereich "S-Bahn, Geschwindigkeit bis 120 km/h " ausgelegt und wurde für höchste Anforderungen bezüglich der Körperschallminderung entwickelt.

Die Federkennlinie dieser Unterschottermatte ist in Abb. 4 dargestellt. Sie hat den für zellige Polyurethan (PUR)-Elastomere typischen degressiven Verlauf im mittleren Lastbereich.

Aus der Federkennlinie ergibt sich ein statischer Bettungsmodul von $c_{\text{stat}} = 0,02 \text{ N/mm}^3$, der nach [2] als Sekante zwischen den Pres-

sungen $0,02 \text{ N/mm}^2$ und $0,1 \text{ N/mm}^2$ zu ermitteln ist.

In Abb. 5 ist die spezifische, statische Tangentensteifigkeit dieser Unterschottermatte zu In Abb. 5 ist die spezifische, statische Tangentensteifigkeit dieser Unterschottermatte zusammen mit der dynamischen Steifigkeit für verschiedene Frequenzen als Funktion der Pressung dargestellt.

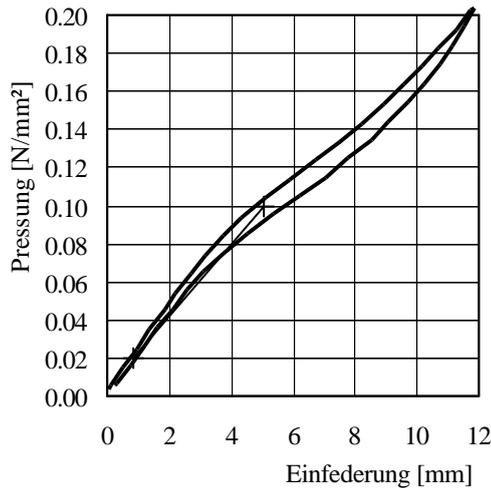


Abb. 5: Federkennlinie der Unterschottermatte des Typs Sylodyn® CN 235

Man erkennt an dieser Darstellung, daß die Unterschottermatte insgesamt eine sehr niedrige dynamische Versteifung aufweist und im relevanten Lastbereich um $0,06 \text{ N/mm}^2$ im Mittel durch eine dynamische Steife von ca. $0,022 \text{ N/mm}^3$ charakterisiert werden kann. Mit diesem Wert wurde auch das durch den Einbau der Unterschottermatte zu erwartende Einfügungsdämmmaß unter Verwendung des Rechenmodells nach [4] berechnet.

4. KÖRPERSCHALLMESSUNGEN

4.1 Durchführung der Messungen

Im Rahmen der baodynamischen Untersuchungen zur Überbauung des S-Bahntunnels wurden vor und nach dem Einbau der Unterschottermatten in den beiden Gleisen umfangreiche Körperschallmessungen durchgeführt [6], [7].

Dabei waren insgesamt 14 Meßpunkte (Mp) eingerichtet, wovon 8 Meßpunkte auf dem

Baugelände verteilt waren, während jeweils 3 Meßpunkte an der Tunnelwand der beiden S-Bahngleise angebracht waren.

Für die Ermittlung der Wirksamkeit der Körperschall-Minderungsmaßnahme, d.h. das Einfügungsdämmmaß der Unterschottermatten, über die hier berichtet wird, werden davon nur die in Abb. 1 und Abb. 2 eingezeichneten

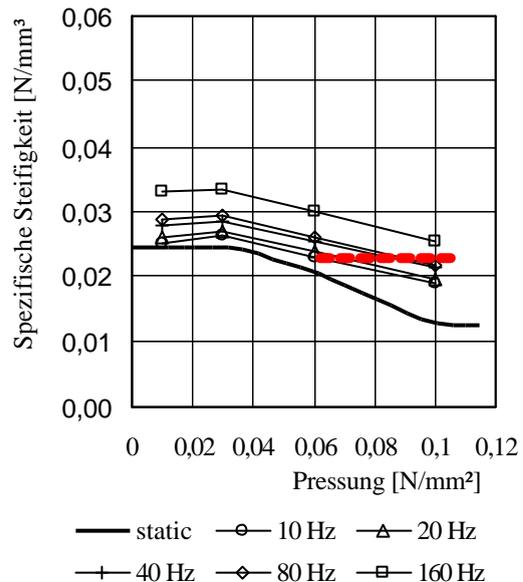


Abb. 6: Statische Tangentensteifigkeit und dynamische Steifigkeit für unterschiedliche Frequenzen der Unterschottermatte Sylodyn® CN 235 als Funktion der Pressung nach [3].

..... Wert, der bei der Berechnung des Einfügungsdämmmaßes nach [4] verwendet wurde.

Mp 1, 2, 3 und Mp 5 [alt] bzw. Mp 8 [neu] herangezogen, da diese bei den Messungen vor und nach dem Einbau jeweils an der gleichen Stelle angeordnet werden konnten.

Die Meßpunkte Mp 1, 2 und 3 befanden sich an der Tunnelwand, 1,3 m über Schienoberkante des Gleises 2 (Fahrtrichtung Nord), das unmittelbar unter dem Baugelände verläuft. An diesen Meßpunkten wurde die horizontale Schwingungsrichtung erfaßt.

Der Meßpunkt Mp 5 [alt, d.h. vor dem Einbau der Unterschottermatten] bzw. Mp 8 [neu, d.h. nach dem Einbau der Unterschottermatten] befindet sich vertikal über der Achse des Gleis

ses 2, auf der Tunnelabdeckung, die im Rahmen der Baumaßnahme aus statischen Gründen zunächst abgetragen und sodann erneuert wurde. An diesen Meßpunkten wurde die vertikale Schwingungsrichtung aufgezeichnet.

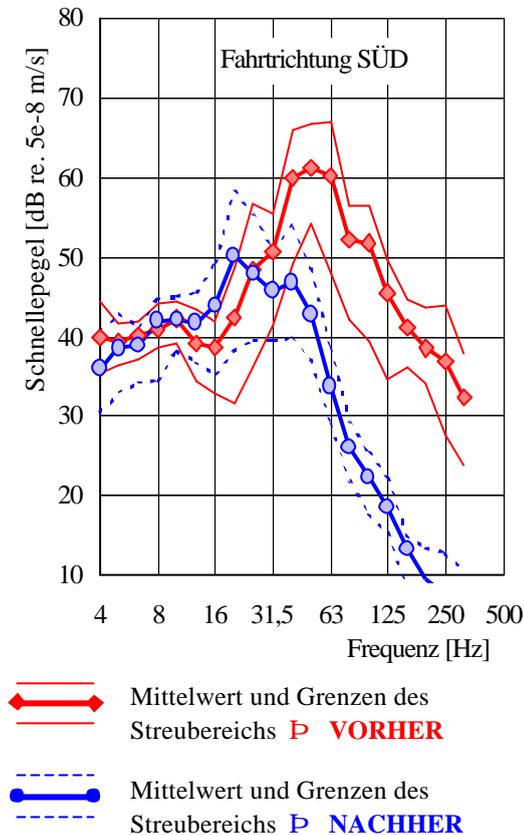


Abb. 7: Schnellepegel-Terzspektren, gemessen an der Tunnelwand und auf der Tunnelabdeckung während S-Bahnvorbeifahrten vor und nach dem Einbau der Unterschottermatte Syldyn® CN 235 und Rekonstruktion der Tunnelabdeckung.

Energetischer Mittelwert und Streubereich aus allen Zugtypen und Meßpunkten, **Gleis 1**.

Zur Meßwerterfassung wurden hochempfindliche Beschleunigungsaufnehmer verwendet, die jeweils auf einem Alu-Plättchen befestigt waren, das seinerseits mittels eines elektrisch isolierenden Klebers an der Betonstruktur (Tunnelabdeckung bzw. Tunnelwand) befestigt war.

Je Fahrtrichtung wurden ca. 15 - 20 Zugvorbeifahrten meßtechnisch erfaßt, wobei zunächst noch die unterschiedlichen Baureihen ET 476, ET 480 und ET 481 der in Berlin ver-

kehrenden S-Bahntriebzüge getrennt registriert wurden.

Die Schwingbeschleunigungssignale wurden während jeder Einzelmessung über ein Meßdaten-erfassungssystem in eine mobile Rechenanlage eingespeist und auf der Festplatte abgespeichert.

4.2 Auswertung der Messungen und Messergebnisse

Zunächst wurden die gespeicherten Meßsignale jeder Zugvorbeifahrt fortlaufend mittels digitaler Terzfilter analysiert (gleitender Effektivwert "FAST", $\tau = 125$ ms) und die Zeitverläufe der Beschleunigungspegel-Terzspektren aller Zugvorbeifahrten je Meßpunkt als "Campell-Diagramm" dargestellt (dreidimensionale Darstellung). Mit Hilfe dieser Darstellung konnten gestörte Messungen, d.h. sogen. Ausreißer, problemlos erkannt und von den weiteren Auswertungen ausgeschieden werden. Nunmehr wurde je Zugvorbeifahrt und Meßpunkt per Rechnerprogramm der Maximalwert der Vorbeifahrt ermittelt und um diesen ein Zeitfenster entsprechend einer Zuglänge gelegt.

Aus den Signalen innerhalb dieses Zeitfensters wurden nach Integration maximale Terzschnellepegel ermittelt und im Frequenzbereich von 4 Hz bis 315 Hz als Funktion der Terzmittenfrequenz dargestellt. Aus diesen Spektren der Einzelzugfahrten je Meßpunkt wurden nach nochmaliger Kontrolle und gegebenenfalls Aussonderung von "Ausreißern" energetisch gemittelte Schnellepegelspektren je Meßpunkt und Triebzugtyp berechnet.

Es zeigte sich, daß diese nach nochmaliger Mittelung über alle Zugtypen und Meßpunkte zu jeweils einem Schnellepegel-Terzspektrum je Fahrtrichtung vor und nach dem Einbau der Unterschottermatten zusammengefaßt werden konnten.

Die resultierenden mittleren Spektren sind in Abb. 7 für Zugfahrten auf Gleis 1 (Fahrtrichtung Süd) und in Abb. 8 für Zugfahrten auf Gleis 2 (Fahrtrichtung Nord) jeweils mit Streubereich dargestellt. Diese Diagramme sind die Grundlage für die Ermittlung des Einfügungsdämmmaßes der eingebauten Unterschottermatten des Typs Syldyn® CN 235.

Bereits beim Vergleich der Spektren Vorher / Nachher kann man die ausgezeichnete Wirksamkeit der Maßnahme erkennen.

Außerdem zeigen die Meßergebnisse trotz der großen Bauartunterschiede zwischen den S-Bahnzügen der alten Baureihen ET 476 und der neuen Baureihen ET 480 und ET 481 eine insgesamt erstaunlich geringe Streuung.

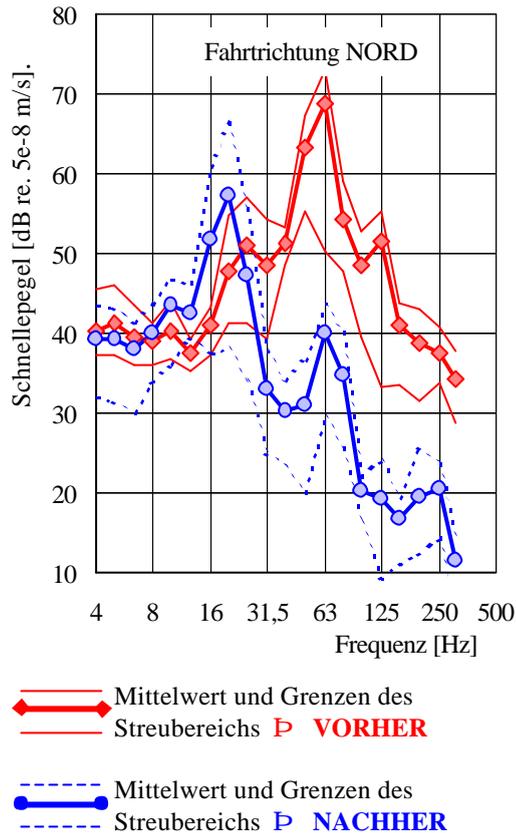


Abb. 8: Schnellepegel-Terzspektren, gemessen an der Tunnelwand und auf der Tunnelabdeckung während S-Bahnvorbeifahrten vor und nach dem Einbau der Unterschottermatte Syldyn® CN 235 und Rekonstruktion der Tunnelabdeckung. Energetischer Mittelwert und Streubereich aus allen Zugtypen und Meßpunkten, **Gleis 2**.

5. WIRKSAMKEIT DER EINGEBAUTEN UNTERSCHOTTERMATTEN

Die Wirksamkeit der Unterschottermatten, d.h. deren Einfügungsdämmmaß, wurde aus den mittleren Terzspektren Vorher / Nachher nach

Abb. 7 und Abb. 8 durch Bildung von Terzpegel-Differenzen ermittelt.

Diese sind in Abb. 9 getrennt für Zugfahrten auf Gleis 1 (Fahrtrichtung Süd) und Gleis 2 (Fahrtrichtung Nord) dargestellt. Außerdem ist in dieser Abbildung das im Rahmen der Projektierung der Maßnahme mittels des Rechenmodells nach [4], [5] prognostizierte Einfügungsdämmmaß angegeben.

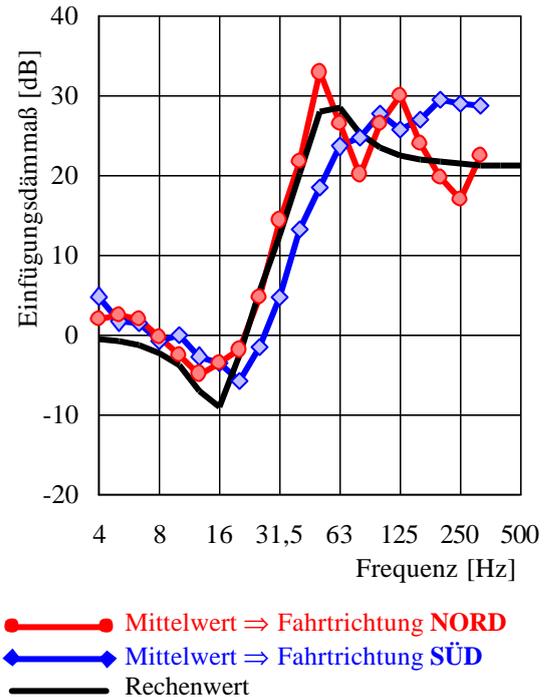


Abb. 9: Einfügungsdämmmaß der Unterschottermatte Syldyn® CN 235.

Messung: arithmetischer Mittelwert über alle Meßpunkte und Zugtypen ET 476, ET 480 und ET 481.

Rechnung nach [4]: mittlere dynamische Steifigkeit der Unterschottermatte $s'' \approx 0,022 \text{ N/mm}^3$.

Aus der Abb. 9 geht hervor, daß durch den Einbau der Unterschottermatten die Körperschallpegel im Frequenzbereich ab etwa 25 Hz reduziert wurden. In dem bezüglich Sekundärluftschall aus dem Zugverkehr kritischen und typischen Frequenzbereich ab ca. 63 Hz werden Minderungen bis zu 30 dB, im Mittel um ca. 25 dB erreicht.

6. FOLGERUNGEN

Der Einbau der Unterschottermatten ist im Hinblick auf die gestellten Anforderungen als voller Erfolg zu werten, so daß die ursprüngliche Absicht, zusätzlich zur Maßnahme am Oberbau auch Maßnahmen am Gebäude, z.B. in Form einer elastischen Gebäudelagerung, fallen gelassen wurde. Dies ist für den Bauträger auch deshalb besonders bemerkenswert, weil baudynamische Untersuchungen ergeben haben, daß aufgrund der sehr komplexen Statik der Gebäude durch die elastische Gebäudelagerung im Verhältnis zum wirtschaftlichen Aufwand nur eine geringe Reduktion der durch den S-Bahnbetrieb hervorgerufenen Körperschallpegel zu erwarten gewesen wären.

Teile der im Bau befindlichen Gebäude sollen als hochwertiger Geschoßwohnungsbau genutzt werden. In diesen Bereichen ist daher der Einbau von schwimmenden Estrichen zwingend erforderlich. Um diese Estrichsysteme unter Berücksichtigung der noch verbliebenen Körperschallmissionen aus dem Zugbetrieb optimal auslegen zu können, ist vorgesehen, in diesen Gebäudeteilen nach Fertigstellung der Rohbauten erneut Körperschallmessungen durchzuführen.

An dieser Stelle soll noch auf die gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Einfügungsdämmmaß der eingebauten Unterschottermatten hingewiesen werden. Der Unterschied zwischen den Kurven für die verschiedenen Fahrtrichtungen ist allerdings nicht ohne weiteres erklärbar. Eine mögliche Ursache könnte darin liegen, daß Unterschiede am Oberbau, z.B. bezüglich der Höhe und Steife des Schotterbetts, vorliegen. Andererseits können sich auch die baulichen Veränderungen im Zusammenhang mit der Erneuerung der Tunnelabdeckung ausgewirkt haben.

Abschließend ist noch festzustellen, daß die vorliegenden Ergebnisse in Fortführung früherer Projekte mit ähnlicher Aufgabenstellung (siehe z.B. [8], [9], [10]) als weitere Bestätigung für die gute Prognosesicherheit des verwendeten Rechenmodells nach [4], [5] gewertet werden können

7. LITERATUR

- [1] Wettschureck R G, Daiminger W (2001) „Installation of high-performance ballast mats in an urban railway tunnel in the city of Berlin“, Proceedings 4th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2001, Patras, Griechenland, Januar 2001.
- [2] DB-TL 918 071 (1988) „Technische Lieferbedingungen Unterschottermatten“ der Deutschen Bahn AG, Ausgabe Juni 1988.
- [3] Hofmann P (1996) „Bestimmung des dynamischen Bettungsmoduls einer Unterschottermatte des Typs Sylodyn® CN 235“, Müller-BBM Bericht Nr. 32.242/11, im Auftrag der Getzner Werkstoffe GmbH.
- [4] Wettschureck R G, Kurze U J (1985) „Einfügungsdämmmaß von Unterschottermatten, ACUSTICA, Vol. 58, pp. 177 – 182
- [5] Wettschureck R G (1985) „Ballast Mats in Tunnels – Analytical Model and Measurements“, Proceedings inter-noise '85, München, Vol. I, pp. 721 – 724.
- [6] Daiminger W et al. (1998) „Dorotheenhöfe, Berlin-Mitte – Baudynamische Untersuchungen zur Überbauung des S-Bahntunnels“, Müller-BBM Bericht Nr. 33 848/3, im Auftrag von HTV - Projektmanagement für Immobilien GmbH, Berlin.
- [7] Daiminger W et al. (1999) „Dorotheenhöfe, Berlin-Mitte – Baudynamische Untersuchungen zur Überbauung des S-Bahntunnels“, Müller-BBM Nr. 33 848/18, im Auftrag von HTV - Projektmanagement für Immobilien GmbH, Berlin.
- [8] Wettschureck R G (1995) „Vibration and Structure-Borne Noise Insulation by means of Cellular Polyurethane (PUR) Elastomers in Railway Track Applications“, Rail Engineering International, Edition 1995, No. 2, pp. 7 – 14.
- [9] Wettschureck R G (1997) „Measures to reduce Structure-Borne Noise Emission induced by Above-Ground, Open Railway Lines“, Rail Engineering International, Edition 1997, No. 1, pp. 12 – 16.
- [10] Wettschureck R G, Breuer F, Tecklenburg M, Widmann H (1999) „Installation of Highly Effective Vibration Mitigation Measures in a Railway Tunnel in Cologne, Germany“, Rail Engineering International, Edition 1999, No. 4, pp. 12 – 16.