


3.VDI-Fachtagung - Baudynamik


Schwingungstechnische Untersuchungen und Dimensionierung des Oberbaus

im Rahmen des Projektes „Fast Tram Krakau“



GuD CONSULT GmbH

- Gutachten
- Beratung
- Planung
- Bauüberwachung



GuD CONSULT GmbH, Ihr Partner im Bauingenieurwesen und in den Geowissenschaften
Berlin ■ Potsdam ■ Leipzig ■ Stuttgart ■ Hamburg ■ Athen ■ Wien



GuD Geotechnik und
Dynamik GmbH



GuD Ingenieurbüro
für Spezialtiefbau GmbH



GuD Planungsgesellschaft
für Ingenieurbau mbH

www.gudconsult.de

Schwingungstechnische Untersuchungen und Dimensionierung des Oberbaus im Rahmen des Projektes „Fast Tram Krakau“

Dipl.-Ing. **S. Appel**, Dipl.-Geophys. **S. Achilles**,
GuD Geotechnik und Dynamik GmbH, Berlin;
Dipl.-Ing. **M. Biskup**, Getzner Werkstoffe GmbH, Berlin

1 Kurzfassung

Der Ausbau und die Modernisierung der Krakauer Straßenbahn war eines der ersten Infrastrukturprojekte Polens, die mit Geldern des EU Strukturfonds gefördert wurden. Teil des sogenannten Fast Tram Projektes war der Bau eines Straßenbahntunnels im Zentrum der Stadt. Für den im Rohbau fertig gestellten Tunnel war anhand schwingungstechnischer Untersuchungen nachzuweisen, dass in den nahegelegenen Wohnbauten und im direkt über dem Tunnel liegenden Shopping Center „Galeria Krakowska“ die Anforderungen an den Schwingungs- und Schallschutz eingehalten werden.

Um die Schwingungsübertragung vom Tunnel auf benachbarte Gebäude zu untersuchen, wurden vor Ort Messungen durchgeführt, welche spektrale Übertragungsfunktionen lieferten. Die maßgebende Kraftanregung auf das Tunnelfundament infolge einer Straßenbahnüberfahrt wurde mittels eines Finiten-Element-Modells unter Einbeziehung von Schwingungsregistrierungen an vorhandenen Krakauer Straßenbahngleisen rückgerechnet.

Im Ergebnis der Untersuchungen war festzustellen, dass der Einsatz herkömmlicher Gleise dazu führen würde, dass in den Wohngebäuden und im Shopping Center mit hoher Wahrscheinlichkeit störende Sekundärluftschallimmissionen auftreten. Zur wirksamen Reduzierung der sekundären Luftschallpegel erfolgte daher eine Optimierung des vorgesehenen Masse-Feder-Systems, wobei hierbei sowohl rechnerische Untersuchungen als auch Messergebnisse in die Betrachtung eingingen.

2 Situationsbeschreibung

Bereits in den 70-iger Jahren wurde mit der Planung und Errichtung eines 1,3 km langen Straßenbahntunnels im Zentrum Krakaus begonnen. Von Juni 2007 bis Oktober 2008 erfolgten der Ausbau und die Ertüchtigung des Tunnels zwischen dem Rondo Mogielski und der Pawia-Straße. Neben dem Bau von Bahnsteigen, der Sanierung älterer Tunnelabschnitte und der Anpassung des Tunnelbauwerks an aktuelle Normen sollte ein bzgl. der Erschütterungsemissionen optimierter Gleisoberbau festgelegt werden. Aufgrund der Finanzierung des Projektes aus Mitteln des europäischen Strukturfonds waren neben polnischen auch europäische Standards zu berücksichtigen. Für die ausführenden Firmen ergaben sich folgende Problemstellungen:

1. In Bezug auf „Lärm und Schwingungen“ wurden in der Ausschreibung neben der Einhaltung vorgegebener Luftschall- und Erschütterungswerte auch Anforderungen bzgl. des zulässigen Sekundärluftschalls in den umliegenden Gebäuden gestellt. Erfahrungen und Kenntnisse zu Prognoseverfahren waren zu dieser Zeit jedoch kaum vorhanden.
2. Darüber hinaus verfügten die ausführenden Firmen über wenig Erfahrung mit dem Bau gedämmter Gleissysteme.

3 Aufgabenstellung

Das Ingenieurbüro GuD Geotechnik und Dynamik GmbH wurde beauftragt, aus den zur Verfügung stehenden Oberbausystemen die Ausführung festzulegen, welche dem geforderten Erschütterungs- und Sekundärluftschallschutz gerecht wird. Auf der Grundlage vor Ort durchgeführter Schwingungsmessungen, vorgenommen sowohl an bestehenden Straßenbahnstrecken als auch im Rohbau des Tunnels, waren die durch den Schienenverkehr hervorgerufenen Emissionen abzuschätzen und die resultierenden Erschütterungs- und sekundären Luftschallwerte für die umliegende Bebauung zu prognostizieren.

Der Getzner Werkstoffe GmbH kam die Aufgabe zu, durch die Wahl der Parameter ein Oberbausystem zu entwickeln, dass sowohl den in der Ausschreibung genannten technischen Parametern als auch den Anforderungen hinsichtlich eines ausreichendem Erschütterungs- und Schallschutzes entspricht.

4 Bestimmung der Schwingungsanregung

4.1 Straßenbahntypen

Im Straßenbahnnetz von Krakau verkehren ca. 500 Straßenbahnen, wobei im wesentlichen vier Bahntypen anzutreffen sind. Diese unterscheiden sich im Alter, in ihrer Bauart und folgend in der Schwingungsanregung. Bild 1 zeigt drei in Krakau verkehrende Straßenbahntypen, die in den 1960-iger Jahren gebaut wurden. Darüber hinaus ist ein Foto der seit 1999 eingesetzten modernen Niederflurbahnen zu sehen.



Bild 1: Straßenbahntypen "105N" (links); Düwag E1, genannt "Vienna" (oben mittig); Bombardier (oben rechts); MAN GT6, genannt "Nürnberg" (rechts unten)

Bei der Überfahrt der Straßenbahnen werden Erschütterungen als tieffrequente Schwingungsemissionen durch das Rad-Schiene-System ausgelöst, die über den Gleisoberbau und das Planum in das umgebende Erdreich weitergeleitet werden.

Im folgenden Bild 2 werden Emissionsspektren in Form von mittleren Terzspektren der Schwingschnelle gegenübergestellt, aus denen Unterschiede bzgl. der Emissionen zu erkennen sind. Die größten Schwingungsamplituden wurden bei Überfahrten der Bahnen vom Typ „105N“ registriert, wobei die maßgebliche Anregung bei Frequenzen um 20 Hz angesiedelt ist. Die Straßenbahnen vom Typ „Nürnberg“ und „Vienna“ verursachen vergleichbare Anregungsspektren. Im Frequenzbereich unter 30 Hz konnten für Überfahrten der Niederflurbahnen (Typ „Bombardier“) die geringsten Emissionen festgestellt werden. Demgegenüber wurden für diese Typen maßgebliche Anregungen über 40 Hz registriert.

Die Messungen fanden in der Innenstadt Krakaus, an einer Gleisstrecke statt, die sich zum Zeitpunkt der Messungen in sehr schlechtem Zustand befand. Aus den Emissionsspektren konnten für das Projekt wesentliche Rückschlüsse gezogen werden:

- Für Überfahrten der Typen „105N“, „Vienna“ und „Nürnberg“ werden maßgebliche Erschütterungen im Frequenzbereich um 20 Hz ausgelöst. Diese sind bedeutend für die spürbaren Deckenschwingungen in den umliegenden Bauwerken, da in diesem Frequenzbereich i.d.R. auch die Deckeneigenfrequenzen liegen und somit Resonanzeffekte hervorgerufen werden können.
- Für Überfahrten der Straßenbahnen vom Typ Bombardier musste aufgrund der höherfrequenten Schwingungsanregung (>40 Hz) von erhöhten sekundären Luftschallpegeln in nahegelegenen Wohngebäuden ausgegangen werden.

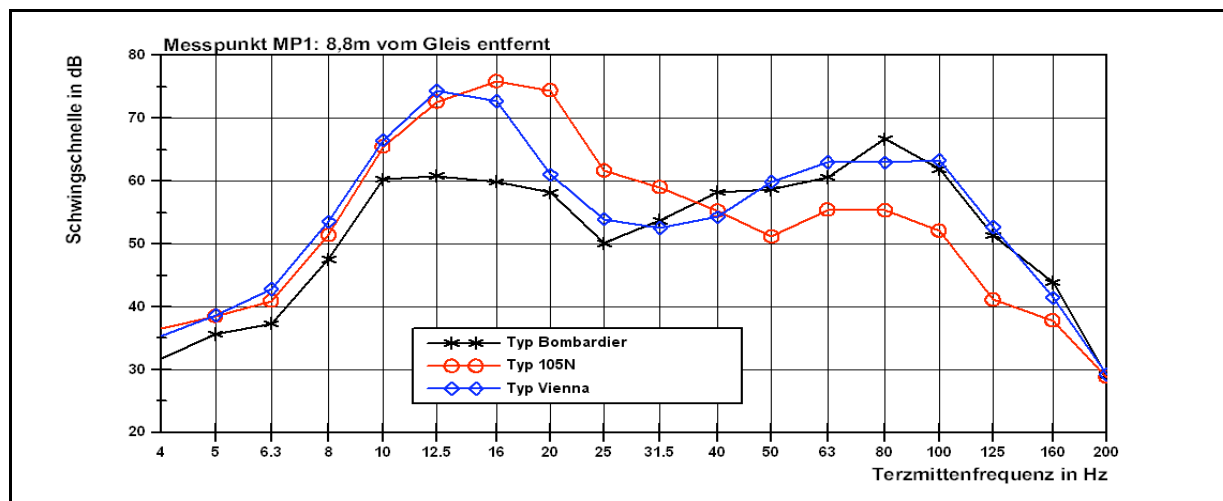


Bild 2: Emissionsspektren in der ul. Starowislna

4.2 Oberbauarten

Der Gleisaufbau des Straßenbahnnetzes in Krakau ist sehr unterschiedlich. Im Innenstadtbereich findet man i.d.R. Aufbauten mit Gleistragplatten (Dicke ca. 25 cm) vor, die abhängig vom Zeitpunkt ihrer Reinstandsetzung zusätzlich auf elastischen Matten (Gummi-granulatmatten) gelagert wurden. In der Lubicz-Straße wurde ein Masse-Feder-System mit Polyurethanmatten installiert. Die hochwirksame Dämmmaßnahme sollte einerseits einen hohen Erschütterungsschutz für ein neu erbautes Opernhaus sicherstellen und andererseits als Teststrecke für das geplante Tunnelprojekt herangezogen werden. In weiteren Bereichen der Stadt verkehren die Bahnen auf Schotterstrecken. Bild 3 beinhaltet eine Gegenüberstellung von im Baugrund, an ausgewählten Gleisstrecken, erfassten Emissionsspektren.

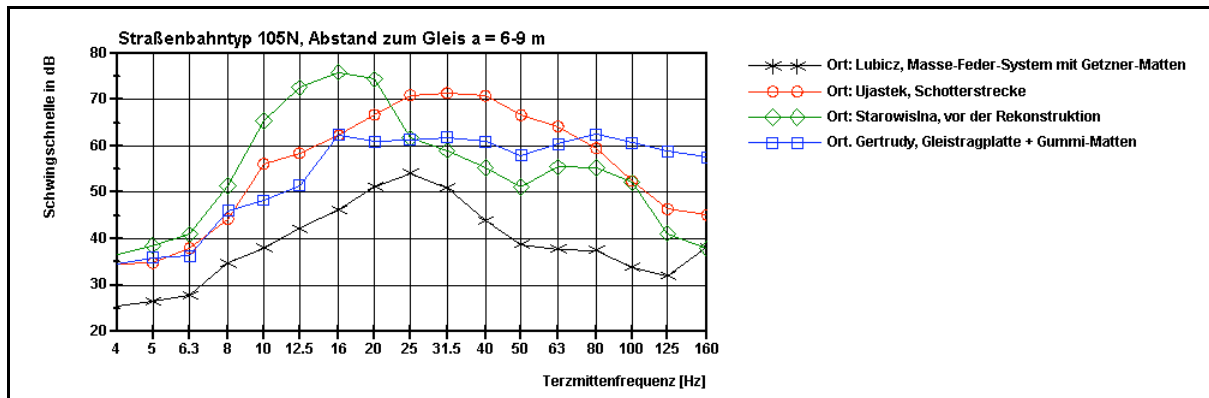


Bild 3: Emissionsspektren, unterschiedliche Gleissysteme

Das Diagramm zeigt, dass die größte Schwingungsanregung für Frequenzen unter 30 Hz an der ungedämmten Strecke in der Starowislna-Straße verzeichnet wurde. Für höhere Frequenzanteile konnten vergleichbar hohe Amplituden an der Schotterstrecke sowie an der mittels Gummi-Granulatmatten gedämmten Strecke ul. Gertrudy festgestellt werden. Die geringste Erschütterungsemission wurde in der Lubicz-Straße (MFS mit Getzner-Polyurethanmatten) registriert. Im Gegensatz zu anderen gedämmten Systemen war hier zusätzlich ein ca. 30 cm starker Betontrog, mit der Funktion einer Impedanzplatte, auf dem Baugrund vorhanden. Durch diese Maßnahme konnten insbesondere die tieffrequenten Anregungen durch die Straßenbahnen vom Typ 105N bzw. „Vienna“ und „Nürnberg“ reduziert werden. Obwohl vor kurzem rekonstruiert, wiesen Gleistragplatten in der ul. Gertrudy sowie auf Strecken mit ähnlichen Gleisaufbauten aufgrund des ungenügend steifen Untergrundes bereits wieder diverse Baumängel auf, was zu den registrierten hohen Schwingungsemissionen führte.

4.3 Berechnung der Schwingungsanregung im Tunnel

4.3.1 Vorgehensweise

Die Berechnungen erfolgten in zwei Stufen. Für den ersten Berechnungsschritt wurden die Ergebnisse von Schwingungsmessungen herangezogen, um mittels eines Finiten-Element-Modells (FEM) die Kraftanregung, die auf eine Gleistragplatte bei der Überfahrt einer Straßenbahn wirkt, zu berechnen (Freifeldberechnungen).

Im zweiten Untersuchungsschritt erfolgte die Abbildung des Tunnels mit dem umgebenden Baugrund mittels finiter Elemente. Das Tunnelfundament wurde innerhalb der Modellrechnungen mit der zuvor berechneten Kraftanregung aus dem Straßenbahnverkehr beaufschlagt. Im Ergebnis konnten so die Tunnelschwingungen unter Anregung der Straßenbahnüberfahrten berechnet werden.

4.3.2 Freifeldberechnungen

Grundlage der Freifeldberechnungen waren Schwingungsmessungen an Straßenbahngleisen in der Innenstadt Krakaus. Anhand der entlang von Messprofilen bei Straßenbahnüberfahrten ermittelten Schwingungsantworten im Boden wurden mit Hilfe eines FEM die von den Straßenbahnen ausgehenden Kraftanregungen rückgerechnet. Das zweidimensionale Modell stellt einen Querschnitt durch die Straßenbahntrasse mit dem umliegenden Baugrund dar. Für den Oberbau wurde eine 30 cm starke Gleistragplatte berücksichtigt. Die Baugrundsichtung wurde durch Layer abgebildet. Die Berechnungen der Schwingungsantworten erfolgten im Zeitbereich mit dem Programm Plaxis V8.6. Da im Ergebnis frequenzabhängige Übertragungsfunktionen zur Berechnung der Anregungskraft benötigt wurden, musste eine Zeitfunktion mit konstantem Leistungsinhalt über den interessierenden Frequenzbereich von 1-200 Hz erstellt werden. Hierfür wurde ein über 8 s dauerndes weißes Rauschen angesetzt. Die Berechnungen wurden folgendermaßen durchgeführt:

- Berechnung der Baugrundschrwingungen $v(t)_{B, \text{Rauschen}}$ aufgrund der Kraftanregung $f(t)_{\text{Rauschen}}$ an den Knotenpunkten 7 m, 13 m und 17 m
- Berechnung von Übertragungsfunktionen im logarithmierten Terzfrequenzbereich
$$H(f)_{7m, 13m, 17m} = V(f)_{B, \text{Rauschen}, 7m, 13m, 17m} - F(f)_{\text{Rauschen}}$$
- Berechnung der Kraftanregung auf die Gleistragplatte durch Straßenbahnüberfahrt
$$F(f)_{\text{Straßenbahn}, 7m, 13m, 17m} = H(f)_{7m, 13m, 17m} - V(f)_{\text{Straßenbahn}, 7m, 13m, 17m}$$

4.3.3 Berechnung der Emissionsspektren im Tunnel

Für die Berechnungen der Tunnelschwingungen infolge Straßenbahn-anregung wurden ebenfalls 2-dimensionale FE-Modelle erstellt. Abgebildet wurden verschiedene Tunnelquerschnitte. Diese repräsentieren die Abschnitte, in denen auch die nachfolgend beschriebenen Schwingungsmessungen zur Ermittlung der Übertragungsverhältnisse Tunnel->Bauwerk durchgeführt wurden. Die Abmessungen des FE-Modells wurden relativ groß gewählt, um Reflexionen an den Modellrändern zu vermeiden (siehe Bild 4). Die Anregung auf der Tunnelsohle erfolgte wiederum durch eine Einheitskraftanregung im Zeitbereich. Die Berechnung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Berechnung der Tunnelschwingungen $v(t)_{T, \text{Rauschen}}$ infolge der Kraftanregung $f(t)_{\text{Rauschen}}$
- Berechnung von Übertragungsfunktionen im logarithmierten Terzfrequenzbereich
$$H(f)_{\text{Tunnel}} = V(f)_{T, \text{Rauschen}} - F(f)_{\text{Rauschen}}$$
- Berechnung der Tunnelschwingungen infolge Straßenbahnüberfahrt
$$V(f)_{T, \text{Straßenbahn}} = H(f)_{\text{Tunnel}} + F(f)_{\text{Straßenbahn}, 7m, 13m, 17m}$$

Die Emissionsspektren $V(f)_{T,\text{Straßenbahn}}$ der verschiedenen Tunnelabschnitte, berechnet unter Ansatz der Anregungen aus den Straßenbahnüberfahrten, wurden im folgenden zur Prognose der Deckenschwingungen in den Bauwerken entlang des Tunnels herangezogen.

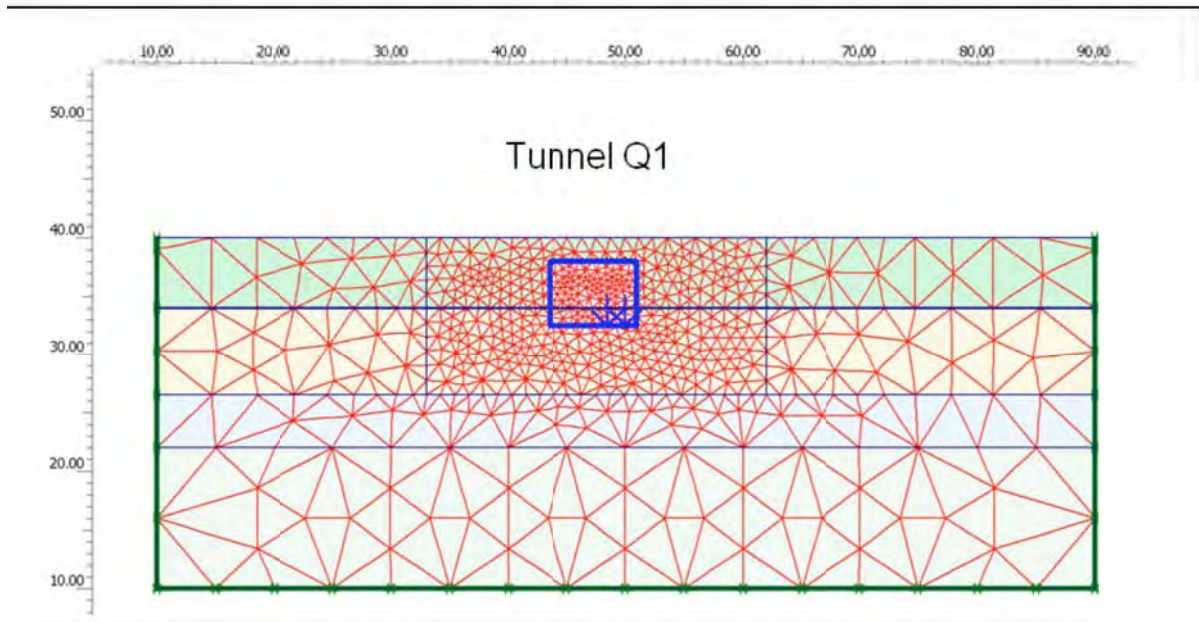


Bild 4: FE-Modell zur Berechnung der Tunnelschwingungen

5 Untersuchung der Schwingungsübertragung vom Tunnel auf die Bauwerke

Die Bebauung entlang der Tunnelstrecke ist recht unterschiedlich. Am östlichen ca. 500 m langen Tunnelabschnitt befinden sich überwiegend unterkellerte, mit vier Obergeschossen ausgestattete Wohnbauten mit Holzbalkendecken, errichtet in Ziegelmauerwerks-Bauweise. Der laterale Abstand zwischen Tunnel und Gebäuden variiert dort zwischen 5 m und 22 m. Nach Unterquerung des Hauptbahnhofs biegt die Tunnelstrecke nördlich ab. In der Kurve ist der Tunnel mit dem Stahlbetonbau des Shopping Centers „Galeria Krakowska“ direkt, ohne Bodenüberdeckung, überbaut. Die anschließende Tunnelstrecke zieht sich durch ein Gelände, dessen Bebauung mit Wohn- und Geschäftshäusern gerade errichtet wird oder für die nahe Zukunft geplant ist. Zusätzlich variieren Tunnelquerschnitt und Tiefenlage abschnittsweise.

Um repräsentative Angaben zur Schwingungsübertragung vom Tunnel auf Geschossdecken umgebender Gebäude zu erhalten, wurden Schwingungsmessungen an insgesamt 7 Stellen vorgenommen. Wie bei solchen Untersuchungen üblich, wurden vor dem Gleiseinbau auf der Sohle des Tunnels Schwingungen angeregt und gleichzeitig im Tunnel und außerhalb, auf der Baugrundoberfläche bzw. auf den Geschossdecken des direkt über dem Tunnel lie-

genden Shopping Centers, Messungen durchgeführt. Da kein ausreichend leistungsfähiges Schwingungsaggregat zur Verfügung stand, musste auf eine Stoßanregung mit einer Baumaschine (Radlader) ausgewichen werden. Letztlich erwies sich das jedoch nicht als Problem, da das interessierende Spektrum vollständig in der Stoßantwort des Tunnels enthalten war und selbst an den Baugrundmesspunkten (bis zu 8 m über der Tunneldecke gelegen) noch ausreichend kräftige Schwinggeschwindigkeiten aufgezeichnet werden konnten. Bild 5 zeigt entsprechende Zeitsignale und Spektren, aus denen nach den Eingangs-Ausgangs-Beziehungen linearer Systeme die spektralen Übertragungsfunktionen berechnet werden konnten.

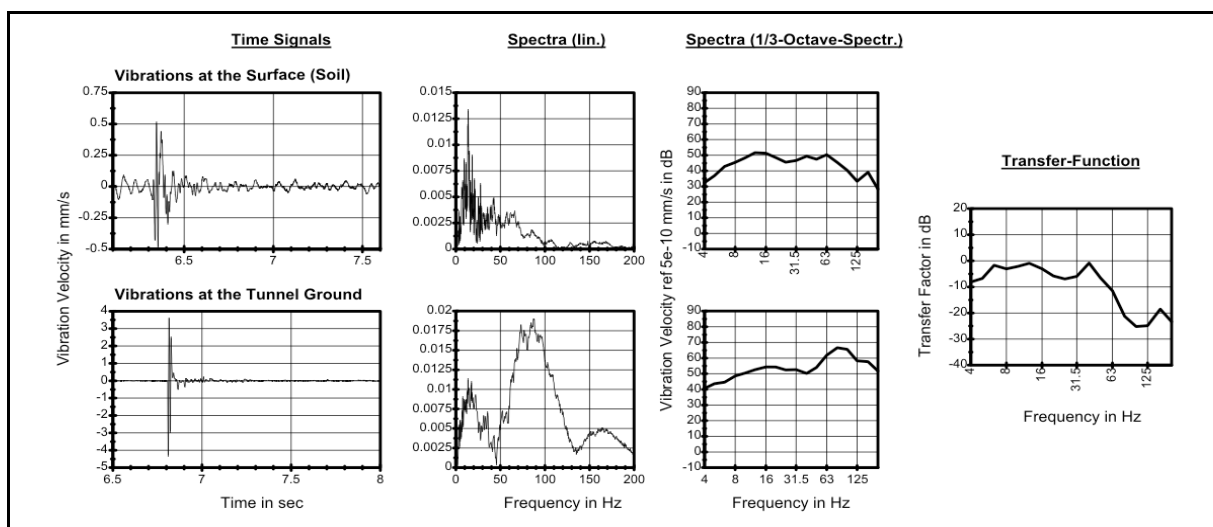


Bild 5: Beispiel für die Berechnung einer Übertragungsfunktionen

6 Immissionsprognose

Die Untersuchungen am Shopping Center lieferten bereits die vollständigen Übertragungsfunktionen Tunnel \rightarrow Geschosdecken, da die Messungen dort auf mehreren Deckenfeldern des fertigen Gebäudes vorgenommen werden konnten. Für die Bebauung entlang der übrigen Tunnelstrecke war diese Vorgehensweise nicht anwendbar, weil die Vielzahl unterschiedlicher Geschosdecken in den Wohngebäuden des östlichen Streckenabschnittes einen unverträglich hohen Messaufwand bedeutet hätte und darüber hinaus die Gebäude im nördlichen Streckenabschnitt noch gar nicht fertiggestellt waren. Die in diesen Streckenabschnitten ermittelten Übertragungsfunktionen Tunnel \rightarrow Baugrund wurden daher mit weiteren Transferfunktionen beaufschlagt. Letztere beschreiben die Weiterleitung der Schwingungen vom Baugrund auf Geschosdecken, wobei zwischen Holzbalken- und Stahlbetondecken unterschieden wird. Die Übertragungsfunktionen Baugrund \rightarrow Decken sind im Mittel

aus einer großen Menge von Untersuchungen hervorgegangen und werden u.a. von der DB AG zur Schwingungs- und Sekundärluftschallprognose empfohlen [1]. Ihre Anwendung liefert keine deterministischen Ergebnisse für einzelne Deckenfelder. Die Praxis zeigt jedoch, dass sie statistisch eine sehr zuverlässige Eingrenzung der Schwingungsimmisionen ermöglichen. Das Besondere an dieser Art der Immissionsprognose ist, dass man bei der Beaufschlagung der Schwingungsanregung mit dem Ergebnis der beiden aufsummierten Übertragungsfunktionen die Berechnungen mehrfach wiederholt und dabei das Maximum der Übertragungsfunktion über der Frequenzachse im Bereich der praktisch vorkommenden Deckenresonanzen verschiebt. Verwendet wird letztlich nur das Ergebnis mit den größten Schwingstärken und Sekundärluftschallpegeln. Auf diese Weise erhält man eine „worst-case-Prognose“, die auch den Resonanzfall berücksichtigt.

Die Deckenschwingungen wurden mit Anregungsfunktionen für unterschiedliche Tramtypen und für die in Frage kommenden Gleissysteme mit und ohne Dämmung berechnet. Im Ergebnis war festzustellen, dass mit einem ungedämmten Oberbau im Tunnel zwar gerade noch eine Einhaltung der Anhaltswerte der DIN 4150-2 in den Anliegerbauten möglich gewesen wäre, jedoch die mittleren Maximalwertpegel des sekundären Luftschalls auf unverträgliche 57 dB(A) in den nächstgelegenen Wohnungen und 69 dB(A) im Shopping Center angestiegen wären. Emissionsmindernde Maßnahmen waren somit notwendig.

7 Dimensionierung des Leichten-Masse-Feder-Systems (LMFS)

Bestandteil der Ausschreibung war die Festlegung des im Tunnel einzubauenden Oberbausystems. Dieses sollte als feste Fahrbahn mit Rillenschienenlagerung (RSL) in einer Gleis- tragplatte auf Elastomermatten ausgeführt werden. Die Parameter eines solchen Leichten-Masse-Feder-Systems (LMFS) wurden auf die statischen und dynamischen Eigenschaften hin in einem Dauerbelastungsversuch mit 3 Mio. Lastwechseln getestet. Durch Modellversuche im Labor wurde sichergestellt, dass einerseits die maximal zulässige Schieneneinsenkung von 1,5 mm nicht überschritten wird und andererseits eine ausreichende schwingungsdämmende Wirksamkeit gegeben ist. So zeigt das Bild 6 beispielhaft, wie im Prüflabor die statischen und dynamischen Steifigkeiten der Vergussmasse der RSL bestimmt wurden.

Für die Ermittlung der letztlich benötigten Einfügedämmmaße wurden wiederum FEM-Berechnungen herangezogen. Einerseits wurde ein herkömmlicher Schotteroberbau als elastisch gelagerter Balken abgebildet. Andererseits erfolgte die Modellierung des elastischen RLS auf dem LMFS durch ein FEM mit zwei Durchlaufträgern (unterer Träger auf Elastomerfederung, oberer Träger auf Ersatzfedern für das RSL). Dabei fanden die in den Belastungsversuchen bestimmten Parameter (Steifigkeit, Dämpfung) Verwendung. Beide Systeme wurden

mit Einheitsimpulsen belastet. Die Differenz der Antworten ergab das theoretische Einfügedämmmaß (EFD). Eine Plausibilitätskontrolle über die Messergebnisse an den untersuchten Krakauer Strecken, mit ungedämmten und LMFS-Oberbau, bestätigte die Anwendbarkeit der berechneten EFD (siehe Bild 7).



Bild 6: Laborversuch

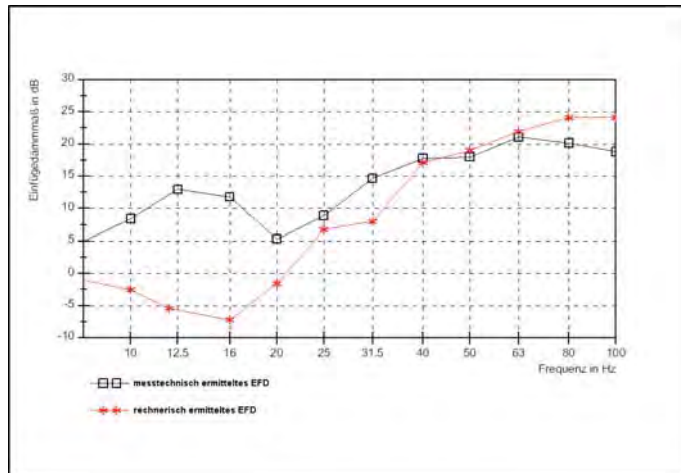


Bild 7: Einfügedämmmaße

Damit konnte rechnerisch nachgewiesen werden, dass der Einbau des LMFS-Oberbau (Polyurethanmatten unter Beton-Gleistragplatten mit RSL) die geforderte Absenkung der Sekundärluftschallimmissionen auf weniger als 40 dB(A) in den Wohnungen und 50 dB(A) im Shopping Center ermöglichen wird.

- [1] Körperschall- und Erschütterungsschutz, Leitfaden für den Planer, Deutsche Bahn AG, Ausgabe August 1996
- [2] Achilles, S; Wettschureck, R.: „Schwingungs- und Sekundärluftschalldämmung an Gleisstrecken“, *Gemeinschaftstagung der Französischen, Schweizerischen und Deutschen Akustischen Gesellschaft (CFA/DAGA '04), Straßburg, März 2004*
- [3] Biskup, M.: „Produkte und Systeme zur Schwingungsisolierung und zum Erschütterungsschutz“, *Seminar Erschütterungen und Erschütterungsschutz, Oberhausen 2008*
- [4] Hebener, H.; Achilles, S.: „Schwingungsdämmung für den Neubau der SAT.1 Zentrale in Berlin“, *Vortragsband der Dreiländertagung DACH 1999, Publikation Nr. 10 der DGEB*
- [5] Richter, Th.: „Erschütterungseinwirkungen aus dem Betrieb von Bahntunneln auf innerstädtische Bebauung, Erfahrungen aus Berliner Projekten“, *1. EFUC-Konferenz 2003, Suderburg, Deutschland*