

ERSCHÜTTERUNGS- UND KÖRPERSCHALLIMMISSIONEN INFOLGE VON SCHIENENVERKEHR

Silke Appel

Müller – BBM GmbH
Niederlassung BFB Stuttgart
Schwieberdinger Straße 62, 70435 Stuttgart
E-mail: Silke.Appel@MuellerBBM.de

1 Einleitung

Im Zuge von neu zu errichtenden Bebauungen in Großstädten kommt es oft aufgrund der Lage von Schienenverkehrswegen im bzw. nahe am Baufeld zur Fragestellung, wie stark die Erschütterungseinwirkungen aus diesen Verkehrswegen auf das zu errichtende Gebäude sind und welche baulichen Anpassungen notwendig werden, um die hohen Immissionsstandards der heutigen Zeit zu erfüllen. So durchschneiden vorhandene Fahrwege die Baufelder und müssen mit freitragenden Konstruktionen überbaut werden. In anderen Bereichen werden die Bauwerke direkt neben bestehenden Tunnelanlagen errichtet. Im Vorfeld der Planungen für Neubauten muss davon ausgegangen werden, dass über den Baugrund eine Weiterleitung der Erschütterungen aus dem Schienenverkehr auf Gründung, tragende Wände und Geschossdecken des geplanten Bauvorhabens erfolgen wird, wobei resonanzbedingte Verstärkungen, vorrangig im Bereich der Deckeneigenfrequenzen, möglich sind. Störungen durch hohe Schwingungs- und Körperschallpegel können ohne nähere Prüfung nicht ausgeschlossen werden. Die Untersuchungen bzgl. der zu erwartenden Schwingungsimmissionen beinhalten folgende Punkte:

- Schwingungsmessungen auf dem Baufeld (Freifeld),
- Anwendung messtechnisch unterlegter, empirischer oder numerischer Verfahren,
- Dimensionierung und Umsetzung von Dämmmaßnahmen

Generell besteht die Möglichkeit, höherfrequente Schwingungsanteile der Emission direkt am Fahrweg, z.B. durch den Einbau von Unterschottermatten, zu reduzieren. Ist die Schwingungsdämmung an der Quelle aus baupraktischen oder anderen Gründen nicht möglich, müssen die Schwingungen im Bereich des Empfängers, d.h. direkt am Bauwerk reduziert werden. Die elastische Gebäudelagerung stellt hier eine in der letzten Zeit immer häufiger angewendete Praxis dar. Schwingungsmindernd wirksam ist die elastische Gebäudelagerung jedoch nur, wenn:

- die Prognose der Schwingungsimmissionen in die geplanten Neubauten zuverlässige Werte liefert
- die Dimensionierung bzw. Auslegung der elastischen Elemente alle wesentlichen Aspekte zur Bestimmung der Dämmwirkung

Anhand von Projektbeispielen der jüngeren Vergangenheit werden folgend die genannten Aspekte näher erläutert und diskutiert.

2 Erschütterungsprognose

2.1 Generelle Vorgehensweise

Das nachfolgende Schema verdeutlicht die generelle Vorgehensweise zur Erstellung einer Prognose von Gebäudeschwingungen unter Anregung aus dem Schienenverkehr.

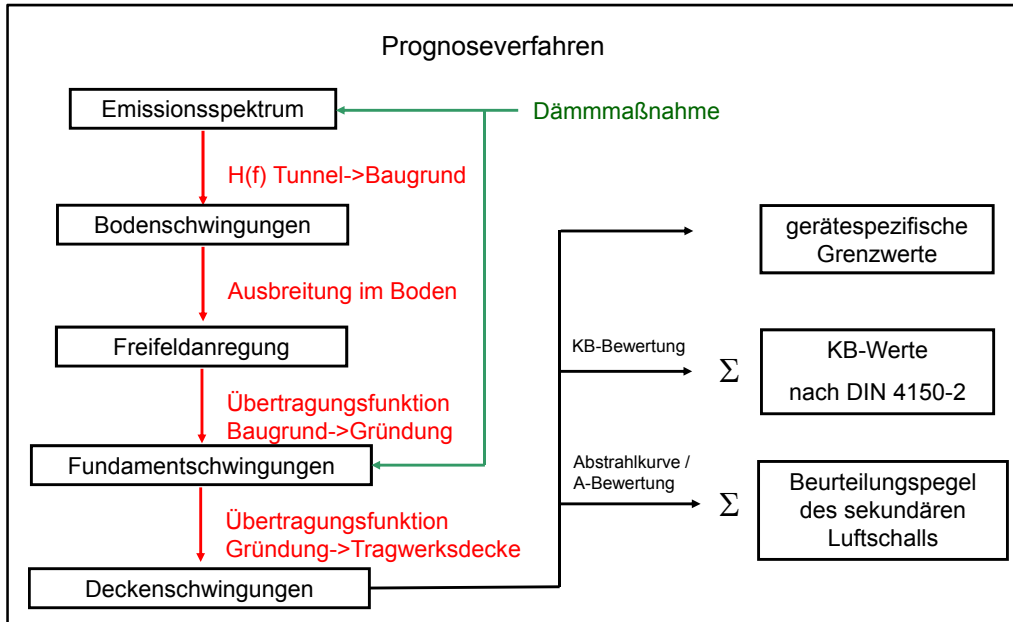


Abbildung 1: generelles Vorgehen zur Erstellung einer Immissionsprognose

Ausgehend von Emissionsspektren, erfasst i.d.R. an der Tunnelwand, können über empirische oder messtechnisch erfasste Übertragungsfunktionen die Boden- und folgend die Bauteilschwingungen prognostiziert werden. Anhand der berechneten Schwingungen von Geschossdecken werden die Beurteilungswerte für die spürbaren Erschütterungen (KB-Werte) und der sekundären Luftschallpegel abgeschätzt und bewertet. Im Falle einer Überschreitung normativer oder spezifischer Anhalts- und Richtwerte müssen Minderungsmaßnahmen erarbeitet und dimensioniert werden.

2.2 Prognose der Emission

Für die Anwendung von Prognoseverfahren ist die Kenntnis der vom Schienenverkehr ausgehenden Emissionen, d.h. der Erschütterungen im Baugrund erforderlich. Im Zuge der Durchführung von Schwingungsmessungen im Baugrund sollte eine statistisch gesicherte Anzahl von Zugüberfahrten zur Verfügung gestellt werden. Sofern mit vertretbarem Aufwand möglich, empfiehlt es sich, Überfahrten eines kompletten Wagenumschlufs messtechnisch zu erfassen. Die Frequenzinhalte einer Schwingungsanregung aus Schienenverkehr sind nicht nur abhängig von der Zuggeschwindigkeit sondern auch vom Zustand des rollenden Materials sowie der Gleislagen. Unterschiedliche Wagentypen mit verschiedenen Achslasten und Achsabständen können zu sehr verschiedenen Anregungsfrequenzen führen. Für Schienenverkehr des öffentlichen Nahverkehrs sind i.d.R. zwei maßgebliche Bereiche der Schwingungsanregung relevant [1]:

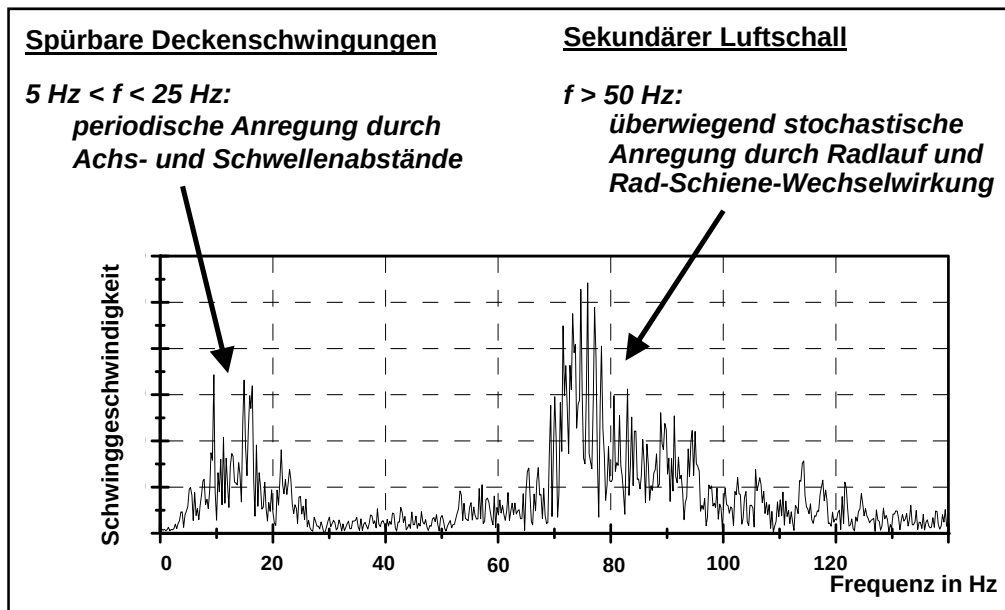


Abbildung 2: Typisches Anregungsspektrum infolge Schienenverkehrs

Für Bauvorhaben mit einer relativ geringen Gründungstiefe können zur Erfassung der Schwingungsanregung Messprofile, bestehend aus einer Anordnung von Schwingungssensoren auf der Baugrundoberfläche, mit unterschiedlichen Abständen zur Anregungsquelle, ausgelegt werden. Für tiefer gegründete Bauwerke sollten zur Bestimmung der Anregungsfunktionen Bohrungen bis in Gründungstiefe abgeteuft und die Messaufnehmer auf der Bohrlochsohle installiert werden. Ziel sollte es sein, die Erschütterungen immer auf Höhe der geplanten Gründungssohle zu erfassen, da die Frequenzanteile der Schwingung über die Tiefe sich stark unterscheiden und folgend fehlerhafte Prognosen erstellt werden können. Dieser Effekt wird im Folgenden anhand eines Bauvorhabens in Berlin verdeutlicht.

Ein Neubau, geplant mit einem Tiefgeschoss und 5 Obergeschossen, sollte direkt neben einem U-Bahntunnel erstellt werden. Die Überdeckung des U-Bahntunnels ist gering, sodass die Tunnelsohle nur ca. 2 m unterhalb der Bauwerkssohle liegt. Eine weitere Anregungsquelle stellte eine unmittelbar neben dem Baugrundstück verlaufende Straßenbahnstrecke dar. Der Neubau wird demzufolge gleichzeitig von unterirdischem und oberirdischem Schienenverkehr beeinflusst. Für eine erste Prognose der zu erwartenden Schwingungsimmersionen wurden Erschütterungsmessungen an der Geländeoberfläche (Höhe Erdgeschoss) vorgenommen. Nach Baugrubenaushub erfolgte eine weitere Schwingungsmessung. Die Schwingungsaufnehmer wurden an vergleichbaren Punkten auf der Baugrubensohle, ca. 4m unter Geländeoberkante (GOK), installiert. Darüber hinaus wurde bei beiden Messungen ein Referenzaufnehmer zur Erfassung der Schwingungsanregung an einem bestehenden Nachbargebäude installiert. Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der erfassten Schwingungsregistrierungen, bezogen auf den Referenzmesspunkt, sowohl für die Anregung aus dem unterirdischen als auch oberirdischen Schienenverkehr.

Die Darstellung verdeutlicht, dass die Schwingungsanregung starke Veränderungen bzgl. der wesentlichen Frequenzanteile erfährt. Während die tieferen Frequenzanteile der Baugrundschrwingungen auf der Baugrubensohle um 5-10 dB geringer ausfallen, werden die Erschütterungen im Frequenzbereich über 50 Hz gegenüber den Messungen in Höhe der GOK verstärkt. Werden die Messungen an der GOK für die Prognose zugrunde gelegt, ist von einer Überbewertung der prognostizierten spürbaren Deckenschwingungen und einer Unterbewertung der sekundären Luftschallpegel auszugehen.

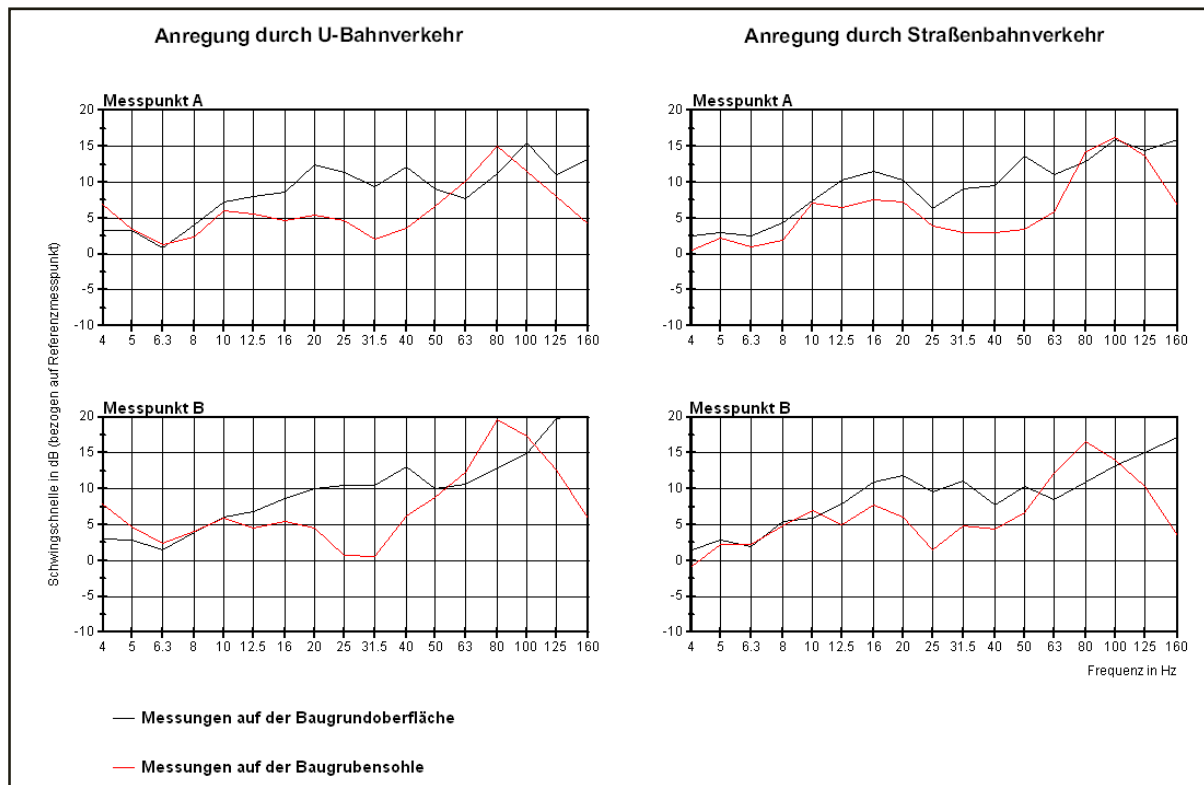


Abbildung 3: BV in Berlin, Vergleich der Messergebnisse an der Geländeoberkante und nach Baugrubenaushub auf Gründungsniveau

Am Beispiel des beschriebenen Bauvorhabens wird ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Auswahl von Messpunkten deutlich. Es sollten nicht nur Messpunkte installiert werden, deren Registrierungen in den folgenden Bearbeitungsschritten unmittelbar in die Prognose eingehen, sondern, sofern möglich, auch Referenzmesspunkte berücksichtigt werden. Diese können die Schwingungsanregung an bereits bestehenden Bauwerken erfassen und sollten nach Möglichkeit nahe der Erschütterungsquelle installiert werden. So können Sekundäreffekte aus weiteren Anregungsquellen erkannt und innerhalb der Prognoseberechnungen berücksichtigt werden. Bei unterirdischem Schienenverkehr bieten sich Messpunkte an der Tunnelwand an, ansonsten können sowohl bestehende Gebäudegründungen als auch Baugrubenwände genutzt werden. Die Messwertregistrierungen dieser Messpunkte können für spätere Vergleichsmessungen, z.B. im fertiggestellten Gebäude, oder zur Beurteilung der Wirksamkeit einer schwingungsmindernden Maßnahme herangezogen werden.

2.3 Prognose der Immission

2.3.1 Empirische Prognoseverfahren

Für die Prognose von Deckenschwingungen werden neben der Kenntnis der Freifeldanregung funktionale Zusammenhänge zum Übertragungsverhalten von Bauwerken benötigt. Beim Übergang der Schwingungen vom Baugrund auf das Fundament des Gebäudes verändern sich sowohl deren Frequenzinhalte als auch die Schwingungsamplituden. Im Bereich der Bauwerks-Boden-Eigenfrequenz kommt es zu einer Verstärkung und somit zu einer Erhöhung der Schwingungsamplituden. Aufgrund der geometrischen Ausdehnung von Bauwerksgründungen, insbesondere bei Plattengründungen, ist die Dämpfung jedoch so hoch, dass die Schwingungsamplituden

moderat, lediglich um einen Faktor von ca. $F = 1,2 \dots 1,5$ verstärkt werden. Im höheren Frequenzbereich werden die Schwingungsamplituden dagegen vermindert. Lediglich im Bereich von Biegeeigenfrequenzen der elastisch auf dem Baugrund gelagerten Fundamentplatte sind lokal Amplitudenverstärkungen möglich. Die Fundamentschwingungen werden über die aufgehenden Wände auf die Geschossdecken übertragen. Je nach Abmessungen und Aufbau der Tragwerksdecken liegen typische Deckeneigenfrequenzen zwischen 10...30 Hz. Die zugehörigen Eigenformen sind nur gering gedämpft (1-3%). Dadurch werden die Schwingungsamplituden der Geschossdecken im Vergleich zu den Fundamentschwingungen im Bereich der Deckeneigenfrequenzen deutlich verstärkt. Vergrößerungsfaktoren von $F = 5-10$ können hier auftreten. Auch im Bereich höherer Eigenfrequenzen treten Amplitudenverstärkungen auf. Diese fallen jedoch aufgrund der i.d.R. höheren Dämpfung deutlich geringer aus. Die Schwingungsantworten der Tragwerksdecken $v(f)_{\text{Decke}}$ können näherungsweise aus der Multiplikation der Übertragungsfunktionen $H(f)$ und der Baugrundschiebungen $v(f)_{\text{Baugrund}}$ errechnet werden:

$$v(f)_{\text{Decke}} = H(f)_{\text{Baugrund} \rightarrow \text{Gründung}} \cdot H(f)_{\text{Gründung} \rightarrow \text{Decke}} \cdot v(f)_{\text{Baugrund}}$$

$$v(f)_{\text{Decke}} = H(f)_{\text{Baugrund} \rightarrow \text{Decke}} \cdot v(f)_{\text{Baugrund}}$$

Insbesondere in frühen Planungsstadien, wenn noch keine, oder nur schematische Tragwerkspläne vorliegen, sind die Deckeneigenfrequenzen nicht bekannt. Um dennoch Orientierungswerte für die zu erwartenden Immissionen zu erhalten, werden empirisch ermittelte Übertragungsfunktionen genutzt. Bei der Anwendung eines Prognoseverfahren, dessen Grundlagen von der Deutschen Bahn AG in einem „Leitfaden für den Planer zum Körperschall- und Erschütterungsschutz“ [2] beschrieben sind, werden die durch Schwingungsmessungen ermittelten Emissionsspektren mit pauschalen Funktionen nach [2] beaufschlagt. Das Verfahren berücksichtigt die Bauwerksbeschaffenheit nur insofern, als dass nach Stahlbeton- oder Holzbalkendecken und nach Anzahl der Geschosse unterschieden wird. Es werden spektrale Übertragungsfunktionen angegeben, die im Mittel aus einer Vielzahl von Erschütterungsmessungen bestimmt wurden und die Schwingungsübertragung vom Baugrund auf die betroffenen Geschossdecken beschreiben.

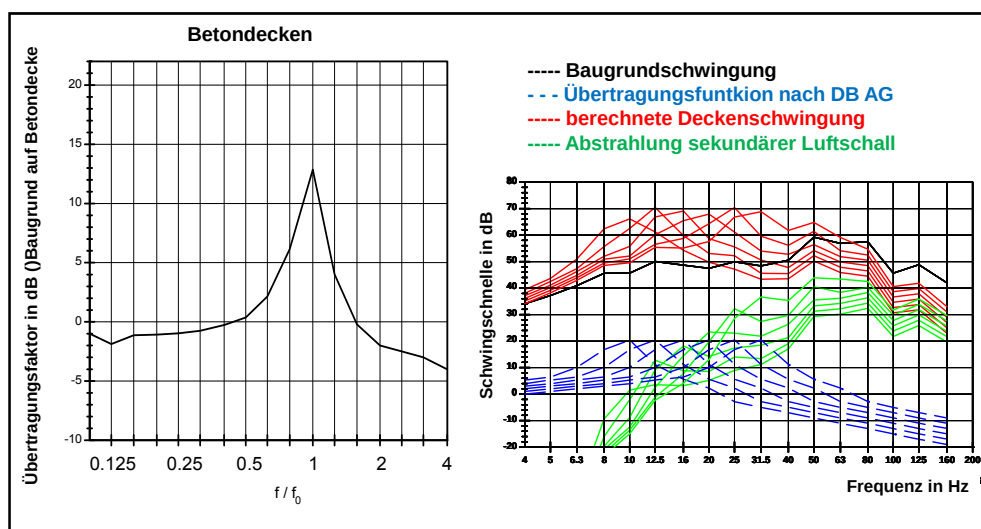


Abbildung 4: pauschales Prognoseverfahren nach Empfehlungen der DB AG

Die Übertragungsfunktionen $H(f)$ werden dabei so variiert, dass mögliche Struktureigenfrequenzen, insbesondere Deckeneigenfrequenzen, in den Terzbändern zwischen 10 Hz und 31,5 Hz mit den Maximalverstärkungen berücksichtigt werden. Die

Berechnungen werden mehrfach durchgeführt, wobei die verwendete Übertragungsfunktion jeweils um eine Terz verschoben wird. Verwendet wird letztendlich nur die Berechnung, welche die höchsten Immissionswerte liefert. Auf diese Weise wird in die Prognoseberechnungen immer der „worst case“ einbezogen, d.h. die näherungsweise Übereinstimmung der Intensitätsmaxima der Anregung mit relevanten Deckenresonanzen. Aus den Spektren der so erhaltenen Deckenschwingungen können in einem nächsten Berechnungsschritt, unter Berücksichtigung stochastischer Zusammenhänge und einer Raumschallkorrektur, wie in [3] angegeben, Prognosewerte für die bewerteten Schwingstärken auf den Fußböden (KB-Werte) und für Sekundärluftschallpegel in Innenräumen abgeleitet werden.

2.3.2 Messtechnische Bestimmung der Übertragungsfunktionen

Die Stuttgarter Straßenbahn AG plante für die Landeshauptstadt Stuttgart eine Erweiterung ihres Stadtbahnnetzes. Der Neubau des 26. Streckenabschnittes der U6 sollte den Stadtteil Fasanenhof in einer Tunnelstrecke unterqueren. Zur Prognose der Schwingungsübertragung in die umliegende Bebauung mussten nachfolgende Übertragungsfunktionen bestimmt werden:

1. Übertragungsfunktion Tunnel->Baugrund
2. Übertragung Baugrund ->Bauwerksgründung->Tragwerksdecken

Die Übertragung der vom Zugverkehr ausgehenden Erschütterungen vom Tunnel auf den freien Baugrund konnte im vorliegenden Fall zunächst nur durch Annahmen bzw. anhand von Erfahrungen und Messdaten vergleichbarer Projekte abgeschätzt werden. Zur pauschalen Bestimmung der Schwingungsübertragung vom Boden über die Gründung auf die Tragwerksdecken standen die unter Kapitel 2.3.1 beschriebenen empirisch ermittelten Übertragungsfunktionen zur Verfügung.

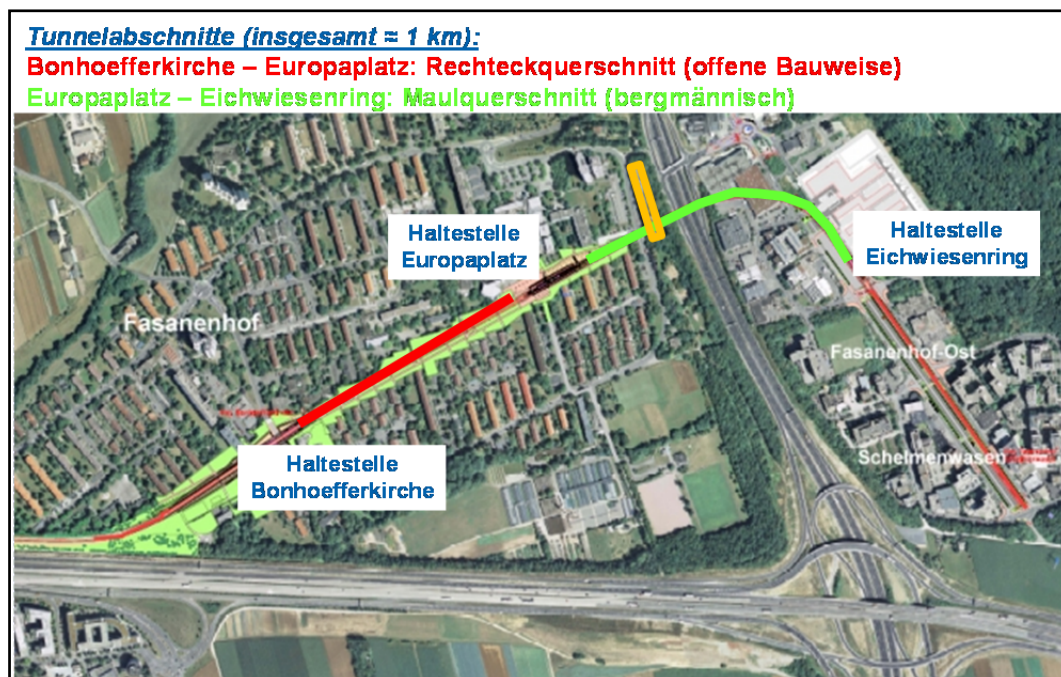


Abbildung 5: BV U6 Fasanenhof in Stuttgart, Übersicht über den Verlauf des 26. Streckenabschnittes der U6, (maps.google.de)

In verschiedenen Phasen der Fertigstellung des Straßenbahntunnels wurden dann jedoch Schwingungsmessungen zur Überprüfung dieser Schwingungsübertragung, jeweils unter definierter Anregung, durchgeführt. Die Schwingungsanregung wurde mit einem dynamischen Unwuchterreger erzeugt. Damit war es möglich, in einem Frequenzbereich zwischen 5 Hz und max. 110 Hz eine definierte Kraftanregung in die Tunnelsohle einzuprägen. Gleichzeitig wurden die daraus resultierenden Tunnelwandschwingungen sowie die Gebäudereaktionen messtechnisch erfasst.

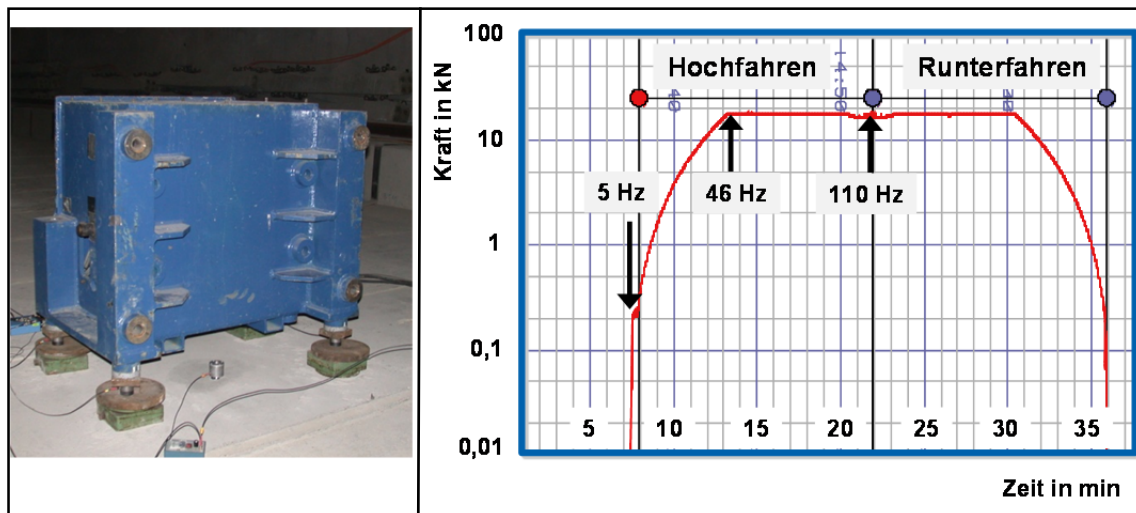


Abbildung 6: BV U6 Fasanenhof in Stuttgart, Durchführung von Schwingungsmessungen mit dem Unwuchterreger Dynaq® im Rohbautunnel zur Bestimmung von Übertragungsfunktionen Tunnel->Gebäude

Anhand der messtechnisch überprüften Übertragungsfunktionen konnte die Prognoseberechnung verifiziert bzw. modifiziert und folgend vorgeschlagene Dämmmaßnahmen konkretisiert werden. Im Frequenzbereich unter 25 Hz erfolgte eine Korrektur der Übertragungsfunktion, da die in den Gebäuden gemessenen Schwingungen in diesem Frequenzbereich stark vom Straßenverkehr überlagert wurden.

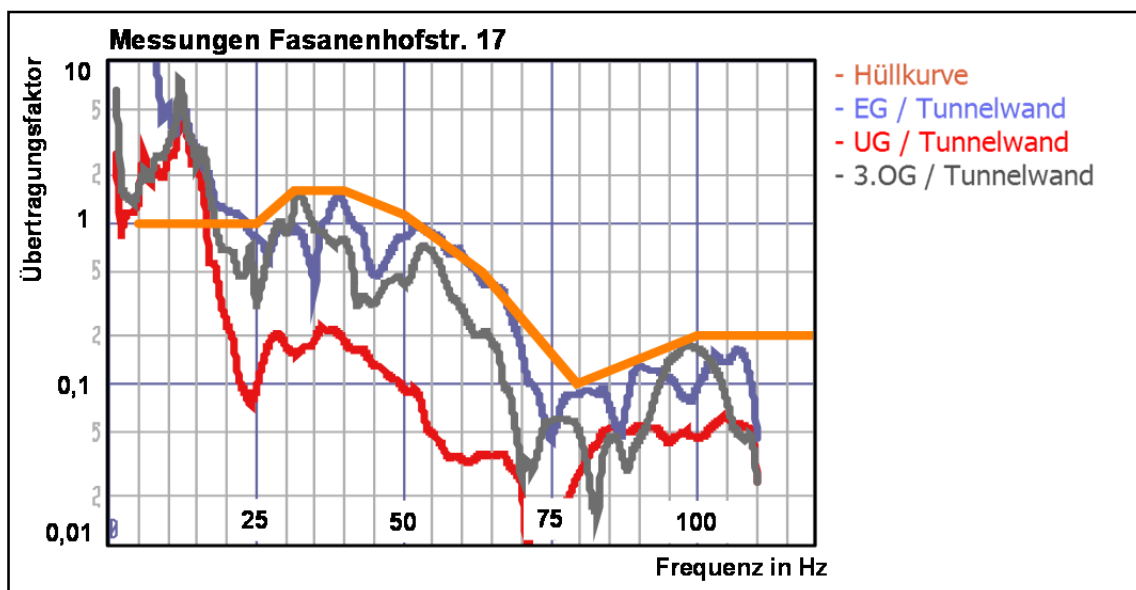


Abbildung 7: BV U6 Fasanenhof in Stuttgart, Verifikation der Prognoseergebnisse anhand der Messergebnisse bei künstlicher Anregung im Rohbautunnel

2.3.3 Numerische Prognoseverfahren

Liegen die Prognosewerte nach dem Verfahren mit den pauschalen Übertragungsfunktionen oberhalb der zulässigen Anhaltswerte oder sind die Beurteilungswerte stark abhängig von möglicherweise auftretenden Resonanzerscheinungen der Tragwerksdecken, wird eine verfeinerte Prognose unter Einbeziehung der tatsächlichen Tragwerksstruktur erforderlich.

Reduzierte Modelle, wie z.B. Mehr-Massen-Schwinger- [4] oder ebene Modelle [5] bieten den Vorteil einer relativ geringen Anzahl von Freiheitsgraden und damit kürzerer Rechenzeiten als für 3D-Modelle. Durch die Reduktion auf einzelne Bauteile (z.B. Deckenfelder) bzw. ausgesuchte Schnittdarstellungen besteht jedoch die Gefahr, dass wesentliche Effekte der Schwingungscharakteristik übersehen oder unterdrückt werden. Um die wesentlichen dynamischen Effekte erfassen zu können, erfordert die teilweise sehr starke Idealisierung vereinfachter Berechnungsmodelle unter Umständen einen sehr hohen ingenieurtechnischen Aufwand für deren Erstellung. Bei dreidimensionalen Modellen ist die Abbildung zwar umfassender, durch die hohe Anzahl von Knotenpunkten im Modell ist der Berechnungsaufwand jedoch ungleich größer. In Summe kann die Bearbeitungszeit für die Erstellung räumlicher Systeme jedoch durchaus ähnlich zu dem reduzierter Systeme sein.

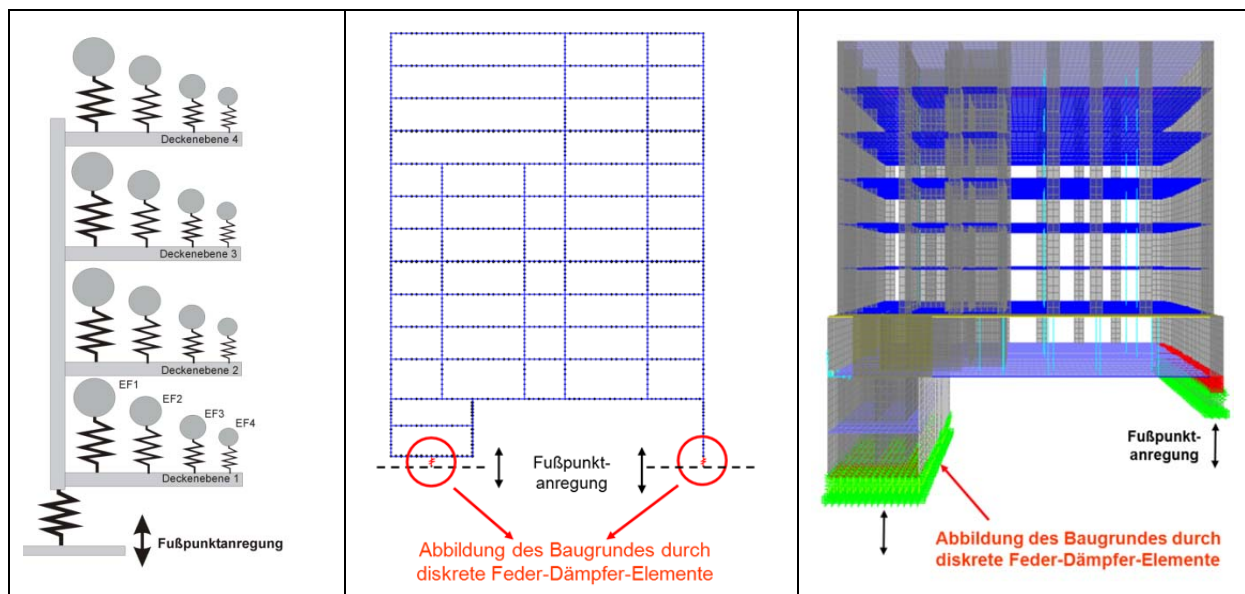


Abbildung 8: Modelle für strukturdynamische Berechnungen:

links: Mehr-Massen-Schwinger-Modell;

Mitte: ebenes Modell; rechts: 3D-Modell

Bezüglich der Abbildung des Baugrundes gibt es ebenfalls Einschränkung für die unterschiedlichen Modelle. Für Mehr-Massen-Schwinger-Modelle wird die gesamte Baugrundbettung i.d.R. durch eine einzige komplexe Ersatzfeder berücksichtigt. Diese kann frequenzabhängig angegeben werden. Eine Berücksichtigung der Elastizität der Fundamentplatte ist nicht möglich. Auch die Angabe von Phasenverschiebungen innerhalb der Anregung ist ausgeschlossen.

Für ebene Systeme stellt sich die Frage, inwieweit die Baugrunddämpfung realistisch berücksichtigt werden kann. Hier reduziert sich die eigentlich dreidimensionale geometrische Abstrahlung auf eine Fläche. Bei ebenen Modellen mit diskreten Ersatzfedern müssen Federsteifigkeit und Dämpfung so angepasst werden, dass das Verhältnis von Masse zu Steifigkeit und auch Masse zu Dämpfung gewahrt bleibt.

Dreidimensionale Modelle mit angeschlossenem Halbraum können Federsteifigkeit und Dämpfung dagegen realistisch berücksichtigen. Die Abbildung erfordert jedoch eine sehr feine Elementierung und damit eine hohe Zahl an Freiheitsgraden, zumindest im Bereich der Ankopplung der Struktur an den Halbraum. Für Modelle mit diskreten Ersatzfedern muss, ähnlich zu den 2D-Modellen, eine entsprechende Übertragung der Ersatzgrößen erfolgen. Diese ist abhängig von der Elastizität der Fundamentplatte, von der Baugrundsteifigkeit, von der Massenbelegung der Fundamentplatte durch das aufgehende Bauwerk und auch von der Art der Anregung.

Als Schwingungsanregung kommen im numerischen Modell Amplitudenspektren, für Berechnungen im Frequenzbereich, oder Zeitverläufe des Schwingweges, für Berechnungen im Zeitbereich, in Frage. Die mittels Schwingungsmessungen erfassten Baugrundschiebungen stellen die Freifeldverschiebung dar. Das heißt, die Bodenreaktion, die der Baugrund aufgrund der Anregung des Schienenverkehrs die Randbedingung durch das Bauwerk erfährt. Nach Holzlöhner [7] ist die Freifeldbewegung nicht mehr synchron, wenn die Wellenlängen λ der sich unter dem Fundament eines Bauwerks ausbreitenden Bodenwellen in der Größe der Sohlflächenlänge liegen. Durch die Mittelung der Freifeldverschiebungen werden die Anteile der kleineren Wellenlängen abgemindert. Große Sohlflächen wirken somit als Tiefpassfilter.

Für Berechnungen mit 3-dimensionalen Modellen bieten sich Verfahren zur Berechnung von Übertragungsfunktionen Baugrund->Bauteilschwingung an. Dann kann im Zuge der Auswertung die Ermittlung der eigentlichen Schwingungsantworten $v(f)_{\text{Bauteil}}$ durch Faltung bzw. Multiplikation der Übertragungsfunktionen mit verschiedenen Anregungsfunktionen im Zeit- und Frequenzbereich erfolgen.

Zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen $H(f)$ muss eine Anregung gefunden werden, die den maßgeblichen Frequenzbereich (0-200 Hz) erfasst. Während für Berechnungen im Frequenzbereich das Einheitsspektrum verwendet werden kann, sind für Berechnungen im Zeitbereich mehrere Funktionen möglich:

- Einheitsimpuls
- Weißes Rauschen
- Sweep-Funktion

Aufgrund der nur gering gedämpften Eigenfrequenzen der Tragwerksdecken empfiehlt es sich nicht, die Prognoseberechnungen im linearen Frequenzbereich, d.h. durch Berechnung von Schmalbandspektren durchzuführen. Nicht zu vermeidende Abweichungen bzgl. der durch die FE-Abbildung (Geometrie, Einspannverhältnisse und Materialparameter) bedingten Verschiebung der Deckeneigenfrequenzen um 1-2 Hz können bei stark harmonischen Anteilen der Anregung zu grundsätzlich anderen Ergebnissen führen. Bei typischen Anregungen aus Schienenverkehr liegen über einzelne Terzen breitbandige Anregungen vor. Daher genügt es hier, die Anteile in diesen Frequenzbändern zusammenzufassen.

3 Minderungsmaßnahmen

3.1 Maßnahmen am Gleis

Eine wirksame und auch effektive Methode zur Minderung der eingetragenen Gebäudeschwingungen stellt die Schwingungsdämmung an der Quelle, d.h. am Gleisoberbau dar. Eine solche Dämmung wird i.d.R. durch den Einbau elastischer Materialien vorgenommen. Das Einfügedämmmaß (EFD), definiert als die Reduktion der Schwingungsemission durch die erfolgte Dämmmaßnahme, ist abhängig von der Geometrie, der Lage und der Beschaffenheit des Fahrweges, dem Gleisaufbau, den Achsenlasten des Zuges sowie von der Materialbeschaffenheit und Anordnung der elastischen Komponente. Möglichkeiten zur Schwingungsminderung am Gleis (Abbildung 9) sowie erreichbare Dämmwirkungen in Tunnelstrecken können wie folgt zusammengefasst werden:

- elastische Schienenlager: $\text{EFD} < 10 \text{ dB}$ für Frequenzen $f > 50 \text{ Hz}$
- besohlte Schwellen: $\text{EFD} < 15 \text{ dB}$ für Frequenzen $f > 30 \text{ Hz}$
- Unterschottermatten $\text{EFD} = 8 - 30 \text{ dB}$ für Frequenzen $f > 25 \text{ Hz}$
- Masse-Feder-Systeme: $\text{EFD} = 10 - 30 \text{ dB}$ für Frequenzen $f > 15 \text{ Hz}$

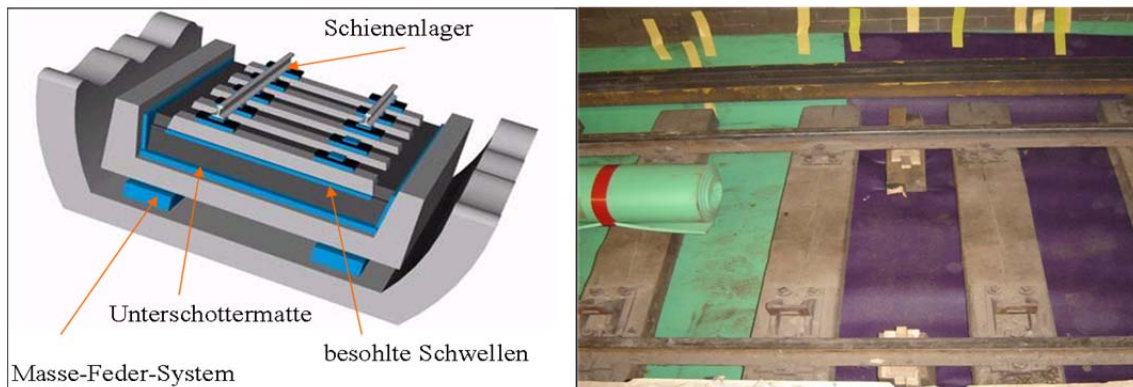


Abbildung 9: Möglichkeiten der Anordnung elastischer Elemente (links), Einbau von Unterschottermatten in einem S-Bahntunnel in Berlin (zweilagig, rechts)

Generell gilt, je weiter oben im Gleisaufbau die Anordnung der elastischen Elemente erfolgt, desto geringer fällt aufgrund fehlender Masse, bei gleichzeitiger Beschränkung der maximal zulässigen Schieneneinsenkung, die resultierende Schwingungsminderung aus. Für den bereits vorgestellten untersuchten Tunnelabschnitt der U6 wurden entsprechend der Anforderungen an den Schwingungsschutz Bereiche mit Masse-Feder-Systemen und einzubauenden Unterschottermatten festgelegt.

Durch die gezielte Anregung des fertig gestellten Fahrbahntroges für das Masse-Feder-System konnte darüber hinaus das Eigenschwingverhalten der Betonfertigteile des Troges überprüft werden. Die messtechnischen Versuche zeigten, dass zwischen 45 und 55 Hz ein massiver Einbruch der Dämmwirkung durch das Masse-Feder-System zu verzeichnen war. Grund hierfür war eine angeregte Biegeeigenfrequenz des Betontroges. Die zugehörige Biegeeigenform des Trogbalkens konnte anhand einer Finiten-Element-Berechnung nachvollzogen werden (siehe Abbildung 11, oberes Bild).

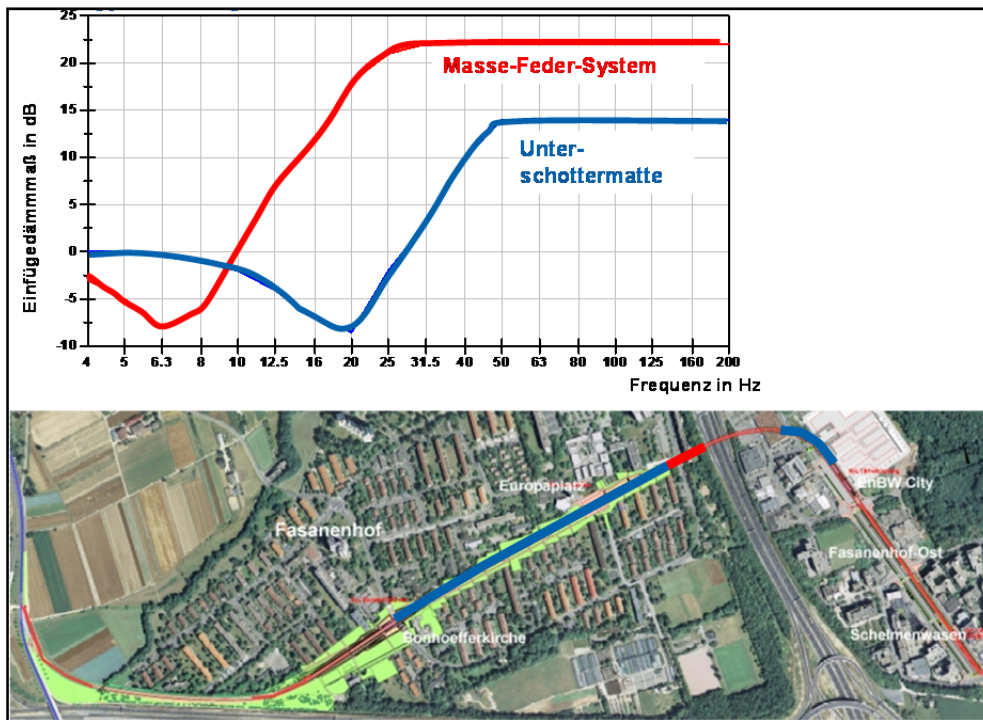


Abbildung 10: BV U6 Fasanenhof in Stuttgart, Maßnahmen zur Schwingungsminderung

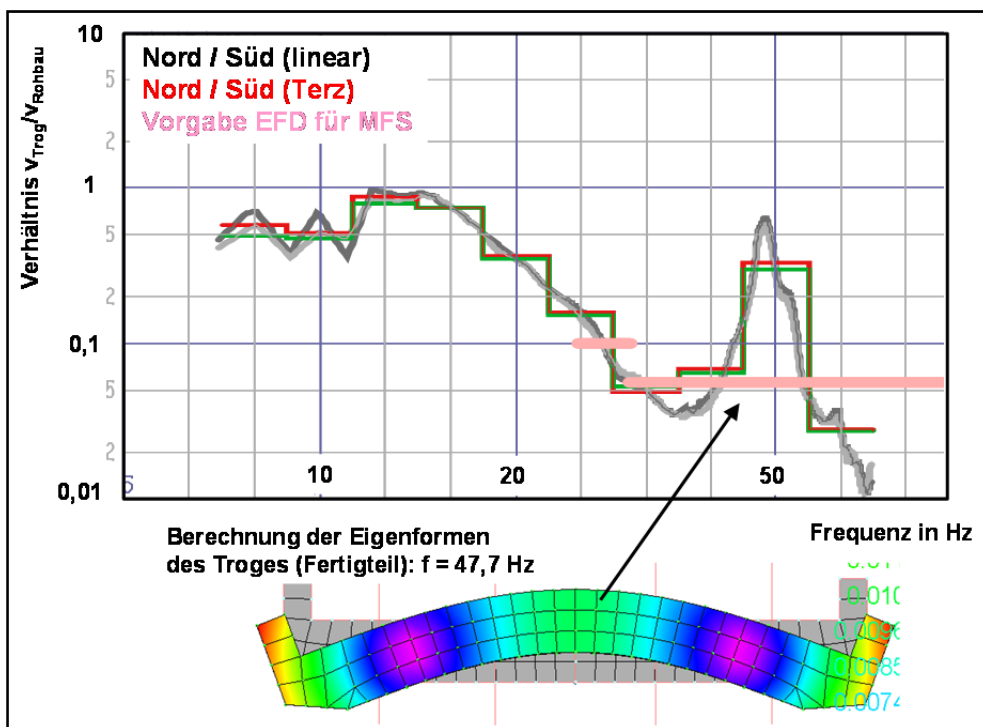


Abbildung 11: BV U6 Fasanenhof in Stuttgart,
oben: Darstellung des Verhältnisses der Schwingungsantworten bei Anregung auf dem elastisch gelagerten Trog / Anregung auf der Tunnelsohle,
unten: Berechnung der Biegeeigenfrequenzen des Troges anhand eines FE-Modells

Zum Zeitpunkt der Messungen auf dem Trogbalken konnte davon ausgegangen werden, dass diese Resonanzanteile zwischen 45 Hz und 55 Hz, infolge der Biegeeigenschwingungen des Trogbalkens, durch den noch zu installierenden Gleisaufbau (mit Schotter, Schwellen und Schienen) maßgeblich bedämpft werden. Darüber hinaus wurde der Unwuchterreger in der Mitte des Troges aufgestellt, sodass die erste Eigenform optimal angeregt wurde. Die montierten Schienen wurden jedoch in Höhe der Nulldurchgänge der Eigenform montiert, sodass nicht davon auszugehen war, dass diese erste Platteneigenfrequenz bzw. –eigenform durch den Zugverkehr maßgeblich angeregt wird.

Die folgenden Messungen unter künstlicher Anregung auf dem fertig gestellten Gleis bestätigten diese Annahme. Die Abbildung 12 beinhaltet eine Gegenüberstellung der messtechnisch ermittelten und im Zuge der Prognoseberechnungen geforderten Dämmwirkung des Masse-Feder-Systems. Die registrierten Tunnelwandschwingungen sind aufgrund des erfolgten Gleisaufbaus (Schotter, Schwellen, Schienen, siehe schwarze Kurve) im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen mit Kraftanregung direkt auf dem Trog (Kurve mit Symbol Dreieck) bei vergleichbarer Schwingungsanregung durch den Dynaq® in einem weiten Frequenzband geringer geworden. Nur im Frequenzbereich zwischen 25 Hz und 40 Hz wurden geringfügig höhere Schwingungsamplituden bei vergleichbarer Anregung verzeichnet.

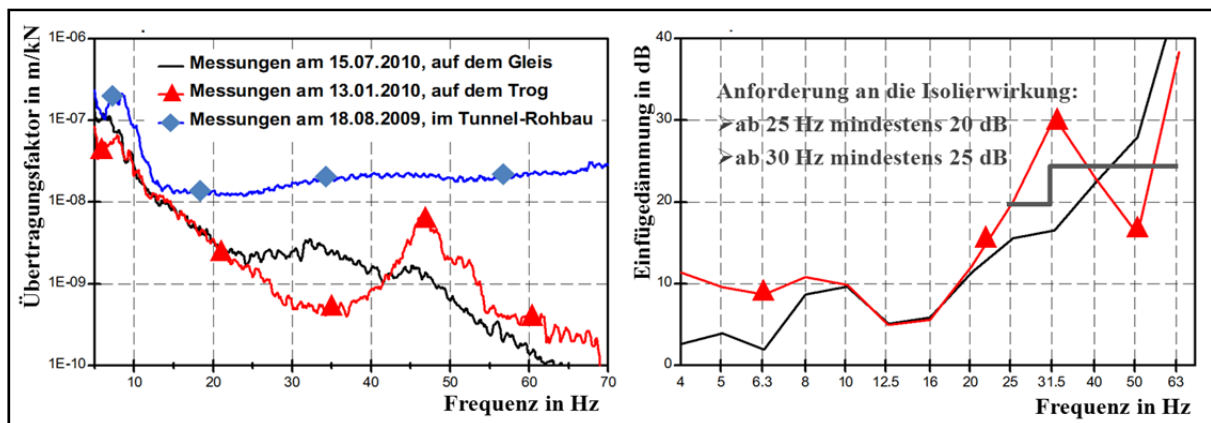


Abbildung 12: Messtechnisch ermittelte Einfügedämmmaße für das Masse-Feder-System

Die Resonanzanteile zwischen 45 Hz und 55 Hz werden infolge der Biegeeigenschwingungen des Trogbalkens durch den Gleisaufbau maßgeblich bedämpft. Darüber hinaus hatten sich die Eigenfrequenzen des durch die zusätzliche Masse belasteten Trogbalkens in Richtung tieferer Frequenzen verschoben. Der als kritisch zu betrachtende Einbruch in der Dämmwirkung bei ca. 50 Hz trat somit nicht mehr auf. Die geforderte Dämmwirkung (schwarze Kurve im rechten Diagramm) konnte im Zuge dieser Messungen dennoch nicht ganz nachgewiesen werden. Durch die Verschiebung der Eigenfrequenz infolge der zusätzlichen Massen wird die angestrebte Dämmwirkung zwischen 25 Hz und 40 Hz nach Fertigstellung des Gleises nicht mehr erreicht. Es muss in diesem Zusammenhang jedoch darauf verwiesen werden, dass die hier angegebene, anhand von Schwingungsmessungen an der Tunnelwand verifizierte Dämmwirkung nicht ganz der eigentlichen Einfügedämmung, wie sie auch in den Prognoseberechnungen angesetzt wurde, entspricht. Die Systeme, aus denen die Dämmwirkung berechnet wurde, sind durch die unterschiedlichen Grade der Fertigstellung des Gleises während der drei durchgeführten Messungen nicht unmittelbar vergleichbar. Die messtechnischen Untersuchungen im Tunnel sowie nach Fertigstellung auch in der angrenzenden Bebauung belegen, dass es sich hier um ein hoch wirksames Masse-Feder-System im Tunnel der U6 handelt.

3.2 Elastische Gebäudelagerung

3.2.1 Allgemeines

Resonante Schwingungen von Geschossdecken infolge der Anregung aus dem Schienenverkehr können durch Eingriffe in die Tragwerksstruktur und der damit verbundenen Verschiebung der Deckeneigenfrequenzen aus dem Anregungsbereich heraus vermieden werden. Hier wird eine enge Abstimmung mit dem Architekten und dem Tragwerksplaner vorausgesetzt.

Zur Reduzierung der Schwingungsimmissionen oberhalb von 30 Hz bietet sich alternativ zur Dämmmaßnahme am Gleis eine elastische Lagerung des Bauwerks an. Durch eine elastische Gebäudelagerung sind je nach Auslegung und Untergrundverhältnissen in einem für die Anregung aus dem Schienenverkehr typischen Frequenzbereich zwischen 30 und 120 Hz Dämmwirkungen von 10 bis 20 dB realisierbar, wobei die resultierende Dämmwirkung von mehreren Faktoren abhängig ist:

- von der Qualität der eingesetzten Materialien (Elastomermatten, Feder-Dämpfer-Elemente)
- von der qualitätsgerechten Verlegung der Materialien,
- von einer optimalen dynamischen und statischen Auslegung.

Abhängig von der Nachgiebigkeit des Untergrundes und den elastischen Eigenschaften des Bauwerks fällt die Dämmwirkung im Vergleich zur Gleisdämmung mit Unterschottermatten oder einem Masse-Feder-System somit geringer aus. Eine Lagerung des Bauwerks auf elastischen Elementen kann zum einen im Bereich der Gründung erfolgen. Hier werden i.d.R. Elastomermatten unterhalb der Fundamentplatte angeordnet.

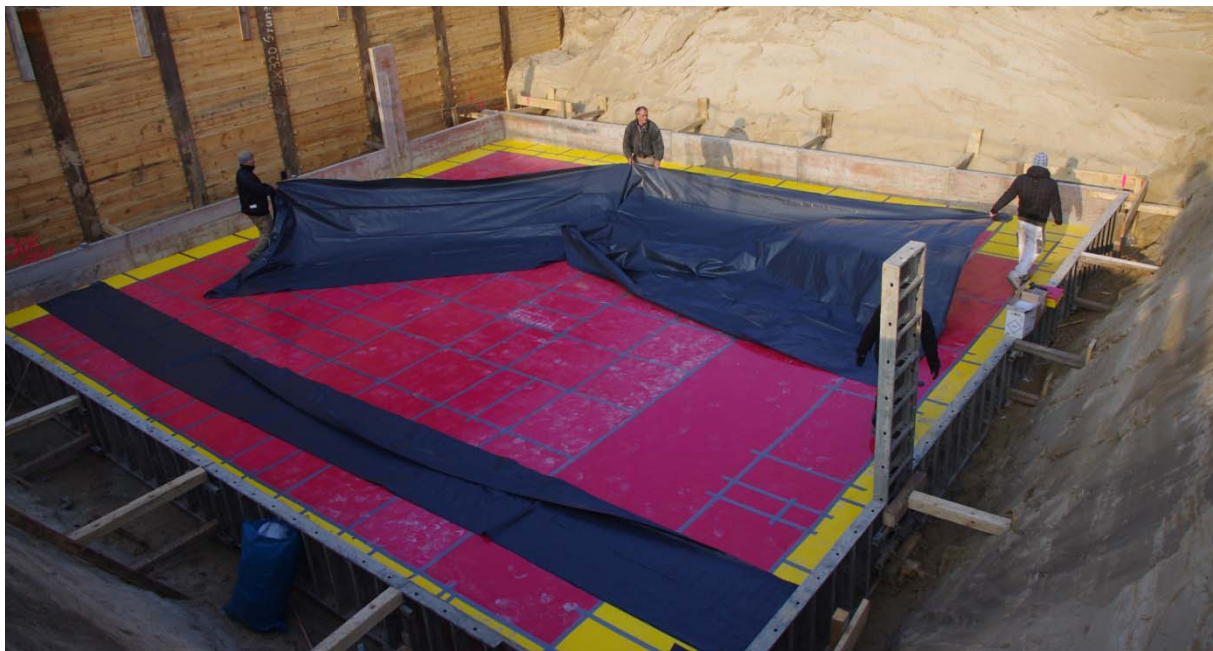


Abbildung 13: BV Hilde-Ephraim-Straße in Berlin,
flächig unterhalb der Bodenplatte verlegte Elastomermatten

Sind Streifen- oder Einzelfundamente vorhanden, werden diese auf entsprechenden Streifen- oder Punktlagern gegründet. Darüber hinaus kann auch eine Trennung des Bauwerks zwischen Untergeschoss und Erdgeschosses erfolgen. Dabei werden entweder Stahlfedern oder hoch belastbare Elastomermatten auf, meistens verstärkten, Kellerwänden

installiert. Das Untergeschoss erfährt dann keine Schwingungsreduktion. Die Immissionsminderung beginnt mit der Kellerdecke. Für die Erstellung eines geeigneten Berechnungsmodells sind einige, oftmals vernachlässigte, Aspekte zu hinterfragen:

- Welchen Einfluss haben die visko-elastischen Eigenschaften des Baugrundes?
- Wirkt sich die Anordnung einer Impedanzplatte (zusätzliche Bodenplatte unter der elastischen Lagerung) positiv auf die Dämmwirkung aus?
- Welchen Einfluss hat die Elastizität der Fundamentplatte?

3.2.2 Einfluss des Baugrundes auf die Dämmwirkung

Erste Untersuchungen anhand einfacher Mehr-Massen-Schwinger-Modelle zeigen, dass der wirklichkeitsnahen Berücksichtigung des Baugrundes besondere Bedeutung bei der Bestimmung der resultierenden Dämmwirkung zukommt. So ist unter durchaus typischen Baugrundverhältnissen, mit mitteldicht gelagerten Sanden und Scherwellengeschwindigkeiten unter 350 m/s, nicht die Abstimmfrequenz sondern das Verhältnis der Dämpfungsparameter von Baugrund (Abstrahldämpfung im Halbraum) und Elastomer maßgebend. Für die genannten Baugrundverhältnisse sind die Steifigkeiten von Baugrund und Elastomer nahezu gleich groß. Das gedämmte System erfährt aus dynamischer Sicht eine nachhaltige Veränderung durch die geringe Materialdämpfung des Elastomers.

Die oftmals angegebene Abstimmfrequenz bezieht sich dagegen auf ein fiktives Modell der starren Bauwerksmasse auf elastischen Elementen über starrem Untergrund. Unter Ansatz einer Reihenschaltung der komplexen Federn für den Baugrund und das Elastomer tritt diese „theoretische Abstimmfrequenz“ in der Übertragungscharakteristik nicht auf und ist somit für die Ermittlung der Dämmwirkung auch nicht maßgebend, siehe Abbildung 14.

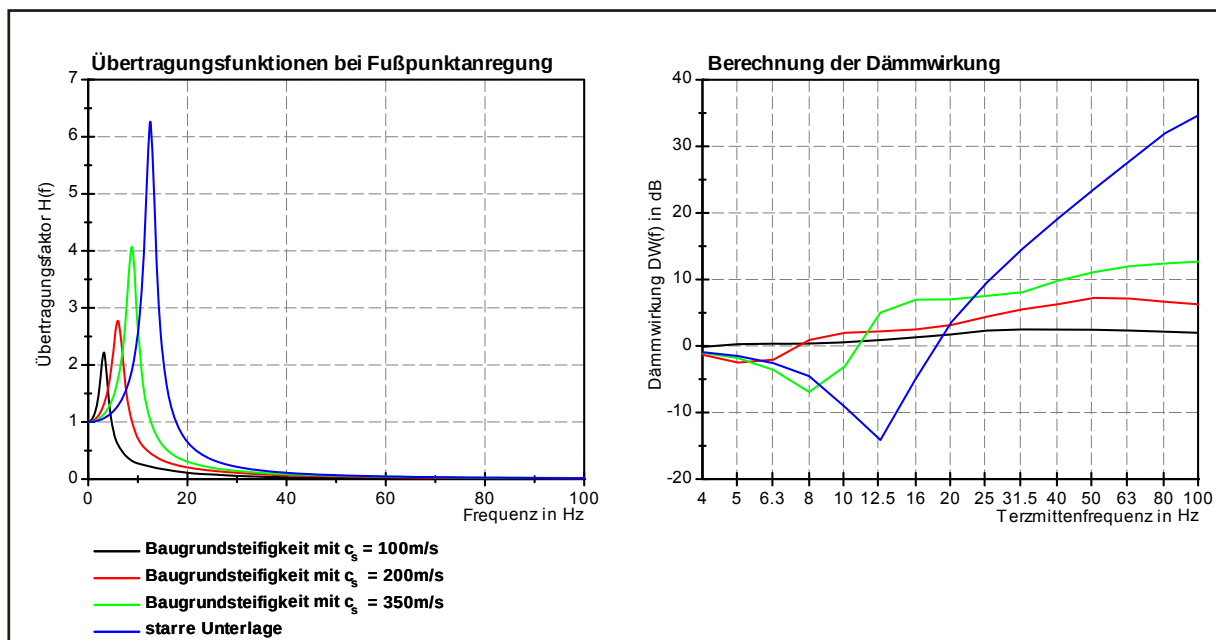


Abbildung 14: Übertragungsfunktionen und Dämmwirkungen mit dem 1-Masse-Schwinger-Modell

Die blaue Kurve im Diagramm links spiegelt das Übertragungsverhalten der Bauwerksmasse auf der Elastomerfeder über einer starren Unterlage wieder. Die „theoretische“ Abstimmfrequenz für dieses System liegt bei 13 Hz. Unter Berücksichtigung

der elastischen Baugrundeigenschaften verschiebt sich die Eigenfrequenz des 1-Massen-Schwingers in Richtung niedrigerer Frequenzen. Gleichzeitig verringert sich aufgrund der geometrischen Abstrahlungsdämpfung des Baugrundes der maximale Übertragungsfaktor. Die Überhöhung für Systeme auf steifem Untergrund betragen i.d.R. mehr als 10 dB. Da die „theoretische“ Abstimmfrequenz oftmals zwischen 10 Hz und 15 Hz und damit im Bereich von Deckeneigenfrequenzen angesiedelt ist, führt die elastische Lagerung rein rechnerisch zu Problemen bzgl. spürbarer Deckenschwingungen in den Bauwerken. Unter Berücksichtigung des nachgiebigen Untergrundes zeigt sich jedoch, dass derartige Überhöhungsfaktoren nicht auftreten.

Des Weiteren zeigen die Berechnungen mit dem 1-Massen-Schwinger-Modell, dass durch den Einfluss des visko-elastischen Baugrundes die von den Herstellern prognostizierten Dämmwirkungen von z.T. mehr als 30 dB, zumindest bei Einsatz auf maximal mitteldicht gelagerten Sanden, nicht erreicht werden können.

Weiterführend Berechnungen mit Halbraummodellen bestätigen diese Effekte. Die Abbildung 15 beinhaltet berechnete Dämmwirkungen starrer Fundamentplatten für unterschiedliche Baugrundsteifigkeiten. Zum quantitativen Vergleich ist auch hier die Dämmwirkung der elastisch gelagerten Fundamentplatte auf steifem Boden eingezeichnet (Kurve hellblau). Die Frequenzachse wurde für die Darstellung der Dämmwirkungen auf die theoretische Abstimmfrequenz f_{th} bezogen.

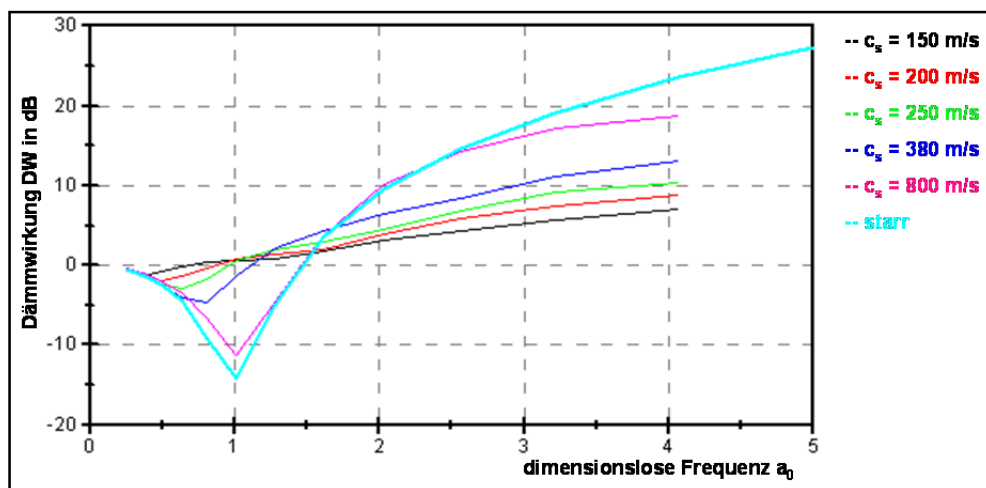


Abbildung 15: Einfluss der Baugrundsteifigkeit auf die Dämmwirkung

Die weiteren Diagramme der Abbildung 16 beinhalten die berechneten Differenzen der Dämmwirkungen für Systeme unter Berücksichtigung des Baugrundes als homogenes, elastisches Medium und das System auf unendlich steifem Untergrund. Die Differenz der Dämmwirkung zum „optimalen“ System auf steifem Untergrund wird sowohl mit steigender Frequenz als auch mit zunehmend weicherem Boden größer. Weiterhin ist zu beachten, dass sich für höhere Frequenzen die Abhängigkeit der Dämmwirkungsdifferenz von der Elastomersteifigkeit verringert. Für mitteldichte Böden können anhand der Kurven Differenzen zu den maximalen Dämmwirkungen, wie sie auch in den Datenblättern der Mattenherstellern genannt werden, von mehr als 10 dB für Frequenzen über 30 Hz abgelesen werden.

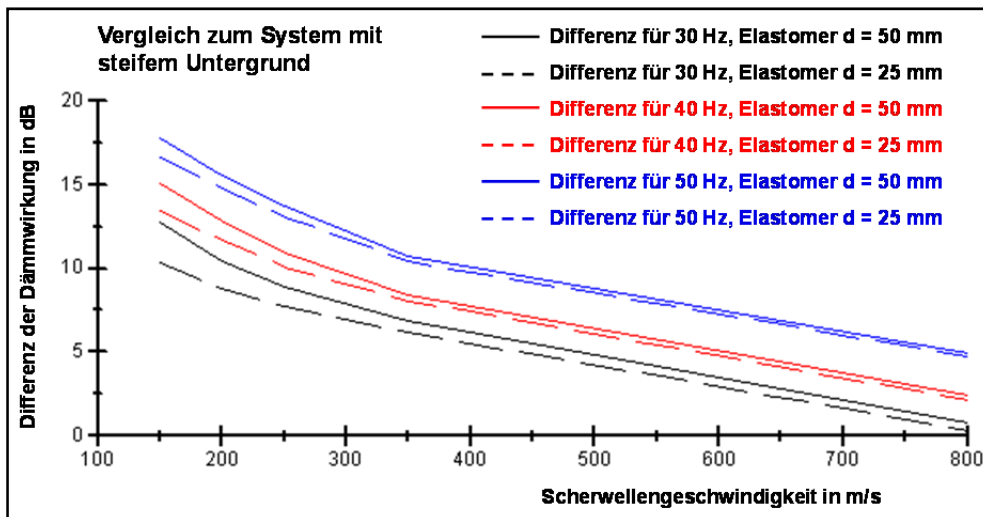


Abbildung 16: Differenz der Dämmwirkung in Abhängigkeit von Frequenz und Baugrundsteifigkeit

Der Baugrund hat somit einen ganz wesentlichen Einfluss auf die resultierende Dämmwirkung einer elastischen Fundamentlagerung. Wird das Fundament auf einem weichen Boden gegründet, fällt die Dämmwirkung sehr viel niedriger, als von Herstellerfirmen von Elastomeren in deren Datenblättern prognostiziert, aus. Wird darüber hinaus eine Baugrundsichtung mit sehr weichen Bodenschichten direkt unterhalb des Fundamentes angetroffen, wird die resultierende Dämmwirkung aufgrund der dann zu geringen Baugrundsichtdämpfung noch weiter reduziert. Im ungünstigen Fall kann die gewünschte Wirkung einer Schwingungsreduktion ganz ausbleiben.

3.2.3 Einfluss einer Impedanzplatte auf die Dämmwirkung

Eine Reihe von Modellrechnungen zur Wirkungsweise von Impedanzplatten zeigten, dass anhand vereinfachter Mehr-Massen-Schwinger-Modelle keine schwingungsmindernde Wirkung durch Impedanzplatten nachweisbar ist. Hierfür ist die Verwendung numerischer Modelle (Finite-Element-Modell oder Halbraummodelle) notwendig. In der Modellrechnung wirken Impedanzplatten nur unter Ansatz einer phasenversetzten, indirekt über den Boden eingeleiteten Anregung unter großflächigen Fundamenten. Diese kann, wie das Bild links zeigt, als Kraftanregung auf einem Nachbarfundament aufgebracht werden. Alternativ ist die Anregung über schräg einfallende Wellen möglich (Bild rechts).

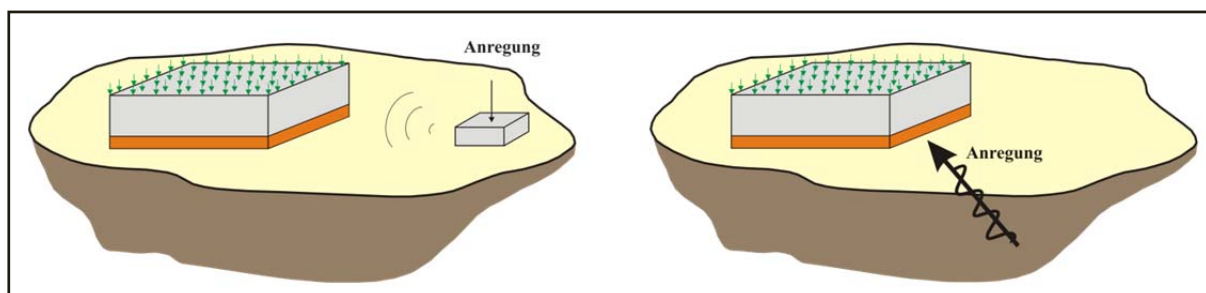
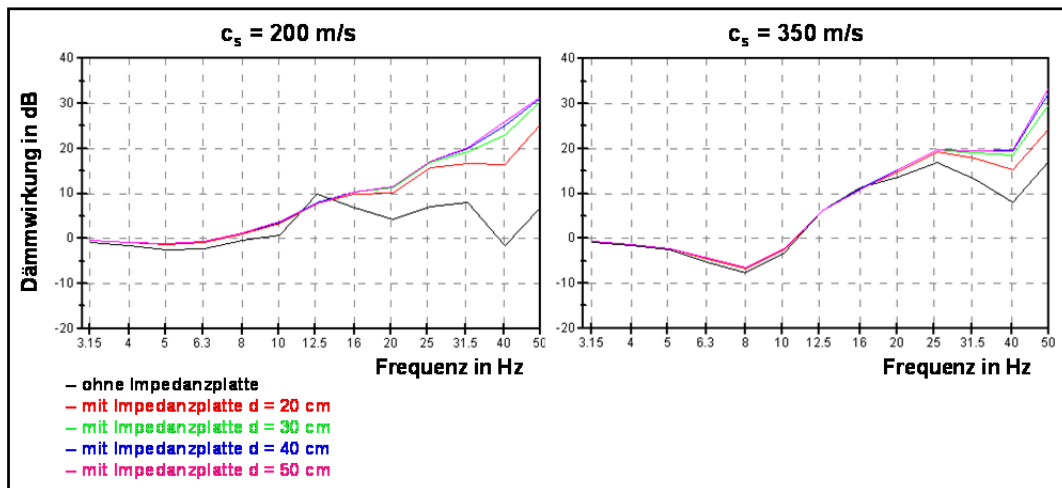
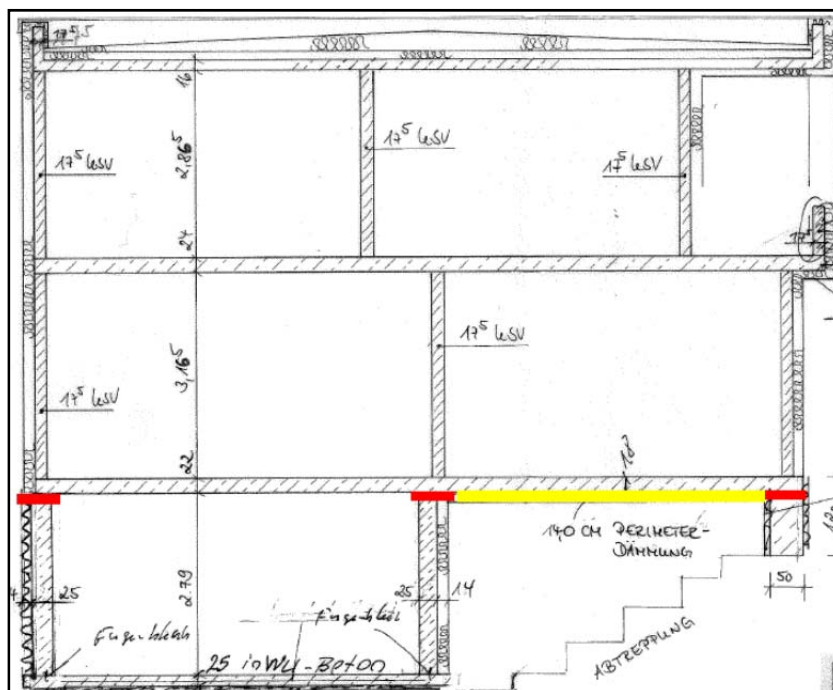


Abbildung 17: Ansatz phasenversetzter Anregung in der Modellrechnung

Die folgenden Abbildungen stellen zusammenfassend Dämmwirkungen unterschiedlicher Systeme gegenüber. Variiert wurden die Stärke der Impedanz- und Fundamentplatten sowie die Baugrundsteifigkeit.



Die Dämmwirkung von Systemen mit Impedanzplatten ist für höhere Frequenzen nahezu unabhängig von der Baugrundsteifigkeit. Schon ab einer Stärke der Impedanzplatte von $d = 30 \text{ cm}$ ist die maximale Dämmwirkung annähernd erreicht. Eine weitere Verstärkung der Impedanzplatte bewirkt nur eine geringe zusätzliche Erhöhung der Dämmwirkung.



Ein aktuelles Projektbeispiel eines Einfamilienhauses in Berlin zeigt den Effekt deutlich. Das Gebäude ist teilunterkellert. Im nicht unterkellerten Bereich soll die elastische Lagerung auf Streifenfundamenten (rot) erfolgen. Zwischen den Streifenfundamenten soll ein sehr weiches Elastomer (gelb) flächig verlegt werden. Diese Art der Lagerung bewirkt einen nicht gewollten Einbruch der Dämmwirkung zwischen 20 Hz und 40 Hz.

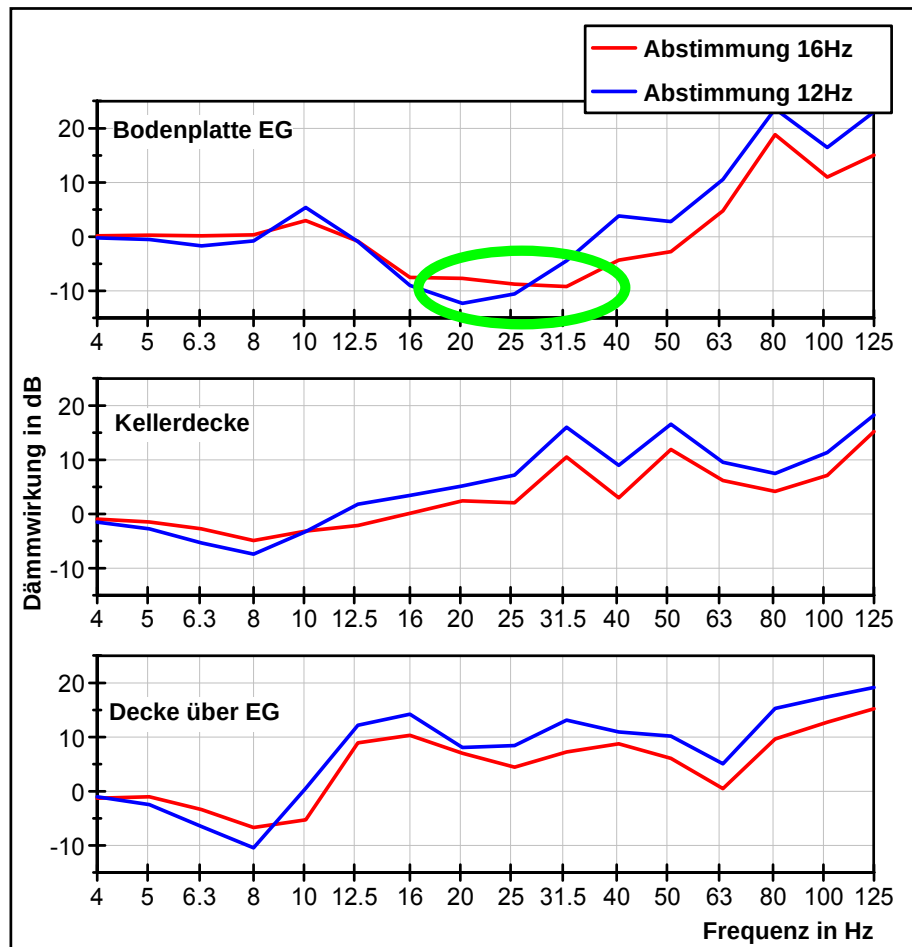


Abbildung 20: berechnete Dämmwirkungen

3.2.5 Schlussfolgerungen für die Dimensionierung der Gebäudelagerung

Vereinfachte Modelle führen i.d.R. zu einer frequenzabhängigen Überbewertung der Dämmwirkung elastisch gelagerter Fundamente und vor allem Fundamentplatten. Daher sollten für die Dimensionierung von wirksamen, elastischen Gebäudelagerungen aufwendigere Halbraummodelle unter Berücksichtigung der Wellenausbreitung angewendet werden. Da nur mit diesen Modellen ein Ansatz phasenversetzter Anregung unter der Fundamentplatte möglich sind, müssen sie zwangsläufig für Parametervariationen zur Festlegung der Fundamentsteifigkeit, der Stärke von Impedanzplatten und der Steifigkeit der Elastomere selbst herangezogen werden.

4 Literatur

- [1] Appel, S. „Dimensionierung einer elastischen Gebäudelagerung am Beispiel der Townhouses in Berlin.“ Bauingenieur 02/2008
- [2] Deutsche Bahn AG. „Körperschall- und Erschütterungsschutz, Leitfaden für den Planer“, 1996
- [3] Müller, G., und M. Möser. Taschenbuch der Technischen Akustik, 2004
- [4] Breitsamter, N. „Ersatzmodelle zur Bestimmung der Schwingungsantwort von Gebäuden unter Anregung durch Bodenerschütterungen.“ Dissertation. Technische Universität Berlin, 1996
- [5] Richter, Thomas; Appel, Silke: FEM-Berechnungen als bodenmechanisches Prognosemodell am Beispiel von Bebauungen am Potsdamer und Leipziger Platz, TU Hamburg-Harburg, 2005
- [6] Appel, S; Beyer, K: Strassenbahn U6 Stuttgart: Anregung, Prognose und Messung der Schwingungsemission, Müller-BBM Bahnakustik, 2011
- [7] Holzlöhner, U. „Schwingungen von Fundamenten.“ Bodendynamik. Friedr. Vieweg & Sohn, 1986
- [8] Appel, S. „Einfluss der Steifigkeit von Baugrund und Gründung auf die Abschirmung von Schienenverkehrserschütterungen mit Elastomermatten“, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2011