

Christos Vrettos, Oliver Kornadt, Andreas Becker,
Leila Nagel, Elisabeth Seibel,
Albert Vogel, Marc Oliver Rosenquist

Prognose des strukturinduzierten sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr

F 3089

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0192-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

**Prognose des strukturinduzierten sekundären
Luftschalls aus dem Schienenverkehr**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau
des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.17)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung



Bundesamt
für Bauwesen und
Raumordnung

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Christos Vrettos
Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt

Sachbearbeiter: Priv.-Doz. Dr.-Ing. Andreas Becker
Dr. rer. nat. Leila Nagel
Dipl.-Ing. Elisabeth Seibel
Dr.-Ing. Albert Vogel

Praxispartner: Dipl.-Ing. Marc Oliver Rosenquist, baudyn GmbH

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	3
2	Problematik und Herangehensweise	3
3	Charakterisierung und Einwirkung von Erschütterungen und Körperschall.....	9
3.1	Begriffe und Definitionen.....	9
3.2	Übertragung von Erschütterungen zum Immissionsort	10
3.3	Einwirkung von sekundärem Luftschall auf Menschen.....	11
4	Boden-Bauwerk-Interaktion und strukturdynamische Systemeigenschaften.....	13
4.1	Theoretische Untersuchungen	13
4.2	Experimentelle Untersuchungen.....	26
4.3	Strukturdynamische Berechnungen	32
4.4	Parameterstudie zur Boden-Bauwerk-Wechselwirkung.....	44
5	Bauakustische Berechnungen und Messungen	52
5.1	Berechnungen zur schalltechnischen Charakterisierung des Testreferenzgebäudes 52	
5.2	Ermittlung des Abstrahlgrades von schwingenden Oberflächen.....	57
5.3	Test-Referenzgebäude	58
5.4	Berechnung der Schalldämmung im Referenzgebäude.....	59
5.5	Schallanregung im Senderraum.....	60
5.6	Messung der Oberflächenschwingungen	65
5.7	Messen von Schalldruckpegeln bei tiefen Frequenzen.....	70
6	Erschütterungs- und bauakustische Messungen an einem Untersuchungsobjekt	73
6.1	Objekt- und Standortbeschreibung	73
6.2	Vorgehensweise und Messergebnisse.....	77
6.3	Berechnung des Schalldruckpegels aufgrund schwingender Oberflächen.....	80
7	Prognose von Schalldruckpegeln in Empfangsräumen – Validierung durch Messungen 81	

8	Übersicht zum Prognoseverfahren.....	85
8.1	Prognose Erschütterungstransmission	85
8.1.1	Vorgehen	85
8.1.2	Erkenntnisse.....	89
8.2	Prognose sekundärer Luftschall durch Bauteilschwingungen.....	91
9	Zusammenfassung	92
10	Literatur.....	94

1 Veranlassung

Als sekundärer Luftschall wird der abgestrahlte Luftschall eines durch Körperschall zu mechanischen Schwingungen angeregten Bauteils bezeichnet. Der sich in einem Raum einstellende Schalldruckpegel hängt von der Geometrie und dem Abstrahlgrad des schwingenden Bauteils sowie von dem Schallabsorptionsgrad des Raumes ab. Diese Abhängigkeit ist zudem frequenzabhängig und wird durch die Quellencharakteristik (Zugvorbeifahrt) und die Impedanzen des betrachteten Gebäudes wesentlich beeinflusst. Letztere werden bestimmt durch die Tragkonstruktion und die Gründungsverhältnisse des Gebäudes. Bestehende Prognoseverfahren betrachten in vereinfachter Weise Standardsituationen bezüglich der Gründungsverhältnisse, der Tragkonstruktion sowie der Eigenschaften des Schallfeldes im Raum. Zur Verminderung der hohen Prognoseungenauigkeit müssen die Einflussparameter genauer untersucht und in einem verbesserten Prognoseverfahren berücksichtigt werden. Gebäude mit unregelmäßiger Geometrie oder auf Pfählen gegründete Gebäude sowie Tragsysteme mit teilweise nicht-biegesteifen Bauteilverbindungen oder mit Verkleidungen wie Vorsatzschalen können mit den vorhandenen Verfahren nicht erfasst werden. Im Rahmen des beantragten Vorhabens sollen obige Fragestellungen gezielt angegangen werden. Nach einer Bewertung des Standes der Wissenschaft sollen für repräsentative Randbedingungen aufwändige berechnungstechnische Untersuchungen für die Übertragung der Schwingungen vom Boden über die (Pfahl-)Gründung in das Gebäude in ausgeprägt geschichteten Böden sowie die Erfassung der Schwingung der unterschiedlichen raumbegrenzenden Flächen (Wand, Fensterfassade, schwimmender Estrich) vorgenommen werden. Schließlich soll dann die Übertragung von Körperschall in Luftschall untersucht werden. Die Validierung der numerischen Untersuchungen soll exemplarisch über messtechnische Untersuchungen erfolgen. Abschließend sollen die Ergebnisse in ein praxistaugliches Verfahren zur Prognose überführt werden.

2 Problematik und Herangehensweise

Aufgrund der in Ballungsräumen weiter zunehmenden räumlichen Verdichtung nehmen Nutzungskonflikte, hier zwischen Wohnbebauung und Schienenverkehrswegen, weiter zu. Zunächst wurde der Schallschutz gegenüber dem Außenlärm in Gebäuden durch Straßen- und Schienenverkehr sowie Betriebe durch eine Erhöhung der Luftschalldämmung der Fassadenbauteile erhöht. Vor dem Hintergrund des auf diese Weise deutlich gesunkenen Luftschallpegels in den Wohnungen wird der aus der Schwingungsübertragung im betreffenden schutzbedürftigen Raum abgestrahlte strukturinduzierte sekundäre Luftschall deutlich hörbar und damit entsprechend störend wahrgenommen. Zusätzlich ist die Sensibilität der Bevölkerung gegenüber Schallimmissionen im Wohnumfeld im Zusammenhang mit einer gestiegenen Anzahl an 1-Personen-Haushalten gestiegen.

Der strukturinduzierte sekundäre Luftschall ist insbesondere in Gebäuden an unterirdischen Schienenstrecken, wegen des dort fehlenden primären Luftschalls, störend wahr-

nehmbar und häufig gegenüber den über den Fußboden auf den Menschen in Gebäuden übertragenen spürbaren Erschütterungen maßgeblich.

Das in Deutschland in den letzten vierzig Jahren gewonnene, beträchtliche Know-how auf dem Gebiet des Erschütterungsschutzes betrifft die Emission und Transmission bei Schienenverkehr und stützt sich vornehmlich auf Messungen. Im Bereich der Immission sind – wegen der Variabilität der Gebäudestrukturen und Bauteile, der architektonischen Konzepte und der verwendeten Materialien – die Prognoseverfahren für den strukturinduzierten Sekundärschall bei weitem nicht ausgereift, so dass Handlungsbedarf für die Planung und Optimierung von Bauwerken dringend erforderlich ist. Hier knüpft das beantragte Vorhaben an.

Der Stand der Wissenschaft im Erschütterungsschutz in Deutschland ist in [56] zusammengefasst. Die Anforderungen und der Aufbau eines spektralen Verfahrens zur Immissionsprognose für Erschütterungen inkl. Literatur sind in der Richtlinie VDI 3837 [47] angegeben. Der gängige, vereinfachte Ansatz zur Abschätzung des Schallpegels aus dem Körperschall basiert auf den Angaben in [43].

Im Rahmen eines durch das BMBF geförderten Verbundvorhabens mit dem Titel „Praxisgerechtes Prognoseverfahren für Schienenverkehrserschütterungen“ wurden vorhandene Ansätze zur Prognose von Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen zusammengefasst und bewertet [27], [29]. In dem Bericht zu Sekundärschallimmissionen in Gebäuden werden die Defizite der Verfahren aufgezeigt, wie z.B. die Annahme einer Unabhängigkeit des Differenzpegels zwischen Sekundärschall- und Körperschall im Terzspektrum, was der praktischen Erfahrung widerspricht. Weiterhin wird festgestellt, dass die fehlenden verbindlichen Vorgaben zu den Sekundärschallmessungen keinen eindeutigen Vergleich zwischen Messungen erlauben.

In dem o.g. Verbundvorhaben wurden in einem weiteren Teilprojekt gleichmäßig aufgebaute Bauwerksmodelle unterschiedlicher Modellierungstiefe aufgestellt und berechnet: Stockwerkrahmen mit oder ohne Scheibenelementen, gegründet auf vereinfacht angenommenen homogenen Böden mittels Fundamentgruppen oder -platten. Für diese Konfiguration wurden Näherungsverfahren für die Ersatzsteifigkeit der Gründung entwickelt, die jedoch nur begrenzt verifiziert worden sind [2], [16]. Pfahlgründungen in geschichteten Böden wurden kaum betrachtet, genauso wenig wie unregelmäßige Grundriss- bzw. Stockwerkgeometrien. Der Einfluss der Ausbildung der Bauteilverbindungen innerhalb der Tragkonstruktion wurde ebenfalls nicht betrachtet.

Die Fachliteratur ist reich an Projektbeispielen, die Angaben hinsichtlich Details der Tragwerksausbildung oder der Baugrundverhältnisse sind jedoch meistens lückenhaft, so dass der Nutzen beschränkt ist. Gut dokumentierte Messergebnisse im Rahmen von Bauvorhaben sind ausschließlich bei den Verfassern der entsprechenden gutachterlichen Stellungnahmen zu finden, die auch die spezifischen Randbedingungen kennen und die Übersicht

über die Fülle von Messdaten haben [38], [20]. Die Mitwirkung eines auf diesem Gebiet spezialisierten Ingenieurbüros mit einem großen Fundus an Projekterfahrung ist eine unabdingbare Voraussetzung für die praktische Relevanz dieses Forschungsvorhabens.

Die bauakustischen Aspekte des beantragten Vorhabens betreffen die Ausbreitung von Körperschall in Gebäudestrukturen. Übersichtsartikel hierzu siehe [52], [1]; sie befassen sich mit den Übertragungsfunktionen an Stoßstellen und Anschlüssen, wie Deckenan-schlüssen sowie mit dem Abstrahlgrad von schwingenden Bauteilen.

Im Bereich der verkehrsbedingten Erschütterungen dominieren mit Abstand die Schienenverkehrswege, wodurch die Erschütterungsbeurteilung zu einem festen Bestandteil entsprechender Genehmigungsunterlagen für Schienenverkehrswege geworden ist. Vor der Planung oder dem Umbau einer Bahnstrecke wird eine Prognose bezüglich der zu erwartenden Geräusche erstellt. Dies kann eine frühzeitige Erkennung möglicher Konflikte bewirken und ermöglicht den Einsatz einer wirksamen Lärminderungsmaßnahme.

Die Lärmbelastigungen der Anwohner werden anhand schalltechnischer Untersuchungen für den Ist- und Prognosefall mit und ohne Ausbaumaßnahmen berechnet [11]. Im üblichen Straßenverkehr entstehen meist nur punktuelle Erschütterungen, z.B. durch Überfahren von Schwellen, welche mit entsprechenden Optimierungsmaßnahmen verringert oder gar verhindert werden können. Bei Schienenverkehrswegen hingegen ergeben sich durch das Laufen der Metallräder auf Stahlschienen erhebliche Erschütterungen, die sich auf benachbarte Gebäude im Nahbereich übertragen. Die Schallausbreitung kann, wie in **Abbildung 1** zu sehen ist, auf drei Wegen erfolgen. Zum einen ist eine Übertragung von sog. Direktschall (Schall im Frei-Feld) durch die Luft möglich. Dieser dringt unmittelbar von der Schallquelle zum menschlichen Ohr. Der Direktschall setzt sich neben der Zuggeschwindigkeit aus Rollgeräuschen, Kurven-, Brems- und Aggregatgeräuschen sowie dem Schall aus aeroakustischen Quellen zusammen.

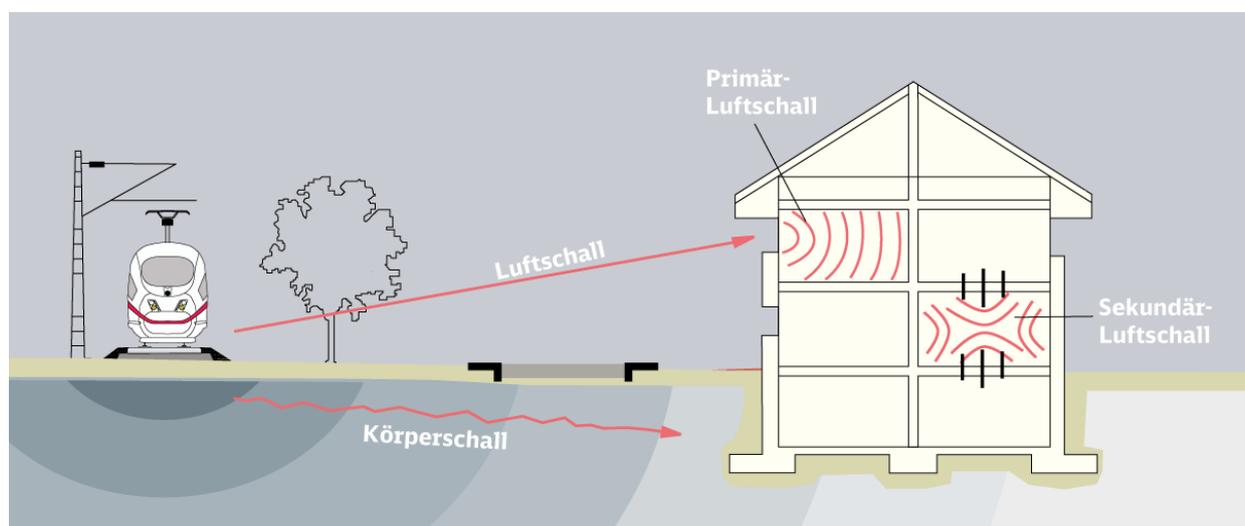


Abbildung 1: Schallemissionen und -immissionen [11]

Die zweite Möglichkeit der Schallausbreitung ist der reflektierte Schall. Hierbei handelt es sich ebenfalls um Luftschall der zunächst an Decken und Wänden reflektiert wird und tief in die Räume hineinwirken kann. Eine weitere wesentliche Größe stellt der Sekundärschall dar, welcher in geschlossenen Räumen wahrgenommen wird.

Nach wie vor ist die Prognose des strukturinduzierten sekundären Luftschalls sehr schwierig, sowohl i) im Hinblick auf die Übertragung des Körperschalls vom Boden über die Gründung in das Gebäude als auch ii) im Hinblick auf die Schallabstrahlung durch die betreffenden Raumbegrenzungsflächen. Dadurch liegen in der Praxis sehr hohe Ungenauigkeiten bei der Prognose vor.

Somit umfasst die Prognose von Erschütterungen drei, getrennt voneinander zu betrachtende Teilbereiche:

- a) Emission an der Quelle durch Zusammenwirken von Fahrzeug und Fahrweg
- b) Transmission durch Wellenausbreitung durch den Boden
- c) Immission durch Übertragung der Schwingungen vom Boden in benachbarte Gebäude

Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchungen ist der Bereich der Immission, der in [Abbildung 2](#) zusammen mit den maßgebenden Übertragungsmechanismen und den wichtigsten Einflussparametern detailliert dargestellt ist. [Abbildung 3](#) hebt nochmals die in diesem Bericht behandelten Faktoren hervor. Für die Bereiche der Emission durch Fahrzeug und Fahrweg sowie der Übertragung im Boden wird auf vorhandenes Fachwissen, dokumentierte Messergebnisse sowie Literaturangaben verwiesen.

Zur Lösung der Fragestellungen werden Berechnungen und numerische Simulationen durchgeführt, welche mit Messergebnissen validiert werden. Hierzu werden im Rahmen des Projektes entsprechende Messungen realisiert. Darüber hinaus werden bereits vorhandene sowie in der Literatur angegebene Messergebnisse verwendet.

Die vorgenommene ausführliche Recherche bestätigte die Tatsache, dass die wenigen vorhandenen technischen Informationen hauptsächlich aus unveröffentlichten Projektbeispielen bzw. Konferenzbeiträgen stammen. Eine Verallgemeinerung der technischen Erkenntnisse zeigt sich als extrem schwierig und belegt damit auch die hohe Komplexität der Fragestellung. Anhand der abgeschlossenen Untersuchungen wird deutlich, dass in der gängigen Praxis vorrangig empirische Beziehungen, zumeist projektbezogen, Anwendung finden.

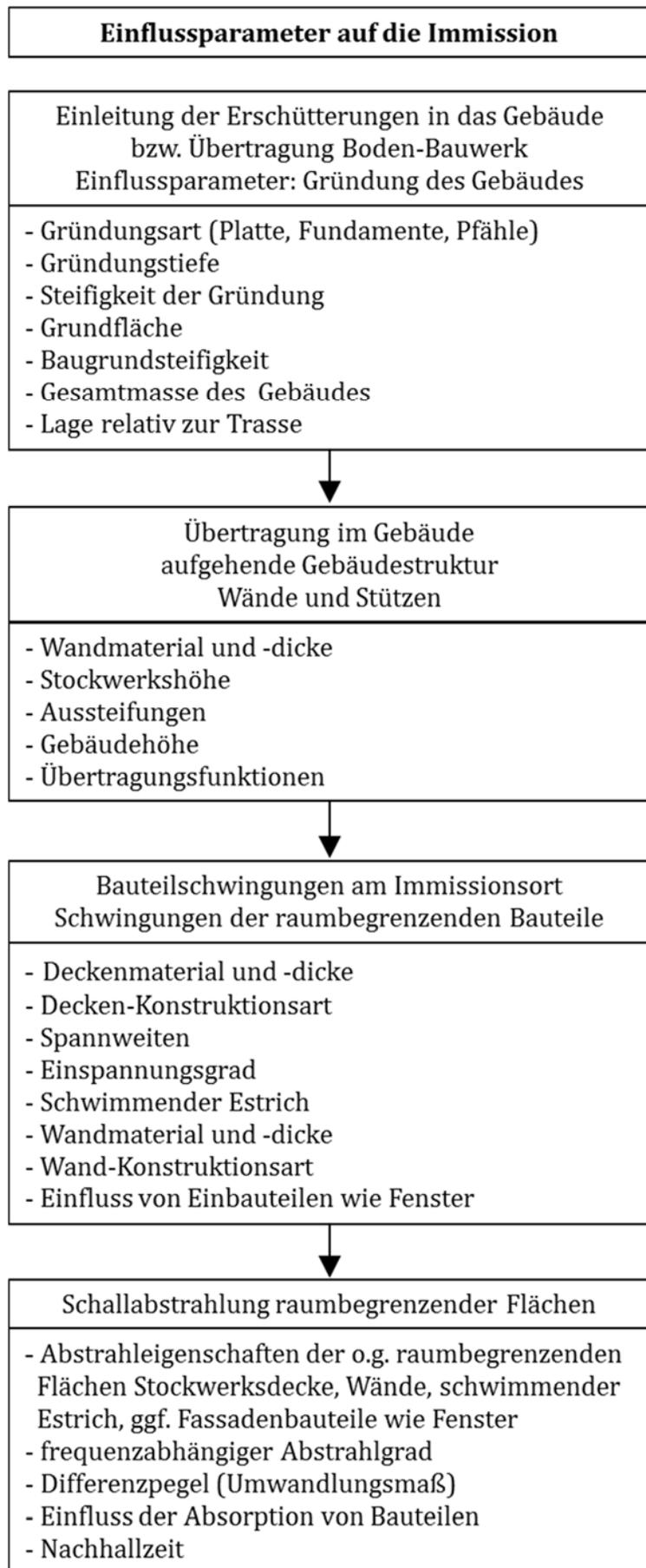


Abbildung 2: Einflussparameter auf die Immission

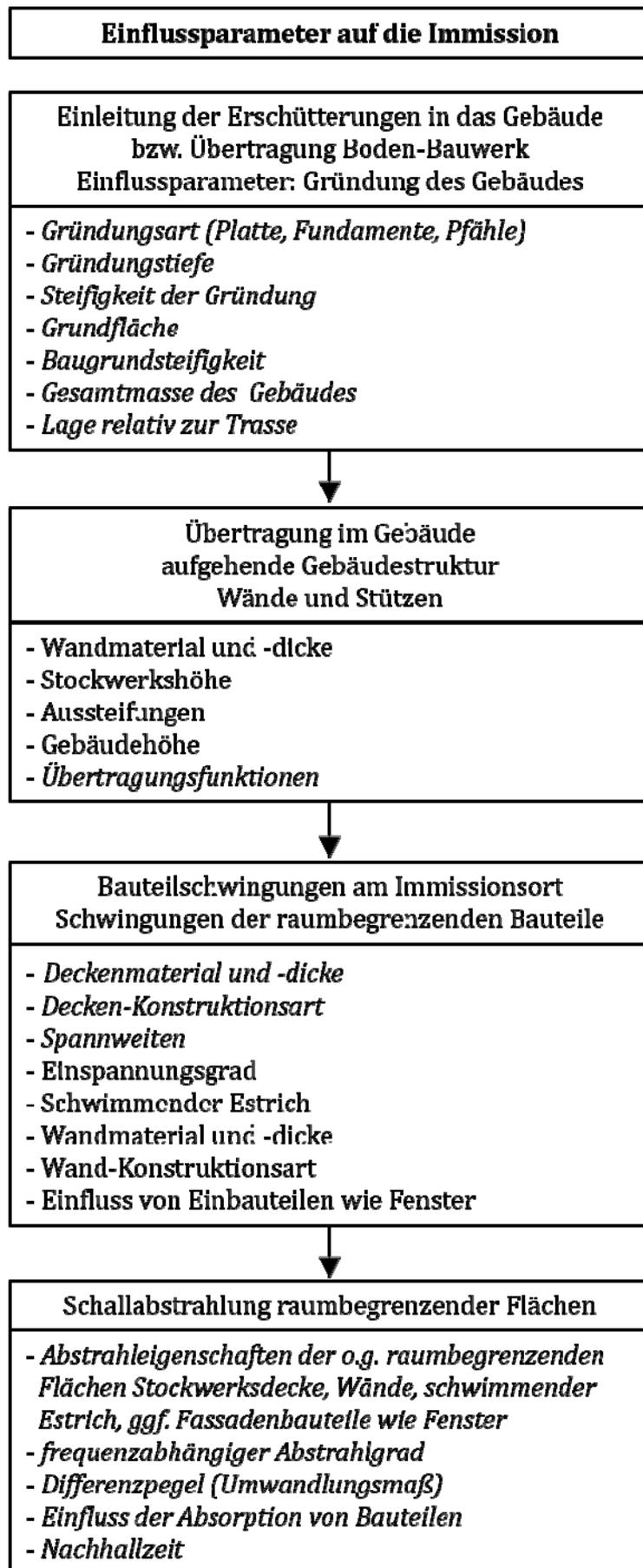


Abbildung 3: Im vorliegenden Bericht betrachtete Einflussparameter

3 Charakterisierung und Einwirkung von Erschütterungen und Körperschall

3.1 Begriffe und Definitionen

Die Problematik des Erschütterungsschutzes wurde in Deutschland sehr früh angegangen, so dass heute der Stand von Wissenschaft und Technik sehr fortgeschritten ist und ausgereifte Regelwerke zur Verfügung stehen. Das vorhandene Wissen ist jedoch in vielen Fachpublikationen gestreut. *Erschütterungen* sind mechanische Schwingungen fester Körper im Bereich 1 ... 80 (315) Hz mit potenziell schädigender oder belastender Wirkung (Definition gem. DIN 4150). Als *Körperschall* hingegen werden Schwingungen der Bausubstanz im bauakustischen Bereich von 16 ... 2000 (4000) Hz bezeichnet. Oft wird in der Literatur der Begriff Körperschall auch als Synonym für die Erschütterungen verwendet [17][19]. Der innerhalb eines Gebäudes infolge des Körperschalls entstehende Luftschall (Schwingungsanregung von Decken und Wänden mit der damit verbundenen Schallabstrahlung) wird *sekundärer Luftschall* genannt. Die Abstrahlung von Erschütterungen wird als *Emission*, der Eintrag in eine Struktur als *Immission* und die Übertragung der Schwingungsenergie über den Baugrund als *Transmission* bezeichnet.

Die Einwirkungen von Erschütterungen auf Menschen werden in der DIN 4150 behandelt und auf der Basis des Wahrnehmungsvermögens beim Menschen festgelegt, welches von mehreren physiologischen aber auch psychologischen Faktoren abhängt. Die Intensität der Wahrnehmung wird bestimmt durch die Amplitude der kinematischen Größen, die Dauer der Schwingeinwirkung sowie den Frequenzgehalt. Die Ermittlung des zulässigen Erschütterungspegels erfolgt nach DIN 4150-2 anhand einer relativ aufwendigen, jedoch eindeutig festgelegten Prozedur.

Alternativ zur Verwendung der kinematischen Größe (Geschwindigkeit) als Erschütterungskenngröße wird oft in Anlehnung an die Akustik der Schnellepegel L_v angegeben:

$$L_v = 20 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) \text{ in dB} \quad (1)$$

wobei v der Effektivwert der Schwingschnelle in mm/s und $v_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ mm/s die Bezugschnelle sind. In Pegeldarstellung erfolgt auch die Angabe der Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen mittels des Einfügungsdämmmaßes (Schnellepegeldifferenz).

Als sekundärer Luftschall wird der von den sechs Raumbegrenzungsflächen abgestrahlte Luftschall bezeichnet, als Körperschall hingegen die Schwingungen der Begrenzungsflächen, d.h. die Ursache für den Sekundärschall. Sekundärer Luftschall wird als Schalldruckpegel L_p dargestellt:

$$L_p = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ in dB} \quad (2)$$

wobei p der Schalldruck und $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa ein Referenzdruck (normierte Hörschwelle) sind.

Die Merkmale der Erschütterungsquellen bei ober- und unterirdischen Verkehrswegen hängen von dem Zugtyp und der Oberbauform sowie von den Eigenschaften des Baugrundes als Übertragungsmedium ab. Während die Methoden zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen inzwischen ausgereift sind und allgemein akzeptierte Kriterien aufgestellt worden sind, stellt die Prognose des Erschütterungsniveaus in Gebäuden nach wie vor eine schwierige und komplexe Aufgabe dar. Praxisnahe Prognoseverfahren bestehen aus einer Kombination von Messungen und numerischen Berechnungen. Letztere werden insbesondere dann eingesetzt, wenn Messungen nicht möglich und/oder Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Erschütterungsübertragung durch den Baugrund bis zum Gebäudefundament bestehen bzw. Ausführungsvarianten zu untersuchen sind.

3.2 Übertragung von Erschütterungen zum Immissionsort

Entlang des Übertragungsweges vom Gleis zu den Gebäudefundamenten schwächen sich die Erschütterungen infolge Abstrahlungs- und Materialdämpfung ab. Weiterhin reduziert sich das Erschütterungsniveau beim Übergang vom Boden auf das eingebettete Fundament bedingt durch die kinematische Interaktion mit dem umliegenden Boden. Die Erschütterungen des Gebäudefundamentes erreichen dann die oberen Stockwerke. Infolge des Eigenschwingverhaltens der Geschossdecken und der Wände werden sie dadurch mehr oder weniger verstärkt. Die angeregten Deckeneigenschwingungen sind schließlich die Größen, die es zu prognostizieren und zu beurteilen gilt, unter Einbeziehung des abgestrahlten sekundären Luftschalls.

Die Erschütterungsausbreitung kann mittels Übertragungsfunktionen oder in Pegelschreibweise formuliert werden. Bei der ersten Variante wird die Antwort am Immissionsort als kinematische Größe, z.B. Schwinggeschwindigkeit $v(f)$, dadurch bestimmt, dass die Erregung am Emissionsort (z.B. Kraft $P(f)$ auf Gleisoberkante) mit einer Reihe von frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen $H_i(f)$ multipliziert wird. Diese Übertragungsfunktionen geben das Schwingungsübertragungsverhalten des Oberbausystems, des Untergrunds als Ausbreitungsmedium, des Übergangs vom Untergrund auf die Gebäudefundamente sowie die Ausbreitung im Gebäude wieder.

In der Praxis wird oft das Emissionsspektrum an der Quelle $v_Q(f)$ in Form eines Schwinggeschwindigkeitsspektrums angegeben bzw. gemessen und das Ausbreitungsgesetz als Produktgesetz mittels vier Übertragungsspektren formuliert:

$$v(f) = v_Q(f) \cdot [V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot V_4] \quad (3)$$

wobei $V_i(f)$ die Veränderungen entlang des Übertragungsweges wiedergeben: V_1 infolge der Wechselwirkung mit der direkten Umgebung der Quelle, V_2 infolge der geometrischen und hysteretischen Dämpfung im Boden sowie möglicher Störungen bzw. Schichtung entlang des Ausbreitungsweges bis zu den Gebäudefundamenten, V_3 die Veränderungen beim Übergang vom Boden in das Gebäude und V_4 diejenigen infolge der Ausbreitung im Gebäude selbst. Soll lediglich das Erschütterungsniveau beurteilt werden, ist die Ermittlung der Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeiten ausreichend.

3.3 Einwirkung von sekundärem Luftschall auf Menschen

Zur Beurteilung werden verschiedene Kenngrößen verwendet. Aus dem zeitvariablen Schalldruckpegelverlauf $L_p(t)$ wird der äquivalente Dauerschallpegel L_{peq} , welcher auch als Mittelungspegel L_{pm} bezeichnet wird, ermittelt:

$$L_{peq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] \text{ in dB} \quad (4)$$

Da die Schallimmissionen meistens aus mehreren Ereignissen (Schienenverkehr) bestehen, wird zusätzlich der mittlere Maximalpegel der Ereignisse ermittelt:

$$L_{p_{max,m}} = 10 \cdot \log \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{p_{max,i}}/10} \quad (5)$$

wobei N die Anzahl der Ereignisse und $L_{p_{max,i}}$ die einzelnen Maximalpegel sind. Diese energetische Mittelung führt dazu, dass hohe Pegel stärker berücksichtigt werden, als dies bei einer linearen Mittelung der Fall wäre. Die Betrachtung erfolgt über einen bestimmten Zeitraum, z.B. 16 Tagesstunden. Bei der Zeitbewertung des Schallsignals wird meistens die Einstellung „fast“ (F) gewählt und eine A-Frequenzbewertung vorgenommen, so dass zur genauen Bezeichnung der Index AF hinzugefügt werden muss $L_{pAFmax,m}$.

Beim Schienenverkehr wird der Beurteilungspegel für die Tages- und die Nachstunden aus dem Mittelungspegel (äquivalenter Dauerschallpegel) unter evtl. Berücksichtigung eines Abschlags (Schienenbonus) ermittelt.

Die Beurteilung des sekundären Luftschalls ist bis dato weder gesetzlich festgelegt noch in einer DIN-Norm oder VDI-Richtlinie angegeben. Als Anhaltswerte für den zumutbaren Schallinnenpegel in Räumen können die aus den Vorgaben der 24. BImSchV [6] ableitbaren Richtwerte angesetzt werden. Dabei wird als Pegel der äquivalente Dauerschallpegel L_{pAeq} über die Beurteilungszeit tags und nachts herangezogen.

In der VDI-Richtlinie 2719 werden Anhaltswerte für in Aufenthaltsräume von außen eindringenden Schall genannt, die nicht überschritten werden sollten. Sie bilden die Grundlage für das erforderliche Schalldämmmaß der Fenster. Wird angenommen, dass der von den Raumbegrenzungsflächen abgestrahlte Sekundärluftschall nicht stärker sein soll als

der von außen eindringende direkte Luftschall, können die Anhaltswerte nach VDI 2719 zur Beurteilung angesetzt werden. Für Neubauten wird die Einhaltung der unteren Grenzen angestrebt.

In der TA-Lärm [46] werden unabhängig von der Lage und Nutzung Immissionsrichtwerte für Innenräume genannt.

Die in diesen Regelwerken angegebenen Richtwerte sind als äquivalenter Dauerschallpegel L_{pAeq} (Mittelungspegel) zu verstehen. Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen (L_{pAFmax} -Werte) dürfen diese Immissionsrichtwerte um ein vorgegebenes Maß nicht überschreiten. Obwohl die TA-Lärm [46] nur für Anregung aus gewerblichen Anlagen gilt, wird sie oft für die Beurteilung des tieffrequenten sekundären Luftschalls aus unterirdischen Schienenverkehrswegen angesetzt.

Weitere Vorschläge zu Anhaltswerten werden in [28] zusammengestellt. Über die Handhabung in der Schweiz wird in [41] berichtet, wobei Zielwerte in Abhängigkeit von der erwünschten Komfortstufe vorgeschlagen werden.

Die Zusammenhänge zwischen Erschütterungsimmissionen und sekundärem Luftschall sind sehr komplex und eine messtechnische Erfassung ist aufwendig. Deswegen wird meistens eine rechnerische Abschätzung vorgenommen. Eine Möglichkeit ist die Anwendung der folgenden frequenzabhängigen Beziehung bei Annahme eines diffusen Schallfeldes

$$L_{pA}(f) = L_{vA}(f) + 10 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot S}{A(f)}\right) + 10 \cdot \log(\sigma(f)) \quad \text{in dB(A)} \quad (6)$$

wobei L_{pA} der A-bewertete spektrale Schalldruckpegel im Raum, L_{vA} der A-bewertete spektrale Körperschallschnellepegel der Raumbegrenzungsflächen, S die Größe der schwingungserregten Fläche, A die äquivalente Absorptionsfläche des Raumes und σ der Abstrahlgrad sind. Die einzelnen Parameter können anhand von raumakustischen Erfahrungswerten ermittelt werden.

Eine weitere Alternative beruht auf einer Regressionsrechnung von Ergebnissen umfangreicher Untersuchungen in Wohngebäuden bei Schienenverkehr mit S- und Fernbahnen, [43]. Als Eingangsgröße für den Körperschall wird der in Fußbodenmitte des betrachteten Raums gemessene, energetisch gemittelte Terzschnellepegel verwendet. Repräsentative Messergebnisse sind in **Abbildung 4** dargestellt. Die Unterscheidung nach Zugattungen ergab nur geringfügige Veränderungen, sodass lediglich eine Trennung nach Deckentyp (Beton- und Holzbalkendecke) vorgenommen wurde. Die resultierenden spektralen Korrelationen werden durch folgende Gleichung ermittelt, wobei f_T die Terz-Mittenfrequenz ist und C_1 und C_2 frequenzabhängig bestimmt werden, siehe unten:

$$L_{pA}(f_T) = C_1(f_T) + C_2(f_T) \cdot L_{vA}(f_T) \quad \text{in dB(A)} \quad (7)$$

Durch Bildung der Summenpegel kann anschließend der mittlere Maximalpegel für jede Anregungsart (Zugtyp) berechnet werden. Diese mittleren Maximalwertpegel werden den Anhaltswerten der VDI 2719 gegenübergestellt. Die unter Berücksichtigung der Einwirkungszeiten berechneten Mittelungspegel können anhand der Vorgaben der 24. BImSchV [6] bewertet werden.

Bei der vereinfachten Methode hingegen wird eine einzige Beziehung nach Gl. (7) über den gesamten Frequenzbereich verwendet mit den folgenden Konstanten, [43]:

Betondecken: $C_1 = 15,8 \text{ dB(A)}$; $C_2 = 0,60$
 Holzbalkendecken: $C_1 = 19,9 \text{ dB(A)}$; $C_2 = 0,47$

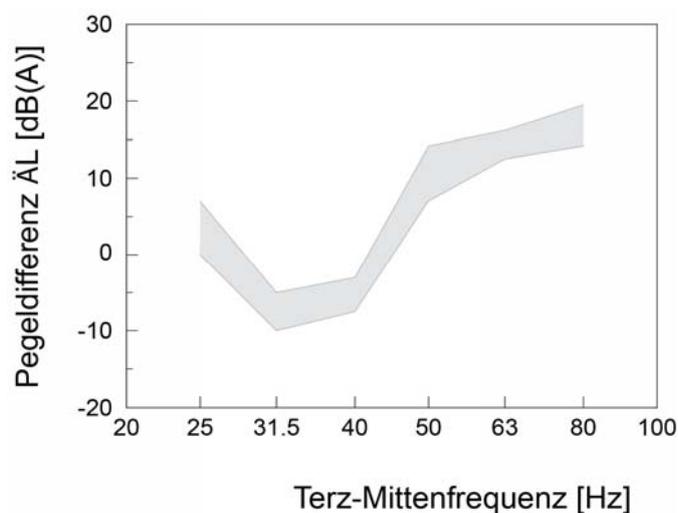


Abbildung 4: Spektrale Pegeldifferenz zwischen dem sekundären Luftschallpegel eines typischen Raumes mit Betondeckenaufbau durch Fernbahn [43]

4 Boden-Bauwerk-Interaktion und strukturdynamische Systemeigenschaften

4.1 Theoretische Untersuchungen

Der Energieeintrag infolge einer Erschütterung in das Gebäude hängt in hohem Maße von der Ankopplung der Gebäudestruktur an den Boden ab. Hierbei spielt nicht nur die Einbettungstiefe des Gebäudes im Untergrund eine Rolle, auch durch die Art der Gründung kann sich beispielsweise der Frequenzgehalt des imitierten Signals deutlich von dem der Emissionsquelle unterscheiden. Die Erfassung dieser komplexen Wechselwirkungen erfolgt mit Hilfe analytischer und numerischer Methoden zur dynamischen Antwort von Boden-Gründung-Bauwerk-Systemen. Anhand von Messungen an realen Gebäuden wurden einerseits typische Frequenzspektren der Boden-Bauwerk-Interaktion erkannt. Teilweise führen die Messergebnisse jedoch auch zu bislang wenig beachteten Effekten.

Beim Übergang der Erschütterungen vom umgebenden Boden auf das Bauwerk bestimmt das dynamische Verformungsverhalten des Bauwerks, ob die Erschütterungen verstärkt oder abgemindert werden. Die Schnittstelle wird durch die Gründung definiert. Einflussparameter für diese dynamische Boden-Bauwerk-Wechselwirkung sind, neben der Frequenz, die Eigenschaften des umgebenden Bodens (Verformungsmodul, Dämpfungskapazität) sowie die Geometrie der Gründungskörper und deren Einbettungsverhältnisse in den Boden. Die relative Steifigkeit zwischen Boden und Bauwerk samt seiner Gründung bestimmt die Größe und den dominanten Frequenzbereich der dynamischen Antwort. So sind z.B. Gründungen auf Einzel- und Streifenfundamenten generell als aufgelöste, weiche Flachgründungen anzusehen, während Platten-, Pfahl- und Pfahl-Plattengründungen steifere Gründungsarten sind. Beim Übergang auf starre Strukturen werden Schwingungen aufgrund der kinematischen Wechselwirkung verringert, während der Übergang auf weiche Gebäudestrukturen zu einer Abminderung infolge der Bauwerksträgheit führt. Der betroffene Frequenzbereich ist von der Steifigkeit abhängig.

Angaben zu frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen zwischen Boden und Fundament sind selten in der Fachliteratur. Auswertungen von Messergebnissen werden vereinzelt in Veröffentlichungen in Form von Übertragungsspektren angegeben [42]. Niedrige Faktoren sind eher schweren Gebäuden zuzuordnen. Praxisrelevante Ergebnisse liefert eine Auswertung von Messberichten der Deutschen Bahn in [60] mit Mittelwerten von ca. 0,67 für Frequenzen $f < 16$ Hz, abnehmend bis 0,37 bei 31,5 Hz und wieder zunehmend auf 0,67 bis 63 Hz, [Abbildung 5](#).

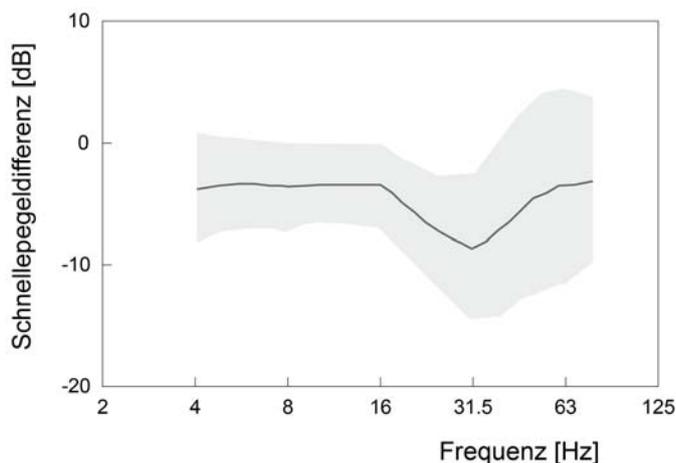


Abbildung 5: Terz-Schnellepegeldifferenz Fundament/Boden bei der Übertragung von Erschütterungen auf Gebäude. Mittelwert und Standardabweichung aus Messungen der DB an 135 zwei- und dreigeschossigen Gebäuden [60]

Eine genauere Abbildung der Wechselwirkung erfolgt mittels eines Feder-Dämpfer-Modells, wobei die Federn die Nachgiebigkeit des Bodens und die Dämpfer die Abstrahlung der Schwingungsenergie beschreiben. Gängige Lösungen hierfür bestehen für Fundamente auf der Baugrundoberfläche aber auch Gebäude gegründet auf Pfählen.

Die dynamischen Steifigkeitsfunktionen werden als Produkt der statischen Werte (sehr niedrige Frequenzen) und frequenzabhängiger Funktionen ermittelt, [10], [55]. Eine Einbettung der Gründungskörper in den Boden bewirkt eine Erhöhung der Steifigkeit aufgrund der erhöhten Kontaktfläche zum umgebenden Baugrund aber auch der mit der Tiefe generell zunehmenden Bodensteifigkeit. Der erste Effekt führt zu einer deutlichen Erhöhung der Abstrahlungsdämpfung. Formeln zur Abschätzung des Einflusses der Einbettung finden sich in [15]: Es zeigt sich, dass der Anstieg der Fundamentsteifigkeit stark vom Schwingungsmodus abhängt: während bei vertikalen Schwingungen dieser Anstieg ca. 30% beträgt, kann bei Kippschwingungen ein Anstieg auf das 4-fache des Wertes für ein Oberflächenfundament erfolgen. Gleiches gilt für die Dämpfungswerte.

Ein weiterer Effekt der Einbettung betrifft die Weiterleitung der Erschütterungen in das Gebäude. Die Einbettung führt zu einer verstärkten Schallanregung der Decken und Wände in höheren Frequenzbereichen. Die Versteifung des Systems, insbesondere der aufgehenden Wände, führt zu einer phasengleichen Anregung der Decken und dadurch zu höherfrequenten Gebäudeschwingungen, so dass sich die Deckenamplituden erhöhen, [39].

Die Lagerung von Flachgründungen wird mittels Feder- und Dämpferelementen abgebildet. Diese Feder- und Dämpferelemente sind abhängig von der Frequenz und der Grundrissgeometrie. Ihre Bestimmung erfolgt mit Hilfe höherer Methoden der Kontinuumsmechanik. Sie werden allgemein als dynamische Steifigkeiten bezeichnet.

Aus numerischen Untersuchungen wurden Näherungsformeln für die dynamischen Steifigkeiten von Flachgründungen entwickelt. Der Grundwert betrifft Gründungen auf der Oberfläche des Baugrundes; der Einfluss der Einbettung wird durch einen Erhöhungsfaktor berücksichtigt.

Die komplexe frequenzabhängige Steifigkeit S_z der Flachgründung kann wie folgt beschrieben werden.

$$S_z = \bar{K}_z + i\omega C_z \quad (8)$$

wobei ω die Kreisfrequenz ist. Zunächst wird die statische Steifigkeit K_z berechnet. Für eine Flachgründung mit der Grundfläche A_b und der Länge $2L$ kann folgende Näherungsformel verwendet werden [14], [15], [35]:

$$K_z = \frac{2GL}{1-\nu} \left(0,73 + 1,54 \left(\frac{A_b}{4L^2} \right)^{0,75} \right) \quad (9)$$

wobei G der Schubmodul und ν die Poissonzahl des Bodens sind.

Der Einfluss der Einbindetiefe D wird wie folgt berücksichtigt:

$$\frac{K_{z, \text{eingebettet}}}{K_{z, \text{Oberfläche}}} = \left[1 + \frac{1}{21} \frac{D}{B} (1 + 1,3\chi) \right] \left[1 + 0,2 \left(\frac{A_w}{A_b} \right)^{2/3} \right] \quad (10)$$

wobei A_w die aktuelle Kontaktfläche zwischen Gründungsplatte/Fundament und Boden mit Dicke d ist: $A_w = d \cdot \text{Umfang}$.

$$\chi = \frac{A_b}{4L^2} \quad (11)$$

Der Einfluss der Frequenz wird durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt:

$$\bar{K}_z = k_z \cdot K_z \quad (12)$$

Für die Federsteifigkeit bis zu einem Verhältnis Länge/Breite = 4 ergeben sich bei $a_0 = 2$ Werte für k_z zwischen 0,6 und 0,8, wobei die dimensionslose Frequenz a_0 ist wie folgt definiert ist:

$$a_0 = \frac{\omega \cdot B}{V_S} \quad (13)$$

wobei B die kürzeste Seitenlänge und V_S die Scherwellengeschwindigkeit im Boden sind. Der Einfluss der Einbettung auf den dynamischen frequenzabhängigen Korrekturfaktor wird für die praktische Anwendung in erster Näherung vernachlässigt.

Die Dämpfungskonstante C_z kann wie folgt geschrieben werden:

$$C_z = (\rho V_{La} A_b) \cdot c_z \quad (14)$$

wobei ρ die Dichte des Bodens ist und

$$V_{La} = \frac{3,4}{\pi(1-\nu)} V_S \quad (15)$$

Die dimensionslose viskose Dämpfungskonstante c_z kann in erster Näherung als frequenzunabhängig zu 1 angesetzt werden.

Der Einfluss der Einbettung auf die Dämpfungskonstante wird wie folgt erfasst:

$$\frac{C_{z, \text{eingebettet}}}{C_{z, \text{Oberfläche}}} = 1 + \rho V_S A_w \quad (16)$$

Bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Fundamentkörper existieren nur wenige Studien, [4]. Die Abnahme der Steifigkeit einer Fundamentgruppe mit kleiner werdendem Abstand der einzelnen Fundamente zueinander hängt neben den Bodeneigen-

schaften zusätzlich von der Frequenz bzw. dem Verhältnis zwischen dem äquivalenten Durchmesser der Fundamentgruppe und der Scherwellenlänge der Anregung ab, [4]. Ist die Scherwellenlänge kleiner als der äquivalente Radius der Fundamentgruppe, beträgt die Steifigkeit der Gruppe ca. die Summe der einzelnen Steifigkeiten. Bei größeren Scherwellenlängen reduziert sich infolge der Wechselwirkung die Gesamtsteifigkeit. Als Grenzfall wird bei sehr niedrigen Frequenzen und verschwindendem Fundamentabstand die Gesamtsteifigkeit durch Multiplikation der Steifigkeit des Einzelfundamentes mit der Wurzel der Fundamentanzahl angegeben.

In einer ersten Näherung wird der Einfluss der Wechselwirkung in Abhängigkeit vom Verhältnis der tatsächlichen Fundamentfläche $\sum A_F$ zur Grundrissfläche des Gebäudes A_B ermittelt. Korrekturfaktoren für den Fall von auf Einzelfundamenten gegründeten Skelettbauten werden hier aus den Ergebnissen in [4] für $\sum A_F/A_B \geq 0,25$ approximiert:

$$\frac{k}{k_B} = 1,08 - \exp\left(-2,5\left(\sum \frac{A_F}{A_B}\right)\right) \quad (17)$$

$$\frac{c}{c_B} = 0,03 + 0,9 \cdot \left(\sum \frac{A_F}{A_B}\right)^{2,8} \quad (18)$$

wobei k_B und c_B die Werte der Federsteifigkeit und Dämpfungskonstante für ein äquivalentes Kreisfundament des Radius $\sqrt{A_B/\pi}$ sind. Entsprechende Ergebnisse für Streifenfundamente und Fundamentrost werden in [4] angegeben.

Der Einfluss einer expliziten Schichtung des Baugrundes bzw. der Druckabhängigkeit des Verformungsmoduls zeigt sich sowohl bei der Frequenzabhängigkeit der Fundamentsteifigkeit als auch bei der Abstrahlungsdämpfung. Hierzu werden Computerprogramme eingesetzt, da die Angabe von Näherungsformeln wegen der großen Anzahl der Parameter nicht möglich erscheint. Generell gilt, dass je steifer die Unterlage der Bodenschicht, desto kleiner ist die Dämpfung in der weicheren Schicht. Die Schichtresonanz führt zu einer Verringerung der Fundamentsteifigkeit in diesem Frequenzbereich.

Bei wenig tragfähigem Baugrund werden Pfahlgründungen eingesetzt. Wegen der Anzahl der Parameter (Pfahllänge, -durchmesser, -entfernung, Erregerfrequenz) ist die Lösung des dynamischen Wechselwirkungsproblems viel komplizierter als für Flachgründungen. Des Weiteren existieren für Pfahlgründungen keine geschlossenen Lösungen. Lediglich für einige Konfigurationen bestehen explizite Ausdrücke. Aus diesem Grund werden nachfolgend Pfahlgründungen ausführlicher betrachtet.

Bei Pfahlgruppen unter statischer vertikaler Belastung ist die Steifigkeit eines Pfahles in der Gruppe erheblich kleiner als die eines allein stehenden Pfahls. Numerische Untersuchungen an vertikal schwingenden Pfahlgruppen zeigen ein – im Vergleich zum Einzelpfahl – stark frequenzabhängiges Verhalten. Die statischen Steifigkeiten werden durch Anwen-

zung von frequenzabhängigen Interaktionsfaktoren, die abhängig vom Pfahlabstand und der Wellengeschwindigkeit im Boden ermittelt werden, multipliziert, [23]. Die Berechnung der zugehörigen frequenzabhängigen Feder- und Dämpferkonstante erfordert den Einsatz von numerischen Algorithmen. Eine erstaunlich gute Wiedergabe der genauen Lösung für homogene Böden ist mit dem Verfahren nach Dobry/Gazetas zu erreichen, welches hier zugrunde gelegt wird. Im Einzelnen sieht die Berechnung wie folgt aus:

Die komplexe Steifigkeit des Einzelpfahls lautet:

$$K_z^S(f) = \bar{K}_z^S(f) + i \cdot a_0 \cdot C_z^S(f) = F^S / w^S \quad (19)$$

wobei

$$a_0 = \frac{\omega \cdot d}{V_S} \quad (20)$$

die dimensionslose Frequenz ist. ω ist die Kreisfrequenz, d ist der Pfahldurchmesser und V_S die Scherwellengeschwindigkeit im Boden.

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (21)$$

mit G als Schubmodul und ρ als Dichte des Bodens.

Die komplexe Steifigkeit der Pfahlgruppe wird analog hierzu geschrieben [12]:

$$K_z^G(f) = \bar{K}_z^G(f) + i \cdot a_0 \cdot C_z^G(f) = F^G / w^G \quad (22)$$

Für die Federsteifigkeit des alleinstehenden Einzelpfahls wird eine frequenzunabhängige Form als zutreffend angesetzt:

$$k_z = 1,9 \cdot E \cdot d \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{2/3} \left(\frac{E_p}{E}\right)^{-(L/d)(E_p/E)} \quad (23)$$

wobei E_p der Elastizitätsmodul und L die Länge des Pfahls sind.

Für die viskose Dämpfungskonstante wird angesetzt:

$$c_z = a_0^{-1/5} \cdot \rho \cdot V_S \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot r_d \quad (24)$$

wobei

$$r_d = 1 - \exp\left(-\left(E_p / E\right)\left(L / d\right)^{-2}\right) \quad (25)$$

Als Interaktionsfaktor wird definiert das Verhältnis zwischen der zusätzlichen Setzung von Pfahl q hervorgerufen durch Pfahl p und der Setzung des Pfahls q unter eigener dynamischer Belastung:

$$\alpha_v = \alpha_v(f) = w_{qp} / w_{qq} \quad (26)$$

Unter der Annahme, dass die Verschiebung $w(r)$ im Abstand r von der Pfahlachse

$$w(r) \approx A \frac{1}{\sqrt{r}} \exp(-\beta \cdot \omega \cdot r / V_S) \cdot \exp\left[i \cdot \omega \left(t - \frac{r}{V_S}\right)\right] \quad (27)$$

ist, ergibt sich:

$$w_{qq} \approx A \frac{1}{\sqrt{d/2}} \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t) \quad (28)$$

$$w_{qp} \equiv w(r=S) = A \frac{1}{\sqrt{S}} \exp(-\beta \cdot \omega \cdot S / V_S) \cdot \exp\left[i \cdot \omega \left(t - \frac{S}{V_S}\right)\right] \quad (29)$$

wobei S der Achsabstand zwischen den Pfählen ist und β die hysteretische Dämpfung des Bodens. Somit erhält man:

$$\alpha_v \approx \left(\frac{S}{d/2}\right)^{-1/2} \cdot \exp(-\beta \cdot \omega \cdot S / V_S) \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot S / V_S) \quad (30)$$

Für eine Pfahlgruppe bestehend aus 2x2 Pfählen erhält man für die Steifigkeit der Gruppe:

$$K_z^G = \frac{4K_z^S}{1 + 2\alpha_v(S) + \alpha_v(S\sqrt{2})} \quad (31)$$

Entsprechend kann man vorgehen, um größere Pfahlgruppen zu berechnen. Die Berücksichtigung der Interaktion zwischen allen Pfählen innerhalb der Gruppe führt zu einem starken Abfall der Steifigkeit, was für die Praxisanwendung nicht zutreffend ist. Somit wird empfohlen, und in den nachfolgenden Berechnungen auch übernommen, die Steifigkeit des Einzelpfahles anzusetzen und lediglich mit dem Interaktionsfaktor für eine 3x3 Gruppe abzumindern.

Typische Ergebnisse sind in [Abbildung 6](#) dargestellt. Man erkennt die starke Abhängigkeit der Interaktionsfaktoren und somit der dynamischen Steifigkeit der Pfahlgründung von der Erregerfrequenz. Geringe Abweichungen bei der Ermittlung der anregenden Frequenz können zu dramatischen Veränderungen des Schwingungsverhaltens führen.

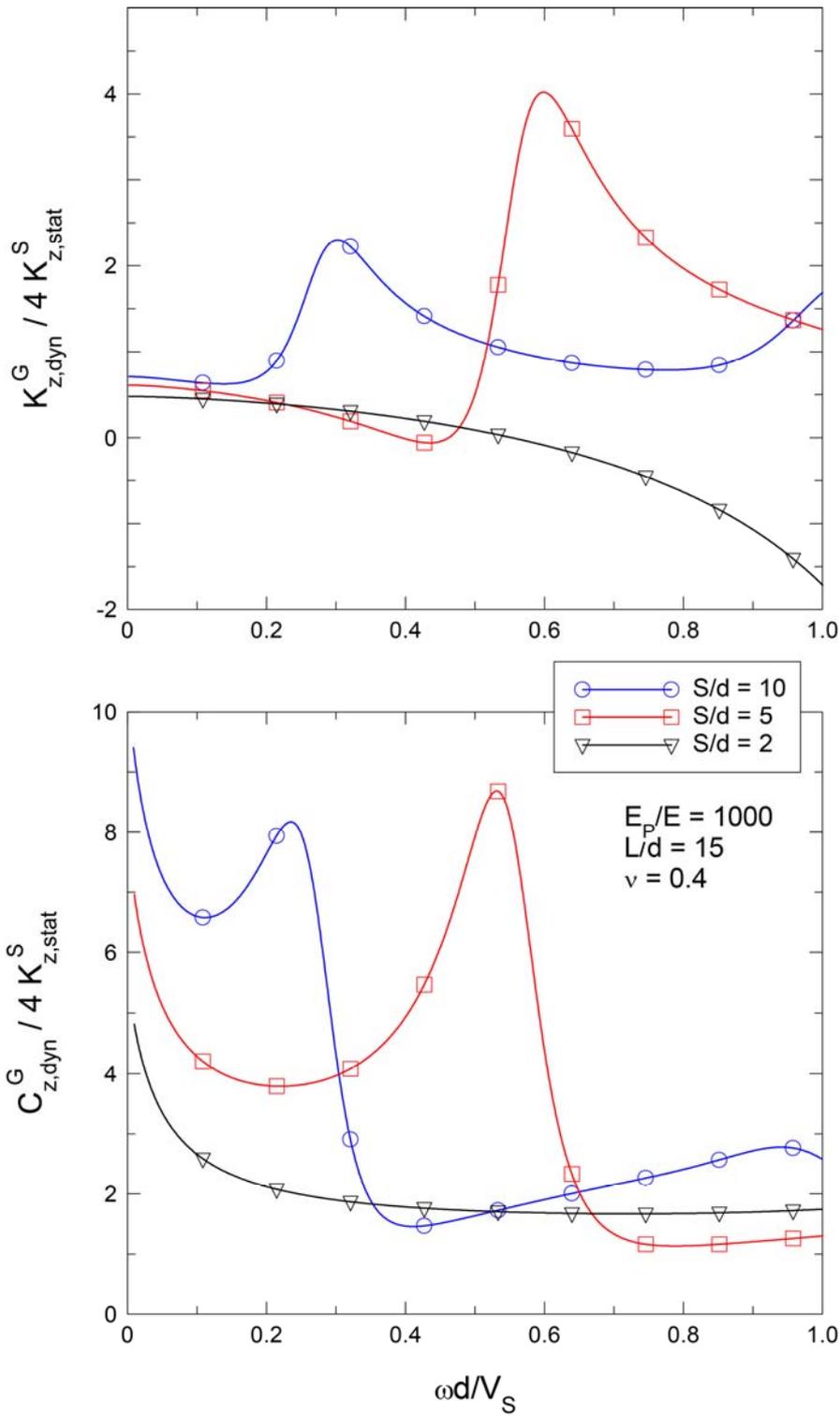


Abbildung 6: Bezogene vertikale dynamische Steifigkeit und Dämpfung (Gruppenfaktor) für eine 2x2 Pfahlgruppe

Obige Formeln für die frequenzabhängigen Feder- und Dämpferkonstanten berücksichtigen nicht die kinematische Interaktion zwischen den einzelnen Gründungselementen infolge des einfallenden Wellenfeldes aus der betrachteten Erschütterungsquelle. Untersuchungen und Empfehlungen in der internationalen Fachliteratur deuten darauf hin, dass diese Interaktion in erster Näherung vernachlässigt werden kann. Was jedoch unbedingt

in die Modellierung einbezogen werden sollte, ist die zeitversetzte Anregung der einzelnen Gründungselemente, bedingt durch deren unterschiedliche Positionen im Gründungsrastrer. Hierzu wird das bekannte Abstrahlungsgesetz für die Intensität der Schwingung an der Oberfläche herangezogen. Man unterscheidet zwischen zwei Formulierungen:

vereinfachte globale Erfassung

$$v = v_1 \left(\frac{r_1}{r} \right)^{n(f)} \quad (32)$$

Superposition geometrischer Abstrahlung und Materialdämpfung

$$v = v_1 \left(\frac{r_1}{r} \right)^{n(f)} \exp\left(-\frac{2\pi D}{\lambda}(r-r_1)\right) \quad (33)$$

wobei r_1 eine Referenzentfernung mit der Schwinggeschwindigkeit v_1 ist, D das Dämpfungsverhältnis im Boden und λ die maßgebende Wellenlänge im Boden.

Die Erschütterungsquellen können als Punkt- oder Linienquelle abgebildet werden; meistens als Kombination von beiden. Jeder Quellentyp wird durch eine andere Ausbreitungscharakteristik gekennzeichnet. Ein weiterer Einflussfaktor ist die dominante Frequenz im Spektrum, die sich durch Filterungseffekte im Boden entlang des Ausbreitungsweges in Richtung niedrigerer Frequenzen verschiebt. Dies führt zur Hervorhebung von Frequenzen, die sich in der Nähe der Eigenfrequenzen von Gebäuden bzw. Gebäudeteilen befinden, und somit zur Verstärkung des die Gründung des Bauwerks beanspruchenden Erschütterungssignals.

Anhaltswerte für den frequenzabhängigen Exponenten $n(f)$ bei Verkehrserschütterungen lauten:

0,5/0,3/0,75/1,3/2,2 bei 8/16/32/63/125 Hz

Ein weiterer Punkt betrifft die mögliche Reduktion des Erschütterungssignals beim Übergang auf die Pfähle. Hierzu wird ein einfaches praxisnahes Modell verwendet [32], was nachfolgend vorgestellt wird.

Die Wechselwirkung Pfahl-Boden wird durch ein Winkler-Medium modelliert. Die Reaktionsfedern und -dämpfer werden wie folgt frequenzabhängig angesetzt:

$$k_z = 0,6 \cdot E \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \sqrt{a_0}\right) \quad (34)$$

$$c_z = c_{z,Abstrahlung} + c_{z,hysteretisch} = 1,2 \cdot \pi \cdot a_0^{-1/4} \cdot \rho \cdot V_S \cdot d + \beta \frac{k_z}{\pi \cdot f} \quad (35)$$

Es werden folgende Wellenkennzahlen eingeführt:

$$\alpha_1 = \frac{2\pi}{V_R} \sqrt{1 - \psi_P^2} \quad , \quad \alpha_2 = \frac{2\pi}{V_R} \sqrt{1 - \psi_S^2} \quad (36)$$

$$\psi_S = \frac{V_R}{V_P} \quad , \quad \psi_P = \psi_S \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}} \quad (37)$$

wobei V_P die Kompressionswellengeschwindigkeit im Boden, V_R die Rayleighwellengeschwindigkeit im Boden und ν die Poissonzahl des Bodens sind.

Betrachtet wird ein Pfahl unter harmonischer erzwungener Schwingung infolge des Verschiebungsfeldes einer Rayleighwelle. Es wird nur die vertikale Schwingung berücksichtigt. Die Differentialgleichung für die vertikale Pfahlschwingung $W(z)$ infolge des vertikalen Verschiebungsfeldes $v(z)$ der einfallenden Rayleighwelle lautet:

$$W'' - \delta^2 \cdot W = -\varepsilon_z v(z) \quad (38)$$

mit

$$\delta^2 = \frac{k_z + i\omega c_z - m\omega^2}{E_P A_P} \quad (39)$$

$$\varepsilon_z = \frac{k_z + i\omega c_z}{E_P A_P} \quad (40)$$

wobei m die Masse des Pfahls und A_P die Querschnittsfläche des Pfahls ($A_P = \pi \cdot d^2 / 4$) sind.

Die vertikale Komponente des Verschiebungsfeldes der einfallenden Rayleighwelle ist:

$$v(z) = v_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot z) + v_2 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot z) \quad (41)$$

$$v_1 = -\sqrt{1 - \psi_P^2} \quad , \quad v_2 = \frac{2 - \psi_S^2}{2\sqrt{1 - \psi_S^2}} \quad (42)$$

Die axiale Kraft entlang des Pfahls (Stauchung positiv) beträgt:

$$P = -E_P A_P \cdot W' \quad (43)$$

Die Annahmen lauten: i) nur kinematische Interaktion, ii) schwimmender Pfahl. Die Randbedingungen werden wie folgt geschrieben:

$$\text{RB1: am Pfahlkopf } z = 0: P = 0 \quad (44)$$

$$\text{RB2: am Pfahlkopf } z = L: P = 0 \quad (45)$$

Die allgemeine Lösung der inhomogenen Differentialgleichung lautet:

$$W = W_{\text{hom}} + W_{\text{part}} \quad (46)$$

mit:

$$\text{homogene Lösung: } W_{\text{hom}}(z) = A \cdot \exp(\delta \cdot z) + B \cdot \exp(-\delta \cdot z) \quad (47)$$

$$\text{partikuläre Lösung: } W_{\text{part}}(z) = -\varepsilon_z \left[\frac{v_1 \cdot \exp(\alpha_1 \cdot z)}{\alpha_1^2 - \delta^2} + \frac{v_2 \cdot \exp(\alpha_2 \cdot z)}{\alpha_2^2 - \delta^2} \right] \quad (48)$$

Die Integrationskonstanten lassen sich aus den Randbedingungen RB1 und RB2 ermitteln:

$$A = \frac{\text{Det1}}{\text{Det}} \quad B = \frac{\text{Det2}}{\text{Det}} \quad (49)$$

mit

$$\text{Det1} = b_1 \cdot a_{22} - b_2 \cdot a_{12} \quad \text{Det2} = b_2 \cdot a_{11} - b_1 \cdot a_{21} \quad (50)$$

$$\text{Det} = a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21} \quad (51)$$

$$a_{11} = 1 \quad , \quad a_{12} = -1 \quad , \quad a_{21} = \exp(\delta \cdot L) \quad , \quad a_{22} = -\exp(-\delta \cdot L) \quad (52)$$

$$b_1 = -\frac{\varepsilon_z}{\delta} [h_1 + h_2] \quad b_2 = -\frac{\varepsilon_z}{\delta} [h_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot L) + h_2 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot L)] \quad (53)$$

$$h_1 = \frac{v_1 \cdot \alpha_1}{\alpha_1^2 - \delta^2} \quad , \quad h_2 = \frac{v_2 \cdot \alpha_2}{\alpha_2^2 - \delta^2} \quad (54)$$

Da die Pfahl-Boden-Interaktion komplex ist ($k_z + i c_z$), ist auch die Antwort des Pfahls komplex.

Wird für den Pfahl ein Spitzendruckwiderstand angesetzt, lautet die Randbedingung:

$$\text{RB2: am Pfahlfuß: } P = K_b \cdot (W - v) \Big|_{z=L} \quad (55)$$

wobei K_b die effektive Federsteifigkeit im Pfahlfuß ist. Nach Einführung von

$$K_b^* = \frac{K_b}{E_P A_P} \quad (56)$$

ergibt sich

$$a_{21} = \exp(\delta \cdot L) \cdot \left(1 + \frac{K_b^*}{\delta}\right), \quad a_{22} = -\exp(-\delta \cdot L) \left(1 + \frac{K_b^*}{\delta}\right) \left(1 + \frac{K_b^*}{\delta}\right) \quad (57)$$

$$b_2 = -\frac{\varepsilon_z}{\delta} \left[h_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot L) (\alpha_1 - K_b^*) + h_2 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot L) (\alpha_2 - K_b^*) \right] \\ + \frac{K_b^*}{\delta} \left[v_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot L) + v_2 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot L) \right] \quad (58)$$

Schließlich ermittelt sich die Verschiebung des Pfahlkopfs ($z = 0$) wie folgt:

$$W(0) = \frac{\varepsilon_z}{\delta \cdot \sinh(\delta \cdot L)} \left((h_1 + h_2) \cosh(-\alpha_2 \cdot L) - [h_1 \cdot \exp(-\alpha_1 \cdot L) + h_2 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot L)] \right) \\ - \varepsilon_z \left(\frac{h_1}{\alpha_1} + \frac{h_2}{\alpha_2} \right) \quad (59)$$

Im Grenzfall eines unendlich langen Pfahls ($L \rightarrow \infty$) vereinfacht sich die Lösung. Sie kann aus der allgemeinen Lösung durch eine Grenzwertbetrachtung numerisch ermittelt werden.

Am Pfahlkopf erhält man:

$$W(0) = \frac{\varepsilon_z}{\delta} \left(\frac{v_1}{\alpha_1 + \delta} + \frac{v_2}{\alpha_2 + \delta} \right) \quad (60)$$

Typische Ergebnisse sind in [Abbildung 7](#) dargestellt. Man erkennt die starke Abhängigkeit des Übertragungsfaktors Freifeld – Pfahlkopf. Dieser variiert mit dem Verhältnis Pfahllänge/Pfahldurchmesser sowie mit dem Verhältnis der Moduln des Pfahls und des umgebenden Bodens.

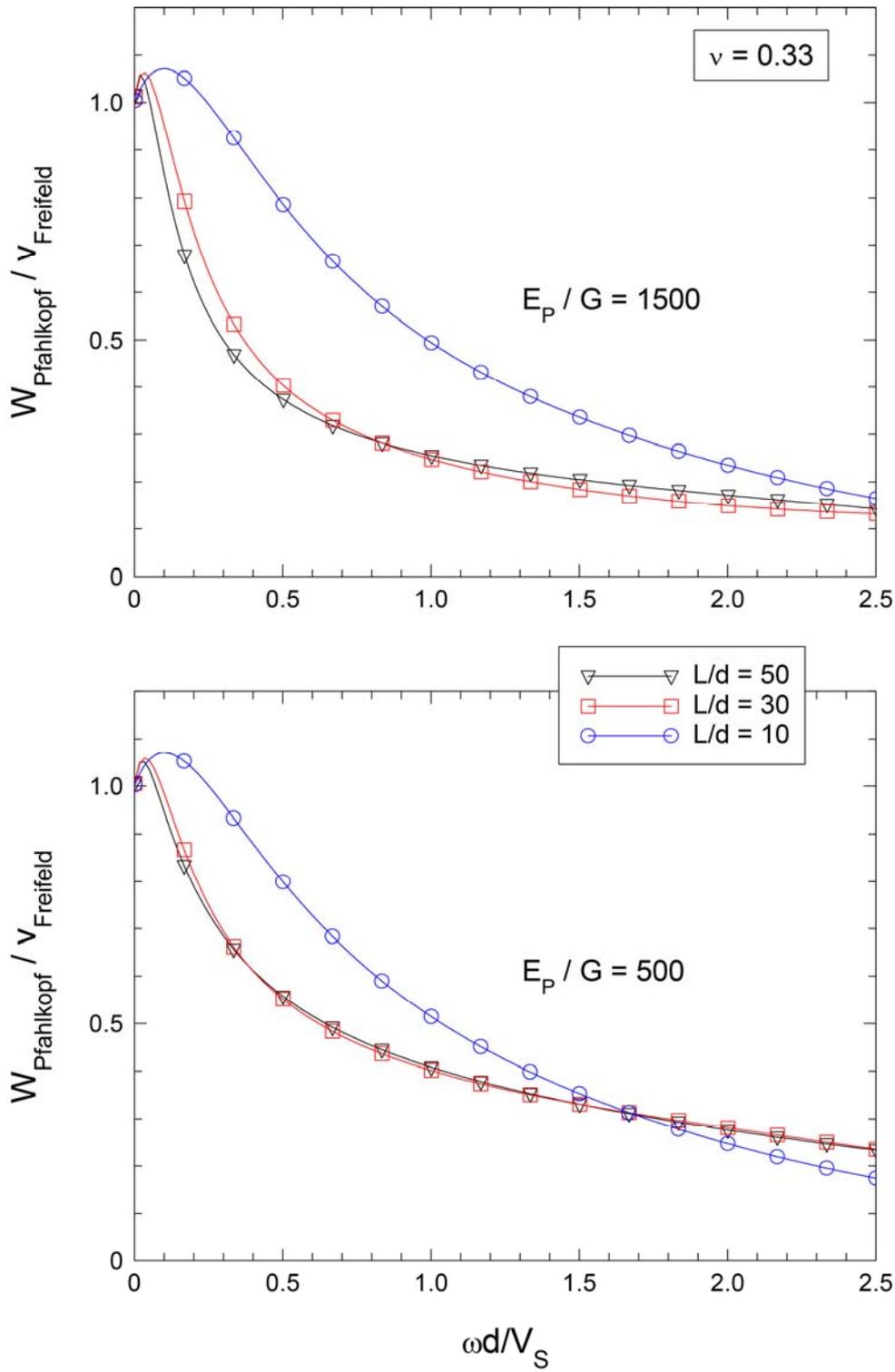


Abbildung 7: Kinematischer Übertragungsfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Pfahlschlankheiten und bezogene Bodensteifigkeiten

4.2 Experimentelle Untersuchungen

Die theoretischen Untersuchungen zeigten, dass die Wechselwirkung zwischen den Pfählen die globale Steifigkeit der Gründung dramatisch beeinflussen kann. Es wurde somit beschlossen, die Pfahl-Boden-Interaktion experimentell im Modellmaßstab und im 1:1 Maßstab zu untersuchen.

Laborversuche fanden in der Versuchshalle des FG Bodenmechanik und Grundbau statt. Großmaßstäbliche Versuche sind extrem aufwendig. Es wurde auf bereits durchgeführte dynamische Messungen mit Impulsanregung während eines Feldversuches in England zurückgegriffen. Die Auswertung wurde aktualisiert und um Gesichtspunkte, die das vorliegende Vorhaben betreffen erweitert. Insbesondere die Antwort auf höhere Frequenzen erforderte eine differenziertere Auswertung und Beurteilung der aufgenommenen Signale.

In den Laborversuchen wurden sieben Aluminiumpfähle in einen Sandboden kontrolliert eingebracht und der Zentrumpfahl anschließend mit einer harmonischen Beanspruchung zwischen 20 Hz und 200 Hz belastet. Es wurden der Einfluss von Pfahllänge sowie Abstand zur Anregung untersucht. Gemessen wurde die Beschleunigungen an den Pfahlköpfen – dieser Anteil wird letztendlich in das aufgehende Gebäude übertragen – sowie an der Geländeoberfläche. Die Messungen an der Geländeoberfläche stellen eine Referenzmessung zu dem Erregersignal dar. Bei dem Boden handelt es sich um einen typischen, gleichförmigen Sand, der in kontrollierter mitteldichter Lagerung eingebaut wurde. [Abbildung 8](#) zeigt die Konfiguration des Versuchsaufbaus. Die Pfahlgeometrie war wie folgt:

Pfahl-Nr.	Länge [cm]	Abstand zu P1 [cm]
P1	40	-
P2	40	8
P3	40	12
P4	40	20
P5	60	8
P6	60	12
P7	60	20



Abbildung 8: Versuchsaufbau im Labor mit eingebetteten Modellpfählen

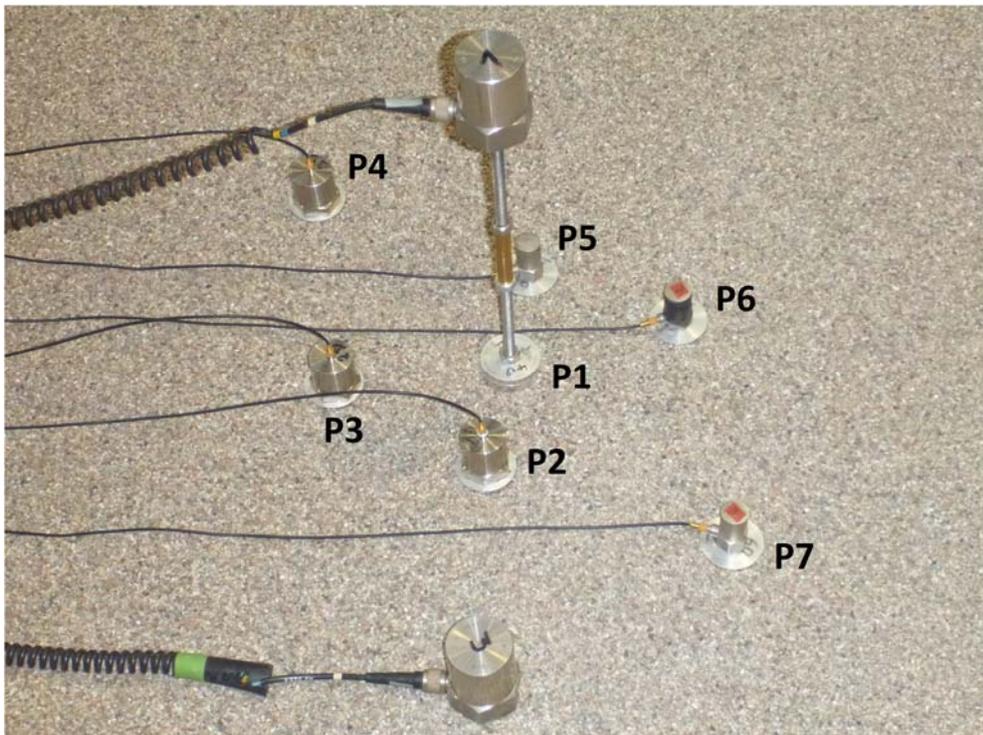


Abbildung 9: Anordnung der Pfähle in der Gruppe, P1 bezeichnet die Position der Anregung (der Shaker in P1 ist hier nicht dargestellt, siehe auch Abbildung 8)

Die Pfähle waren in den Abständen von $2 \cdot D$, $3 \cdot D$ und $5 \cdot D$ vom Zentrumpfahl angeordnet, wobei D der Pfahldurchmesser ist.

Eine Draufsicht der Pfahlgruppe mit Nummerierung der einzelnen Pfähle ist in [Abbildung 9](#) gegeben. Zwei typische Ergebnisse zeigt [Abbildung 10](#).

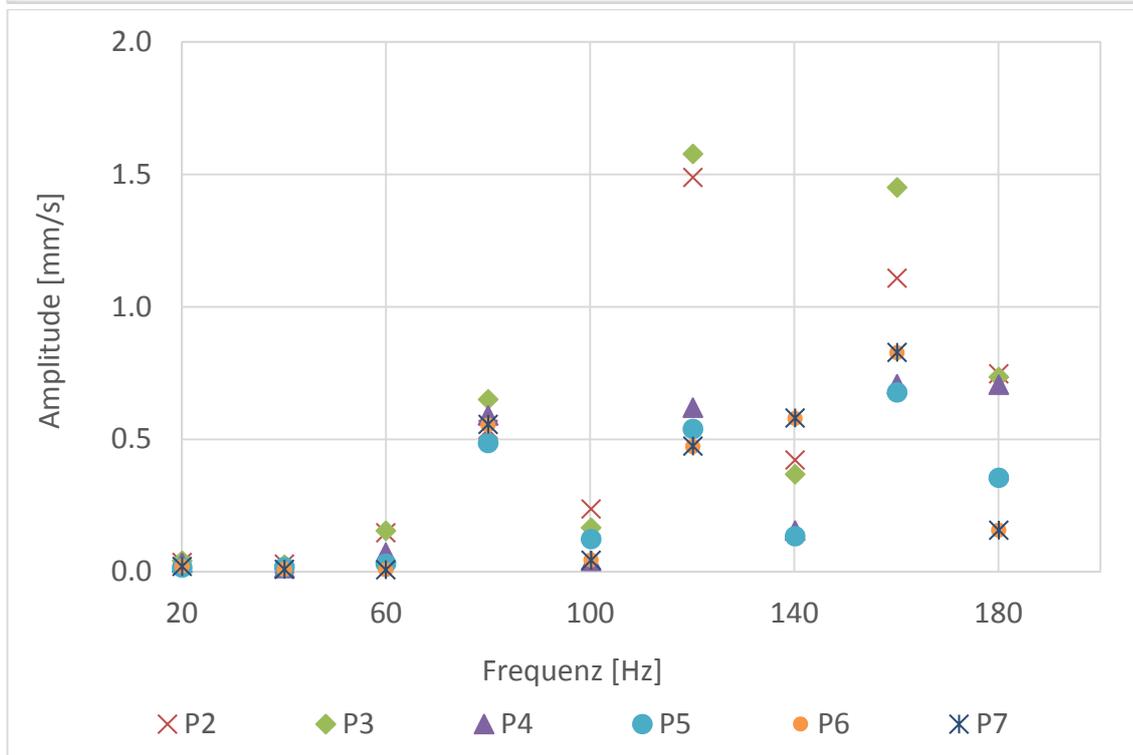
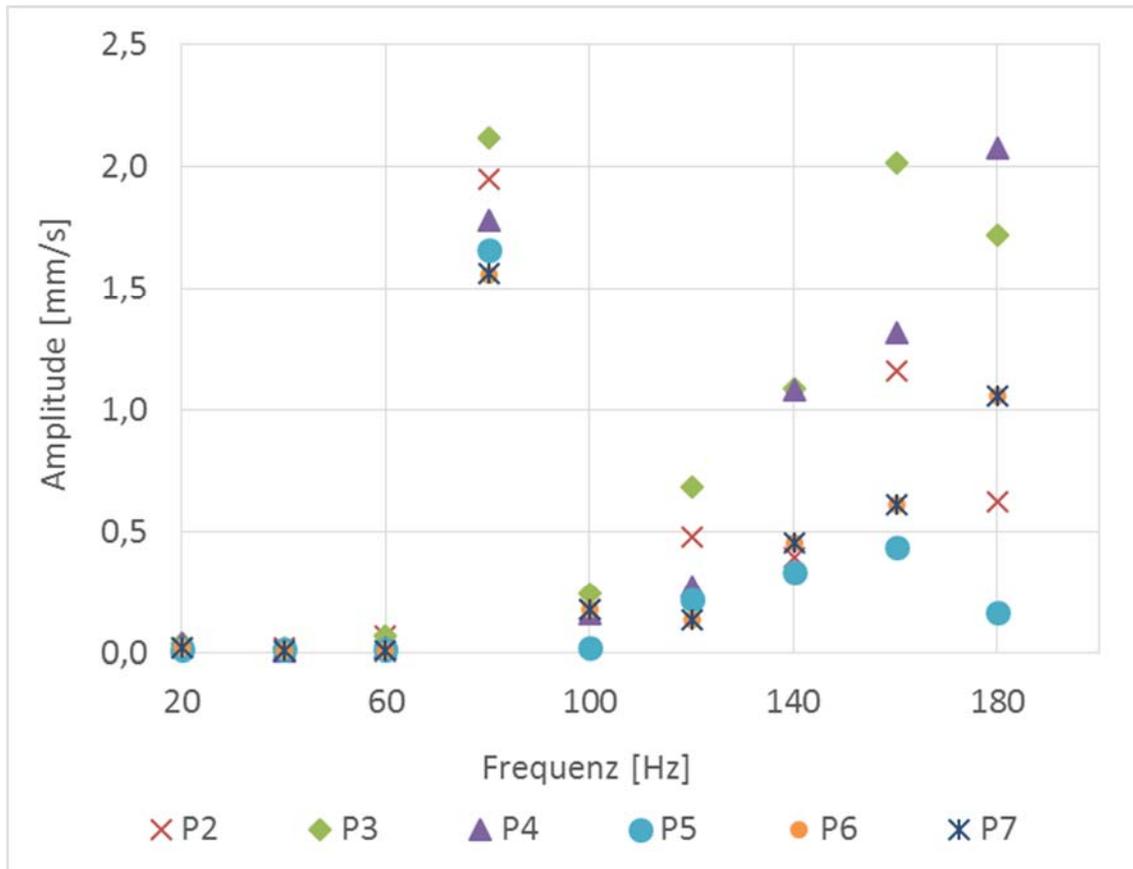


Abbildung 10: Ergebnisse zweier Messreihen der Laborversuche an einer Pfahlgruppe in Sand

Man erkennt aus den obigen Abbildungen eine starke Resonanz bei 80 Hz und teilweise auch bei 160 Hz, die vermutlich aus den Reflektionen von der Behälterwand herrühren. Für die Übertragung in die Praxis ist das Verhältnis der Wellenlänge zum Pfahldurchmesser bzw. der Pfahlhöhe zu normieren. Die Versuche zeigen die Interaktion zwischen den Pfählen, die Herleitung von allgemein gültigen Beziehungen zur Anwendung in der Praxis bedarf jedoch einer viel höheren Anzahl von Versuchen mit unterschiedlichen Konfigurationen und Erregungsfrequenzen. Somit zeigen sich tendenziell ansteigende Amplitudenwerte der gemessenen Beschleunigungen an den unterschiedlichen Pfählen, sobald die Erregerfrequenz von 40 Hz bis 180 Hz ansteigt.

Das Forschungsprojekt INAREIS behandelte die Überprüfung der Eignung und v.a. auch der Effektivität der Elektrosmose beim Entfernen von Spundwandbohlen aus kohäsiven Böden. Hierfür wurden neben groß- und kleinmaßstäblichen Laborversuchen auch großmaßstäbliche Feldversuche durchgeführt. Es sollten vorrangig die relevanten Parameter aus verschiedenen Bodeneigenschaften und Systemkonfigurationen identifiziert werden, die den größten Einfluss auf den Herausziehwiderstand haben. Diese Feldversuche wurden in einem Versuchsfeld durchgeführt, das überwiegend aus tonigem Untergrund bestand. Die Spundwandbohlen waren mit unterschiedlichen Längen und gegenseitigen Abständen im Boden eingebracht. Diese Systemkonfiguration machte es ebenfalls möglich, das Interaktionsverhalten von pfahlartigen Elementen unter dynamischer Lasteinwirkung zu untersuchen und den Einfluss von z. B. Einbindelänge, Durchmesser etc. zu ermitteln. Hierfür wurden die Bohlen über ein mittig zwischen ihnen angebrachtes Stahlrohr mit einem Impulshammer angeregt und sowohl das Erregersignal als auch die Antwortsignale an den Bohlen mittels Geschwindigkeitsaufnehmern (Geophone) aufgezeichnet. Es konnten Anregungen bis in größere Tiefen realisiert werden. In [Abbildung 11](#) ist der Aufbau der Feldversuche für eine ausgewählte Konfiguration dargestellt.

Anhand der registrierten Zeit-Geschwindigkeits-Signale wurden zunächst Wellengeschwindigkeit und -länge rechnerisch bestimmt und anschließend eine Fast-Fourier-Transformation- (FFT-) Analyse durchgeführt, um die Frequenzgehalte zu analysieren. Mit Hilfe der maßgebenden Frequenzen aus der FFT-Analyse wurde nun der Interaktionsfaktor zwischen Erreger- und Antwortpfahl berechnet. Abschließend wurden noch die Terzen ermittelt und damit eine Übertragungsfunktion bestimmt. Diese Vorgehensweise führte zu den folgenden Ergebnissen:

Die Wellengeschwindigkeiten aus dem registrierten Ersteinsatz der Wellen wurden gemessen. Die Rayleigh- und Scherwellengeschwindigkeiten betragen im Mittel 330 m/s bzw. 370 m/s. Daraus ergibt sich ein Schubmodul von etwa 200 MPa. Die Wellenlängen betragen zwischen 2 m und 6 m, je nach Versuchskonfiguration. Es ließ sich jedoch keine Abhängigkeit zur Länge des Pfahls bzw. dessen Abstand zum Erreger feststellen.



Abbildung 11: Versuchsaufbau im Feld mit eingebetteten Spundwandprofilen

Als Ergebnis der FFT-Analyse ergaben sich die höchsten Frequenzen i.d.R. an dem Erregerpunkt. Die niedrigsten Frequenzen traten überwiegend an den am weitesten entfernt liegenden Spundwandbohlen auf. Die vom Erregerpunkt gleich weit entfernt liegenden Bohlen zeigten in etwa die gleiche Frequenzverteilung. In [Abbildung 12](#) ist exemplarisch das Ergebnis einer Konfiguration dargestellt. Die Abbildung zeigt die Zeit-Geschwindigkeits-Signale und die zugehörigen FFT-Auswertungen des Hammerschlags auf das Profil P4/P5, die beiden unmittelbar benachbarten Bohlen P4 und P5 sowie die deutlich weiter entfernt stehende Bohle P13.

Die längeren Spundwandbohlen reagieren i.d.R. mit einer höheren Frequenz, was wiederum zu einem kleineren Interaktionsfaktor führt. Es wird bestätigt, dass mit höherer Frequenz und größer werdendem Abstand zum Erreger der Interaktionsfaktor kleiner wird.

Die Übertragungsfunktionen, exemplarisch für eine Konfiguration in [Abbildung 13](#) ausgewertet, zeigen ebenfalls, dass die beiden dem Erreger am nächsten stehenden Spundwände die gleiche Übertragung des Signals erfahren (hier P4 und P5). Mit zunehmender Frequenz nimmt die Übertragung zu den weiter entfernten Pfählen (hier P13) deutlich ab, der qualitative Verlauf bleibt jedoch meist ähnlich wie der der anderen Spundwände.

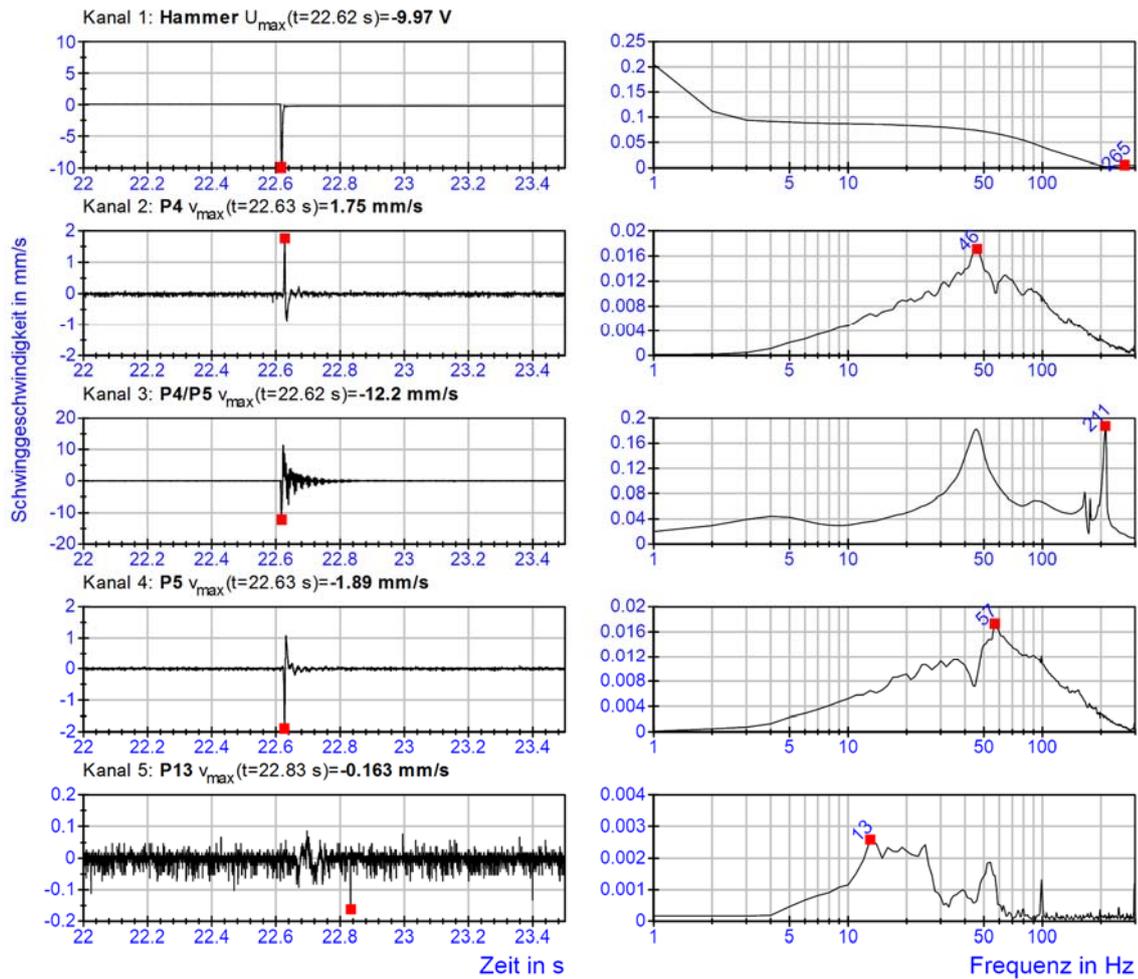


Abbildung 12: Zeit-Geschwindigkeits-Signale mit zugehörigen FFT-Signalen für eine ausgewählte Konfiguration (Hammerschlag auf Profil P4/P5, Bohlen P4, P5 und P13)

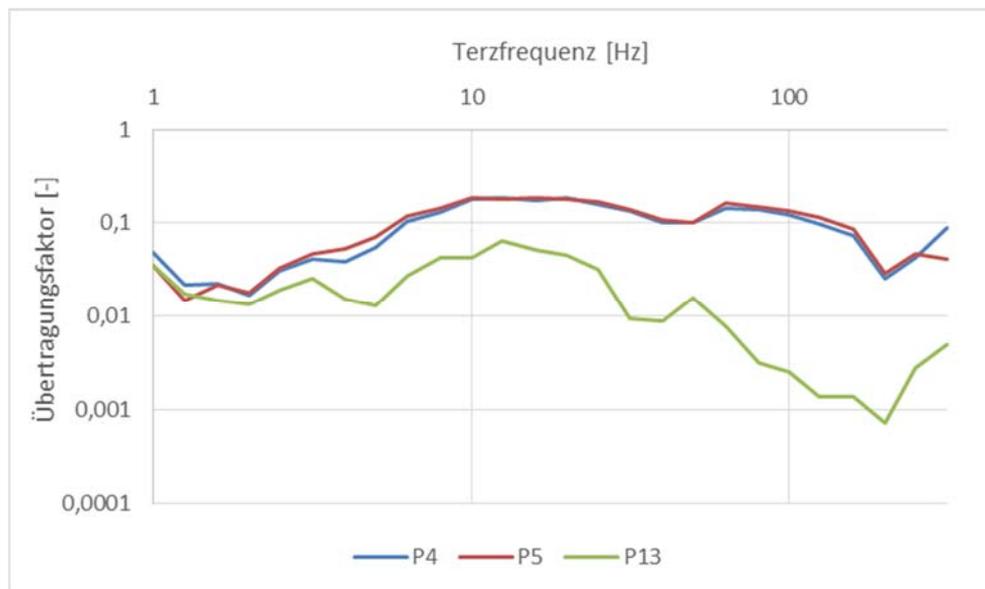


Abbildung 13: Übertragungsfunktionen (Hammerschlag auf Profil P4/P5, Bohlen P4, P5 und P13)

Ergänzend zu diesen Feldversuchen wurden großmaßstäbliche Laborversuche mit gleicher Intention durchgeführt. Hierfür wurden in einem Betonzylinder vier Spundwandbohlen in den Boden (Ton) eingebracht. Im Zentrum der Gruppe war wiederum ein Stahlrohr angebracht, welches mit einem Impulshammer belastet wurde. Die Laborkonfiguration ist in [Abbildung 14](#) dargestellt.



Abbildung 14: Versuchsaufbau im Labor mit eingebetteten Spundwandprofilen

Die Ergebnisse sind ähnlich denen der Feldversuche. Die abschließende Auswertung und Dokumentation ist noch nicht abgeschlossen.

4.3 Strukturdynamische Berechnungen

Zur Prognose von Erschütterungen und strukturinduziertem sekundärem Luftschall für eine geplante Wohnanlage wurden strukturdynamische Berechnungen durchgeführt. Als Inputsignale für die Berechnungen dienten gemessene Erschütterungssignale aus den Vorbeifahrten von Zügen im Bereich einer mehrgleisigen, hochfrequentierten Bahnstrecke. Die gewählte Bahnstrecke wird in dem Untersuchungsabschnitt von unterschiedlichen Zugkategorien befahren. Neben S-Bahn-Verkehr nutzt der Güterverkehr sowie der Personennah- und -fernverkehr in Form von IC- und ICE-Zügen die Gleisanlagen. [Abbildung 15](#) zeigt die Situation im Grundriss.

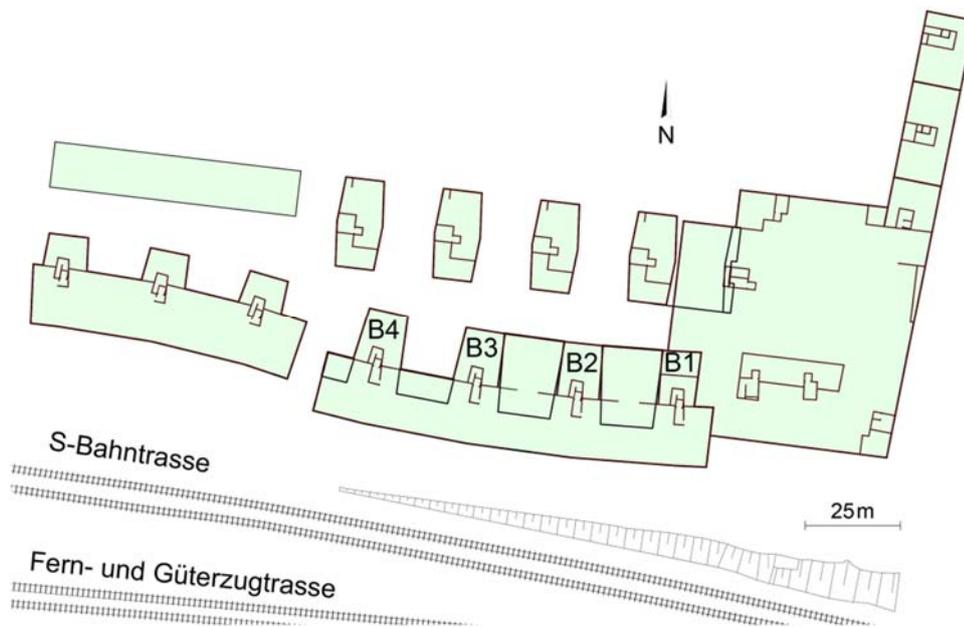


Abbildung 15: Lageplan der Gebäude mit Bahntrassen

Ein typisches Gebäude dieses Komplexes wurde mittels strukturdynamischer Berechnungen analysiert. Das Eingangssignal für diese Berechnungen wurde aus gemessenen Erschütterungssignalen aus den Vorbeifahrten der Züge bestimmt. Hierbei wurden die Schwinggeschwindigkeiten über ausreichend lange Zeiträume in unterschiedlichen Abständen entlang des Gleiskörpers mit Hilfe von Geophonen in vertikaler sowie horizontaler Richtung gemessen. Um Informationen zur Ausbreitung der Erschütterungen auch in unterschiedlichen Tiefenlagen zu erhalten, wurden die Geschwindigkeitsaufnehmer sowohl an der Geländeoberfläche als auch in speziell hierfür vorbereiteten Bohrlöchern platziert.

Als Ergebnis der Messungen ergaben sich typische Zeitverläufe der Schwinggeschwindigkeit sowie Frequenzspektren für die unterschiedlichen Zuggattungen. Exemplarisch sind in [Abbildung 16](#) die registrierten Messergebnisse bei der Vorbeifahrt einer S-Bahn sowie eines Güterzuges dargestellt.

Vergleicht man lediglich diese beiden Zugarten miteinander, so wird bereits die Komplexität des Forschungsvorhabens in Form des breiten Frequenzbandes, welches bei den Vorbeifahrten auftritt, deutlich. Die Darstellung der energieäquivalenten Terzschnellepegel, [Abbildung 18](#), bestärkt dies.

Messung von Schienenverkehrsemission

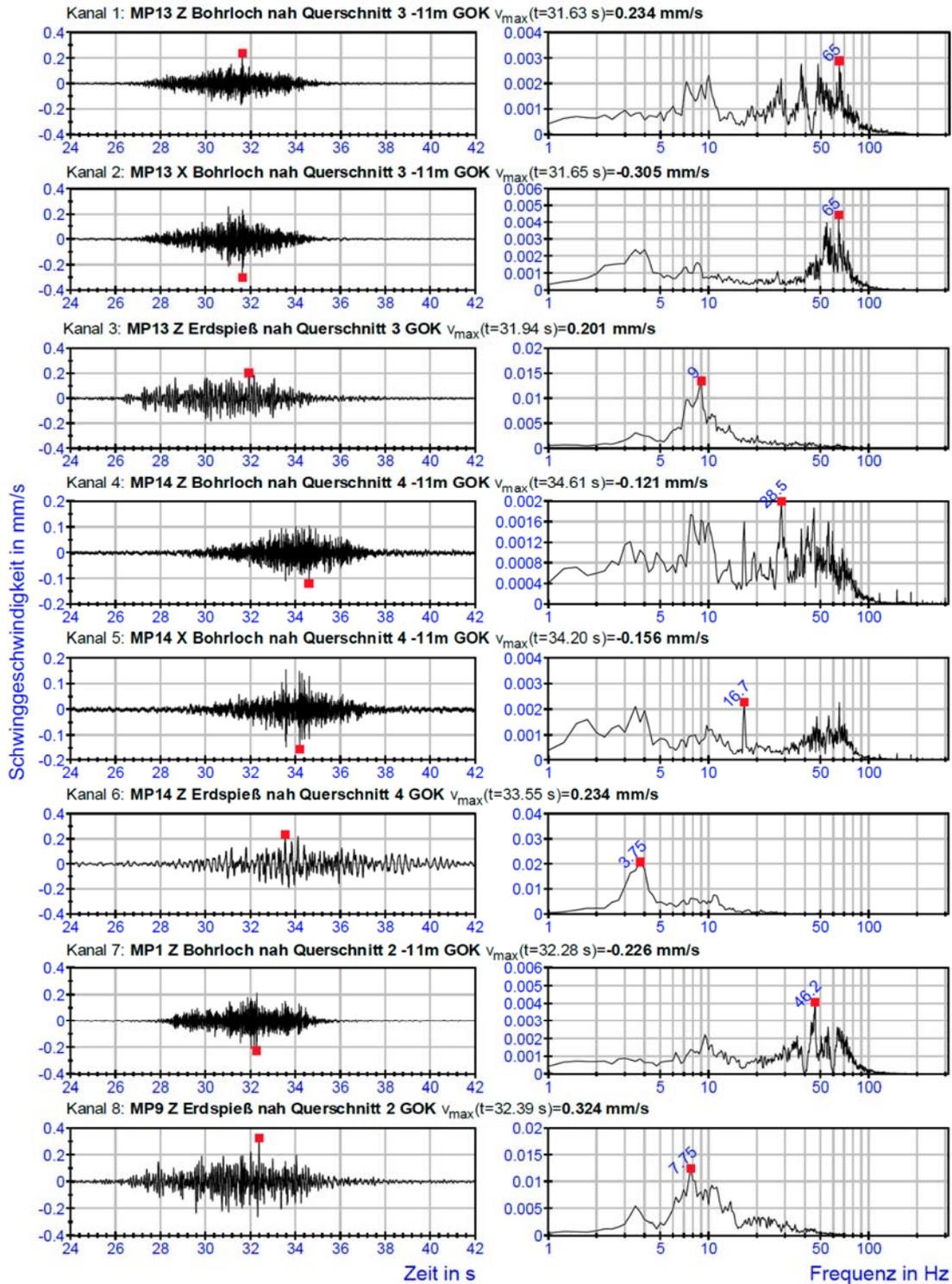


Abbildung 16: Schwinggeschwindigkeiten sowie Frequenzspektren bei der Vorbeifahrt S-Bahn

Messung von Schienenverkehrsemission

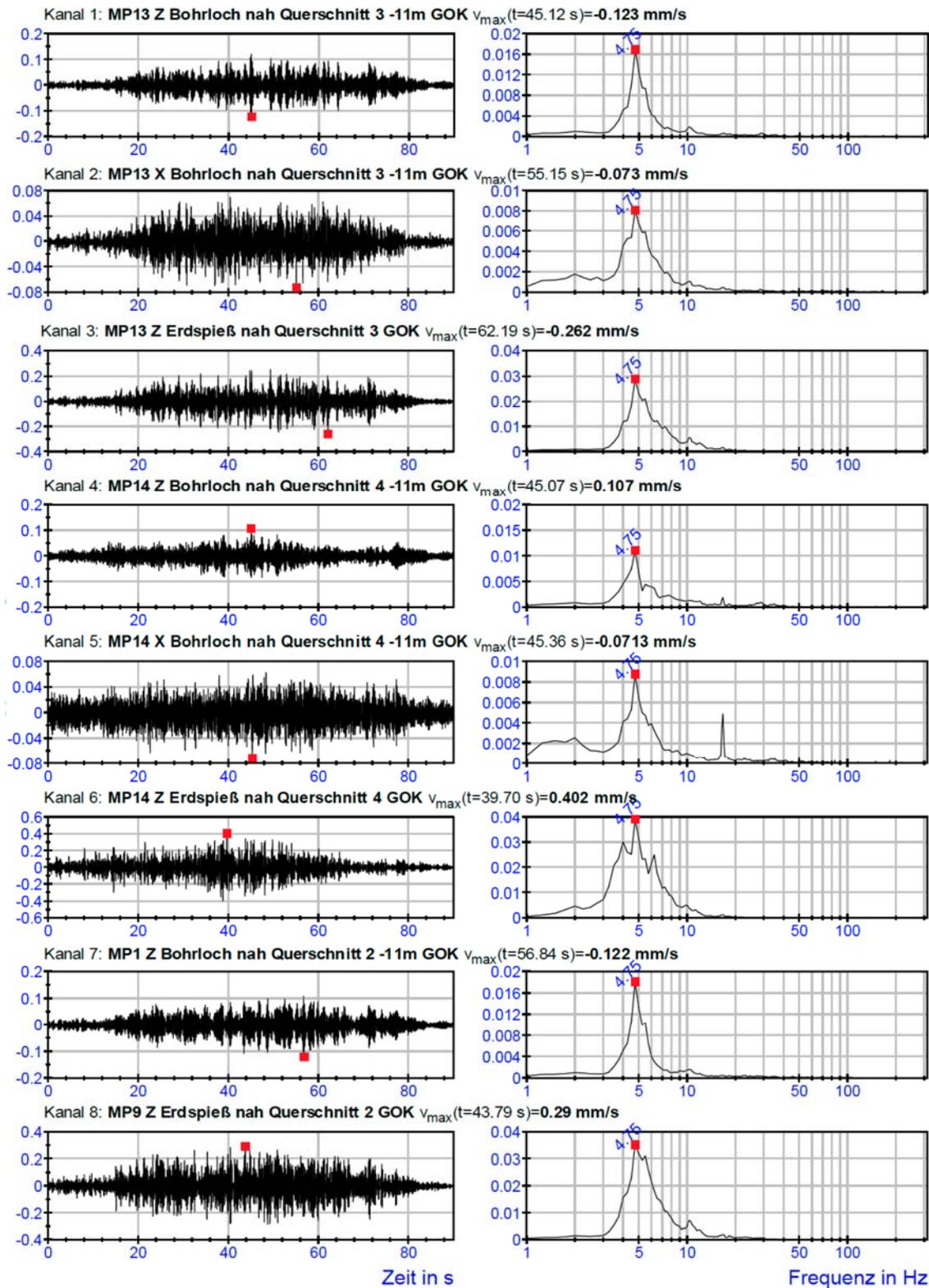


Abbildung 17: Schwinggeschwindigkeiten sowie Frequenzspektren bei der Vorbeifahrt Güterzug

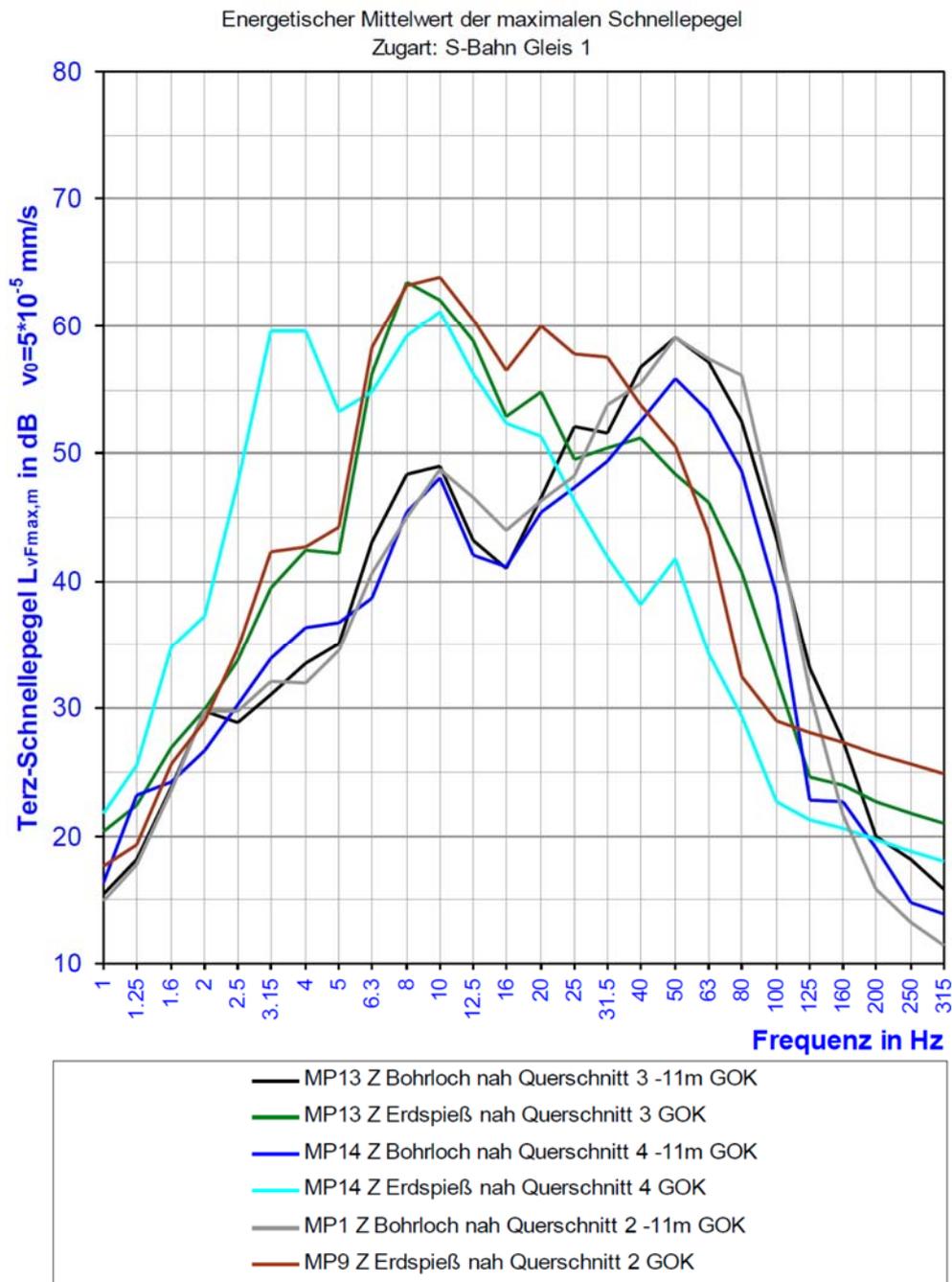


Abbildung 18: Energieäquivalente Terzsnellepegel bei S-Bahn

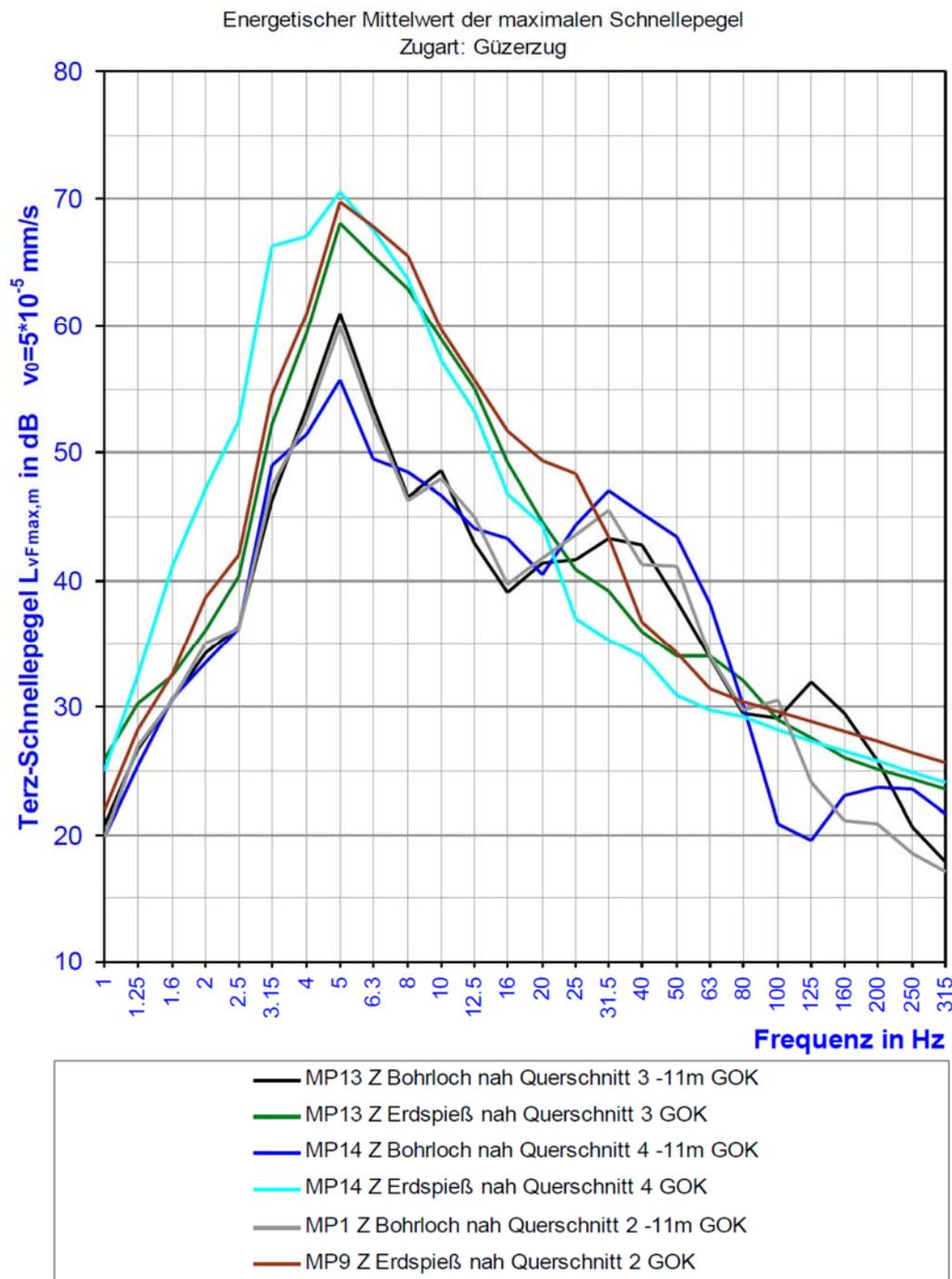
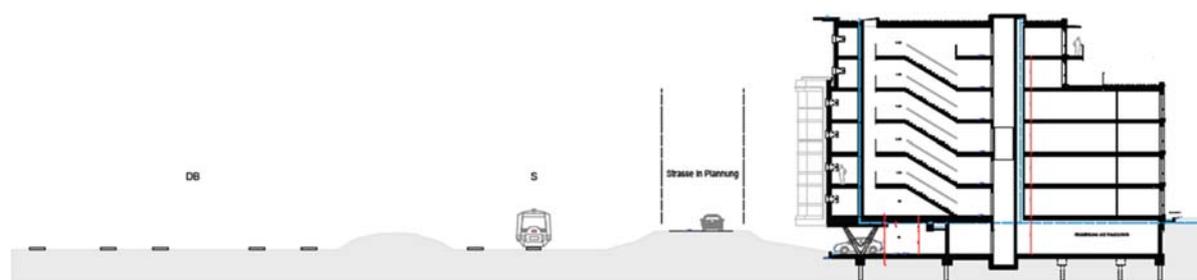


Abbildung 19: Energieäquivalente Terzschnellepegel bei Güterzug

Ziel der anschließenden strukturdynamischen Berechnung war die Prognose des Schwingungsverhaltens von Decken- und Wandelementen einer repräsentativen Wohneinheit der in [Abbildung 20](#) dargestellten geplanten weitläufigen Wohnanlage. Die Prognose der Erschütterungen und des sekundären Luftschalls erfolgte zunächst gemäß der Richtlinie 800.25-01 bis 05 „Erschütterungen und sekundärer Luftschall“ der Deutschen Bahn AG. Die dort mit einer Parametervariation verwendete Übertragungsfunktion berücksichtigt die Übertragung der Erschütterungen vom Boden über die Gründung auf das Bauwerk bis auf die Bauteile wie Stockwerksdecken, welche von maßgebender Bedeutung sind. Basie-

rend auf den Ergebnissen der genannten Schwingungsmessungen und darauf basierenden Erschütterungsprognosen hatten zur Einhaltung der Anforderungen der DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“ eine Hochabstimmung der Eigenfrequenzen der Stockwerksdecken ergeben.

Bei der isoliert betrachteten Wohneinheit handelt es sich um ein sechsgeschossiges Gebäude mit Tiefgarage und typischen Abmessungen sowie Baustoffen des aktuellen modernen Wohnungsbaus. Aufgrund der anstehenden Untergrundverhältnisse (Auffüllung/weicher Boden) ist eine Pfahlgründung vorgesehen, wobei die Pfähle als Einzelpfähle und als Pfahlgruppen mit bis zu 8 Einzelpfählen angeordnet sind. Auf die Bestimmung der bodendynamischen Kenngrößen, der Werte für frequenzabhängigen Federsteifigkeit und Dämpfung des Einzelpfahls und der Pfahlgruppe sowie die dynamische Beanspruchung des Gesamtsystems aus einem registrierten Messsignal wurde im Abschnitt 4.1 bereits ausführlich eingegangen. [Abbildung 20](#) zeigt einen Gebäudequerschnitt sowie die Orientierung zu den Gleisanlagen.



[Abbildung 20](#): Querschnitt durch das Gelände sowie Gebäude

Anhand der aufwendigen strukturdynamischen Berechnung wurde in einem individuellen Berechnungsmodell von Boden und Bauwerk einschließlich der Pfahlgründung die Prognosezuverlässigkeit im Hinblick auf die Übertragung der Erschütterungen vom Boden über die Gründung auf das Bauwerk, innerhalb des Gebäudes sowie die Anregbarkeit von Stockwerksdecken und Wänden genauer untersucht.

Zur Berücksichtigung des Einflusses der kinematischen Interaktion zwischen dem Boden und den Pfählen bei indirekter Erregung durch ein sich horizontal ausbreitendes Wellenfeld existieren derzeit noch keine übertragbaren Lösungsansätze. Ergebnisse für die Antwort eines Einzelpfahls auf eine Rayleigh-Welle in homogenem Boden sind bei Makris [\[32\]](#) vorgestellt. Die dort angegebenen Kurven mit einer begrenzten Parametervariation zeigen, dass die vertikale Pfahlkopfverschiebung ungefähr 20% höher als die vertikale Verschiebungskomponente der Rayleigh-Welle im Boden ist. Da zudem der Einfluss der ausgeprägten Baugrundsichtung nicht quantifiziert werden konnte, wurde entschieden, die kinematische Boden-Pfahl Interaktion zu vernachlässigen. Die Berechnung erfasst die Interaktion zwischen Boden und Bauwerk sowie die Weiterleitung des Erschütterungssignales innerhalb des Gebäudes.

Die Prognose wurde mit repräsentativen Emissionen aus den Zuggattungen S-Bahnzüge, Güterzüge sowie Doppelstock-Regionalzüge vorgenommen. Angesetzt wurde das im Freifeld an der Oberfläche gemessene Signal. Die Abnahme der Signalstärke mit der Ausbreitungsentfernung vom Gleis infolge geometrischer Dämpfung im Untergrund wurde durch eine Reduktion des Anregungssignals entlang der Gebäudetiefe (in Richtung Norden) nach dem Abklinggesetz für Rayleigh-Wellen berücksichtigt, so dass an der am weitesten entfernten Pfahlreihe nur noch 71% der Signalstärke der Vorderreihe angesetzt wurde. Als Alternative wurde auch die Ausführung einer Flächengründung betrachtet. Sie wurde jedoch wegen der schlechten Baugrundverhältnisse nicht im Detail berechnet und als Lösung verworfen.

Die dreidimensionalen FE-Berechnungen wurden mittels des Finite-Elemente-Programms *SAP2000* durchgeführt. Das FE-Modell bildete die einzelnen Geschosdecken sowie die Bodenplatte durch Plattenelemente ab. Die Dicke der Bodenplatte variierte zwischen 30 cm und 50 cm; im Bereich der Pfähle wurde eine Dicke von bis zu 80 cm vorgesehen, wobei im Rahmen der Berechnungen vereinfacht eine mittlere Dicke der Bodenplatte von 40 cm angenommen wurde. Die Erdgeschossdecke wies in unterschiedlichen Bereichen eine Dicke zwischen 30 cm bis 60 cm auf. Für die Stahlbetondecken der einzelnen Geschosse wurde durchweg 20 cm eingesetzt. Die Stahlbetonwände wurden ebenso durch Strukturelemente modelliert. Die Dicke der Stahlbetonwände im Kellergeschoss betrug 30 cm, bei den weiteren Stockwerken wurde 20 cm Wanddicke (Treppenhauswände) angenommen. Die tragenden Mauerwerkswände wurden mit den jeweils statisch erforderlichen Wanddicken berücksichtigt. Numerisch besitzen die Mauerwerkswände zwar eine axiale Tragfähigkeit und Steifigkeit, die Übertragung von Biegemomenten am Auflagerbereich Decke/Wand durch eine gewisse Einspannwirkung wurde jedoch nicht berücksichtigt. Die Tragfähigkeit der Trennwände wurde wegen der sehr geringen Steifigkeit vernachlässigt und lediglich der Massenanteil der Wände durch einen entsprechenden Zuschlag berücksichtigt. Die Stahlbetonstützen im Keller- und Erdgeschoss wurden durch Balkenelemente mit entsprechenden Querschnittswerten modelliert.

[Abbildung 21](#) zeigt eine räumliche Ansicht des Gebäudemodells.

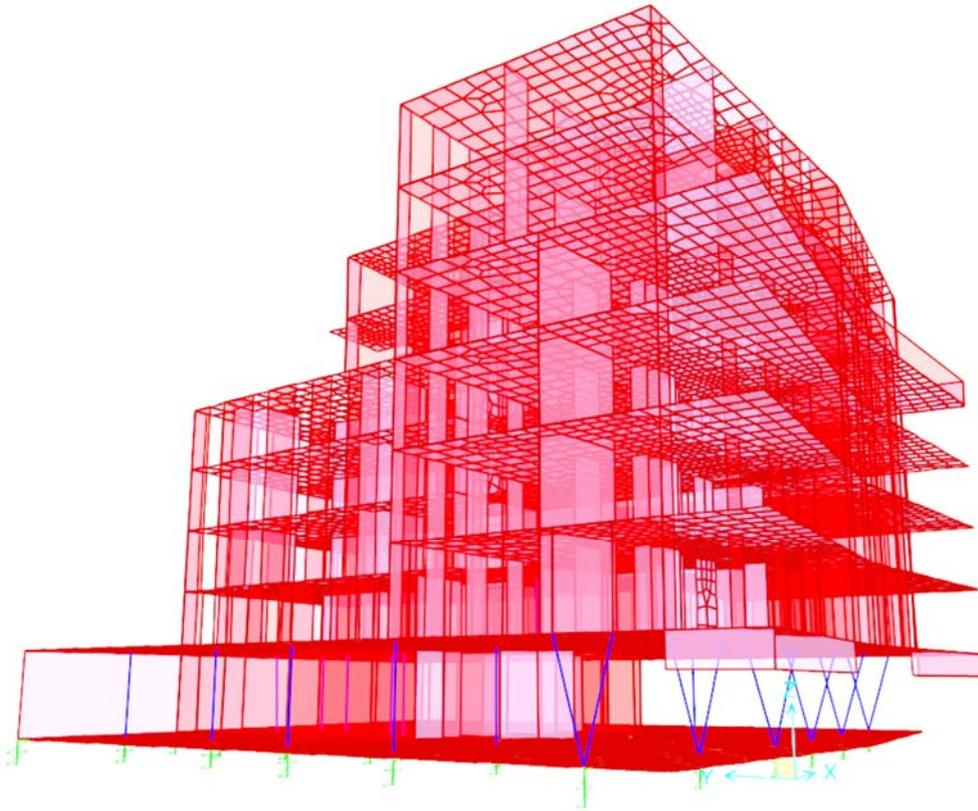


Abbildung 21: Räumliches Gebäudemodell

Da in der Berechnung lediglich ein Gebäudeausschnitt der gesamten Wohnanlage berücksichtigt wurde, und sich sowohl die Decke der Tiefgarage als auch die Bodenplatte über den betrachteten und diskretisierten Gebäudeabschnitt hinaus fortsetzen, wurde die Annahme von entsprechenden Randbedingungen an den Schnittufern der Plattentragwerke erforderlich. Exemplarisch für die Berechnungen sind in [Abbildung 22](#) Systemgrundrisse der Bodenplatte sowie einer Obergeschossdecke mit eingezeichneten Randbedingungen dargestellt.

Die Auflagerung des Systems erfolgt über eine Pfahlgründung, bestehend aus Einzelpfählen sowie Pfahlgruppen. Die Einzelpfähle sowie die Pfahlgruppen wurden durch parallel geschaltete Feder und Dämpfer modelliert.

Für ausgewählte Messsignale erfolgten Berechnungen im Zeitbereich. Hierzu wurden die Ergebnisse der durchgeführten Erschütterungsmessungen unmittelbar als Verschiebungs-Zeit-Verlauf an den Auflagerpunkten der einzelnen Federelemente (Pfähle, Pfahlgruppen) des Berechnungsmodells eingepreßt.

Als Ergebnis der Berechnung ergaben sich die Systemeigenfrequenzen der gesamten Gebäudestruktur. Beispielhaft ist in [Abbildung 23](#) die erste Eigenform des diskretisierten FE-Modells dargestellt. Des Weiteren lassen sich mit Hilfe der FE-Berechnungen nun Vergrößerungsfunktionen zwischen dem Eingangs- und Antwortsignal ableiten.



Abbildung 22: Systemgrundrisse der Bodenplatte sowie einer Obergeschosdecke

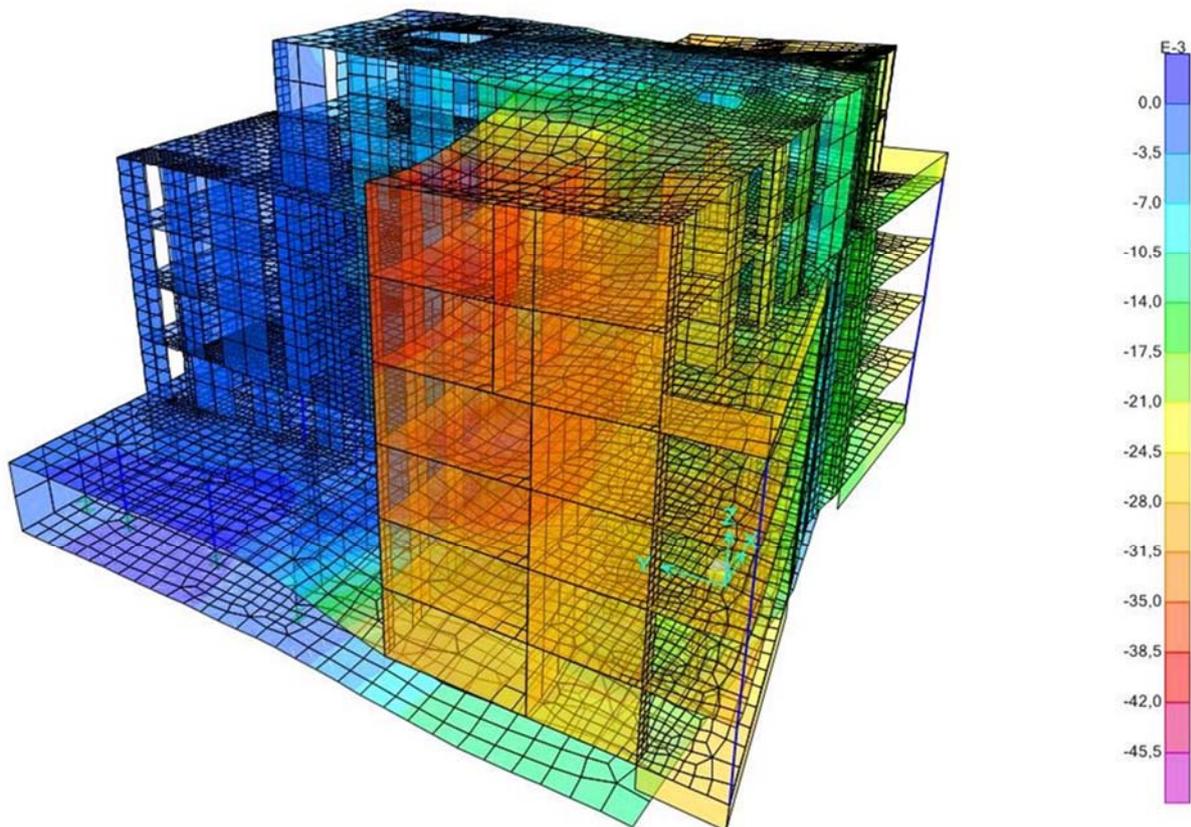


Abbildung 23: FE-Modell, erste Eigenform bei einer Eigenfrequenz von 7,2 Hz

Zur Beurteilung des Schwingungseintrags in den einzelnen Deckenplatten wurden repräsentative Beobachtungspunkte ausgewählt. Sie befinden sich an Systemknoten in Plattenbereichen, wo eine starke Amplitude zu erwarten war. [Abbildung 24](#) zeigt ein typisches Eingangssignal sowie das zugehörige Antwortsignal an einem exemplarisch ausgewählten Beobachtungspunkt. Für ausgewählte Punkte in unterschiedlichen Stockwerken wurden aus den Ergebnissen frequenzabhängige Übertragungsfunktionen für die vertikalen Ver-

schiebungen berechnet. Die Übertragungsfunktionen werden auf die Anregung der vorderen Pfahlgruppenreihe an der der Bahntrasse zugewandten Seite des Gebäudes bezogen. Typische Verläufe sind in [Abbildung 25](#) wiedergegeben.

Zur Prognose der Erschütterungen wurden aus diesen Übertragungsfunktionen Terzdifferenzspektren ermittelt und mit den gemessenen Terzschnellepegeln der verschiedenen o.g. Zuggattungen beaufschlagt. Als Immissionsgrößen wurden für die Erschütterungen die mittlere maximale bewertete Schwingstärke und für den sekundären Luftschall der mittlere Maximalpegel prognostiziert. Mit diesen Maximalwertgrößen wurden die Beurteilungsschwingstärke und der Mittelungspegel als mittlere Einwirkungsgrößen für Tag und Nacht unter Verwendung der Verkehrshäufigkeit der o.g. Zuggattungen ermittelt.

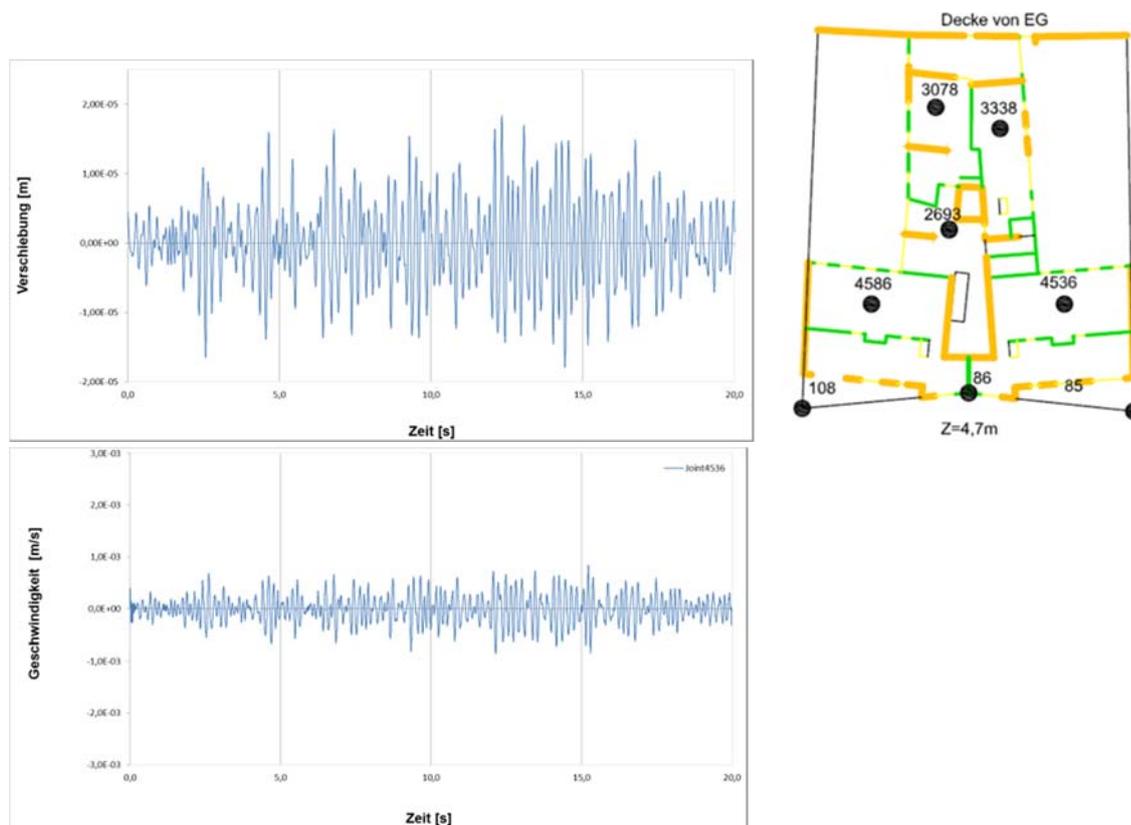


Abbildung 24: Zeitsignale. Eingangssignal (oben) und Antwort an einem Beobachtungspunkt auf der Erdgeschossdecke (unten)

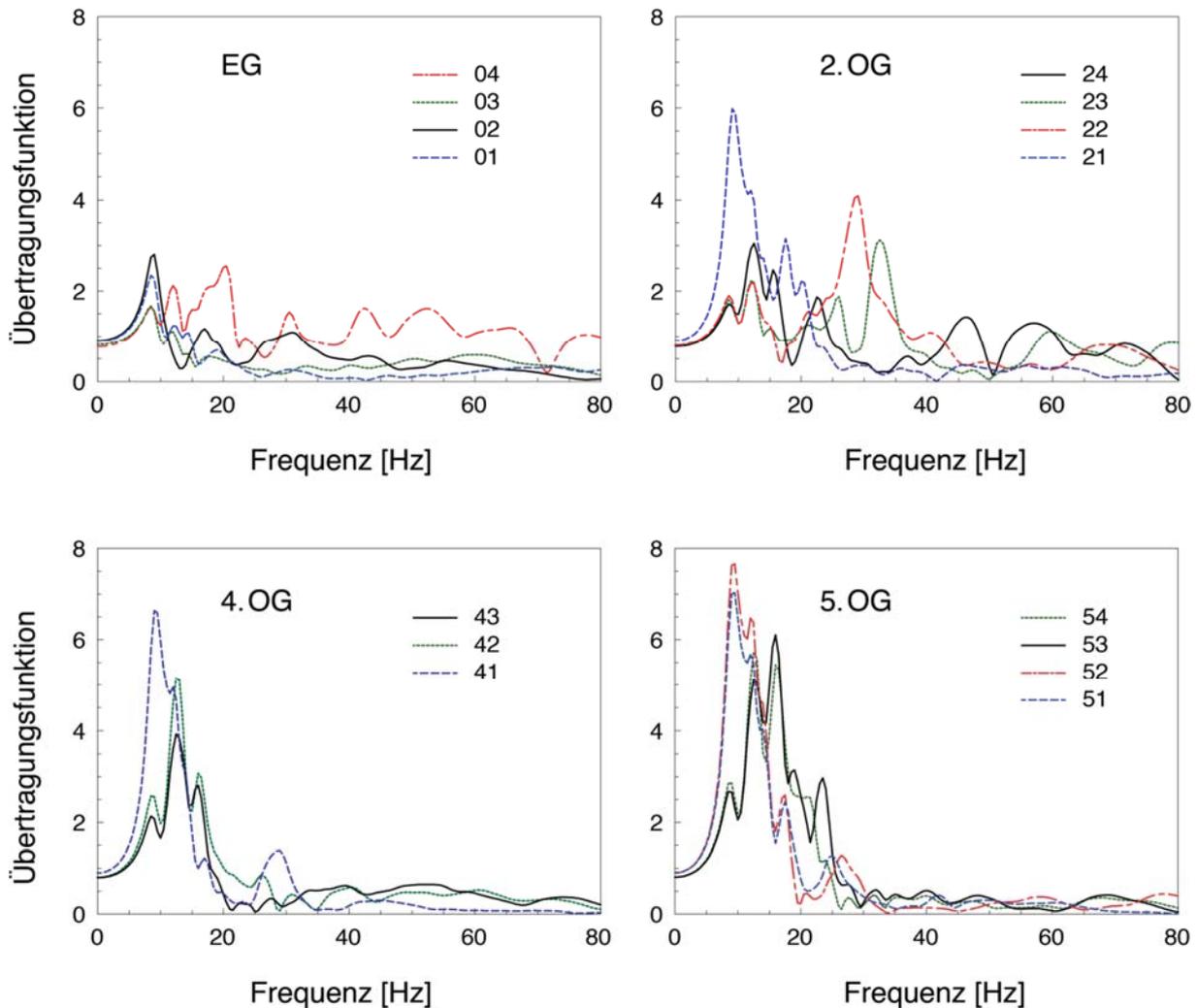


Abbildung 25: Übertragungsfunktionen an ausgewählten Beobachtungspunkten

Die mit dem 3D-Berechnungsmodell ermittelten Übertragungsfunktionen weisen im Vergleich zu den Standard-Übertragungsfunktionen der DB-Richtlinie im tieffrequenten Bereich eine große Übereinstimmung auf, während für höhere Frequenzen eine geringere Überhöhung bei Resonanzen und eine höhere Dämmung oberhalb der Resonanzfrequenz vorliegen.

Auf Grundlage der Ergebnisse der 3D-Berechnungen wurde festgestellt, dass die geringe Elastizität des aufgehenden Gebäudes mit großen Spannweiten für die Zufahrt zu den Kfz-Stellplätzen in der untersten Geschossebene und mit fehlenden tragenden Wänden in den Obergeschossen sowie die Auslegung der Pfahlgründung einen entscheidenden Einfluss auf die Übertragung der tieffrequenten Schienenverkehrserschütterungen haben. Aus diesen Erkenntnissen konnten Vorschläge für Maßnahmen an der Gründung und der aufgehenden Gebäudestruktur zur Verminderung der Schwingungsübertragung abgeleitet werden.

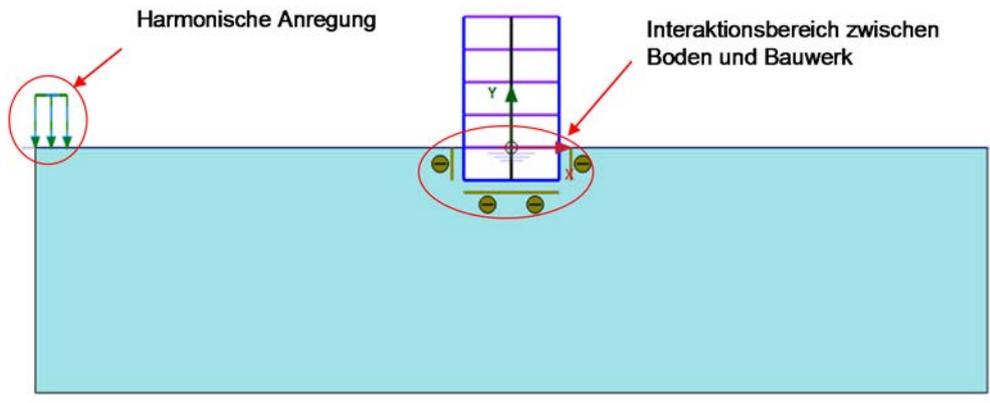
Die zur Verfügung stehenden analytischen Formeln ermöglichen die Abschätzung von Federsteifigkeiten und Dämpfungen von Einzelpfählen und Pfahlgruppen. Für genauere Berechnungen im Rahmen der Ausführungsplanung sind jedoch numerische Verfahren mit Berücksichtigung der aktuellen Schichtung empfohlen. Ein individuelles 3D-Berechnungsmodell von Boden und Bauwerk einschließlich Gründung ermöglicht eine zuverlässigere Prognose im Hinblick auf die Übertragung der Erschütterungen vom Boden über die Gründung auf das Bauwerk, innerhalb des Gebäudes sowie die Anregbarkeit von Stockwerksdecken und Wänden. Die genaue strukturdynamische Abbildung der einzelnen Komponenten des Tragwerks (Auflagerungsbedingungen, Fugen) ist dabei von entscheidender Bedeutung.

Zusammenfassend konnte mit der gewählten Vorgehensweise das Schwingungsverhalten eines typischen, auf Pfählen gegründeten Wohngebäudes für real gemessene Erschütterungseinwirkungen prognostiziert werden. Mit Hilfe dieses Modells ist es möglich, unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion, Eigenfrequenzen der gesamten Gebäudestruktur zu erfassen und Vergrößerungsfunktionen für einzelne Beobachtungspunkte zu ermitteln. Für vorgegebene Zeitverläufe können die entsprechenden Antworten berechnet werden. Diese Ergebnisse stehen nun für eine Abschätzung des sekundären Luftschalls zur Verfügung.

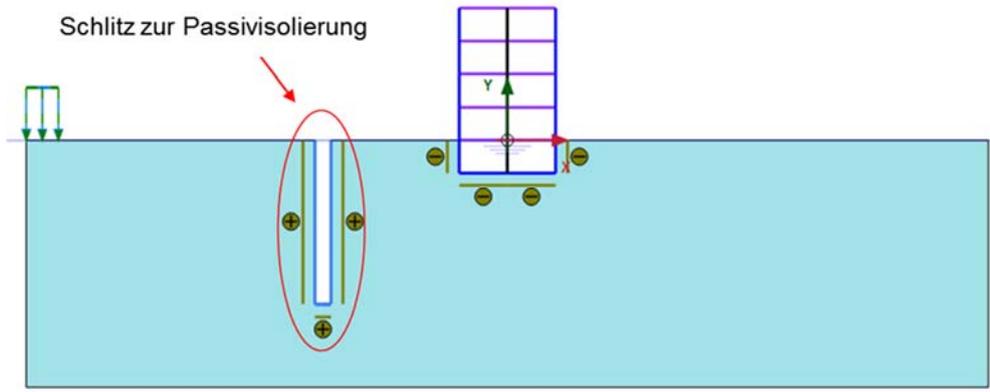
4.4 Parameterstudie zur Boden-Bauwerk-Wechselwirkung

In numerischen Parameterstudien wurde die Erschütterungsausbreitung infolge von oberirdischem Schienenverkehr und dessen Auswirkungen auf bestehende Gebäude untersucht. Zum Einsatz kam hierzu das FE-Programm *Plaxis 2D*. In der exemplarisch vorgestellten Studie wurden drei Berechnungsmodelle mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften bzw. Systemen betrachtet. Ziel war es, Informationen über mögliche Einflussparameter zu erhalten.

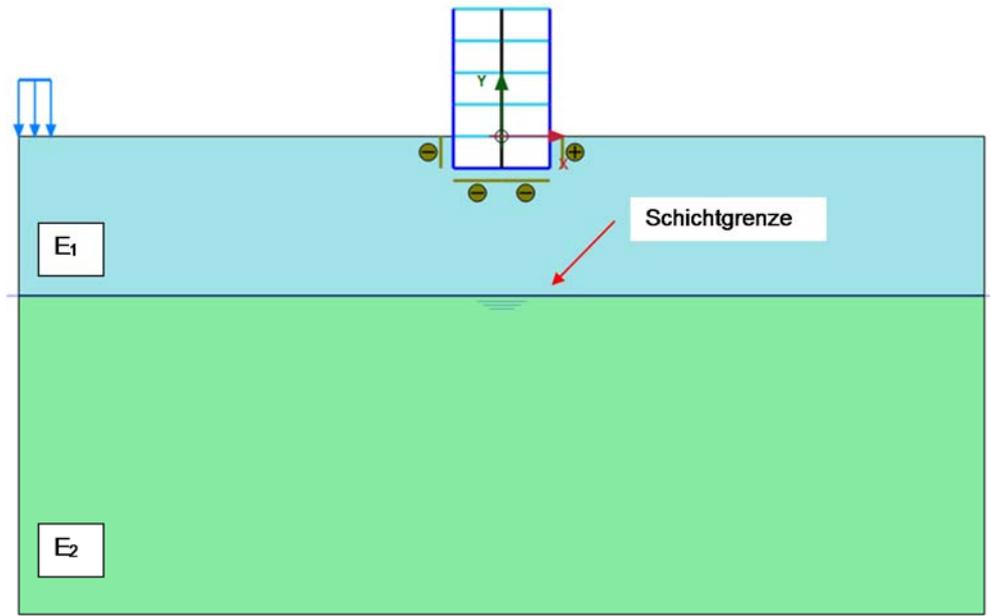
Betrachtet wurde eine mehrstöckige Struktur, die im Untergrund eingebettet ist. Für die Untergrundsituation wurden homogene Verhältnisse sowie ein zweifach geschichteter Bodenaufbau betrachtet. Die Auswirkungen einer Abschirmung von Erschütterungen durch eine Passivisolierung in Form eines offenen Bodenschlitzes wurden für den homogenen Fall ergänzend untersucht. In [Abbildung 26](#) sind diese drei Systeme dargestellt.



Modell mit homogenem Untergrund



Modell mit homogenem Untergrund und Passivisolierung (Schlitz)



Modell mit geschichtetem Untergrund

Abbildung 26: Berechnungsmodelle

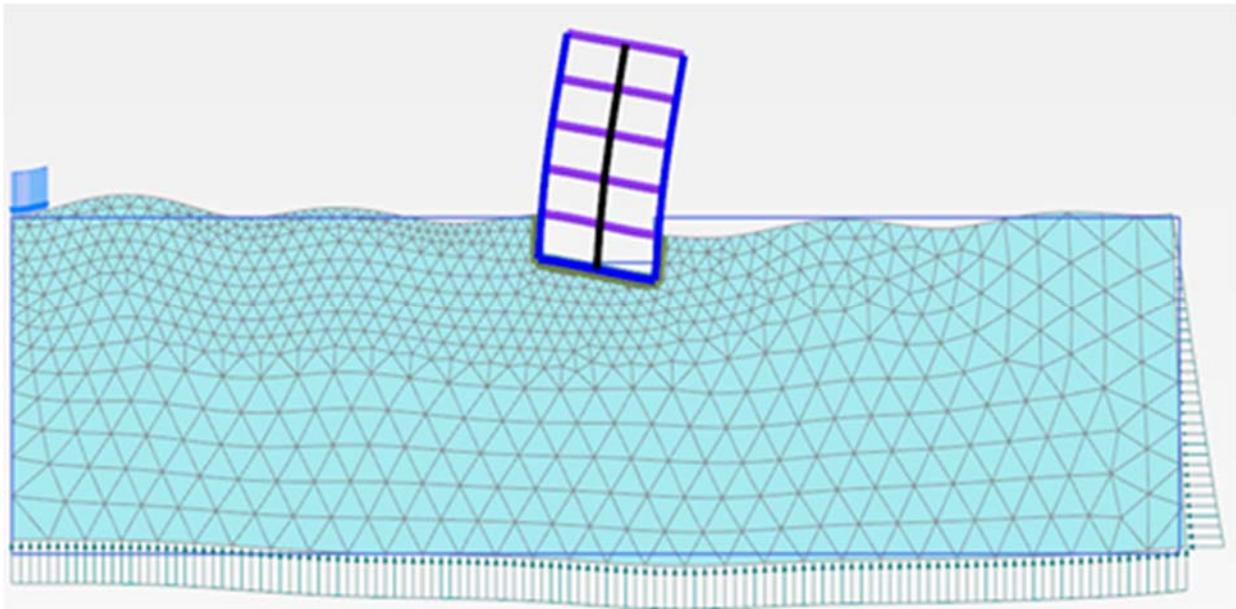


Abbildung 27: Gebäude im Wellenfeld

Der Schienenverkehr wurde als Streifenlast mit harmonischer Anregung modelliert. Die Anregung erfolgte mit einem typischen Frequenzband zwischen 8 Hz und 64 Hz und einer Spannungsamplitude von 10 kN/m^2 . Die statische Komponente, also das Eigengewicht des Zuges, wurde vereinfacht zu 1 kN/m^2 angenommen. [Abbildung 27](#) zeigt die schwingende Gebäudestruktur unter dem Einfluss eines Wellenfeldes.

I. d. R. weisen Gebäude in horizontaler Richtung oftmals eine geringere Steifigkeit im Vergleich zur vertikalen Achse auf. Somit dominieren zumeist horizontale Schwingungen bzw. Schwingungsanteile das Strukturverhalten eines eingebetteten Bauwerkes. Bei der Auswertung wurden daher vorrangig die horizontalen Schwingungskomponenten betrachtet. Die Beobachtungspunkte innerhalb des Berechnungsgebiets wurden so gewählt, dass möglichst viele Informationen über die entfernungs- und frequenzbedingten Abminderung zur Verfügung stehen ([Abbildung 28](#)). Für die Auswertung wurden mehrere Punkte entlang des Übertragungspfades im Boden gewählt. Die Schwingungen des eingebetteten Bauwerks wurden in der Mitte der einzelnen Strukturelemente (Decken und Wände) an ausgewählten Punkten untersucht. Die Verbindungen wurden als biegesteif angenommen und nicht weiter differenziert.

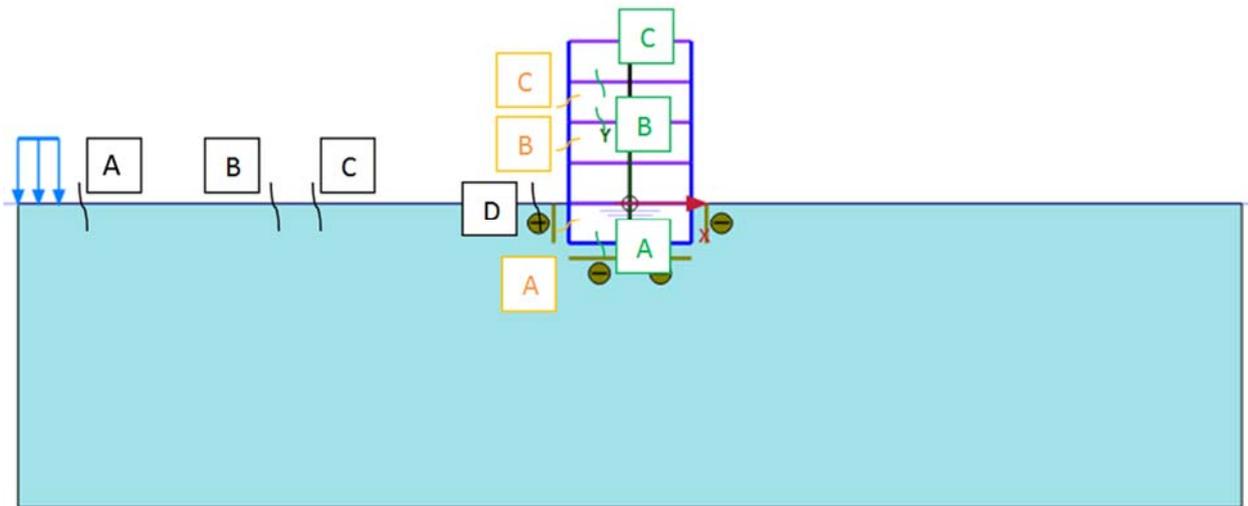


Abbildung 28: Beobachtungspunkte

In gleicher Weise wie die vertikalen Schwingungsamplituden infolge einer geometrischen Dämpfung mit der Entfernung von der Quelle abnehmen, reduzieren sich auch die Horizontalkomponenten. Auch nehmen die Amplituden mit zunehmender Frequenz ab, [Abbildung 29](#).

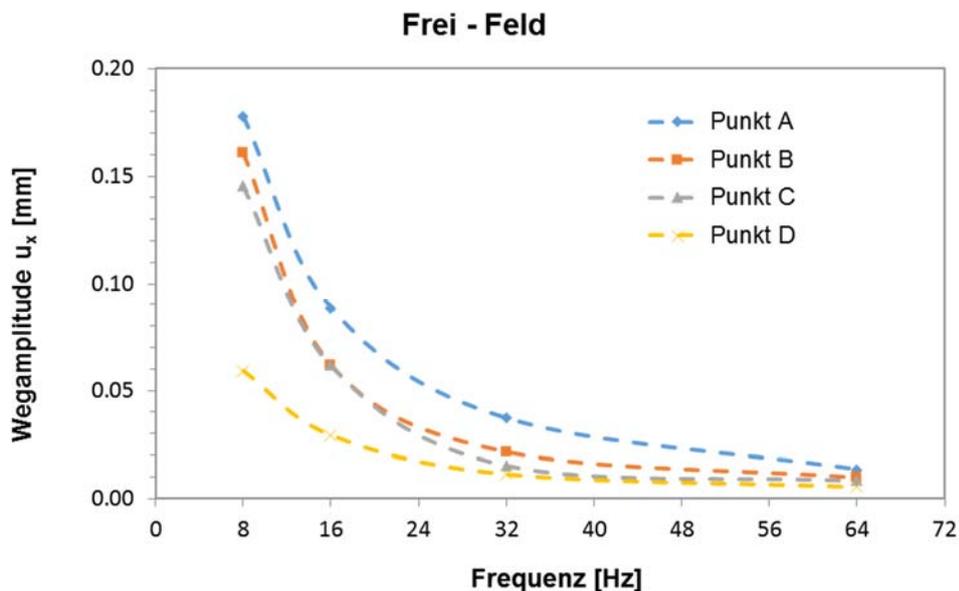


Abbildung 29: Schwingungsamplitude u_x in Abhängigkeit der Erregerfrequenz

Die Erschütterungsweiterleitung im Gebäude hängt primär vom Gebäude selbst ab. Die Übertragungsfunktion von Gebäuden kann auf einfallende Erschütterungen gemäß [Abbildung 30](#) angenähert werden. Die Eigenfrequenzen von Gebäuden liegen i. d. R. zwischen 10 Hz und 20 Hz, was dazu führen kann, dass bei längerer Einwirkung tieffrequenter

Schwingungsanteile bereits bei geringer Energiezufuhr Resonanzerscheinungen auftreten. Wie in [Abbildung 30](#) zu sehen ist, sind die Amplituden im Bereich der Eigenfrequenz der Decken (20 Hz) aufgrund von Resonanzeffekten stark erhöht.

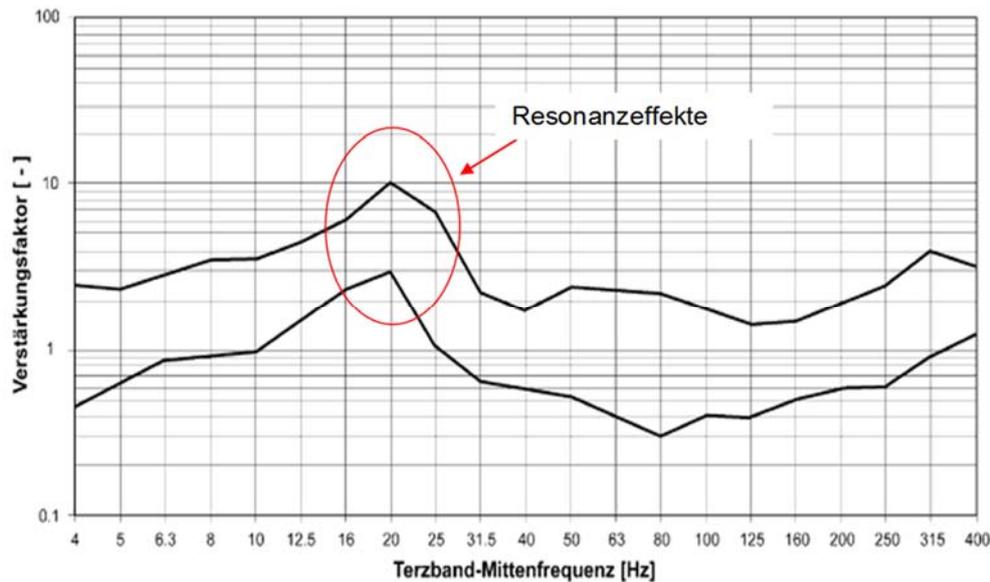


Abbildung 30: Übertragungsspektrum vom Boden auf die Geschossdecken

Die Schwingungen aufsteigender tragender Bauteile, also Stützen und Wände, werden von den Gesamtbauwerksschwingungen, den Eigenschwingungen und durch angekoppelte schwingende Deckenmassen bestimmt. Bei mehrstöckigen Gebäuden sind die Bauteilschwingungen von der Gebäudehöhe abhängig, da sich die Dämpfungs- und Steifigkeitseigenschaften mit zunehmender Höhe ändern.

In den durchgeführten Untersuchungen ergaben sich mit zunehmender Gebäudehöhe auch höhere Werte der horizontalen Wegamplituden in ausgewählten Wandmitten, [Abbildung 31](#).

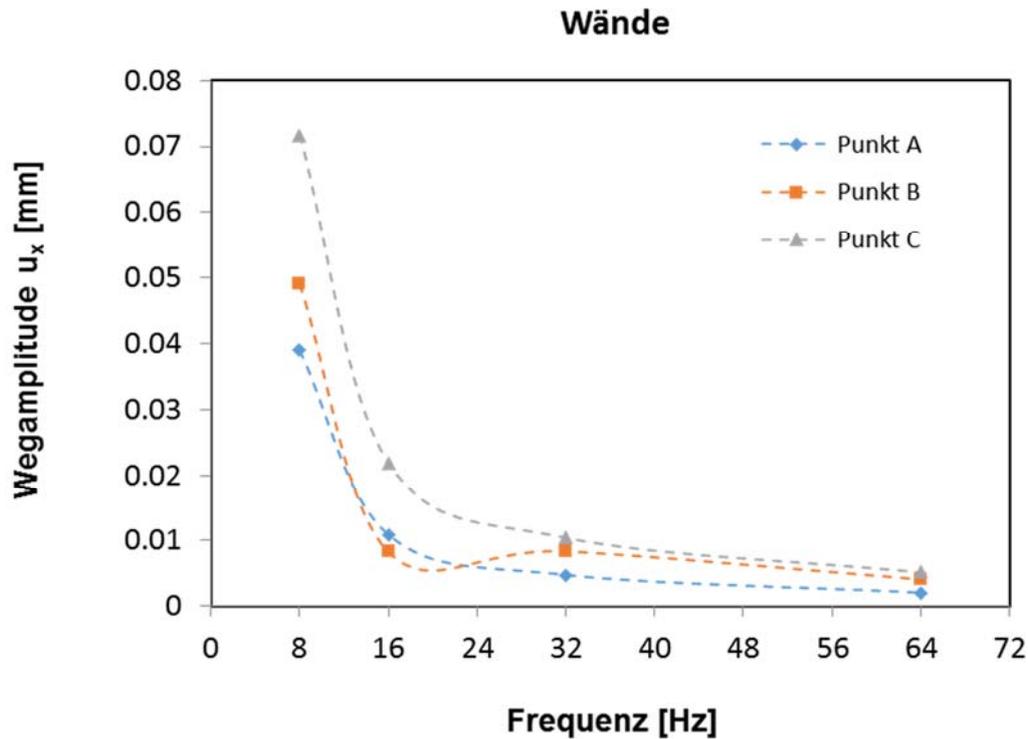
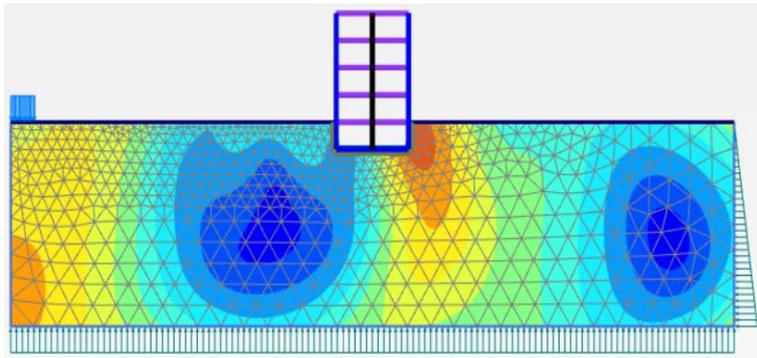
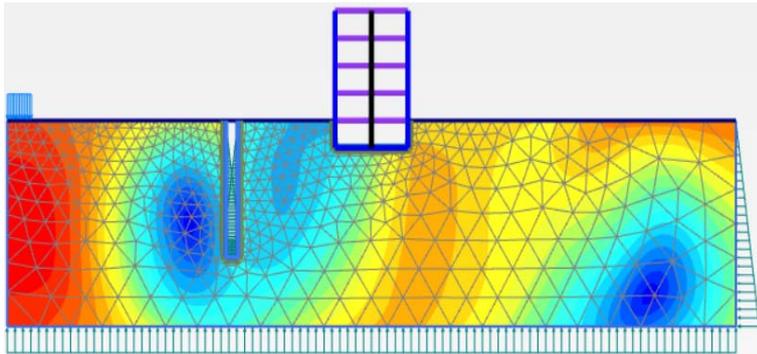


Abbildung 31: Wegamplituden von Wänden in unterschiedlicher Gebäudehöhe in Abhängigkeit der Erregerfrequenz

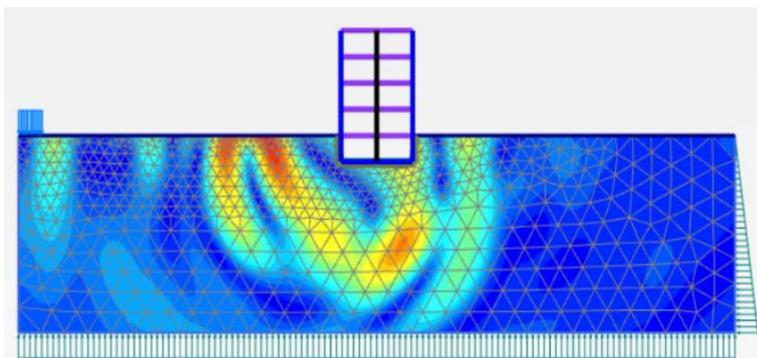
Der Einfluss einer Passivisolierung wird anhand der exemplarischen Darstellungen in [Abbildung 32](#) deutlich. Aufgezeigt ist die Verteilung des Verschiebungsvektors sowie der Schwinggeschwindigkeit in beiden Systemen zu einem vergleichbaren Zeitpunkt bei einer harmonischen Anregung mit 8 Hz. Infolge der Passivisolierung kommt es zu einer „Konzentration der Erschütterung“ im Bereich der Quelle und zu vergleichsweise höheren Schwinggeschwindigkeiten vor dem Schlitz. Diese Beobachtung der Freifeldschwingungen stimmt mit analytischen Untersuchungen überein. Die Simulationen zeigen, dass im Freifeld realistische Werte für die frequenz- und entfernungsbedingten Abminderung der Erschütterungen berechnet werden können. Die Passivisolierung bewirkt, dass es zu Reflektionen vor dem Schlitz bzw. zu Abminderung der Erschütterungen hinter dem Schlitz kommt.



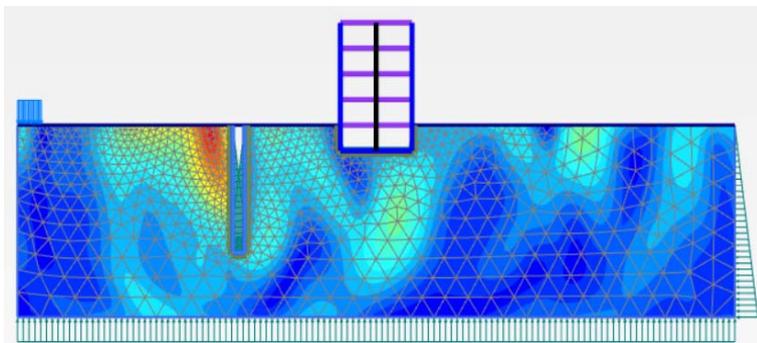
a) Verschiebung $|u|$



b) Verschiebung $|u|$ mit Schlitz



c) Geschwindigkeit $|v|$



d) Geschwindigkeit $|v|$ mit Schlitz

Abbildung 32: Verformungen und Schwinggeschwindigkeiten bei Aktivierung der harmonischen Anregung mit einer Frequenz von 8 Hz, Skala von rot nach blau abnehmend

Infolge der Passivisolierung kommt es zwangsläufig zu geringeren Erschütterungen im Ankopplungsbereich, so dass nennenswert weniger Energie in das Gebäude eingetragen wird. Die Weiterleitung der Erschütterungen im Gebäude selbst ist abhängig u. a. von der Gebäudehöhe und steigt mit zunehmender Höhe. Innerhalb des Gebäudes zeigt sich im Gegensatz zum vorherigen Modell eine Amplituden- und Schwinggeschwindigkeitsminderung mit zunehmender Gebäudehöhe.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich der Schlitz bei der Schwingungsweiterleitung im Gebäude mindernd auf die betrachteten Kenngrößen auswirkt. In [Abbildung 33](#) sind entsprechende Ausschnitte für das Gebäude dargestellt.

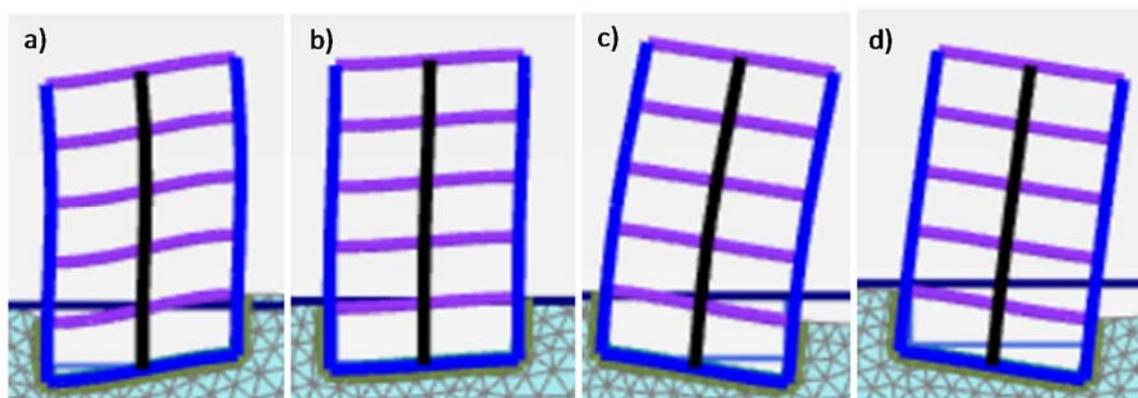


Abbildung 33: Gebäudeverformungen bei einer Erschütterungsanregung mit 8 Hz; a) Phase 3 ohne Schlitz, b) Phase 3 mit Schlitz, c) Phase 4 ohne Schlitz, d) Phase 4 mit Schlitz

Wesentlich komplexer gestaltet sich die Beurteilung der Ergebnisse, wenn eine Schichtung des Baugrundes vorliegt. An der Schichtgrenze zwischen den einzelnen Bodenschichten treten Reflektionen sowie Refraktionen auf, die sich je nach Untergrundverhältnissen in unterschiedlicher Form auf die eingebettete Struktur auswirken. Durch die Überlagerung der auftretenden Schwingungsanteile kommt es nicht nur zu einer Veränderung der Schwingungsamplituden in Form möglicher Verstärkungen. Auch das Frequenzspektrum der eingeleiteten Energie ändert sich je nach Variation der Untergrundparameter.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Erschütterungsausbreitung im Baugrund und die Übertragung auf ein Gebäude durch die Vielzahl an Parametern beeinflusst wird und somit zumeist nur „unscharf“ prognostiziert werden kann. V. a. die Inhomogenität des Bodens ist ein bedeutender Faktor, weswegen Messungen vor Ort letztendlich unumgänglich sind, möchte man eine realistische Beurteilung und Prognose sicherstellen.

5 Bauakustische Berechnungen und Messungen

5.1 Berechnungen zur schalltechnischen Charakterisierung des Testreferenzgebäudes

Für die Prognose von Schallschutz sowie zur Prognose von Lärm ist ein hinreichend genaues und praktisch anwendbares Verfahren notwendig. Sind die wichtigsten Bauwerkspareparameter bekannt, kann nach DIN 4109 bzw. EN ISO 12354 [51], [53]. Die akustische Übertragung von zu Schwingungen angeregten Bauteilen in Senderäumen zu Empfangsräumen abgeschätzt werden und so der zu erwartenden Schalldruckpegel in Empfangsräumen prognostiziert werden. Dieses energiebasierte Rechenverfahren ist normativ für einen Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz vorgesehen. Allerdings kann das Verfahren auch im tiefen Frequenzbereich angewendet werden, wenn die Abmessungen der Bauteile genügend groß und nicht zu „massiv“ sind, sodass ausreichend Eigenmoden im Bauteil enthalten sein können. Es erfordert dabei beim Messen der mittleren Oberflächenschnelle auf Empfangsplatten Geschick des Messenden, damit das räumliche Schnellmittel durch die Messpunktwahl richtig abgebildet wird.

Die Prognose des zu erwartenden Schalldruckpegels – hier sekundärer Luftschall genannt – kann durch die Einleitung und Ausbreitung von Körperschall in eine Gebäudestruktur beschrieben werden [24]. Dazu ist im Folgenden der detaillierte Rechenweg dargestellt.

Der resultierende, abgegliche Schalldruckpegel $L_{n,s}$ [dB] im Empfangsraum ergibt sich zu:

$$L_{n,s} = 10 \cdot \lg \cdot \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,s,ij}}{10}} \quad (61)$$

wobei j das abstrahlende Element im Empfangsraum, i das Element im Senderaum, in das eine Schallquelle Schall einleitet und n die Anzahl der Elemente, die im Empfangsraum Schall abstrahlen, bezeichnen. $L_{n,s,ij}$ [dB] kennzeichnet den resultierenden, abgeglichenen Schalldruckpegel im Empfangsraum aufgrund einer angekoppelten Wand i im Senderaum und abstrahlenden Wand j im Empfangsraum und wird ermittelt nach:

$$L_{n,s,ij} = L_{W_s,inst,i} - D_{sa,i} - R_{ij,ref} - 10 \lg \frac{S_i}{S_{ref}} - 10 \lg \frac{A_{ref}}{4} \quad (62)$$

Hierbei ist $L_{W_s,inst,i}$ der installierte Körperschalleistungspegel der Quelle am angekoppelten Element i , in dB, $D_{sa,i}$ ist ein Ausdruck zur Anpassung der Körperschallanregung des angekoppelten Gebäudeelementes i an Luftschallanregung, in dB, $R_{ij,ref}$ beschreibt den Flankenschalldämmkoeffizient für die Übertragung von Element i im Senderaum zum Element j im Empfangsraum, mit Bezug auf die Fläche $S_{ref} = 10 \text{ m}^2$, in dB, wobei S_i die Fläche des angekoppelten Gebäudeelementes und A_{ref} die äquivalente Bezugs-Absorptionsfläche mit $A_{ref} = 10 \text{ m}^2$ sind.

Der installierte Körperschalleistungspegel $L_{Ws,inst,i}$ [dB] berechnet sich wie folgt:

$$L_{Ws,inst} = L_{Ws,c} - D_{C,i} \quad (63)$$

Hierbei ist $L_{Ws,inst,i}$ die Schalleistung in dB, die vom Erdreich in die Gebäudestruktur eingeleitet wird. Diese Leistung wird in das Empfangsbauteil Erde-Gebäude eingeleitet. Im Gebäude wird dann dieses Bauteil zum Sendebauteil für die Schallausbreitung bis in den Empfangsraum. $L_{Ws,c}$ und $D_{C,i}$ sind hier Quellen und Empfänger spezifische Ausdrücke für punktförmig angenommene Körperschallquellen. Der Parameter $D_{sa,i}$ zur Anpassung der Körperschallanregung des angekoppelten Gebäudeelementes an die Luftschallanregung wurde für übliche Nutzungsgeräusche in Gebäuden detailliert untersucht und inzwischen auch normativ in DIN EN 12354 geregelt. Er berechnet sich durch

$$D_{sa,i} = 10 \cdot \lg \cdot \frac{2\pi \cdot m_i \cdot 2,2\tau_i}{\rho_0 \cdot c_0 \cdot T_{s,i} \cdot \sigma_i} \quad (64)$$

Für das Referenzgebäude ergibt sich durch eine reine Kraftanregung in dem Fall der Anpassungsterm zu

$$D_{sa,i} = 10 \cdot \lg \cdot \frac{400 \cdot f_{c,i} \cdot \sigma_i}{m_i \cdot f^2} \quad (65)$$

Dabei ist f_c die kritische Frequenz des Elements i in Hz, σ_i der Abstrahlgrad des Elementes i , m_i die flächenbezogene Masse des Elements i in kg und f die Mittenfrequenz des Terzbands in Hz.

Die dabei auftretende kritische Frequenz wird auch als Grenzfrequenz oder Koinzidenzfrequenz genannt. Stimmen die Wellenlängen der anregenden Luftschallwelle mit der freien Biegewelle der Platte überein, so nennt man diesen Fall Koinzidenz. Theoretisch kann durch eine unendlich große Platte erst oberhalb der sogenannten Koinzidenzgrenzfrequenz durch Biegeschwingungen Luftschall erzeugt werden. Allerdings wird durch zahlreiche weitere akustische Effekte bei endlichen Platten auch mit niedrigerer Frequenz Schall weitergeleitet beziehungsweise abgestrahlt, [33]. Für den Grenzfrequenzbereich ist die Schallübertragung Luft-Bauteil und auch die andere Richtung Bauteil-Luft besonders gut, was den Grund für Einbrüche des Schalldämm-Maßes von plattenförmigen Bauteilen im oberen Frequenzbereich darstellt, [44]. Die Koinzidenzgrenzfrequenz wird bestimmt aus dem Verhältnis von flächenbezogener Masse und Biegesteifigkeit des Bauteils sowie der Schallgeschwindigkeit in der Luft, [7]:

$$f_{gr} = f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{m''}{B'}} = \frac{c_0^2}{2\pi \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{12\rho_{pl} \cdot (1 - \mu^2)}{E}}, [f] = Hz \quad (66)$$

Der Abstrahlgrad ist stark abhängig von der Konstruktion der Wand sowie von dem Anteil freier und erzwungener Wellen auf dem abstrahlenden Bauteil. Dieser Anteil wird ent-

scheidend von der Art der Anregung des Bauteils oder der Gebäudestruktur, z.B. punktförmig, flächenförmig oder dreidimensional beeinflusst. Für im Gebäude auftretende Anregungen durch übliche Nutzungen wurde der Abstrahlgrad detailliert untersucht und kann wie folgt in Anlehnung an DIN EN 12354 berechnet werden.

Entsprechend des Verhältnisses aus betrachtetem Frequenzband und der Koinzidenzfrequenz des Bauteils berechnet sich der Abstrahlgrad nach den folgenden Gleichungen. Für massive Wände, wie sie im Referenzgebäude zu finden sind, kann der Abstrahlgrad σ_2 (Abbildung 34) für tiefe Frequenzen 20 Hz bis 50 Hz berechnet werden über

$$\sigma_2 = 4 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \left(\frac{f}{c_0} \right)^2 \quad (67)$$

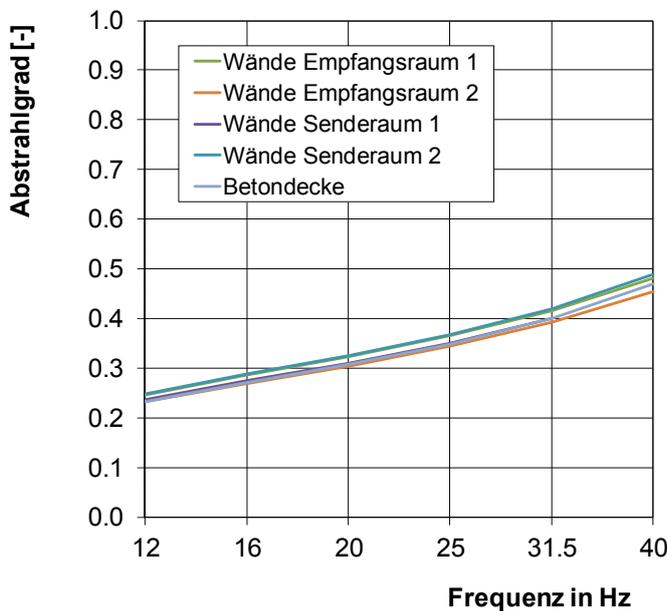


Abbildung 34: Abstrahlgrad σ_2 der massiven Bauteile im Referenzgebäude

Für den Frequenzbereich in der Größenordnung der Grenzfrequenz (ca. 100 Hz) berechnet sich der Abstrahlgrad σ_3 (Abbildung 35) der betrachteten massiven Bauteile nach

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{2\pi \cdot f \cdot (l_1 + l_2)}{16c_0}} \quad (68)$$

Bisher nicht abschließend untersucht ist jedoch, ob diese Gleichungen in Bezug auf Schwingungsübertragungen aus dem Baugrund angewendet werden können, weil der Anteil der freien und erzwungenen Wellen für diese spezielle Art durchaus erheblich anders sein kann als bei Nutzer induzierten Geräuschen im Gebäude. Hier ist aus Sicht der Autoren noch Forschungsbedarf gegeben.

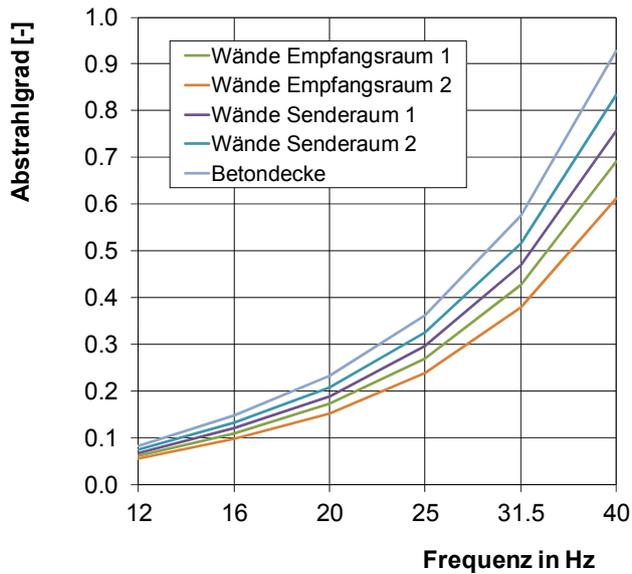


Abbildung 35: Abstrahlgrad σ_3 der massiven Bauteile im Referenzgebäude

Zur Beschreibung des Schallschutzes einer Baustruktur über die verschiedenen Übertragungswege kann das folgende Model verwendet werden [26]. Dafür müssen die Gebäude-daten zu Struktur und baulicher Ausbildung der einzelnen Elemente und Stoßstellen be-kannt sein.

$$R_{ij} = \frac{R_i}{2} + \Delta R_i + \frac{R_j}{2} + \Delta R_j + K_{ij} + 10 \cdot \lg \left(\frac{S_s}{l_0 \cdot l_{ij}} \right) \quad (69)$$

wobei R_{ij} das Schalldämm-Maß eines trennenden Bauteils; R_i das Schalldämm-Maß des Bauteils i im Senderaum; R_j das Schalldämm-Maß des Bauteils j im Empfangsraum; ΔR_i , ΔR_j das Luftschallverbesserungsmaß durch Vorsatzkonstruktionen für ein trennendes Bauteil im Senderaum und/oder im Empfangsraum (im Testgebäude nicht vorhanden); $T_{s,lab}$ die Körperschall-Nachhallzeit für ein Bauteil im Prüfstand; K_{ij} aus DIN 4109-Teil 3 das Stoß-stellendämm-Maß für jeden Übertragungsweg von Bauteil i zu Bauteil j ; S_s die Fläche des trennenden Bauteils; S_i die Fläche des Bauteils i im Senderaum; S_j die Fläche des Bauteils j im Empfangsraum und l_{ij} die gemeinsamen Kopplungslänge zwischen Bauteil i und Bauteil j , gemessen von Oberfläche zu Oberfläche sind [51].

Für das zu untersuchende Testgebäude sind alle erforderlichen Daten zur Berechnung der akustischen Eigenschaften bekannt bzw. werden rechnerisch und messtechnisch ermittelt. Da die in der Norm gegebenen Daten zum Teil für den bauakustisch relevanten Frequenz-bereich von 100 Hz bis 3150 Hz vorgesehen sind, wird hier für tiefe Frequenzen beim Schalldämm-Maß auf Prüfstandswerte aus einer Datenbank [8] zurückgegriffen und für tiefe Frequenzen nach EN ISO 12354-1 berechnet.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden am Prüfstand experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um das Abstrahlverhalten von Luftschall durch massive Bauteile zu quantifizieren. Dabei wurde auf die Abstrahlphänomene im tiefen Frequenzbereich (20 Hz bis 200 Hz) eingegangen und durch die detaillierte Berechnung nach DIN EN 12354-1 ermittelt.

Das Schalldämm-Maß R eines Bauteils ist definiert nach

$$R = -10 \lg \tau \quad (70)$$

Für den Fall, dass die betrachtete Frequenz kleiner der Koinzidenzgrenzfrequenz f_c (Koinzidenzfrequenz Betondecke ca. 117 Hz; Wände ca. 100 Hz) ist, kann der Transmissionsgrad eines Bauteils berechnet werden nach

$$\tau = \left(\frac{2 \cdot \rho_0 \cdot c_0}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot m'} \right) \cdot \left(2\sigma_f + \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1^2 + l_2^2} \cdot \sqrt{\frac{f_c}{f}} \frac{\sigma^2}{\eta_{tot}} \right) \quad (71)$$

Dabei bezeichnet f die Frequenz, f_c die Koinzidenzgrenzfrequenz, σ den Abstrahlgrad für freie BiegeWellen, σ_f den Abstrahlgrad für erzwungene BiegeWellen, ρ_0 die Dichte der Luft (unter Normalbedingungen 1200 kg/m³), η_{tot} den Gesamtverlustfaktor, l_1 , l_2 die Kantenlängen der Bauteile 1 und 2 und m' die flächenbezogene Masse des Bauteils.

Die Koinzidenzfrequenz ergibt sich aus

$$f_c = \frac{c_0^2}{1,8 \cdot c_L \cdot t} \quad (72)$$

wobei t die Bauteildicke beschreibt.

Je nach Verhältnis von betrachteter Frequenz und Koinzidenzfrequenz, muss der Abstrahlgrad des Bauteils berechnet werden. Für den hier betrachteten Fall ist f stets kleiner $f_c/2$ und auch kleiner als f_{11} , sodass sich folgender Abstrahlgrad ergibt:

$$\sigma = 4 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot \left(\frac{f}{c_0} \right)^2 \quad (73)$$

Für höhere Frequenzbereiche ergeben sich andere Bestimmungsformeln für den Abstrahlgrad, die hier nicht weiter erläutert werden, da sie im Rahmen des Forschungsprojektes nicht untersucht wurden.

Die Wellenzahl in Luft ergibt sich aus folgender Gleichung

$$k_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c_0} \quad (74)$$

5.2 Ermittlung des Abstrahlgrades von schwingenden Oberflächen

Für den tiefen Frequenzbereich stellen die angegebenen Gleichungen für die Berechnung des Abstrahlgrades Näherungen dar, da diese für diffuse Schallfelder gelten. Im Frequenzbereich von 20 – 100 Hz ist aber das Schallfeld zum Teil modal, sodass es zum einen bei der Messung der Schalldruckpegel in Räumen, und zum anderen für die gemachten Annahmen des Schall-Abstrahlverhaltens von Oberflächen, zu Unsicherheiten kommen kann.

Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen, dass es sehr wichtig ist, die Konstruktion der betrachteten Bauteile gut zu kennen, um deren Koinzidenzfrequenzen berechnen zu können. Denn die Berechnung des Abstrahlgrades im unteren Frequenzbereich ist maßgeblich von der Koinzidenzfrequenz abhängig [33], [45]. Mit den so errechneten Daten zur Abstrahlcharakteristik der Bauteile für tiefe Frequenzen werden die Berechnungen der Schalldämm-Maße erweitert, sodass nun der Luftschall auch für sehr tiefe Frequenzen berechnet und prognostiziert werden kann.

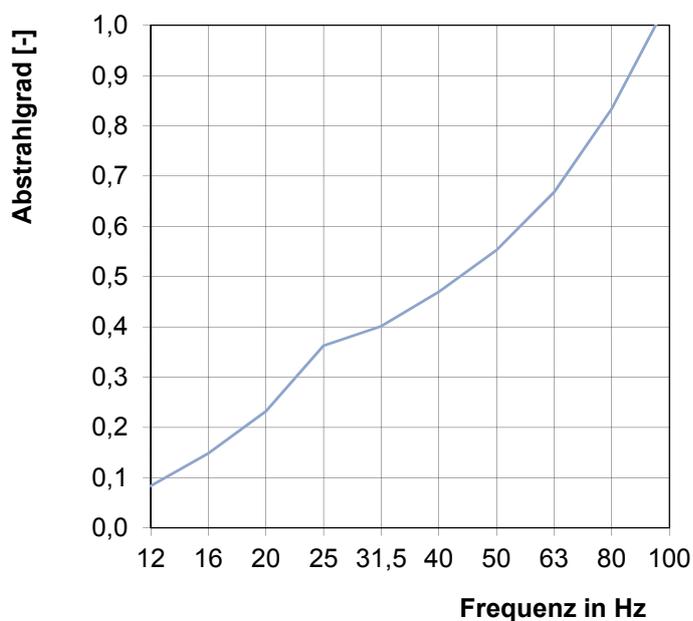


Abbildung 36: Abstrahlgrad einer Betondecke für verschiedene Frequenzbereiche

Abbildung 36 zeigt den für verschiedene Frequenzbereiche kombinierten Abstrahlgrad für die Decke im Referenzprüfstand. Im sehr tiefen Frequenzbereich strahlt die Platte fast keinen Luftschall ab, mit der mit der Frequenz nimmt die Abstrahlung zu. Zu dem Frequenzband um 100 Hz hin nähert sich der Abstrahlgrad 1 an.

5.3 Test-Referenzgebäude

Als Test-Referenzgebäude zur Prüfung von tieffrequentem, sekundären Luftschall wurde der an der TU Kaiserslautern vorhandene akustische Deckenprüfstand verwendet. Dieser ist eine Raum-in-Raum-Konstruktion und besteht aus zwei übereinander liegenden Räumen, die vom übrigen Baukörper schwingungstechnisch entkoppelt sind. Dadurch wurde eine detaillierte Untersuchung der Schalleinleitung im unteren Raum-, Wand- und Fußbodenbereich möglich. Die vorhandene Test-Konstruktion ist wie folgt aufgebaut (Tabelle 1):

Tabelle 1: Detaillierte Bauteilparameter des Referenzgebäudes

Bauteil	Material	Dicke in cm	m' in kg/m ²	Fläche in m ²
Mauerwerk, aufgehende Wände				(inkl. Öffnungen)
Raum unten	Kalksandstein, MG III	24	480	2 x (14 + 15,75)
Raum oben	Kalksandstein, MG III	24	480	2 x (12 + 13,5)
Decken/Böden				
Grundplatte (unten)	Stahlbeton	19	456	16
Decke 1 (Mitte)	Stahlbeton	14	336	16
Decke 2 (oben)	Stahlbeton	19	456	16
Stöße zwischen allen Bauelementen	massiv – massiv			

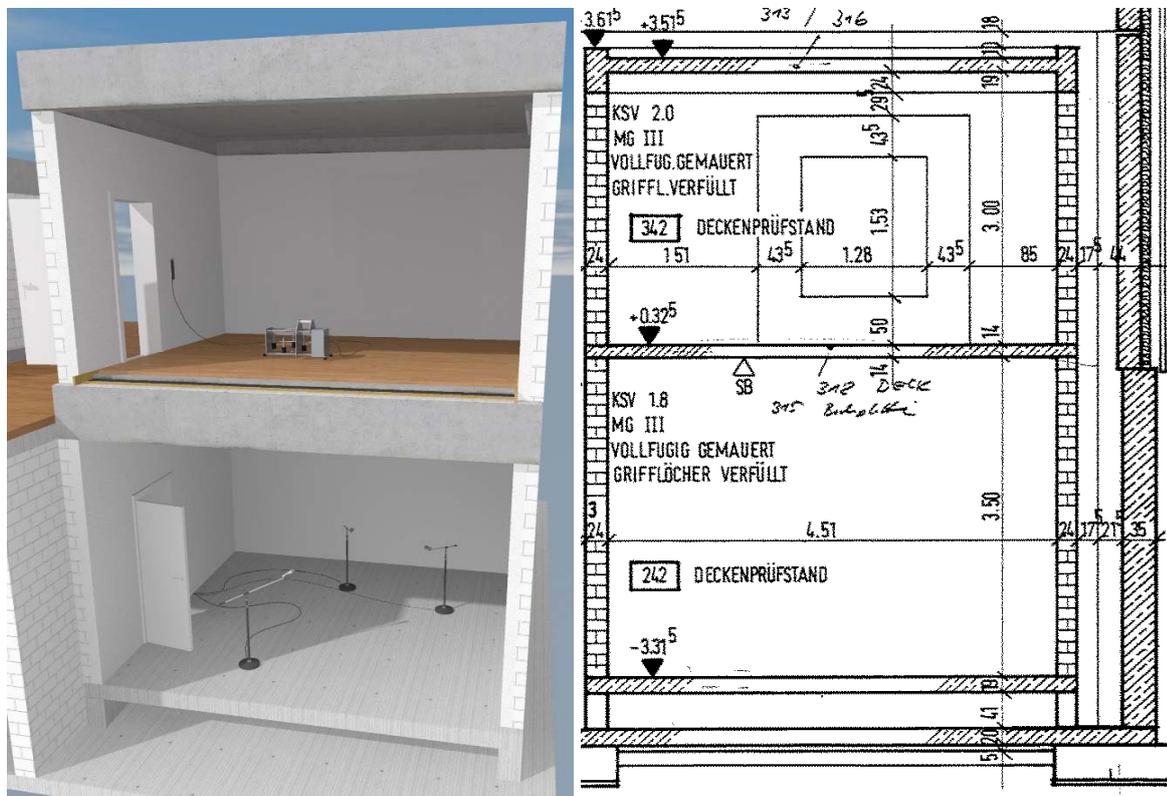


Abbildung 37: Links: 3-D-Modell des Prüfstandes an der TU Kaiserslautern; Rechts: Längsschnitt des Prüfstandes

5.4 Berechnung der Schalldämmung im Referenzgebäude

Die Schalldämmung im Referenzgebäude wurde mit verschiedenen Verfahren ermittelt. Zunächst wurde das Schalldämm-Maß der Bauteilsituation Senderraum unten – Empfangsraum oben über Daten aus einer Bauteildatenbank (Bastian) frequenzabhängig berechnet (50 Hz bis 5000 Hz). Dazu wurde der Formelapparat mit dem Prognosemodell nach DIN EN 12354-1 bzw. DIN 4109-2 verwendet.

Des Weiteren wurde für den tiefen Frequenzbereich bis 20 Hz das Schalldämm-Maß über die analytischen Beschreibungen für das Schalldämm-Maß nach DIN EN 12354-1 direkt berechnet.

Für einen Vergleich wurde die Schalldämmung der Raumsituation gemessen. Dazu wurden mit verschiedenen Lautsprechern Messsignale erzeugt, mit denen über die Schallpegeldifferenz und der Nachhallzeit im Empfangsraum das Bau-Schalldämm-Maß ermittelt wurde. Als Messsignale wurden rosa Rauschen und weißes Rauschen verwendet. Die Schallquellen waren ein Subwoofer sowie ein Round-Speaker (runder Dodekaeder). Die Messung mit dem Subwoofer ermöglichte die Erzeugung von Schall für sehr tiefe Frequenzen, wie er auch bei sekundärem Luftschall verstärkt auftritt.

Im in [Abbildung 38](#) dargestellten Ergebnis zeigen sich Unterschiede für die Ermittlung des Schalldämm-Maßes des Testgebäudes. Das Ergebnis durch die Quelle Subwoofer kann nur bis ca. 300 Hz verwendet werden, da oberhalb dieser Frequenz die Abgabe von Schall sehr stark abnimmt (abfallende lila Kurve). Von 50 Hz bis ca. 300 Hz stimmen die beiden Schalldämm-Maß-Messungen mit Round-Speaker und Subwoofer (lila; orange) relativ gut überein. Im unteren Frequenzbereich liefert die Subwoofer-Messung kleinere Schalldämm-Maß-Werte, was auf das bedeutend stärkere Messsignal zurückgeführt werden kann. Die theoretische Berechnung von R' (grün) ergibt im tiefen Frequenzbereich kleinere Werte und im hohen Frequenzbereich ähnliche Werte wie die Messung mit Round-Speaker und weißem Rauschen (orange), hier als *übliche* Schalldämm-Maß Messung bezeichnet.

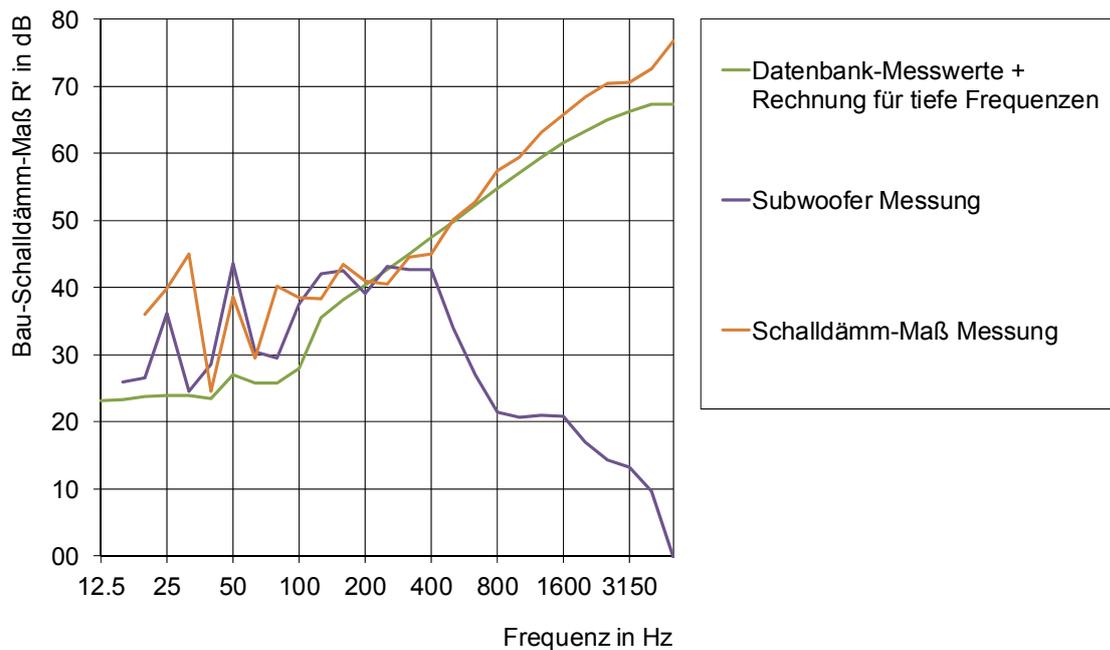


Abbildung 38: Schalldämm-Maß der Decke im Deckenprüfstand der TU Kaiserslautern; berechnet und gemessen (Einbruch lila Kurve aufgrund des Subwoofer-Arbeitsbereichs)

5.5 Schallanregung im Senderraum

Die Schallanregung im Senderraum erfolgt zum einen durch elektrodynamische Shaker und des Weiteren durch einen Subwoofer ([Abbildung 39](#)). Dieser besondere Lautsprecher (Anregung von Luftschall) besitzt eine besonders große Membran, die tieffrequenten Luftschall abstrahlen kann. Der frequentielle Arbeitsbereich des hier verwendeten Lautsprechers liegt zwischen 20 Hz und 200 Hz. Dieser Frequenzbereich endet im unteren Bereich an der Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Gehörs und im oberen Bereich am oberen Ende der Frequenzen des sekundären Luftschalls durch Schienenverkehr. Mit dieser Schallquelle kann also sekundärer Luftschall, erzeugt durch Schienenlärm, simuliert und das Testgebäude angeregt werden.



Abbildung 39: Subwoofer zur Erzeugung von tieffrequentem Schall, analog sekundärem Luftschall

Des Weiteren werden die akustischen Eigenschaften der Baustruktur durch sehr tieffrequente Luftschallanregung charakterisiert. Im Empfangsraum (oben) wurde an den maßgeblichen Bauteilen die mittlere Schnelle mit Beschleunigungssensoren gemessen.

Weiterhin wurden während der Anregung im Senderraum gleichzeitig im Empfangsraum mit einem Scanning-LDV die Oberflächenschwingungen der an der Abstrahlung beteiligten Flächen im Empfangsraum untersucht und aufgenommen. Der gewählte Messaufbau ist in [Abbildung 40](#) dargestellt. Durch das gleichzeitige Messen des Luftschalls wurden dadurch detaillierte Aussagen zum Abstrahlverhalten im Empfangsraum möglich, insbesondere eine Quantifizierung des Schwingungsverhaltens für den tiefen Frequenzbereich.

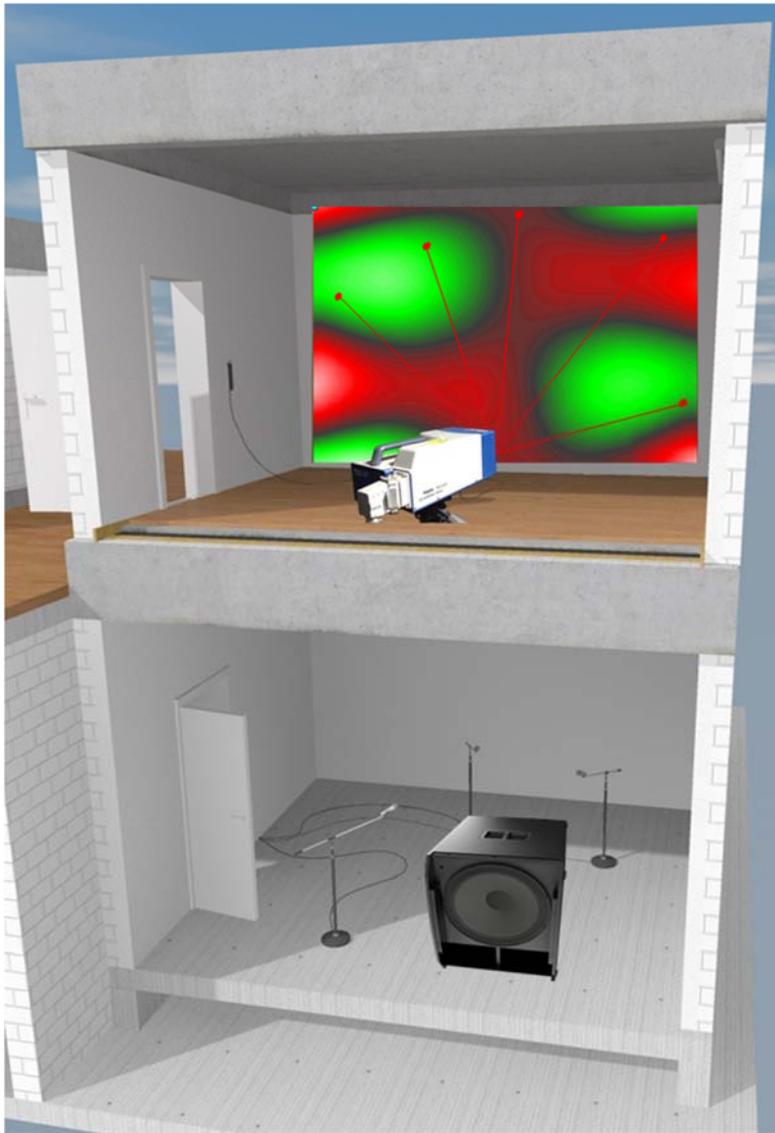


Abbildung 40: Prinzip der Messung der Oberflächenschnelle mit einem Scanning-LDV (3D), erzeugt durch eine mit einem Subwoofer simulierte Sekundärschallanregung; Darstellung eines exemplarischen Schwingungsbildes (Eigenmode der Wandplatte) mit Wellenbergen und-tälern (Laserstrahl symbolisch)

Des Weiteren erfolgte eine messtechnische Aufnahme der Gebäudeschwingungen am Test-Referenz-Versuchsstand. Der Schallschutz von Gebäuden wird im erweiterten bauakustischen Frequenzbereich innerhalb der Terzfrequenzbänder von 50 Hz bis 5000 Hz ermittelt. Zwar befinden sich die für die Luft- und Körperschallübertragung und somit die für den Planer schallschutzrelevanten Frequenzen in diesem Bereich, allerdings können auch tiefere Frequenzen unter der 50 Hz-Grenze bei einem Schalldruck oberhalb der Hörschwelle zu Störeffekten führen. Es besteht folglich ein besonderes Interesse die Reaktion der Bauwerksstruktur infolge Schwingungsanregung unter 50 Hz zu untersuchen.

Insbesondere bei der Anregung eines Gebäudes über Vibrationen, die über das Erdreich transportiert werden, wird die Gebäudestruktur in ihren Eigenmoden zu Schwingungen angeregt. Liegen Eigenfrequenzen von Gebäudebauteilen über 20 Hz, können für den Menschen störende Geräusche entstehen.

Die Systemantwort der Bauwerke kann bei dieser Fragestellung mittels einer Modalanalyse analysiert und bearbeitet werden. Dazu werden die über das Bauwerk und seine Bausubstanz zur Verfügung stehenden Informationen in ein FE-Modell eingearbeitet und anschließend mittels einer experimentellen Modalanalyse verifiziert. In dieser Studie wird konkret der zweigeschossige Deckenprüfstand des Fachgebiets Bauphysik der TU Kaiserslautern unter Berücksichtigung der vorliegenden Pläne und Materialinformationen mit der FE-Software *SAP2000* modelliert und die dynamischen Parameter Eigenfrequenz und Eigenform berechnet. In [Abbildung 41](#) sind die einzelnen Modellierungsphasen für das FE-Modell dargestellt.

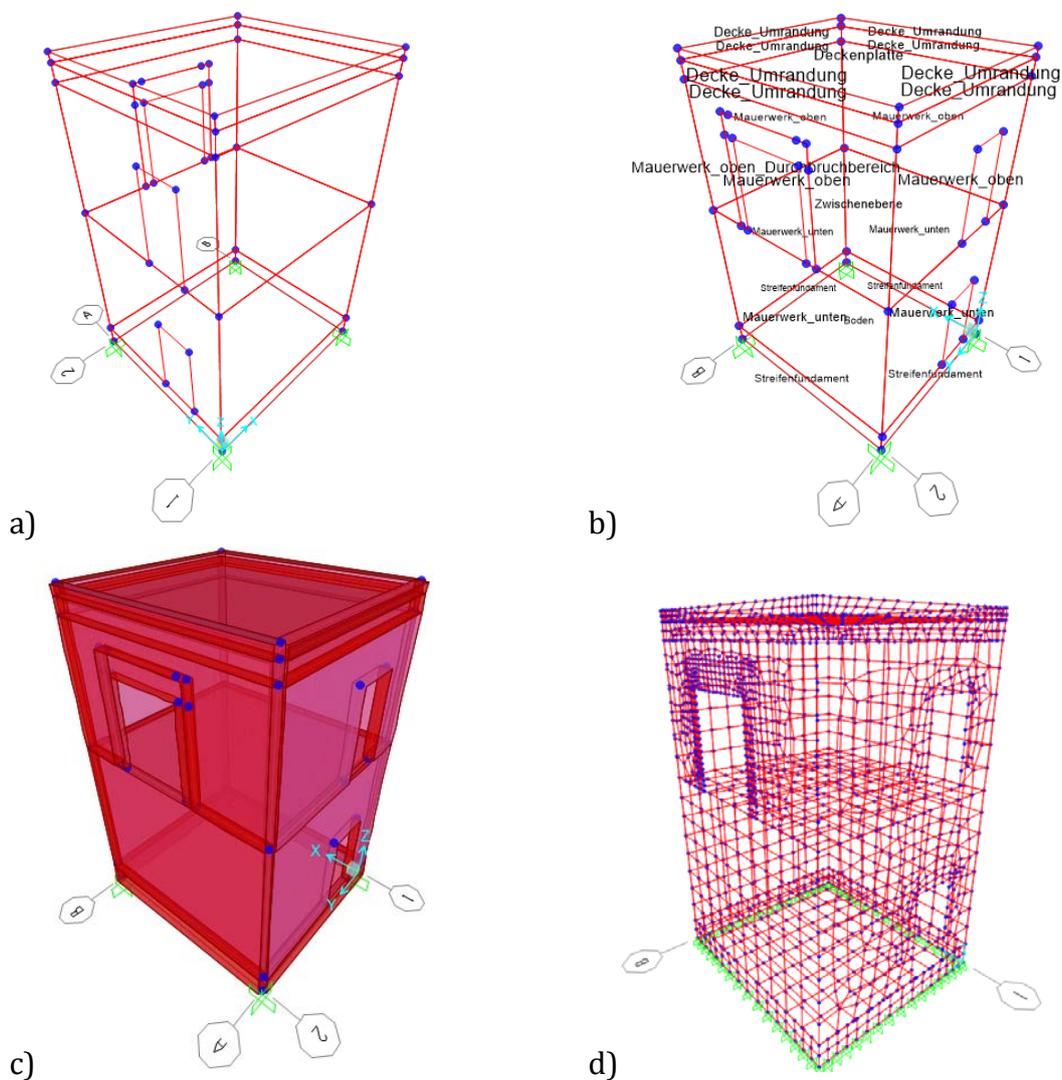


Abbildung 41: FE-Modell des Prüfstandes; Diskreditierung des Testgebäudes zur Ermittlung der Gebäude-Eigenfrequenzen - a) Schalenmodell, b) Materialzuordnung, c) Extrudierte Darstellung, d) Vernetzung des Modells, meshing

Als Ergebnis der strukturdynamischen Berechnung ergeben sich die Systemeigenfrequenzen des Prüfraums. Exemplarisch für die Untersuchungen sind die ersten vier Eigenformen in [Abbildung 42](#) dargestellt.

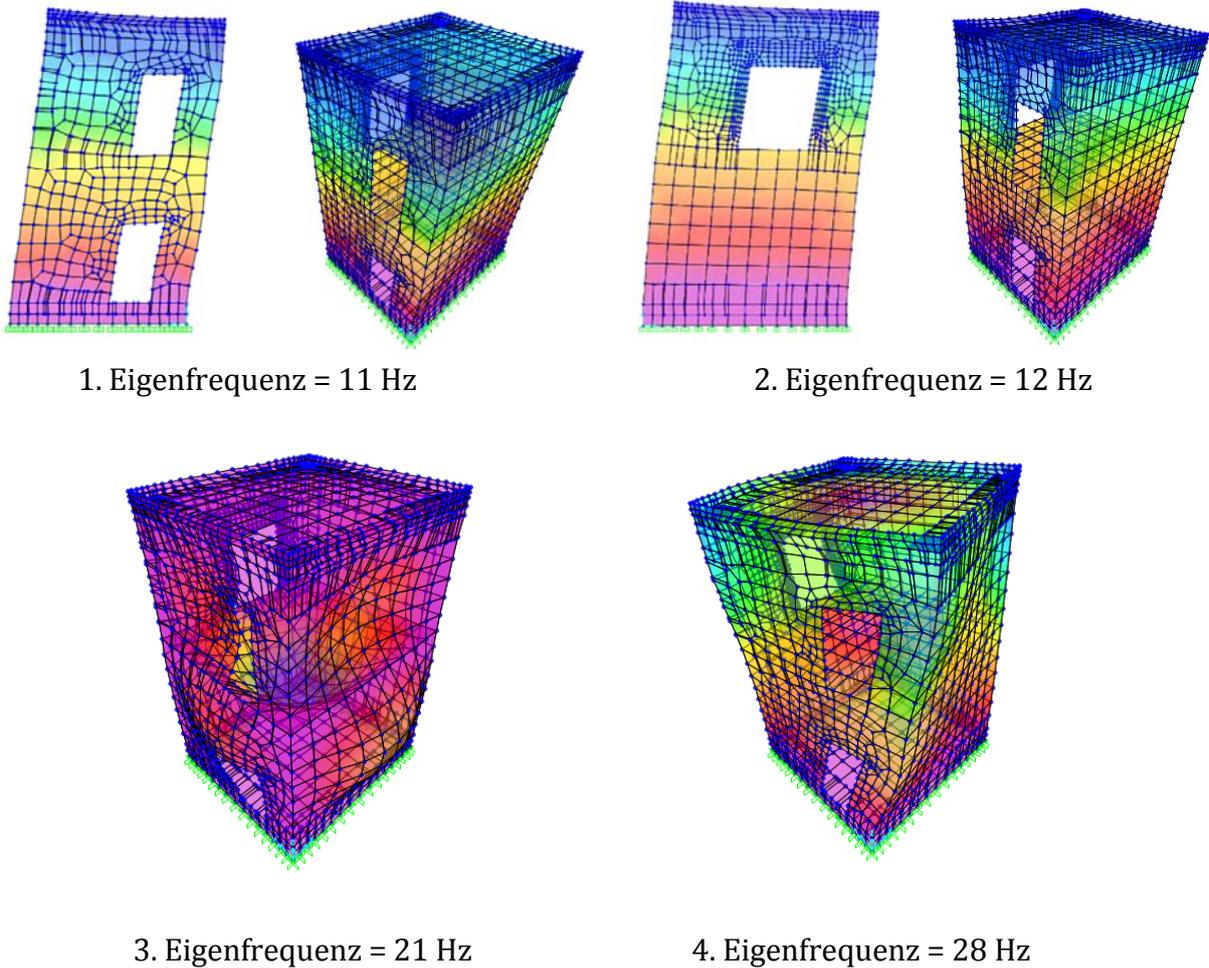


Abbildung 42: Darstellung der ersten vier Eigenfrequenzen anhand der translatorischen Verschiebungen

Die berechneten Eigenfrequenzen wurden nun mit der experimentellen Bestimmung verglichen. Dazu wurde mit Beschleunigungsaufnehmern an verschiedenen Punkten am Testobjekt das Schwingungsverhalten aufgenommen. [Tabelle 2](#) vergleicht Mess- und Berechnungswerte für die 1. und 2. Gebäudeeigenmoden.

Tabelle 2: Vergleich der Eigenfrequenzen aus Berechnung und Messung

Bauteil	Richtung	1. Eigenfrequenz in Hz		2. Eigenfrequenz in Hz	
		SAP2000	Messung	SAP2000	Messung
Bodenplatte (gelenkig)	z	32	48	73	90-93
Bodenplatte (eingespannt)	z	58		108	
Zwischendecke (gelenkig)	z	24	30	57	67
Zwischendecke (eingespannt)	z	44		83	
Dachebene	z	31	29	59	-
Wand 1	y	29	36	50	-
Wand 2	x	32	35	61	55
Wand 3	y	24	25	53	51
Wand 4	x	22	22	46	40
Wand 5	x	22	22	45	43

Es wird deutlich, dass die Gebäudeeigenschwingungen weit im hörbaren Frequenzbereich liegen (bis ca. 100 Hz). Dadurch kann bei Anregungen durch Bodenschwingungen im Gebäude abgestrahlter Sekundärschall/Luftschall entstehen.

Mit den durch diese Simulation gewonnen Daten können jetzt Rückschlüsse auf das akustische Übertragungsverhalten der Gebäudestruktur gezogen werden. Bei den ermittelten Eigenfrequenzen schwingt die Gebäudestruktur bei Anregungen besonders gut und leitet Schwingungen, zum Beispiel durch Anregungen aus dem Erdreich, besonders gut weiter.

Im nächsten Schritt wurden akustische Messungen bei definierter Anregung im unteren Teil des Referenzobjektes durchgeführt. Die Besonderheit dabei ist das Messen des sich einstellenden Schalldruckpegels im tiefen Frequenzbereich (20 Hz bis 100 Hz). Hier spielt der Abstrahlgrad der Raumbegrenzungsflächen eine wesentliche Rolle. Der Abstrahlgrad wurde im weiteren Projektfortschritt über die Messung der Oberflächenschnelle mit einem Laser-Doppler-Vibrometer ermittelt. Die Messung der Oberflächenschnellen wird auch zur Verifizierung der im Gebäudesimulation errechneten Eigenmoden genutzt.

5.6 Messung der Oberflächenschwingungen

Nachdem die Eigenmoden der Gebäudestruktur simuliert und messtechnisch erfasst worden sind, wurde mit Körperschallmessungen an ausgewählten Oberflächen das Schwingungsverhalten der Bauteile aufgenommen. Dazu wurden Beschleunigungssensoren und ein Laser-Doppler-Scanning-Vibrometer (im Folgenden LDV genannt) verwendet. Mit dem LDV ist es möglich, neben Eigenmoden auch weitere Schwingungsformen, sowie Kombina-

tionen aus verschiedenen horizontalen und vertikalen Moden zu vermessen und zu visualisieren.

Beschleunigungssensoren haben gegenüber dem LDV den Vorteil, dass sie an jeden beliebigen Punkt des zu untersuchenden Objektes montiert werden können, wohingegen das LDV möglichst senkrecht zur gesamten Oberfläche ausgerichtet sein sollte. Allerdings ist mit Beschleunigungssensoren kein restlos rückwirkungsfreies Messen von Schwingungen möglich. Diese Art von Sensoren erhöhen die Masse des schwingenden Bereiches um den Kontaktpunkt Sensor-Platte. Das heißt, die zu messenden Körperschallschwingungen des Plattenelementes werden durch die Masse des Sensors beeinflusst. Zusätzliche Massen auf einem Empfänger bewirken durch ihren Blindwiderstand eine Verschiebung der Schwingungsenergie. Das bedeutet, die zusätzliche Masse durch das Aufbringen von Beschleunigungssensoren erhöht die Punktimpedanz an diesem Punkt und verringert somit die Schwingung an dieser Stelle. Dieser Effekt kann bei den hier verwendeten Empfangsstrukturen vernachlässigt werden, da ihre Masse sehr viel größer als die der Sensoren ist.



Abbildung 43: Beschleunigungssensoren zur Messung der Oberflächenschnelle auf den Raumbegrenzungsflächen

Aus den gemessenen Schwingungsgeschwindigkeiten kann der Schnellepegel des Bauteils berechnet werden:

$$L_v = 20 \cdot \log \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad (75)$$

Dabei ist v der Effektivwert der Schwingschnelle in m/s und $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s der Bezugswert der Schallschnelle.

Die Messung der Oberflächenschnelle bzw. Beschleunigung auf schwingenden Deckenplatten ist abhängig von der Lage der Sensoren. Misst man zum Beispiel in der Nähe eines Wellenknotens, so ist dort eine sehr geringe Auslenkung messbar. Aus diesem Grund muss bei

der Messung auf eine ausreichende Zahl an Sensoren an verschiedenen Positionen auf der Bauteiloberfläche geachtet werden.

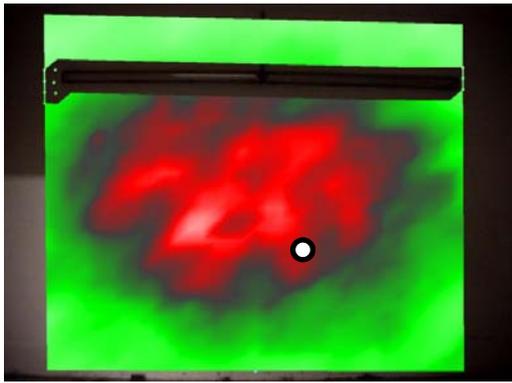
Für die Messung der Oberflächenschnelle wurde neben den Beschleunigungssensoren auch ein Laser-Doppler-Scanning-Vibrometer (LDV) der Firma Polytec [21] verwendet, das die Oberfläche mit einem Laserstrahl in einem festgelegten Raster abtastet und so eine berührungs- und rückwirkungsfreie Messung der Schnelle an sehr vielen Punkten auf der Plattenoberfläche in gleichmäßigen Abständen (10 cm) ermöglicht (Abbildung 44).



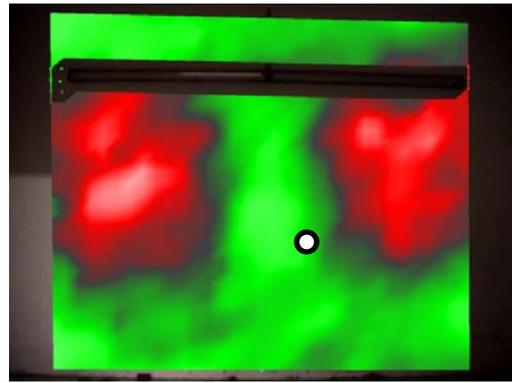
Abbildung 44: Messprinzip Laser-Doppler-Vibrometer; Messstrahl mit Laser-Messpunkt auf einer Oberfläche

Die Laser-Doppler-Vibrometrie ist ein berührungsloses und damit rückwirkungsfreies, optisches Messverfahren für mechanische Schwingungsvorgänge. Die Grundlage für das Messprinzip bildet die Frequenzverschiebung eines Laserstrahls, die dieser bei der Reflexion eines schwingenden Messpunktes erfährt. Dieses aus der Akustik bekannte Phänomen wird Dopplereffekt genannt. Durch die Überlagerung des Ausgangssignals mit dem durch den Dopplereffekt modulierten reflektierten Strahl wird im Messgerät eine Interferenz erzeugt, die die Berechnung der Schwinggeschwindigkeit des Reflektors ermöglicht. Da die Anregung der Empfängerstruktur reproduzierbar ist, kann bei gleichen Erregersignalen an vielen verschiedenen Punkten die Oberflächenschnelle mit dem LDV gemessen werden. Anschließend werden mit der Gerätesoftware alle Messpunkte kombiniert und ein Schwingungsbild der vermessenen Oberfläche erzeugt.

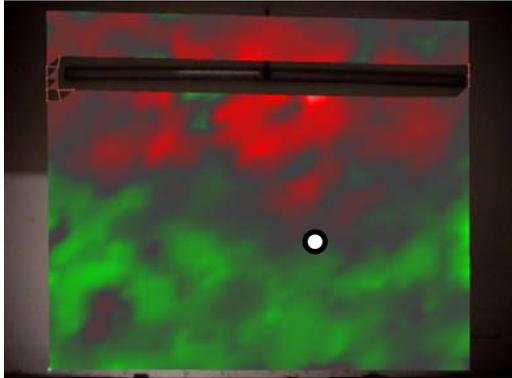
Die folgenden Bilder der [Abbildung 45](#) zeigen ausschnittsweise für ein Bauteil die Haupt-Moden. Diese stimmen mit den rechnerisch ermittelten gut überein (hier dargestellt Terzbänder).



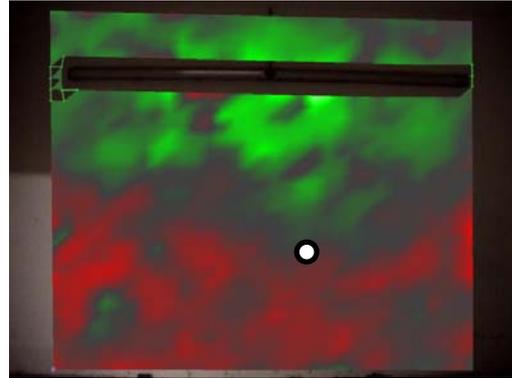
30 Hz



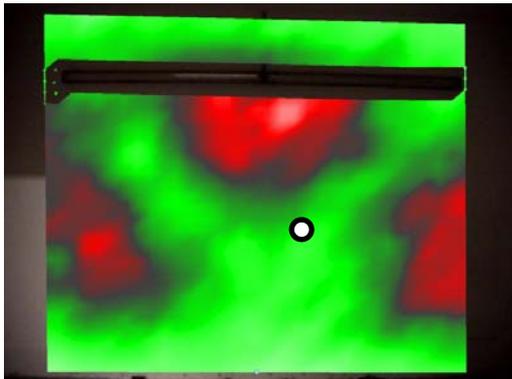
60 Hz



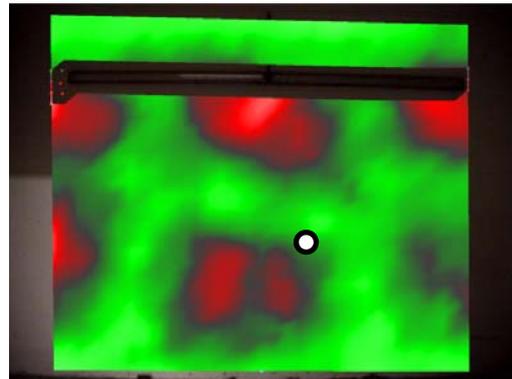
75 Hz (Phase = 0)



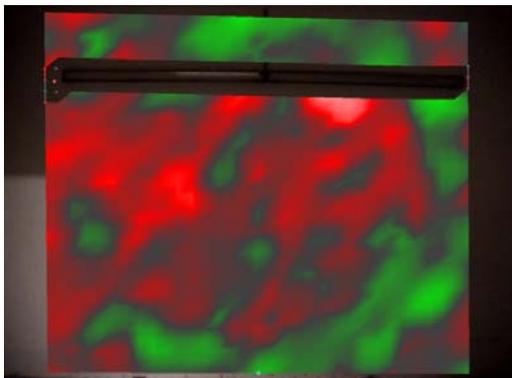
75 Hz (Phase = π)



90 Hz



140 Hz



500 Hz

Abbildung 45: Schwingungsbilder von verschiedenen Eigenmoden einer Raumbegrenzungsfläche (Wand), aufgenommen mit einem Laser-Doppler-Vibrometer. Der rote Bereich zeigt Wellenmaxima, der grüne Bereich Wellenminima. In weiß ist der Plattenmittelpunkt markiert

Es ist zu erkennen, dass bei einem in der Mitte der Platte platzierten Beschleunigungssensor nur in der Nähe eines Wellenknotens (bei 75 Hz und 90 Hz) die Beschleunigung

gemessen wird. Diese Messpositionen sind also nicht repräsentativ für die Energie in diesem Frequenzbereich, da dieser Wert kein effektives Beschleunigungsmittel darstellen kann.

Mit Hilfe der Schwingungsbilder können die Positionen der Wellenknoten detektiert werden. Damit bieten sie den Vorteil im Testreferenzgebäude einzelne Beschleunigungsaufnehmer genau so platzieren zu können, dass ein guter Mittelwert der Oberflächenschnelle gemessen werden kann. Damit können Messfehler (zum Beispiel durch zufällige Platzierung aller Beschleunigungssensoren im Bereich von Wellenknoten) reduziert werden.

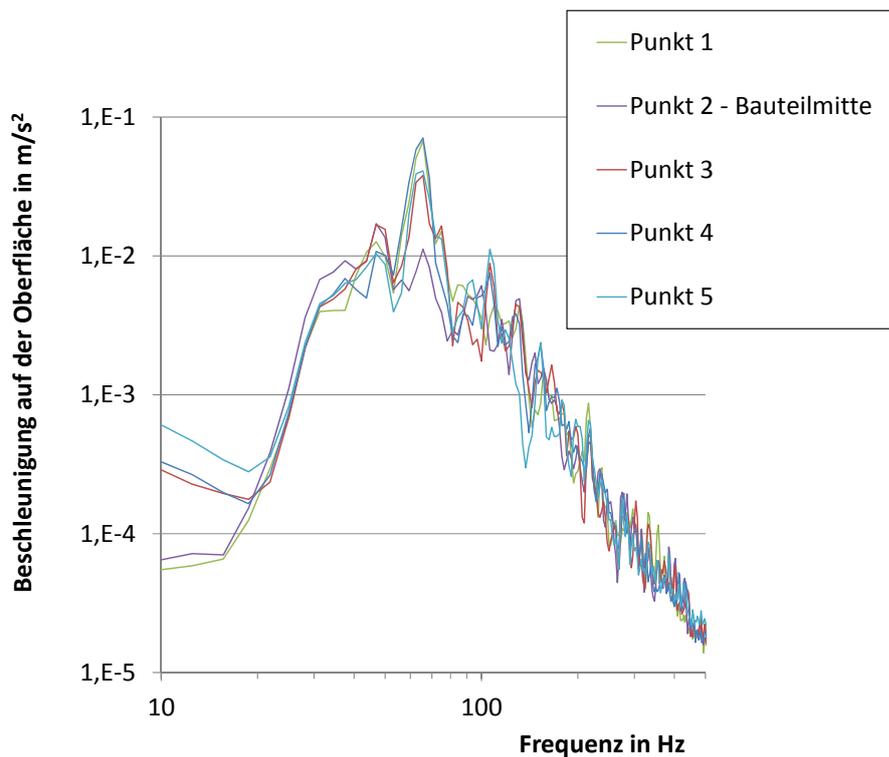


Abbildung 46: Beschleunigung auf der Decke bei Anregung mit tieffrequenten Luftschal

Abbildung 46 zeigt die auf der Deckenplatte verteilt gemessenen Oberflächenschnellen. Es ist zu erkennen, dass die Schnelle in Plattenmitte (lila) qualitativ nicht die mittleren Beschleunigungen auf der Platte im unteren Frequenzbereich wiedergibt. Es sollte also vorteilhaft sein, ein Beschleunigungsmittel auf Empfangsplatten zu messen.

5.7 Messen von Schalldruckpegeln bei tiefen Frequenzen



Abbildung 47: Messung des Schalldruckpegels im Senderaum mit Mikrofonen; Luftschallquelle

Zur Messung von Schalldruckpegeln im Raum wurde wie in [Abbildung 47](#) dargestellt, die Luft mit einer Luftschallquelle angeregt und der Schalldruckpegel mit Mikrofonen aufgezeichnet. Durch Abschalten eines Anregungssignals oder nach einer Impulsanregung kann mit Hilfe der Messung der Schalldruckpegel die Nachhallzeit des Raums bestimmt werden.

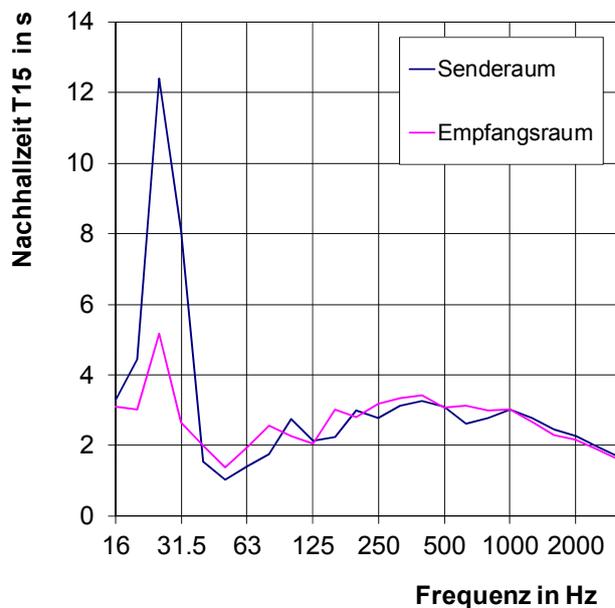


Abbildung 48: Gemessene Nachhallzeiten T15 in Empfangs- und Senderaum des Testreferenzgebäudes

Die gemessene Nachhallzeit ([Abbildung 48](#)) beschreibt die raumakustischen Eigenschaften des Raumes. Im Diagramm sind sich beide Räume ähnlich, sie unterscheiden sich lediglich bei einer Frequenz im tiefen Frequenzbereich signifikant. Die Ursache dafür sind modale Effekte im Raum die das Messen der Schalldruckpegel beeinflussen.

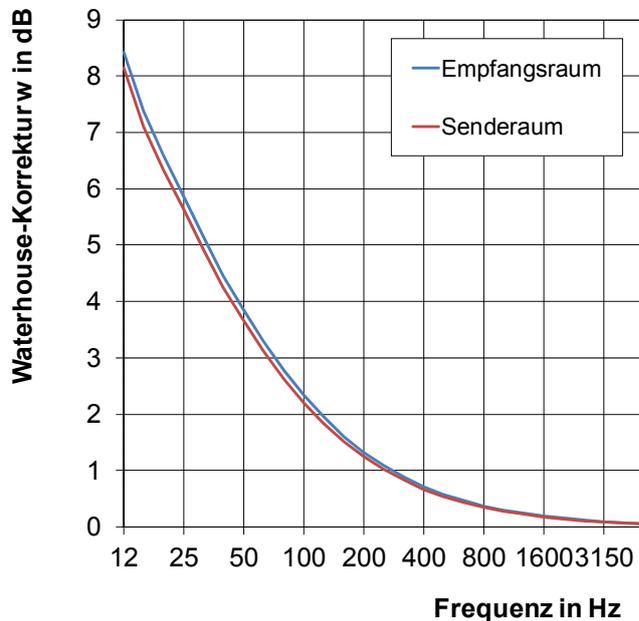


Abbildung 49: Waterhouse Korrektur nach DIN EN 12354-5 für das Messen des Schalldruckpegels bei tiefen Frequenzen

[Abbildung 49](#) beschreibt die so genannte Waterhouse-Korrektur pro Oktavband [59], die bei dem Messen von Schalldruckpegeln im tiefen Frequenzbereich zu berücksichtigen ist. Aufgrund von Reflexionseffekten an den Raumbegrenzungsflächen ist dort in direkter Nähe ein höherer Schwingungsenergiegehalt messbar, sodass das Messen des mittleren Schalldruckpegels in der Raummitte zu einem zu kleinen Pegel führt. Zumeist hebt sich bei Pegeldifferenzen die Korrektur gerade auf, wenn Sende- und Empfangsraum ungefähr gleich groß sind.

Insbesondere bei der Messung des sekundären Luftschalls ist es wichtig die Art der Korrektur zu berücksichtigen, da sie mit abnehmender Frequenz größer wird und im Bereich von 20 Hz bis 50 Hz bis zu 6 dB groß werden kann (in Abhängigkeit des Raumvolumens). Die Waterhouse-Korrektur kann folgendermaßen berücksichtigt werden:

$$c_W = 10 \cdot \lg \left(\frac{c_0 \cdot S_t}{8 \cdot f \cdot V} \right) \tag{76}$$

Dabei entspricht c_0 der Schallgeschwindigkeit, S_t der geometrischen Fläche aller Raumbegrenzungsflächen, f der Terzmittenfrequenz und V dem Raumvolumen.

In der DIN EN 12354-5 wird beschrieben, dass diese analytische Beschreibung tendenziell etwa das Doppelte des gemessenen Schalldruckes ergibt. Bei den durchgeführten Messungen der Schalldruckpegel wurde deshalb die Waterhouse-Korrektur mit einem Faktor 0,5 versehen und entsprechend berücksichtigt.

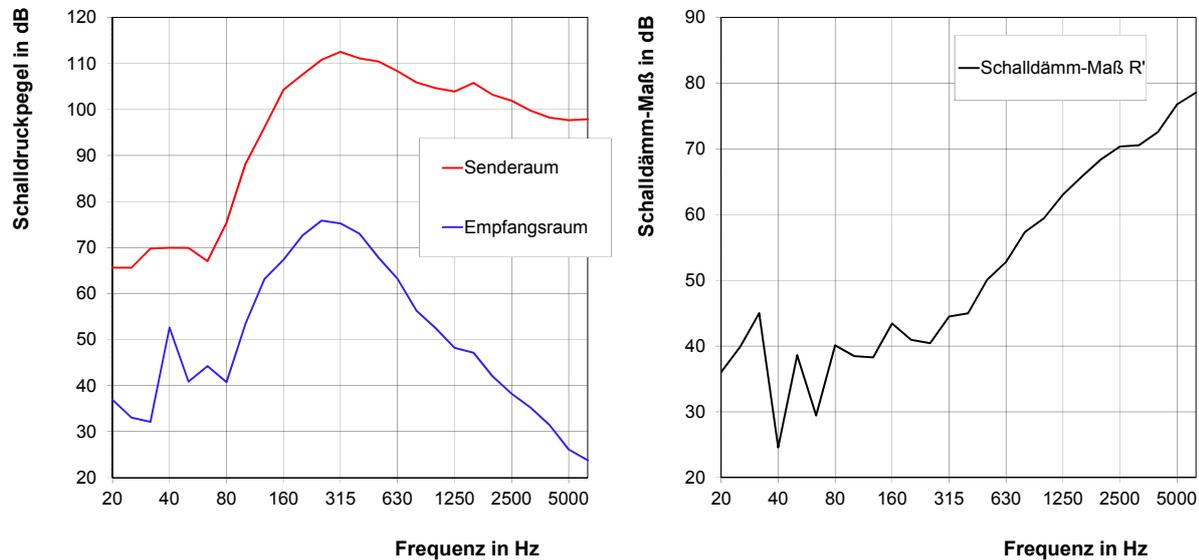


Abbildung 50: links) Schalldruckpegel im Sende- und Empfangsraum, Frequenzbereich 20-6300 Hz, Messsignal weißes Rauschen; rechts) resultierendes Schalldämm-Maß

Abbildung 50 zeigt die in einem Frequenzbereich von 20 Hz bis 6300 Hz gemessenen Werte der Schalldruckpegel in Sende- und Empfangsraum bei einer Anregung mit weißem Rauschen, sowie das daraus bestimmte Schalldämm-Maß.

Im folgenden Diagramm der [Abbildung 51](#) ist deutlich der Wirkungsbereich des Subwoofers zu erkennen, dessen Arbeitsbereich zwischen 25 Hz und 150 Hz liegt.

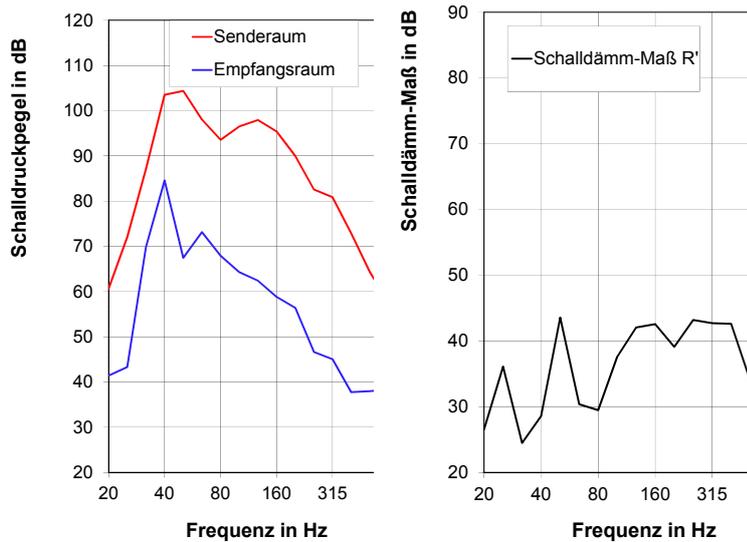


Abbildung 51: Schalldruckpegel in Sende- und Empfangsraum sowie daraus bestimmtes Schalldämm-Maß; Schallquelle Subwoofer mit weißem Rauschen

Das gemessene Schalldämm-Maß R ist für den tiefen Frequenzbereich klein, was zu erwarten war. Erst bei höheren Frequenzen steigt das Schalldämm-Maß entsprechend dem Bergerschen Massegesetz an [7].

6 Erschütterungs- und bauakustische Messungen an einem Untersuchungsobjekt

6.1 Objekt- und Standortbeschreibung

In Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro baudyn GmbH konnten Schwingungsmessungen an einem realen Gebäude durchgeführt werden. Das Ziel der Messungen war es, den aufgrund von Schwingungen und Erschütterungen entstehenden sekundären Luftschall zu messen. Gleichzeitig sollten die maßgeblichen, vibrierenden Raumbegrenzungsflächen aufgemessen werden, so dass ein Bezug hergestellt werden kann.

Bei dem Untersuchungsobjekt handelte es sich um ein ehemaliges Bürogebäude aus den 70er Jahren im Klinkerbau. Dieses ist in unmittelbarer Nähe zu einer U-Bahntrasse gelegen (Abbildung 52). Die relativ neu gebaute U-Bahntrasse U4 ist ohne Unterschottermatten ausgeführt, was zu stärkeren Vibrationen und letztendlich zu höherem Störpotential von Gebäudenutzern führen kann.



Abbildung 52: Untersuchungsobjekt

Aufgrund der weiteren Planungen für den Gebäudestandort (Abriss und Neubau) sollen für das neu zu errichtende Gebäude Prognosen zum zu erwartenden Sekundärschall durch die U-Bahnlinie U4 gemacht werden.

Das Gebäude ist ein mehrgeschossiges Bürogebäude, das ein bzw. zwei Kellergeschosse hat. Die Messpunkte im Gebäude waren über mehrere Geschosse verteilt. Der Schalldruckpegel wurde im untersten Untersuchungsraum aufgenommen (Abbildung 53 und Abbildung 54).

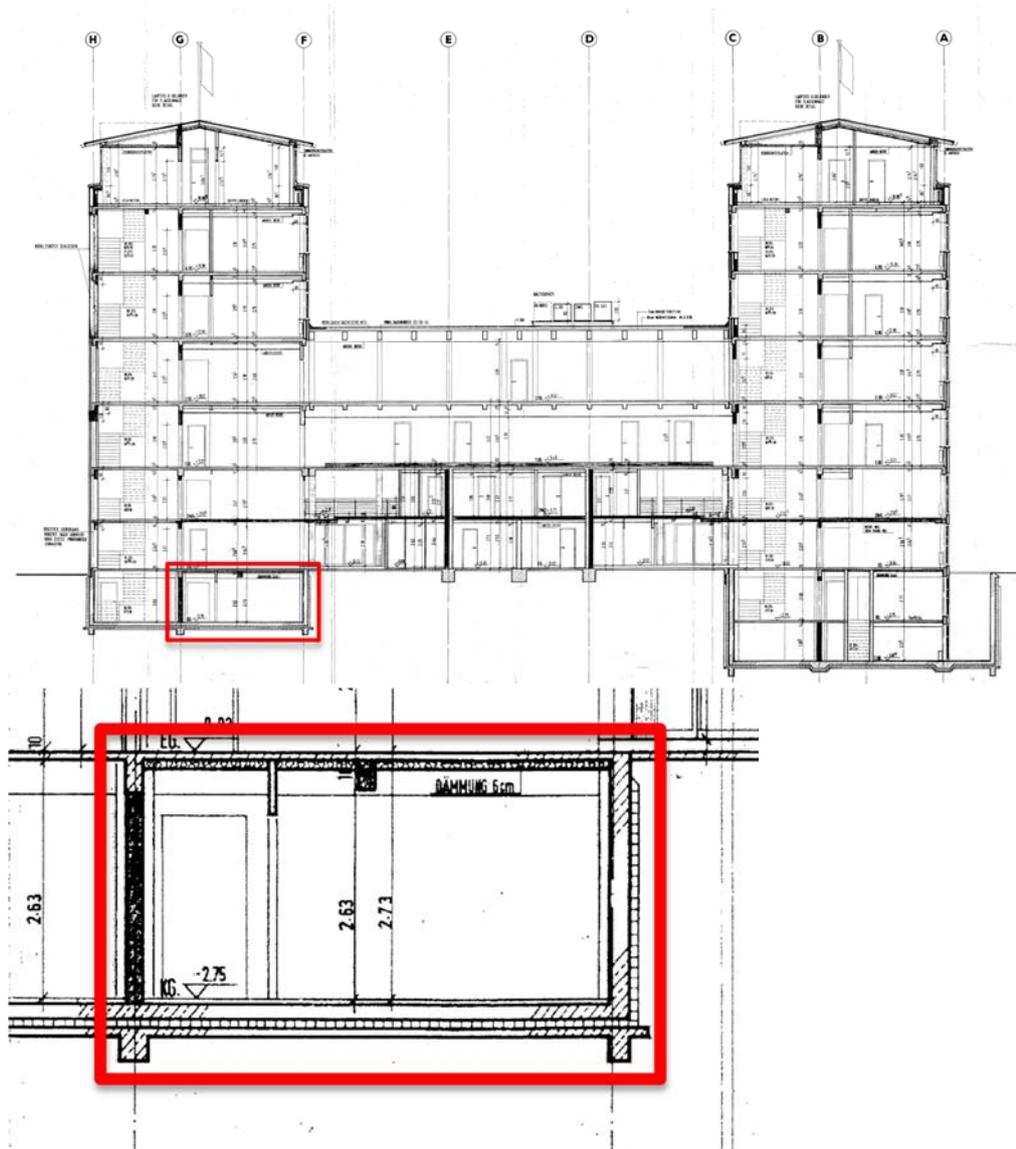


Abbildung 53: Untersuchungsobjekt, Schnitt, Empfangsraum im Kellergeschoß

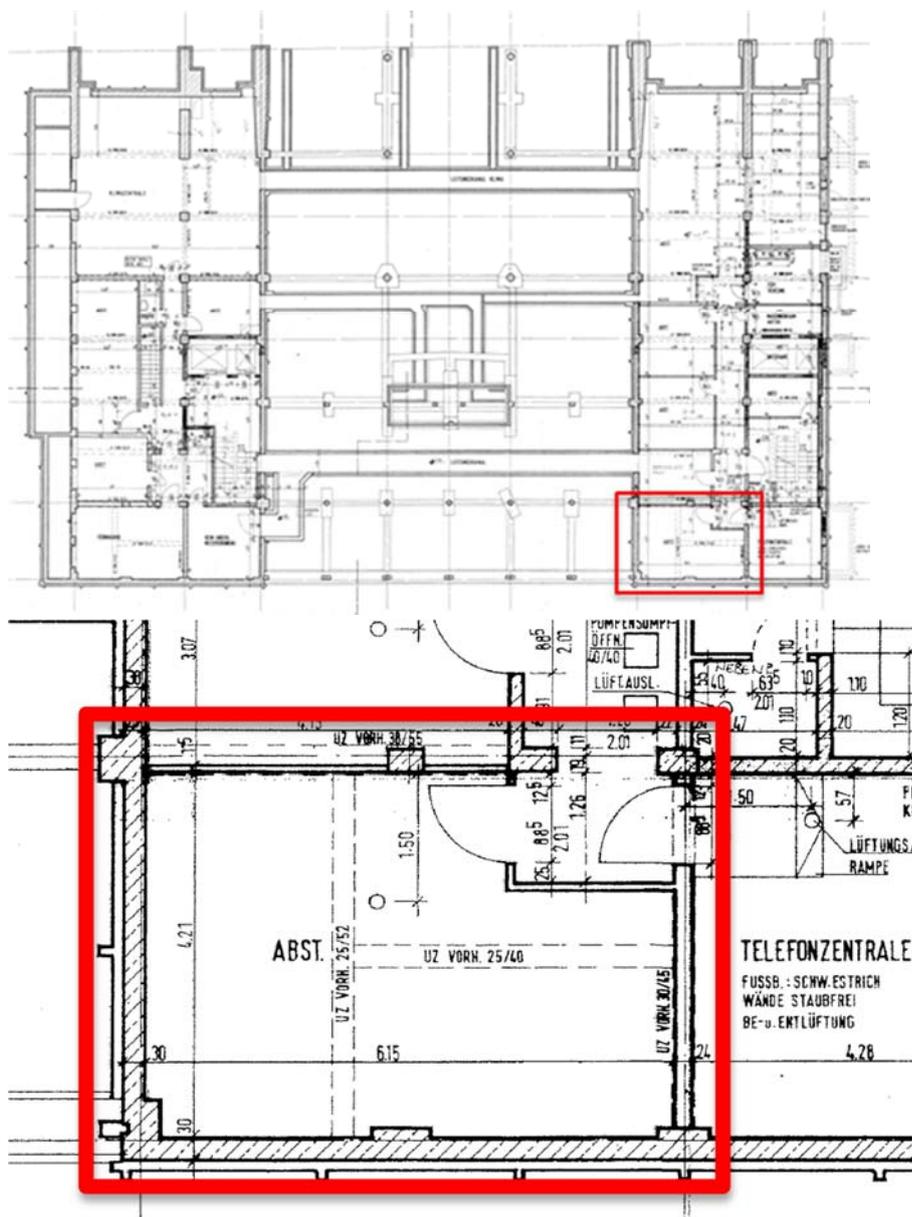


Abbildung 54: Untersuchungsobjekt, Grundriss Kellergeschoß, Empfangsraum

Bei dem Fundament des Untersuchungsobjektes handelt es sich um eine Pfahlgründung, die je nach Tidenhub in mehr oder weniger feuchtem Grund situiert ist. Dadurch ist die Prognose des durch den Boden laufenden Schalls abhängig von dessen Wassergehalt. Für den vorliegenden Fall wurde bei Niedrigwasser der sekundäre Luftschall gemessen und berechnet. Diese Situation ist besonders günstig, da die Wellenausbreitung durch den oberflächennahen Grundwasserbereich nicht gestört wird. Zwischen Erdreich, Bodenplatte und restlichen erdberührten Bauelementen ist hier eine Perimeterdämmung angeordnet. Das bedeutet, das Erdreich ist zum Teil von dem Gebäude entkoppelt. Allerdings bleiben die Pfähle der Pfahlgründung spezielle Vibrations- bzw. Körperschallquellen, die Schwingungen in das Gebäude einleiten.

6.2 Vorgehensweise und Messergebnisse

Die Schallereignisse konnten nach dem U-Bahn-Fahrplan relativ genau bestimmt werden. Es trat ca. alle 10 Minuten ein Schallereignis auf, das mit dem Gehör wahrnehmbar war, sodass von einem sekundären Luftschallereignis gesprochen werden konnte. Dieses war qualitativ am stärksten im untersten Geschoss, das dem Fundament und somit dem U-Bahntunnel am nächsten war.

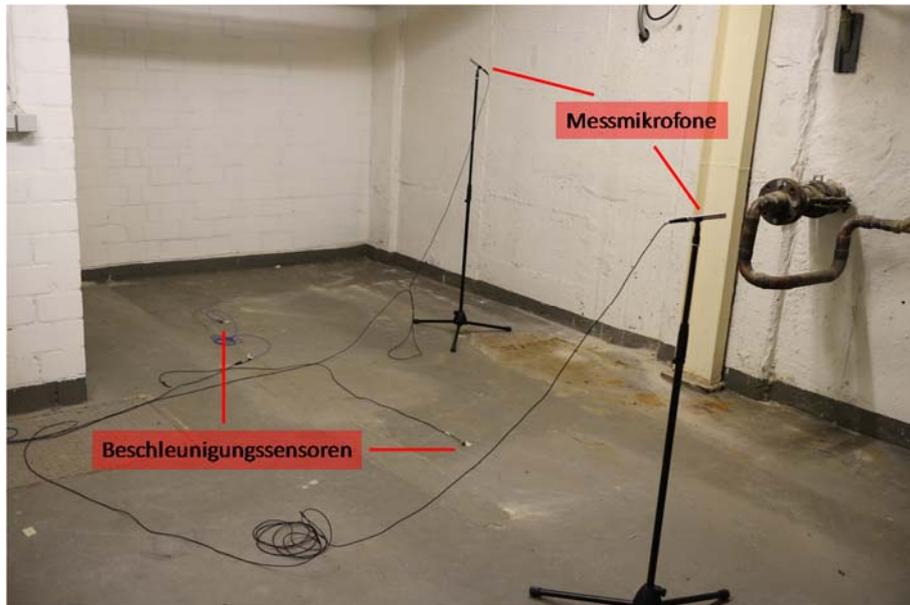


Abbildung 55: Messsituation im Kellergeschoß, Messung des Schalldrucks und der mittleren Schnelle auf der Decke

Es wurde in den betroffenen Geschossen die Bodenschwingung aufgezeichnet sowie gleichzeitig der sich einstellende Schalldruckpegel gemessen, siehe [Abbildung 55](#). Mit der gemessenen Nachhallzeit im Untersuchungsraum konnte dann der Schalldruckpegel prognostiziert und mit dem experimentell ermittelten verglichen werden.

Nachhallzeit

Um vergleichbare Schalldruckpegel messen und berechnen zu können, müssen die akustischen Eigenschaften des Messraumes quantifiziert werden. Dazu kann die Nachhallzeit herangezogen werden, die über die Sabinsche Gleichung mit der äquivalenten Schallabsorptionsfläche zusammenhängt.

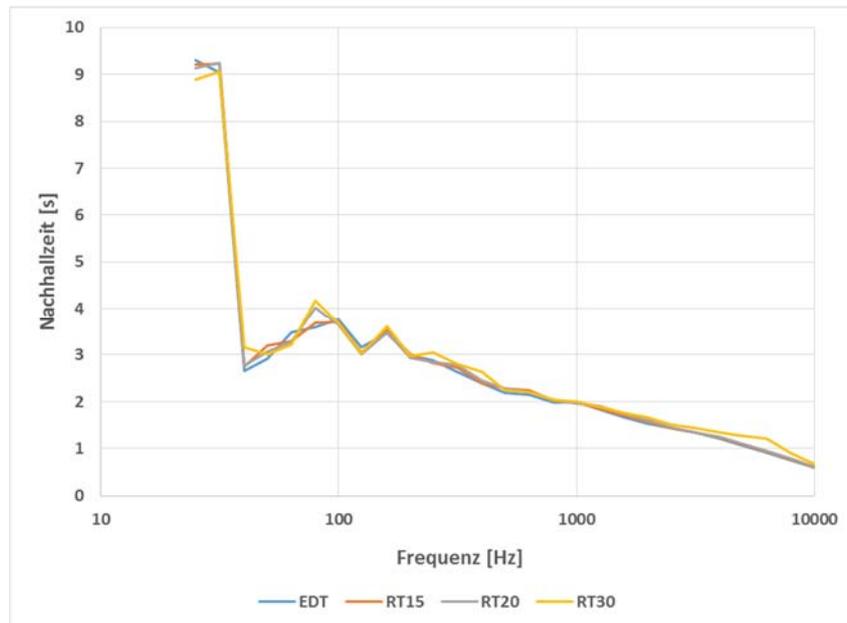
$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{A} \quad (77)$$

wobei T die Nachhallzeit, V Raumvolumen und A die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes ist.

Die Nachhallzeit wurde hier über die Raum-Impuls-Antwort auf ein transientes Messsignal ermittelt. Dazu wurden das Zerplatzen eines Luftballons und der dadurch entstehende

Knall genutzt. Alternativ kann auch eine Schreckschusspistole verwendet werden, was aufgrund der über den gesamten Frequenzbereich hohen, messbaren Schalldruckpegeln nicht notwendig war.

Für den hier untersuchten Raum treten für tiefe Frequenzen bis 100 Hz relativ hohe Nachhallzeiten auf, was auf die schallharten Raumbegrenzungsflächen und dem Fehlen von Einrichtung/Mobiliar geschuldet ist. Mit steigender Frequenz nimmt auch die Absorptionsfähigkeit des Raumes zu und die Nachhallzeit nimmt ab ([Abbildung 56](#)).



[Abbildung 56](#): Nachhallzeitmessung im Kellergeschossraum

Es ist zu bemerken, dass alle 3 Abklingkurven, RT15, RT20 und RT30 nahezu identisch verlaufen. Die sehr große Nachhallzeit bei den tiefen Frequenzen können auf modale Effekte im Raum zurückgeführt werden.

Schalldruckpegel

Mit den Messmikrofonen wurde an verschiedenen Positionen der Schalldruckpegel bei einem auftretenden Schallereignis gemessen. Es wurden insgesamt 44 Schallereignisse aufgezeichnet und ausgewertet. Im Ergebnis stellt sich der in [Abbildung 57](#) dargestellte Zeitverlauf des Schalldruckpegels ein. Der hier abgebildete Pegel ist noch nicht Nachhall korrigiert.

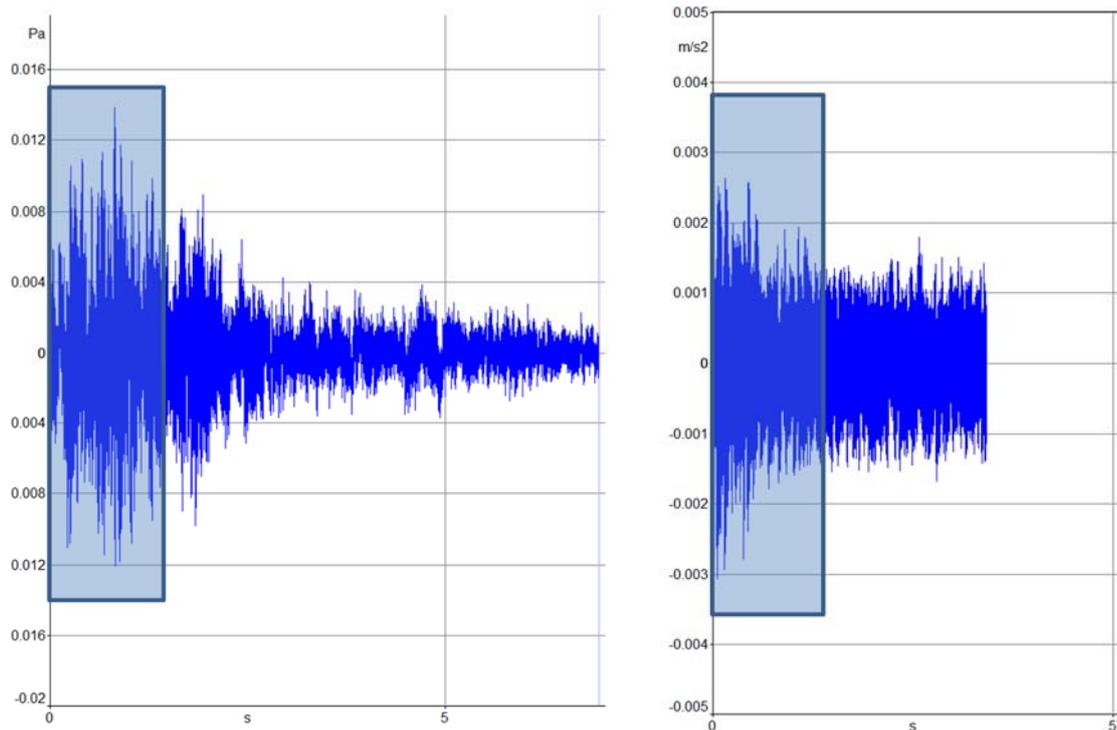


Abbildung 57: links) Schalldruckpegelverlauf im Empfangsraum; blau-transparent: Kennzeichnung der zur weiteren Auswertung herangezogenen Zeitintervalls, rechts) Beschleunigungspegelverlauf im Empfangsraum; blau-transparent: Kennzeichnung der zur weiteren Auswertung herangezogenen Zeitintervalls

Zur weiteren Bearbeitung und Auswertung des Messsignals wurde im markierten Zeitintervall eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) durchgeführt, sodass im Frequenzbereich weiter ausgewertet werden kann.

Der simultan auf dem Fußboden gemessene Zeitverlauf des Beschleunigungspegels ist in [Abbildung 57](#) dargestellt. [Abbildung 58](#) zeigt die FFT-Analysen der Messsignale von Schalldruck und Beschleunigung. Es ist festzustellen, dass beim Schalldruck Überhöhungen bei ca. 50 Hz und 120 Hz auftreten. Bei der Beschleunigung tritt eine Überhöhung bei 100 Hz auf. Die stärkste Überhöhung ist auch auf dem Fußboden als Beschleunigung nachweisbar.

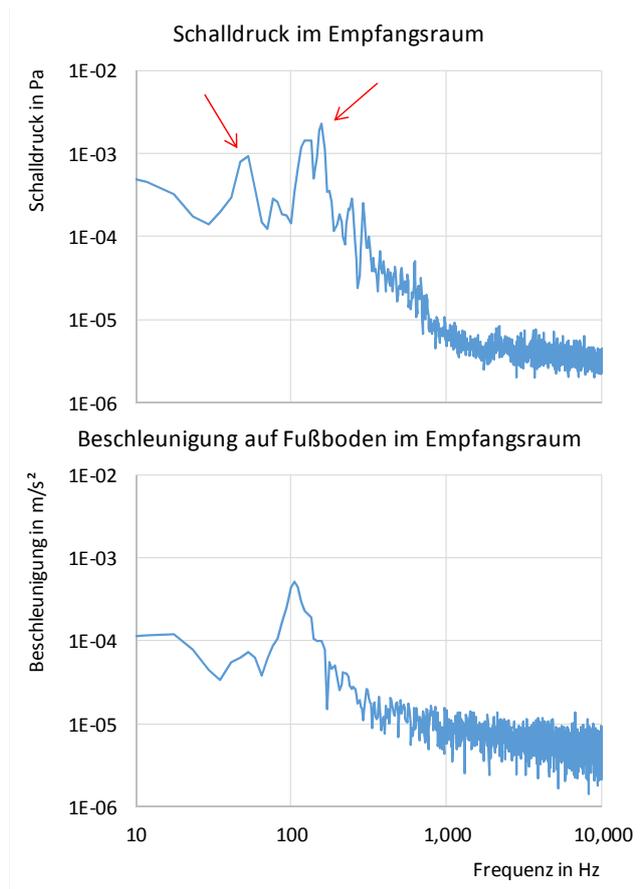


Abbildung 58: oben: Schalldruck im Raum in Abhängigkeit der Frequenz;
unten: Beschleunigung auf dem Fußboden

6.3 Berechnung des Schalldruckpegels aufgrund schwingender Oberflächen

Aufgrund des Fehlens von detaillierten Gebäudeinformationen zu Konstruktion und Baumaterial konnte keine umfängliche Schallprognose durchgeführt werden. Es wurde daher der im Raum entstehende Schalldruckpegel aufgrund der Oberflächenschwingung des Fußbodens mit dem gemessenen Schalldruck verglichen. Dazu wurde folgende Beziehung verwendet:

$$L_p = L_v + 10 \cdot \lg\left(4 \cdot \frac{S}{A}\right) + 10 \cdot \lg(\sigma) \quad (78)$$

Dabei ist L_p der Schalldruckpegel, L_v der Schnellepegel, S die Größe der schwingungserregenden Fläche, A die äquivalente Schallabsorptionsfläche und σ der Abstrahlgrad.

Für die Berechnung des Schalldruckpegels für die gegebene Bausituation wurde der Abstrahlgrad der Betonbodenplatte zu 1 angenommen.

Tabelle 3: Gemessene und prognostizierte Schalldruckpegel

	50 Hz	100 Hz
Gemessener Schalldruckpegel L_p für das Terzband um 100 Hz	34	37 dB
Waterhouse korrigiert	38 dB	38 dB
Berechnung nach empirischer Prognosegleichung	35 dB	41 dB
Berechnung nach Gleichung für Schallabstrahlung	34 dB	44 dB

In **Tabelle 3** sind die Ergebnisse aus Messung und Prognose zusammengefasst. Die Abweichungen liegen dabei im Bereich von 3 dB bis 6 dB. Diese Abweichungen wurden durch die Zusammenwirkung einer Reihe von Randbedingungen bedingt: So konnte zum einen aus praktischen Gründen und aufgrund der Raumgeometrie nur an einer begrenzten Anzahl an Messpunkten auf dem Fußboden die Schnelle ermittelt werden. Dadurch war es nicht möglich ein effektives Mittel der Schnelle zu bestimmen. Zusätzlich wurden die Messungen durch eine geringe Messsignalstärke in Kombination mit einem hohen Hintergrundrauschen erschwert. Außerdem kann auf Grund der geringen Raumgröße und der Raumgeometrie nicht sichergestellt werden, dass sich an allen Messpunkten ein diffuses Schallfeld ausgebildet hat. Des Weiteren führen die unbekannte Baukonstruktion, sowie der unbekannte Abstrahlgrad von Fußboden und weiteren raumbegrenzenden Flächen zu Unsicherheiten in der Prognose. Auf Grund dieser Vielzahl an Unsicherheiten war eine Abweichung zwischen gemessenen und prognostizierten Schalldruckpegel im oben genannten Bereich zu erwarten.

7 Prognose von Schalldruckpegeln in Empfangsräumen – Validierung durch Messungen

Um die Anwendbarkeit des Prognoseverfahrens nach DIN EN 12354 zu untersuchen, wurde der sich einstellende Schalldruckpegel im Empfangsraum des Testreferenzgebäudes mit den verschiedenen Methoden prognostiziert. Zum Vergleich wurde der sich einstellende Schalldruckpegel im Empfangsraum gemessen, während im Senderraum tieffrequenter Schall als Anregungssignal erzeugt wurde.

Tabelle 4: Empirisch bestimmte Faktoren für die Berechnung des Sekundärschalls für Betondecken

f in Hz	C ₁ in dB	C ₂ [-]
25	23,40	0,42
31,5	28,00	0,51
40	28,80	0,51
50	25,30	0,56
63	22,60	0,60
80	23,70	0,60

Nach dem allgemeinen Prognoseverfahren [55] kann der Schalldruckpegel mit Hilfe der in **Tabelle 4** angegebenen Faktoren aus dem Schnellepegel L_V berechnet werden:

$$L_p = C_1 + C_2 \cdot L_V \tag{79}$$

Zur Berechnung des entstehenden sekundären Schalldruckpegels aufgrund von Bauteilschwingungen kann **Gl. (6)** angewendet werden:

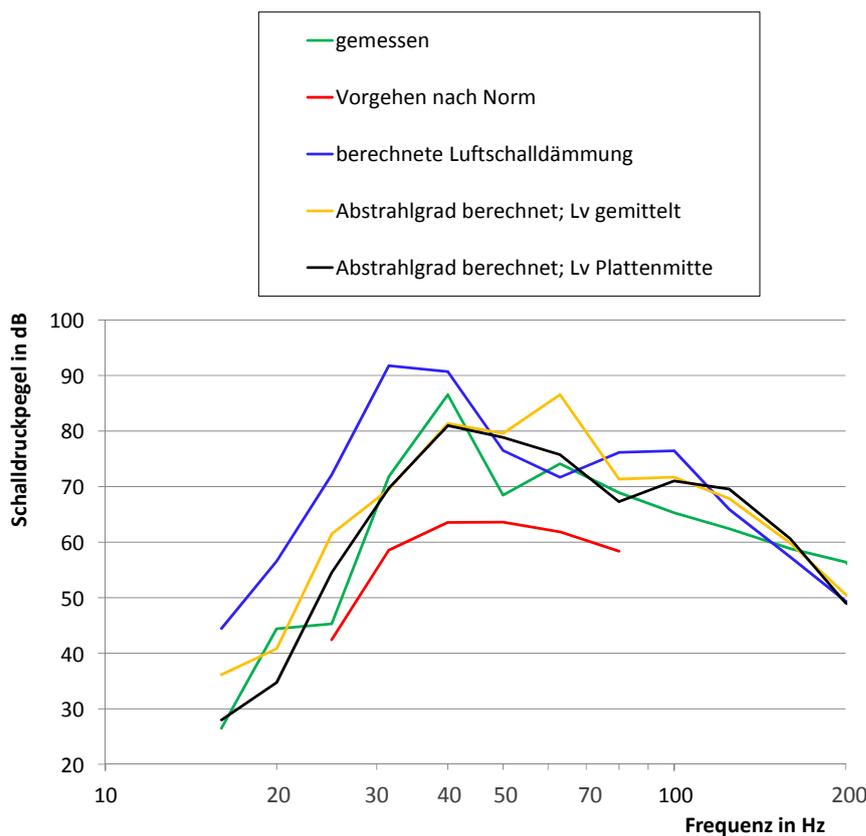


Abbildung 59: Gemessene und berechnete Schalldruckpegel im Empfangsraum des Referenzgebäudes; Quelle Subwoofer weißes Rauschen

In **Abbildung 59** grün dargestellt ist der im Empfangsraum gemessene Schalldruckpegel. Dieser wurde mit der Waterhouse-Korrektur korrigiert. Es ist zu erkennen, dass der Sub-

woofer hohe Schallenergie im tiefen Frequenzbereich in die Gebäudestruktur einleiten kann. Das Signal ist dem von Zügen sehr ähnlich und ist damit sehr gut für die durchgeführten Testrechnungen geeignet.

Der in [Abbildung 59](#) für den Menschen relevante Frequenzbereich beginnt aufgrund des menschlichen Hörvermögens bei ca. 30 Hz. Unter 30 Hz ist das Hörvermögen stark eingeschränkt und unter 20 Hz können akustisch keine Töne mehr wahrgenommen werden.

Rot dargestellt ist die Prognose nach der gängigen Praxis ([Gl. \(79\)](#)), die auf empirisch an vielen (unterschiedlichen) Betondecken gemessenen Werten basiert. Es ist qualitativ ein ähnlicher Verlauf festzustellen, aber die Pegelunterschiede sind mit bis zu 10 dB bis 15 dB groß. Zudem ergibt sich durch diese Art der Prognose stets ein prognostizierter Wert, der kleiner ist als der Messwert. Im Gegensatz dazu liegt die Prognose des Schalldruckpegels über die berechnete Schalldämmung nach DIN EN 12354 ([Gl. \(62\)](#)) zumeist über dem Messwert. Auch die Unterschiede sind im Mittel kleiner. Spitzenwerte in der Kurve werden abgebildet und im kritischen Frequenzbereich von 40 Hz bis 100 Hz ist die Übereinstimmung mit den Messwerten sehr gut. Die größeren Unterschiede für einige Frequenzen sind vermutlich auf die nicht frequenzabhängigen Stoßstellen-Dämm-Maße K_{ij} zurückzuführen. Könnten diese ebenfalls frequenzabhängig berechnet werden, würde das einen weiteren Genauigkeitsgewinn bedeuten.

Die gelbe und die schwarze Kurve sind die über die Oberflächenschnelle ([Gl. \(79\)](#)) auf der Betondecke ermittelten Schalldruckpegel, errechnet aus einem Mittelwert über verschiedene Schnellmesspunkte auf der Platte und zum andern über einen einzigen Messpunkt in der Plattenmitte ([Gl. \(78\)](#)). Dazu wurde der Abstrahlgrad für den betrachteten Frequenzbereich nach DIN EN 12354-5 berechnet und ab 100 Hz zu 1 angenommen. Die Übereinstimmung dieser Berechnungsmethode für den entstehenden Schalldruckpegel mit der Messung ist als gut anzusehen. Die schwarze Kurve (Messung in Plattenmitte) folgt qualitativ und zumeist auch quantitativ der Messkurve.

Auch für eine Körperschallquelle, dem in [Abbildung 60](#) gezeigten elektrodynamischen Shaker betrieben mit rosa Rauschen, ist die Übereinstimmung zwischen der Schalldruckpegelmessung und Berechnung gut. Hier liegt auch der nach der herkömmlichen Methode berechnete Schalldruckpegel im Bereich der Messkurve, die Pegelspitzen können jedoch nicht abgebildet werden.

Mit Hilfe dieser experimentell bestimmten Schalldruckpegel soll die durchgeführte Prognose nach DIN EN 12354-5 validiert werden. [Abbildung 61](#) zeigt die im Empfangsraum gemessenen Schalldruckpegel (grün), die berechneten Schalldruckpegel über [Gl. \(79\)](#), sowie den berechneten Abstrahlgrad mit [Gl. \(78\)](#). Es zeigen sich signifikante Abweichungen zwischen gemessenen und prognostizierten Werten im Bereich kleiner Frequenzen. Diese Abweichungen können durch das modale Verhalten des Raums bei kleinen Frequenzen erklärt werden. Dies entspricht auch den Ergebnissen von [\[48\]](#).



Abbildung 60: Körperschallanregung der Gebäudestruktur mit einem elektrodynamischen Shaker; Messung der Leistungseinleitung am Impedanzmesskopf

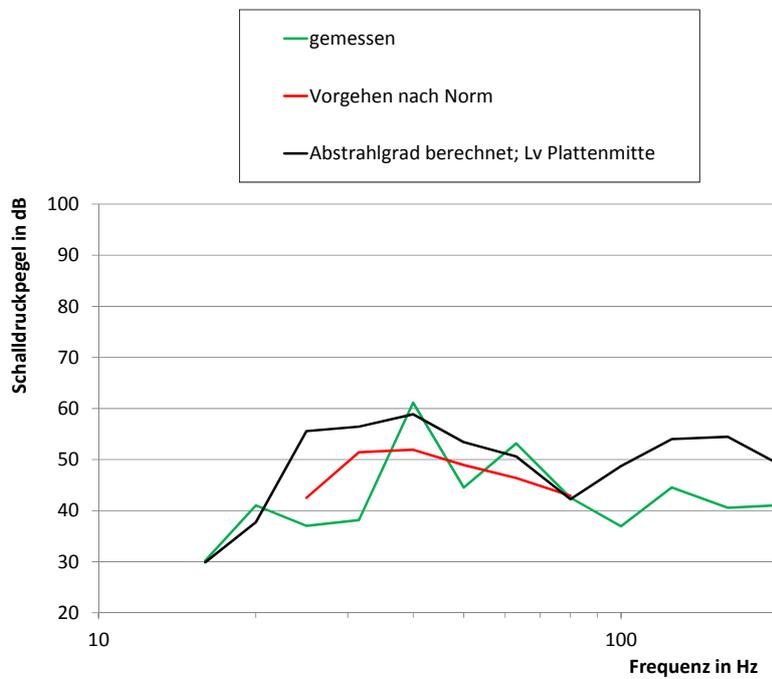


Abbildung 61: Gemessene und berechnete Schalldruckpegel im Empfangsraum des Referenzgebäudes; Quelle Shaker rosa Rauschen

8 Übersicht zum Prognoseverfahren

8.1 Prognose Erschütterungstransmission

8.1.1 Vorgehen

In der Praxis ergibt sich die Notwendigkeit von Prognosen am häufigsten in Zusammenhang mit der Projektierung von ober- oder unterirdischen Schienenverkehrswegen. Eine zuverlässige Prognose erfordert die Abbildung der komplizierten dynamischen Wechselwirkungen vom Emissions- zum Immissionsort. Diese Aufgabe wird sinnvollerweise durch eine Kombination von Messungen und theoretischen Modellen der Erschütterungsausbreitung in Boden und Bauwerk bewältigt. Die dynamischen Kräfte, die über den Gleisoberbau als Erschütterungsenergie in den Untergrund abgegeben werden, sind durch unterschiedliche Anregungsmechanismen am System Fahrzeug/Schiene bedingt, so dass deren Merkmale einer großen Variation unterliegen.

Die Erschütterungsausbreitung in der Nähe einer Bahntrasse, [Abbildung 62](#), kann in sechs Bereiche unterteilt werden:

- (1) Schienenanregung und Einleitung in den Baugrund,
- (2) Weiterleitung durch den Baugrund,
- (3) Einleitung in das Fundament,
- (4) Übertragung vom Fundament auf die Außenmauer,
- (5) Übertragung von Außenmauer zu den Geschossdecken,
- (6) sekundärer Luftschall infolge der Abstrahlung des Körperschalls.

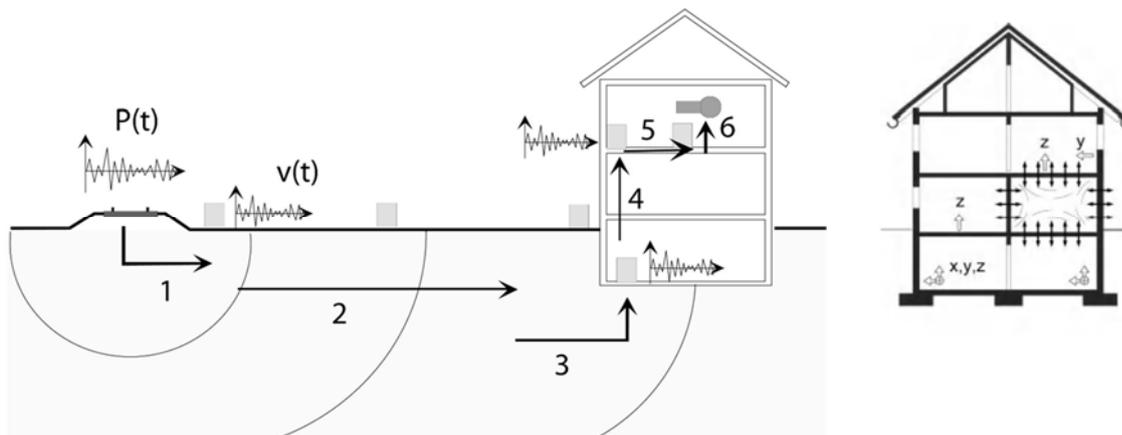


Abbildung 62: Ausbreitung eines Erschütterungssignals

Da immer auch eine Beurteilung des sekundären Luftschalls verlangt wird, findet die Berechnung des ihn verursachenden Körperschalls als Schnellepegel an den Terzmittenfrequenzen f_T statt, so dass dann sowohl v_Q als auch V_i als Terzspektren ermittelt werden müssen. Da der Luftschall als Pegel angegeben wird, ist es zudem sinnvoll, die Erschütterungsübertragung als Summen-Gesetz mit Pegeldifferenzen zu formulieren:

$$L_v(f_T) = L_{v,E}(f_T) + \sum_i L_{ki}(f_T) \quad (80)$$

wobei $L_v(f_T)$ das Immissionsspektrum als Schwingschnellespektrum im Gebäude auf einer Decke, $L_{v,e}(f_T)$ das Emissionsspektrum und $\sum_i L_{ki}(f_T)$ die Summe aller Korrekturpegel für die Anregung und die Ausbreitung darstellen. Letztere können somit sowohl negative als auch positive Werte annehmen.

Die vorgeschlagene Prognose erfolgt frequenzabhängig auf Grundlage der [Gln. \(3\)](#) und [\(80\)](#). Ausgangspunkt ist ein Emissionsspektrum, welches für einen vorgegebenen Zugtyp mit definierter Fahrtgeschwindigkeit auf einem Standard-Oberbau auf einem definierten Boden (oder Tunnel) in einer vorgegebenen Entfernung von der Gleismitte angesetzt wird. Dieses Grundspektrum wird nacheinander mit Übertragungsspektren multipliziert, welche die oben genannten Einflüsse berücksichtigen: Bereiche 1-6 in [Abbildung 62](#).

Im Bereich der Emission entsteht die dynamische Erregung durch die Wechselwirkung von Fahrzeug und Fahrweg. Da häufig abgesicherte Daten über die Anregungscharakteristik fehlen, werden projektbezogene Messungen empfohlen. Die Größe der von einem Zug ausgelösten Erschütterungen hängt im Wesentlichen von der Geschwindigkeit und dem Gewicht des Zuges sowie vom Zustand der Schienen und Radlaufflächen ab.

Infolge der dynamischen Wechselwirkungseffekte spielen die Steifigkeit und die Dämpfung des Unterbaus und des Untergrundes eine entscheidende Rolle für die dynamischen Kräfte: Diese nehmen mit steigender Fahrweg- und/oder Untergrundsteifigkeit zu, wobei erwartungsgemäß der Einfluss beim Schotteroberbau generell von größerer Bedeutung als bei der Festen Fahrbahn ist.

In den letzten Jahrzehnten wurden mehrere Studien durchgeführt, so dass heute ausreichende Klarheit zu den Erregungsmechanismen und den Einflussgrößen besteht. Eine Darstellung würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen, so dass an die Fachliteratur verwiesen wird, [\[3\]](#), [\[34\]](#), [\[40\]](#), [\[60\]](#).

Bei Tunnelstrecken spielt die relative Steifigkeit des Tunnels zu der des umliegenden Bodens eine dominante Rolle. Die Anregbarkeit (Emission) eines Tunnels wird durch die Admittanz beschrieben, [\[22\]](#): Bergmännisch erstellte, einschalige Tunnel in Tübbingbauweise ergeben eine vielfach höhere Admittanz als in offener Bauweise erstellte rechteckige Tunnel.

Im Bereich der Transmission wird das entstehende Wellenfeld durch die Quellengeometrie, den Frequenzgehalt und die Eigenschaften des Baugrundes beeinflusst. In einer ausreichenden Entfernung entsteht ein Wellenfeld, welches dem einer Linienquelle ähnelt. Im Fernfeld lässt sich die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit v im Abstand r von der Erschütterungsquelle näherungsweise mittels [Gl. \(32\)](#) beschreiben.

Die Weiterleitung der Erschütterungen innerhalb des Gebäudes wird hauptsächlich durch dessen Steifigkeit bestimmt. Stark ausgesteifte Gebäude führen in guter Näherung Starrkörperbewegungen aus, sodass die Geschossdecken in einem einheitlichen Schwingungsmodus angeregt werden. Resonanzüberhöhungen treten im Bereich der Gesamtbauwerks- und in den Deckeneigenfrequenzen auf. Bei aufgelösten Bauwerksstrukturen treten zusätzliche Überhöhungen infolge der Wechselwirkungen der einzelnen Bauteile auf. Hinzu kommt der Einfluss der phasenverschobenen Anregung einzelner Gebäudeteile. Zur Quantifizierung dieser Effekte ist eine Berechnung an einem adäquaten Ersatzsystem erforderlich.

Das Schwingungsverhalten eines Gebäudes lässt sich in erster Näherung durch ein einfaches Starrkörpermodell erfassen [18]: Die Übertragungsfunktion der Decken wird durch zwei Resonanzüberhöhungen charakterisiert, so dass ein fußpunkterregter Zweimassen-Schwinger zur Wiedergabe dieses Verhaltens ausreichend ist. Die verschiedenen beobachteten Effekte können durch geeignete Wahl der Kennwerte der einzelnen Systemkomponenten simuliert werden. Das in [Abbildung 63](#) dargestellte, prinzipielle Übertragungsverhalten einer Geschossdecke weist zwei Frequenzen f_1 und f_2 mit einer deutlichen Überhöhung der Eingangsschwingung auf. Die erste Frequenz f_1 entspricht der Gesamtbauwerkeigenfrequenz, welche von der dynamischen Fundamentsteifigkeit definiert wird. Diese wiederum wird von den Bodeneigenschaften, der Einbettung und der Geometrie des Fundamentsystems bestimmt. Die zugehörige Überhöhung $v/v_0(f_1)$ hängt von der Abstrahl-dämpfung durch das Fundamentsystem ab.

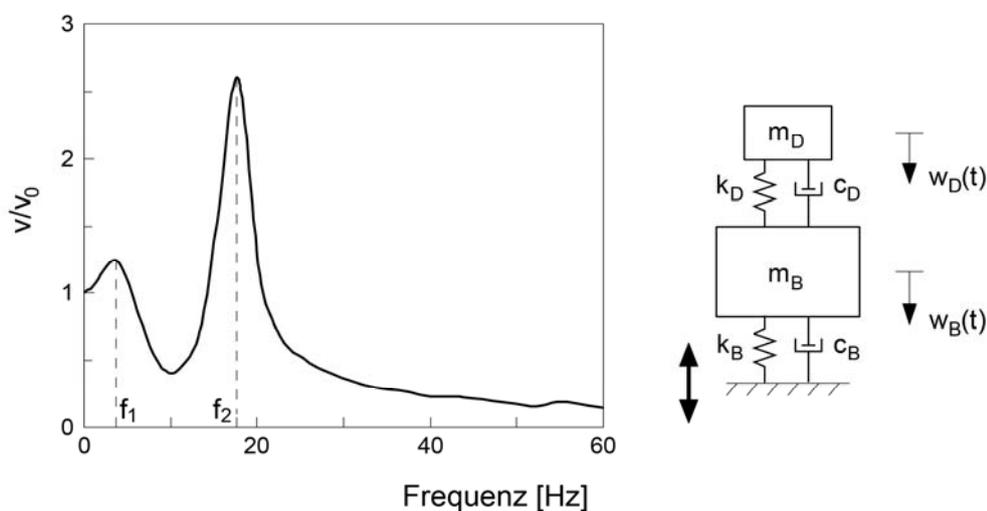


Abbildung 63: Frequenzgang der Überhöhungsfunktion einer Geschossdecke (links) und vereinfachtes Zwei-Massen-Modell (rechts)

Die zweite Frequenz f_2 wird der Deckeneigenfrequenz zugeordnet und durch die Auflagerbedingungen, die Deckenmasse, -geometrie und -steifigkeit sowie der angeregten Eigenform bestimmt. Die Resonanzüberhöhung bei f_2 hängt von der Materialdämpfung der Strukturelemente, der Bauwerks- und Fundamentnachgiebigkeit, der Weiterleitung durch

das Gesamtbauwerk, der Höhenlage sowie einer evtl. auftretenden phasenverschobenen Anregung der Deckenaufleger ab.

Die einzelnen Systemparameter lassen sich wie folgt bestimmen: Feder und Dämpfungs-konstante k_B, c_B werden für die Grundrissabmessungen des Gebäudes in Abhängigkeit von der Frequenz und den Baugrundeigenschaften nach den in [Kapitel 4.1](#) zusammengestellten Lösungen berechnet, wobei für aufgelöste Fundamentformen Korrekturfaktoren angewandt werden. Die Gesamtbauwerksmasse m_B enthält die Deckenmasse m_D . Die Deckenparameter k_D, c_D lassen sich nach den gängigen Verfahren der Baudynamik errechnen, [5].

Alternativ zur obigen vereinfachten Darstellung kann die Modellierung des Bauwerks auch mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) erfolgen. Hierzu stehen verschiedene Detaillierungsstufen zur Verfügung, welche in Abhängigkeit von dem Anforderungsniveau an den Erschütterungsschutz ausgewählt werden.

Bei der vereinfachten Abbildung als ebenes System werden repräsentative Gebäudequerschnitte untersucht. Die einzelnen als Balken abgebildeten Geschossdecken werden in ihrer Steifigkeit und Masse derart berücksichtigt, dass die aus einer dreidimensionalen Berechnung ermittelten Eigenformen bzw. Eigenfrequenzen und auch die statischen Durchbiegungen erhalten bleiben. Die Berechnung wird im Frequenzbereich durchgeführt, so dass für die Boden-Fundament-Wechselwirkung frequenzabhängige Feder- und Dämpferkonstanten eingesetzt werden können.

Bei der detaillierten, räumlichen Berechnung wird das gesamte Gebäude abgebildet. Diese Vorgehensweise wurde exemplarisch unter [Kapitel 4.3](#) erläutert. Sie ist zwar aufwendig, bleibt aber als einzige Möglichkeit übrig, wenn die Gebäudestruktur unregelmäßig ist, wie bei den meisten kritischen Situationen der Fall. Diese Modelle erlauben auch das Aufbringen einer räumlich variablen und phasenverschobenen Anregung. Sind die zugehörigen Algorithmen direkt im Zeitbereich formuliert, kann die Berücksichtigung von frequenzabhängigen Steifigkeitsfunktionen für die einzelnen Fundamente (Auflager) durch das Aufbringen mehrerer Feder- und Dämpferelemente realisiert werden. Dies ist jedoch nur praktikabel für den Grenzfall eines homogenen Bodens. Für geschichtete Böden ist die Bestimmung der entsprechenden Kennwerte kompliziert. Da für die translatorischen Freiheitsgrade (vertikal, horizontal) die Variation mit der Frequenz nicht so stark ist, wird oft in der Praxis mit konstanten Werten für Feder und Dämpfer gerechnet. Vergleiche ebener und räumlicher Modelle zeigen, dass 2D- und 3D-Modelle die wesentlichen Einflüsse beschreiben können.

Die Effekte der Erschütterungseinleitung in Gebäude sowie die der Erschütterungsausbreitung im Inneren von Gebäuden können zum Zwecke der Vordimensionierung näherungsweise mit Hilfe des von der Deutschen Bahn vorgeschlagenen pauschalen Prognoseverfahrens erfasst werden, [9]. Hierzu werden die aus Schwingungsmessungen ermittelten Emissionsspektren mit pauschalen Funktionen beaufschlagt. Das Verfahren berücksichtigt die

Bauwerkseigenschaften lediglich durch die Unterscheidung nach Beton- oder Holzbalkendecken und nach Anzahl der Geschosse. Die angegebenen, auf die Resonanzfrequenz des betrachteten Fußbodens bezogenen, spektralen Übertragungsfunktionen stellen Mittelwerte aus einer Vielzahl von Erschütterungsmessungen dar. Die Deckenresonanzfrequenzen werden in einem Frequenzbereich von 16 bis 50 Hz terzweise variiert, um den maximalen Immissionswert zu erhalten.

Zur Weiterentwicklung des in [9] beschriebenen Prognoseverfahrens für schieneninduzierten, sekundären Luftschall wurden zunächst die im Labor durchgeführten Messungen am Testreferenzgebäude herangezogen. Mit Hilfe dieser Messungen konnte die Methode zur Prognose von sekundärem Luftschall nach DIN EN 12354 Teil 5 getestet werden. Dazu wurde ein Anregungssignal verwendet, das dem zu erwartenden Signal aus Vorbeifahrten im Schienenverkehr ähnlich ist. Es konnte gezeigt werden, dass mit Einführung des neuen Verfahrens eine signifikante Verbesserung der Prognose erreicht werden konnte und die prognostizierten Werte auch in der Nähe der Messwerte liegen [Kapitel 7, Abbildung 59](#).

Zusätzlich wurden mit Hilfe der Messungen detailliert die Abstrahlgrade der schwingenden Oberflächen bestimmt, wobei vor allem auch kleine Frequenzen untersucht wurden. Damit wurde eine Prognose von Luftschall über die Schwingung der Decke möglich.

8.1.2 Erkenntnisse

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass eine Prognose von Luftschall bei tiefen Frequenzen über Prognoseverfahren der DIN EN 12354 Teil 5 unter Laborbedingungen möglich und anwendbar ist. Die Untersuchung von Sendebauteilen, die durch Körperschalleitungseinleitung angeregt wurden zeigt, dass die Prognose in diesem Fall ebenfalls durchführbar ist. Dies lässt den Schluss zu, dass das Prognosesystem der Anregung durch Körperschallquellen gegebenenfalls auch auf die geotechnische Schwingungsbeschreibung im Fundamentbereich übertragbar sein kann. Um eine definierte Kopplung Erdreich-Fundament zu erhalten, müssen die Schwingungssystemidentifizierung weiter detailliert werden. So können Pfahlgründungen als Punktquellen beschrieben werden, was vor allem für höhere Frequenzbereiche (50 – 100 Hz) eine detaillierte Beschreibung ermöglicht.

Um detaillierte Messerfahrungen zu sammeln und um die Grenzen des Verfahrens zu bestimmen, müssen weitere Untersuchungen des weitergeleiteten Schalls durchgeführt werden. Auch müssen mehr Messungen von definierten Gebäudeschwingungen im Feld durchgeführt werden. Fehlen diese detaillierten Gebäudeinformationen wie z.B. das Eigenschwingverhalten oder auch detaillierte Materialdaten, so ist die Prognose ungenau und führt zu signifikanten Unterschieden zwischen Prognose und Messung des Schalldruckpegels. Mit Hilfe dieser weiteren Messerfahrungen sowie der beschriebenen Erweiterung des Prognoseverfahrens auf den Fundamentbereich entsteht die Möglichkeit, dass die Fachgebiete Geotechnik und Bauphysik das gleiche Programm zur Simulation von Schwingungen verwenden können. Dadurch kann die weitere Auswertung und Betrachtung der Schwingungsvorgänge deutlich vereinfacht werden. Im Rahmen dieses Projekts wurde dazu

SAP2000 verwendet, welches die gekoppelte Berechnung von Boden- und Gebäudeschwingungen bietet, [30]. Dadurch wird die Kopplung von schieneninduzierten Bodenschwingungen mit bauakustisch relevanten Bauteilschwingung und letztendlich dem entstehenden sekundären Luftschall möglich.

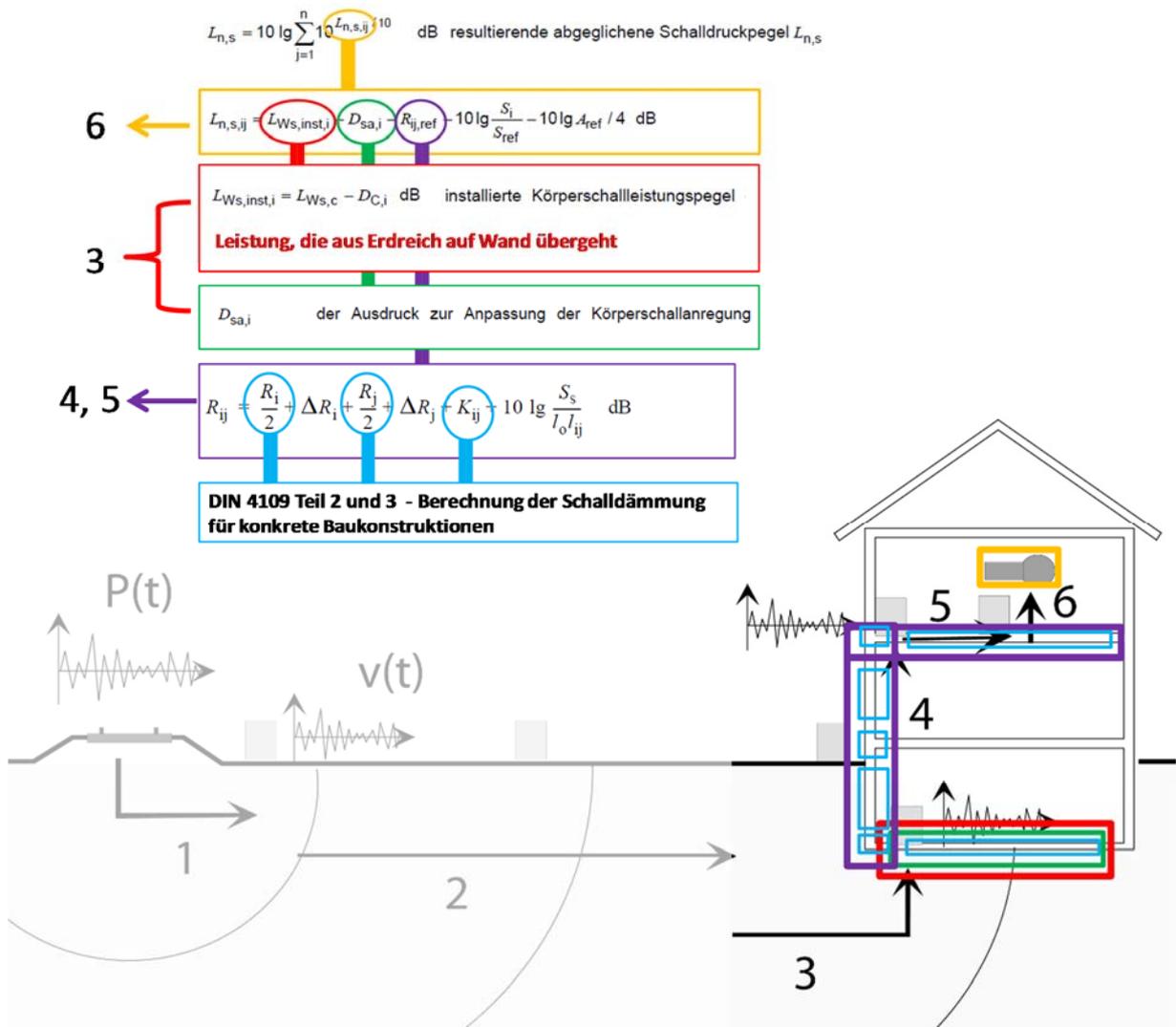


Abbildung 64: Prinzipskizze zu bauakustischem Prognoseverfahren für sekundären Luftschall in Gebäuden; Übertragung Wege 1,2,3 siehe Abbildung 62

Trotz der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Prognostizierbarkeit von tieffrequentem Schall besteht weiterhin die Frage nach dem System der Leistungsübertragung vom Baugrund in das Fundament bzw. in die Pfähle und von dort ins Gebäude. Weiterhin wurden Untersuchungen zum Abstrahlgrad von Bauteiloberflächen durchgeführt. Für eine Betondecke wurden diese berechnet und der abgestrahlte Schalldruckpegel für tiefe Frequenzen gemessen. Die Übereinstimmung ist im Rahmen der erhöhten Unsicherheiten beim Messen von Schallpegeln im tiefen Frequenzbereich als gut anzusehen.

Es konnte im Projekt gezeigt werden, dass die Berechnung des Schalldruckpegels für einzelne Frequenzbänder für ein reales Bauwerk im niedrigen Frequenzbereich möglich ist, aber mit Unsicherheiten behaftet ist, [30]. Im nächsten Schritt muss über die Terzbänder eine energiebasierte Betrachtung des Gesamtsystems erfolgen, bis hin zu sehr tiefen Frequenzen von 20 Hz, [48]. Damit ist die Anwendung des Schalldruckprognoseverfahrens nach DIN EN 12354 für den sekundären Luftschall möglich. Dies bietet viele Vorteile hinsichtlich der Handhabbarkeit und auch der Prognosegenauigkeit.

8.2 Prognose sekundärer Luftschall durch Bauteilschwingungen

Zur Abschätzung des sekundären Luftschalls (Verdeutlichung siehe [Abbildung 64](#)), hervorgerufen durch Gebäude-Bauteil-Schwingungen in einem Frequenzbereich ab ca. 30 Hz bis ca. 150 Hz kann [Gl. \(62\)](#) angewendet werden.

Die dafür erforderliche Berechnung der Luftschalldämmung erfolgt über [Gl. \(69\)](#) wobei auch der Abstrahlgrad nach DIN EN 12345 zu berechnen ist.

Zur Analyse der zu erwartenden Gebäudeschwingungen im tiefen Frequenzbereich bis ca. 20 Hz sind Methoden zur Ermittlung der Eigenschwingformen anwendbar [45], [31]. Für den tiefen Frequenzbereich bis ca. 50 Hz kann fallspezifisch abgeschätzt werden, ob die frequenz aufgelöste Methode der Berechnung der Eigenschwingformen oder ob nach EN 12354-5 die Prognose des sekundären Luftschallpegels [1], [49], [51], [52], [55] angewendet wird. Dabei ist die in den Bauteilen vorhandene Eigenmodenanzahl entscheidend [44]. Je mehr Eigenmoden ein Bauteil im tiefen Frequenzbereich aufweist, desto genauer ist die Prognosemethode nach DIN EN 12354 anwendbar [54].

Ähnliche, vergleichbare Untersuchungen wurden durchgeführt und sind in der Literatur beschrieben, wobei die bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich des Messens von Schallpegeln bei tiefen Frequenzen bestätigt werden konnten, [48], [30]. Weiterer Forschungsbedarf besteht zwangsläufig bei der Quantifizierung der erreichbaren Genauigkeiten bei der Betrachtung tiefer Frequenzen im Allgemeinen hinsichtlich Messungen und Berechnungen. Hier lassen die wesentlichen bauakustischen Ergebnisse aus diesem Forschungsprojekt den Schluss zu, dass auch bis hin zu tiefen Frequenzen bis 20 Hz die energiebasierte Prognoserechnung nach EN 12354 für sekundären Luftschall hinreichend genaue Ergebnisse liefert [50], [53], [54]. Voraussetzung dafür ist aber eine detaillierte Kenntnis der Gebäudestruktur.

9 Zusammenfassung

Zur Lösung der Fragestellungen wurden aufwendige Berechnungen und numerische Simulationen durchgeführt, welche mit Messergebnissen validiert worden sind. Hierzu wurden im Rahmen des Projektes entsprechende Messungen realisiert. Darüber hinaus wurden bei den Antragsstellern bereits vorhandene sowie in der Literatur angegebene Messergebnisse verwendet. Die Ergebnisse wurden dann auf eine in der Praxis handhabbare Vorgehensweise zur Prognose des sekundären Luftschalls in Räumen überführt. Es zeigte sich, dass wegen der großen Variabilität in der Konzipierung der Gründung und der Bauweisen/Geometrien im Hochbau (tragende, nicht tragende Bauteile, Anordnung der Wände) eine Vorgehensweise mit pauschalen Übertragungsfaktoren nicht zielführend ist und die Modellierung der gesamten Übertragungskette erforderlich ist.

Ausgehend von der Erschütterungsquelle (Bahndamm, U-Bahn-Tunnel) sind entsprechend dem Ausbreitungsweg Parameteridentifikationen von Bodenkennwerten exemplarisch durchgeführt worden und in numerische Schwingungsmodelle für den Boden angewendet worden. Die Boden-Bauwerk-Interaktion wurde durch numerische Berechnungen zur frequenzabhängigen Boden-Bauwerk- Wechselwirkung für Platten- und Pfahlgründungen im Bodenhalbraum zur Bestimmung der Übertragung Boden-(Pfahl-) Gründung verwendet. Hierzu wurden eine typische Rahmenkonstruktion sowie ein Gebäude mit komplexer Grundrissgeometrie untersucht. Hierzu wurden strukturdynamische Berechnungen zur Ermittlung der Schwingungsmerkmale der unterschiedlichen raumbegrenzenden Flächen (Wand, Decken, etc.) exemplarisch vorgenommen. Es zeigt sich, dass eine Modellierung/Simulation mit den heute zur Verfügung stehenden numerischen Programmen möglich ist, wobei besonderes Augenmerk auf die Abbildung der einzelnen Strukturkomponenten erforderlich ist.

In einem einfachen, jedoch wirklichkeitsgetreuen Test-Referenzgebäude wurde im Experiment der sekundäre Luftschall durch eine tieffrequente Schallquelle simuliert und die Schallausbreitung und Weiterleitung im Testgebäude gemessen und mit Berechnungsmodellen verglichen. Dazu wurde detailliert der Schallabstrahlgrad der Raumbegrenzungsflächen für den tiefen Frequenzbereich rechnerisch ermittelt. Die Abschätzung des für die Sekundärschallprognose erforderlichen Flankenschalldämm-Maßes erfolgte durch bauakustische Messungen und Rechnungen im Test-Referenzgebäude. Zur Verifikation und Prüfung der Prognosemodelle wurden in Zusammenarbeit mit dem Praxispartner Erschütterungsmessungen im Boden und im Gebäude in-situ durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen bestätigen die Notwendigkeit eines zuverlässigen Prognoseverfahrens und einer detaillierten Berechnung zur Erschütterungsausbreitung im Boden.

Im Ergebnis zeigt sich, dass für die Schallübertragung durch die Anwendung einer energiebasierten Betrachtungsweise für die Sekundärschallprognose die Prognosegenauigkeit deutlich verbessert werden kann. Die Ergebnisse gelten jedoch nur für die untersuchten Randbedingungen, und weitere Untersuchungen sind notwendig.

Für die Formulierung einer Vorgehensweise für den planenden Ingenieur zur Abbildung und Bewertung des gesamten Ausbreitungsweges Schienenfahrzeug – menschliche Wahrnehmung liefert das Projekt wertvolle Erkenntnisse für die einzelnen Komponenten, d.h. Boden und Bauwerk. Zur kompletten Beschreibung müssen jedoch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Dazu zählt die Komponente Boden-Bauwerk Interaktion für weitere Gründungskonfigurationen (Platten-, Pfahlgründungen) sowie die Untersuchung des Abstrahlverhaltens von Massiv- und Leichtbaukombinationen. Weiterhin muss die Komponente Boden hinsichtlich der Schichtenwirkung von Böden tiefenabhängig bezüglich der Schallweiterleitung und dem Dämpfungsverhalten parametrisch in das Prognosemodell überführt werden. Abschließend sei nochmals angemerkt, dass in der Praxis die Prognose des sekundären Luftschalls nach wie vor eine große Streubreite aufweist. Prognosen auf der sicheren Seite führen zu aufwendigen Maßnahmen, oft ohne nennenswerte Reduktion des Risikos einer Fehlplanung. Grund hierfür ist die starke Frequenzabhängigkeit der Gebäudeantwort mit den komplexen Wechselwirkungen. Eine nachhaltige Verbesserung dieser Situation kann nur durch weitere umfangreiche, systematische Untersuchungen erzielt werden, zumindest für Gebäude mit regulärer Gebäudegeometrie und gängigen Bauweisen für Decken, Wände, schwimmenden Estrich und Fenster. Das Rüstzeug hierzu wurde im vorliegenden Bericht dokumentiert und exemplarisch angewandt.

10 Literatur

- [1] Arnold, J., Kornadt, O.: Beschreibung Körperschallinduzierter Schalldruckpegel mit Hilfe von Übertragungsfunktionen, in Bauphysik Kalender 2014: Schwerpunkt: Raumakustik und Schallschutz (ed N. A. Fouad), Wiley-VCH, S. 641-663, 2014.
- [2] Auersch, L., Gerstberger, U., Meinhardt, C., Rücker, W.: Praxisgerechtes Prognoseverfahren für Schienenverkehrserschütterungen, Schlussbericht zum BMBFVorhaben Nr. 19U0039B, 2006.
- [3] Auersch, L.: Schottergleis und Feste Fahrbahn. Fahrzeug-Fahrweg-Dynamik und Erschütterungsemissionen - Komplexe Messungen und Berechnungen, EI- Eisenbahningenieur, 57(4), S. 8-18, 2006.
- [4] Auersch, L.: Zur praxisorientierten Berechnung der Steifigkeit und Dämpfung von Fundamenten und Fahrwegen, In: D-A-CH Tagung Erdbebenwesen und Baudynamik, Innsbruck, Niederwanger, G. (ed.), S. 225-232, 2001.
- [5] Bachmann, H., Ammann, W.J., Deischl, F., Eisenmann, J., Floegl, I., Hirsch, G.H., Klein, G.K., Lande, G.J., Mahrenholtz, O., Natke, H.G., Nussbaumer, H., Pretlove, A.J., Rainer, J.H., Saemann, E.-U., Steinbeisser, L.: Vibration Problems in Structures, Practical Guidelines, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 1995.
- [6] 24. BImSchV: Vierundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung) https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_24/index.html (zuletzt überprüft 24.4.2018).
- [7] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall, Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1996.
- [8] Datenbank der Schallschutz-Software Bastian, Firma DataKustik.
- [9] Deutsche Bahn AG: Körperschall- und Erschütterungsschutz – Leitfaden für den Planer, 1996.
- [10] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugrunddynamik, 2002.
- [11] Die Bahn: Erschütterungsschutz, In: <http://www.abs48.com/umwelt-und-naturschutz/erschuetterungsschutz> (letzter Abruf am 03.10.2016)
- [12] Dobry, R., Gazetas, G.: Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups, Geotechnique, 38, pp. 557-574, 1988.
- [13] Dowding, C.H.: Construction Vibrations, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.
- [14] Gazetas, G.: Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, 117(9), pp. 1363–1381, 1991.
- [15] Gazetas, G.: Foundation Vibrations, In: Foundation Engineering Handbook, H.Y. Fang, H.Y. (ed.), New York: Van Nostrand Reinhold, pp. 553–593, 1991.

- [16] Gerstberger, U., Auersch, L., Meinhardt, C., Rücker, W.: Ein einfach handhabbares Prognoseprogramm für Schienenverkehrserschütterungen, VDI-Berichte 1941 Baudynamik, S. 19-28, 2006.
- [17] Gottlob, D., Vogelsang, B.: Beurteilung von Schallimmissionen – Vorschriften – Normen – Richtlinien, In: Taschenbuch der Technischen Akustik, Müller, G., Möser, M. (Hrsg.), S. 103 - 148, Springer, 2004.
- [18] Grundmann, H., Müller, G.: Erschütterungseinleitung in Bauwerke und Maßnahmen zur Reduzierung von Erschütterungen und sekundären Luftschallemissionen. Bauingenieur, 69, S. 129-137, 1994.
- [19] Guggenberger, J., Müller, G.H.: Erschütterungen, In: Taschenbuch der Technischen Akustik, Müller, G., Möser, M. (Hrsg.), S. 767–798, Springer, 2004.
- [20] Holtzendorff, K., Rosenquist, M.O.: Schwingungsminderung durch Abschirmung der Wellenausbreitung im Boden mit vertikal angeordneten elastischen Matten, VDI-Berichte 2160 Baudynamik, S. 129-142, 2012.
- [21] <http://www.polytec.com/de/loesungen/schwingungen-messen/grundlagendervibrometrie> (25.01.2016).
- [22] Jaquet, T., Heiland, D., Rutishauser, G., Garburg, R.: Nord-Süd-Verbindung in Berlin - Baudynamik bei 15 km Masse-Feder-Systemen, EI – Eisenbahningenieur, 57/9, S. 54-64, 2006.
- [23] Kaynia, A.M.; Kausel, E.: Dynamics of piles and pile groups in layered soil media, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 10, pp. 386–401, 1991.
- [24] Kornadt, O.; Vogel, A.: Characterisation of structure-borne sound sources. In: Proceedings ACOUSTICS Brisbane, Australia, 2016.
- [25] Kornadt, O.; Vogel, A.: Die neue Schallschutznorm: Vergleich DIN 4109:1989 und E DIN 4109:2013, Mauerwerk, 19(2), pp.110-118, 2015.
- [26] Kornadt, O.; Vogel, A.: Schallschutz im Mauerwerksbau nach neuer DIN 4109. In: Mauerwerksbau aktuell 2017 - Praxishandbuch für Architekten und Ingenieure. Kapitel: Schallschutz im Hochbau, 2017.
- [27] Krüger, F.: Praxisgerechtes Prognoseverfahren für Schienenverkehrserschütterungen - Teilprojekt: Nahverkehr und Sekundärschall, Bericht zum BMBF Vorhaben 19U0039A, 2006.
- [28] Krüger, F.: Sekundärschall – Prognose und Bewertung, VDI-Berichte Nr. 1941, S. 85-102, 2006.
- [29] Krüger, F.: Sekundärschall – Prognose und Bewertung, VDI-Berichte 1941 Baudynamik, S. 85-102, 2006.
- [30] Kuo K., Lombaert G., Degrande G.: Formulating hybrid models for prediction of railway induced vibration levels in building, Proceedings of International Conference on Sound and Vibration ICSV, London, United Kingdom, 2017.

- [31] Liang, J., Petersson, B.A.T.: Estimation of vibration distribution for finite structures, *Journal of Sound and Vibration*, 238(2), pp. 271-293, 2000.
- [32] Makris, N.: Soil-pile interaction during the passage of Rayleigh waves: An analytical solution, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23(2), 153-167, 1994.
- [33] Meier, A.: Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand, Dissertation, RWTH Aachen, Shaker, 2000.
- [34] Melke, J.: Erschütterungen und Körperschall des landgebundenen Verkehrs . Prognose und Schutzmaßnahmen, Landesamt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Materialien Nr. 22, 1995.
- [35] Mylonakis, G., Nikolaou, S., Gazetas, G. Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, pp. 824–853, 2006.
- [36] Robinson, M. K.: Prediction of sound and vibration response using transient statistical energy analysis, PhD thesis University of Liverpool, 2012.
- [37] Robinson, M. K.: Prediction of sound and vibration response using transient statistical energy analysis, PhD thesis University of Liverpool, 2012.
- [38] Rosenquist, M.O.: Flughafen-S-Bahn Hamburg, Schienenverkehrserschütterungen und sekundärer Luftschall von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen 1994 bis zu Abnahmemessungen 2008, VDI-Berichte 2063 Baudynamik, S. 41-56, 2009.
- [39] Rücker, W., Said, S.: Einwirkung von U-Bahnerschütterungen auf Gebäude; Anregung, Ausbreitung und Abschirmung, In: Workshop Wave '94, Wave Propagation and Reduction of Vibrations, N. Chouw, N., Schmid, G. (eds.), Ruhr Universität Bochum, pp. 59–78, 1994.
- [40] Rücker, W.F., Auersch, L., Said, S., Krüger, M.: Reduzierung von Schienenverkehrerschütterungen, D-A-CH Tagung, SGEB/DGEB/OeGE, S.117-122, 1997.
- [41] Rutishauser, G.: Erschütterungsschutz in der Schweiz, Entwicklung und Zukunft - Immissionsrichtwerte und technische Anforderungen, VDI-Berichte Nr. 1941, S. 695-706, 2006.
- [42] Rutishauser, R.: Vibrations of traffic, from the source to the recipient - the problem of resonances, Proceedings of 7. Congrès Français d'Acoustique (CFA) und 30. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA), Strasbourg, pp. 1083-1084, 2004.
- [43] Said, A., Grütz, H.-P., Garburg, R.: Ermittlung des sekundären Luftschalls aus dem Schienenverkehr, *Lärmbekämpfung*, 53(1), S. 12-18, 2006.
- [44] Schirmer, W.: Technischer Lärmschutz, Springer, 2006.
- [45] Sennheiser, J.: Über den Einfluss endlicher Dimensionen auf die Schallabstrahlung dünner Platten unterhalb der Grenzfrequenz, Dissertation Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, 1974.

- [46] TA-Lärm: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm) http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26081998_IG19980826.htm (zuletzt überprüft 24.04.2018).
- [47] VDI 3827:2013-01: Erschütterungen in der Umgebung von oberirdischen Schienenverkehrswegen-Spektrales Prognoseverfahren, 2013.
- [48] Villot, M., Jean, P., Grau L.: Predicting ground-borne noise from vibration of radiating building elements using power based building acoustics theory, Proceedings International Conference on Sound and Vibration ICSV, London, United Kingdom, 2017.
- [49] Vogel, A., Arnold, J., Wittstock, V., Kornadt, O., Völker, C.: Prognose von Schalldruckpegeln in Leichtbauten nach DIN EN 12354-5 unter Verwendung der charakteristischen Quellgrößen einer Körperschallquelle, Proceedings „Deutsche Jahrestagung für Akustik“ (2016), Aachen, 2016.
- [50] Vogel, A., Arnold, J., Wittstock, V., Kornadt, O., Völker, C.: Prediction of sound pressure levels in rooms using EN 12354 and the characteristic structure-borne sound power of structure-borne sound sources, Proceedings INTER-NOISE, Hamburg, 2016.
- [51] Vogel, A., Kornadt, O.: Schallschutz für den Wohnungsbau – letzter Status der Normung, Mauerwerk, 20(1), Ernst & Sohn, pp. 64-69, 2016.
- [52] Vogel, A., Wittstock, V., Kornadt, O., Scholl, W.: Application of the two-stage method on the characterization of different structure-borne sound sources and a moment actor, Proceedings INTERNOISE, nr.1160, Innsbruck, 2013.
- [53] Vogel, A., Wittstock, V., Kornadt, O., Völker, C.: Characterisation of sources injecting a moment power with the two-stage-method, Proceedings International Conference on Sound and Vibration ICSV, London, United Kingdom, 2017.
- [54] Vogel, A.: Untersuchung eines ingenieurmäßigen Verfahrens zur Charakterisierung von Körperschallquellen. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern, 2017.
- [55] Vrettos, C.: Bodendynamik, In: Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, Ernst & Sohn, S. 451-500, 2008.
- [56] Vrettos, C.: Erschütterungsschutz, In: Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke, 7. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, S. 691-746, 2009.
- [57] Wang A., Li Y., Wang Z.: Research of new combined track slab system in low frequency vibration control, Proceedings International Conference on Sound and Vibration ICSV, London, United Kingdom, 2017.
- [58] Wang A., Li Y., Wang Z.: Research of new combined track slab system in low frequency vibration control, Proceedings International Conference on Sound and Vibration ICSV, London, United Kingdom, 2017.

- [59] Waterhouse, R.V.: Interference patterns in reverberant sound fields, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 27(2), 1955.
- [60] Wettschureck, R.G., Hauck, G., Diehl, R.J., Willenbrink, L.: Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr. In: *Taschenbuch der Technischen Akustik*, Müller, G., Möser, M. (Hrsg.), S. 483 - 584, Berlin: Springer, 2004.