

Die schwingungsmindernde Wirkung einer elastisch gelagerten Gründung mit Impedanzplatte am Projektbeispiel eines Hotelneubaus in Hamburg

S. Appel, A. Tributsch, GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Berlin, D

Abstract

In Hamburg ist der Neubau eines mehrgeschossigen Hotelgebäudes in unmittelbarer Nähe zu Gleisanlagen der Deutschen Bahn und der Hamburger Hochbahn geplant. Aufgrund geringer Abstände war im Zuge der Planung davon auszugehen, dass über den Baugrund und die Bauwerksgründung störende Verkehrserschütterungen auf Geschossdecken und Wände des Gebäudes übertragen werden.

Im Rahmen des Beitrages wird gezeigt, wie anhand messtechnischer Untersuchungen und strukturdynamischer Berechnungen Maßnahmen zur Schwingungsminderung dimensioniert bzw., eingehend auf die speziellen Randbedingungen und Anforderungen des Projektes, optimiert wurden. Hierbei wird u.a. auf die Notwendigkeit der korrekten Erfassung der vom Schienenverkehr ausgehenden Schwingungsanregung in der Tiefe der künftigen Gründungssohle eingegangen. Weiterhin wird auf die Bedeutung von dreidimensionalen Modellen, die nicht nur die Bauwerkskonstruktion möglichst detailgetreu abbilden sondern darüber hinaus die Boden-Bauwerks-Interaktion als maßgebenden Parameter realitätsnah berücksichtigen, hingewiesen.

Für das vorgestellte Projektbeispiel führt letztendlich nur eine Kombination verschiedener Maßnahmen zur Einhaltung des geforderten Immissionsschutzes. Durch eine hinsichtlich der Elastomermattenstärke abgestufte Lagerung des Bauwerks unterhalb der Bodenplatte und den Ansatz einer zusätzlichen Impedanzplatte können die Vorgaben bzgl. zulässiger Erschütterungsimmissionen in den Hotelzimmern eingehalten werden. Auf Basis von Halbraummodellen, die sowohl die Struktur des Bauwerkes als auch die dynamischen Eigenschaften der anstehenden Bodenschichten berücksichtigen, erfolgte Nachweis und Optimierung der schwingungsmindernden Wirkung der unterhalb der elastischen Elemente angeordneten Impedanzplatte. Dieser Nachweis kann rechnerisch nur unter Betrachtung der dreidimensionalen Wellenausbreitung im Boden erbracht werden, wobei die Minderungswirkung stark von Parametern wie der Baugrundsteifigkeit, der Anregungsfrequenz und auch der Nachgiebigkeit des Gebäudes abhängt.

Die schwingungsmindernde Wirkung einer elastisch gelagerten Gründung mit Impedanzplatte am Projektbeispiel eines Hotelneubaus in Hamburg

Dr.-Ing. Silke Appel

Dr.techn. Alexander Tributsch

GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

1 Einführung

In Hamburg ist der Neubau eines mehrgeschossigen und unterkellerten Hotelgebäudes geplant. Das Bauvorhaben befindet sich in unmittelbarer Nähe zu Gleisanlagen der Deutschen Bahn und der Hamburger Hochbahn, wobei die Gleise der in diesem Bereich oberirdisch geführten U-Bahnlinie mit lediglich ca. 3,5 – 9,5 m die geringsten Abstände aufweisen. Aufgrund dieser Abstandsverhältnisse ist grundsätzlich damit zu rechnen, dass über den Baugrund und die Bauwerksgründung Verkehrserschütterungen auf die Geschossdecken und Wände des geplanten Gebäudes übertragen werden, die unter ungünstigen Bedingungen auf Deckenfeldern infolge von Resonanzerscheinungen direkt spürbar sind und zu störenden Körperschallabstrahlungen (Sekundärluftschall) in den Räumlichkeiten führen können. Die besondere örtliche Situation zeigen folgend Grundriss und Querschnitt.

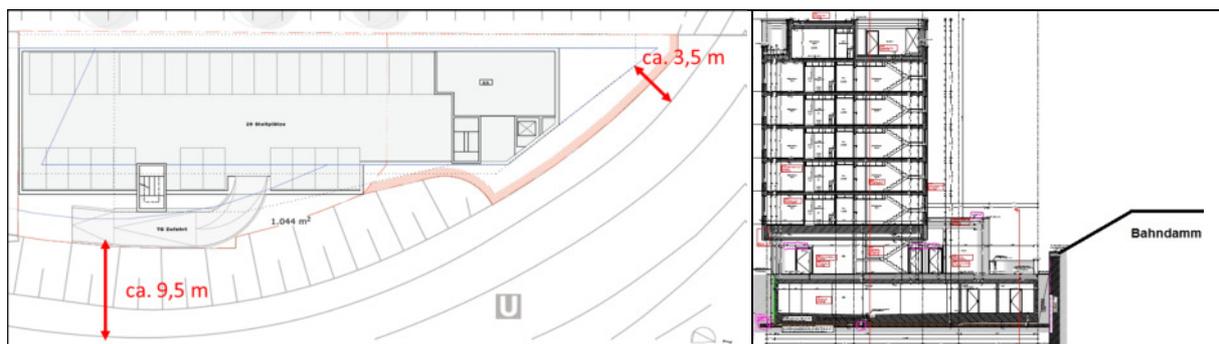


Bild 1. Grundriss und Querschnitt des geplanten Gebäudes und des U-Bahntrassenverlaufes

Auf Basis von Schwingungsmessungen erfolgte eine erste rechnerische Prognose der Schwingungs- und Sekundärluftschallpegel. Im Ergebnis zeigte sich, dass schwingungsmindernde Maßnahmen erforderlich werden und dies u.a. eine Reduktion der sekundären Luftschallpegel um bis zu 20 dB bewirken müssen.

Folgerichtig wurde empfohlen, zur Reduktion der Schwingungsanregung infolge des U-Bahnverkehrs Erd- und Obergeschosse über Stahlfederelemente vom Untergeschoss schwingungstechnisch zu entkoppeln. Diese Variante wurde seitens des Bauherrn und der projektbeteiligten Tragwerksplaner aufgrund der gegebenen Situation mit dem seitlich anstehenden Damm und auch aufgrund der sehr hohen Kosten abgelehnt. Daher war anhand weiterführender Betrachtungen zu untersuchen, ob alternative Minderungsmaßnahmen bzgl. der einzuhaltenden Schwingungs- und Sekundärluftschallpegel in den Hotelzimmern, in diesem Fall eine Schwingungsdämmung im Gründungsbereich mittels Elastomermatten, ebenfalls zielführend sein können.

2 Schwingungsanregung

Die Planung einer Maßnahme zur Minderung von Erschütterungen in Gebäuden, die neben Schienenfahrwegen errichtet werden sollen, beginnt mit der Messung der auf dem zukünftigen Baufeld auftretenden Erschütterungen. Wenn das Gebäude mit einem oder mehreren Untergeschossen in den Untergrund einbindet, ist es nicht mehr ausreichend, nur die Erschütterungen auf der Baugrundoberfläche zu erfassen. Üblicherweise werden zu diesem Zweck Bohrlochmessungen durchgeführt, bei denen Schwingungssensoren auf der Höhe der künftigen Baugrubensohle in ausgebauten Bohrlöchern positioniert werden.

Bei einer Anregung durch oberirdischen Zugverkehr, wie beim hier diskutierten Projektbeispiel, und bei näherungsweise homogenem Untergrund bis deutlich unterhalb der Gründungssohle ist davon auszugehen, dass sich eine frequenzabhängige Amplitudenabnahme mit der Tiefe einstellt, welche den einschlägigen Amplitudenabnahmebeziehungen aus der Literatur folgt. Die Abnahmebeziehung für die Oberflächenwelle ist in Bild 2 dargestellt. Man erkennt, dass die vertikale Amplitude zunächst mit zunehmender Tiefe, je nach Poissonzahl, etwas zunimmt, aber etwa ab einer Tiefe von 20 % der Wellenlänge sehr stark abnimmt. Bei einer Tiefe von einer Wellenlänge $\lambda_R = c_R/f$, mit c_R der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleigh-Welle und f der Anregungsfrequenz, ist die Amplitude bereits auf ca. 20 % der Oberflächenamplitude gesunken. In einer Tiefe von $2 \lambda_R$ ist sie nahezu vollständig abgeklungen.

Hinzu kommt, dass bei einer Anregung an der Oberfläche ca. 2/3 der gesamten Wellenenergie in der Rayleigh-Welle transportiert wird, während sich das restliche Drittel auf die Scherwelle und die Kompressionswelle aufteilt.

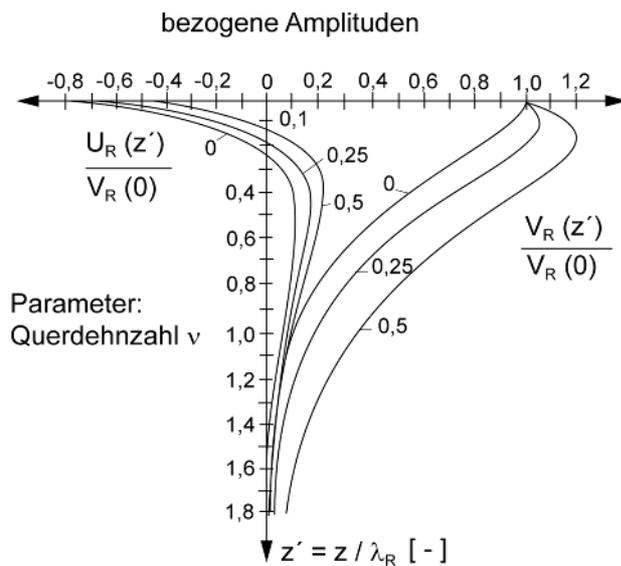


Bild 2. Abnahme der vertikalen und horizontalen Amplitude der Rayleighwelle in einem homogenen Halbraum bezogen auf die vertikale Amplitude an der Halbraumoberfläche, nach [1]

Weiteren Literaturangaben und auch Ergebnissen eigener messtechnischer Untersuchungen [3] kann demgegenüber entnommen werden, dass für Frequenzanteile ab ca. 50 Hz die Amplituden in der Tiefe im Vergleich zu den an der Geländeoberkante gemessenen Schwingungspegeln wieder zunehmen können. Ursache hierfür ist vermutlich die unzureichende Ankopplung der Sensoren an der Oberfläche, d.h. in i.d.R. aufgelockerten und u.U. auch mit inhomogenen Auffüllungen versehenen Böden. Aus den beschriebenen Gründen war es daher auch bei diesem Bauvorhaben zwingend erforderlich, die Schwingungsanregung in der Tiefe der künftigen Gründungssohle, d.h. in für die Messungen vorbereiteten Bohrungen, vorzunehmen.

Die Geometrie des Grundstückes und der Verlauf der U-Bahntrasse, auf einem Damm übergehend in eine Brückenkonstruktion, ließen darüber hinaus den Schluss zu, dass entlang des Grundstückes, auch bei gleichen Abständen, von unterschiedlicher Schwingungsanregung auszugehen war. Da im nördlichen Abschnitt das Grundstück noch bebaut war, konnten hier zunächst keine Bohrungen niedergebracht werden. Alternativ wurde am Brückenwiderlager gemessen. Für die Prognose wurde davon ausgegangen, dass die Schwingungsamplituden am Brückenwiderlager maximal denen an der Spitze der Gebäudegründung entsprechen. Auf dieser Basis erfolgten die Prognoseberechnungen und Planungen zur Dimensionierung schwingungsmindernder Maßnahmen.

Nach Räumung des Grundstückes, ca. 1 Jahr später, wurden im Zuge der nun schon weit fortgeschrittenen Planung zur Verifizierung der Anregung weitere Schwingungsmessungen in Bohrungen, auch für den nördlichen Abschnitt, vorgenommen. Wider Erwarten wurden hier nun noch einmal deutlich höhere Schwingungsamplituden im für den Sekundärluftschall maßgeblichen Frequenzbereich um 80 Hz erfasst.

Das Bild 3 enthält eine Zusammenstellung der ermittelten und für die Prognoseberechnungen bzw. Dimensionierung schwingungsmindernder Maßnahmen maßgebenden Anregungsfunktionen.

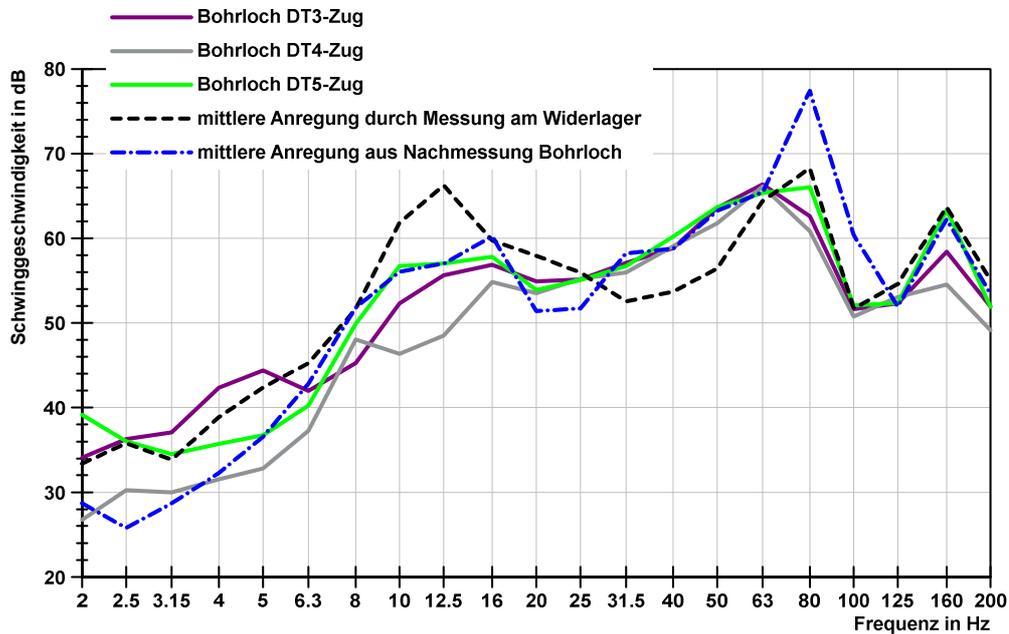


Bild 3. Max-Hold-Spektren der Anregung aus Bohrlochmessungen sowie am Brückenwiderlager

3 Prognoseberechnungen

3.1 Bauwerk

Die Übertragung von Erschütterungen auf Bauwerke wird in entscheidender Weise von der Baugrundsteifigkeit, der Art der Gebäudefundamentierung und Lage relativ zur Erschütterungsquelle, von der Gebäudemasse sowie von den Abmessungen und Spannweiten der Bauwerksteile (Wände, Unterzüge, Decken usw.) bestimmt. Zur Prognose von Erschütterungen in Gebäuden, die wie im vorliegenden Fall dicht an einer Erschütterungsquelle gegründet werden, sind komplexe Modelle wie Finite-Element-Modelle erforderlich. Mit diesen Modellen kann das Schwingungsverhalten des Bauwerkes erfasst werden. Auf Grundlage der Tragwerksplanung wurde ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell, welches die Bauwerkskonstruktion des gesamten Gebäudes detailliert berücksichtigt, erstellt.

3.2 Baugrund

Der Abbildung der Nachgiebigkeit des Baugrundes kommt bei dieser Art von Berechnungen besondere Bedeutung zu. Dem Baugrundgutachten war zu entnehmen, dass unterhalb der geplanten Gründungssohle zunächst grobkiesige, kiesige Mittelsande mitteldichter Lagerung anstehen. Darunter schließt sich ein gewachsener Geschiebemergel von steifer bis halbfester Konsistenz an. Die Berücksichtigung der Baugrundeigenschaften erfolgte im FE-Modell über diskrete Feder-Dämpfer-Elemente.

Die Parameter für die Ersatzfedersteifigkeit bzw. den Dämpfungsparameter gelten jedoch streng genommen für starre Fundamente und sind i.d.R. frequenzabhängig. Bezüglich der Frequenzabhängigkeit der vertikalen Federsteifigkeit kann eingeschätzt werden, dass für höhere Frequenzen von einer Abnahme der Steifigkeit auf ca. 80% auszugehen ist, siehe Bild 4 [1].

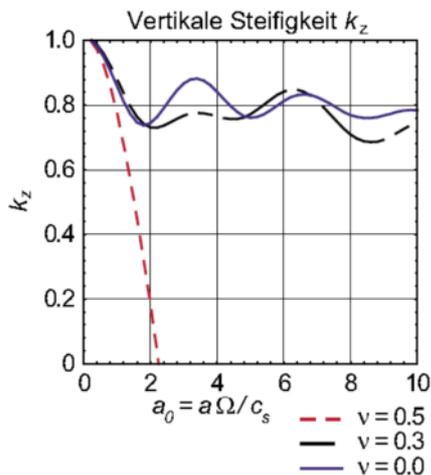


Bild 4. Frequenzabhängigkeit der vertikalen, dimensionslosen Steifigkeit eines starren Fundamentes auf dem Baugrund in Abhängigkeit der Poissonzahl

Weiterhin ist zu beachten, dass der Schubmodul für kleine Dehnungen G_d spannungsabhängig, d.h. von der Auflast durch den Boden bzw. durch das Bauwerk beeinflusst ist.

$$G_d \sim \sqrt{\sigma'_0} \quad \text{mit: } \sigma'_0 - \text{mittlere, allseitige, effektive Spannung}$$

In mehreren Iterationsschritten wurden unter Berücksichtigung der lokal unterhalb der Bodenplatte anstehenden Pressungen über die Ermittlung des belastungsabhängigen Schubmoduls die frequenzunabhängigen Federsteifigkeiten k_z (vertikal) und k_x (horizontal) für eine als starr angenommene Teilfläche der Fundamentplatte ermittelt.

3.3 Dynamische Anregung

Die dynamische Anregung des Berechnungsmodells erfolgt durch Aufbringung einer Fußpunktverschiebung der Feder-Dämpfer-Elemente, die den Baugrund repräsentieren. Als Anregungszeitverlauf wurde eine breitbandige Rauschfunktion mit Frequenzanteilen bis mindestens 160 Hz verwendet.

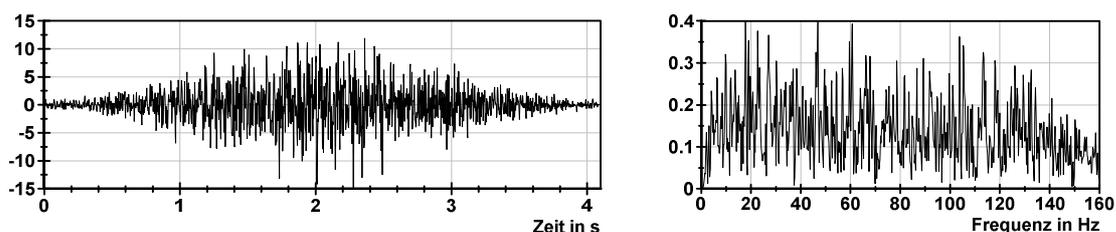


Bild 5. Angesetzte Rauschfunktion als Ersatzanregung im FE-Modell

Bei der Anregung wurde berücksichtigt, dass die Erschütterungsamplituden im Boden mit zunehmendem Abstand zur Erschütterungsquelle abklingen. Die Amplitudenabnahme wurde über entsprechende Faktoren in der Modellrechnung berücksichtigt, die auf Grundlage von [1] bestimmt und mit den Messergebnissen kalibriert wurden. Das folgende Diagramm zeigt für unterschiedliche Frequenzbereiche der Anregung die ermittelten Amplitudenabnahmefunktionen.

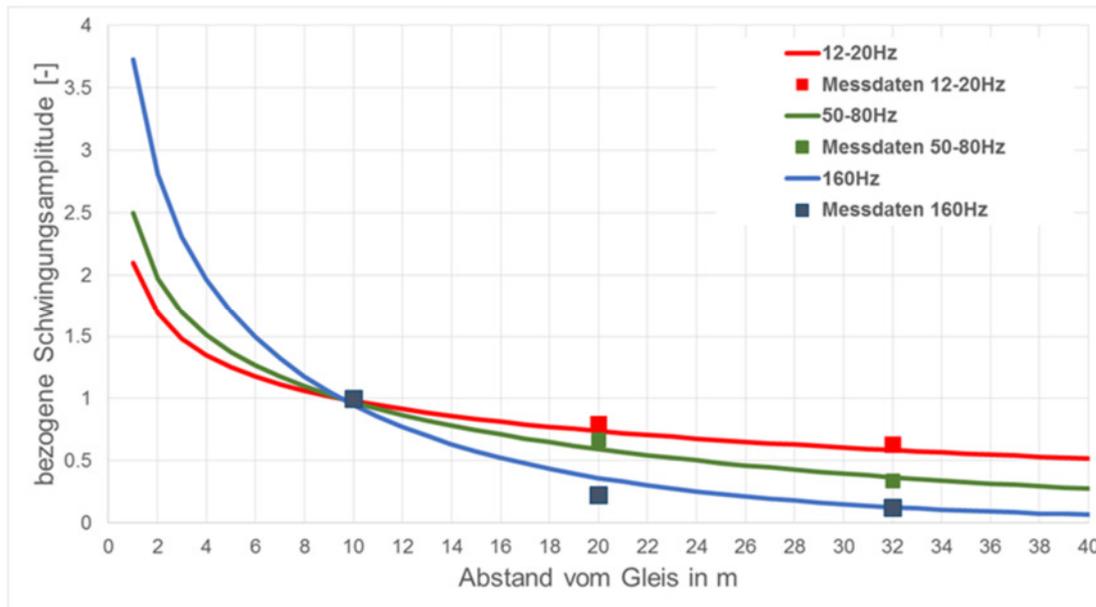


Bild 6. Amplitudenabnahme im Boden

Die Anregung erfolgt in der Realität aufgrund der Wellenausbreitung im Boden nicht phasengleich an allen Knotenpunkten der Bodenplatte. Aus dem unterschiedlichen Eintreffen der Wellen an diesen Knotenpunkten im Modell ergibt sich ein frequenzabhängiger Phasenversatz. Je nach Berücksichtigung dieses Phasenversatzes werden vorwiegend höhere Frequenzanteile beim Übergang vom Baugrund auf das Fundament reduziert.

4 Elastische Gebäudelagerung

Im Ergebnis der FE-Berechnungen überschreiten die Prognosewerte für den sekundären Luftschall im Ausgangszustand des geplanten Bauwerkes die relevanten Beurteilungskriterien. Daher war für das Gebäude bzw. für Teile des Gebäudes eine elastische Lagerung zu betrachten, um so eine Minderung der Erschütterungsimmissionen zu erzielen.

Durch eine solche Maßnahme sind je nach Auslegung und Untergrundverhältnissen in einem für die Anregung aus dem Schienenverkehr typischen Frequenzbereich zwischen 30 Hz und 120 Hz Dämmwirkungen zwischen 10 dB und 20 dB realisierbar.

Die resultierende Dämmwirkung ist hierbei von mehreren Faktoren abhängig, u.a.:

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

Die Wirkungsweise einer Gebäudelagerung kann zunächst anhand eines einfachen Ein-Massen-Schwinger-Modells erläutert werden, siehe Bild 6. Das Ein-Massen-Schwinger-Modell des ungedämmten Systems wird durch die Abbildung oben-links repräsentiert. Das Bauwerk wird durch die starre Masse, der Baugrund durch eine komplexe Feder, bestehend aus einer Steifigkeits- und einer Dämpfungskomponente abgebildet. Der Ein-Massen-Schwinger erfährt eine Fußpunktanregung. Als Antwort auf eine Einheitsanregung ergibt sich die in Blau dargestellte Vergrößerungsfunktion im Diagramm, wobei die größte Amplitude im Bereich der Eigenfrequenz des Systems ermittelt wird.

Für das gedämmte System wird der 1-Massenschwinger um die die komplexe Feder des Elastomers erweitert. Es erfolgt eine Reihenschaltung der Feder-Dämpfer-Elemente für Baugrund und Elastomer. Die realen Anteile, also die Steifigkeiten, für Baugrund und Elastomer liegen in der gleichen Größenordnung. Unterschiede ergeben sich dagegen bzgl. der Dämpfungsparameter. Die Dämpfung der Elastormatte (Materialdämpfung von Polyurethan oder Kautschuk) fällt deutlich geringer aus als die große Abstrahldämpfung durch den Baugrund. Hauptsächlich aufgrund dieses Effektes verändert sich die Übertragungsfunktion des elastisch gelagerten Systems. Die Eigenfrequenz des Ein-Massenschwingers verschiebt sich geringfügig in Richtung tieferer Frequenzen, die Resonanzüberhöhung fällt aufgrund der geringeren Gesamtdämpfung etwas höher aus. Auf der anderen Seite wird gerade aus dem Grund der kleineren Dämpfungsanteile eine Schwingungsreduktion für höhere Frequenzanteile erreicht.

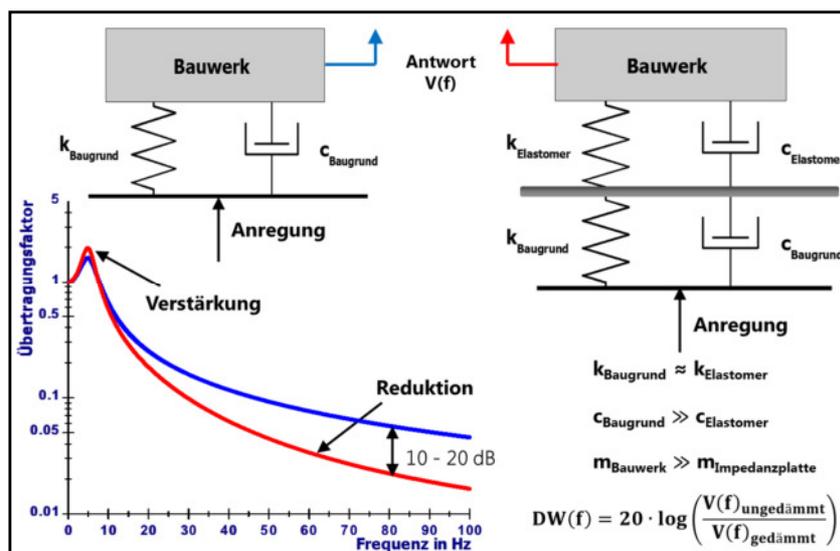


Bild 7. Wirkungsweise einer elastischen Gebäudelagerung anhand eines Ein-Massen-Schwinger-Modells

Eine zusätzliche Impedanzplatte, angeordnet unterhalb des Elastomers, bewirkt in der oben beschriebenen Modellvorstellung aufgrund der kleinen Masse der Platte im Verhältnis zum Bauwerk keine Veränderung.

Um eine elastische Gebäudelagerung effektiv zu dimensionieren, ist die Erstellung eines geeigneten Berechnungsmodells erforderlich. Bei der Berechnung der Dämmwirkung sind u.a. folgende Parameter zu berücksichtigen bzw. Aspekte zu hinterfragen:

- die Materialparameter des Elastomers,
- die Nachgiebigkeit des Untergrundes,
- die Elastizität der Fundamentplatte und die Interaktion mit dem Gebäude,
- die Anforderungen an die Dämmwirkung bzw. Charakteristik der Anregung,
- die Verteilung der statischen Lasten,
- die Einbettung des Bauwerkes in den Untergrund.

Im Projektbeispiel wurde im Folgenden die elastische Lagerung unterhalb der Bodenplatte sowie an den Außenwänden der Untergeschosse untersucht. Die Elastomermatten wurden im FE-Modell durch diskrete Feder-Dämpfer-Elemente abgebildet. Die lokale Steifigkeit des Einzelelementes ergibt sich hierbei aus der geforderten theoretischen Abstimmfrequenz und der lokal vorhandenen Bodenpressung, die wiederum zuvor in einer statischen Berechnung iterativ zu bestimmen ist.

Die theoretische Abstimmfrequenz ergibt sich aus den Annahmen:

- eines ideal steifen Gebäudes mit der Masse m
- eines ideal steifen Untergrundes
- nach der Formel: $f_A = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ (k ist die dynamische Steifigkeit der Elastomermatte)

Je weicher die Elastomermatte ausfällt, d.h. je dicker, desto kleiner ist die theoretische Abstimmfrequenz und umso größer ist die schwingungsreduzierende Wirkung. Da mehr Material i.d.R. zu höheren Kosten führt, ist eine Optimierung zur effektiven Auslegung der Gebäudelagerung anhand des Gebäudemodells zwingend erforderlich.

Geschlossenzellige Elastomermatten aus Polyurethan weisen eine nahezu hysteretische Dämpfung, d.h. frequenzunabhängige Dämpfung, mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,07 - 0,10$ auf. Da das angewendete Berechnungsprogramm lediglich eine viskose Dämpfung für die Berechnung im Zeitbereich berücksichtigen kann, wurde unter Ansatz der maßgeblichen Anregungsfrequenz aus Steifigkeit und Verlustfaktor für jedes Federelement eine viskose Ersatzdämpfung berechnet.

Im Zuge der weiteren Untersuchungen wurden unterschiedliche Steifigkeiten und somit auch Dämpfungen des elastischen Materials variiert. Ziel der folgend beschriebenen Optimierung war es, eine möglichst wirtschaftliche Einhaltung der empfohlenen Anhaltswerte zu erreichen. Es wurden vier Varianten näher untersucht:

GBL-A: vollflächige elastische Lagerung mit einer theoretischen Abstimmfrequenz von 8,5 Hz

GBL-B: abgestufte elastische Gebäudelagerung mit Abstimmfrequenz 6 Hz und 8,5 Hz

GBL-C: abgestufte elastische Gebäudelagerung mit Abstimmfrequenz 6 Hz, 8,5 Hz und 10 Hz

GBL-D: zusätzlich feiner abgestufte elastische Lagerung mit Abstimmfrequenz 6 Hz, 8,5 Hz und 10 Hz

Elastomermatten,
z.B. Typ Sylodyn
(Getzner Werkstoffe GmbH),
d = 25 mm

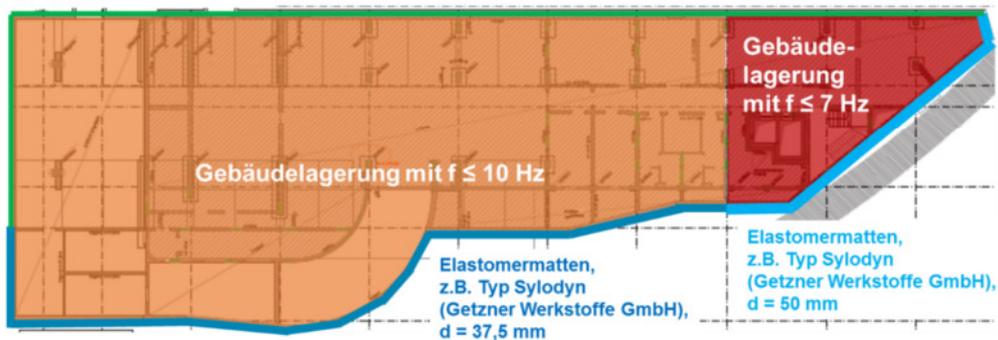


Bild 8. Vorschlag der elastischen Gebäudelagerung, GBL-B

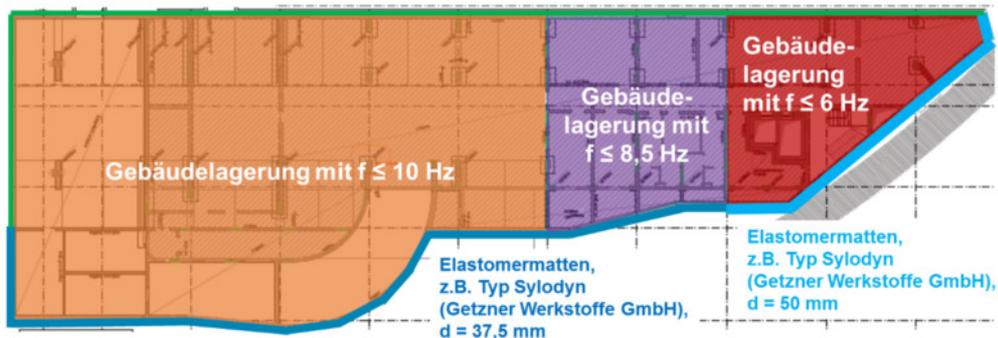


Bild 9. Vorschlag der elastischen Gebäudelagerung, GBL-C

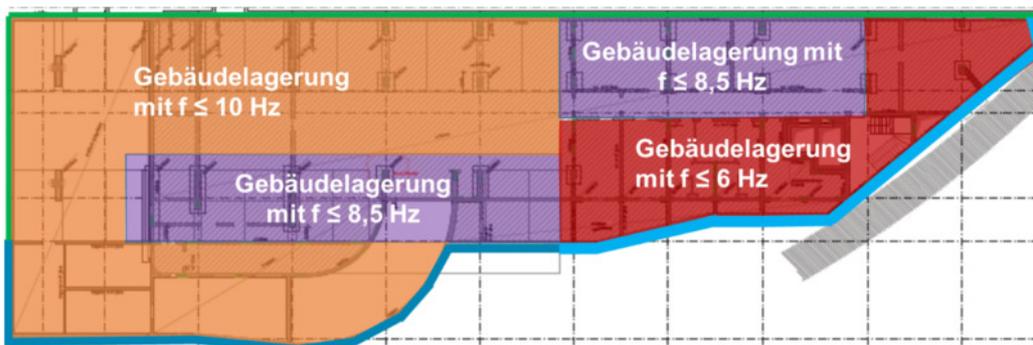


Bild 10. Vorschlag der elastischen Gebäudelagerung, GBL-D

Innerhalb der ersten Phase der Prognoseberechnungen konnte anhand der Variante GBL-C nachgewiesen werden, dass die empfohlenen Beurteilungswerte in den Hotelzimmern des geplanten Bauwerkes (mittlere Maximalpegel nachts unter 35 dB(A)) eingehalten werden. Um auch den Vorgaben des Bauherrn (Einhaltung der TA-Lärm für den sekundären Luftschall, d.h. zulässige Maximalpegel nachts 35 dB(A)) zu entsprechen, wurde empfohlen, zusätzlich eine Impedanzplatte, zumindest im nördlichen hochbelasteten Bereich des Gebäudes vorzusehen. Nach [2] war sicher davon auszugehen, dass in den maßgeblichen Anregungsfrequenzen 60 – 80 Hz eine zusätzliche Minderungswirkung von 3 dB durch die Impedanzplatte mit einer Stärke von ca. 25 cm erzielt werden kann.

Nach erfolgter Nachmessung in den Bohrungen und somit zu berücksichtigender stärkerer dynamischer Anregung im relevanten Frequenzbereich, wurde zunächst die Lagerungsvariante optimiert. Mit der Variante GBL-D liegen die prognostizierten KB_{Fmax} -Werte in allen Geschossen unterhalb des unteren nächtlichen Anhaltswertes A_u der DIN 4150-2, sodass die Norm bzgl. der Einwirkungen auf Personen im Gebäude infolge von Deckenschwingungen als sicher eingehalten gilt. Darüber hinaus wurden mit dem Modell entsprechend der Variante GBL-D nahezu für das gesamte Gebäude und die hier betrachteten Sekundärluftschallpegel verträgliche Werte hinsichtlich der gutachterlichen Empfehlung prognostiziert. Zur Einhaltung der Vorgaben nach TA-Lärm war jedoch eine weitere Reduktion erforderlich.

Da eine weichere Lagerung mit Elastomermatten unterhalb der Gründung, d.h. mit einer theoretischen Abstimmfrequenz < 6 Hz nicht realistisch ist, war die schwingungsmindernde Wirkung der Impedanzplatte für das aktuelle Bauvorhaben nachzuweisen bzw. zu optimieren.

5 Dimensionierung der Impedanzplatte

5.1 Generelle Wirkungsweise

Elastomermatten werden nicht direkt auf dem anstehenden Baugrund verlegt. Die Unterlage stellt i.d.R. eine Sauberkeitsschicht mit besonders hohen Anforderungen bzgl. einer ebenen Oberfläche dar. In der Vergangenheit wurden jedoch statt der Sauberkeitsschicht auch bewehrte Betonplatten als Unterlage für die Verlegung der Elastomermatten verwendet.

Die Berechnung mit einem einfachen 2-Massen-Schwinger-Modell zeigt, dass aufgrund der viel zu geringen Masse dieser Platte im Vergleich zum Bauwerk keine schwingungsmindernde Wirkung zu verzeichnen ist. Anhand numerischer Berechnungen kann der Einfluss von Impedanzplatten auf das Schwingungsverhalten von elastisch gelagerten Fundamenten dagegen belegt werden. In [2] wird nachgewiesen, dass Impedanzplatten nur unter Berücksichtigung einer phasenversetzten, indirekt über den Boden eingeleiteten Anregung unter großflächigen Fundamenten eine schwingungsmindernde Wirkung zur Folge haben. Das Bild 11 stellt Dämmwirkungen vereinfachter Systeme (Bodenplatte mit statischer

Bauwerkslast, Elastomer, Impedanzplatte für quadratische Grundrisse) unter Variation der Stärke der Impedanzplatte sowie der Baugrundsteifigkeit gegenüber.

Ohne Impedanzplatte fällt die Dämmwirkung für elastisch gelagerte Bauwerke auf weichen Böden deutlich geringer aus. Unter Berücksichtigung der Impedanzplatte ist die Dämmwirkung für höhere Frequenzanteile dagegen nahezu unabhängig von der Baugrundsteifigkeit. Demzufolge bewirkt die Impedanzplatte gerade bei locker bis mitteldicht gelagerten, rolligen Böden eine zusätzliche Dämmwirkung. Darüber hinaus wurde in [2] gezeigt, dass lokale Einbrüche der Dämmwirkung aufgrund von Resonanzschwingungen der Bodenplatte durch Impedanzplatten ausgeglichen werden. Für das hier theoretisch untersuchte Modell, mit den Abmessungen von 10 m x 10 m, wird die maximale schwingungsmindernde Wirkung bereits bei einer Stärke der Impedanzplatte von ca. 20-30 cm erreicht.

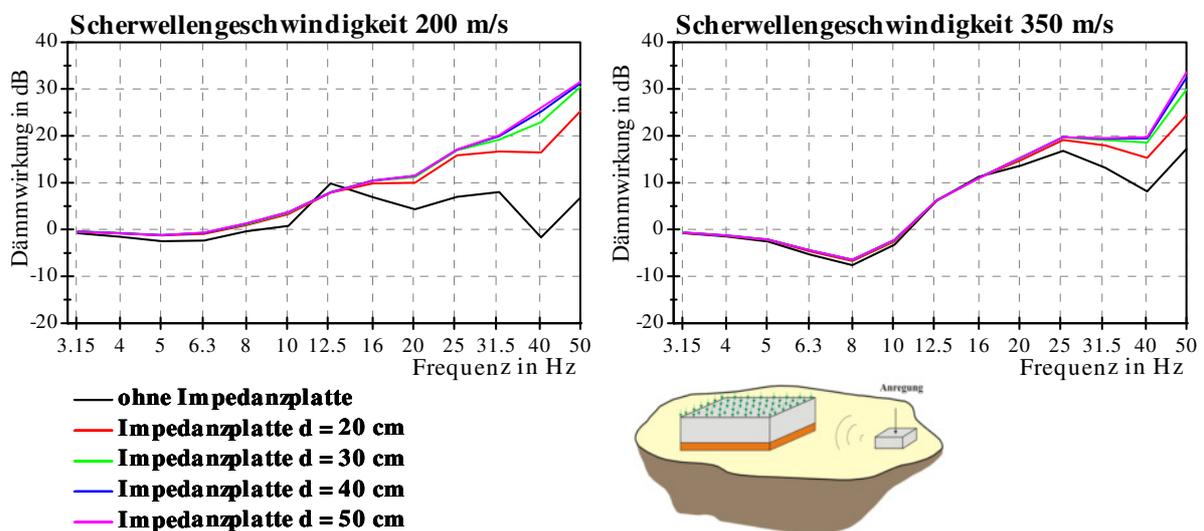


Bild 11. Wirkung von Impedanzplatten unter phasenversetzter Anregung und Variation von Baugrundsteifigkeit und Impedanzplattendicke, Fundament 10 m x 10 m, d = 50 cm [2]

5.2 Prognoseberechnungen

Folgend wurde auf Basis einer strukturdynamischen Berechnung mit einem Teilmodell des Gebäudes (rechts im Bild 12) unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Wellenausbreitung im Boden untersucht, welche Schwingungsreduktion für die gegebenen Verhältnisse durch die Anordnung einer Impedanzplatte zu erwarten ist.

Hierzu wurde das bestehende Gebäude-Teilmodell mit einem Bodenmodell gekoppelt. Das Bodenmodell berücksichtigt die Wellenausbreitung in horizontalen Schichten und angeschlossenem Halbraum.

Da dynamische Bodenparameter für die Schichtung unterhalb der künftigen Bodenplatte nicht vorliegen, wurde unter Betrachtung der Ergebnisse der Baugrunduntersuchungen eine Abschätzung getroffen. Es wurden 3 Profile berücksichtigt, wobei Profil 1 einen konstant homogenen Boden und die Profile 2

und 3 geschichtete Böden mit mitteldichtem Sand und der darunter erkundeten Mergelschicht wiedergeben. Die folgende Grafik (links in Bild 12) zeigt den Verlauf des dynamischen Schubmoduls, wie er mit zunehmender Tiefe unter der Gründungsebene in den Modellrechnungen angesetzt wurde.

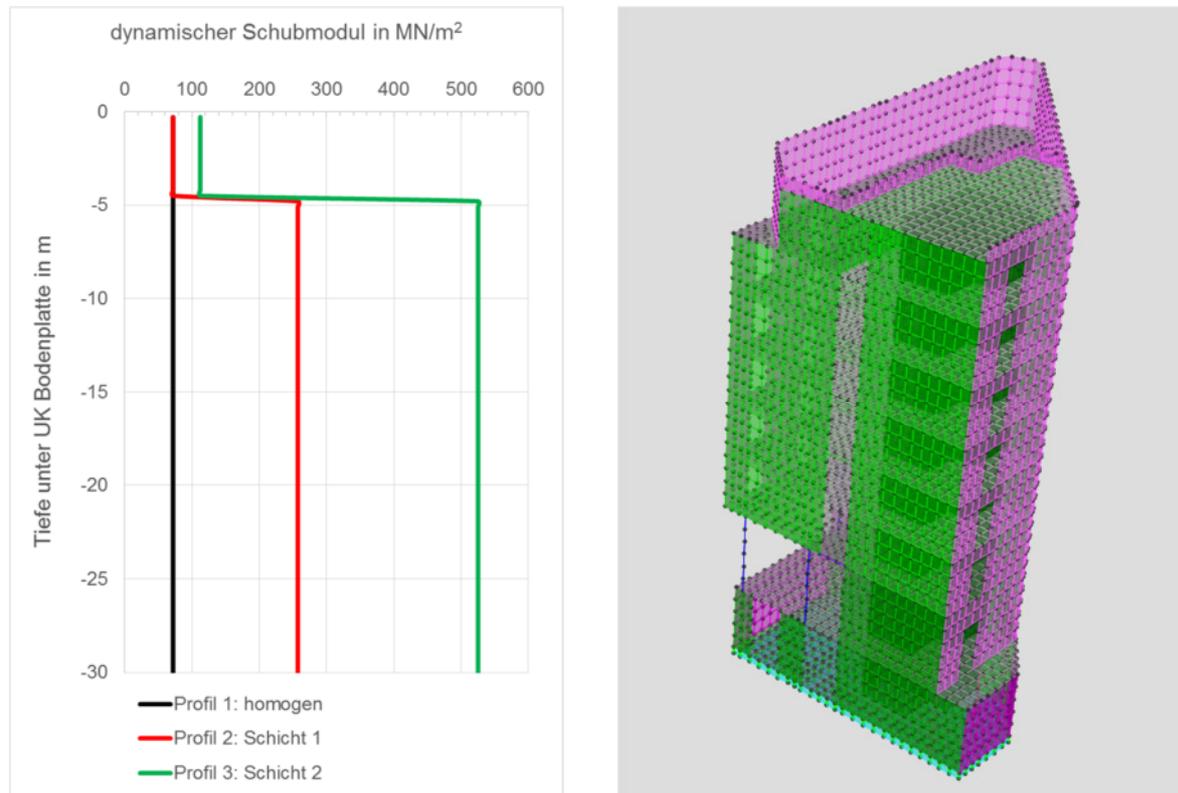


Bild 12. links: berücksichtigte Bodenprofile; rechts: Teilmodell

Zur Ermittlung der Dämmwirkung durch die Impedanzplatte wurde der auf Elastomermatten (Abstimmfrequenz bei 6 Hz) gebettete Gebäudeteil durch eine externe, in den Boden einwirkende Einheitskraft, angeregt. Die Anregung erfolgte im Frequenzbereich bis 100 Hz. Die Berechnungen wurden mit dem Programmsystem SASSI 2000 vorgenommen. Es wurden 3 Modellvarianten untersucht:

- Sauberkeitsschicht unterhalb der Elastomermatten mit einer Dicke von 5 cm
- Impedanzplatte unterhalb der Elastomermatten mit einer Dicke von 20 cm
- Impedanzplatte unterhalb der Elastomermatten mit einer Dicke von 40 cm

Die resultierenden Schwingungsantworten wurden auf jeweils 10 Knotenpunkten der Bodenplatte, des Erdgeschosses und des 1. Obergeschosses ermittelt. Die Dämmwirkung wurde folgend je Knoten aus dem Quotienten der Schwingungsantworten des Modells mit Sauberkeitsschicht zu den Antworten der Modelle mit Impedanzplatte (20 cm bzw. 40 cm) berechnet. Es erfolgte eine Mittelung der so berechneten 10 Dämmwirkungen je Geschossebene. Die folgenden Grafiken zeigen die Gegenüberstellung der Dämmwirkungen für die 3 berücksichtigten Bodenprofile am Beispiel des 1. Obergeschosses.

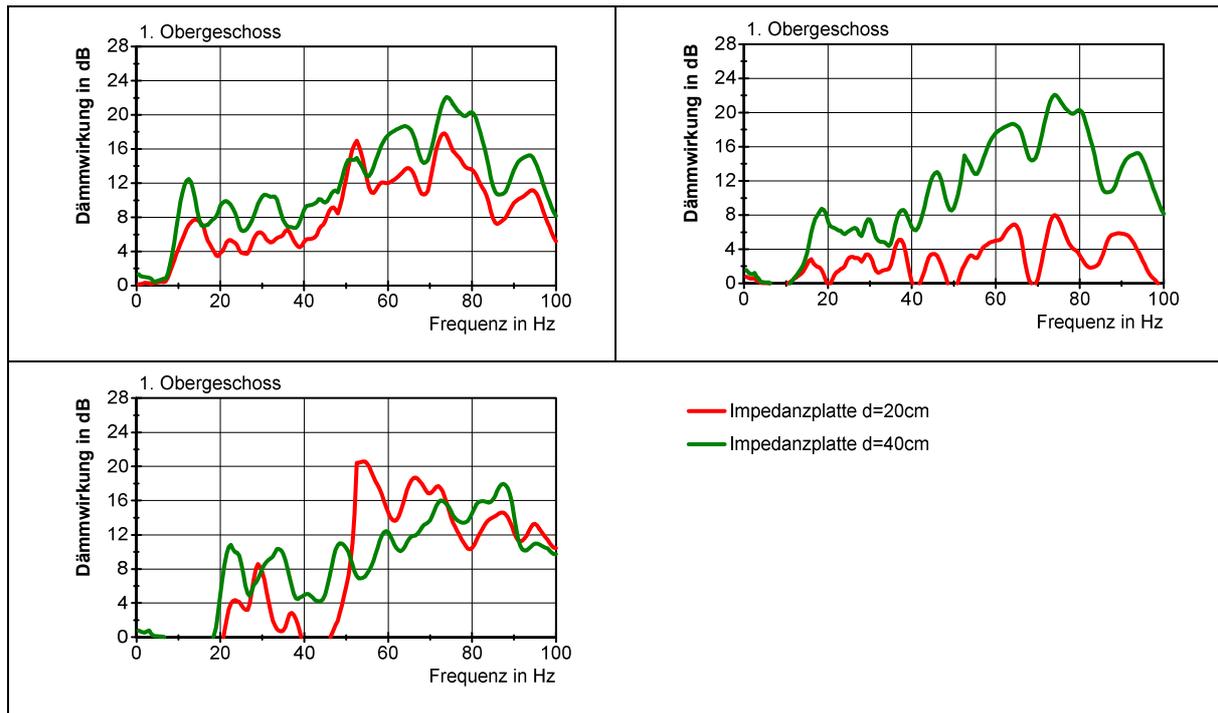


Bild 13. berechnete Dämmwirkungen durch die Impedanzplatte,
 oben links: Bodenprofil 1, homogener Boden
 oben rechts: Bodenprofil 2, Schichtung Sand/ Mergel (untere Steifigkeitsgrenzen)
 unten: Bodenprofil 3, Schichtung Sand/ Mergel (obere Steifigkeitsgrenzen)

Zusammenfassend erfolgte eine Min-Max-Betrachtung der berechneten Dämmwirkungen für die 3 verschiedenen Bodenprofile.

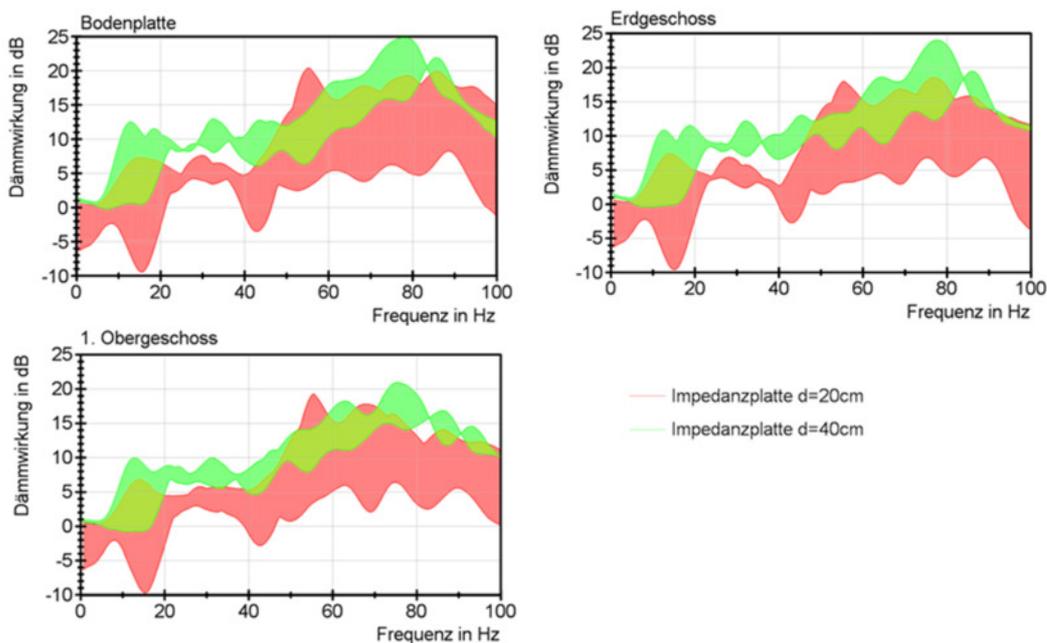


Bild 14. Min-Max-Betrachtung der berechneten Dämmwirkungen durch die Impedanzplatte, für alle 3 untersuchten Bodenprofile

Es wird deutlich, dass im für den sekundären Luftschall maßgeblichen Frequenzbereich, bei 60-80 Hz, auch im ungünstigsten Fall die Dämmwirkung durch die Impedanzplatte bei mindestens 3 dB liegt. Die Diagramme zeigen jedoch auch, dass die Streuung der berechneten Minderungen für die schwächere Platte mit der Stärke von 20 cm (rote Flächen) größer ausfällt als für den Ansatz der steiferen Impedanzplatte mit der Stärke von 40 cm (grüne Flächen). Darüber hinaus ergeben sich, zumindest rein rechnerisch, für dieses Teilmodell mit der Impedanzplatte von 20 cm Stärke, für Frequenzen unter 50 Hz, teilweise negative Dämmwirkungen. Diese treten insbesondere bei den Modellen mit Schichtung Sand/Mergel auf. Das bedeutet, dass hier u.U. Verstärkungen der tieffrequenten Deckenschwingungen auftreten können. Die Dämmwirkung durch eine steifere Impedanzplatte ist generell positiv und liegt für die relevanten Frequenzanteile (60 – 80 Hz) oberhalb von 8 dB. Für den bzgl. der Schwingungseinwirkungen stark belasteten nördlichen Eckbereich des Gebäudes wurde auf Basis dieser Erkenntnisse die Anordnung einer Impedanzplatte mit der Stärke von 40 cm empfohlen.

6 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen am Projektbeispiel zeigen, dass für die zuverlässige Prognose der Schwingungseinwirkungen infolge von Schienenverkehr 3-dimensionale Finite-Elemente-Abbildungen herangezogen werden sollten. Die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung über den Ansatz von komplexen Baugrundsteifigkeiten und deren Ankopplung an praxisübliche dynamische Finite-Elemente-Systeme bleibt für die Prognose von Bauwerksschwingungen aufgrund einer indirekten Anregung der größte Unsicherheitsfaktor. Die wirklichkeitsnahe Abbildung des Baugrundes stellt den sensibelsten Parameter bzgl. der zu erwartenden Schwingungsantworten von noch in der Planung befindlichen Bauwerken dar. Der Ansatz von Ersatzgrößen für starre Fundamente kann hierbei durchaus zu unsicheren Prognoseergebnissen führen.

Da vereinfachte Modelle, insbesondere 1- und 2-Massen-Schwinger-Modelle, die Dämmwirkung elastisch gelagerter Fundamente frequenzabhängig überbewerten, sollten für die Dimensionierung von wirksamen, elastischen Gebäudelagerungen im Idealfall die aufwendigeren Halbraummodelle, mindestens jedoch 3D-Finite-Elemente-Modelle mit gebetteter Bodenplatte, angewendet werden. Da nur mit diesen Modellen Berechnungen der Wellenausbreitung und somit 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.

Für das Projektbeispiel in Hamburg mit starker dynamischer Anregung durch den anliegenden oberirdischen Schienenverkehr war zur Einhaltung der hohen Anforderungen an die zulässigen Schwingungs-

bzw. Sekundärluftschallimmissionen eine effektive Kombination möglicher Maßnahmen zu dimensionieren. Nur mit Hilfe der dreidimensionalen Modelle konnte letztendlich eine zufriedenstellende Lösung unter Berücksichtigung auch der entstehenden Kosten für den Bauherrn gefunden werden.

Der Einsatz von Impedanzplatten im Zusammenhang mit der elastischen Lagerung eines Gebäudes stellt gerade bei vorhandenen eher weicheren Untergründen einen effektiven Ansatz zur zusätzlichen Reduktion der über die Bodenplatte auf das Gebäude einwirkenden Erschütterungen dar. Zu beachten ist jedoch, dass diese Immissionsminderung lediglich für möglichst große Flächen und nur für die höheren, für den sekundären Luftschall maßgebenden Frequenzanteile nachgewiesen werden kann.

Literatur

- [1] Empfehlungen des Arbeitskreis 1.4 Baugrunddynamik der DGGT. Verlag Ernst & Sohn, 2. Auflage, 2018
- [2] S. Appel: Dissertation „Einfluss der Steifigkeit von Baugrund und Gründung auf die Abschirmung von Schienenverkehrserschütterungen mit Elastomermatten“, 2011
- [2] S. Appel, W. Schepers: „Übertragbarkeit gemessener Schwingungen auf eine Fußpunktanregung in der Baugrubensohle“, Hans-Lorenz-Symposium 2018