

Normen Langner, Heinz-Martin Fischer, M. Schneider

**Ursachen und
Verbesserungspotenzial des
Phänomens der tieffrequenten
Trittschallgeräusche bei klassischen
schwimmenden Estrichen auf
Stahlbetondecken im Wohnungsbau**

F 2931

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- 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

2015

ISBN 978-3-8167-9410-3

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

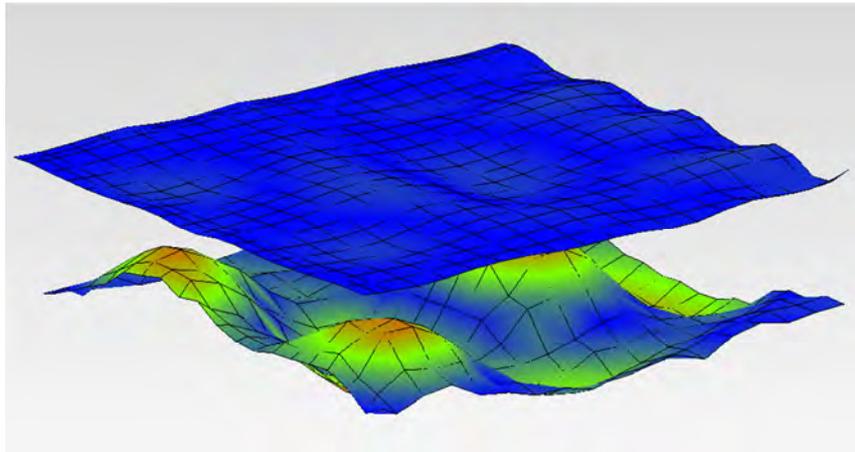
www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abschlussbericht zur Forschungsarbeit

„Ursachen und Verbesserungspotenzial des Phänomens der tieffrequenten Trittschallgeräusche bei klassischen schwimmenden Estrichen auf Stahlbetondecken im Wohnungsbau“

SF-10.08.18.7-11.43



Antragsteller: Bilfinger Berger Hochbau GmbH
Building Technology Center – Abteilung Bauphysik
Goldsteinstraße 114
60528 Frankfurt am Main

Verantwortlicher Projektleiter: Dr.-Ing. N. Langner

Beteiligte Forschungseinrichtung: Hochschule für Technik Stuttgart
Zentrum für akustische und thermische Bauphysik
Schellingstraße 24
70174 Stuttgart

Professor Dr.-Ing. H.-M. Fischer
Dipl.-Ing. (FH) M.Sc. M. Schneider

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.43 / II 3-F20-10-1-082). Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

Inhalt

1. Einleitung	4
1.1 Motivation.....	4
1.2 Methodik	7
1.3 Nutzen.....	9
2. Grundlagen	10
2.1 Charakterisierung des Trittschallschutzes.....	10
3. Literaturrecherche	12
4. Untersuchungen im Labor	19
4.1 Beschreibung des Estrichs.....	19
4.2 Messtechnische Untersuchungen	20
4.2.1 Modalanalyse.....	20
4.2.2 Raumübertragungsfunktionen.....	23
4.2.3 Luft- und Trittschalldämmung	25
4.2.4 Schnellepegeldifferenz	27
4.2.5 Verlustfaktor.....	28
4.2.6 Abstrahlgrad	29
4.2.7 Ermittlung von Hörbeispielen	30
5. Untersuchungen am Bau	32
5.1 Messtechnische Untersuchungen	32
5.1.1 Ergebnisse Luft- und Trittschalldämmung	33
5.1.2 Weitere bauakustische Ergebnisse.....	34
5.1.3 Schmalbandmessungen des Normtrittschallpegels und der Raummoden	36
5.1.4 Hintergrundgeräuschpegel	37
5.2 Umfrage	38
5.2.1 Beschwerdemessungen	39
5.3 Güteprüfungen	40
5.3.1 Vergleich Beschwerdemessung - Güteüberprüfung	40
6. Hörversuche	43
6.1 Methodik der Hörversuche	43
6.2 Variation der Anregearten	43
6.3 Durchführung und Ergebnisse der Hörversuche	47
6.3.1 Einfluss der Anregequelle	48

6.3.2 Einfluss des Frequenzspektrums	48
6.3.3 Einfluss der Nachhallzeit	49
6.3.4 Einfluss der Lautheit.....	49
6.4 Zusammenfassende Bewertung der Hörversuche	50
7. Zusammenfassung und Empfehlungen für Planung und Ausführung.....	52
8. Literatur	54

1. Einleitung

1.1 Motivation

Die Forschungsarbeit befasst sich mit tieffrequenten Trittschallgeräuschen bei klassischen schwimmenden Estrichen auf Stahlbetondecken im Wohnungsbau. Die Veranlassung zu diesem Projekt ergab sich aufgrund der häufigen Beschwerden von Wohnungsnutzern und Nachbarn. Dabei berichten die betroffenen Bewohner regelmäßig über ein tieffrequentes „Dröhnen“ von Trittschallgeräuschen, wenn der Nachbar über seinen Fußboden geht.

Werden anschließend auf Veranlassung der Beschwerden die beanstandeten Konstruktionen messtechnisch analysiert, wird häufig festgestellt, dass die Mindestanforderungen der DIN 4109 [8] und häufig auch die Empfehlungen für einen erhöhten Schallschutz (z.B. Beiblatt 2 der DIN 4109 [1] oder VDI 4100 [2], [3]) oder anders ausgedrückt die Anhaltswerte für einen üblichen Qualitäts- und Komfortstandard (vgl. BGH [4], z.B. Beiblatt 2 der DIN 4109 [1], VDI 4100 [2]) teilweise deutlich erfüllt sind. Die Messwerte sind demzufolge erheblich niedriger als die bestehenden Vorschläge und Empfehlungen der einschlägigen Normen. Die baurechtlichen Anforderungen nach DIN 4109 [8] werden in diesen Fällen grundsätzlich erheblich unterschritten und damit deutlich übererfüllt. Die bewerteten Norm-Trittschallpegel liegen dabei häufig bei etwa $L'_{n,w} \approx 45$ dB und niedriger. Es liegen also sehr gut und mangelfrei ausgeführte schwimmende Estriche auf Stahlbetondecken vor und trotzdem fühlen sich viele Bewohner zu Beschwerden veranlasst.

Die Frage nach den Ursachen dieses Phänomens ist bislang noch ungeklärt. Die Möglichkeiten zur Minderung dieser Geräusche, um eine geeignete Verbesserung der Bauqualität zu erreichen, werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersucht. Ferner soll ein Maßstab, z.B. in Form einer Einzahlangabe, für die Beurteilung solcher Geräusche aus den Erkenntnissen abgeleitet werden, um beispielsweise in einem Beschwerdefall ein geeignetes Prognosetool zur Verfügung zu haben.

Abb. 1 zeigt eine Beispielmessung eines Beschwerdefalles mit einem bewerteten Norm-Trittschallpegel von $L'_{n,w} = 44$ dB mit Darstellung der Hörschwelle nach DIN 45680 [5] und der Trittschallverbesserung nach der Theorie Cremer [6] sowie die Trittschallverbesserung nach DIN EN 12354-2 [7].

Der Trittschallpegel unterhalb von 100 Hz liegt bei etwa 60 dB. Der Einzahlwert des bewerteten Norm-Trittschallpegels liegt bei $L'_{n,w} = 44$ dB. Die Hörschwelle nach DIN 45680 [5] wird bei Anregung mit dem Normhammerwerk um 13 dB bis 35 dB deutlich überschritten.

Die bestehenden Anforderungswerte nach den verschiedenen Normen und Richtlinien [1], [2], [3], [8], [9], [10] werden teilweise erfüllt bzw. sogar erheblich übererfüllt. Tabelle 1 stellt die derzeit in Deutschland bestehenden Anforderungswerte an den Trittschallschutz von Wohnungstrenndecken gegenüber. In Tabelle 2 sind die empfohlenen Werte gemäß DEGA-Schallschutzausweis [10] zusammengestellt.

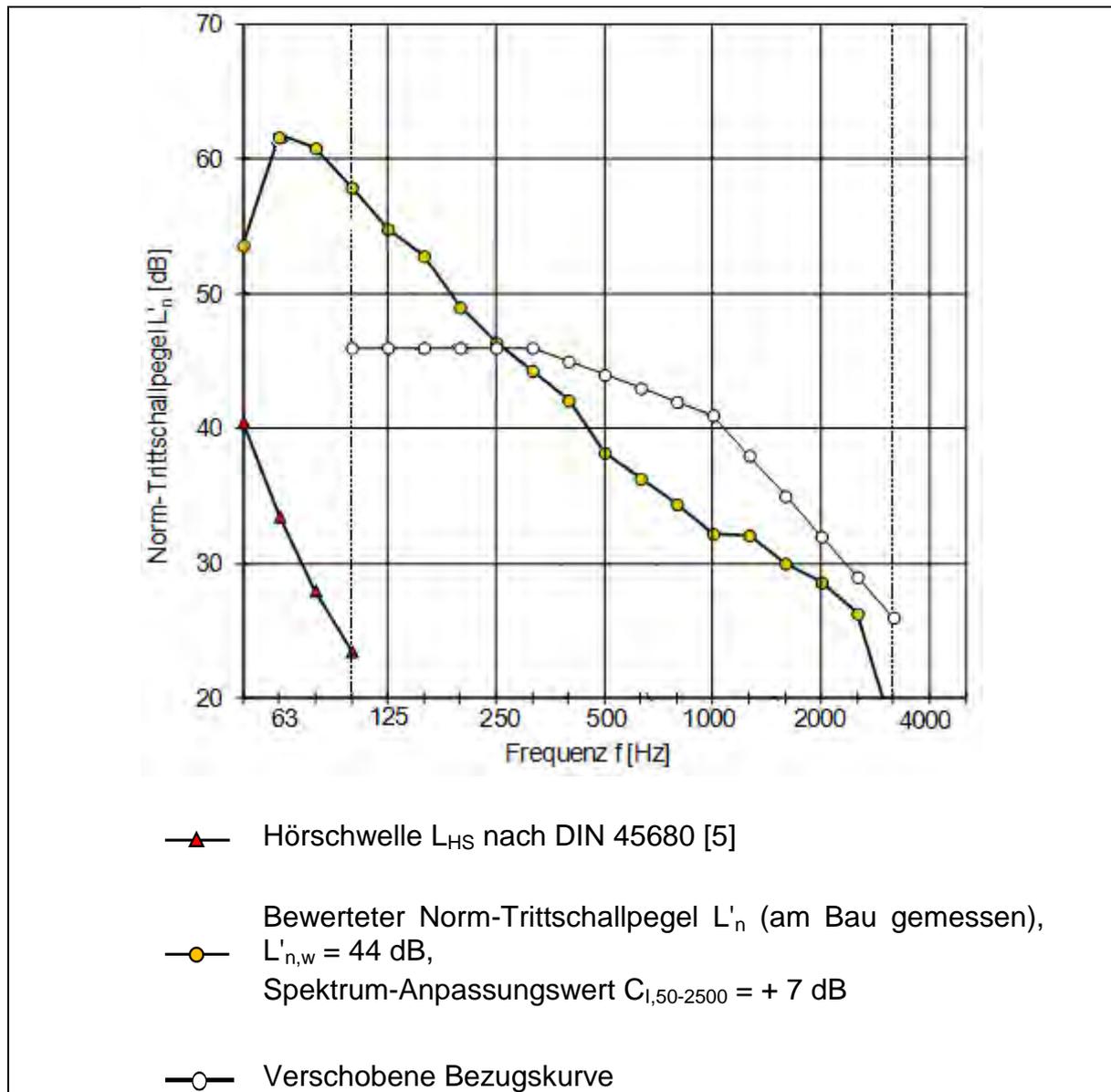


Abb. 1: Beispielmessung eines Beschwerdefalles mit Darstellung der Hörschwelle nach DIN 45680 [5]

Tabelle 1

Anforderungen aus verschiedenen Normen und Richtlinien an die Trittschalldämmung von Wohnungstrenndecken zum Schutz von (fremden) Aufenthaltsräumen; fett gedruckt sind die Werte, die derzeit aktuell sind.

	1	2	3
	Norm / Richtlinie	Anforderungswert	Bemerkung
1	Baurechtliche Anforderung DIN 4109:1989-11 [8] entspr. Schallschutzstufe I VDI 4100:2007-08 [2]	erf. $L'_{n,w} \leq 53$ dB DIN 4109, Tab.3, Z.2, Sp.4	-
2	Vorschlag zum erhöhten Schallschutz DIN 4109 Beiblatt 2:1989-11 [1]	erf. $L'_{n,w} \leq 46$ dB Beiblatt 2, Tab.2, Z.2, Sp.4	-
3	Kennwert Schallschutzstufe II VDI 4100:2007-08 [2]	$L'_{n,w} \leq 46$ dB VDI 4100, Tab.2, Z.4, Sp.6	Ersetzt durch VDI 4100:2012-10 [3]
4	Kennwert Schallschutzstufe III VDI 4100:2007-08 [2]	$L'_{n,w} \leq 39$ dB VDI 4100, Tab.2, Z.4, Sp.7	Ersetzt durch VDI 4100:2012-10 [3]
5	Kennwert Schallschutzstufe I VDI 4100:2012-10 [3]	$L'_{nT,w} \leq 51$ dB VDI 4100, Tab.2, Z.2, Sp.5	Umstellung auf nach- hallzeitbezogene An- forderungswerte
6	Kennwert Schallschutzstufe II VDI 4100:2012-10 [3]	$L'_{nT,w} \leq 44$ dB VDI 4100, Tab.2, Z.2, Sp.6	
7	Kennwert Schallschutzstufe III VDI 4100:2012-10 [3]	$L'_{nT,w} \leq 37$ dB VDI 4100, Tab.2, Z.2, Sp.7	
8	E DIN 4109-1:2006-10 [9]	zul. $L'_{nT,w} \leq 55$ dB E DIN 4109, Tab. 8, Z.1, Sp.3	

erf. $L'_{n,w}$ = Erforderlicher bewerteter Norm-Trittschallpegel nach DIN 4109 [8], Beiblatt 2 [1], VDI 4100:2007-08 [2]

$L'_{nT,w}$ = bewerteter Standard-Trittschallpegel nach VDI 4100:2012-10 [3]

zul. $L'_{nT,w}$ = zulässiger bewerteter Standard-Trittschallpegel nach E DIN 4109-1:2006-10 [9]

Zusätzlich zu den Anforderungswerten in Normen und Richtlinien existiert seit 2005 der DEGA-Schallschutzausweis [10]. In Tabelle 2 sind die Anforderungen aus dem DEGA-Schallschutzausweis in Abhängigkeit von den 7 Schallschutzstufen abgebildet.

Tabelle 2

Anforderungen aus dem DEGA-Schallschutzausweis [10] an die Trittschalldämmung

	F	E	D	C	B	A	A*
Decken $L'_{n,w}$ [dB]	> 60 dB	≤ 60 dB	≤ 53 dB	≤ 46 dB	≤ 40 dB	≤ 34 dB	≤ 28 dB

Der Vergleich von Beschwerdemessungen mit den Anforderungswerten aus den Tabellen 1 und 2 zeigt, dass etliche Anforderungs- und Empfehlungswerte erfüllt werden und trotzdem Beschwerden der Bewohner über tieffrequente Trittschallgeräusche vorgetragen werden.

1.2 Methodik

Zunächst soll die Begrifflichkeit "Tieffrequente Trittschallgeräusche" geeignet definiert werden. Die Beschreibung der genannten Begrifflichkeit umfasst zum einen die physikalische und damit messtechnisch erfassbare Seite (wie z.B. Norm-Trittschallpegel und Pegel beim Begehen des Estrichs, Pegeldifferenzen zum Grundgeräusch, Körperschall-Nachhallzeit der Massivdecke mit Estrich im Vergleich zur Nachhallzeit des Raumes, etc.) und zum anderen die subjektive Beschreibung und Eingruppierung durch die Bewohner. Die subjektive Beschreibung wird durch Hörversuche näher untersucht.

Des Weiteren werden messtechnische Untersuchungen an Deckenkonstruktionen am Bau in verschiedenen in den letzten 5 bis 10 Jahren erstellten Mehrgeschosswohnungsbauten durchgeführt und ausgewertet. Hierbei wird zum einen die Eingangsimpedanz der Deckenkonstruktion, also der Widerstand gegen eine mechanische Anregung, und verschiedene Übertragungsfunktionen (z.B. Transferimpedanz zwischen der auf dem Estrich eingeleiteten Kraft und der daraus resultierenden Schnelle auf der Betondecke oder dem daraus im darunter liegenden Raum resultierenden Schalldruck) gemessen. Parallel werden an diesen Konstruktionen die bewerteten Norm-Trittschallpegel gemäß DIN EN ISO 140-7 [24] bestimmt. Ergänzt werden die eigenen Messungen durch eine Befragung von sachverständigen VMPA-Schallschutzprüfstellen.

Als erstes Zwischenergebnis kann festgehalten werden, dass mit der zuvor beschriebenen Methodik eine Gegenüberstellung der gebauten Konstruktion (erster Aspekt: Technik) mit den daraus resultierenden messtechnischen Erkenntnissen (zweiter Aspekt: physikalische Beschreibung) erfolgt.

Neben diesen in-situ-Betrachtungen sollen in einem weiteren Arbeitsschritt geeignet modifizierte Bodenaufbauten in einer möglichst standardisierten Prüfsituation im Labor eingehend untersucht werden. Die Modifizierungen im Bereich des Bodenaufbaus ergeben sich dabei teilweise aus den Ergebnissen der vorangegangenen messtechnischen Untersuchungen am Bau.

Die verschiedenen Ansätze in diesem Forschungsvorhaben zur Beschreibung und Beurteilung der tieffrequenten Trittschallgeräusche zeigt nachfolgende Abb. 2.

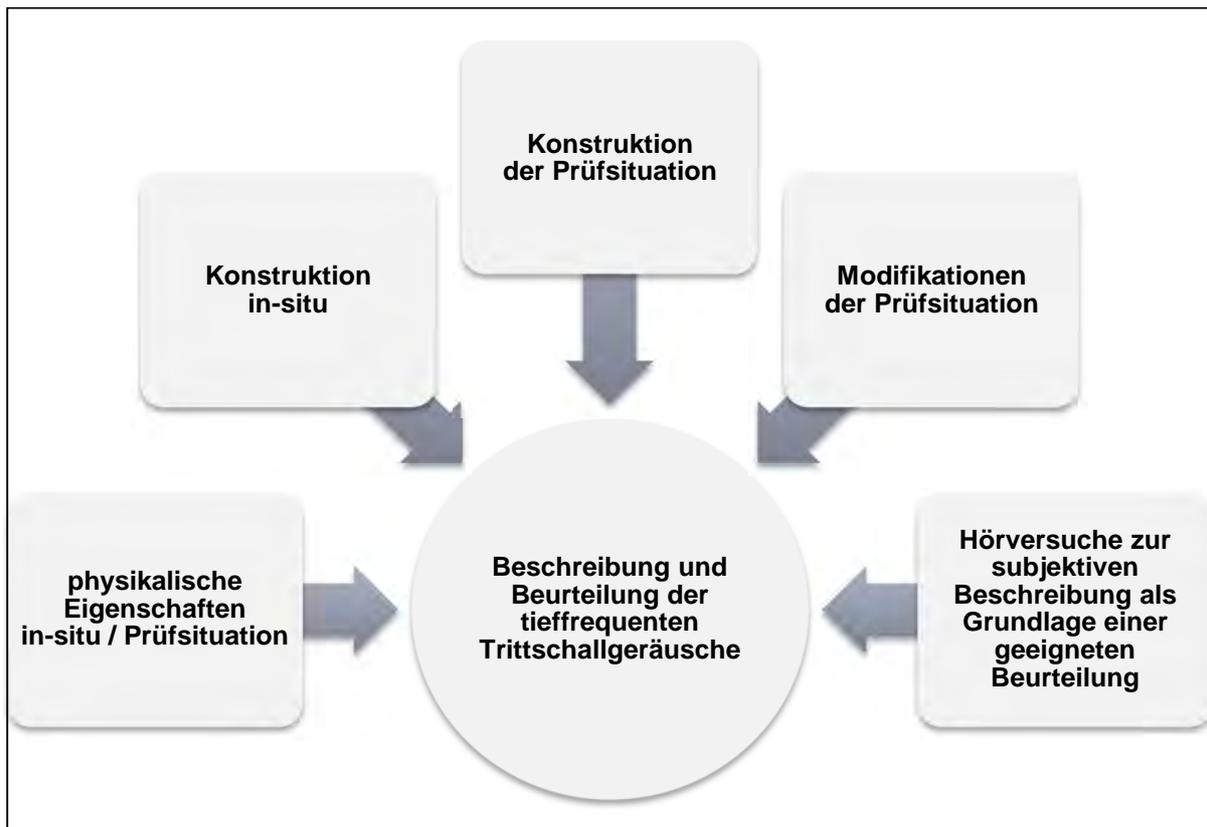


Abb. 2: Ansätze zur Beschreibung und Beurteilung der tieffrequenten Trittschallgeräusche

Die derzeit vorhandenen Unsicherheiten hinsichtlich der physikalischen Ursachen sowie bei der Beurteilung der tieffrequenten Trittschallgeräuschen erfordern ein zweigeteiltes Forschungsvorhaben: Einen physikalisch-messtechnischen Ansatz hinsichtlich der Analyse der Trittschallübertragung bei schwimmenden Estrichen sowohl am Bau als auch an Prüfaufbauten im Labor und einen psychoakustischen Ansatz zur Beschreibung und Beurteilung der Lästigkeit dieser Geräusche.

Der Forschungsansatz baut also grundsätzlich auf zwei Säulen auf. Einerseits auf der offensichtlich vorhandenen Unsicherheit hinsichtlich der physikalischen Ursachen und andererseits auf der Fragestellung, wann eine Störung durch solche Geräusche vorhanden bzw. zu befürchten sind (siehe Abb. 3).

Physikalisch-messtechnischer Ansatz Analyse der Trittschallübertragung sowohl in situ als auch an Prüfaufbauten im Labor	Psychoakustischer Ansatz Beschreibung und Beurteilung der Lästigkeit solcher Geräusche mittels Hörversuchen
I. Gegenüberstellung von Messergebnissen vorhandener Konstruktionen II. Messungen am Bau (1. Aspekt: Regeln der Technik) III. Messungen im Labor (2. Aspekt: Innovationspotenzial)	I. Modifikation eines tieffrequenten Trittschallgeräusches im Spektrum und in der Pegelhöhe II. Entwicklung eines geeigneten Fragebogens III. Statistische Auswertung des Votums der Probanden

Abb. 3: Forschungsansatz basiert auf zwei Säulen

1.3 Nutzen

Der Nutzen der Ergebnisse des Forschungsprojektes besteht darin, dass die Ursachen der tieffrequenten Trittschallgeräusche bei klassischen schwimmenden Estrichen auf Stahlbetondecken genauer als bisher beschrieben werden können. Ferner werden Aufbauten vorgeschlagen, die geeignet sind, mit vorhandenen Baustoffen eine Verminderung des Phänomens der tieffrequenten Trittschallgeräusche herbeizuführen.

Außerdem soll auf Basis der Beschreibung der Begrifflichkeit ein Beurteilungsmaßstab z.B. eine einen weiteren Frequenzbereich umfassende Einzahlangabe abgeleitet werden, der neben Planung und Ausführung auch bei Beschwerdefällen angewendet werden kann.

2. Grundlagen

2.1 Charakterisierung des Trittschallschutzes

Um die akustischen Eigenschaften von Decken hinsichtlich deren Trittschalldämmung zu beschreiben, wird in der Regel auf den Einzahlwert zurückgegriffen. Die Einzahlwertbildung findet in einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 3150 Hz statt, indem eine in DIN EN ISO 717-2 [11] definierte Bezugskurve so lange um ganzzahlige Werte nach oben oder unten verschoben wird, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen maximal groß, jedoch nicht größer als 32 dB ist (dies gilt für eine Messung in Terzbändern). Unter ungünstiger Abweichung werden dabei Überschreitungen der verschobenen Bezugskurve verstanden, während Unterschreitungen nicht berücksichtigt werden.

Nach DIN EN ISO 140-6 [20] müssen für Messungen des Trittschalls in Prüfständen die Terz-Mittelfrequenzen in einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 5.000 Hz gemessen werden. Sollen darüber hinaus auch Zusatzinformationen für das Verhalten der Deckenkonstruktion im tiefen Frequenzbereich unter 100 Hz gesammelt werden, erfolgt zusätzlich die Messung der Terz-Mittelfrequenzen bei 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz.

Bei der Ergebnisdarstellung einer Messung im Prüfstand oder am Bau werden die Frequenzen von 50 Hz bis 5.000 Hz in einem Diagramm eingetragen. Die Darstellung der Frequenzen unterhalb von 100 Hz bzw. oberhalb von 3150 Hz hat allerdings keine Auswirkung auf die Ermittlung des Einzahlwerts, welcher – wie bereits beschrieben – nach DIN EN ISO 717-2 [11] zur Bestimmung des den Norm-Trittschallpegels aus den Frequenzen 100 Hz bis 3.150 Hz errechnet wird.

Um darüber hinaus auch andere Frequenzbereiche hervorzuheben, muss auf die Spektrum-Anpassungswerte zurückgegriffen werden. Für den C_I -Wert werden die Frequenzen von 100 Hz bis 2.500 Hz berücksichtigt. Um tiefe Frequenzen stärker zu beurteilen wird der $C_{I,50-2500}$ verwendet. Der Einzahlwert errechnet sich aus:

$$C_{I,50-2500} = L_{n,sum} - 15 \text{ dB} - L_{n,w} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{mit: } L_{n,sum} = 10 \cdot \log \sum_{50}^{2500} 10^{\frac{L_i}{10}} \text{ dB} \quad (\text{Gl. 2})$$

Für den Fall, dass der Anpassungswert $C_{I,50-2500}$ größer als 0 wird, ist ein größerer Anteil an tieffrequenten Schall vorhanden.

Der Spektrum-Anpassungswert $C_{I,50-2500}$ wird zum Einzahlwert $L'_{n,w}$ addiert, um den spektralen Verlauf der Messkurve zu berücksichtigen und die tatsächliche Störwirkung durch Gehgeräusche im Einzahlwert besser abbilden zu können. Da das Verfahren der Anpassung von Spektren nach DIN EN ISO 717-2 [11] allerdings bei den Anforderungen nach DIN 4109 [8] keine Anwendung findet, erscheint es sinnvoll, die Korrektur des Einzahlwertes mit dem Spektrum-Anpassungswert (also: $L'_{n,w} + C_{I,50-2500}$) bei der Beurteilung der tieffrequenten Geräuschmissionen vorzunehmen, um die reale Störwirkung besser zu beschreiben.

Hinweis: Für die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Messungen wurde im Labor der Frequenzbereich zusätzlich auf 20 Hz – 5.000 Hz erweitert. Unterhalb von 20 Hz ist eine Messung aus akustischer Sicht irrelevant, da der Infraschall nur noch als Schwingung und nicht mehr als akustischer Pegel wahrnehmbar ist.

3. Literaturrecherche

Hinsichtlich der Nutzung von vorhandenen Arbeiten kann folgendes festhalten werden: Das Phänomen wurde an verschiedenen Stellen [z.B.12, 13, 14] wiederholt beschrieben, allerdings sind die Ursachen bisher nicht ausreichend untersucht. Zwar gibt es die verschiedensten Überlegungen und Theorien hinsichtlich der Ursachen, allerdings sind diese Theorien nicht in einer Prüfsituation oder in-situ validiert. Auch widersprechen sich die vorhandenen Theorien teilweise und führen insofern zu einer gewissen Unsicherheit für Planung und Ausführung.

Kühn und Blickle [12] berichten bereits 1993 vom dröhnenden Estrich und Laboruntersuchungen im Frequenzbereich von 25 Hz bis 500 Hz. Die Anregung erfolgte sowohl mit dem Norm-Hammerwerk als auch mit einem Fersengang. Die verbale Beschreibung des Dröhnens nach [13] lautet: "Das verstärkte Mitschwingen von Bauteilen bei der Anregung von Eigenfrequenzen, insbesondere bei tiefen Frequenzen". Kühn und Blickle [12] haben drei Möglichkeiten zur Verminderung des Dröhnens untersucht. Die Rohdecke bestand aus 160 mm Beton.

Bei Möglichkeit Nr. 1 haben sie den schwimmenden Estrich mit der Rohdecke verschraubt, wobei die Schrauben entkoppelt waren. Das Dröhnen hat aber nicht merklich abgenommen. Bei Möglichkeit Nr. 2 haben sie den schwimmenden Estrich mit einem sehr weichen / dicken Teppich belegt. Dies ergab eine deutliche Minderung des Dröhnens, da der beim Gehen erzeugte Kraftstoß wirksam abgefedert wird.

Die Möglichkeit Nr. 3 war eine Vergrößerung der Dicke des Estrichs auf etwa 110 mm bis 120 mm und damit eine Erhöhung seiner flächenbezogenen Masse. Die Resonanzüberhöhung ist bei diesem Aufbau nur schwach bis gar nicht mehr ausgeprägt vorhanden. Sie empfehlen diesen Aufbau und zusätzlich eine Trittschalldämmung mit einer dynamischen Steifigkeit von maximal $s' = 15 \text{ MN/m}^3$.

Burkhart [14] gibt als Beispiel die Messkurve in Abb. 4 an. Der Einzahlwert dieser Messkurve liegt bei $L'_{n,w} = 41 \text{ dB}$. Der Spektrum-Anpassungswert für die Berücksichtigung des erweiterten Frequenzbereiches beträgt $C_{1,50-2500} = 8 \text{ dB}$.

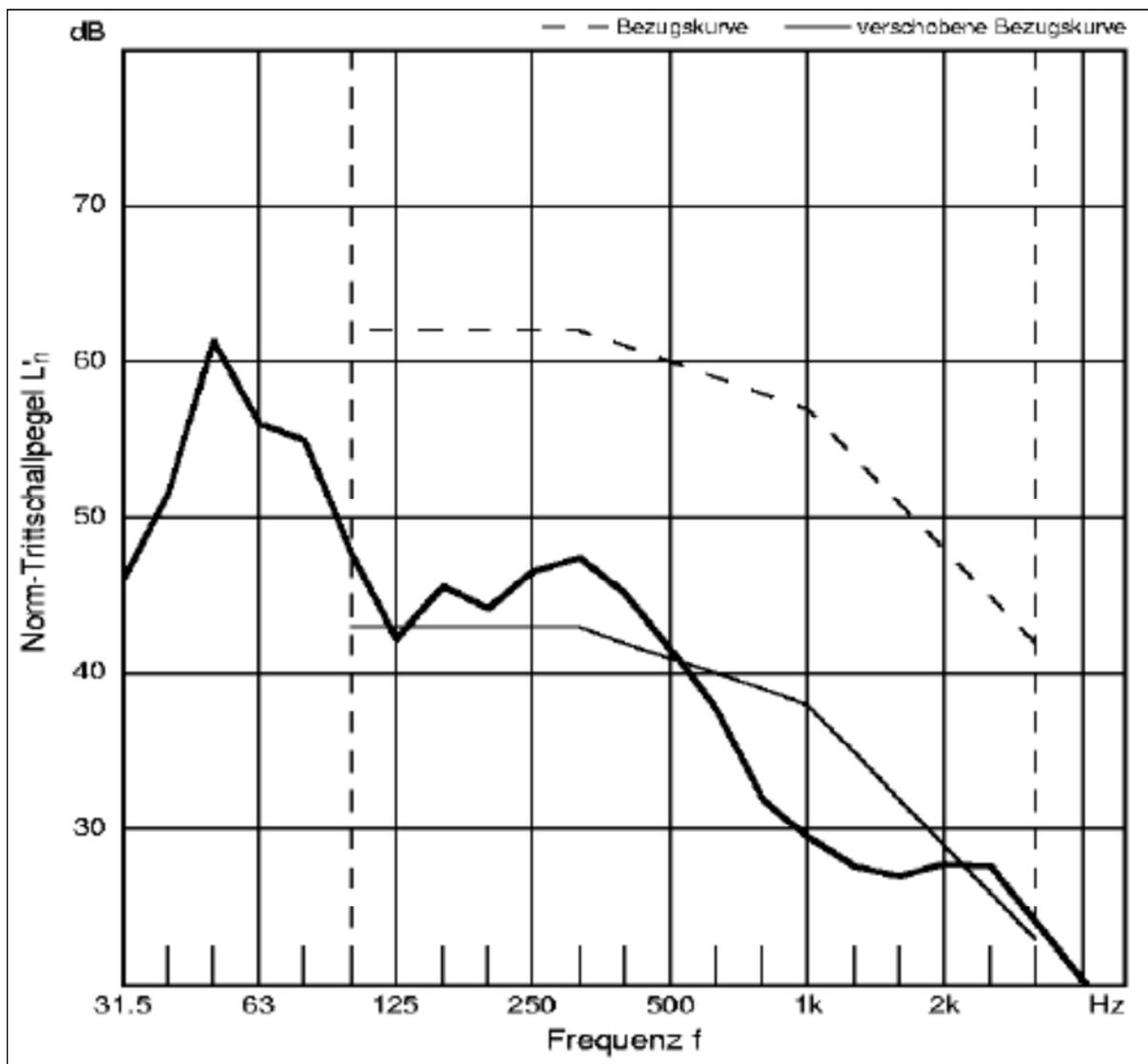


Abb. 4: Norm-Trittschallpegel über der Frequenz. Zu erkennen ist das Maximum der Kurve bei 50 Hz. Der Einzahlwert der Messkurve beträgt $L'_{n,w} = 41$ dB. Der Spektrum-Anpassungswert für die Berücksichtigung des erweiterten Frequenzbereiches beträgt $C_{l,50-2500} = 8$ dB (aus: [14])

Burkhart [15] untersucht verschiedene Bewertungsmethoden der tieffrequenten Trittschallgeräusche. Nach seinen Erfahrungen beschweren sich die Bewohner über dröhnende Estriche ab etwa 60 dB bei den Terzen 63 Hz und 80 Hz. Also scheinen Betroffene bei einer Überschreitung von etwa 30 dB der Hörschwelle bei Anregung mit dem Normhammerwerk nach DIN 45680 [5] bei den Terzen 63 Hz und 80 Hz Beschwerden zu äußern.

Als mögliche Bewertungsmethode gibt er den A-Summenpegel, die Differenz zwischen C-bewertetem Pegel und A-bewertetem Pegel $L_C - L_A$ sowie den Beurteilungspegel L_r nach DIN 45680 [5], den Spektrum-Anpassungswert C_l und den Summand aus Norm-Trittschallpegel und Spektrum-Anpassungswert $L'_{n,w} + C_l$ an.

Die Bewertungsmethoden A-Summenpegel und Differenz $L_C - L_A$ scheidet nach Burkhart [15] wegen der extremen Abhängigkeit vom spektralen Verlauf für die Bewertung aus. Für den A-Summenpegel ist dies noch nachvollziehbar, allerdings für

die Differenz $L_C - L_A$ nicht, da gerade diese Differenz im Sinne der DIN 45680 [5] ein Indiz für das Vorhandensein tieffrequenter Geräuschimmissionen ist.

Als nicht praktikabel erachtet Burkhart [15] den Beurteilungspegel L_r nach DIN 45680 [5], da diese Methodik in der Bauakustik unüblich ist und dieser Wert am Messgerät und in bauakustischen Auswertetools nicht zur Verfügung steht. Allerdings scheint gerade diese Methode sehr gut geeignet zu sein, um tieffrequenten Geräusche zu bewerten; im Immissionsschutz ist dieses Vorgehen Standard. Auch, dass die Bewertung anhand einer standardisierten Hörschwellenkurve durchgeführt wird, macht diese Methode gut geeignet. Diese Vermutung bestätigt Burkhart [15] auch, indem er von einer sehr guten Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis nach DIN 45680 [5] und seinen eigenen Erfahrungen hinsichtlich der Beschwerdefälle spricht.

Die bloße Betrachtung des Spektrum-Anpassungswert C_1 ist nach Burkhart [15] nicht ausreichend, sondern nur die additive Verknüpfung zwischen dem Norm-Trittschallpegel und dem Spektrum-Anpassungswert, also $L'_{n,w} + C_1$. In Tabelle 3 ist die nach Burkhart [15] entwickelte Hilfestellung für die Bewertung des Dröhnens gezeigt.

Tabelle 3

Hilfestellung für das Auftreten von Dröhneffekten. Es werden der Einzahlwert des bewerteten Norm-Trittschallpegels $L'_{n,w}$ und der Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50-2500}$ Hz addiert und in Abhängigkeit des Ergebnisses eine Hilfestellung zur Beurteilung gegeben [15]

$L'_{n,w} + C_{1,50,2500}$ Hz	Hilfestellung
\leq erf. $L'_{n,w}$	Dröhnen unwahrscheinlich
\leq erf. $L'_{n,w} + 0 \dots 5$ dB	Genauere Betrachtung und Bestimmung der Hörschwellenüberschreitung erforderlich
$>$ erf. $L'_{n,w} + 5$ dB	Dröhnen sehr wahrscheinlich

Als Zwischenergebnis kann festgehalten werden, dass tieffrequente Trittschallgeräusche unter 100 Hz häufige Beschwerdefälle in ausgeführten Bauten sind und zwar auch dann, wenn der Estrich sehr gut, also ohne Schallbrücken, ausgeführt wurde und die Einzahlwerte sehr niedrig liegen. Eine Bewertung dieser tieffrequenten Geräusche ist, wie in [15] ausgeführt, möglich. Allerdings ist ein genormtes Bewertungsschema dieses Phänomens nicht vorhanden.

Die Bewertung ist aber nicht das Hauptproblem, denn damit ist weder Symptom noch Ursache erklärt. Insofern erscheint es sinnvoll, nach den Ursachen zu suchen und hierfür ggf. eine Abhilfemöglichkeit zu definieren.

Zur Ursache des Phänomens der tieffrequenten Trittschallgeräusche finden sich in der Literatur ebenfalls einige Ansatzpunkte. Als mögliche Ursachen führt zum Beispiel Burkhart [14] folgende Punkte auf:

- 1) Verlustfaktor der Dämmschicht ist zu gering
- 2) Der Estrich ist „geschüsselt“ und schwingt dadurch stärker
- 3) Sehr homogene Baumaterialien und damit sehr scharfe Resonanzen
- 4) Raummoden im Empfangsraum werden angeregt
- 5) Eigenmoden der Geschossdecke werden angeregt
- 6) Eigenmoden der Estrichplatte werden angeregt

Der Punkt 1) erscheint nach [14] unwahrscheinlich, da das Dröhnen unabhängig vom Trittschalldämmstoff, also Mineralwolle oder Polystyrol, auftritt. Auch Punkt 2) ist nach Burkhart [14] als alleinige Ursache auszuschließen, da das Dröhnen auch nach Rückbildung des geschüsselten Estrichs nach wie vor vorhanden ist. Punkt 3) sieht Burkhart [14] als problematisch an, ohne dies näher zu detaillieren. Die Resonanzen und Eigenfrequenzen der Punkte 4) bis 6) führt Burkhart in einer Simulation zusammen. Abb. 4 zeigt das Simulationsergebnis mit den berechneten Resonanzen von verschiedenen Baustoffen, den Eigenfrequenzen eines Raumes sowie den Verlauf des dazugehörigen Norm-Trittschallpegels.

Als Maßnahmen zur Verringerung der tieffrequenten Resonanzen kommen nach Burkhart [14] in Betracht:

- 1) Verbreiterung der Resonanz, also Verschlechtern der Güte des Schwingsystems Estrich/Dämmschicht
- 2) Inhomogene Fußbodenaufbauten realisieren
- 3) Verschiebung der Resonanzfrequenz zu tieferen Frequenzen von $f_0 \leq 40$ Hz
- 4) Schallbrücken gezielt einbringen
- 5) Unsymmetrisches Auftrennen der Estrichplatten um gleichmäßige flächenhafte Anregung zu vermeiden und Eigenfrequenzen der Estrichplatte zu verschieben

Siebel [16] untersucht hauptsächlich die Hohllagen beim Estrich und kommt entgegen Burkhart [14] zu der Erkenntnis, dass eine nicht vollflächige Auflage der Estrichplatte auf den Dämmstoff erhöhte Dröhneffekte zur Folge hat. Demzufolge führt Siebel als Ursache für das Dröhnen auf:

- 1) Durch Ausbildung von Hohllagen gibt es keine vollflächige Auflage der Estrichplatte auf der Trittschalldämmschicht
- 2) Einbau dicker weicher Dämmschichten mit kleiner dynamischer Steifigkeit
- 3) Dünne massive Decken mit geringer Masse
- 4) Resonanzkopplung zwischen den Estrichkonstruktionen und den Raumresonanzen im Empfangsraum

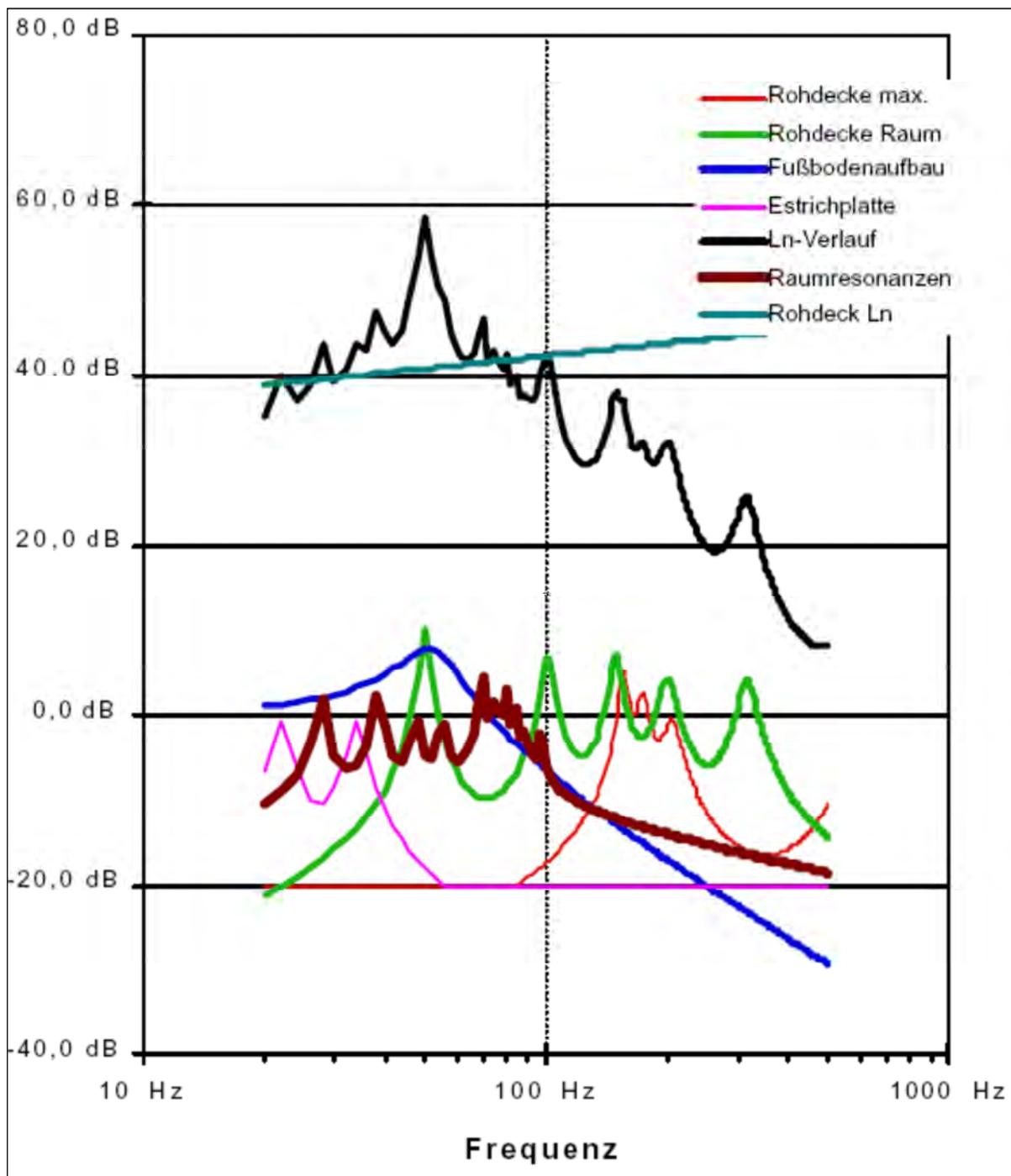


Abb. 5: Resonanzen der Baustoffe und Eigenfrequenzen eines Raumes sowie der dazugehörige Verlauf des Norm-Trittschallpegels [14]

Siebel leitet dies theoretisch in [16] mit der Verschiebung der Eigenfrequenz durch die nicht vollflächige Auflage her. Dadurch verändert sich die Einfederung der Trittschalldämmschicht. Zur Berechnung des Zusammenhanges zwischen statischen Einfederungsmaß Δ_{ys} [m] und der Resonanzfrequenz f_0 [Hz] gibt Siebel [16] folgende Gleichung an:

$$f_0 = \frac{0,5}{\sqrt{\Delta_{ys}}} \quad \text{in [Hz]} \quad (\text{Gl. 3})$$

Er kommt dann bei einer Estrichauflagefläche von 30 % und einer Polystyrol-Trittschalldämmung von 20 mm EPS-T zu einer Eigenfrequenz von etwa 35 Hz und schlussfolgert, dass um die 30 Hz eine Zone mit starker Dröhnung vorhanden ist.

Burkhart [15] gibt die Dröhnfrequenzen bei 60 Hz bis 80 Hz an und kommt mithilfe der Bewertung anhand der standardisierten Hörschwelle nach DIN 45680 [5] zu einer tieffrequenten Geräuschmission. Nicht mit Messungen belegt ist die Aussage von Siebel [16], dass Dröhnen im Bereich von 25 Hz bis 50 Hz vorhanden ist.

Als Sanierung schlägt Siebel [16] bei hohlliegenden Estrichen die nachträgliche Verfüllung des Hohlraumes vor. Hierfür eignen sich nach Siebel [16] Materialien auf Kunststoffbasis, wie PU-Schäume, Silikone, Acryle.

In einer Messkurve zeigt Siebel [16] den Erfolg seiner Maßnahme. Bei der 100-Hz-Terz erreicht er eine Minderung der Resonanzspitze bei 100 Hz von etwa 2 - 3 dB. Im Frequenzbereich unterhalb von 50 Hz werden bei [16] keine Ergebnisse präsentiert.

Goydke [17] stellte durch gehende Versuchspersonen auf verschiedenen Decken und Hörtests fest, dass der Bereich unterhalb von 100 Hz maßgeblich zum Höreindruck beiträgt. Weiter vermutet Goydke [17], dass der Bereich unter 50 Hz vernachlässigbar ist.

Insofern widersprechen Burkhart [14] und Goydke [17] der Erkenntnis von Siebel [16], dass das Dröhnen bei 25 Hz bis 50 Hz liegt. In den genannten Veröffentlichungen sind Messungen unterhalb von 50 Hz nicht dargestellt. Der nach DIN 45680 [5] definierte Hörschwellenpegel bei 30 Hz liegt bei einem Wert von 55,5 dB. Durch einen Geher oder das Norm-Hammerwerk müsste also dieser Wert im Empfangsraum vorliegen, damit ein Hörereignis ausgelöst wird. Allerdings ist das Norm-Hammerwerk, wie Scholl [18] ausführt, kein geeignetes Gerät. Dagegen wäre ein nach Scholl [19] modifiziertes Norm-Hammerwerk geeigneter für die Simulation von tieffrequenten Gehgeräuschen.

Hinsichtlich des Phänomens eines tieffrequenten „Dröhnens“ sind auch leichte Holzdecken für deren hohe Norm-Trittschallpegel im tieffrequenten Bereich bekannt. Diesbezüglich haben Schanda und Schramm in [21] die Absorption tieffrequenten Trittschalls durch in Holzbalkendecken integrierte Helmholtzresonatoren untersucht. In dem gleichnamigen Forschungsprojekt sollte u.a. die prinzipielle akustische Auswirkung eines integrierten Helmholtzabsorbers auf eine Senkung des Norm-Trittschallpegels und des Spektrum-Anpassungswertes geklärt werden. Die Untersuchungen erfolgten vorwiegend in der definierten Umgebung eines Schallprüfstandes.

Hinsichtlich der Verminderung der Schallübertragung im tieffrequenten Bereich wurden Resonatoren an den Luftraum im Gefach der Holzbalkendecke angekoppelt. Deren Absorptionswirkung wurde auf den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz vorgesehen. Damit konnte bei gut durchgeführten Aufbauten der Summenwert $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ aus Norm-Trittschallpegel und aus dem Spektrum-Anpassungswert um 3 dB verringert werden (siehe Abb. 6).

Der insbesondere durch Begehen von Decken verursachte hohe Trittschallpegel in o.g. Frequenzbereich konnte durch den Einbau der Resonatoren ebenfalls reduziert werden. Aus einer Messung beim Begehen der Decke mit Socken konnten in dem Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz durch die Helmholtzresonatoren im Mittel um 6 dB verringert werden, in einzelnen Terzbändern sind durchweg 10 dB erreichbar.

Die in [21] gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich der Verringerung tieffrequenter Trittschallübertragungen sind insbesondere für Holzbalkendecken anwendbar. Für die in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Massivdecken sind zwar die grundsätzlichen Erkenntnisse interessant, allerdings ist der Einsatz von Helmholtzresonatoren zur Verringerung des tieffrequenten Trittschalls nicht umsetzbar.

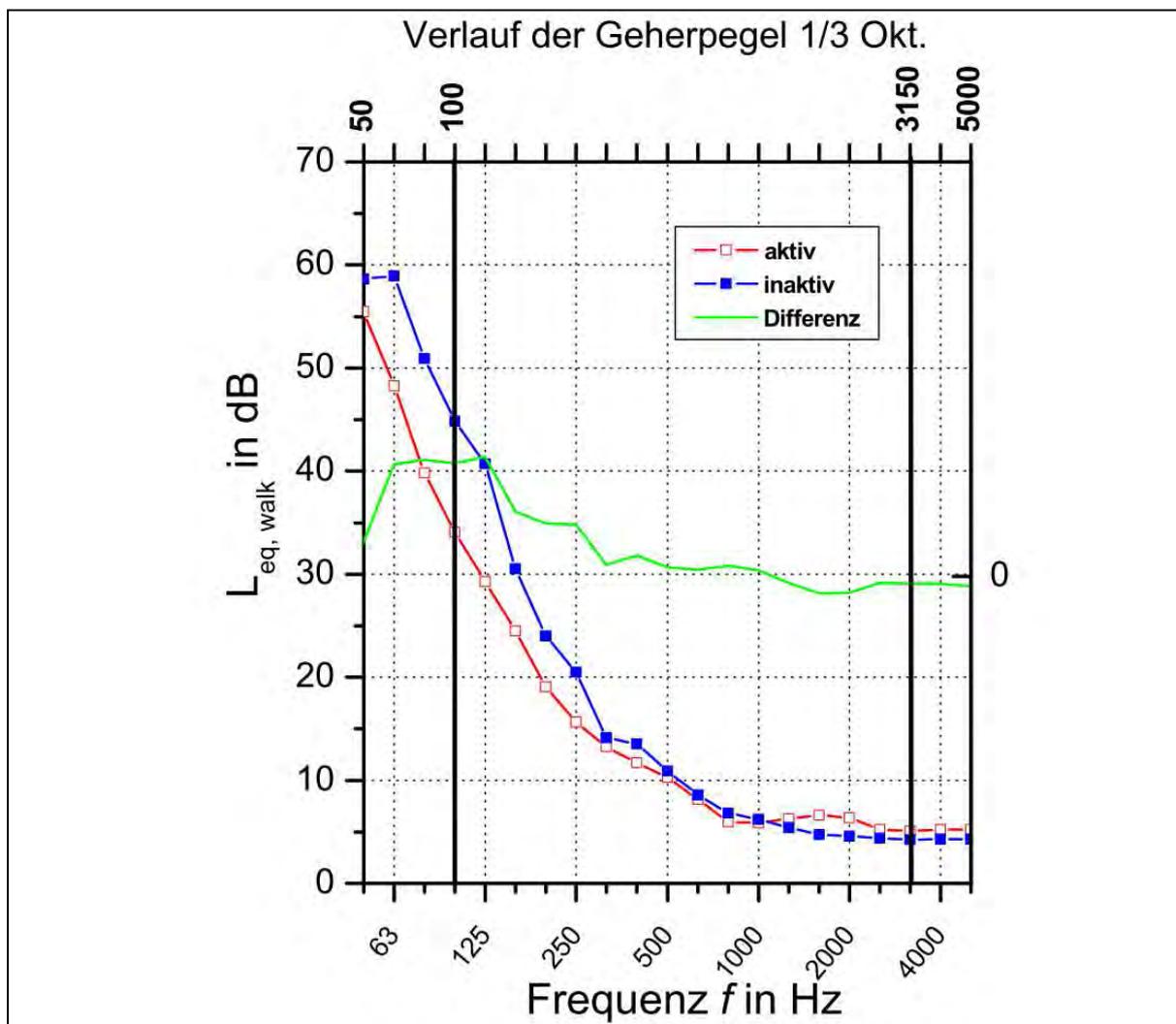


Abb. 6: Vergleich der Pegel beim Begehen einer Holzbalkendecke durch eine männliche Person (75 kg Körpergewicht) mit Socken auf einer „Acht“. Die Differenzkurve (grün, Skala rechts) zeigt eine Verbesserung von 10 dB in einigen Terzbändern (z.B. zwischen 63 Hz und 125 Hz). Der energetische Mittelwert aus den Geherpegeln in den Terzfrequenzen von 50 Hz bis 100 Hz als Referenzmaß für den Wirkungsbereich der Helmholtzresonatoren, zeigt eine Verbesserung von ca. $\Delta L_{eq,walk, Socken, 50-100} = 6$ dB (aus [21]).

4. Untersuchungen im Labor

Im Labor wurde eine Stahlbetondecke ohne und mit Estrich messtechnisch untersucht. Neben den klassischen bauakustischen Messungen zur Luft- und Trittschalldämmung wurden ergänzende Untersuchungen wie eine Modalanalyse, die Bestimmung von Transferfunktionen, Verlustfaktoren und Abstrahlgraden an der Decke jeweils ohne und mit Estrich durchgeführt. Eine Beschreibung der Bauteile sowie die Ergebnisse der Untersuchungen sind nachfolgend dargestellt.

4.1 Beschreibung des Estrichs

Die Labormessungen wurden im Zentrum für Bauphysik in Stuttgart Vaihingen im Deckenprüfstand 3 a/b durchgeführt. Die Raumabmessungen des Senderraumes 3b betragen $b = 4,42 \text{ m}$, $l = 4,76 \text{ m}$ und $h = 3,32 \text{ m}$ in der Höhe (ohne schwimmenden Estrich). Die Abmessung im Empfangsraum betragen: $b = 4,20 \text{ m}$, $l = 4,72 \text{ m}$ und $h = 2,64 \text{ m}$. Daraus ergibt sich ein Raumvolumen im Empfangsraum von $52,3 \text{ m}^3$ und eine Trennfläche (gemeinsame Deckenfläche) von $19,8 \text{ m}^2$.

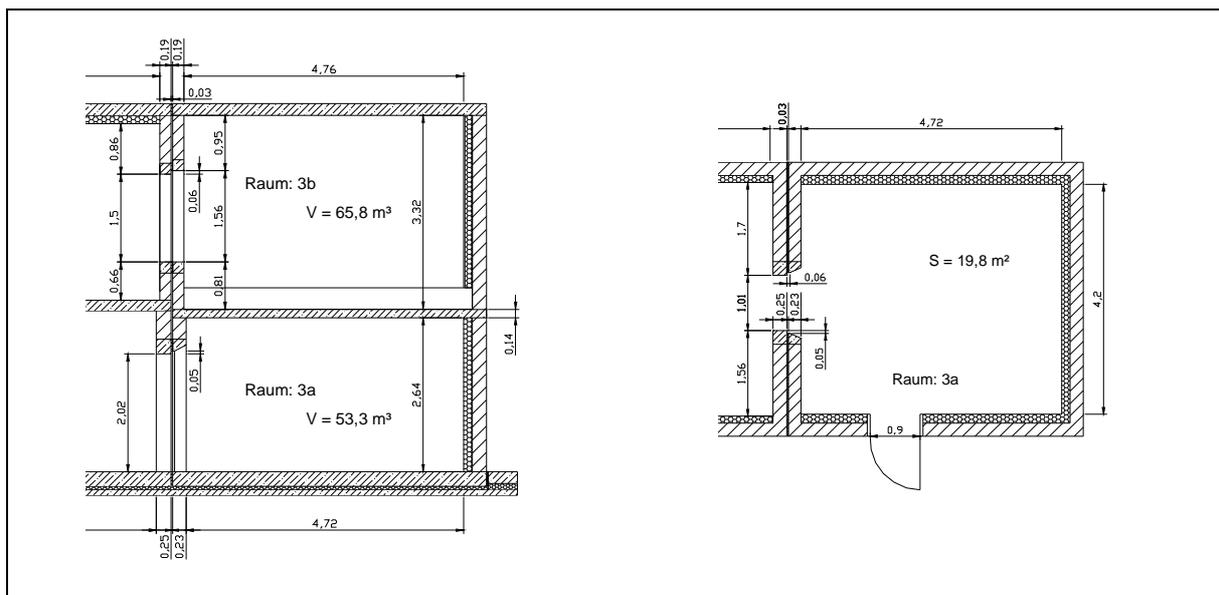


Abb. 7: Schnitt durch den Deckenprüfstand mit den Räumen 3 a unten und 3b oben (links) und Grundriss des Raumes 3a unten (rechts)

Die Rohdecke im Deckenprüfstand 3 a/b weist nach DIN EN ISO 10140-5 Anhang A eine Dicke von 14 cm auf. Sie ist gegenüber üblichen Geschosstrenndecken im Wohnungsbau deutlich dünner.

Der schwimmende Estrich wurde am 29.10.12 eingebaut. Als Wärmedämmung wurde eine 40 mm starke Hartschaumplatte aus expandiertem Polystyrol (EPS 040 DEO nach DIN 4108-10) ohne Schallschutzanforderung eingebaut. Die Trittschalldämmung aus 20-2 mm dickem elastifiziertem expandiertem Polystyrol (EPS T 3500 DES sm nach DIN 4108-10) wurde auf die Wärmedämmung aufgelegt. Zwischen Trittschalldämmung und Estrich wurde eine Trennlage aus PE-Folie eingebaut. Die

Randfuge wurde mit einem PE-Randstreifen 8/120 mm ausgeführt. Als Estrich wurde ein 45 mm dicker Zement-Estrich ZE 30 – S nach DIN 18560 verlegt.

Die Resonanzfrequenz des Systems wurde aus den Federsteifen s'_1 und s'_2 der verwendeten Wärme- und Trittschalldämmung ermittelt. Messungen ergaben eine Federsteife der Trittschalldämmung von $s'_1 = 23 \text{ MN/m}^3$ und der Wärmedämmung $s'_2 = 41 \text{ MN/m}^3$. Die flächenbezogene Masse des Estrichs beträgt $m'_{\text{Estrich}} = 90 \text{ kg/m}^2$. Die flächenbezogene Masse der Rohdecke liegt bei $m'_{\text{Rohdecke}} = 322 \text{ kg/m}^2$.

$$s'_{\text{ges}} = \frac{s'_1 * s'_2}{s'_1 + s'_2} = \frac{23 * 41}{23 + 41} = 15 [\text{MN} / \text{m}^3]$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s'_{\text{ges}} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{15 \left(\frac{1}{90} + \frac{1}{322} \right)} = 73,5 [\text{Hz}]$$

Die berechnete Resonanzfrequenz der Decke mit schwimmendem Estrich liegt bei $f_R = 73,5 \text{ Hz}$.

4.2 Messtechnische Untersuchungen

4.2.1 Modalanalyse

Zur Darstellung der Schwingungsformen wird die Transferfunktion zwischen der Beschleunigung an einem Referenzpunkt und der eingeleiteten Kraft an den Rasterpunkten ermittelt. Das Raster auf der Unterseite der Massivdecke besteht aus $18 \times 20 = 360$ Punkten. Bei der Messung mit schwimmendem Estrich kommen nochmals $20 \times 21 = 420$ Punkte auf der Oberseite des Estrichs hinzu. Auf dem Referenzpunkt wird ein Beschleunigungsaufnehmer befestigt und mit einem Impulshammer wird auf jedem Rasterpunkt mit einem kurzen Kraftimpuls das Bauteil zu Schwingungen angeregt. Aus den gemessenen Zeitsignalen von Kraft und Beschleunigung wurde mittels FFT-Analyse für jedes Punktepaar die Übertragungsfunktion ermittelt. Die Übertragungsfunktionen wurden mittels PC-Programm ME'scopeVES ausgewertet. Für jede Frequenz innerhalb des Messbereichs kann die zugehörige Schwingungsform in einer Animation dargestellt werden. In der nachfolgenden Abb. 8 sind die erste und eine weitere Schwingungsform der Massivdecke (ohne Estrich) dargestellt.

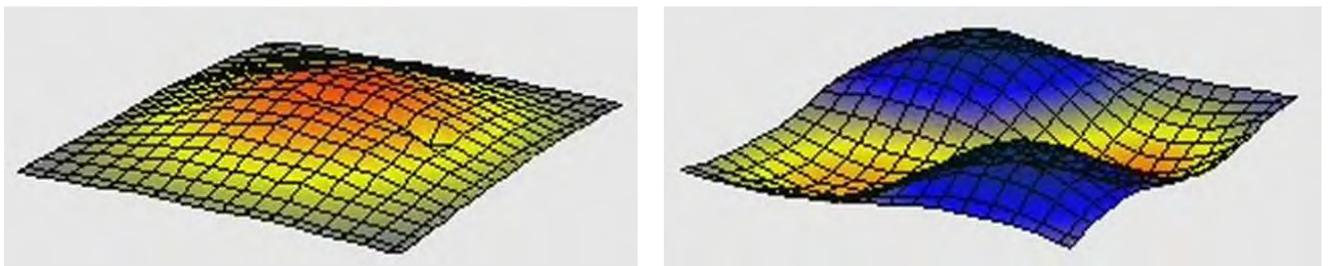


Abb. 8: Schwingungsbilder der ersten Rohdeckeneigenmode bei 24 Hz (links) und einer weiteren höheren Mode bei 92 Hz (rechts)

Die in Abb. 8 gezeigten Schwingungsbilder sind typisch für eine Massivdecke, wobei aufgrund der geringen Deckenstärke sich die erste Eigenmode bei einer für bauübliche Decken sehr niedrigen Frequenz ausbildet.

Ca. 4 Wochen nach dem Einbau des schw. Estrichs wurde eine weitere Modalanalyse durchgeführt. In den nachfolgenden Bildern sind die Eigenmoden der beiden über die Dämmschicht gekoppelten Bauteile Massivdecke (unten) und Estrichplatte (oben) dargestellt. Bei den nachfolgend dargestellten Auswertungen wurde ein Referenzpunkt auf der Unterseite der Massivdecke gewählt. Deshalb entspricht die nachfolgend dargestellte Auslenkung der beiden Platten einer Anregung der Massivdecke am Referenzpunkt.

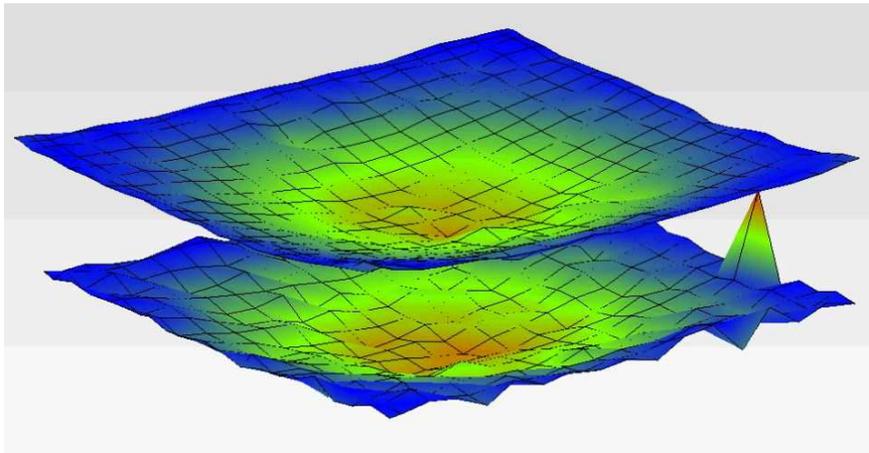


Abb. 9: Schwingungsbild der Eigenmode der gekoppelten Deckenkonstruktion bei 22 Hz

Durch den Einbau des schwimmenden Estrichs verschiebt sich, wie in Abb. 9 zu sehen die erste Eigenmode um ca. 2 Hz zu tieferen Frequenzen hin. Dieses Verschieben zu tieferen Frequenzen ist auf eine höher Masse der Deckenkonstruktion durch den schw. Estrich zurückzuführen. Die Dämmschicht trennt Massivdecke und Estrichplatte, wodurch sich ein geringfügiger Anstieg der Biegesteifigkeit der Gesamtkonstruktion mit einer einhergehenden Erhöhung der Eigenfrequenzen ergibt. Dieses Erhöhen wird jedoch durch die Erhöhung der Masse mit der damit verbundenen Verringerung der Resonanzfrequenz überkompensiert.

Im Bereich deutlich unterhalb der Resonanzfrequenz sind die beiden Platten durch die elastische Zwischenschicht noch starr miteinander gekoppelt und schwingen wie in Abb. 9 zu sehen gleichphasig. Erfolgt die Anregung im Bereich der Resonanzfrequenz so löst sich diese „starre“ Kopplung und die Platten versuchen gegenphasig zu schwingen. Aufgrund der Plattenstruktur und den damit verbundenen Plattenmoden der „bedingt gekoppelten“ Platten ist dies allerdings immer nur in bestimmten Bereichen der Platten möglich. In Abb. 10 ist solch eine Schwingung dargestellt, wobei in diesem Frequenzbereich etwas unter der Resonanzfrequenz einerseits das gegenphasige Schwingen noch nicht stark ausgeprägt ist, andererseits die Estrichplatte gegenüber der Massivdecke deutlich größere Amplituden aufweist.

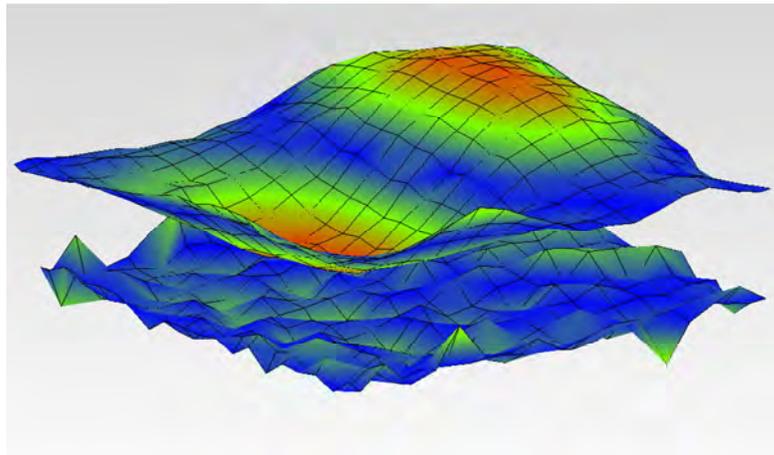


Abb. 10: Schwingungsbild der Eigenmode der gekoppelten Deckenkonstruktion bei 51 Hz

Im Bereich der berechneten Resonanzfrequenz tauchen dann mehrere Eigenmoden mit deutlich ausgeprägtem gegenphasigem Schwingungsverhalten auf. Eine dieser Eigenmoden bei welcher die versetzte Phasenlage besonders deutlich zu erkennen ist, ist in nachfolgender Abb. 11 dargestellt. Bei dieser Eigenmode des weiterhin stark gekoppelten Systems aus Massivdecke – Trittschalldämmschicht – Estrichplatte schwingen nur die Mittenbereiche von Estrichplatte und Massivdecke gegenphasig mit einer relativ großen Auslenkung.

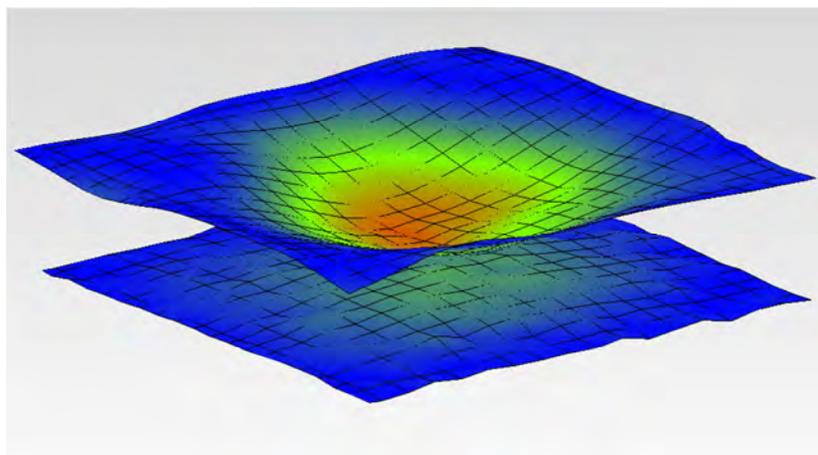


Abb. 11: Schwingungsbild der Eigenmode der gekoppelten Deckenkonstruktion bei 70 Hz

Mit steigender Frequenz werden oberhalb der berechneten Resonanzfrequenz die Amplituden der Estrichplatte gegenüber der Massivdecke wieder geringer. In Abb. 12 ist eine für diesen Frequenzbereich typische Eigenmode dargestellt. Die Estrichplatte wird oberhalb der Resonanzfrequenz immer besser durch die elastische Zwischenschicht entkoppelt, so dass die Amplituden auf der Estrichplatte gegenüber der angeregten Massivdeckenplatte immer geringer werden. Die Entkopplung des schwimmenden Estrichs und damit die trittschalldämmende Wirkung wird damit in Abb. 12 sichtbar.

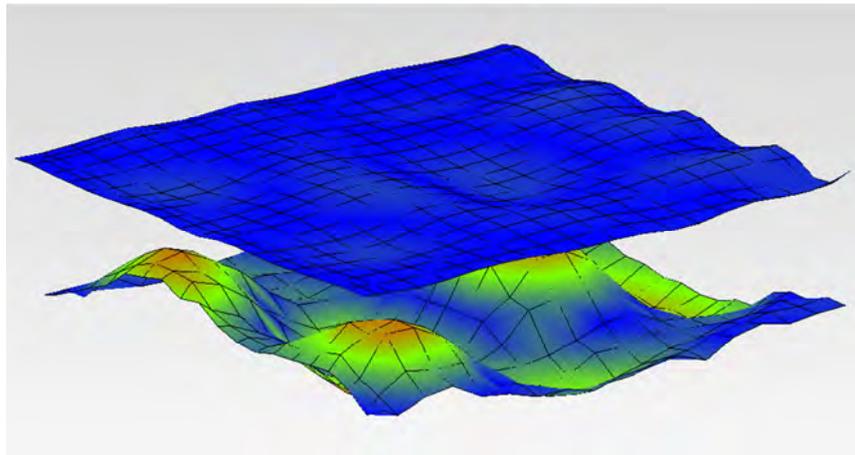


Abb. 12: Schwingungsbild der Eigenmode der gekoppelten Deckenkonstruktion bei 186 Hz

Bei höheren Frequenzen sind nur noch Amplituden auf der angeregten Massivdecke sichtbar, während die Amplituden auf der Estrichplatte verschwindend klein werden.

4.2.2 Raumübertragungsfunktionen

Untersuchungen zum Schallfeld im Raum wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht durchgeführt. Messungen hierzu wurden jedoch im Rahmen einer bachelorarbeit im Jahr 2011 durchgeführt (BA Burgenmeister [22]). Im Rahmen dieser Arbeit wurde insbesondere der Einfluss der Raummoden auf die tieffrequente Trittschallübertragung bzw. die Kopplung zwischen Struktur- und Raummoden untersucht.

Diese Untersuchungen fanden ebenfalls im bereits beschriebenen Deckenprüfstand statt, allerdings lag die Resonanzfrequenz des hier eingebaute Estrich bei $f_R = 96$ Hz. In nachfolgender Abb. 13 ist die Übertragungsfunktion zwischen dem im Empfangsraum ermittelten Schalldruck p [Pa] zu der in die Massivdecke bzw. in die Estrichplatte eingeleiteten Kraft F [N] im Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 200 Hz dargestellt. Zusätzlich sind die messtechnisch ermittelten Struktur- und Raummoden eingezeichnet.

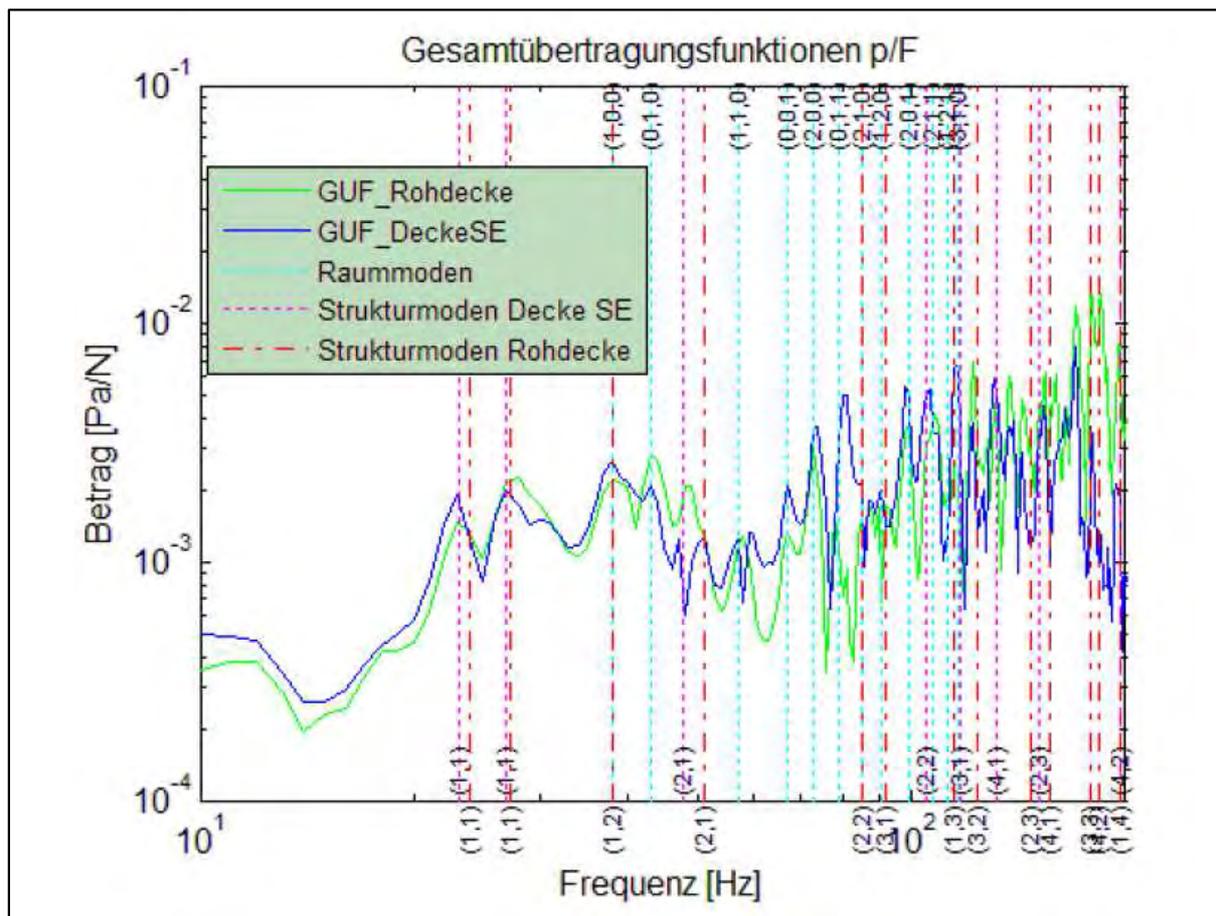


Abb. 13: Übertragungsfunktion Schalldruck zur eingeleiteten Kraft für eine Deckenkonstruktion mit und ohne schw. Estrich im Frequenzbereich 10 Hz – 200 Hz. Zusätzlich sind die messtechnisch ermittelten Raummoden dargestellt (Quelle: BA Burgenmeister [22])

Der deutliche Einfluss sowohl der Raum- als auch der Strukturmoden auf die Übertragungssituation ist sowohl mit als auch ohne schwimmenden Estrich klar erkennbar. Auch hier zeigen sich die im vorangegangenen Abschnitt bereits beschriebenen typischen Frequenzbereiche: unterhalb, bei und oberhalb der Resonanzfrequenz. Während sich deutlich unterhalb der Resonanzfrequenz (bis 50 Hz) durch den Estrich nahezu keine Änderung ergibt, liegt die Übertragungsfunktion im Frequenzbereich der Resonanz (50 Hz- 120 Hz) mit schw. Estrich (blaue Kurve in Abb. 13) deutlich über der ohne Estrich (grüne Kurve). Deutlich oberhalb der berechneten Resonanzfrequenz (ab ca. 150 Hz) liegt dann wiederum die grüne Kurve über der blauen Kurve und die Verbesserung der Trittschalldämmung durch den schwimmenden Estrich ist klar erkennbar.

Die im Empfangsraum ermittelten Schalldruckpegel bei Trittschallanregung der Deckenkonstruktion hängen stark von Raummoden ab. Eine verstärkte Anregung einzelner Raummoden durch die Strukturmoden der Massivdecke bzw. der Massivdecke mit schwimmendem Estrich konnte bei den Untersuchungen jedoch nicht festgestellt werden. Auch bei dieser Estrichkonstruktion ergibt sich ein breiter Frequenzbereich um die berechnete Resonanzfrequenz des Estrichs, in welchem durch Struktur und Raummoden eine erhöhte Trittschallübertragung stattfindet.

4.2.3 Luft- und Trittschalldämmung

Die klassischen bauakustischen Messungen zur Luft- und Trittschalldämmung ergeben keine Überraschungen. Abweichend von dem in DIN EN ISO 10140 vorgegebenen Messbereich wurde allerdings der Messbereich zu tiefen Frequenzen bis 20 Hz ausgeweitet.

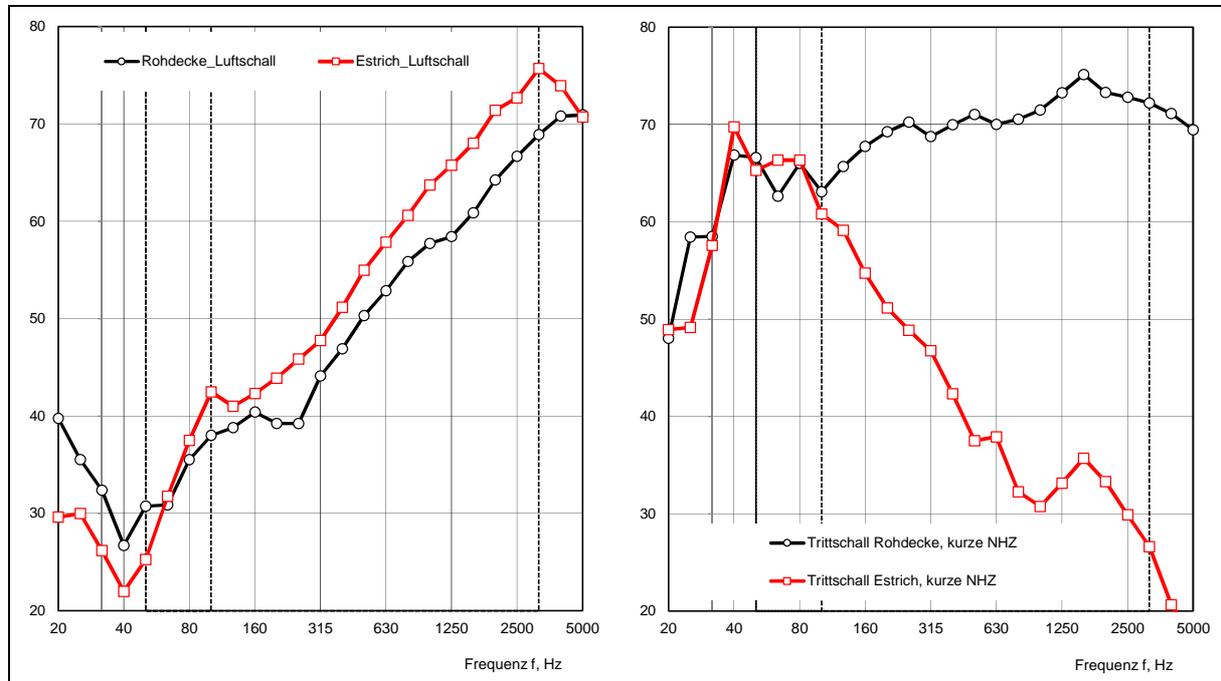


Abb. 14: Schalldämm-Maß R' (linkes Diagramm) und Normtrittschallpegel L'_n (rechtes Diagramm) der untersuchten Prüfstanddecke ohne (schwarz) und mit (rot) schwimmendem Estrich

Die Verbesserung der Luftschalldämmung zwischen den beiden Räumen (Differenz zwischen roter und schwarzer Kurve in Abb. 14 links) wird durch die flankierende Übertragung über eine unverkleidete Massivflanke (siehe Zeichnung in Abb. 7) begrenzt. Die Trittschallverbesserung (Differenz zwischen schwarzer und roter Kurve in Abb. 14 rechts) entspricht in etwa dem rechnerisch zu erwartenden Wert. Im Frequenzbereich um $f = 63$ Hz (etwa Resonanzfrequenz) ergibt sich eine geringfügige Erhöhung des Trittschallpegels, darüber wird der Trittschallpegel durch den schwimmenden Estrich deutlich vermindert.

Die Trittschalldämmung der Deckenkonstruktion mit schwimmendem Estrich wurde 2 Tage nach dem Einbau, nach einer in Prüfständen üblichen Trocknungszeit von ca. 2 Wochen sowie nach ca. 2 Monaten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Abb. 15 dargestellt.

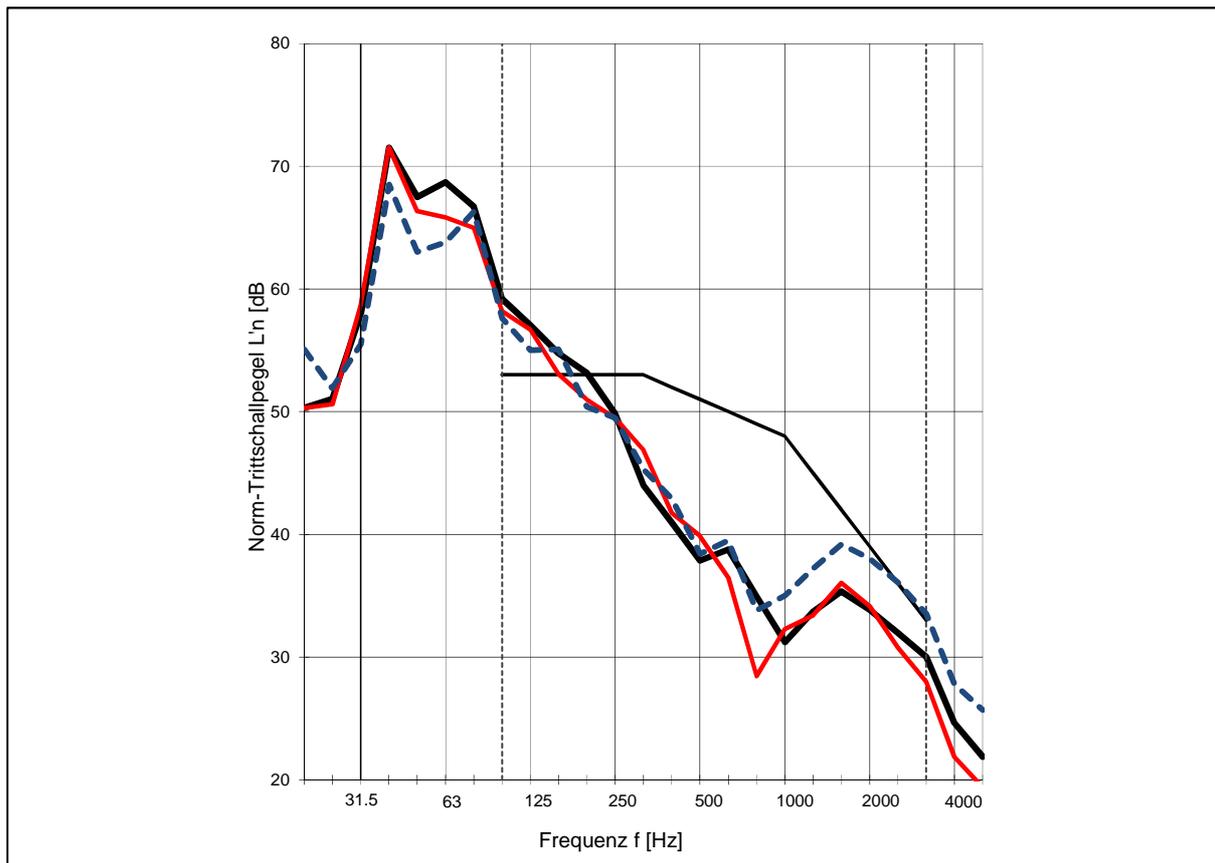


Abb. 15: Normtrittschallpegel L'_n der untersuchten Prüfstanddecke mit schwimmendem Estrich ermittelt in unterschiedlichen Zeiträumen nach dem Einbau: schwarz: 2 Tage, rot: 2 Wochen; blau gestrichelt: 2 Monate

Die Trittschalldämmung der Konstruktion ändert sich im untersuchten Zeitraum nur geringfügig. Die Änderungen unter 80 Hz ergeben sich vermutlich aufgrund einer hohen Messunsicherheit bei den tiefen Frequenzen. Um 3 – 5 dB höhere Trittschallpegel werden im Frequenzbereich ab 1 kHz nach einer längeren Standzeit gemessen. Die Ursachen hierfür konnten nicht abschließend geklärt werden, allerdings zeigen alle 3 Messkurven einen für Randschallbrücken typischen Frequenzverlauf. In einem breiten mittleren Frequenzbereich zeigt sich kein signifikanter Einfluss der Trocknungszeit auf den Normtrittschallpegel.

Von Gutachtern wird manchmal ein Einfluss der Größe der Estrichplatte auf den Trittschallpegel angenommen. Um hierzu Aussagen zu gewinnen wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen vor dem Ausbau der Estrichplatte diese durch Trennschnitte verkleinert, so dass aus der ursprünglich ca. 4 m x 5 m = 20 m² großen Platte jeweils eine ca. 2.5 m x 4 m = 10 m², eine 2.5 m x 2 m = 5 m², eine 1.25 m x 2 m = 2.5 m² und zwei 1.25 m x 1 m = 1.25 m² große Rechtecke entstanden sind. Auf diesen Rechtecken wurde dann das Hammerwerk aufgesetzt und der Trittschallpegel im darunterliegenden Raum bestimmt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Abb. 16 dargestellt.

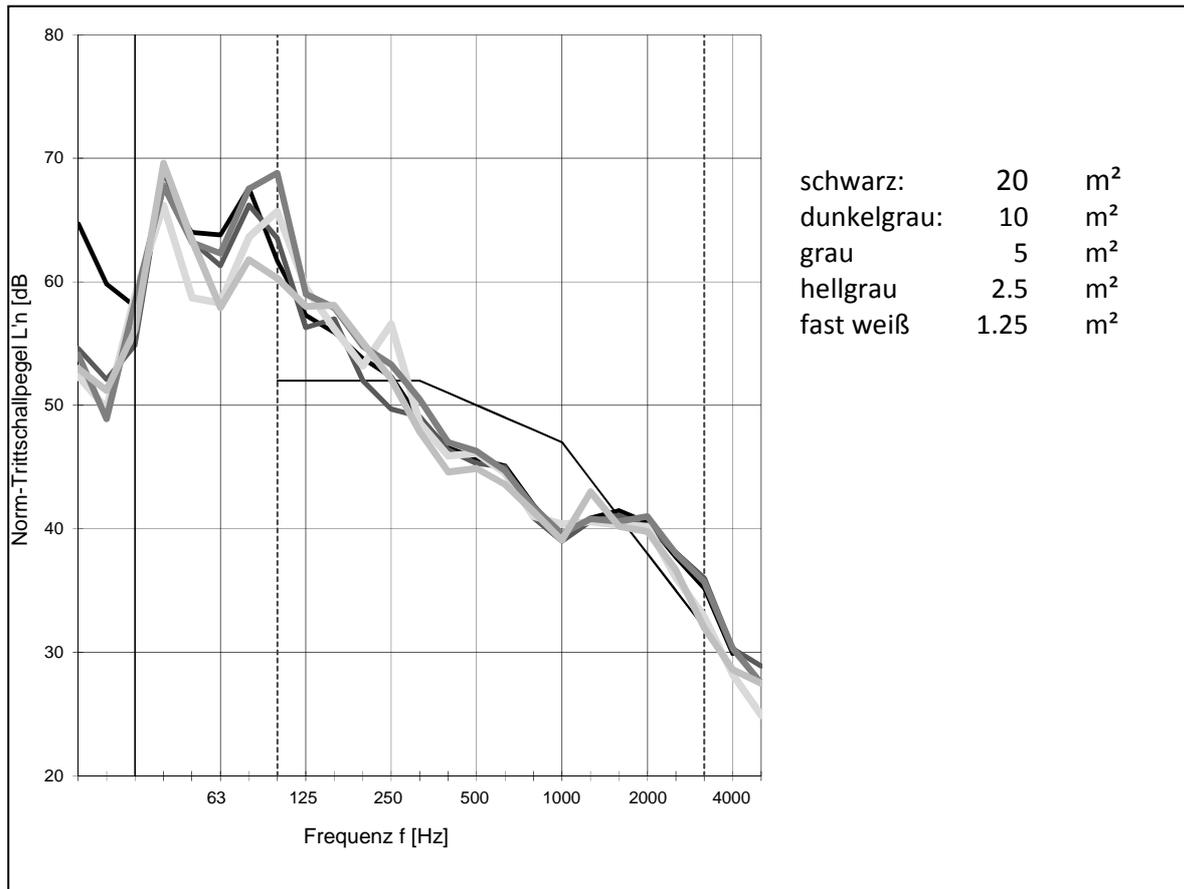


Abb. 16: Normtrittschallpegel L'_n der untersuchten Prüfstanddecke mit schwimmendem Estrich ermittelt für unterschiedliche Estrichflächen

Im gesamten Frequenzbereich ist kein systematischer Zusammenhang zwischen der Größe der untersuchten Estrichplatte und dem gemessenen Normtrittschallpegel festzustellen. Ein Durchtrennen der Estrichplatte bietet demnach kein Potential zur Verbesserung des Normtrittschallpegels bei Beschwerden über zu hohe Trittschallpegel.

4.2.4 Schnellepegeldifferenz

Die Trittschallverbesserung wird normgerecht bei Anregung mit dem Normhammerwerk aus der Differenz der Messungen ohne und mit Deckenauflage (schw. Estrich) ermittelt. Alternativ hierzu kann aber auch die Schnellepegeldifferenz zwischen der mittels Körperschallsender angeregten Rohdecke und dem darüber angeordneten schwimmenden Estrich ermittelt werden. Diese Ergebnisse sind in nachfolgender Abb. 17 dargestellt.

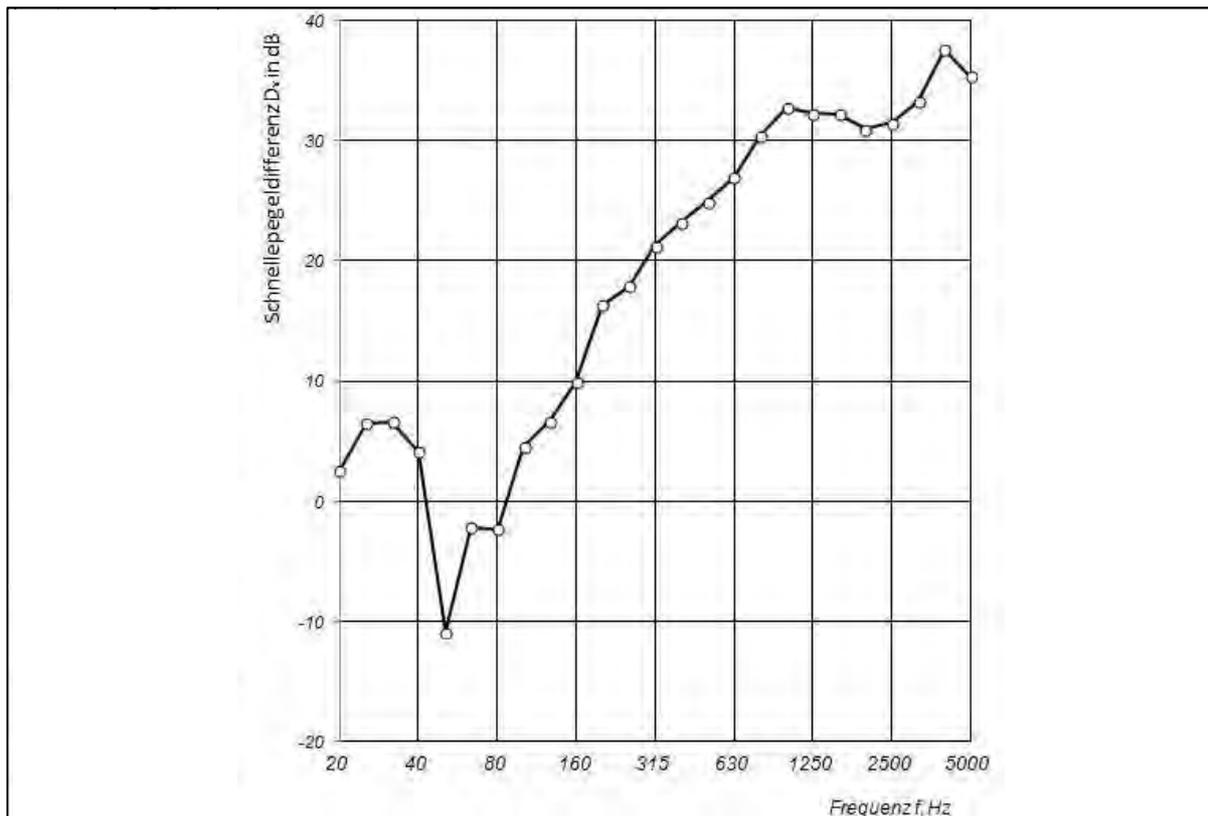


Abb. 17: Schnellepegeldifferenz D_v zwischen der mittels Körperschallsender angeregten Massivdecke und der darüber angeordneten Estrichplatte

Aus der gemessenen Schnellepegeldifferenz erkennt man sehr gut die Verminderung der Dämmung bei der Resonanzfrequenz sowie die Zunahme der Verbesserung durch den schwimmenden Estrich mit der Frequenz. Auch hier ergibt sich oberhalb von 630 Hz ein Plateau bei welchem die Pegeldifferenz nicht weiter ansteigt.

4.2.5 Verlustfaktor

Der Verlustfaktor von Massivbauteilen kann deren Schalldämm-Maß erheblich beeinflussen. Inwieweit dies für mehrschalige Massivkonstruktionen gilt, ist bislang noch nicht abschließend geklärt. In nachfolgender Abb. 18 ist der Verlustfaktor der Massivdecke sowie der Verlustfaktor der Estrichplatte (ohne Schallbrücke) dem mittleren Bauverlustfaktor $\eta_{\text{Bau,ref}}$ gegenübergestellt. Der mittlere Bauverlustfaktor $\eta_{\text{Bau,ref}}$ ist ein durch Messungen an massiven Bauteile im Geschosswohnungsbau ermittelter Wert. Während der Verlustfaktor der Massivdecke im gesamten Frequenzbereich etwas unter dem mittleren Bauverlustfaktor liegt, ergibt sich für den Verlustfaktor des schwimmenden Estrichs ein Maximum mit einer deutlichen Überschreitung dieses Referenzwertes im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 125 Hz. Dies ist der Frequenzbereich oberhalb der Resonanzfrequenz des schwimmenden Estrichs, für den sich eine große Relativbewegung zwischen Massivdecke und Estrich ergibt. Oberhalb von 500 Hz bestimmen aufgrund der Entkopplung die internen Verluste und die Abstrahlung den Verlustfaktor der Estrichplatte.

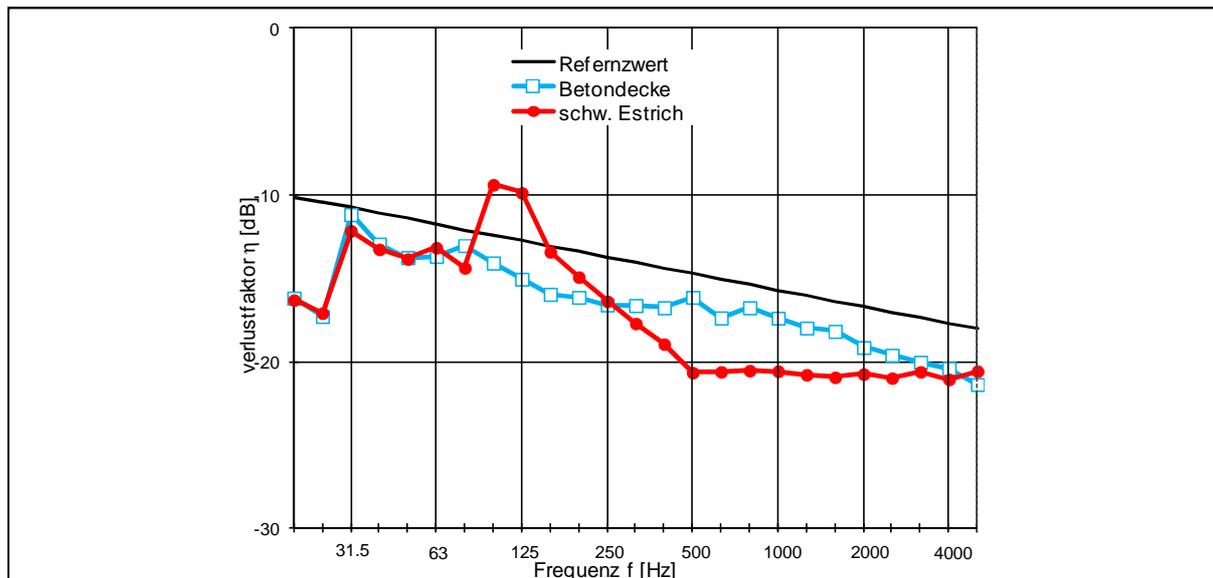


Abb. 18: Verlustfaktor η der Estrichplatte und der Massivdecke im Vergleich zu dem für massive Bauteile üblicherweise zu erwartende Wert $B_{\text{au,ref}}$

Weiterhin wurden Untersuchungen zu einer erhöhten Bedämpfung der Estrichplatte durchgeführt. Hierzu wurde eine dauerplastische Masse zwischen Estrichplatte und aufgehenden Wänden eingefügt. Durch die plastische Masse sollten die Schwingungen der Estrichplatte an ihren freien Rändern bedämpft werden. Messungen zeigten allerdings nur im Frequenzbereich oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz ($f > 500$ Hz) eine Erhöhung des Verlustfaktors um den Faktor 2. Bei den tiefen Frequenzen konnte keine nennenswerte Veränderung festgestellt werden. Mithilfe einer Messung konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von Schwingungstilgern zwar einzelne Moden bedämpft werden können, eine signifikante Erhöhung des Verlustfaktor bzw. der Trittschalldämmung konnte allerdings in den Terzbändern nicht festgestellt werden.

4.2.6 Abstrahlgrad

Durch die Messung des mittleren Schnellepegels auf der Estrichplatte und gleichzeitige Bestimmung des abgestrahlten Schalleistungspegels der Platte (aus Schalldruckpegel und Nachhallzeit) kann der Abstrahlgrad σ oder das Abstrahlmaß $10 \log \sigma$ bestimmt werden. In nachfolgender Abbildung ist das ermittelte Abstrahlmaß der Estrichplatte dargestellt. Deutlich ist die erhöhte Abstrahlung im Bereich der Koinzidenzgrenzfrequenz des Estrichs ($f_c \approx 500$ Hz) zu erkennen. Unterhalb dieser Frequenz vermindert sich die Abstrahlung deutlich, um bei 100 Hz ein lokales Maximum zu erreichen. In diesem Frequenzbereich werden der Estrichplatte die Schwingungen der Massivdecke aufgezwungen. Die erhöhte Schallabstrahlung wird dann zu tieferen Frequenzen wiederum durch die Koinzidenzgrenzfrequenz der Massivdecke ($f_c \approx 125$ Hz) vermindert.

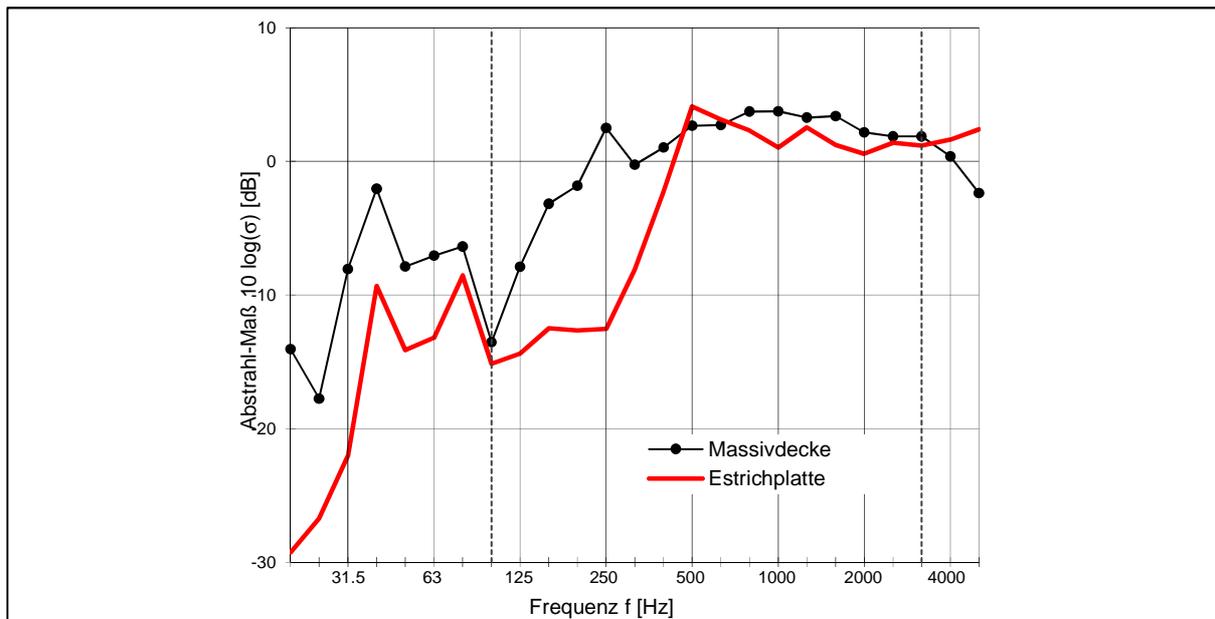


Abb. 19: Abstrahlmaß $10 \log \sigma$ der Estrichplatte und der Massivdecke

4.2.7 Ermittlung von Hörbeispielen

Zu einer psychoakustischen Beurteilung des Trittschallschutzes wurden im Prüfstand mittels eines Kunstkopfes Trittschallgeräusche gehörrichtig aufgenommen. Diese Aufnahmen umfassten sowohl Messungen ohne als auch Messungen mit schwimmendem Estrich, Messungen mit bauüblichen Nachhallzeiten ($T = 0.5 \text{ s}$) im Empfangsraum, aber auch mit deutlich längeren Nachhallzeiten ($T = 1 \text{ s} - 2 \text{ s}$). Als Anregung wurden neben dem Normhammerwerk und dem japanischen Gummiball auch übliche Wohngeräusche wie das Begehen ohne und mit weichen und harten Schuhe, das Fallenlassen eines Schlüssels oder Stühle Rücken verwendet.

In nachfolgender Abbildung 20 sind die A-bewerteten Trittschallpegel bei unterschiedlicher Anregung dargestellt. Die Anregung mit dem Gummiball entspricht in etwa der eines hüpfenden Kindes und erzeugt die höchsten Pegel mit einem Maximum im Frequenzbereich von 40 Hz bis 160 Hz. Das Rücken eines Stuhles (Ziehen des Stuhles mit ca. 0.5 m/s über den Estrich) erzeugt ebenfalls hohe Pegel wobei hier das Maximum im Frequenzbereich von 50 Hz bis 315 Hz liegt. Das Fallenlassen eines Schlüsselbundes erzeugt ein relativ breitbandiges Geräusch während das Begehen insbesondere mit harten Sohlen wieder ein das Maximum im Frequenzbereich von 80 Hz bis 315 Hz hat.

Die aufgezeichneten Trittschallgeräusche weisen im Wesentlichen im Frequenzbereich zwischen 63 Hz und 315 Hz ein Maximum auf. Diese Geräusche liegen über dem im Wohnungsbau üblichen Grundgeräuschpegeln und wären demnach im Empfangsraum deutlich wahrzunehmen.

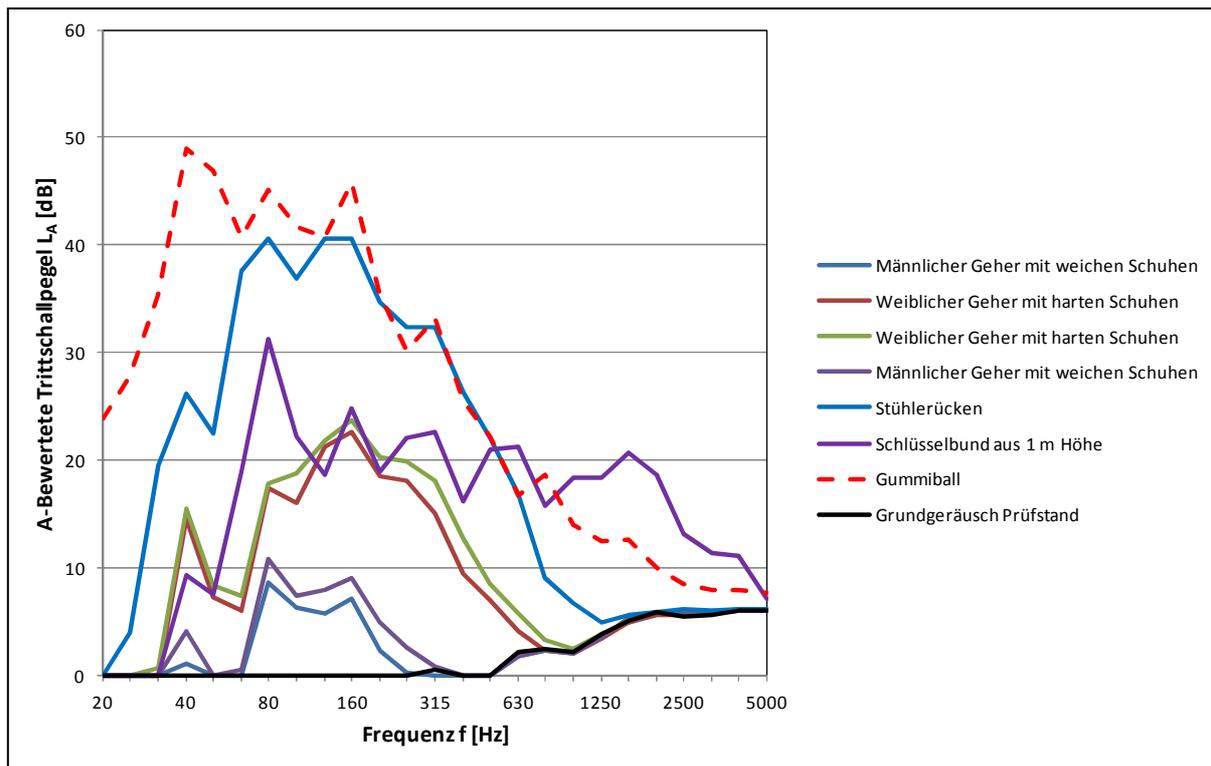


Abb. 20: A-bewertete Trittschallpegel bei unterschiedlicher Anregung der Estrichplatte

5. Untersuchungen am Bau

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden von der HFT Stuttgart an zwei Baustellen messtechnische Untersuchungen durchgeführt. Hierbei konnten wichtige Erkenntnisse bezüglich des am Bau zu erwartenden Schallschutzes gewonnen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Allerdings konnten keine Bewohner bezüglich ihrer subjektiven Eindrucks befragt werden. Um die Belästigung durch tieffrequente Trittschallgeräusche in bestehenden Wohngebäuden zu untersuchen wurden zusätzlich zu den im Forschungsantrag beschriebene Untersuchungen im Rahmen einer an der HFT Stuttgart durchgeführten Bachelorarbeit durch Christian Rittig [25] noch eine Umfrage unter beratenden Bauphysikbüros durchgeführt. Hierbei sollten Messungen in neu erstellten Mehrfamilienhäusern dem Verfasser mitgeteilt werden welche einerseits auf Veranlassung der Bewohner durchgeführt wurden andererseits Messungen welche im Rahmen einer Bauabnahme bzw. einer Güteprüfung vor dem Einzug der Bewohner durchgeführt wurden. Während die erste Gruppe als repräsentativ für einen unzureichenden baulichen Trittschallschutz steht, kann die zweite Gruppe als repräsentativ für einen im Mittel mit den heutigen Bauweisen erreichte Trittschalldämmung gesehen werden. Die Ergebnisse dieser Befragung sind im zweiten Teil dieses Abschnittes dargestellt.

5.1 Messtechnische Untersuchungen

An folgenden beiden Bauvorhaben wurden Messungen durchgeführt:

1. Neubau Pflegekompetenzzentrum Ringstraße, 99848 Wutha-Farnroda

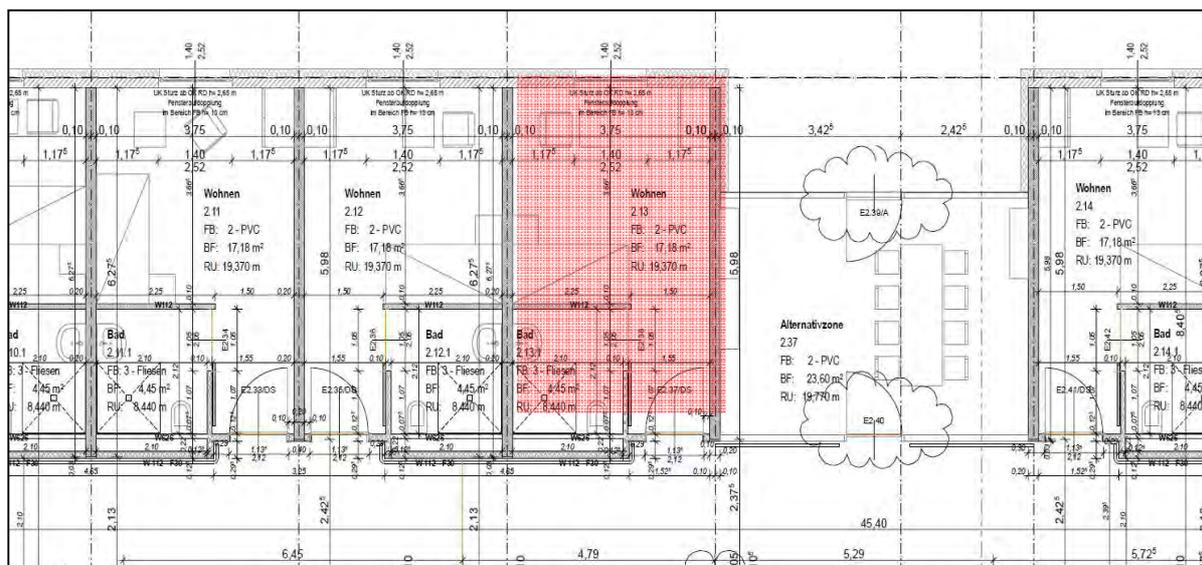


Abb. 21: Grundriss des 2. OG des Pflegezentrums. Der Empfangsraum ist rot markiert.

Die Wohnungstrenndecke hatte folgenden Aufbau:

50	mm	Zementestrich auf einer Trennlage
20	mm	Trittschalldämmung PST
80	mm	Ausgleichsschicht PS
200	mm	Stahlbetondecke

Die flankierenden Trenn- und Außenwände sind aus massivem Mauerwerk, die Innenwände sind Gipskartonständerwände.

2. Wohnbebauung Karlsruhe Neureut-Kirchfels Nord Cluster 2-4. BA Geschosswohnungsbau + Stadthäuser

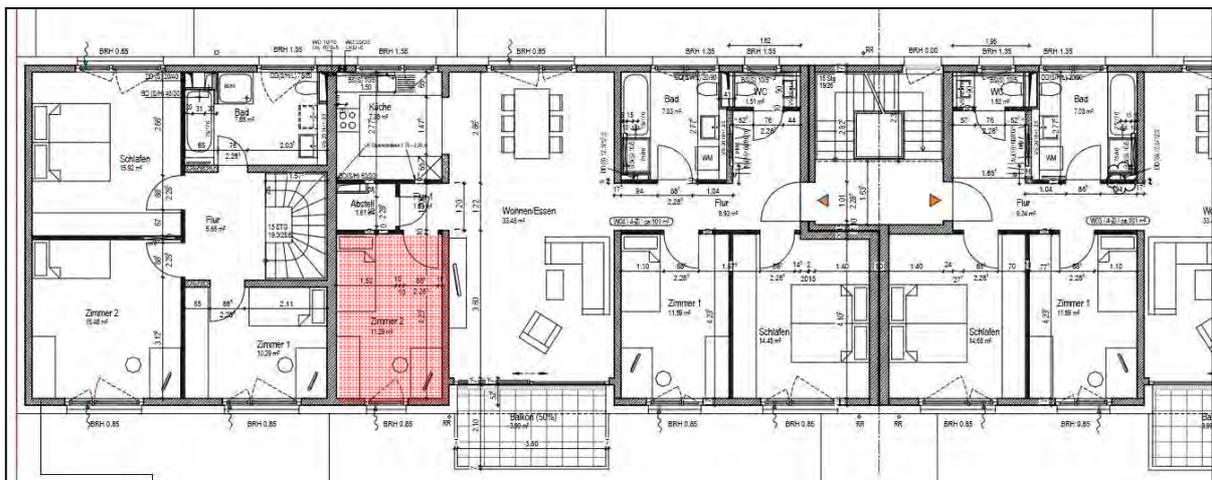


Abb. 22: Grundriss des 1. OG der Wohnbebauung. Der Senderraum ist rot markiert.

Die Wohnungstrenndecke hatte folgenden Aufbau:

80	mm	Zementestrich auf einer Trennlage
20	mm	Trittschalldämmung PST
40	mm	Ausgleichsschicht PS
200	mm	Stahlbetondecke

Die flankierenden Trenn-, Innen- und Außenwände sind aus massivem Mauerwerk.

5.1.1 Ergebnisse Luft- und Trittschalldämmung

Folgende Werte des bewerteten Bau-Schalldämm-Maßes R'_w wurden zwischen den Wohnungen ermittelt (siehe Tabelle 4). Die Luftschalldämmung der Wohnungstrenndecken ist in beiden Gebäuden ausgezeichnet und übertrifft die Mindestanforderungen der DIN 4109 [8] weit.

Folgende Werte des bewerteten Normtrittschallpegels $L'_{n,w}$ wurden zwischen den Wohnungen ermittelt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 4

Messwerte der ermittelten Luftschalldämmung der Trenndecken

Nr.	Senderraum	Empfangsraum	Messwert $R'_{w}(C; C_{tr})$
1	Farnroda 3.OG, Whg. 3.13,	2.OG, Whg. 2.13	61(-1;-4) dB
2	Karlsruhe 1.OG, Whg. Mitte li, Zimmer 2	EG Whg. Mitte li, Zimmer 2	61(-2;-7) dB

Tabelle 5

Messwerte der ermittelten Luftschalldämmung der Trenndecken

Nr.	Senderraum	Empfangsraum	Messwert $L'_{n,w}(C_i)$	Messwert $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$
1	Farnroda 3.OG, Whg. 3.13,	2.OG, Whg. 2.13,	47(-3) dB	50 dB
2	Karlsruhe 1.OG, Whg. Mitte li, Zimmer 2	EG Whg. Mitte li, Zimmer 2	39(0) dB	50 dB

Der Trittschallschutz ist ebenfalls als gut zu bezeichnen und übertrifft die Mindestanforderungen der DIN 4109 [8]. Obwohl der bewertete Normtrittschallpegel bei den beiden Bauvorhaben einen Unterschied von 8 dB aufweist, ergibt sich unter Berücksichtigung der gemessenen Trittschallpegel bei tiefen Frequenzen in beiden Fällen ein $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} = 50$ dB.

5.1.2 Weitere bauakustische Ergebnisse

Im Gegensatz zu den Messungen im Labor erfolgt die Trittschallübertragung am Bau nicht nur über die Schallabstrahlung der Trenndecke sondern auch durch Schallübertragung über die flankierenden Bauteile. Durch Körperschallmessungen kann der Anteil der direkten und der flankierenden Trittschallübertragung für die jeweilige Bausituation bestimmt messtechnisch werden.

Die Trittschallübertragung erfolgt durch die Schallabstrahlung der Trenndecke sowie durch die die Trenndecke flankierenden Bauteile. Der größte Anteil an Schallenergie wird direkt durch die Trenndecke abgestrahlt (rote Kurve in Abb. 23). Die anderen Bauteile weisen etwas geringere Flankenschallpegel auf. Die Außenwand bestimmt

die Übertragung im Frequenzbereich von 1 kHz - 5 kHz wobei die Ursache (Resonanz in der Außenwand; Schallbrücke zwischen Estrichplatte und Außenwand) nicht abschließend geklärt werden konnte. Insgesamt überwiegt der Anteil der flankierenden Übertragung über den der Direktübertragung, so dass sich der Einzahlwert des Normtrittschallpegels durch die flankierende Übertragung um ca. 5 dB verringert.

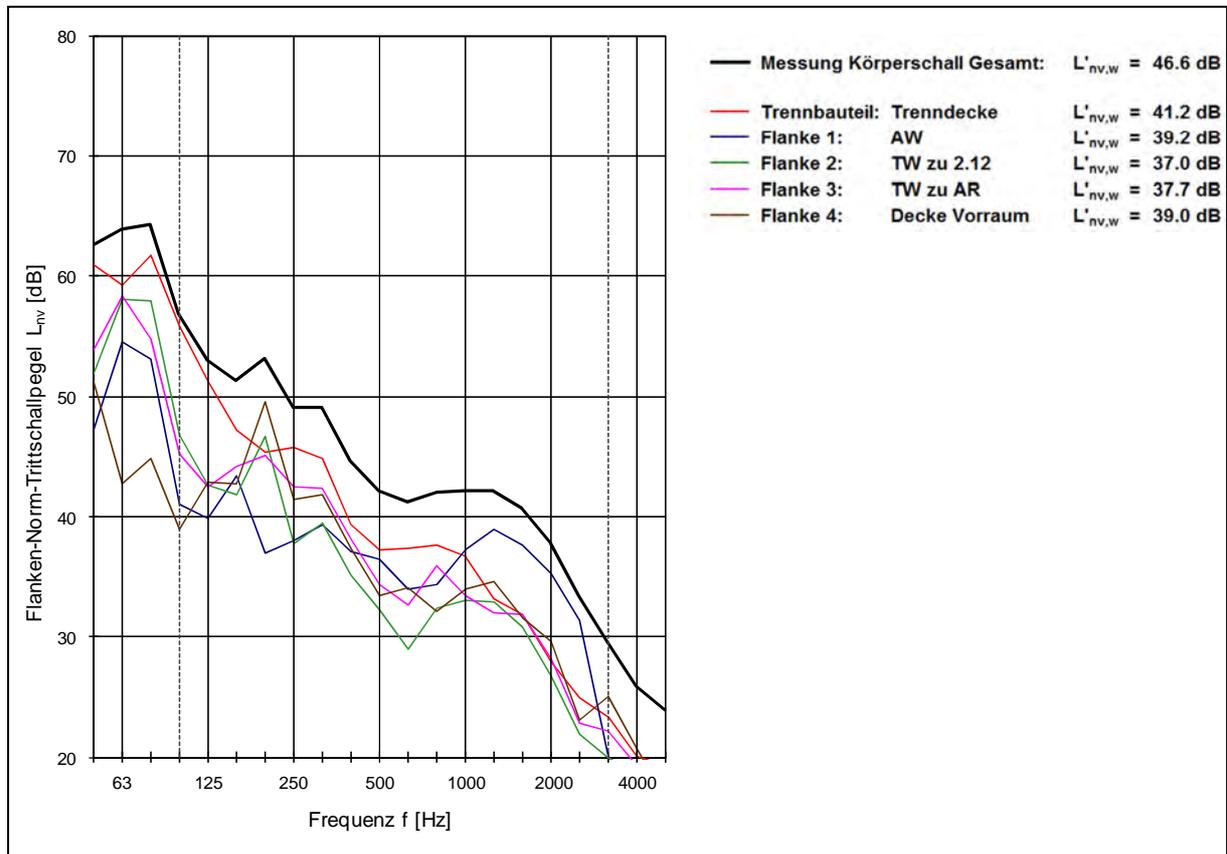


Abb. 23: Flankentrittschallpegel in Wutha-Farnroda ermittelt durch Körperschallmessungen der Schallschnelle auf den Oberflächen der an der Schallübertragung beteiligten massiven Bauteile.

Weiterhin wurde auch am Bau der Verlustfaktor der Massivdecke sowie der Estrichplatte bestimmt (Abbildung 24).

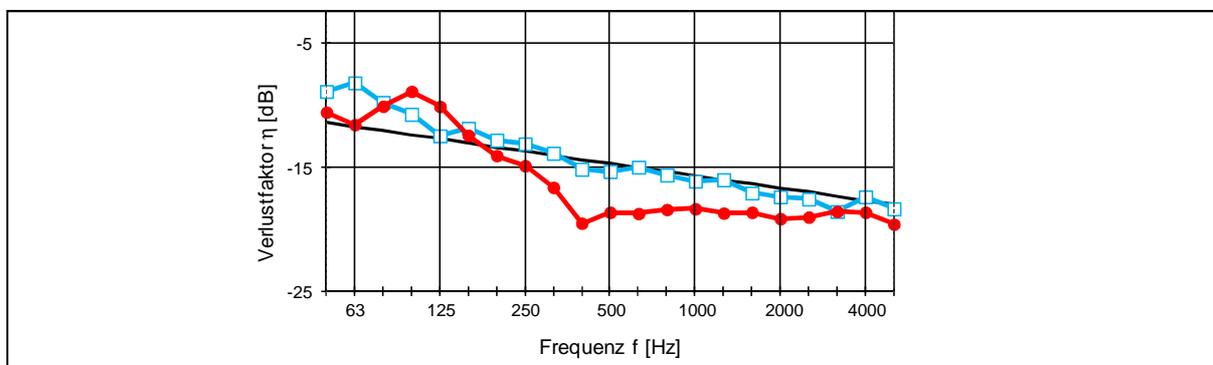


Abb. 24: Verlustfaktor η ermittelt auf der Massivdecke (blau) und auf der Estrichplatte (rot) im Vergleich zum im Mittel am Bau zu erwartenden Verlustfaktor $\eta_{Bau,ref}$ (schwarz)

Der Verlustfaktor der Massivdecke liegt sehr nahe bei dem am Bau im Mittel zu erwartenden Wert. Wie im Labor (vgl. Abb. 18) zeigt sich auch am Bau im Bereich und etwas oberhalb der Resonanzfrequenz der Estrichkonstruktion eine relativ hoher Verlustfaktor. Bei höheren Frequenzen liegt der Verlustfaktor der Estrichplatte nahezu konstant bei $10\log(\eta) \approx -19$ dB bzw. $\eta \approx 0.013$.

5.1.3 Schmalbandmessungen des Normtrittschallpegels und der Raummoden

Neben den Messungen in Terzen wurden auch Schmalbandmessungen und Messungen in 1/24-Oktavbändern durchgeführt. Mit diesen Messungen können einzelne Struktur- oder Raummoden detektiert und ihr Einfluss auf das Übertragungsverhalten ermittelt werden.

Um den Einfluss der Raummoden auf den Normtrittschallpegel zu untersuchen wurde im Empfangsraum der Baumeasurement in Wutha-Farnroda eine Übertragungsfunktion zwischen dem Anregesignal des Lautsprechers und dem Schalldruckpegel im Raum bestimmt. In nachfolgender Abb. 25 sind die im Empfangsraum an drei Messpunkten bei Anregung mit rosa Rauschen ermittelten normierten Schalldruckpegel in einer Bandbreite von ca. 0.1 Hz Frequenzbereich von 20 Hz - 200 Hz dargestellt.

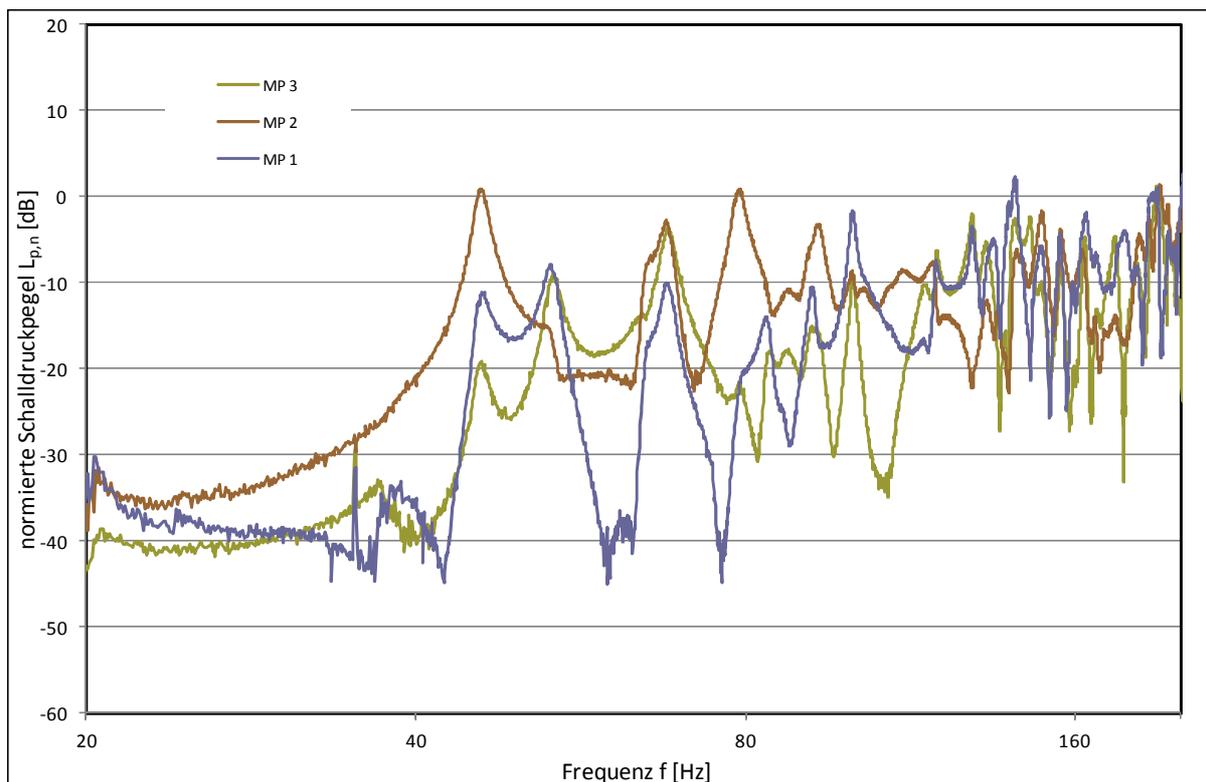


Abb. 25: Normierte Schalldruckpegel im Empfangsraum bei Anregung mit Rosa Rauschen.

Die verschiedenen Raummoden bei $f = 45,6$ Hz, $53,5$ Hz, $67,3$ Hz, $78,6$ Hz,... sind an den drei Messpunkten gut zu erkennen allerdings unterschiedlich stark ausgeprägt. Deutlich ist auch die Zunahme der Modendichte mit der Frequenz zu erkennen.

An den gleichen Messpunkten im Empfangsraum wurde nun auch der Schalldruckpegel bei Anregung der Estrichplatte im Senderraum mit dem Normhammerwerk bestimmt. Die in der Raumübertragungsfunktion gefundenen Eigenmoden (Abb. 25) finden sich als Pegelspitzen im Normtrittschallpegel in Abb. 26 wieder.

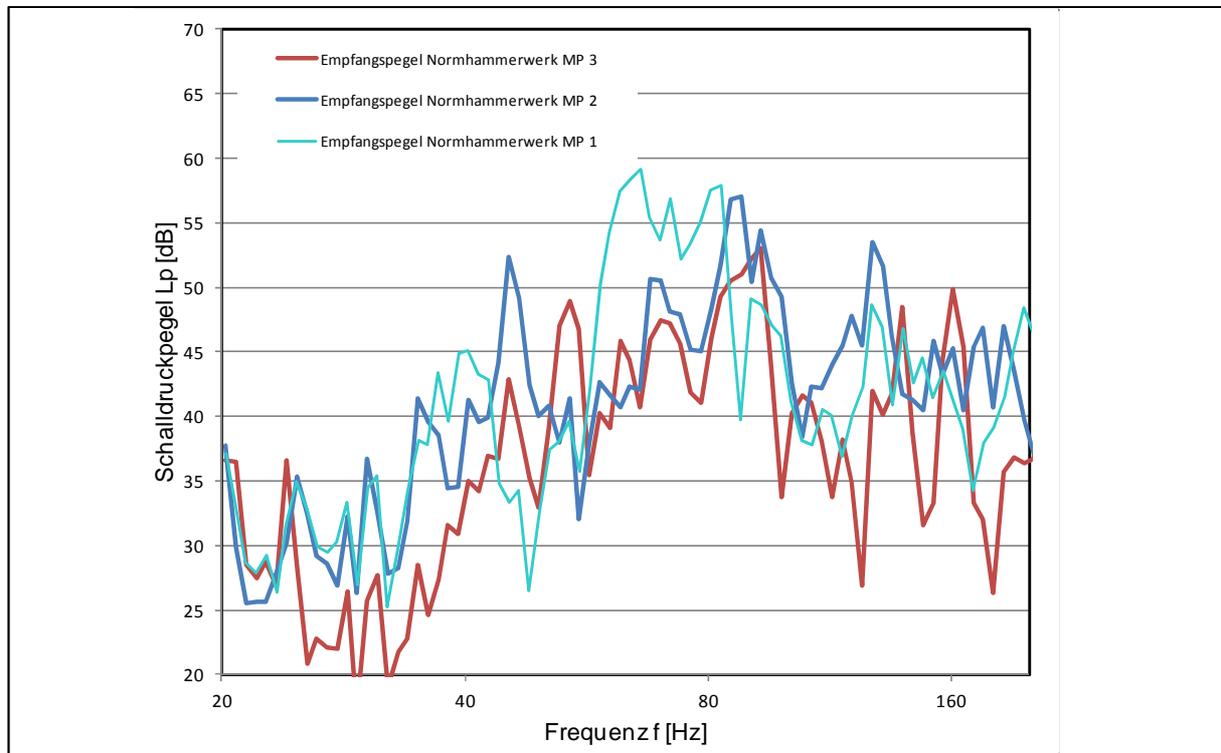


Abb. 26: Schalldruckpegel in 1/24 Oktavbandbreite im Empfangsraum bei Anregung der Estrichplatte im Senderraum mit dem Normhammerwerk

Die in den tiefen Frequenzen am Bau ermittelten Normtrittschallpegel werden zwar auch wie im Labor von den Pegelspitzen bei den Raumeigenmoden mitbestimmt, allerdings wird der Verlauf des Normtrittschallpegels nicht durch die Raummoden selbst geprägt, noch ergaben sich bei den durchgeführten Messungen am Bau Hinweise auf einzelne Raummoden, die ein "tieffrequentes Dröhnen" hervorrufen.

5.1.4 Hintergrundgeräuschpegel

Die Wahrnehmung von Trittschallgeräuschen und damit auch das Potenzial an Störwirkung hängt neben der Höhe des Pegels der Geräusche auch sehr stark von der Verdeckung bzw. der Höhe des Hintergrundgeräuschpegels ab.

In modernen Neubauwohnungen wurden aus wärmetechnischen Gründen Außenbauteile immer dichter, so dass in den letzten Jahrzehnten der Schallschutz der Fenster, besonders bei Außenbauteilen ohne normative Anforderungen, deutlich stieg. Der Umgebungslärm dringt damit weniger in die Wohnung ein, so dass der Hintergrundgeräuschpegel sinkt und Geräusche aus den Nachbarwohnungen weniger verdeckt werden. Da gleichzeitig weder eine normative Anhebung des geschuldeten Trittschallschutzes noch eine Erhöhung des Trittschallschutzes durch konstruktive Maßnahmen erfolgte, ergibt sich mit den gesunkenen Hintergrund-

geräuschpegeln eine erhöhte Störwirkung. Diese Störwirkung verursacht dann sich häufende Klagen bezüglich eines mangelhaften Trittschallschutzes. Hierbei werden vor allem die tiefen Frequenzen im Bereich der Resonanzfrequenz als störend mit dem Wort "Dröhnen" beschrieben, da bei üblicher Trittschallanregung im wesentlichen tiefe Frequenzen über dem Hintergrundgeräusch liegen und somit wahrzunehmen sind.

Im Rahmen der durchgeführten Baumessungen konnten allerdings aufgrund des laufenden Baubetriebes keine für übliche Wohnungen repräsentative Grundgeräuschpegel ermittelt werden.

5.2 Umfrage

Im Rahmen einer an der HFT Stuttgart durchgeführten Bachelorarbeit [25] wurde eine Umfrage unter beratenden Bauphysikbüros durchgeführt. Hierbei sollten Messungen in neu erstellten Mehrfamilienhäusern mitgeteilt werden, welche einerseits auf Veranlassung der Bewohner durchgeführt wurden, andererseits Messungen, welche im Rahmen einer Bauabnahme bzw. einer Güteprüfung vor dem Einzug der Bewohner durchgeführt wurden. Während die erste Gruppe als repräsentativ für einen unzureichenden baulichen Trittschallschutz steht, kann die zweite Gruppe als repräsentativ für einen im Mittel mit den heutigen Bauweisen erreichte Trittschalldämmung gesehen werden.

Allerdings zeigte sich nur eine geringe Bereitschaft der über e-Mail angeschriebenen Bauphysikbüros Daten zur Verfügung zu stellen. Deutlich mehr Messdaten konnten durch persönliche Kontakte und direkte Ansprache zu Ingenieurbüros zusammengetragen werden, sodass letztlich ein Datenpool von 33 Beschwerdemessungen und 17 Güteprüfungen [25] zustande kam.

Aus dem Datenpool wurden dann die Messungen herausgefiltert, die folgenden Anforderungen genügten:

- Messung vertikal von oben nach unten (keine diagonal oder horizontal Messungen)
- Messungen mit Stahlbetondecken mit einer Dicke von 200 mm -220 mm
- Messungen direkt auf schwimmendem Estrich oder auf verklebtem Parkett (keine weichfedernden Bodenbeläge etc.)
- schwimmender Estrich (klassisch oder Heizestrich)

Die Steifigkeit der Trittschalldämmung war im Allgemeinen nicht bekannt.

5.2.1 Beschwerdemessungen

In nachfolgender Abb. 27 ist der Frequenzverlauf des Norm-Trittschallpegels L'_n der verbleibenden 10 Messung dargestellt, die aufgrund von Beschwerden der Bewohnern durchgeführt wurden.

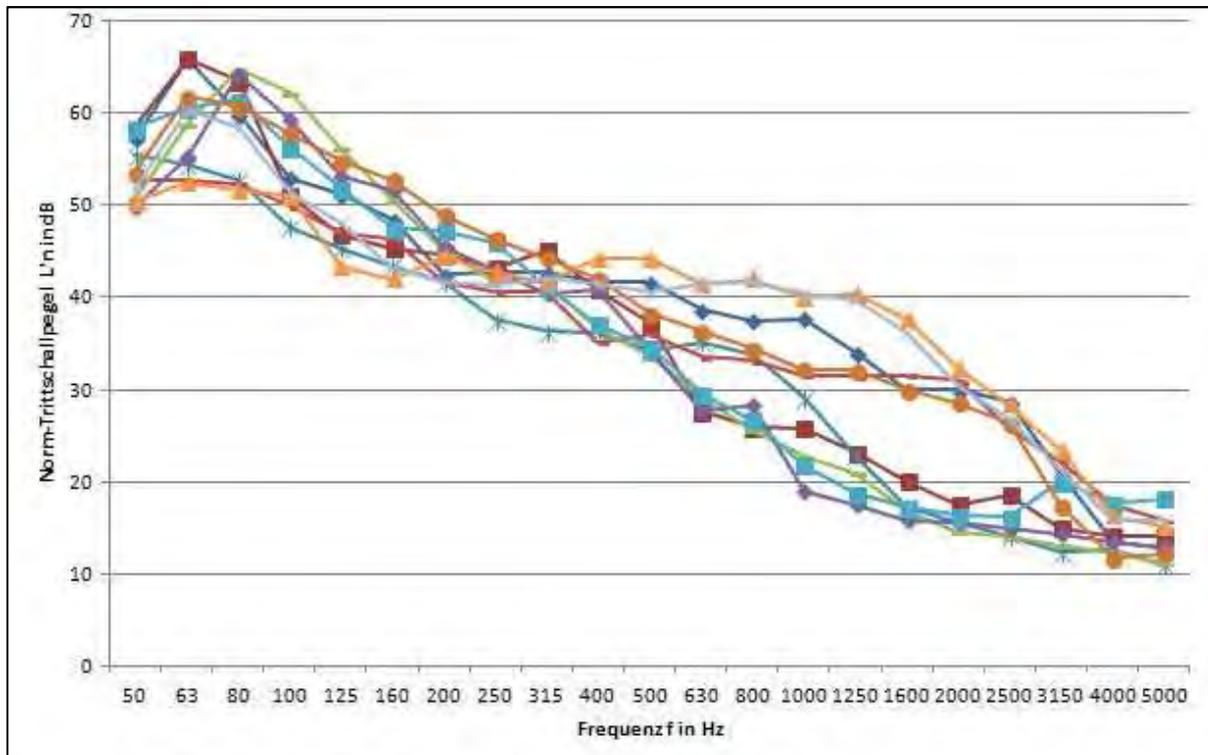


Abb. 27: Normtrittschallpegel von 10 Baumessungen beauftragt aufgrund von Beschwerden der Bewohner; Quelle: [25]

Im Frequenzverlauf des Normtrittschallpegels der Beschwerdemessungen fällt auf, dass 7 der 10 Messungen im Frequenzbereich 50 - 125 Hz deutlich höhere Pegel aufweisen. Diese sieben Kurven weisen dabei ein Maximum bei 63 Hz bzw. 80 Hz auf, das darauf schließen lässt, dass die Resonanzfrequenz des schwimmenden Estrichs in diesem Frequenzbereich liegt. Die drei Beschwerdemessungen ohne diese hohen Trittschallpegel bei tiefen Frequenzen weisen allerdings bei höheren Frequenzen erhöhte Trittschallpegel auf. Diese hohen Trittschallpegel im Frequenzbereich von 800 Hz - 2500 Hz sind typisch für handwerkliche Ausführungsfehler z.B. durch Parkettkleber im Randbereich (Randschallbrücken), die ebenfalls zu Beschwerden führen können.

5.3 Güteprüfungen

In nachfolgender Abb. 28 ist der Frequenzverlauf des Norm-Trittschallpegels L'_n der 12 Baumessung dargestellt, die aufgrund einer Güteüberwachung der Baustelle durchgeführt wurden.

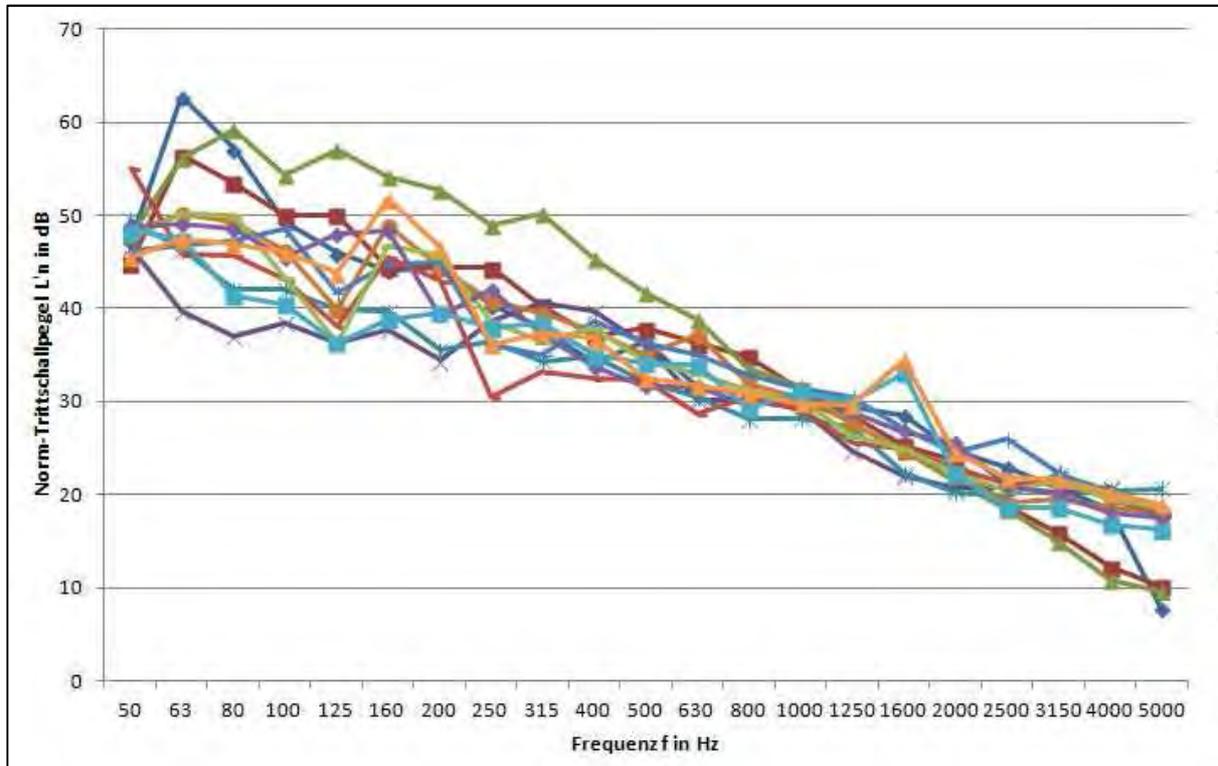


Abb. 28: Normtrittschallpegel von 12 Baumessungen beauftragt aufgrund von Güteprüfungen; Quelle: [25]

Der Frequenzverlauf des Norm-Trittschallpegels L'_n der 12 Baumessung (alle mit Parkett), die aufgrund einer Güteüberwachung der Baustelle durchgeführt wurden, zeigte eine deutlich geringere Streuung. Für drei der Messungen zeigt sich auch hier ein etwas erhöhter Trittschallpegel bei den tiefen Frequenzen. Bei den güteüberprüften Bauten wurden keine erhöhten Trittschallpegel im mittleren Frequenzbereich (Randschallbrücken) festgestellt.

5.3.1 Vergleich Beschwerdemessung - Güteüberprüfung

Nachfolgend werden die Beschwerdemessungen mit den Güteprüfungen verglichen. Hierzu sind in Abb. 29 die gemittelten Frequenzverläufe sowie deren Standardabweichungen dargestellt.

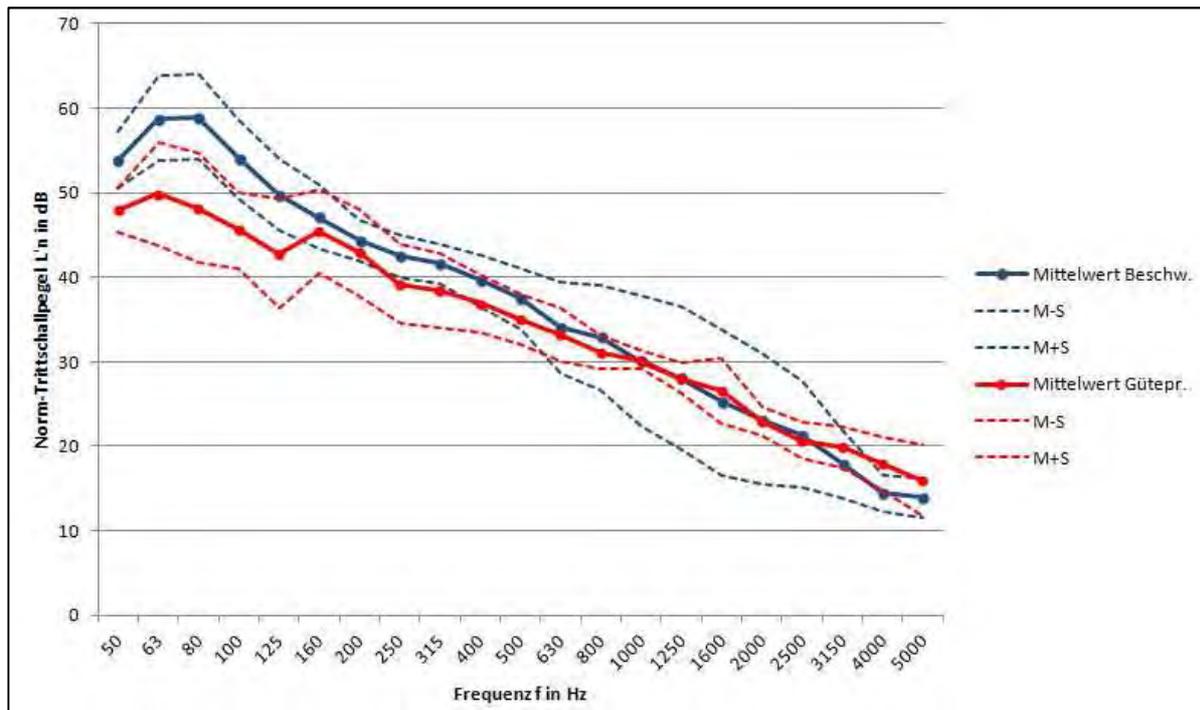


Abb. 29: Mittelwerte sowie Streubereich (Mittelwert \pm Standardabweichungen: M-S, M+S) der Normtrittschallpegel von Baumessungen beauftragt aufgrund von Güteprüfungen (rot) und aufgrund von Beschwerden (Quelle: [25]).

Deutliche Unterschiede zwischen den Mittelwerten ergeben sich vor allem im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 125 Hz. Hier liegen die mittleren Trittschallpegel bei den Beschwerdemessungen mit $L'_n = 60$ dB um fast 10 dB über den Werten bei den Güteprüfungen. Die deutlich höheren Pegel im bislang bei den Anforderungen an den baulichen Trittschallschutz nicht berücksichtigten Frequenzbereich unter 100 Hz führen demnach häufig zu Beschwerden.

In nachfolgender Abb. 30 werden die entsprechend DIN EN ISO 717-2 [11] ermittelten verschiedenen Einzulangaben der Beschwerdemessungen und der Güteprüfungen verglichen.

	Beschwerde		Güteprüfung	
	Mittelwert	Stabw	Mittelwert	Stabw
$L'_{n,w}$ [dB]	41,5	2,7	37,2	3,4
C_l [dB]	0,9	2,1	0,0	0,9
$L'_{n,w} + C_l$ [dB]	42,4		37,2	
V_E [m ³]	84,5	64,8	56,5	7,7
Max L'_n [dB]	60,5	4,9	52,0	5,2
freq. Max L'_n [Hz]	65,3	10,7	63,2	14,6
$C_{l,50-2500}$ [dB]	8,0	3,6	4,1	1,7
$L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$ [dB]	49,5		41,3	
$L_{n,T,w}$ [dB]	45,8		39,7	

Abb. 30: Mittelwerte sowie Standardabweichungen der entsprechend DIN EN ISO 717-2 [11] bewerteten Einzulangaben des Normtrittschallpegels von Beschwerdemessungen und Güteprüfungen (Quelle: [25])

Obwohl sich die bewerteten Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ der Beschwerdemessungen und der Güteprüfungen sich im Mittel um 4,3 dB unterscheiden, ist diese Größe als Anforderungsgröße zur Beurteilung des Trittschallschutzes nur bedingt geeignet, da sogar die Norm-Trittschallpegel der Beschwerdemessungen mit $L'_{n,w} = 41,5$ dB deutlich unter den Vorschlägen eines erhöhten Schallschutzes z.B. der DIN 4109 Beiblatt 2 [1] mit $L'_{n,w,erf} \leq 46$ dB liegen.

Überraschend ist, dass die Raumgröße bei den Beschwerden im Mittel um die Hälfte höher ist. Hierdurch ergibt sich für den bewerteten Standard-Trittschallpegel $L_{n,T,w}$ gegenüber $L'_{n,w}$ eine um 2 dB höhere Differenz zwischen den Beschwerdemessungen und den Güteprüfungen. Hier zeigt sich, dass eine Beurteilung entsprechend der Vorschläge der VDI 4100 [3] bei der SSTII mit $L'_{n,T,w,erf} \leq 44$ dB für den Mittelwert der Güteprüfungen gut eingehalten, bei den Beschwerdemessungen aber überschritten wird.

Noch größer wird die Differenz zwischen Güteprüfung und Beschwerdemessung, wenn als Beurteilungsgröße der Spektrum-Anpassungswert $C_{l,50-2500}$ mit berücksichtigt wird. Bei dieser Größe wird auch der Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz mitberücksichtigt. Dieser Wert beträgt bei den Beschwerden 8 dB und bei den Güteprüfungen 4 dB, so dass sich bei einer Beurteilung z.B. bei $L_{n,T,w} + C_{l,50-2500}$ eine Differenz zwischen Güteprüfung und Beschwerdemessung von über 10 dB ergibt (Beschwerdemessung: $L_{n,T,w} + C_{l,50-2500} = 53,8$ dB; Güteprüfungen: $L_{n,T,w} + C_{l,50-2500} = 43,8$ dB).

Der Einzelwert $L_{n,T,w} + C_{l,50-2500}$ ist damit als Beurteilungsgröße gegenüber dem Normtrittschallpegel $L'_{n,w}$ deutlich geeigneter.

6. Hörversuche

Zur Beschreibung der Beschwerden in Bezug auf tieffrequente Trittschallübertragungen sind neben dem in den vorstehenden Abschnitten beschriebenen physikalisch-messtechnischen Ansatz auch psychoakustische Aspekte von Interesse. Um auch die subjektive Beschreibung der tieffrequenten Trittschallgeräusche zu erfassen wurden im Rahmen der Forschungsarbeit auch Hörversuche durchgeführt [23]. Aufgrund des umfangreichen Untersuchungsprogramms insgesamt sowie der begrenzten Zeit und Mittel können diese nicht als umfassend und abgeschlossen betrachtet werden. Die Hörversuche dienen vielmehr dem Aufzeigen der Möglichkeiten einer statistischen Auswertung und der verschiedenen Möglichkeiten, tieffrequente Geräusche zu beschreiben. Idealerweise lassen sich auf diese Weise die Faktoren identifizieren, die maßgeblich für die Störwirkung verantwortlich sind. Ziel der Hörversuche war es daher, die Einflüsse verschiedener Anregequellen, der Frequenzen und der Nachhallzeit auf die subjektive Empfindung von Personen einzugrenzen, und zu klären, ab wann vom einem „Dröhnen“ gesprochen wird.

6.1 Methodik der Hörversuche

Die experimentell durchgeführten Hörversuche [23] an einer kleinen Gruppe von ca. 20 bis 30 Versuchsteilnehmern erfolgten mit unterschiedlichen Anregungen (z.B. Normhammerwerk, Japanischer Gummiball, Heeldrop, Stuhlrücken mit/ohne Person) aus den Labor- und In-situ-Messungen, die mit einem Kunstkopf gehörriktig aufgezeichnet wurden. Neben den verschiedenen Anregequellen wurden auch die Grundkonstruktionen variiert (Stahlbetondecke mit und ohne Estrich) sowie die Nachhallzeit im Empfangsraum verändert (durch die Anordnung von Absorbern konnten bei 500 Hz z.B. $T_0 = 3,19$ s, $T_1 = 1,03$ s und $T_4 = 0,38$ s eingestellt werden).

Die Modifikationen der aufgezeichneten Geräusche (z.B. um einen hörbaren Unterschied der Aufzeichnungen zu generieren oder um die Aufnahmen in einen tieferen Frequenzbereich zu verschieben) und die psychoakustische Auswertung erfolgen mit der Analysesoftware Viper.

6.2 Variation der Anregearten

Die Hörversuche wurden für unterschiedliche Variationen der aufgezeichneten Anregungen durchgeführt. Zunächst wurden für die Konstruktion Massivdecke mit schwimmendem Estrich fünf in ihrer Anregeart völlig verschiedene Geräusche ausgesucht (Gehen Absatzschuhe, Gehen Sportschuhe, Japanischer Gummiball, Heeldrops und Stuhlrücken mit Person) und deren Lautheit auf 3,9 sone angepasst. Darüber hinaus wurden daraus zwei in ihrer Anregeart völlig unterschiedliche Geräusche verwendet, um jeweils drei Mal deren Frequenzspektrum zu modifizieren.

In der ersten Modifikation wurde die lauteste Terz im Frequenzspektrum schmalbandig zu tieferen Frequenzen verschoben. Die zweite Modifikation verschob dagegen die lauteste Terz schmalbandig zu höheren Frequenzen und die Dritte die lauteste Terz breitbandig zu tieferen Frequenzen. Bei der breitbandigen Verschiebung sind außer der lautesten Terz auch die nächstgelegenen Terzen mit verschoben worden.

Exemplarisch wird im Folgenden die Modifikation eines Terzspektrums am Beispiel der Anregung „Japanischer Gummiball“ beschrieben. In Abb. 31 ist das Terzspektrum (Frequenz über der Zeit) des Originalgeräusches dargestellt. Die horizontale Achse zeigt den Pegel auf der Farbskala. Es ist zu erkennen, dass die lauteste Terz bei 40 Hz liegt und einen Pegel von etwa 70 dB aufweist.

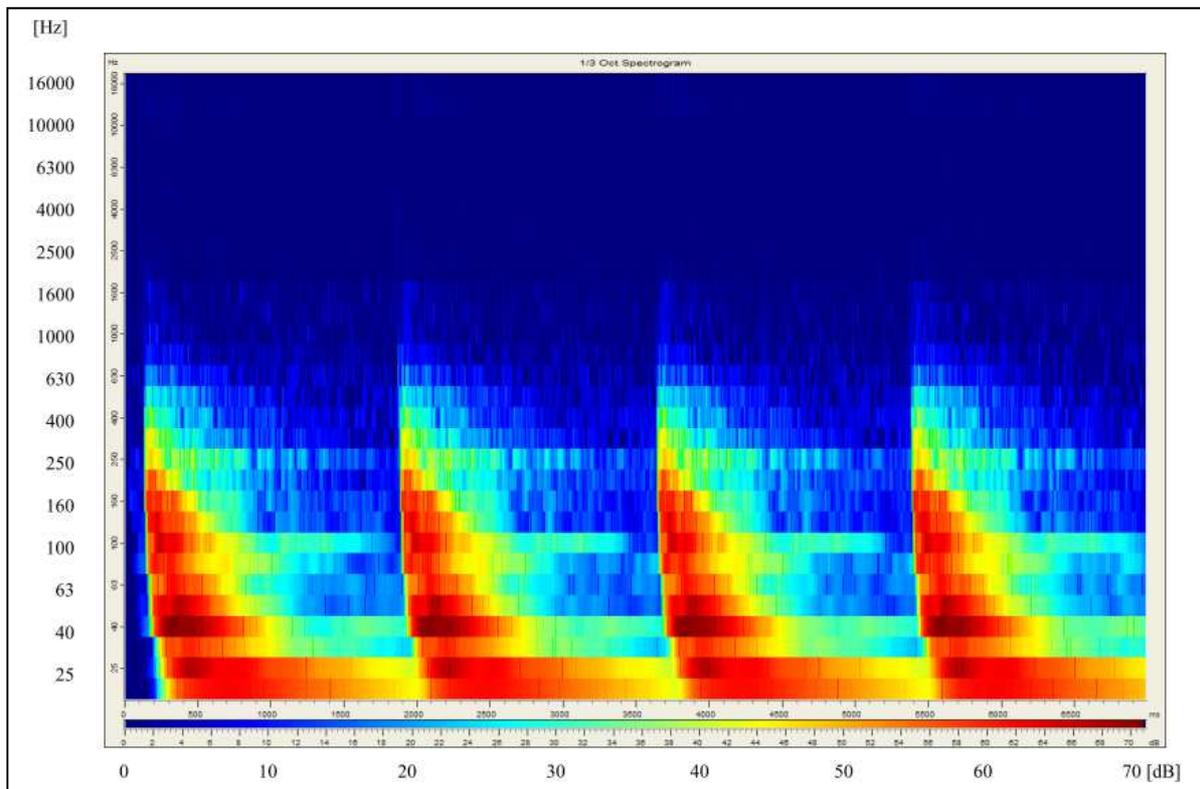


Abb. 31: Original Terzspektrum der nicht modifizierten Anregung „Japanischer Gummiball“ (aus [23]).

Das Frequenzband bei 40 Hz wurde anschließend um 20 dB schmalbandig reduziert und in einem weiteren Schritt das Frequenzband, welches zwei Terzbandbreiten tiefer liegt, um 30 dB angehoben. Die Pegelwerte zur Reduzierung bzw. zur Verstärkung der einzelnen Terzbandbreiten wurden zuerst anhand der Farbskala und dem logischen Verständnis (je tiefer der Ton, desto größer muss sein Pegel sein, um diesen als gleich laut wahrzunehmen), anschließend durch wiederholtes Anhören der Aufnahmen für die Hörversuche ausgewählt. Abb. 32 zeigt das auf die beschriebene Weise modifizierte Terzspektrum der Anregung „Japanischer Gummiball“.

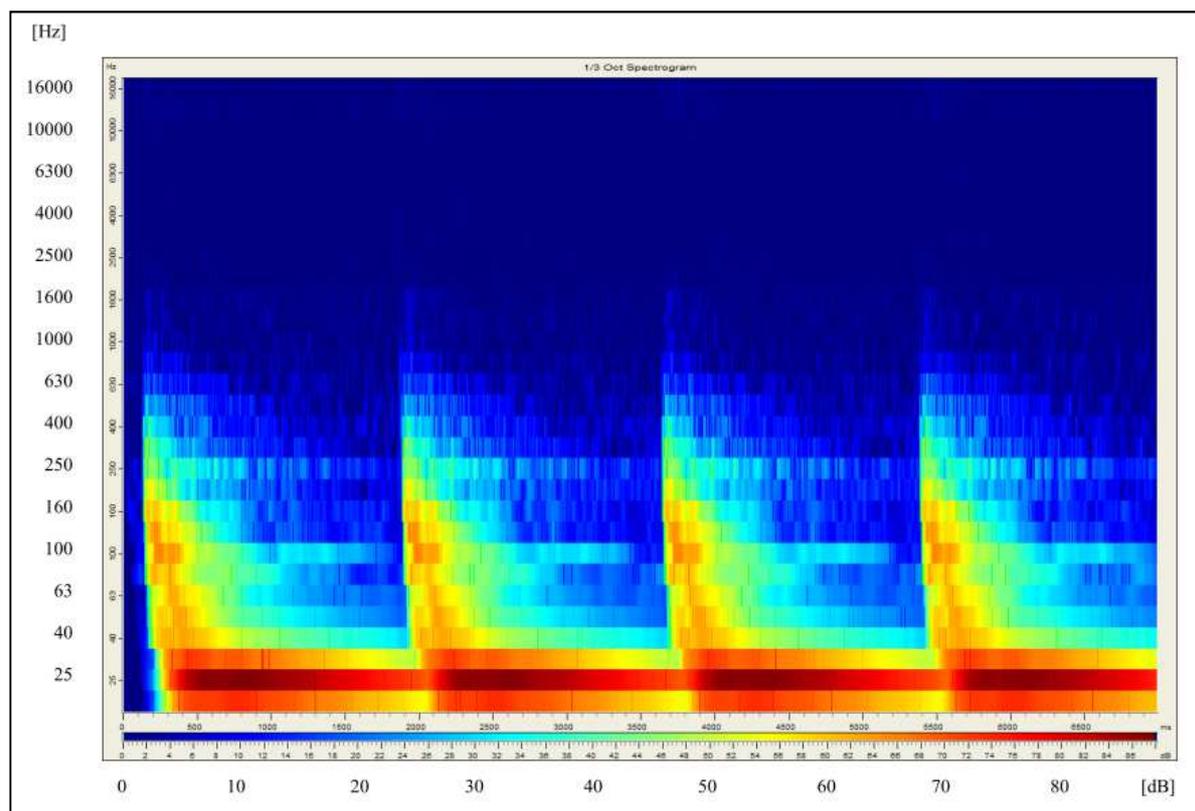


Abb. 32: Modifiziertes Terzspektrum der Anregung „Japanischer Gummiball“ (aus [23]). Das Frequenzband bei 40 Hz wurde im Vergleich zum Originalterzspektrum um 20 dB schmalbandig reduziert während das Frequenzband, welches zwei Terzbandbreiten tiefer lag, um 30 dB angehoben wurde (vgl. Abb. 33).

Die lauteste Terz des Originalspektrums konnte mit der Modifikation um zwei Terzbandbreiten zu tieferen Frequenzen verschoben werden. Durch die Angleichung der Lautheit beider Terzspektren auf 3,9 sone ergibt sich für das modifizierte Geräusch eine Abschwächung des Pegels über die gesamte, restliche (nicht modifizierte) Frequenzbreite. Auf diese Weise sollte der bewusst eingestellte Unterschied der beiden Geräusche in den Hörversuchen nicht offensichtlich wahrnehmbar sein, da es insbesondere darum ging das tieffrequent modifizierte Geräusch „unbewusst“ als solches zu bewerten. In den folgenden beiden Abbildungen sind die vorgenommenen Geräuschmodifikationen für den Japanischen Gummiball und das Stuhlrücken mit Person dargestellt (siehe Abb. 33 und Abb. 34).

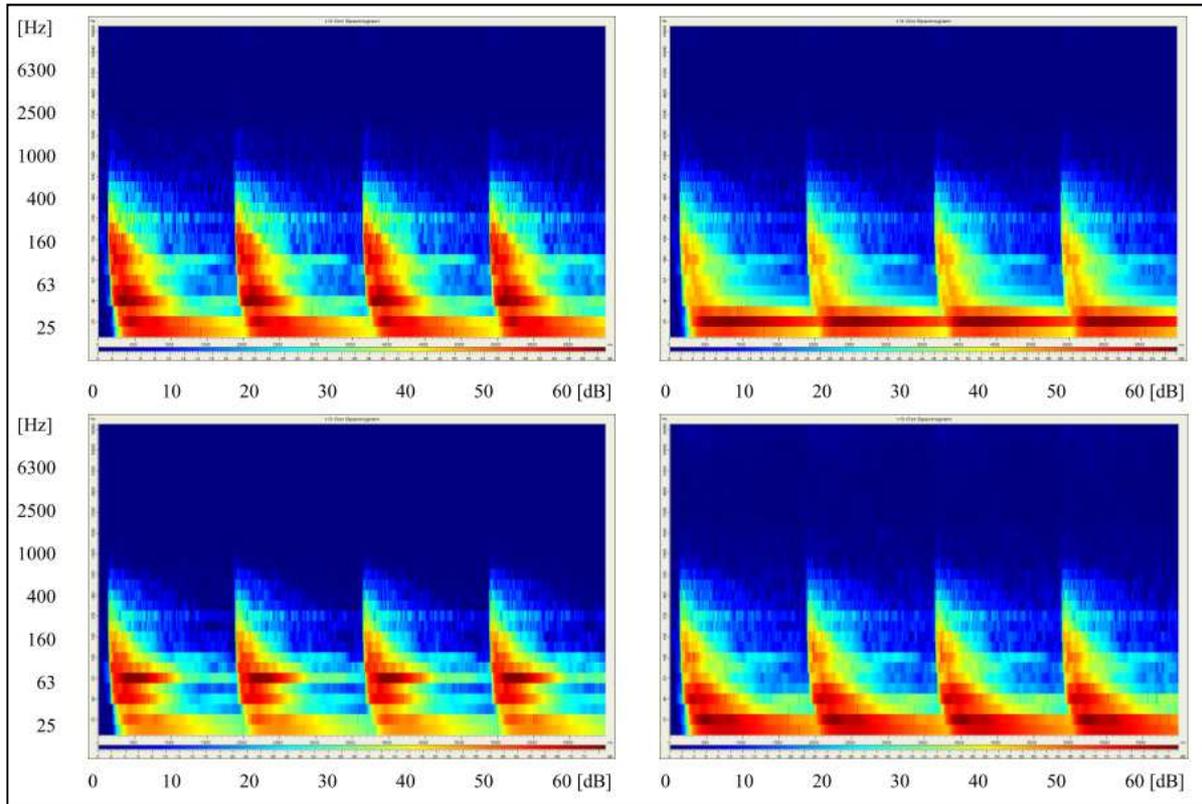


Abb. 33: Modifiziertes Terzspektrum der Anregung „Japanischer Gummiball“ (aus [23]). Links oben: original; rechts oben: schmal, tief; links unten: schmal, hoch; rechts unten: breit tief.

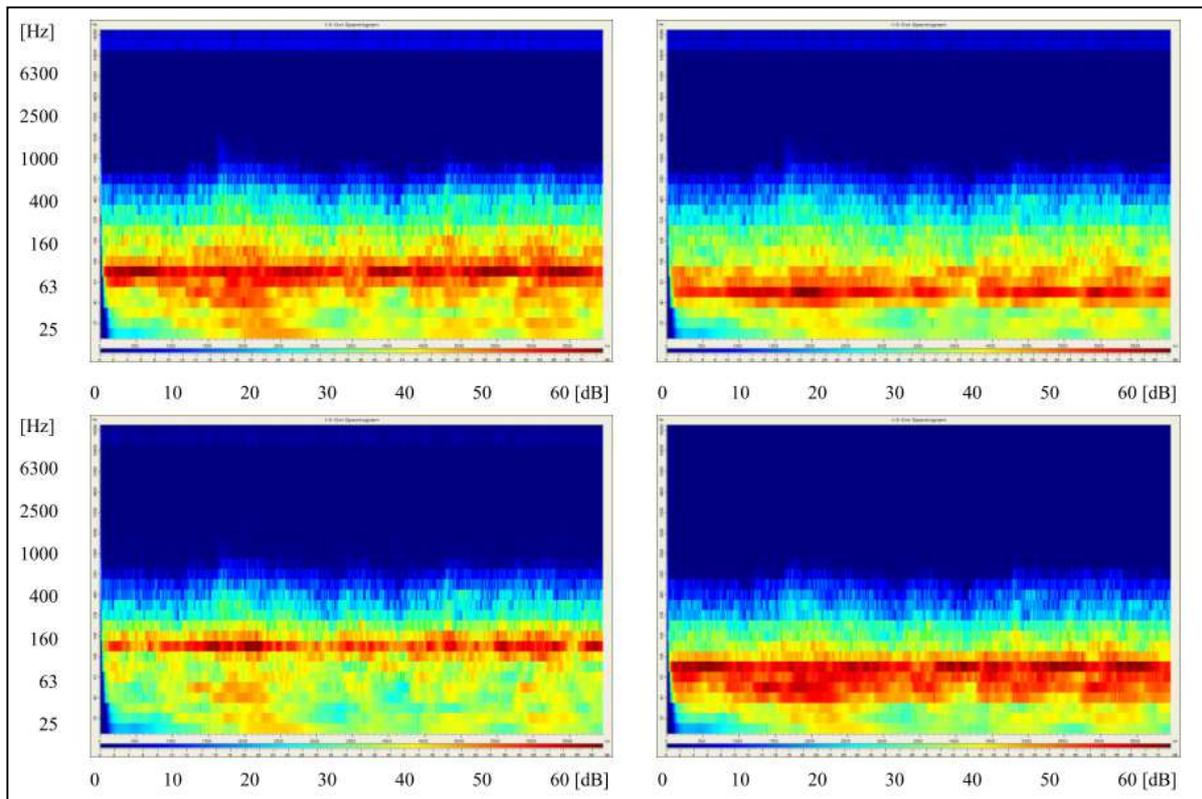


Abb. 34: Modifiziertes Terzspektrum der Anregung „Stuhlrücken mit Person“ (aus [23]). Links oben: original; rechts oben: schmal, tief; links unten: schmal, hoch; rechts unten: breit tief.

Als weitere Variation der aufgezeichneten Geräusche wurden erneut zwei in ihrer Anregeart verschiedene Geräusche ausgewählt und für jeweils drei deutlich voneinander abweichende Nachhallzeiten ($T_0 = 3,19$ s, $T_1 = 1,03$ s und $T_4 = 0,38$ s) betrachtet. Eine Anpassung der Anregungen an die Lautheit oder eine anderweitige Modifizierung erfolgte nicht.

In einer letzten Variation sollte in den Hörversuchen der Einfluss eines Lautstärkeunterschieds bewertet werden. Dazu wurden drei in ihrer Anregeart völlig verschiedene Geräusche verwendet. Die Aufnahmen der Grundanregungen erfolgten sowohl für die Konstruktion der Massivdecke mit und ohne schwimmenden Estrich. Der dabei auftretende deutliche Unterschied in der Lautheit (die Aufnahmen der Konstruktion „Rohdecke ohne schwimmenden Estrich“ waren teilweise sehr laut (bis max. 17 sone) während die Konstruktion „Rohdecke mit schwimmenden Estrich“ teilweise sehr leise (bis min. 0,6 sone) war) wurde vereinheitlicht, um anschließend von dem Ausgangsniveau einer gleichen Lautheit für jedes der ausgewählten Geräusche einen modifizierten und hörbaren Lautstärkeunterschied für die Hörversuche zu verwenden.

6.3 Durchführung und Ergebnisse der Hörversuche

Die Durchführung der Hörversuche fand im reflexionsarmen Halbraum des ZfB-Vaihingen statt [23]. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Versuche für alle Teilnehmer unter den gleichen Umgebungsbedingungen stattfanden und äußere Störfaktoren (z.B. Hintergrundgeräusche) gering waren. In den Hörversuchen wurden 30 Personen (13 Frauen und 17 Männer) befragt. Das Alter der Versuchsteilnehmer lag zwischen 17 und 74 Jahren. Die gehörrichtige Wiedergabe der aufgezeichneten Anregungen wurde durch elektrostatische Kopfhörer gewährleistet, die ein Frequenzspektrum von 12 Hz bis 65 kHz übertragen konnten. Die Kopfhörer waren weiterhin mit einem kalibrierten Kopfhörerverstärker verbunden, um sicherzustellen, dass die eingespielten Geräusche in der gewollten Lautstärke wiedergegeben wurden.

Für die verschiedenen Anregungen der Decke (Gehen Absatzschuhe, Gehen Sportschuhe, Japanischer Gummiball, Heeldrops und Stuhlrücken mit/ohne Person) sollte durch die Versuchsteilnehmer eine Beurteilung über eine Verhältnisskala, die von „sehr schwach störend“ bis „sehr stark störend“, erfolgen.

Für die in den Frequenzbändern modifizierten Anregungen (original, schmal tief, breit tief, schmal hoch) des Japanischen Gummiballs und des Stuhlrücken mit Person sollte in einer Kategorieunterteilungsskala die Bewertung von „überhaupt nicht störend“ bis „extrem störend“ erfolgen.

Um den Einfluss der Nachhallzeit zu bewerten (z.B. für unterschiedliche eingerichtete Wohnungen), wurden den Teilnehmern zwei verschiedene Anregungen eingespielt, die jeweils mit drei unterschiedlichen Nachhallzeiten aufgenommen wurden. Für die Bewertung sollte in einer Verhältnisskala zwischen „sehr schwach störend“ bis „sehr

stark störend“ und in einer zweiten Skala zwischen „gar nicht dröhnend“ bis „außerordentlich dröhnend“ unterschieden werden.

Die Bewertung der Lautstärke erfolgte durch die Beschreibung des Geräuschempfindens über Adjektivpaare (z.B. leise-laut, angenehm-unangenehm, gedämpft-dröhnend, etc.).

6.3.1 Einfluss der Anregequelle

Aus den Hörversuchen konnte aus den Mittelwerten der Bewertung das nachstehende Ranking der am stärksten störenden Anregequelle (bei angeglicherer Lautheit) ermittelt werden (beginnend mit dem am stärksten als störend empfundenen Geräusch). Allerdings konnte aus der statistischen Auswertung der Versuche die Art der Anregequelle nicht nachweisbar für das Störimpfinden verantwortlich gemacht werden. Die Mittelwerte wichen nur geringfügig voneinander ab und lagen alle zwischen „mittel störend“ (Bewertung 3) und „stark störend“ (Bewertung 4):

- 1) Stuhlrücken (Mittelwert der Bewertung zwischen 1 und 5: 3,759)
- 2) Gehen Absatzschuhe (Mittelwert der Bewertung zwischen 1 und 5: 3,741)
- 3) Gummiball (Mittelwert der Bewertung zwischen 1 und 5: 3,431)
- 4) Heeldrops (Mittelwert der Bewertung zwischen 1 und 5: 3,414)
- 5) Gehen Sportschuhe (Mittelwert der Bewertung zwischen 1 und 5: 3,414)

6.3.2 Einfluss des Frequenzspektrums

Aus den Hörversuchen konnte aus den Mittelwerten der Bewertung das nachstehende Ranking der am stärksten störenden Anregequelle (bei angeglicherer Lautheit) ermittelt werden (beginnend mit dem am stärksten als störend empfundenen Geräusch).

- 1) Stuhlrücken (breit, tief) (Mittelwert der Bewertung: 37,778)
- 2) Stuhlrücken (schmal, hoch) (Mittelwert der Bewertung: 37,111)
- 3) Gummiball (breit, tief) (Mittelwert der Bewertung: 36,148)
- 4) Stuhlrücken (schmal, tief) (Mittelwert der Bewertung: 35,148)
- 5) Stuhlrücken (Original) (Mittelwert der Bewertung: 34,889)
- 6) Gummiball (schmal, hoch) (Mittelwert der Bewertung: 34,889)
- 7) Gummiball (schmal, tief) (Mittelwert der Bewertung: 32,704)
- 8) Gummiball (Original) (Mittelwert der Bewertung: 32,537)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Gummiball als eine weniger störende Anregequelle als das Stuhlrücken beurteilt wurde. Das korreliert mit der Einstufung in den einzelnen Anregequellen (siehe 6.3.1).

Werden dagegen die Bewertungen unabhängig von der Anregequelle, aber im Zusammenhang mit dem modifizierten Frequenzspektrum betrachtet, ist festzustellen, dass die breitbandigen und tieffrequent abgestimmten Geräuschübertragungen als

unangenehmer als das Originalgeräusch bewertet wurden. Allerdings trifft dies in beiden Fällen (Gummiball und Stuhl) auch für die schmalbandig zu hohen Frequenzen verschobenen Geräusche zu. Eine besonders tieffrequente Anregung wurde demnach bei gleicher Lautheit nicht als störender empfunden.

6.3.3 Einfluss der Nachhallzeit

Der Einfluss der Nachhallzeit wurde in den Hörversuchen für die beiden zuvor auch für die Frequenzabhängigkeit genutzten Anregungen Japanischer Gummiball und Stuhlrücken mit/ohne Person für drei deutlich voneinander unterschiedliche Nachhallzeiten bewertet. Die verwendeten Nachhallzeiten lagen bei 500 Hz bei $T_0 = 3,19$ s, $T_1 = 1,03$ s und $T_4 = 0,38$ s.

Aus den Hörversuchen konnte aus dem Median der Bewertungen das nachstehende Ranking der am stärksten störenden Anregequelle und Nachhallzeit ermittelt werden (beginnend mit dem am stärksten als störend empfundenen Geräusch). Die Bewertung erfolgte von „sehr schwach störend“ (Bewertung 1) bis „sehr stark störend“ (Bewertung 5) bzw. „gar nicht dröhnend“ (Bewertung 1) bis „außerordentlich dröhnend“ (Bewertung 5). In beiden Kategorien ergab sich der gleiche Median:

- 1) Stuhl ohne Person T_0 (Median der Bewertung 4,5)
- 2) Stuhl ohne Person T_4 (Median der Bewertung 4,0)
- 3) Stuhl ohne Person T_1 (Median der Bewertung 4,0)
- 4) Gummiball T_0 (Median der Bewertung 3,0)
- 5) Gummiball T_1 (Median der Bewertung 2,5)
- 6) Gummiball T_4 (Median der Bewertung 2,0)

Die Abhängigkeit der Bewertung von der Nachhallzeit ist in diesem Hörversuch eindeutig. Zum einen wird der Gummiball (wie auch in den anderen Varianten) weniger störend empfunden als das Stuhlrücken. Zum anderen kann die Störempfindung bzw. die Einstufung eines Dröhnens mit einer längeren Nachhallzeit in Relation gesetzt werden. D.h. je größer die Absorption in einem Raum, desto geringer wird eine Dröhnwirkung empfunden.

6.3.4 Einfluss der Lautheit

Der Einfluss der Lautheit wurde in den Hörversuchen für eine Konstruktion nur aus Massivdecke und eine Konstruktion mit schwimmendem Estrich auf Massivdecke mit Hilfe von Adjektivpaaren bewertet (z.B. leise-laut, unangenehm-angenehm, gedämpft-dröhnend, etc.). Die eingespielten Anregungen waren dabei:

Gummiball auf Rohdecke / auf schwimmendem Estrich

Stuhlrücken mit Person auf Rohdecke / auf schwimmendem Estrich

Gehen mit Absatzschuhen auf Rohdecke / auf schwimmendem Estrich

Dabei konnte aus den Ergebnissen der Hörversuche allerdings keine Relevanz hinsichtlich der Konstruktion bestimmt werden. Anhand der Mittelwerte ergaben die Hörversuche für die Adjektivpaare, Anregearten und Konstruktionen folgendes Ergebnis:

Der Gummiball wurde als sehr gleichmäßig wahrgenommenes Geräusch bewertet. Von der Versuchsgruppe wurde diese Anregung unabhängig davon, ob ein schwimmender Estrich vorhanden war oder nicht, als tieffrequentes und lästiges Geräusch beschrieben. Die Aufnahme mit schwimmendem Estrich wurde dabei aber als wesentlich leiser, gedämpfter, zurückhaltender und tiefer empfunden.

Das Stühlerücken auf der Rohdecke wurde dagegen als besonders laut, unangenehm, aufdringlich, schwankend und aufregend eingestuft. Allerdings wurde das gleiche Geräusch, aufgenommen mit einem schwimmenden Estrich deutlich weniger negativ bewertet.

Insgesamt wurde das Stühlerücken von den Testpersonen ähnlich wie der Gummiball als tieffrequent und lästig eingestuft. Bei der Konstruktion mit schwimmendem Estrich ergab sich zusätzlich die Bewertung als „dröhnend“, wobei es gleichzeitig auch leiser, zurückhaltender, weniger scharf, tiefer und dumpfer empfunden wurde.

Ein ähnliches Ergebnis ergab sich aus der Anregung Gehen mit Absatzschuhen. Auch in diesem Fall wurde das Geräusch mit schwimmendem Estrich wesentlich positiver bewertet als die Aufnahme der Anregung ohne Estrich. Für diesen Fall beurteilten die Versuchsteilnehmer das Geräusch im Wesentlichen als besonders laut, aufdringlich und scharf sowie als „dröhnend“. Demgegenüber wurde das Geräusch des Gehens mit Absatzschuhen, bei Aufnahme mit schwimmendem Estrich leiser und erheblich stumpfer als auch tiefer empfunden.

6.4 Zusammenfassende Bewertung der Hörversuche

Das Ziel der Durchführung von Hörversuchen im Rahmen des Forschungsprojektes war die Ermittlung erster Ansätze zur Beschreibung tieffrequenter Trittschallgeräusche über psychoakustische Kenngrößen. Dabei sollte zunächst untersucht werden, welche dieser Kenngrößen mit dem Maß der Störwirkung am besten korrelieren. Weiterhin sollte der Einfluss verschiedener Anregequellen, des Frequenzspektrums und der Nachhallzeit auf die subjektive Empfindung der Testgruppe in den Hörversuchen haben. Des Weiteren sollte aus den Hörversuchen erarbeitet werden, ab wann Personen von einem „Dröhnen“ sprechen.

Insgesamt können die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Hörversuche aufgrund des zeitlich und finanziell zur Verfügung stehenden Rahmens nur als erster Ansatz zur Ermittlung der oben beschriebenen Zusammenhänge angesehen werden. Insbesondere die Untersuchung des Einflusses des Frequenzspektrums erfordern weitere und umfassendere Hörversuche. Beispielsweise könnten anhand verschiedener Anregequellen mehrerer Frequenzabstufungen mit verschiedenen

Frequenzspektren Versuche durchgeführt werden. Weiterhin könnten die gewonnenen Erkenntnisse zum nachgewiesenen Einfluss der Nachhallzeit vertieft werden. Von Interesse wäre in diesem Fall, ab welchem Punkt der gegenseitige Einfluss von Lautstärke, Nachhallzeit und Frequenz zu einem „Dröhnen“ führt.

Unabhängig davon konnten durch die Durchführung und Auswertung der Hörversuche teilweise Übereinstimmungen zwischen den psychoakustischen Kenngrößen und der subjektiven Bewertung abgeleitet werden. Vor allem und am deutlichsten konnte dabei die Lautheit als eindeutige psychoakustische Kenngröße erkannt werden. Je lauter ein Geräusch dargeboten wurde, desto negativer war die Bewertung der Testgruppe.

In den Hörversuchen, in denen zur Vermeidung der Bewertung des Einflusses der Lautheit diese auf einen Wert vereinheitlicht wurde, konnten dagegen keine eindeutigen Ergebnisse bestimmt werden. Es zeichnete sich allerdings eine nachvollziehbare Tendenz ab, in der die Größe des Schärfeanteils mit einem zunehmenden Störfempfinden des Geräusches im Zusammenhang stand.

Eine Verallgemeinerung der Aussage, dass die Störwirkung abhängig von der Anregequelle ist, kann aus den Hörversuchen nicht abgeleitet werden. Auch gab es keinen Anhaltspunkt dafür, dass ein Zusammenhang zwischen der Tiefe der lautesten Terz im Frequenzspektrum und der Größe der Störwirkung besteht.

Dennoch konnte in Einzelfällen aus der Auswertung der Hörversuche ein Einfluss der Anregequelle und des Frequenzspektrum auf die Störwirkung erkannt werden. Dabei bestimmt die Anregequelle die Werte aller psychoakustischen Kenngrößen und damit auch den der Lautheit.

Eine wesentliche Erkenntnis aus den Hörversuchen war der Einfluss der Nachhallzeit, der signifikant für das Hörfempfinden war. Je gedämpfter (und damit je kürzer die Nachhallzeit) dabei der Empfangsraum, desto weniger störend und dröhnend wurde die jeweilige Anregung empfunden. Demnach wirkt sich eine kürzere Nachhallzeit positiv auf die Geräuschübertragung bzw. -empfindung aus. Dabei wurden die Geräusche auch als weniger dröhnend wahrgenommen. Wie auch bei den anderen Kenngrößen, hat auch bei der Nachhallzeit die Lautheit einen Einfluss auf die Bewertung.

7. Zusammenfassung und Empfehlungen für Planung und Ausführung

Die Problematik des Dröhnens von Estrichen wurde mittels schalltechnischer Messungen im Labor und am Bau untersucht. Eine Befragung unter Ingenieurbüros sowie Hörversuche mit unterschiedlichen Trittschallgeräuschen lieferten weitere wichtige Erkenntnisse zur subjektiven Beurteilung des Dröhnens. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass hohe Trittschallpegel im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz zu Beschwerden führen, die dann häufig sowohl von den Bewohnern als auch von den Gutachtern mit dem Begriff "Dröhen" in Verbindung gebracht werden.

Die in der Literatur genannte Hypothese, dass einzelne über die Trittschalldämmung gekoppelte Strukturmoden der Massivdecke und des Estrichs in Verbindung mit einzelnen Raummoden singuläre schmalbandige hohe Pegel verursachen, konnte nicht bestätigt werden. Vielmehr zeigt sich, dass ein ca. eine Oktave breiter Frequenzbereich bei der Resonanzfrequenz des schwimmenden Estrichs die hohen Trittschallpegel bestimmt. Alle in diesem Frequenzbereich auftretenden Raum- und Strukturmoden werden verstärkt angeregt und führen zu erhöhten Schalldruckpegeln im Empfangsraum.

Liegt die Resonanzfrequenz dabei im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz, werden bei Baukonstruktionen im üblichen Massivbau in diesem Frequenzbereich Normtrittschallpegel von $L_n > 60$ dB gemessen, die dann immer häufiger zu Beschwerden führen. Die Hörversuche haben gezeigt, dass die Trittschallgeräusche einer Massivdecke mit einem schwimmenden Estrich, dessen Resonanzfrequenz zu tieferen Frequenzen hin verschoben wurde, als weniger störend empfunden werden.

Deshalb ergibt sich aus den Untersuchungen die Empfehlung zukünftig bei der Planung die Resonanzfrequenz des schwimmenden Estrichs auf unter 50 Hz auszulegen. Eine gegenüber der Mindestdicke von $d = 45$ mm erhöhte Estrichdicke vermindert zwar die Resonanzfrequenz und erhöht damit den Trittschallschutz nachhaltig, wird aber aufgrund einer verlängerten Trocknungszeit ungern ausgeführt. Am einfachsten kann die Resonanzfrequenz zu tiefen Frequenzen verschoben werden, indem eine entsprechend "weichere" Trittschalldämmplatte eingebaut wird. Liegt die dyn. Steifigkeit s' der Trittschalldämmplatten deutlich unter 10 MN/m^3 , so ergeben sich im Wohnungsbau bei üblichen Massivdecken (Dicke ca. 200 mm) und üblichen Estrichdicken von 50 mm Resonanzfrequenzen von unter 50 Hz.

Der Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz wird derzeit bei der Bewertung zu der in Deutschland üblicherweise verwendeten Einzahlangaben (L'_{nw}) nicht herangezogen. Weder die baurechtlich verbindlichen Mindestanforderungen der DIN 4109 noch die Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz nach VDI 4100 berücksichtigen bislang den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz. Hier sind sowohl der Gesetzgeber (über die baurechtlich verbindlichen Mindestanforderungen) als auch die Normungsgremien aufgerufen die bisherige Größe L_{nw} durch eine geeignetere Anforderungsgröße z.B. $L'_{n,w} + C_{150-2500}$ bzw. $L'_{nT,w} + C_{150-2500}$ zu ersetzen.

Wenn in den normativ gestellten Anforderungen die tiefen Frequenzen berücksichtigt werden, sind Planer und Bauausführende bereit bzw. sogar gezwungen schwimmende Estriche auf Massivdecken so zu planen und auszuführen, dass zukünftig kein "Dröhnen" die Nachbarn belästigt.

8. Literatur

- [1] DIN 4109 Beiblatt 2:1989-11
Schallschutz im Hochbau - Hinweise für Planung und Ausführung, Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz, Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- und Arbeitsbereich
- [2] VDI 4100:2007-08 (ersetzt durch VDI 4100: 2012-10)
Schallschutz von Wohnungen - Kriterien für Planung und Beurteilung
- [3] VDI 4100:2012-10
Schallschutz im Hochbau, Wohnungen, Beurteilung und Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz
- [4] Urteil Bundesgerichtshof vom 04.06.2009 (Az.: VII ZR 54/07)
- [5] DIN 45680:1997-03
Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft
- [6] Cremer, L., zitiert nach Gösele, K.: Schalldämmung in Gebäuden (Kapitel 21) in Heckl, M. / Müller, H.A.: Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer-Verlag, 1994, 2. Auflage
- [7] DIN EN 12354-2:2000-09
Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften , Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen; Deutsche Fassung EN 12354-2:2000
- [8] DIN 4109:1989-11
Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise
- [9] E DIN 4109-1:2006-10
Schallschutz im Hochbau, Teil 1: Anforderungen
- [10] DEGA-Empfehlung 103: "Schallschutz im Wohnungsbau - Schallschutzausweis", März 2009 (www.dega-akustik.de)
- [11] DIN EN ISO 717-2:2006-11:
Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen , Teil 2: Trittschalldämmung (ISO 717-2:1996 + AM1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 717-2:1996 + A1:2006
- [12] Kühn, B., Blickle, R.: "Untersuchungen zum Sonderfall des dröhnenden Unterlagsbodens", Zeitschrift Wärme-, Kälte-, Schall-, und Brandschutz wksb 32/1993
- [13] Schmidt, H.: "Schalltechnisches Taschenbuch", VDI 1988
- [14] Burkhart, C.: "Tieffrequenter Trittschall - Messergebnisse, Mögliche Ursachen", 28. Jahrestagung für Akustik an der Ruhr-Universität Bochum - DAGA 2002

- [15] Burkhart, C.: "Tieffrequenter Trittschall – Messergebnisse, Beurteilung", 29. Jahrestagung für Akustik an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen – DAGA 2003
- [16] Siebel, A.: "Guter Trittschallschutz mit voller Dröhnung - zwischen Norm und Realität", Lärmbekämpfung - Zeitschrift für Akustik, Schallschutz und Schwingungstechnik, Nr. 4, Juli 2008
- [17] Goydke, H.: "Zur Messung und Bewertung tieffrequenter Trittschalldämmung", 11. Jahrestagung der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik an der Universität Stuttgart - DAGA 1985
- [18] Scholl, W.: "Kann das Trittschall-Hammerwerk Gehgeräusche charakterisieren?", 26. Jahrestagung für Akustik an der Universität Oldenburg - DAGA 2000
- [19] Scholl, W.: "Das Normtrittschallhammerwerk muss laufen lernen!", 27. Jahrestagung für Akustik an der Technischen Universität Hamburg-Harburg – DAGA 2001
- [20] DIN EN ISO 140-6:1998-12
Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 6: Messung der Trittschalldämmung von Decken in Prüfständen
- [21] Schanda, U./Schramm, M.: Absorption tieffrequenten Trittschalls durch in Holzbalkendecken integrierte Helmholtzresonatoren, Forschungsbericht der Forschungsinitiative "Zukunft Bau", Z 6 – 10.08.18.7 – 08.19 / II 2 – F20-08-31(086)
- [22] Joanna Burgenmeister: Einfluss von Struktur- und Raummoden auf die tieffrequente Trittschallübertragung einer Massivdecke mit schwimmendem Estrich, Bachelorarbeit im Studiengang Bauphysik an der Hochschule für Technik, Stuttgart im Wintersemester 2011
- [23] Retzbach, S.: Beschreibung tieffrequenter Trittschallgeräusche auf Basis von Hörversuchen, Bachelorarbeit im Studiengang Bauphysik an der Hochschule für Technik, Stuttgart 2013
- [24] DIN EN ISO 140-7: 1998-12
Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 6: Messung der Trittschalldämmung von Decken in Gebäuden
- [25] Rittig, Christian: Übertragung tieffrequenter Trittschallgeräusche auf Massivdecken mit schwimmendem Estrich, Bachelorarbeit im Studiengang Bauphysik an der Hochschule für Technik, Stuttgart 2013