

Ulrich Schanda, Andreas R. Mayr, Fabian Schöpfer

Übertragungsfunktionen im Holzbau

Prognose der Schallübertragung aus
haustechnischen Anlagen mit einem
tabellarischen, praxistauglichen
Ingenieurersatzverfahren

F 3163

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0452-2

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

Übertragungsfunktionen im Holzbau

Prognose der Schallübertragung aus
haustechnischen Anlagen mit einem tabellarischen,
praxistauglichen Ingenieurersatzverfahren

Förderung	Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen SWD-10.08.18.7-16.39) Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.
Projektlaufzeit	01.11.2016 - 31.12.2018
Zuwendungsempfänger	Technische Hochschule Rosenheim Hochschulstraße 1 83024 Rosenheim
Projektleiter	Prof. Dr. Ulrich Schanda
Projektmitarbeiter	Dr. Andreas R. Mayr, Fabian Schöpfer M.Eng.
Berichtsdatum	26. Juni 2019

Kurzfassung

Zum Nachweis des gesetzlich geforderten Schallschutzes bei gebäudetechnischen Anlagen ist die Kenntnis der von diesen Anlagen ausgehenden Schallemissionen und deren Übertragung im Gebäude erforderlich. Hierfür steht mit der EN 12354-5:2009 ein validiertes Berechnungsverfahren zur Verfügung, das aber nur im Massivbau anwendbar ist. Ziel dieses Vorhabens war es, auch für den Holzbau ein praktikables Berechnungsverfahren zu erarbeiten, um die im Holzbau aufwendigen Planungsprozesse zur Erfüllung des geforderten Schallschutzes zu verbessern. Dabei wird ein empirisches Verfahren basierend auf gemessenen Übertragungsfunktionen vorgeschlagen. Damit kann die gesamte Übertragung von der eingeleiteten Körperschalleistung bis zum resultierenden Schalldruckpegel im schutzbedürftigen Raum beschreiben werden. Diese Übertragungsfunktionen können messtechnisch in Gebäuden in Holzbauweise ermittelt werden. Die prinzipielle Eignung dieses Verfahrens konnte für ausgewählte Übertragungssituationen in Forschungsarbeiten sowohl von der Technischen Hochschule Rosenheim als auch von anderen Forschungseinrichtungen bereits gezeigt werden. Im Rahmen dieses Projektes wurden Übertragungsfunktionen in Gebäuden in Holzbauweise ermittelt. Aus den so ermittelten Daten wurden Gruppen für ähnliche Übertragungswege und Konstruktionen gebildet. Für diese wurden repräsentative Übertragungsfunktionen abgeleitet, die nun erstmals eine Abschätzung des Schalldruckpegels aus gebäudetechnischen Anlagen im Holzbau ermöglichen.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Besonderer Dank gebührt den Industriepartnern die durch ihr Mitwirken zum Gelingen beigetragen haben:

Bau-Fritz GmbH & Co. KG (Herrn Simon Hanslmeier)
Huber & Sohn GmbH & Co. KG (Herrn Johann Peteratzinger)
Regnauer Fertigtbau GmbH & Co. KG (Herrn Sebastian Sebald)
Züblin Timber GmbH (Herrn Andreas Amorth)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iii
Danksagung	v
Symbolverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Arbeitsplan	2
2 Grundlagen	5
2.1 Körperschalleistung	5
2.2 Räumlich gemittelter Schalldruckpegel	5
2.3 Definition Übertragungsfunktion	6
3 Literatur	9
3.1 Veröffentlichungen im Rahmen dieses Projektes	9
3.2 Vorangegangene Forschungsarbeiten an anderen Stellen	9
3.3 Vorarbeiten an der TH Rosenheim	10
3.3.1 Messverfahren	11
3.3.2 Bisherige Gebäudemessungen	12
3.3.3 Validierung	12
4 Methodik	13
4.1 Verwendete Messtechnik	13
4.1.1 Laborprüfstand	13
4.2 Laboruntersuchungen	13
4.2.1 Optimierung des Messverfahrens zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen	13
4.2.2 Anregung von Momenten	15
4.3 Gebäudemessungen	16
4.3.1 Repräsentative Gebäude und Konstruktionen	16

5	Ergebnisse	17
5.1	Labormessungen	17
5.1.1	Optimierung des Messverfahrens	17
5.1.2	Anregung von Momenten	17
5.2	Gebäudemessungen	18
5.2.1	Übersicht der gemessenen Daten	18
5.2.2	Ableitung von Planungsdaten aus Messdaten	22
5.3	Beispiel zur Anwendung des Prognoseverfahren	26
6	Zusammenfassung und Ausblick	31
7	Projektbewertung und Transferkonzept	33
7.1	Vergleich der erzielten Ergebnisse mit dem Arbeitsplan	33
7.2	Forschungs- und Normungsarbeit	34
7.3	Baupraxis	34
	Repräsentative Übertragungsfunktionen	35
	Ergebnisse der Baumessungen	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Gesamtübertragung	2
Abbildung 2	Leichtbauprüfstand: Isometrie	14
Abbildung 3	Leichtbauprüfstand: Grundriss	14
Abbildung 4	Leichtbauprüfstand: Schnitt	15
Abbildung 5	D_{TF} für Momentenanregung	19
Abbildung 6	Beispiele für Übertragungspfade	20
Abbildung 7	Übersicht Übertragungsfunktionen: Übertragungspfad: Horizontal/direkt	23
Abbildung 8	Übersicht Übertragungsfunktionen: Übertragungspfad: Vertikal	23
Abbildung 9	Übersicht Übertragungsfunktionen: Übertragungspfad: Diagonal	24
Abbildung 10	Übersicht Übertragungsfunktionen: Übertragungspfad: KG ins EG bzw. 1. OG	24
Abbildung 11	Qualitative/repräsentative Übertragungsfunktionen. . .	25
Abbildung 12	Eingangsdaten für fiktive Quelle.	27
Abbildung 13	Schalldruckpegel für fiktive Quelle.	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Repräsentative Übertragungsfunktionen	36
---	----

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	m^2	Äquivalente Absorptionsfläche
D_{TF}	dB	Übertragungsfunktion (Transmission function)
F	N	Kraft
L_W	dB	Schalleistungspegel mit $W_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W}$
T	s	Nachhallzeit 60 dB
V	m^3	Volumen
W	J	Leistung
f	Hz	Frequenz
p	Pa	Schalldruck
v	m/s	Schallschnelle

Tiefstellungen

av	Mittelwert (Average)
NB	Schmalband (Narrow Band)

1 Einleitung

1.1 Motivation

Neben der verbreiteten Anwendung für Einfamilienhäuser eröffnen sich für den Holzbau durch die Weiterentwicklung der konstruktiv-technischen Lösungen, aber auch aufgrund einer Ausweitung von baulichen Reglementierungen neue Märkte, zum Beispiel im mehrgeschossigen Wohnungsbau im urbanen Raum. Zudem gewinnt der Holzbau auch in der Gesellschaft als zukunftsweisende, nachhaltige und energiesparende Bauweise wachsenden Zuspruch. Dennoch bleibt ein hoher Wohn- und Arbeitskomfort neben den Aspekten der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz ein wesentliches Qualitätskriterium. Hier spielt der bauliche Schallschutz eine tragende Rolle. Allerdings sind in Niedrigenergie- und Passivhauskonzepten meist gebäude-technische Anlagen erforderlich, die im Betrieb ungewollte Geräuschemissionen verursachen können. Bei zentralen heiztechnischen Anlagen oder einer Wohneinheitentrennung ist der Schallschutz nicht nur gewünscht sondern auch geschuldet [DIN 4109-1:2018-01]. Aber auch im eigenen Wohnbereich gibt es Empfehlungen für maximale Schalldruckpegel [DIN 4109:1989-11 Beiblatt 2; VDI 4100:2012-10, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2015] erzeugt durch heiztechnische Anlagen in der eigenen Wohnung. Aus diesen Gründen ist es bereits in der Planungsphase notwendig, den zu erwartenden Schalldruck berechnen zu können.

Da Geräte und Anlagen mit der Gebäudestruktur verbunden sind, können sie zusätzlich zum abgestrahlten Luftschall vom Gerätegehäuse auch direkt Vibrationen (Körperschall) in das Gebäude einleiten. Der Luft- und Körperschallanteil kann bei der Berechnung der Schallübertragung separat betrachtet werden. Der resultierende Schalldruckpegel ergibt sich dann aus der energetischen Summe der beiden Komponenten. In leichten Gebäudestrukturen ist dabei der anteilige Schalldruckpegel, verursacht durch Körperschallanregung, meist maßgeblich.

1 Einleitung

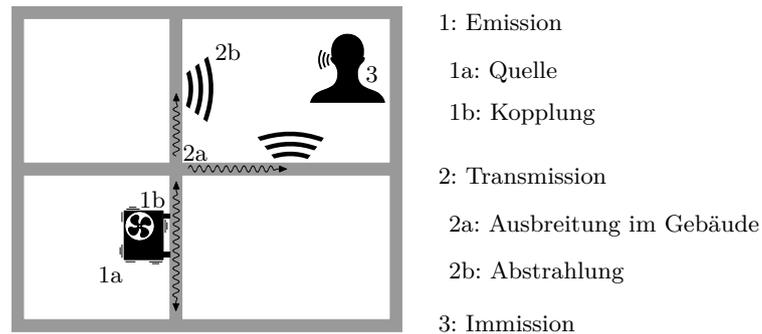


Abbildung 1 Gesamtübertragung (Zeichnung aus [Schöpfer 2019b])

Die Beschreibung der Körperschalleinleitung und –übertragung ist im Vergleich zur Luftschallübertragung ungleich komplizierter, da die strukturdynamischen Eigenschaften von Quellen und Empfangsstrukturen in die Berechnung eingehen und zusätzlich deren Wechselwirkung berücksichtigt werden muss. Vor dem Hintergrund dieser Komplexität gibt es bisher nur erste Ansätze für Berechnungsmethoden die im Sinne einer praktikablen und effizienten Schallschutzplanung sind. Umfassend validierte und standardisierte Prognosewerkzeuge sind bisher leider nicht vorhanden.

1.2 Zielsetzung

Für die Prognose ist also ein Berechnungsmodell notwendig, das die gesamte Übertragung von der Vibrationserzeugung der gebäudetechnischen Anlage bis hin zum wahrgenommenen Schalldruckpegel umfasst. Dabei kann die Körperschallerzeugung und die Übertragung durch das Gebäude wie in Abbildung 1 dargestellt, unterschieden und zunächst separat behandelt werden. Dies ermöglicht eine individuelle Charakterisierung von Quellen und ihren Körperschalleigenschaften im Rahmen von Laborprüfverfahren. Unabhängig davon ist ein Modell für die Übertragung durch das Gebäude, das den Schwerpunkt des Projektes darstellt.

1.3 Arbeitsplan

Zur Erarbeitung eines empirischen Prognoseverfahrens wurden folgende Arbeitspakete im Projektantrag definiert:

AP1 Erstellung der Mess- und Auswerteroutinen

AP2 Auswahl repräsentativer Gebäude und Konstruktionen

AP3 Laborstudien zur Körperschallanregung,-übertragung und -abstrahlung

AP4 Planung und Durchführung von Bau- und Labormessungen

AP5 Datenanalyse der Bau- und Labormessungen

AP6 Untersuchungen zu relevanten Normierungsgrößen

AP7 Erstellung und Validierung des Prognosemodells

AP8 Erstellung des Abschlussberichtes

2 Grundlagen

2.1 Körperschalleistung

An einer Anregeposition, k , kann die eingeleitete Leistung, $W_{\text{NB},k}$, aus dem Realteil des Kreuzspektrums zwischen der anregenden Kraft und der resultierenden Schnelle am Kraftereinleitungspunkt nach Gleichung (2.1) schmalbandig (Narrow Band) bestimmt werden.

$$W_{\text{NB},k} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \hat{F} \hat{v}^* \right\} \quad (2.1)$$

Dabei ist \hat{F} die komplexe Kraft und \hat{v}^* die konjugiert komplexe Schnelle. Der Leistungspegel in Terzbändern, $L_{W,k}$, kann für jede Anregeposition, k , berechnet werden durch

$$L_{W,k} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{j=1}^J W_{\text{NB},k,j}}{W_0} \right) \quad (2.2)$$

dabei ist $W_{\text{NB},k,j}$ die eingeleitete Leistung für die FFT-Linie, j an der Anregeposition k , W_0 ist der Bezugswert für die Leistung von 10^{-12} W, und J ist die Anzahl der FFT-Linien für das jeweilige Terzband.

2.2 Räumlich gemittelter Schalldruckpegel

Für jede Anregeposition, k , wird der Schalldruckpegel ebenfalls schmalbandig im Empfangsraum an mehreren Positionen, i , bestimmt. Die schmalbandigen Autospektren des Schalldruckes werden nach Gleichung (2.3)

$$p_{i,k}^2 = \sum_{j=1}^J \tilde{p}_{\text{NB},i,j,k}^2 \quad (2.3)$$

in Terzbänder aufsummiert. Dabei ist $\tilde{p}_{\text{NB},i,j,k}$ der Effektivwert des Schalldruckes für die FFT-Linie j . Für jede Mikrofonposition, i , ist gegebenenfalls eine Korrektur für Grundgeräuscheinflüsse vorzunehmen.

Der räumlich gemittelte Schalldruckpegel, $L_{av,k}$, wird für M Mikrofonpositionen nach Gleichung (2.4) bestimmt.

$$L_{av,k} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^M \tilde{p}_{i,k,\text{corr}}^2}{M p_0^2} \right) \quad (2.4)$$

Hier ist $\tilde{p}_{i,k,\text{corr}}^2$ der quadratische Mittelwert des Schalldruckes in Terzbändern an der Position, i , bei Anregung an Position, k , korrigiert für einen möglichen Grundgeräuscheinfluss. p_0 ist die Bezugsgröße für den Schalldruckpegel von 2×10^{-5} Pa. Falls notwendig ist zusätzlich eine Korrektur für mögliche Luftschallnebenwegsübertragung durchzuführen.

Zur Bestimmung eines räumlich gemittelten Schalldruckpegels bei tiefen Frequenzen sei an dieser Stelle auf das in DIN EN ISO 16283-1:2018-04 beschriebene Verfahren verwiesen, das wie in [Hopkins und Turner 2005] gezeigt, auch noch im 20 Hz Terzband verwendet werden kann.

2.3 Definition Übertragungsfunktion

Zur Beschreibung der Gesamtübertragung wurde in [Schanda, Mayr und Schöpfer 2017; Schöpfer 2019b] die Übertragungsfunktion *transmission function*, D_{TF} , definiert. Für eine Anregung am Punkt k , gilt

$$D_{TF,k} = L_{av,k} - L_{W,k} \quad (2.5)$$

wobei $L_{W,k}$ der Pegel der eingebrachten Leistung am Anregepunkt k ist. $L_{av,k}$ ist der räumlich gemittelte Schalldruckpegel in einem Empfangsraum für die Punktanregung mit $L_{W,k}$ am Punkt, k . Die Gesamtübertragung umfasst dabei alle beteiligten Übertragungswege von der Punktanregung bis zum räumlich gemittelten Schalldruckpegel im Empfangsraum.

Für mehrere Anregepunkte K , kann eine mittlere Gesamtübertragung, $D_{TF,av}$, wie folgt berechnet werden:

$$D_{TF,av} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{k=1}^K 10^{0.1 D_{TF,k}}}{K} \right) \quad (2.6)$$

Durch den Bezug auf die Nachhallzeit ist die Gesamtübertragung als *standardized spatial-average transmission function*, $D_{TF,av,nT}$ definiert.

$$D_{TF,av,nT} = D_{TF,av} - 10 \lg \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (2.7)$$

2.3 Definition Übertragungsfunktion

dabei ist T die Nachhallzeit im Empfangsraum und T_0 die Bezugsnachhallzeit von 0.5 s. In gleicher Weise kann die äquivalente Absorptionsfläche A herangezogen werden um eine *normalized spatial-average transmission function*, $D_{\text{TF,av,n}}$, zu bestimmen.

3 Literatur

3.1 Veröffentlichungen im Rahmen dieses Projektes

Im Rahmen dieses Projektes wurden Erkenntnisse auf nationalen und internationalen Fachtagungen präsentiert [Schöpfer 2017; Schöpfer, Hopkins u. a. 2017a; Schöpfer, Hopkins u. a. 2017c; Schöpfer, Mayr und Schanda 2018; Mayr, Schöpfer u. a. 2018; Schöpfer 2019a; Schöpfer, Mayr und Schanda 2019]. Der vorliegende Bericht fasst die Erkenntnisse unter Verwendung der Inhalte der o.g. Beiträge zusammen.

3.2 Vorgegangene Forschungsarbeiten an anderen Stellen

In der Forschungs- und Normungsarbeit der letzten Jahre wurde die Entwicklung von Prognosemodellen, basierend auf Daten der Körperschalleistung von Geräten vorangetrieben. So sind in DIN EN 15657:2017-10 Messverfahren zur Bestimmung der Körperschalleistung im Labor als Eingangsdaten für ein Prognosemodell beschrieben. Zusätzlich bietet diese Norm vereinfachte Berechnungsvarianten zur Bestimmung der tatsächlich eingebrachten Körperschalleistung in der konkreten Einbausituation. Ausgehend von diesen Eingangsdaten kann die Übertragung prognostiziert werden, wobei verschiedene Ansätze denkbar sind.

Deterministische Methoden, wie die Finite Element Methode (FEM) oder statistische Verfahren, wie die Statistische Energieanalyse (SEA) stellen die Grundlage vieler Modelle dar und bieten die Möglichkeit zur detaillierten, parametrisierten Modellierung. Aufgrund des hohen Aufwandes in der Modellierung ist die Anwendung dieser wissenschaftlichen Methoden allerdings weitestgehend im Forschungsbereich verbreitet. Praktikablere Methoden zur Prognose der Schallübertragung sind in der Normenreihe EN 12354 beschrieben. Dabei enthält Teil 5 [DIN EN 12354-5:2009-10] die Prognose von Installationsgeräuschen. Allerdings sind diese Berechnungsmethoden bisher

nur für Gebäude mit homogenem Bauteilaufbau und Gesamtverlustfaktoren, die maßgeblich durch Bauteilkopplungen begründet sind, gültig. Sie können deshalb nicht direkt im Leichtbau angewendet werden. Nach der Überarbeitung von Teil 1-4 in den vergangenen Jahren wird aktuell Teil 5 überarbeitet, unter anderem um die Methoden für den Leichtbau anzupassen. Parallel zu diesen normativen Verfahren könnte ein empirischer Ansatz, aufbauend auf gemessenen Daten zur Beschreibung der Gesamtübertragung (siehe Anhang F der DIN EN 12354-5:2009-10) eine praktikable und effiziente Möglichkeit bieten, Installationsgeräusche im Leichtbau abzuschätzen. Dieser Ansatz wurde bereits von anderen Autoren [z.B. Buhlert und Feldmann 1979; Vercammen und Heringa 1989; Gerretsen 1993; Fischer 2001; Kornadt u. a. 2012; Arnold und Kornadt 2014] zur Beschreibung der von haustechnischen Geräten ausgehenden Körperschallübertragung vorgeschlagen, wobei Übertragungsfunktionen zwischen anregender Kraft und resultierendem Schalldruckpegel die Grundlage bildeten. In [Kornadt u. a. 2012; Arnold und Kornadt 2014] wurde zusätzlich die Eingangsimpedanz der Struktur berücksichtigt.

Aufbauend auf die erwähnten Arbeiten wird in diesem Projekt ein empirisches Verfahren, basierend auf Übertragungsfunktionen zwischen der eingeleiteten Körperschalleistung und dem resultierenden mittleren Schalldruckpegel in einem Empfangsraum vorgeschlagen.

3.3 Vorarbeiten an der TH Rosenheim

In einem Kooperationsprojekt zwischen der Hochschule für Technik Stuttgart und der Technischen Hochschule Rosenheim wurde die Körperschalleitung und Übertragung im Massivbau und Leichtbau untersucht [Fischer u. a. 2017; Schanda, Mayr und Schöpfer 2017]. Dem Projekt war eine kooperierende Promotion, betreut an der University of Liverpool angeschlossen [Schöpfer 2019b]. Aus dem Projekt sowie der Promotion zeichnete sich ein empirischer Ansatz basierend auf gemessenen Übertragungsfunktionen als vielversprechend Methode vor allem in Hinblick auf die Anwendung in der Planungspraxis ab. Das vorliegende Projekt baut deshalb auf den Voruntersuchungen aus dem Projekt [Fischer u. a. 2017; Schanda, Mayr und Schöpfer 2017] sowie der Promotion [Schöpfer 2019b] auf. Aus diesem Grund sind in diesem Bericht auch Ergebnisse aus [Schöpfer 2019b] ergänzend dargestellt. Der Schwerpunkt des Projektes liegt auf der Beschreibung der Körperschall-

übertragung durch das Gebäude durch die Sammlung von Daten durch Messungen in Gebäuden.

3.3.1 Messverfahren

Das grundlegende Messverfahren wurde in [Schöpfer 2019b] erarbeitet. Die wesentlichen Untersuchungen wurden in [Schöpfer, Hopkins u. a. 2017b] vorgestellt und werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Untersuchungen zur Art der Anregung

Bei Art der Anregung kann zwischen stationärer Anregung und transienter Anregung unterschieden werden. Für die stationäre Anregung wird üblicherweise ein Shaker in Kombination mit einem Kraftsensor oder Impedanzmesskopf verwendet. Dabei ist die Befestigung des Shakers bzw. des Kraftsensors vor allem auf der im Leichtbau häufig verwendeten Gipskartonbeplankung problematisch. Aus diesem Grund ist eine transiente Anregung mit einem Impulshammer praktikabler. Zudem kann die Anregung fast rückstandslos durchgeführt werden, wodurch Messungen auch im ausgebauten Zustand mit fertigen Bauteiloberflächen noch zu vertreten sind. Da keine aufwändige Befestigung notwendig ist, können Messungen mit transienter Anregung im Vergleich zu stationärer Anregung mit einem Shaker wesentlich zeit-effektiver durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Nachteil bei transienter Anregung ist allerdings der eingeschränkte Frequenzbereich. Dabei ist der Frequenzbereich durch den Impuls vor allem nach oben limitiert. Aus diesem Grund wurde der Frequenzbereich der dargestellten Daten auf maximal 1000 Hz beschränkt. Zu tiefen Frequenzen kann bei transienter Anregung eine zusätzliche Messung mit einer weicheren Hammerspitze ergänzend zur Messung mit einer harten Spitze durchgeführt werden. Die Übertragungsfunktion kann aus beiden Messungen zusammengesetzt werden. Ein weiterer Nachteil bei transienter Anregung ist die Gefahr einer nicht linearen Anregung. In [Schöpfer, Hopkins u. a. 2017b] wurde allerdings gezeigt, dass zwischen stationärer Anregung und einer transienten Anregung mit üblichen Schlagstärken und verschiedenen Spitzen im Wesentlichen nur geringe Unterschiede <1 dB für harte Spitzen und <2 dB für eine weiche Gummispitze auftreten.

Darauf aufbauend wurde für das Messverfahren am Bau die transiente Anregung gewählt.

Untersuchungen zur Position der Anregung

Um den Einfluss der Position der Anregung auf die gemessene Übertragungsfunktion, D_{TF} , zu untersuchen wurden im Labor an einer Holzrahmenkonstruktion verschiedene Anregepositionen analysiert. Die Ergebnisse sind in [Schöpfer, Hopkins u. a. 2017b] zusammengefasst. Dabei wurde zwischen Positionen auf Wandriegeln und im Gefach unterschieden. Zudem wurde für eine diagonale Übertragung der Abstand zu Stoßstelle variiert.

Die Ergebnisse zeigten, dass für eine Übertragungssituation die Ergebnisse auch für extrem unterschiedliche Anregepositionen in einem Band ± 4 dB sind. Darauf aufbauend wurden im Rahmen der Baumessungen pro Übertragungssituation mindestens zwei Anregepositionen bei Holzrahmenbauwänden und mindestens eine Anregeposition bei (Holz-) Massivwänden verwendet.

3.3.2 Bisherige Gebäudemessungen

In den vorangegangenen Arbeiten wurden Messungen in insgesamt sieben Gebäuden von zwei verschiedenen Herstellern durchgeführt. Insgesamt wurden 34 Übertragungsfunktionen ermittelt. Die Daten beschränken sich allerdings auf Holzrahmenbaukonstruktionen und im Wesentlichen Einfamilienhäuser. Zudem war in einigen Situationen ein zu geringer Signal-zu-Rausch-Abstand vorhanden, weshalb das Messverfahren im Rahmen dieses Projektes weiter optimiert wurde.

Bei der Darstellung der Ergebnisse der Baumessungen im Rahmen dieses Projektes werden die Daten aus den vorangegangenen Projekten mit herangezogen.

3.3.3 Validierung

In Fallstudien wurde die Anwendung des Verfahrens für eine reale Quelle sowie für eine idealisierte Körperschallquelle validiert [Schöpfer, Mayr und Schanda 2018; Schöpfer 2019b]. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Prognose mit dem angestrebten Verfahren im Rahmen von ± 10 dB mit der Messung des Schalldruckpegels im Frequenzbereich von 20 Hz to 1000 Hz übereinstimmt. Im Mittel ist die Abweichung in diesem Frequenzbereich < 2 dB.

4 Methodik

4.1 Verwendete Messtechnik

4.1.1 Laborprüfstand

Für die Laboruntersuchungen steht der in den Abbildungen 2, 3 und 4 gezeigte Prüfstand an der Technischen Hochschule Rosenheim zur Verfügung.

4.2 Laboruntersuchungen

4.2.1 Optimierung des Messverfahrens zur Ermittlung von Übertragungsfunktionen

Um im Rahmen der Baumessungen effektiv repräsentative Daten zu ermitteln wurde das Messsystem aufbauend auf den Voruntersuchungen optimiert. Der Fokus lag dabei vor allem auf der verwendeten Sensorik, sowie der Optimierung des zeitlichen Ablaufes der Messung einer Übertragungsfunktion um die engen Zeitfenster auf Baustellen effektiv zu nutzen.

Zur Messung der installierten Leistung ist zusätzlich zur Anregekraft auch die Kenntnis der Schnelle am Anregepunkt erforderlich (siehe Gleichung (2.1)). Hierfür werden Beschleunigungssensoren verwendet welche auf das Anregesignal sowie auf die Empfangsstruktur abgestimmt werden müssen. Aufgrund der robusteren Verkabelung sind auf Baumessungen ICP (IEPE) Sensoren praktikabler. Im Rahmen der Vorarbeiten war die Empfindlichkeit der Beschleunigungssensoren jedoch ein limitierender Faktor. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieses Projektes die Anwendbarkeit von Sensoren mit verschiedenen Empfindlichkeiten untersucht.

Die Optimierung des Messverfahrens umfasste auch eine Variation der Anregung durch verschiedener Impulshammer. Dadurch sollte der Signal-zu-Rausch Abstand der Messungen optimiert werden.

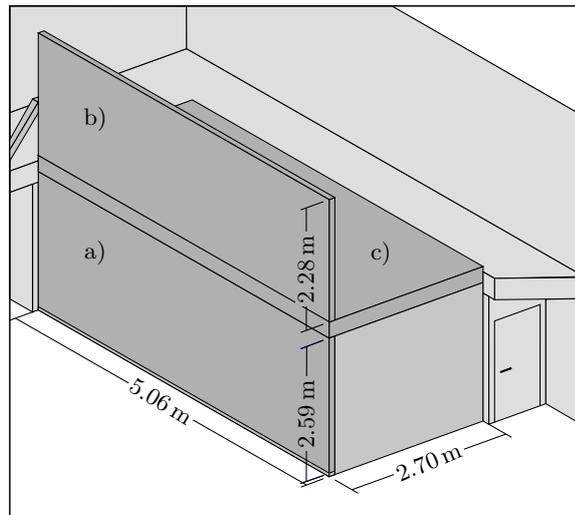


Abbildung 2 Isometrie des Leichtbauprüfstandes an der TH Rosenheim mit folgenden Bauteilen: a) und b) Holzrahmenbauwand. c) Holzbalkendecke (Zeichnung aus [Schöpfer 2019b]).

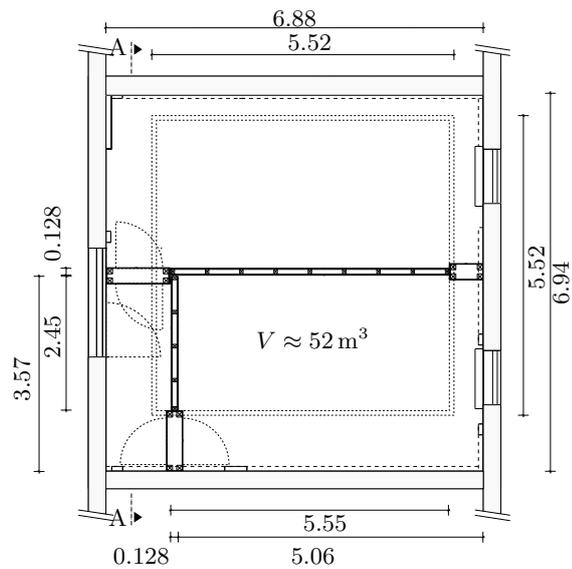


Abbildung 3 Grundriss des Leichtbauprüfstandes. Abmessungen in Meter (Zeichnung aus [Schöpfer 2019b]).

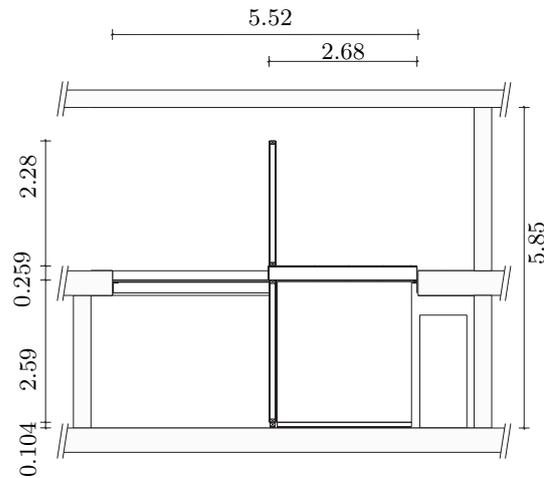


Abbildung 4 Leichtbauprüfstand. Schnitt A-A, siehe Abbildung 3) (Zeichnung aus [Schöpfer 2019b])

Ebenso wurden im Vergleich zu den Vorarbeiten die Verwendung robusterer Mikrofone im Empfangsraum erprobt.

4.2.2 Anregung von Momenten

Durch die Anregung mit einem Shaker oder einem Impulshammer wird die Gebäudestruktur nur durch ein Kraft senkrecht zur Bauteiloberfläche angeregt. Gebäudetechnische Geräte können die Struktur aber potentiell auch durch Momente zu Biegeschwingungen anregen.

Deshalb wurde die Fragestellung untersucht, inwiefern übliche Geräte in der Lage sind, zusätzlich zur Kraftanregung auch über Momente Körperschall in Leichtbaustrukturen einzuleiten. Dies ist insofern von Relevanz, da bisherige Ansätze zur Prognose der Schalldruckpegel aus haustechnischen Anlagen sowie auch der in diesem Projekt verfolgte empirische Ansatz eine Momentenanregung aus Gründen der Praktikabilität vernachlässigen. Im Vergleich zu Kraftkomponenten ist die Untersuchung von Momentenkomponenten ungleich komplizierter und aufwändiger, da diese nicht direkt messtechnisch erfasst werden können. Aus diesem Grund sind umfangreiche indirekte Messmethoden erforderlich, die im Vergleich zur direkten Messung zudem deutlich sensitiver auf Störeinflüsse sind. Voruntersuchungen mit idealisierten, für das Vorhaben entwickelten Momentenquellen zeigten,

dass die indirekten Verfahren anwendbar sind, um die Momentenkomponenten zu bestimmen. Darauf aufbauend wurde im Laborprüfstand ein Moment angeregt und der resultierende Schalldruck bestimmt. So konnte eine Übertragungsfunktion, D_{TF} , für Momentenanregung bestimmt werden.

4.3 Gebäudemessungen

4.3.1 Repräsentative Gebäude und Konstruktionen

Das angestrebte Prognoseverfahren beruht auf gemessenen Daten die zunächst einzigartig für die jeweilige Situation sind. Um daraus Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften abzuleiten ist es notwendig repräsentative Gebäude und Konstruktionen zu definieren. Im Holzbau gibt es bedingt durch die Kombination von verschiedenen Werkstoffen und technischen Lösungen eine Vielzahl an möglichen Konstruktionen. Je nach Gebäudetyp werden diese den jeweiligen Anforderungen angepasst.

In Abstimmung mit den Industriepartnern wurden die Gebäudemessungen so abgestimmt um ein breites Spektrum an Gebäudetypen (Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Bürogebäude, etc.) sowie Konstruktionen und Übertragungswegen abzubilden.

5 Ergebnisse

5.1 Labormessungen

5.1.1 Optimierung des Messverfahrens

Im Vergleich zu den Vorarbeiten zeigte sich, dass die Anwendung von Sensoren mit geringerer Empfindlichkeit (Kistler, 8702B500) auf den leichten Strukturen im Holz-Leichtbau robuster ist. Dennoch ist vor allem bei tiefen Frequenzen auf einen ausreichenden Signal-zu-Rausch-Abstand zu achten. Dies kann vor allem bei schwereren Bauteilen in Holmassivbauweise von Relevanz sein. Durch die Verwendung angepasster Sensoren auf die zu untersuchende Struktur konnte die Schlagstärke erhöht werden, ohne die Sensoren zu übersteuern. Somit konnte der Signal-zu-Rausch-Abstand der Mikrofone im Empfangsraum verbessert werden. Dadurch war es nicht notwendig low-noise Mikrofone einzusetzen und es konnte auf konventionelle Mikrofone zurückgegriffen werden. Hier wurde vorpolarisierten Mikrofone (PCB, 378B02) eingesetzt, welche aufgrund der robusten Verkabelung auf Baustellen günstiger sind. Für die Anregung wurden drei verschiedene Impulshammer (Endevco 2304, Endevco 3202-10 und Kistler 9726A20000) verwendet. Je nach Situation konnte so der Signal-zu-Rausch-Abstand sowohl für die Beschleunigungssensoren als auch für die Mikrofone optimiert werden.

Im Vergleich zu den bisherigen Arbeiten konnte der Messablauf durch parallele mehrkanalige Messung effizienter gestaltet werden um in den engen Zeitfenstern auf der Baustelle mehr Daten zu sammeln.

So konnten durch die Optimierungsmaßnahmen mehr Daten mit besser Qualität in weniger Messzeit erfasst werden.

5.1.2 Anregung von Momenten

Wie in [Schöpfer 2019b] beschrieben wurde am Laborprüfstand ein Moment angeregt und der resultierende Schalldruck gemessen. Für horizontale Übertragung wurde die Übertragungsfunktion für eine Kraft senkrecht

zur Bauteiloberfläche im Vergleich zu den beiden out-of-plane Momenten bestimmt. Untersuchungen mit Quellen, von welchen die Anteile der Anregekomponenten unbekannt waren, zeigten allerdings, dass die Anregung einzelner Komponenten zu schwach ist, um die indirekten Messverfahren störungsfrei anzuwenden [Schöpfer 2019b]. Die Messdaten können somit nur herangezogen werden, um tendenzielle Aussagen abzuleiten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die grauen Bereiche stellen Frequenzbereiche dar in welchen die eingebrachte Leistung negativ war und nach dem in [Schöpfer 2019b] Verfahren bearbeitet wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass die Übertragung eines Momentes in der gleichen Größenordnung ist wie für eine Anregung durch eine Kraft senkrecht zur Bauteiloberfläche. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass hier bewusst versucht wurde dominant ein Moment bzw. eine senkrecht zur Bauteil Oberfläche angreifende Kraft separat anzuregen. Bei realen Quellen ist die Anregung eine Kombination aus allen sechs Freiheitsgraden (1xKraft senkrecht, 2 Moment out-of-plane, 2x Kraft in Plattenebene, 1xMoment in Plattenebene). Untersuchungen in [Mayr 2009; Schöpfer 2019b] zeigten, dass die Anregung durch die Kraftkomponente senkrecht zur Bauteiloberfläche oftmals in weiten Frequenzbereichen dominiert. Allerdings sind durchaus auch Frequenzbänder vorhanden, in welchen die Momentenanregung eine Rolle spielen kann.

5.2 Gebäudemessungen

5.2.1 Übersicht der gemessenen Daten

Unter Anwendung des in Abschnitt 2.3 beschriebenen Verfahrens wurden Übertragungsfunktionen in Gebäuden in Holzbauweise gemessen. Bisher wurden Messungen in 19 Gebäuden (zwölf im Rahmen dieses Projektes) von fünf verschiedenen Herstellern durchgeführt. Dabei wurden sowohl Gebäude in Holzrahmenbau- als auch in Holzmassivbauweise betrachtet. Unter den untersuchten Gebäuden waren elf Einfamilienhäuser, fünf Mehrfamilienhäuser zwei Bürogebäude sowie ein Sechsgeschoßer. Der gesamte Datensatz umfasst derzeit 120 Übertragungsfunktionen.

Um aus den Daten repräsentative Übertragungsfunktionen für ähnliche Situationen abzuleiten wurden folgende Kriterien herangezogen um Gruppen zu bilden:

- Übertragungspfad (18 Varianten)

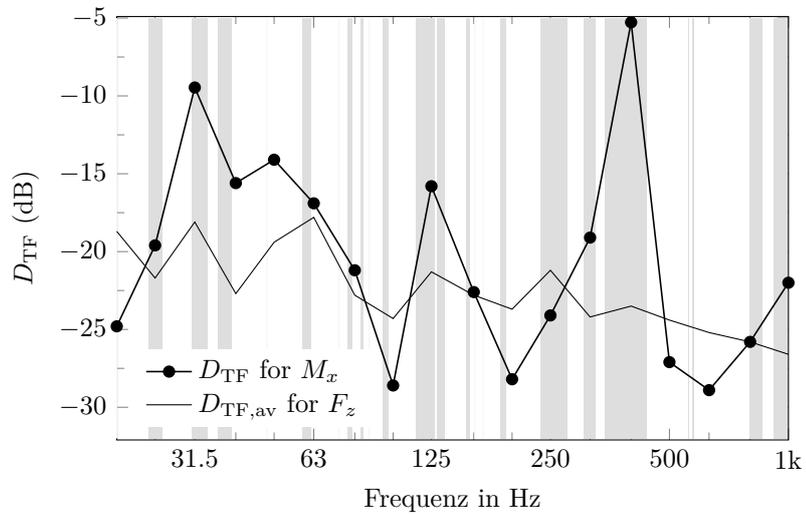
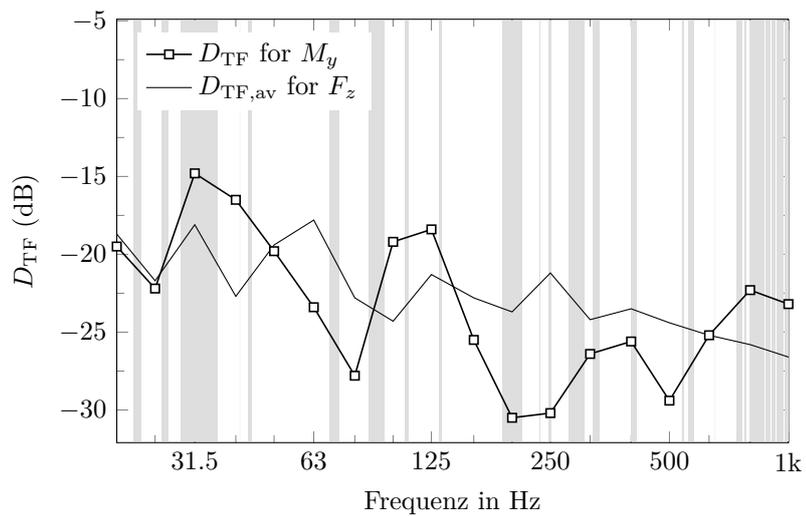
(a) Moment, M_x .(b) Moment, M_y .

Abbildung 5 Übertragungsfunktion für Momentenanregung am Laborprüfstand (Abbildungen 2 - 4). In den grau hinterlegten Frequenzbereiche mussten die Daten nachbearbeitet werden [Schöpfer 2019b]. Zum Vergleich ist die Übertragungsfunktion auch für Kraftanregung dargestellt. Abbildung aus [Schöpfer 2019b]



Abbildung 6 Beispiele für Übertragungspfade. Dabei stellt der grüne Pfeil die Anregung dar und der orange markierte Raum den Empfangsraum (ER). Die Skizzen stellen schematisch Gebäudeschnitte dar (obere Reihe Vertikalschnitte, untere Reihe Horizontalschnitte)

- Typ des angeregten Bauteils (7 Varianten)
- Konstruktion des angeregten Bauteils (9 Varianten)
- Vorsatzschale (3 Varianten)

Übertragungspfad: Der Übertragungspfad beschreibt den Weg vom angeregten Bauteil zum betrachteten Empfangsraum. Dabei beschreibt eine direkte Übertragung zum Beispiel die Anregung der Trennwand und den mittleren Schalldruckpegel im dahinter liegenden Raum. Eine vertikale Übertragung ist zum Beispiel die Anregung der Außenwand im Erdgeschoss zum darüber liegenden Raum im ersten Obergeschoss. Beispiele für Übertragungspfade sind in Abbildung 6 skizziert. Für die vorhandenen Daten lassen sich 18 Varianten bezüglich unterschiedlicher Übertragungspfade bilden.

Typ des angeregten Bauteils:

Hierbei wird zum Beispiel zwischen einer Innenwand, einer Wohnungstrennwand, einer Kommunnwand oder einer Außenwand unterschieden. Insgesamt liegen sieben Varianten vor.

Konstruktion des angeregten Bauteils:

Die Konstruktion des angeregten Bauteils kann zum Beispiel eine Holzrahmen- oder Holzmassivkonstruktion sein. Der Datensatz umfasst aber auch Mauerwerks-

oder Betonwände im Kellergeschoss. Insgesamt sind für dieses Kriterium 9 Varianten erkannt worden.

Vorsatzschale:

Das letzte Kriterium berücksichtigt, ob vor dem angeregten Bauteil eine Vorsatzschale – und wenn ja, in welcher Ausführung – vorhanden war. Hier wird unterschieden zwischen keiner Vorsatzschale, Vorsatzschale in Holzrahmenbauweise und Vorsatzschale als Sanitärsystem mit Metallprofilen.

Durch die Kombination dieser Kriterien ergeben sich für die vorliegenden Daten insgesamt 51 Kombinationen. Die Ergebnisse für alle Gruppen sind im Anhang dargestellt. Im nächsten Abschnitt werden exemplarisch 13 dieser Kombinationen gezeigt. Für diese 13 sind jeweils mindestens drei gemessene Übertragungsfunktionen vorhanden.

Im Folgenden werden Datensätze für folgende Übertragungssituationen gezeigt:

- Horizontale (direkte) Übertragung: Empfangsraum direkt hinter der angeregten Trennwand.
- Vertikale Übertragung: Empfangsraum über oder unter dem Raum in dem eine Wand angeregt wird.
- Diagonale Übertragung: Empfangsraum diagonal über oder unter der angeregten Wand.
- Übertragung vom Kellergeschoss (Anregung auf Betonwand) in darüber liegende Geschoße mit Holzbaukonstruktion.

Aufgrund der Stichprobengröße für jede Kombination wird die Darstellung mit Boxplots der Darstellung mit Mittelwert und Standardabweichung vorgezogen. Dabei stellt die Box den Interquartilsabstand und repräsentiert somit 50 % der Datensätze. Unter dem 50 Hz Terzband sind die Daten ohne Normierung auf die Nachhallzeit des Empfangsraumes dargestellt ($D_{TF,av}$, Gleichung (2.6)). Im und über dem 50 Hz Terzband sind die Daten normiert auf die Nachhallzeit dargestellt ($D_{TF,av,nT}$, Gleichung (2.7)). Unter den Abbildungen sind die Anzahl der für die jeweilige Gruppe vorhandenen Datensätze, die Zahl der Gebäude in denen diese erfasst wurden und die Zahl der Hersteller angegeben. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die

volle Stichprobengröße nicht zwingend in jedem Terzband vorhanden ist, da zum Teil aufgrund von Grundgeräuscheinflüssen o.Ä. einzelne Terzbänder in der Datenauswertung verworfen werden mussten. Abbildung 7 zeigt gruppierte Daten für horizontal/direkte Übertragung für vier verschiedene Trennwandkonstruktionen. Abbildung 8 zeigt gruppierte Daten für vertikale Übertragung wobei zwischen T- und X-Stößen als auch zwischen der Konstruktion des angeregten Bauteils unterschieden wird. Abbildung 9 zeigt Daten für diagonale Übertragung wobei zwischen X-Stößen und versetzten Stößen unterschieden wird. Abbildung 10 zeigt Daten für die Übertragung vom Kellergeschoss in darüber liegende Holzbaugeschoße. Dabei wird zwischen der Übertragung vom Kellergeschoss ins Erdgeschoss und vom Kellergeschoss ins erste Obergeschoss unterschieden. Aus den gezeigten Daten ist zu erkennen, dass der Interquartilsabstand in den einzelnen Gruppen zum größten Teil kleiner als 10 dB ist. Allerdings kann dieser in einzelnen Terzbändern auch bis zu 20 dB groß sein. Dennoch kann für jede Gruppe eine Charakteristik im Frequenzspektrum abgeleitet werden. So zeigt beispielsweise die horizontale Übertragung über eine Wand mit Einfachständerwerk ein leicht fallendes Spektrum bei tiefen- und mittleren Frequenzen, das zu hohen Frequenzen flacher wird. Für eine Doppelständerwand und direkter Übertragung zeigt sich ein stark fallendes Spektrum.

5.2.2 Ableitung von Planungsdaten aus Messdaten

Auf dieser Grundlage wurden für jede Gruppe qualitativ charakteristische Spektren abgeleitet, die sich am 75 % Quantil der Daten orientieren und somit tendenziell auf der sicheren Seite liegen. Diese qualitativen Spektren sind in Abbildung 11 für acht Gruppen dargestellt. Die Zahlenwerte sind tabellarisch im Anhang aufgelistet.

Es ist zu sehen, dass die horizontale Übertragung bei Wänden mit Einfachständerwerk (I) ohne und (II) mit Vorsatzschale im Frequenzbereich von 63 Hz to 125 Hz sehr ähnlich ist. Wie erwartet ist durch die zusätzliche Vorsatzschale, die ebenfalls in Holzrahmenbauweise konstruiert ist, bei hohen Frequenzen eine Verbesserung erkennbar.

Die direkte Übertragung über Kommunwände mit getrenntem Ständerwerk (III) weist im tiefen Frequenzbereich geringfügig niedrigere und damit günstigere Werte im Vergleich zum Einfachständerwerk auf. Hier ist auch die Masse-Feder-Masse Resonanz des Doppelwandensystems die limitierende Ei-

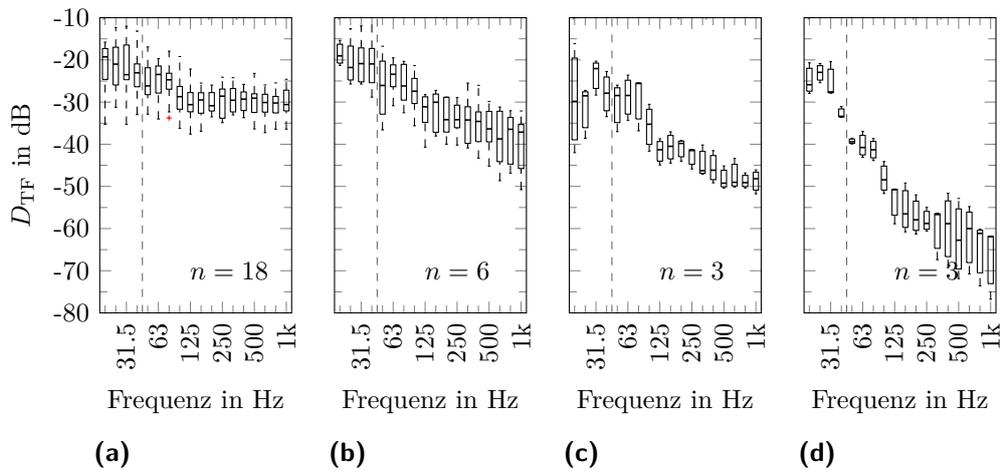


Abbildung 7 Übertragungspfad: Horizontal/direkt. (a) Einfachständerwerk ohne Vorsatzschale, (b) Einfachständerwerk mit Vorsatzschale in Holzrahmenbauweise, (c) Einfachständerwerk mit (ggf. zus. entkoppelter) Konterlattung, (d) Wohnungstrennwand, getrenntes Ständerwerk

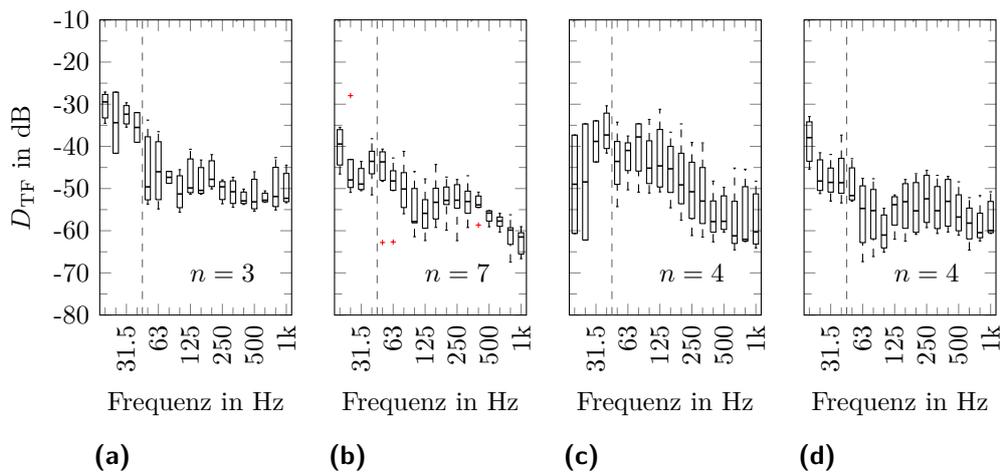


Abbildung 8 Übertragungspfad: vertikal. (a) Außenwand (T-Stoß), Holzrahmenbau, keine Vorsatzschale, (b) Außenwand (T-Stoß), Holzrahmenbau mit Installationsebene, (c) Außenwand (T-Stoß), Holzmassivbau, keine Vorsatzschale, (d) Innenwand (X-Stoß), Holzrahmenbau, keine Vorsatzschale.

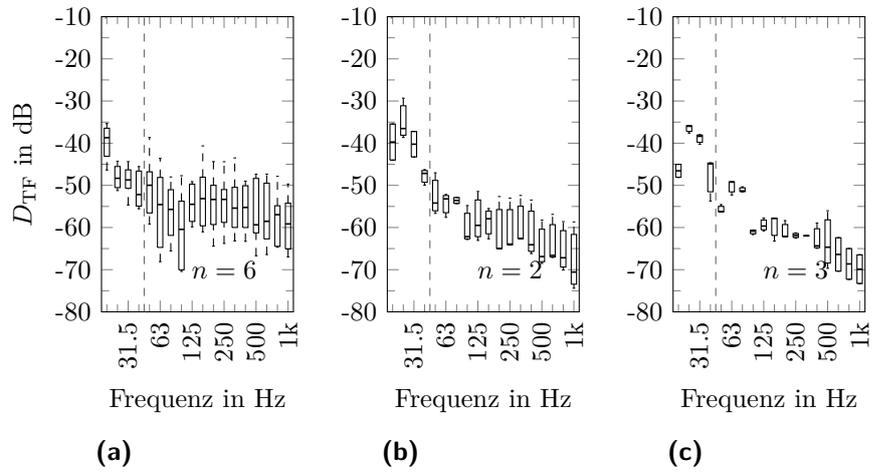


Abbildung 9 Übersicht Übertragungsfunktionen: Übertragungspfad: Vertikal.
 (a) Innenwand, X-Stoß, Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, keine Vorsatzschale, (b) Innenwand, X-Stoß mit Versatz, Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, keine Vorsatzschale, (c) Innenwand, X-Stoß mit Versatz, Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Vorsatzschale: Holzrahmenkonstruktion.

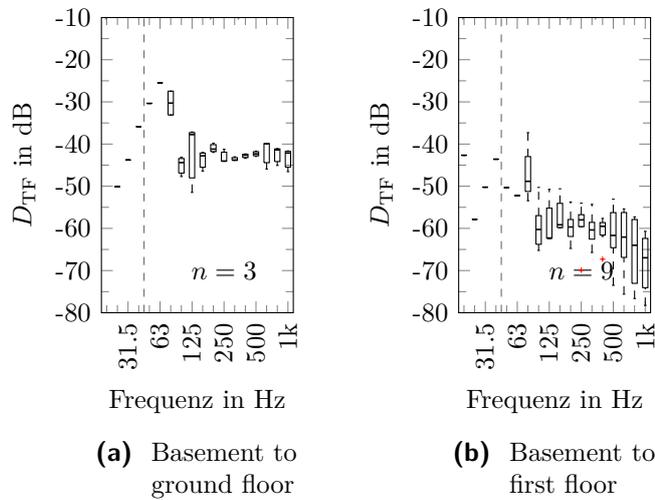
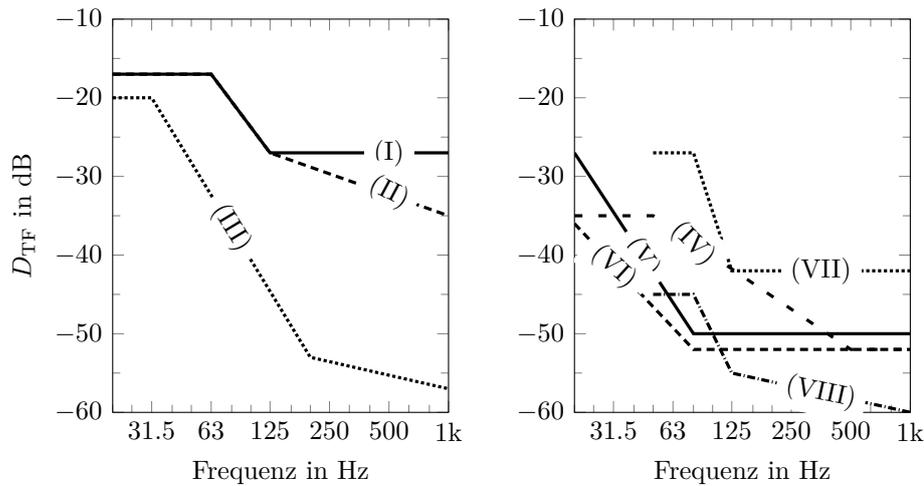


Abbildung 10 Übertragungspfad: (a) Kellergeschoss ins Erdgeschoß, (b) Kellergeschoss in 1. Obergeschoß



(a) Übertragung: Horizontal/direkt:
 (I) siehe Abb. 7a
 (II) siehe Abb. 7b
 (III) siehe Abb. 7c

(b) Übertragung über ein oder mehrere Stoßstellen
 (IV) siehe Abb. 8c
 (V) siehe Abb. 8a
 (VI) siehe Abb. 9a
 (VII) siehe Abb. 10a
 (VIII) siehe Abb. 10b

Abbildung 11 Qualitative/repräsentative Übertragungsfunktionen.

genschaft. Zu hohen Frequenzen ist eine deutliche Verbesserung aufgrund der getrennten Ständerwerke erkennbar.

Diagonale (V) und vertikale Übertragung (VI) in Gebäuden mit Einfachständerwerk weisen generell ein sehr ähnliches Verhalten auf. Die Werte der vertikalen Übertragung liegen allerdings tendenziell höher, da der Übertragungsweg auf die gegenüberliegende Wandseite entfällt. Der spektrale Verlauf für vertikale Übertragung im Holzmassivbau weicht von der ähnlichen Übertragungssituation in Holzrahmenbauweise ab.

Gruppen (VII) und (VIII) zeigen Daten für die Übertragung von massiven Kellerwänden (Beton oder Mauerwerk) auf vertikalem Weg in die Holzrahmenkonstruktion im Erdgeschoss oder Obergeschoss. Hier sind bei tiefen Frequenzen keine Daten vorhanden, da die schweren Wände nicht ausreichend angeregt werden konnten um genügend Signal-zu-Rausch-Abstand für die Schalldruckmessung zu erzielen. Es ist jedoch nahezu eine parallele

Verschiebung der zwischen der Übertragung ins Erdgeschoss zur Übertragung ins Obergeschoss von 15 dB to 20 dB zu erkennen. Die Daten für die Übertragung ins Erdgeschoss weisen im Vergleich zur diagonalen und vertikalen Übertragung in reiner Holzrahmenkonstruktion (Gruppe (V) und (VI)) relative hohe Werte auf. Hier ist zu berücksichtigen, dass D_{TF} mit der installierten Leistung gebildet wird, wodurch nur die Körperschallübertragung im Gebäude, unabhängig von der Anregbarkeit der Wände oder Decken beschrieben wird. Die deutlich niedrigere Anregbarkeit (Admittanz) der Kellerwände im Vergleich zu Holzrahmenbauwänden kommt deshalb hier nicht zu tragen. Dies wird im folgenden Anwendungsbeispiel verdeutlicht.

5.3 Beispiel zur Anwendung des Prognoseverfahren

In diesem Abschnitt wird die Anwendung der gemessenen und qualitativ zusammengefassten Übertragungsdaten aus Abbildung ?? anhand einer fiktiven Quelle [Schöpfer, Mayr und Schanda 2018] beschrieben.

Wie zum Beispiel in [Scheck u. a. 2016] oder [Schöpfer, Hopkins u. a. 2017a] ersichtlich, weisen typische gebäudetechnische Geräte Anregespektren mit maßgeblichen Komponenten bei tiefen Frequenzen auf. Für die Aktivität (hier die freie Schnelle, v_f) der fiktiven Quelle wurde aus diesem Grund ein mit der Frequenz abfallendes Spektrum gewählt (siehe Abbildung 12 links), das gemäß bisheriger Erfahrung im Bereich üblicher Geräte liegt. Für die Admittanz der Quelle wurde ein frequenzunabhängiger Wert von $1 \times 10^{-4} \text{ m}/(\text{Ns})$ gewählt. Dies entspricht in etwa der Größenordnung eines kompakten, wandhängenen Lüftungsgerätes wie in Schöpfer, Hopkins u. a. 2017a gezeigt.

In Abhängigkeit der Empfangsstruktur kann für diese Quelle nach Gleichung (5.1) [DIN EN 15657:2017-10] die installierte Leistung berechnet werden.

$$L_{W,\text{inst}} = \left[10 \lg \left(\frac{\text{Re}\{Y_{R,\text{eq}}\} Y_0}{|Y_{S,\text{eq}}|^2 + |Y_{R,\text{eq}}|^2} \right) \right] \text{dB} \quad (5.1)$$

$$+ L_{vf} - 60 \text{ dB}$$

Dabei ist L_{vf} der Pegel der freien Schnelle von der fiktiven Körperschallquelle und $Y_{S,\text{eq}}$ deren Admittanz (Source). Dies entspricht dabei der Näherung, dass die Quelle einen äquivalenten Kontaktpunkt mit der Struktur hat.

Entsprechend ist $Y_{R,eq}$ die Admittanz der Empfangsstruktur an diesem Punkt. (Receiver) und Y_0 die Bezugsadmittanz von $1 \text{ m}/(\text{N s})$.

In Abbildung 12 ist die installierte Leistung $L_{W,inst}$ für zwei verschiedene Empfangsstrukturen dargestellt. Dabei entspricht eine Admittanz von $1 \times 10^{-4} \text{ m}/(\text{N s})$ in der Größenordnung einer Holzständerwand im Bereich der Wandriegel [siehe z.B. Mayr und Gibbs 2016], $4 \times 10^{-5} \text{ m}/(\text{N s})$ einer Holzmassivwand und $1 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{N s})$ einer massiven Kelleraussenwand. Dabei ist erkennbar, dass der installierte Körperschalleistungspegel für die gleiche Quelle an einer schweren Massivwand geringer ist.

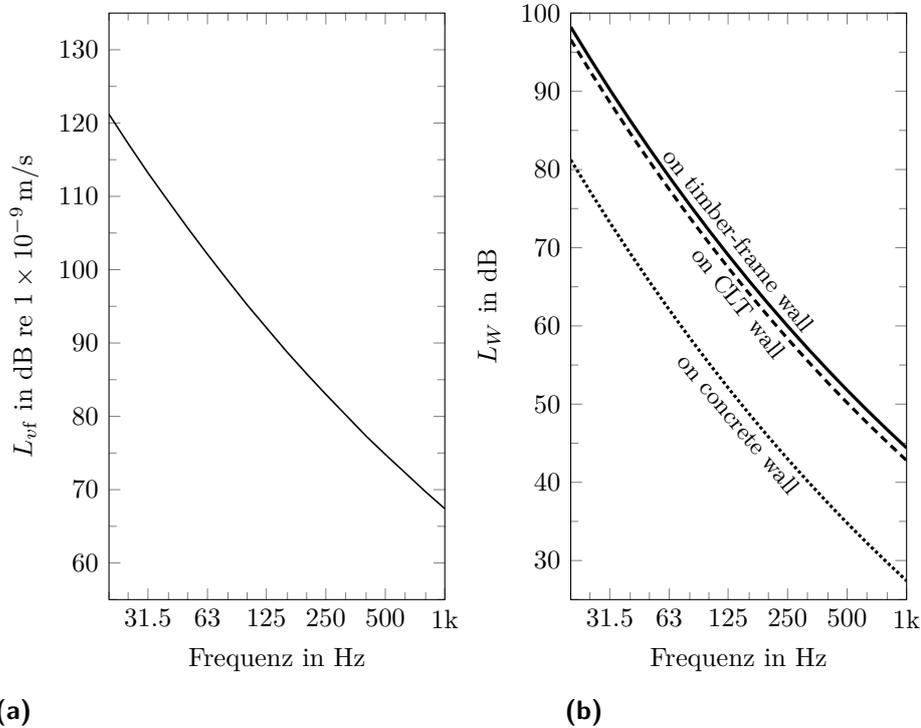


Abbildung 12 Daten der fiktiven Quelle. (a) Pegel der freien Schnelle, L_{vf} . (b) Installierter Körperschalleistungspegel, $L_{W,inst}$, der Quelle mit $Y_S = 1 \times 10^{-4} \text{ m}/(\text{N s})$ an einer Holzrahmenbauwand ($Y_R = 1 \times 10^{-4} \text{ m}/(\text{N s})$) sowie an einer Massivwand ($Y_R = 5 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{N s})$).

Die installierte Leistung dieser fiktiven Quelle dient nun als Eingangsgröße um durch Umstellen von Gleichung (2.5) den Schalldruckpegel in den Übertragungssituationen aus Abbildung ?? zu berechnen. Dabei wurde für die Gruppen (I), (II), (III), (V) und (VI) die installierte Leistung an einer Holzrahmenbauwand verwendet, da hier das angeregte Bauteil ebenfalls eine Wand in Holzbauweise war. Für die Gruppe (IV) wurde die installierte Leistung an einer Holzmassivwand verwendet und für die Gruppen (VII) und (VIII) die Leistung an einer Betonwand. Die resultierenden Schalldruckpegel für die acht Gruppen sind in Abbildung 13 als A-bewertete Spektren dargestellt.

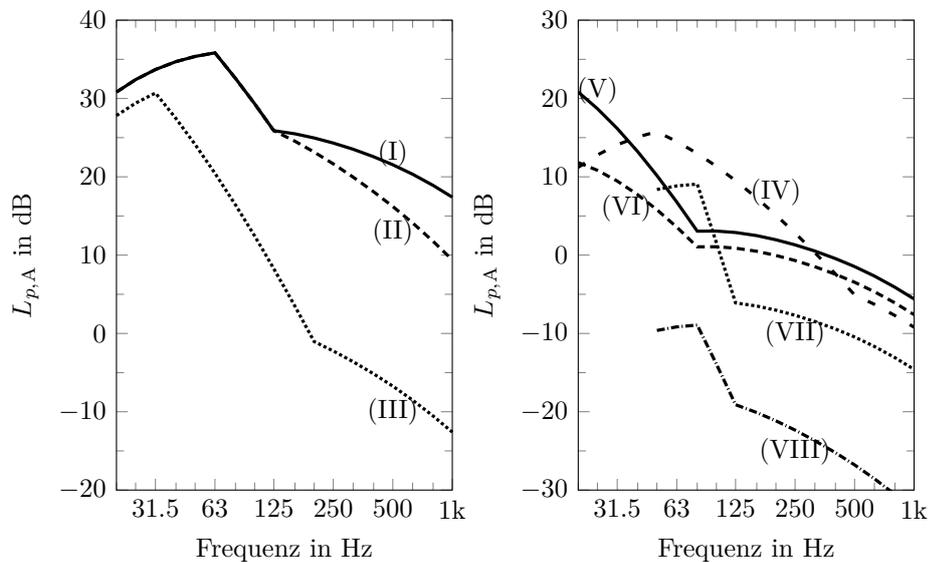


Abbildung 13 Resultierende A-bewertete Schalldruckpegel für eine fiktive Quelle (siehe Abbildung 12) in den in Abbildung 11 dargestellten Übertragungssituationen.

Da es sich um eine fiktive Situation handelt, soll der Fokus weniger auf den absoluten Schalldruckpegeln liegen. Aus diesem Grund sind in der Abbildungsbeschriftung die A-bewerteten Summenpegel relativ zueinander aufgeführt. Gruppen (II) bis (VI) sind auf Gruppe (I) bezogen und Gruppe (VIII) auf (VII). Der A-bewertete Summenpegel für Gruppen (I) bis (VI)

wurde von 20 Hz to 1000 Hz und für Gruppen (VII) und (VIII) von 50 Hz to 1000 Hz gebildet.

Die dargestellten Schalldruckpegel zeigen den Spektralen Verlauf für eine Quelle in verschiedenen Einbausituationen. Es ist allerdings zu erkennen, dass sich der A-bewertete Summenpegel für direkte/horizontale Übertragung durch eine übliche Innenwand in Holzrahmenbauweise mit und Vorsatzschale nicht unterscheidet. Auch für eine Wohnungstrennwand mit getrenntem Ständerwerk ist der Summenpegel um nur 7 dB niedriger im Vergleich zur Wand mit Einfachständerwerk. Dabei ist für das getrennte Ständerwerk eine signifikante Verbesserung zu hohen Frequenzen ersichtlich. Für vertikale Übertragung unterscheidet sich der spektrale Verlauf für Holzrahmen- und Holzmassivkonstruktionen. Dennoch unterscheidet sich der A-bewertete Summenpegel um 2 dB. Im Vergleich zur horizontalen Übertragung ist der Summenpegel um ≈ 20 dB niedriger. Für die diagonale Übertragung ist Summenpegel um um ≈ 25 dB niedriger. Vergleicht man die Übertragung vom Kellergeschoss ins Erdgeschoss mit der Übertragung ins Obergeschoss so ist ein Unterschied von ≈ 17 dB erkennbar. Der Schalldruckpegel bei der Übertragung vom Kellergeschoss ins Erdgeschoss ist in etwa in der Größenordnung für die vertikale oder diagonale Übertragung in reiner Holzbauweise obwohl die installierte Leistung der Quelle deutlich niedriger ist. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Übertragung vom massiven Kellergeschoss ins darüber liegende Erdgeschoss effektiver ist wie Abbildung 11 ersichtlich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Prognose des Schalldruckpegels aus gebäudetechnischen Anlagen erscheint der vorgeschlagene Ansatz basierend auf gemessenen Übertragungsfunktionen als praktikabel und in absehbarer Zeit in der Praxis anwendbar. Die hierfür benötigte Datengrundlage konnte im Rahmen dieses Projektes wesentlich erweitert werden. Dabei wurden die bereits vorhandenen Daten zum Einen durch Messungen in Gebäuden mit Wohneigentumstrennung und zum Anderen durch Messungen in Gebäuden in Holzmassivbauweise ergänzt. Insgesamt liegen nun 120 gemessene Übertragungsfunktionen aus 19 Gebäuden in Holzbauweise vor. Für die experimentellen Erfassung der Daten wurde die vorhandene Messmethode angewandt. Dabei wurde der Messablauf sowie die Messausrüstung optimiert, um den Signal-zu-Rausch-Abstand zu verbessern und zusätzlich effektiver zu sein um die engen Zeitfenster im Rahmen von Baumessung effizient zu nutzen.

Um ein empirisches Prognosemodell abzuleiten wurden die vorhandenen Daten anhand von Kategorien in Bezug auf die Konstruktion, den Bauteiltyp, den Übertragungspfad sowie unter Berücksichtigung zusätzlicher Vortragschalen gruppiert. Dabei ergeben sich aus den vorhandenen Daten 51 Gruppen. Die individuellen Gruppen weisen Charakteristika im Frequenzspektrum auf. Darauf aufbauend wurden repräsentative Spektren für die Übertragungsfunktionen von Gruppen mit mindestens drei Datensätzen abgeleitet. Sind Eingangsdaten für eine gebäudetechnische Anlage vorhanden, ist damit nun erstmals eine Abschätzung des resultierenden Schalldruckpegels im Holzbau möglich.

Das vorgeschlagene Verfahren ist allerdings nicht nur auf eine Anwendung im Holzbau beschränkt. Übertragungsfunktionen können auch im Massivbau gemessen oder nach den vorhandenen Prognosemethoden berechnet und katalogisiert werden. Dies könnte für die Anwendung in der Planungspraxis ein interessanter Ansatz sein.

Auf der bisher vorhandenen Datengrundlage ist die Unsicherheit der Abschätzung noch nicht quantifizierbar. Zudem ist zu beachten, dass die Untersuchungen zur Körperschallanregung zeigen, dass eingeleitete Momente ähnlich effizient zum Schalldruckpegel beitragen. Die gemessenen Übertragungsfunktionen bilden allerdings nur eine Kraftanregung senkrecht zur Bauteiloberfläche ab. In früheren Untersuchungen konnte allerdings in Fallstudien gezeigt werden, dass eine Kraftanregung in der Regel dominiert. Um dies auf eine breitere Basis zu stellen sind weitere Untersuchungen zu den Eingangsdaten von gebäudetechnischen Anlagen notwendig. Dies nicht nur in Bezug auf die Anregekomponenten erforderlich; bisher ist noch nicht bekannt, dass Quelldaten von Herstellern verfügbar sind, die für eine Prognose herangezogen werden könnten. Die vorhandenen Eingangsdaten sind an den jeweiligen Forschungsinstituten im Rahmen von Fallstudien ermittelt worden. Ein wichtigen Anknüpfungspunkt für zukünftige Forschungsthemen stellt deshalb die Ermittlung von Eingangsdaten für die Prognose dar.

Ebenfalls ist die weiterführende Sammlung von gemessenen Übertragungsfunktionen ein wichtiger Aspekt um das vorgeschlagenen empirische Prognoseverfahren auf eine breitere Datenbasis zustellen. Somit können weitere Situationen im Katalog abgebildet werden für die durch ausreichend große Stichproben auch eine Abschätzung der Prognoseunsicherheit möglich ist.

7 Projektbewertung und Transferkonzept

7.1 Vergleich der erzielten Ergebnisse mit dem Arbeitsplan

Arbeitspaket 1 (Erstellen der Mess- und Auswerteroutinen) wurde erfolgreich bearbeitet. Die vorhandenen Routinen wurden optimiert und weiterentwickelt. Arbeitspaket 2 (Auswahl repräsentativer Gebäude und Konstruktionen) wurde in Abstimmung mit den Industriepartnern bearbeitet. Es konnten verschiedene Gebäudetypen, vom Einfamilienhaus bis zum Holzhochhaus untersucht werden. Dennoch ist zu bemerken, dass der Ansatz eines empirischen Modells eine große Datenbasis benötigt. Demnach ist die Sammlung von Daten weiterhin notwendig, obwohl im Rahmen dieses Projektes schon eine Vielzahl von Übertragungssituationen erfasst wurden. Arbeitspaket 3 (Laborstudien zur Körperschallanregung, -übertragung und -abstrahlung) wurde in Bezug auf die Körperschallanregung, vor allem durch Momente bearbeitet. Zur Körperschallübertragung und Abstrahlung ergaben sich aus der Literatur ausreichende Erkenntnisse die zur Interpretation der Untersuchungen in diesem Projekt ausreichend. Arbeitspaket 4 (Planung und Durchführung von Bau- und Labormessungen) wurde erfolgreich bearbeitet obwohl sich die Terminierung von Baumessungen schwierig gestaltet hat. Dennoch konnten durch die optimierten Messmethoden Zeitfenster in den eng getakteten Bauzeitenplänen gefunden werden. Arbeitspaket 5 (Datenanalyse der Bau- und Labormessungen) wurde bearbeitet. Die Erkenntnisse der Labormessungen stellen die Grundlagen zum Verständnis der Anregemechanismen dar. Die im Rahmen von Baumessungen ermittelten Daten wurden für das empirische Prognosemodell aufbereitet. Arbeitspaket 6 (Untersuchungen zu relevanten Normierungsgrößen) kann als ebenso abgeschlossen gelten, da Betrachtungen hierzu parallel zur Bearbeitung des Arbeitspaketes 5 angestellt wurden und letztendlich als Pegeldifferenz der Übertragungsfunktion D_{TF} in einen Normvorschlag zur Überarbeitung der

EN 12354-5:2009 einmündeten. In Arbeitspaket 7 (Erstellung und Validierung Prognosemodell) ergänzend zu früheren Fallstudien zur Validierung die Anwendung des Verfahrens anhand einer fiktiver Körperschallquelle dargestellt.

7.2 Forschungs- und Normungsarbeit

Die Erkenntnisse des Projektes fließen in die Normungsarbeit ein. So ist das Messverfahren nun in der ISO 10848-1:2017 beschrieben. Zudem fließt der Ansatz des empirischen Prognoseverfahrens in die Überarbeitung der EN 12354-5:2009 ein. Die Erkenntnisse wurden während und nach der Projektlaufzeit auf nationalen und internationalen Fachkongressen vorgestellt: [Schöpfer 2017; Schöpfer, Hopkins u. a. 2017a; Schöpfer, Hopkins u. a. 2017c; Schöpfer, Mayr und Schanda 2018; Mayr, Schöpfer u. a. 2018; Schöpfer 2019a; Schöpfer, Mayr und Schanda 2019].

7.3 Baupraxis

Ein Ziel des Forschungsvorhabens war es ein praktikables Ingenieurersatzverfahren zu entwickeln, das zeitnah Anwendung in der Planungspraxis finden kann. Hierfür wurden die Erkenntnisse nicht nur dem Fachpublikum im Bereich der Bauakustik [Schöpfer, Hopkins u. a. 2017a; Schöpfer, Hopkins u. a. 2017c; Schöpfer, Mayr und Schanda 2018; Mayr, Schöpfer u. a. 2018; Schöpfer, Mayr und Schanda 2019] sondern auch dem Fachpublikum im Bereich Holzbau vorgestellt [Schöpfer 2017; Schöpfer 2019a]. Parallel werden die Ergebnisse des Projektes in die Lehre an der TH Rosenheim im Rahmen von Vorlesungen eingebunden. Desweiteren wurden studentische Hilfskräfte durch die Mitarbeit im Projekt (zum Beispiel auf Baumessungen) an das Thema herangeführt. Im Rahmen von Projektsitzungen mit den beteiligten Firmen wurden die Erkenntnisse präsentiert und diskutiert. Die positive Resonanz vor allem in Bezug auf die praktikable Anwendung ist vielversprechend in Bezug auf eine zeitnahe Anwendung in der Praxis. Durch die Aufnahme in der ISO 10848-1:2017 ist ein normiertes Verfahren vorhanden das die Erweiterung des Datensatzes auch durch andere Institute ermöglicht. Ein weiterer positiver Schritt in Richtung der Anwendung in der Praxis ist die Berücksichtigung der Verfahrens in der Überarbeitung der EN 12354-5:2009, welche die Prognose von Installationsgeräuschen beschreibt.

Repräsentative Übertragungsfunktionen

In der folgenden Tabelle sind die Zahlenwerte der in Abbildung 11 gezeigten repräsentativen Spektren aufgeführt. Zur Abschätzung des Schalldruckpegels aus gebäudetechnischen Anlagen ist allerdings zu beachten, dass die Prognoseunsicherheit auf der Grundlage der vorhandenen Daten derzeit noch nicht quantifiziert werden kann. Zudem ist zu beachten, dass die Werte im und unter dem 40 Hz Terzband auf Daten beruhen, die nicht auf die Nachhallzeit bezogen sind.

Tabelle 1 Repräsentative Übertragungsfunktionen (Siehe Abschnitt 5.2.2)

f / Hz	I	II	III	IV	V	VI	VI	VIII
20	-17	-17	-20	-35	-27	-36	-	-
25	-17	-17	-20	-35	-31	-39	-	-
32	-17	-17	-20	-35	-35	-41	-	-
40	-17	-17	-24	-35	-39	-44	-	-
50	-17	-17	-28	-35	-42	-47	-27	-45
63	-17	-17	-32	-37	-46	-49	-27	-45
80	-20	-20	-37	-38	-50	-52	-27	-45
100	-24	-24	-41	-40	-50	-52	-35	-50
125	-27	-27	-45	-42	-50	-52	-42	-55
160	-27	-28	-49	-44	-50	-52	-42	-56
200	-27	-29	-53	-45	-50	-52	-42	-56
250	-27	-30	-54	-47	-50	-52	-42	-57
315	-27	-31	-54	-49	-50	-52	-42	-57
400	-27	-31	-55	-50	-50	-52	-42	-58
500	-27	-32	-55	-52	-50	-52	-42	-58
630	-27	-33	-56	-52	-50	-52	-42	-59
800	-27	-34	-56	-52	-50	-52	-42	-59
1000	-27	-35	-57	-52	-50	-52	-42	-60

I: Horizontal/direkt, Einfachständerwerk, Innenwand, keine Vorsatzschale

II: Horizontal/direkt, Einfachständerwerk, Innenwand, Vorsatzschale: Holzrahmenbaukonstruktion

III: Horizontal/direkt, getrenntes Ständerwerk, Wohnungstrennwand, keine Vorsatzschale

IV: Vertikal, T-Stoß, Holzmassivkonstruktion, Außenwand, keine Vorsatzschale

V: Vertikal, T-Stoß, Einfachständerwerk, Außenwand, keine Vorsatzschale

VI: Diagonal, X-Stoß, Einfachständerwerk, Innenwand, keine Vorsatzschale

VII: Vertikal, T-Stoß, Betonwand, Kelleraußenwand, keine Vorsatzschale (ER im Erdgeschoß)

VIII: Vertikal, T-Stoß, Betonwand, Kelleraußenwand, keine Vorsatzschale (ER im 1. Obergeschoß)

Ergebnisse der Baumessungen

Im Folgenden sind alle Ergebnisse der Baumessungen dargestellt. Die Daten sind wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, gruppiert dargestellt. Wenn der Signal-zu-Rausch-Abstand unzureichend war, wurde gegebenenfalls einzelne Terzbänder verworfen, weshalb manchen Datensätze Lücken im Spektrum aufweisen.

Über jeder Grafik sind die vier Kriterien beschrieben, die jede Gruppe einzigartig machen. Zusätzlich ist angegeben wie viele Datensätze für die Gruppe bisher vorhanden sind. Des weiteren ist aufgelistet wie viele verschiedene Hersteller, individuelle Gebäude sowie Gebäudetypen (z.B. Einfamilienhaus, Mehrfamilien- oder Bürogebäude) in der gezeigten Gruppe enthalten sind.

Gruppe 1

Übertragungspfad: Diagonal mit Versatz

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

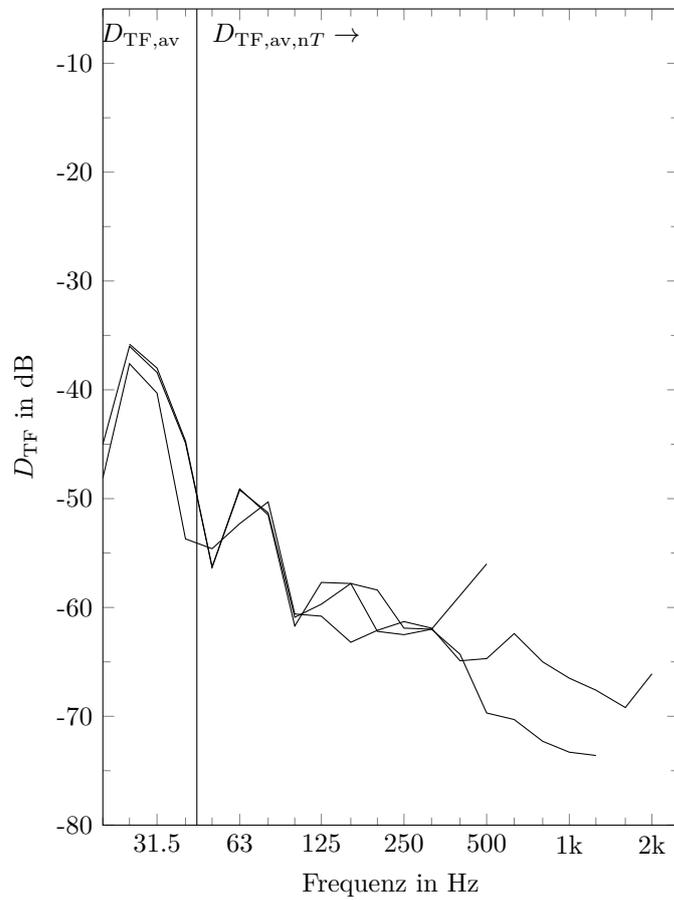
Vorsatzschale: Holzrahmenkonstruktion

Datensätze: 3

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 2

Übertragungspfad: Diagonal mit Versatz

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

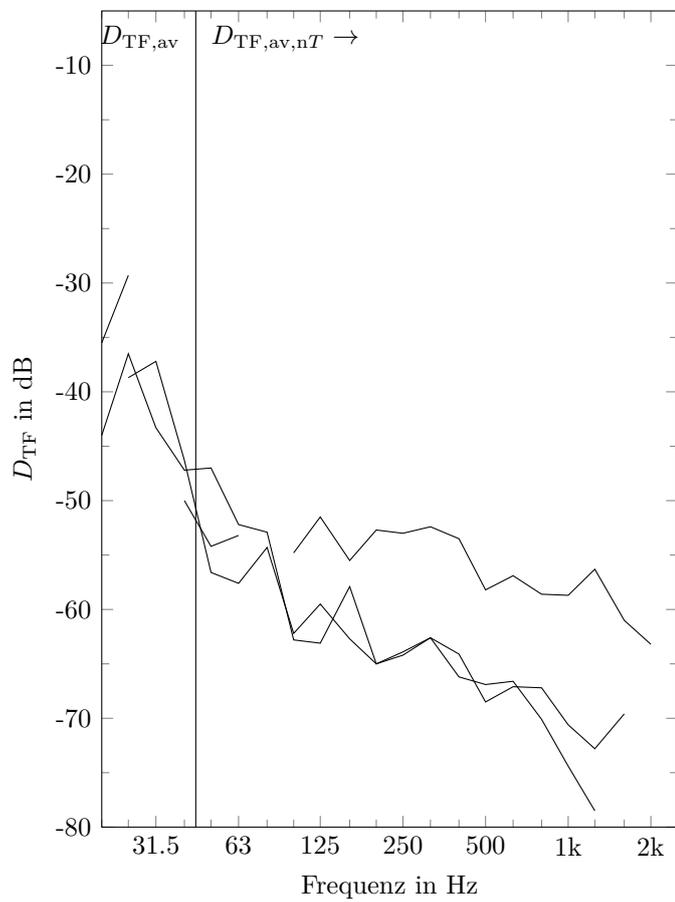
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 3

Anzahl verschiedener Hersteller: 3

Anzahl verschiedener Gebäude: 3

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Gruppe 3

Übertragungspfad: Diagonal mit Versatz (ER über od. unter anger. Wand)

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

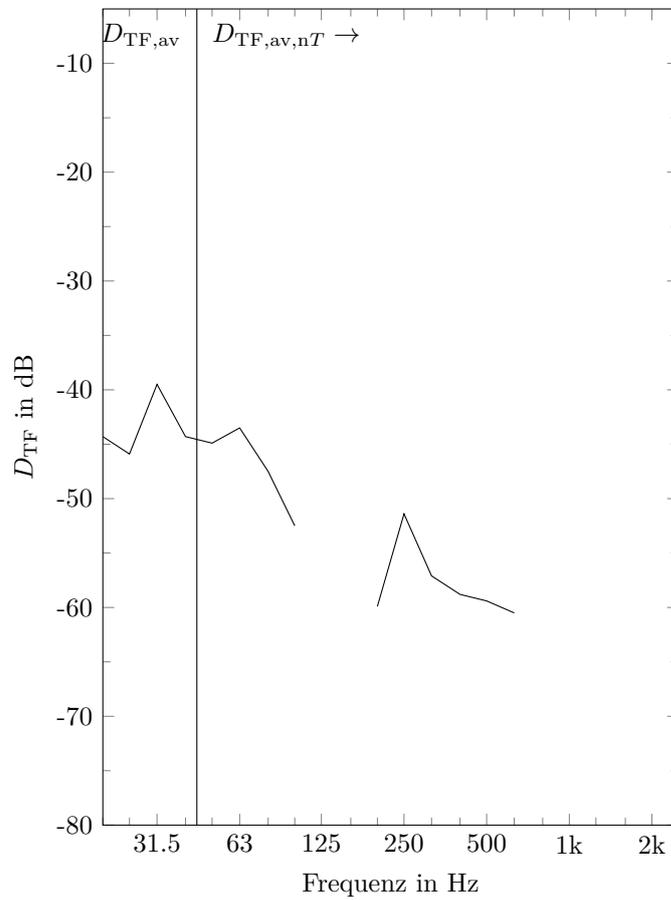
Vorsatzschale: Holzrahmenkonstruktion

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 4

Übertragungspfad: Diagonal mit Versatz (ER über od. unter anger. Wand)

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

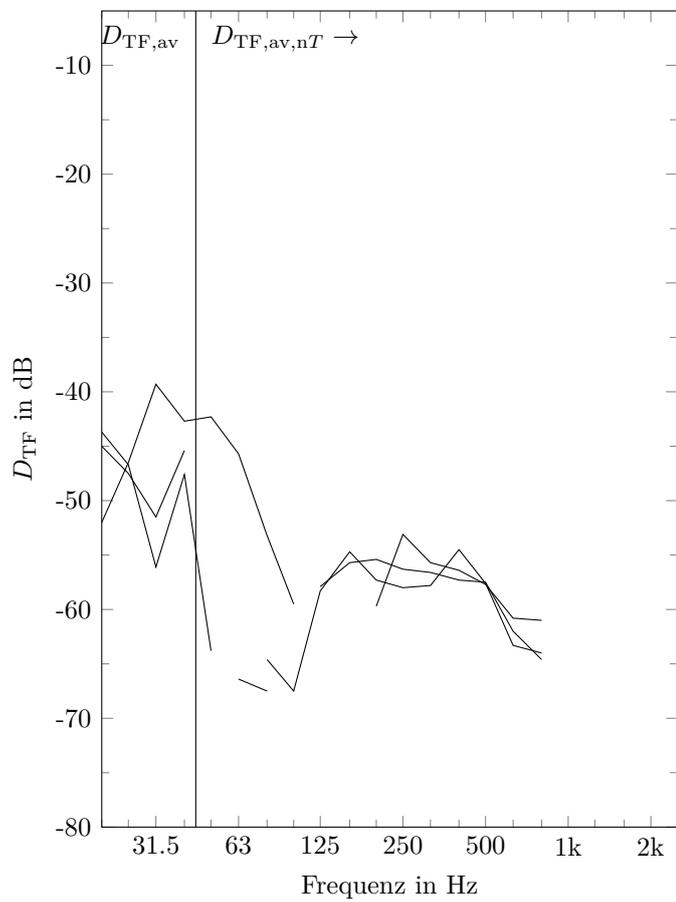
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 3

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 2

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 5

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Kellerwand, innen

Konstruktion des angeregten Bauteils: Mauerwerk

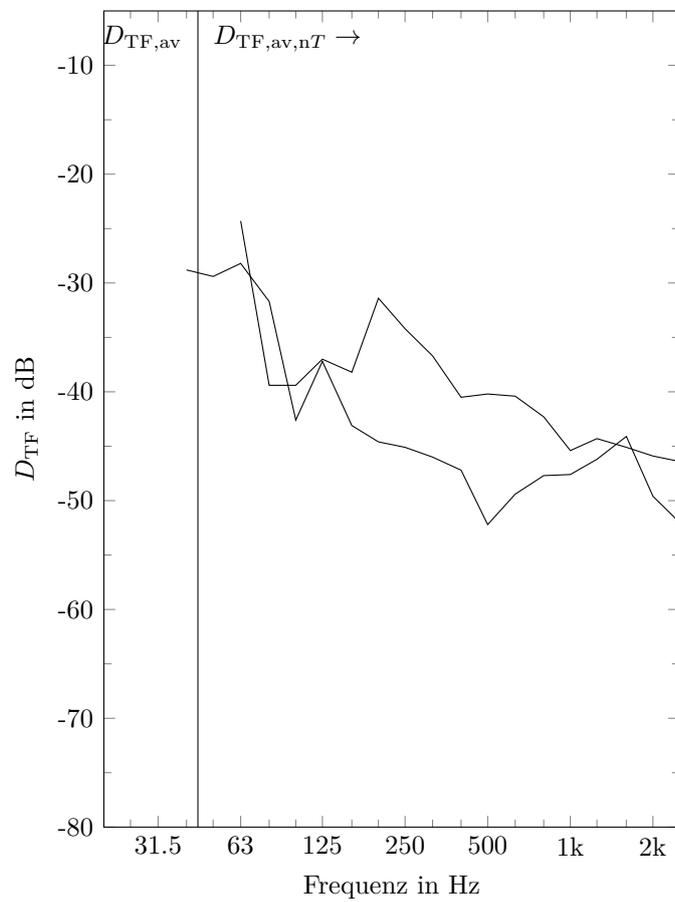
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 2

Anzahl verschiedener Hersteller: 2

Anzahl verschiedener Gebäude: 2

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 6

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoß (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Kellerwand, innen

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

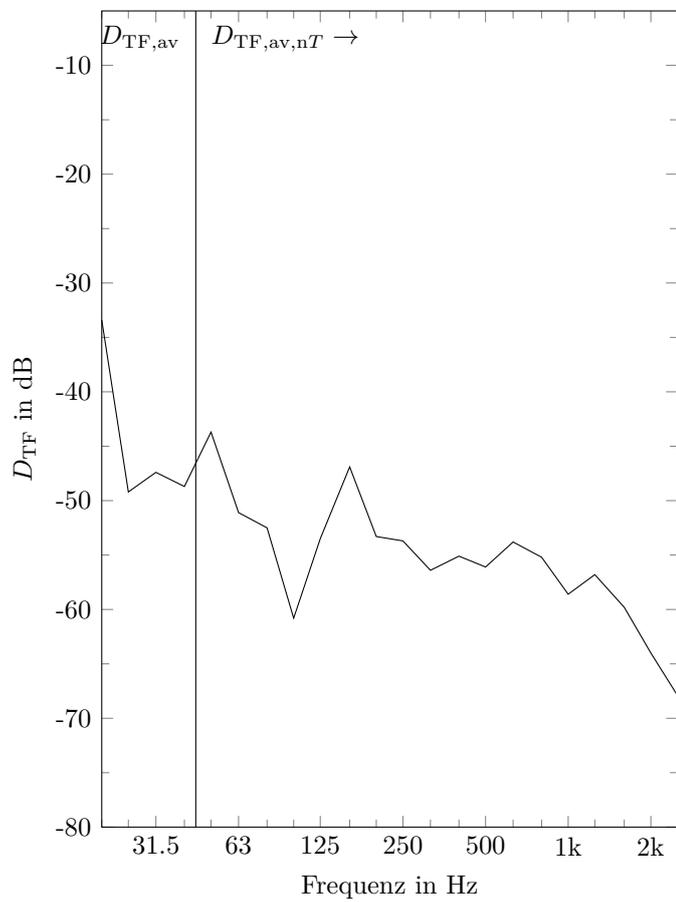
Vorsatzschale: Holzrahmenkonstruktion

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 7

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Kellerwand, innen

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

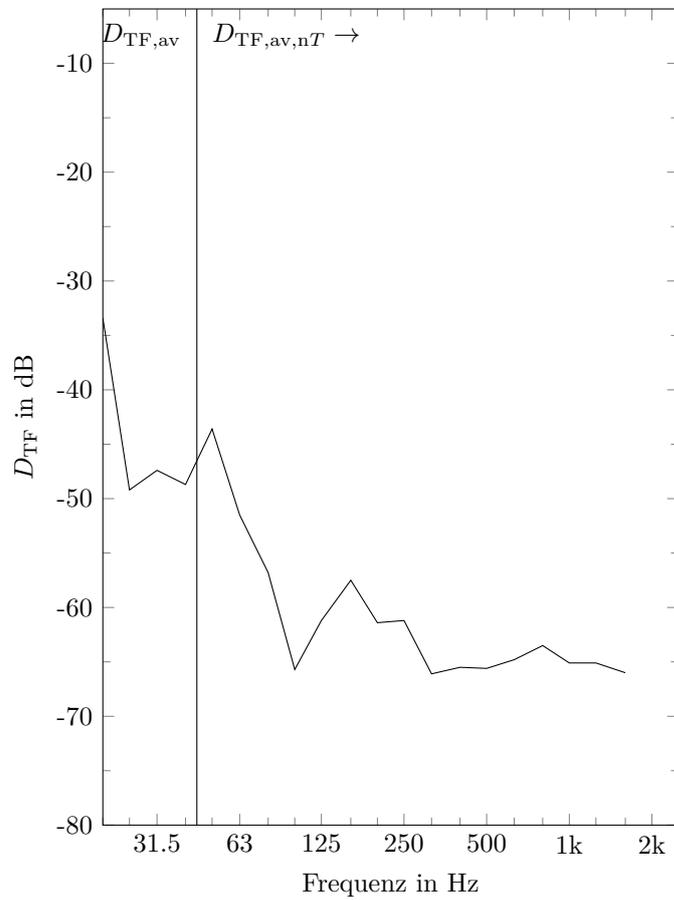
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 8

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoß (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

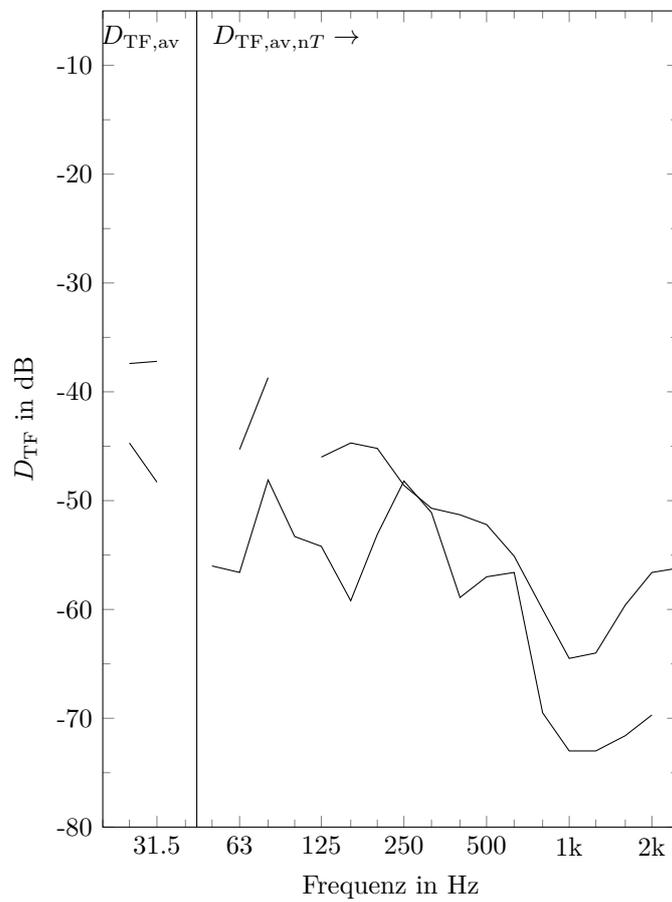
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 2

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 9

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoß (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Trockenbauwand (Metallprofile)

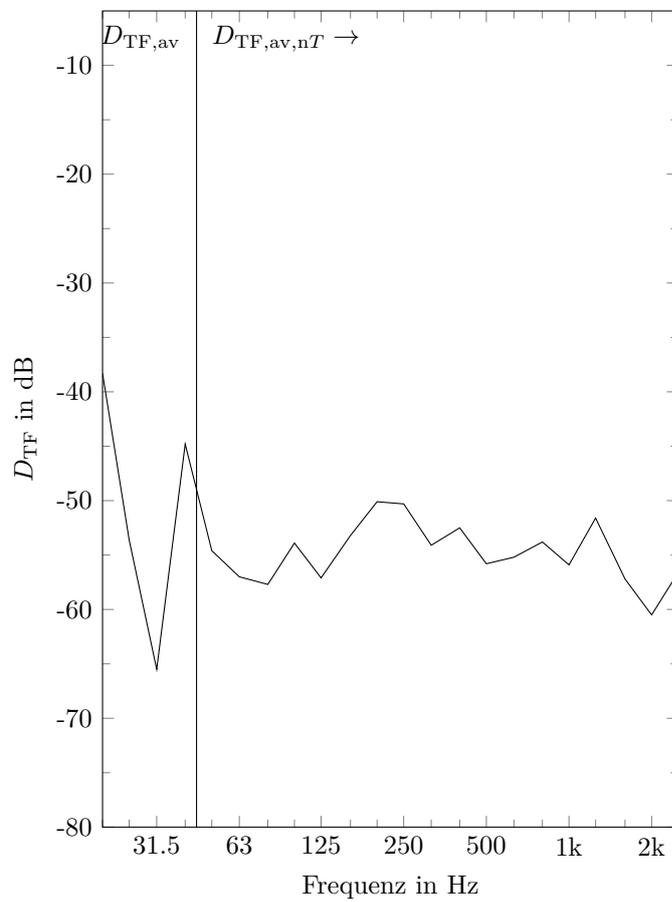
Vorsatzschale: Trockenbau (Metallprofil) oder Sanitärsystem

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 10

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Trockenbauwand (Metallprofile)

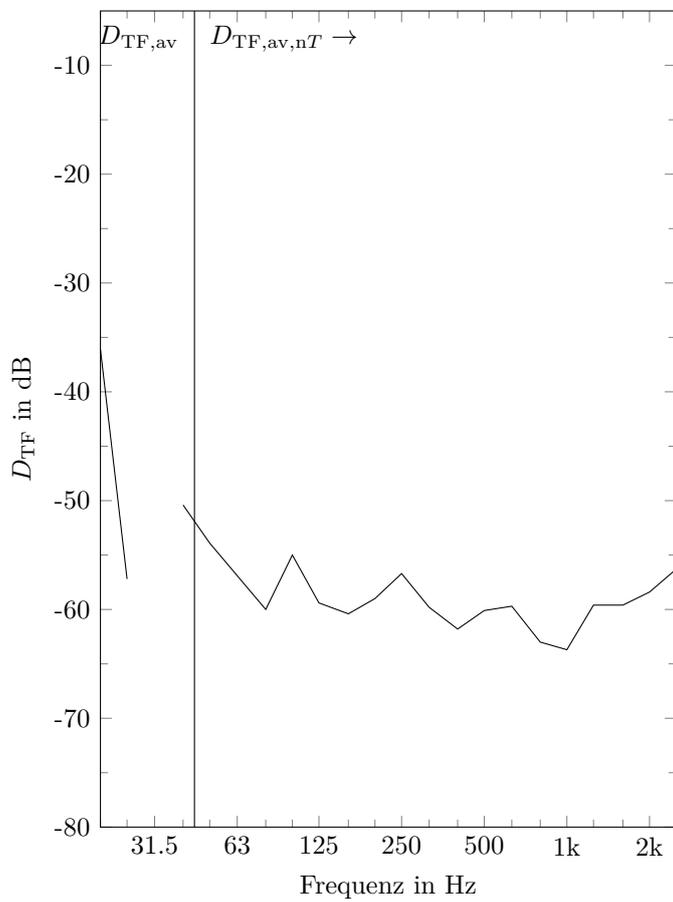
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 11

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

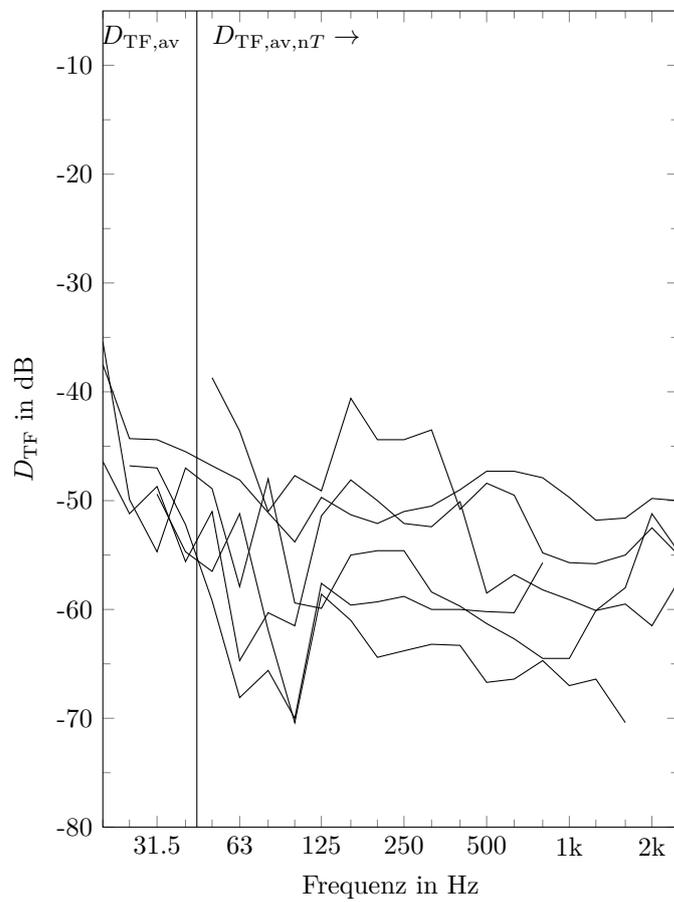
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 6

Anzahl verschiedener Hersteller: 4

Anzahl verschiedener Gebäude: 6

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Gruppe 12

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Installationsebene bzw. Konterlattung

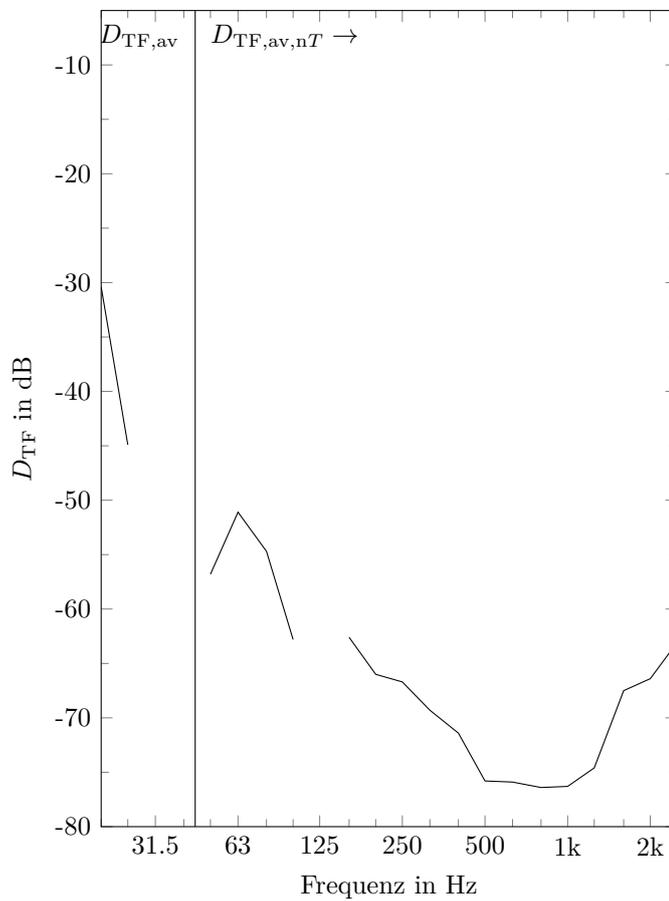
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 13

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Wohnungstrennwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Installationsebene bzw. Konterlattung

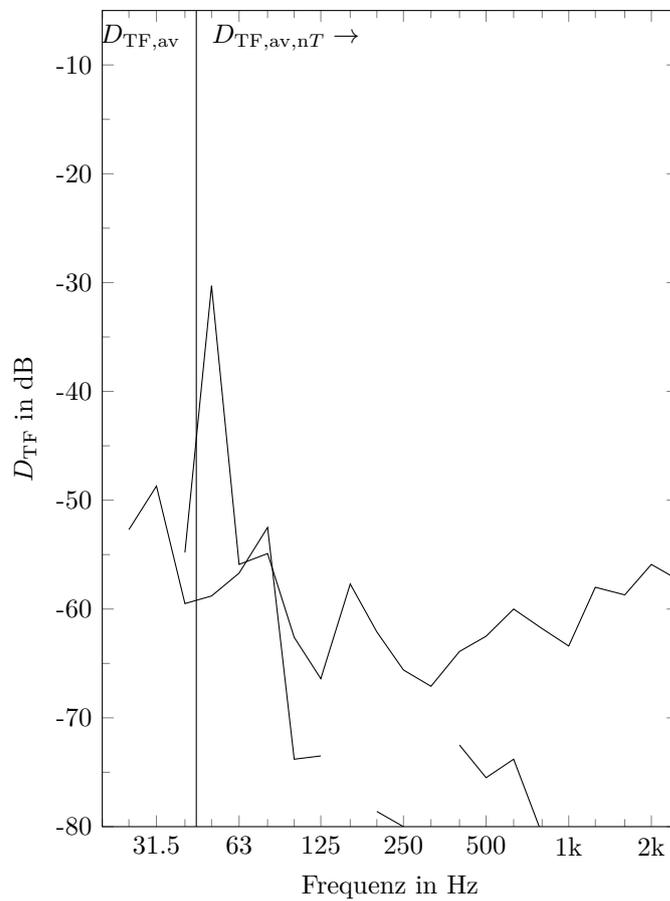
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 2

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 14

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Wand-Decke)

Typ des angeregten Bauteils: Installationswand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Installationswand

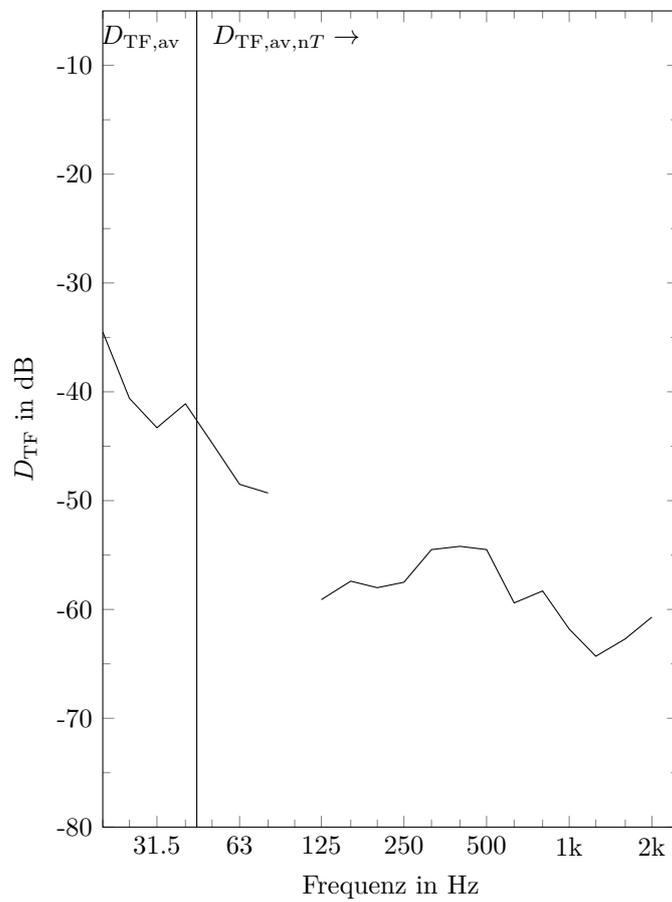
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Ergebnisse der Baumessungen

Gruppe 15

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Wand-Wand)

Typ des angeregten Bauteils: Boden, Trenndecke

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

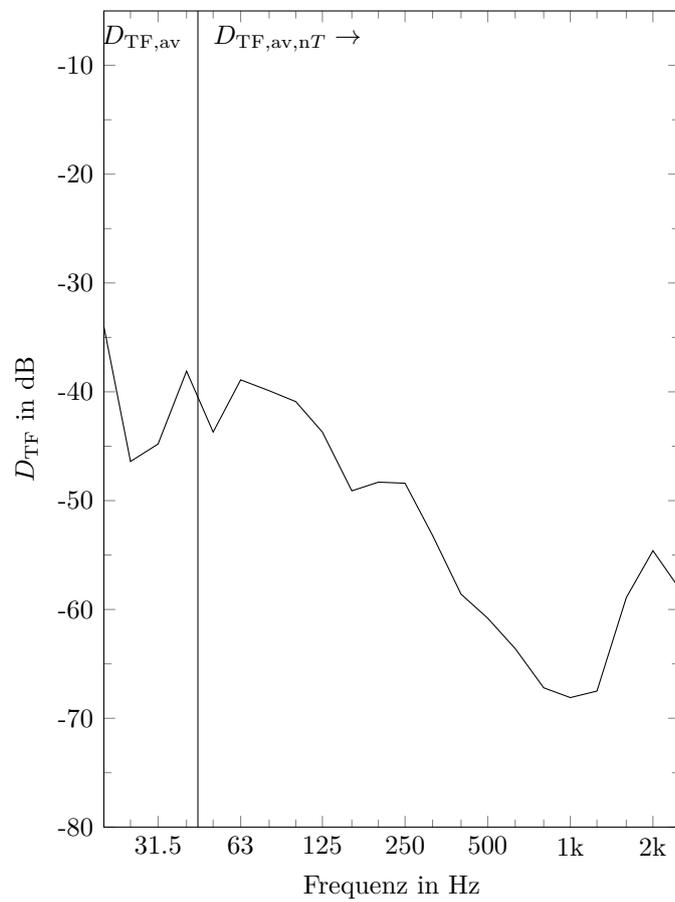
Vorsatzschale: Schwimmender Estrich

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 16

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoß (Decke-Wand)

Typ des angeregten Bauteils: Wohnungstrennwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, getrenntes Ständerwerk

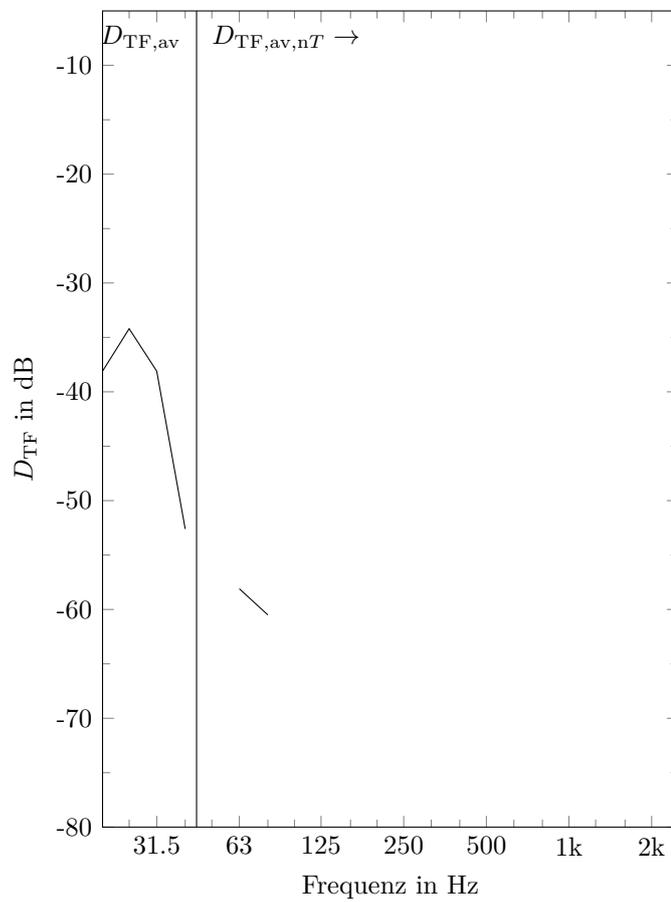
Vorsatzschale: Trockenbau (Metallprofil) oder Sanitärsystem

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Ergebnisse der Baumessungen

Gruppe 17

Übertragungspfad: Diagonal, X-Stoss (Decke-Wand)

Typ des angeregten Bauteils: Wohnungstrennwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, getrenntes Ständerwerk

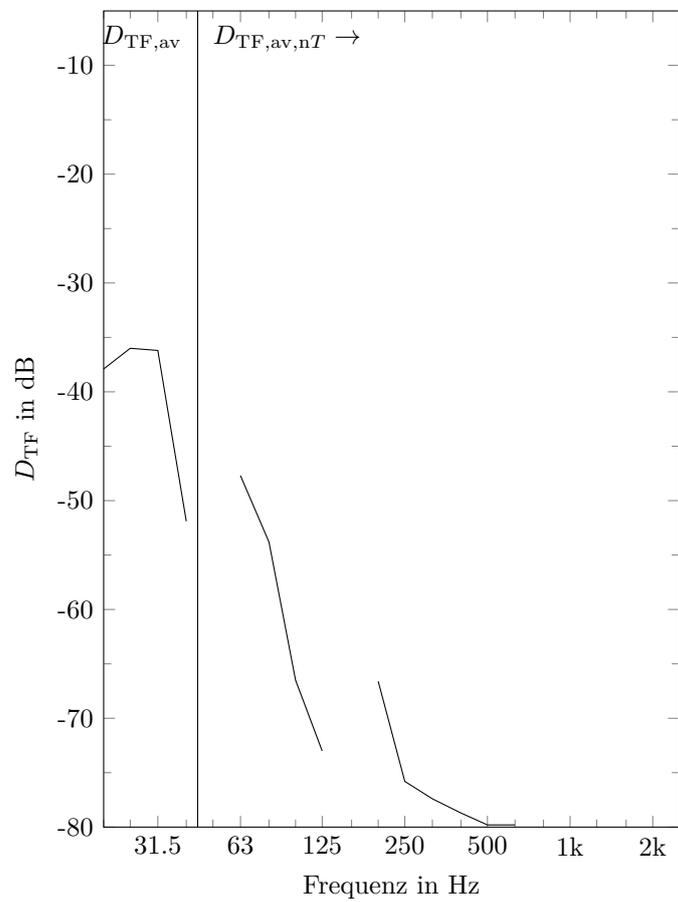
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 18

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

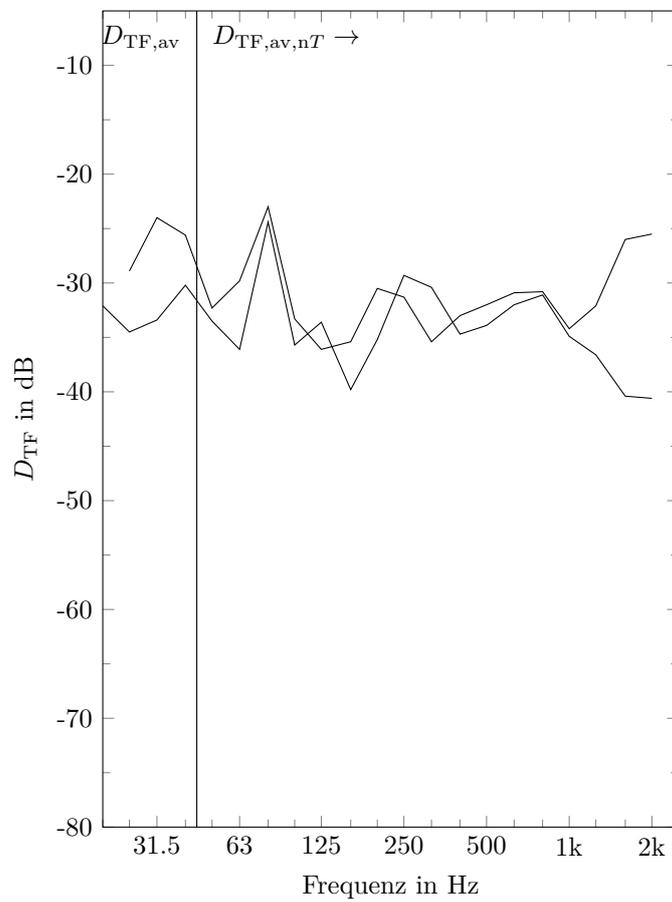
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 2

Anzahl verschiedener Hersteller: 2

Anzahl verschiedener Gebäude: 2

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Ergebnisse der Baumessungen

Gruppe 19

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

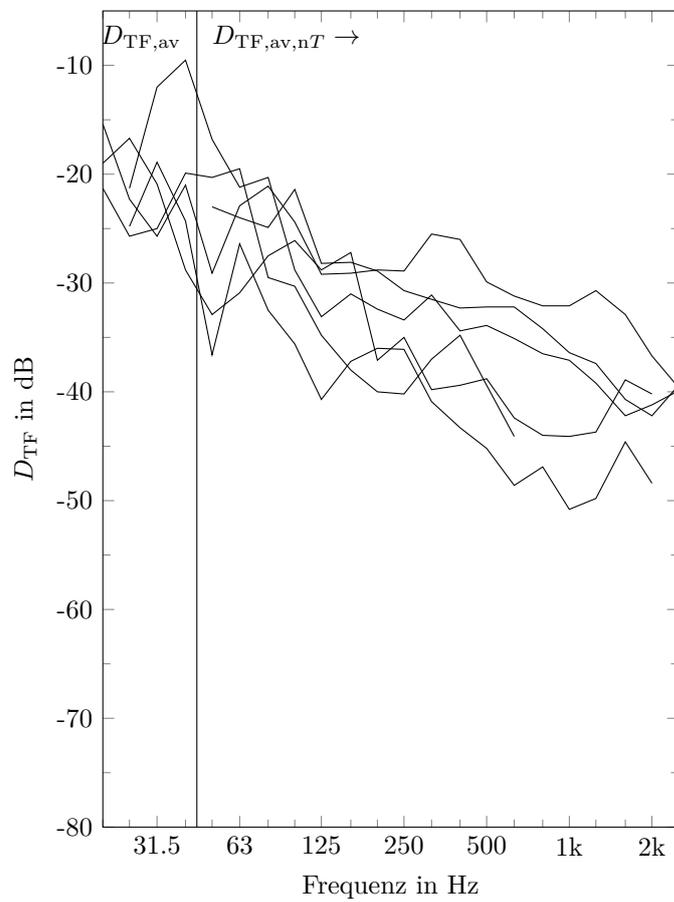
Vorsatzschale: Holzrahmenkonstruktion

Datensätze: 6

Anzahl verschiedener Hersteller: 3

Anzahl verschiedener Gebäude: 6

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Gruppe 20

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

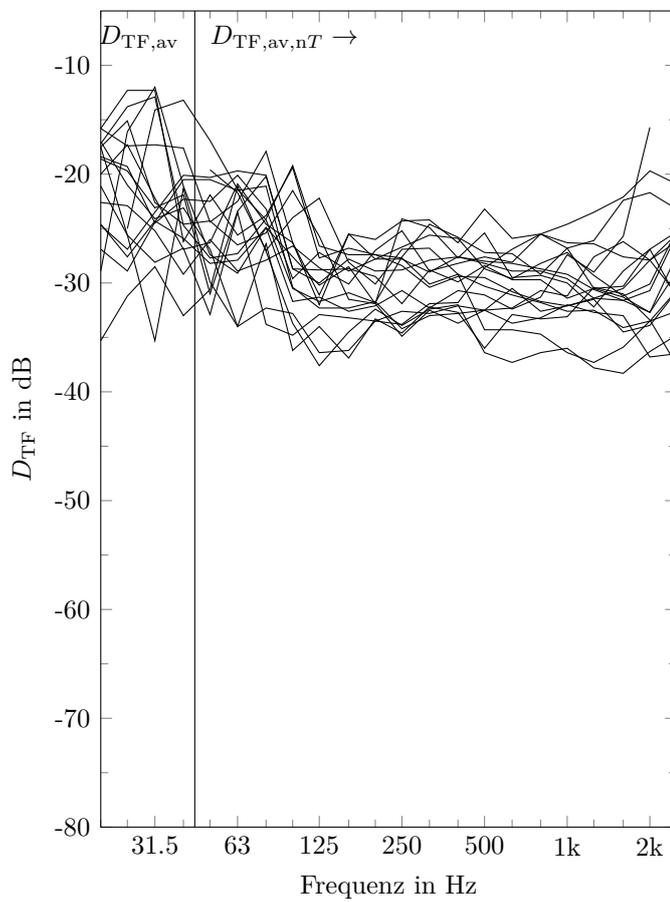
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 18

Anzahl verschiedener Hersteller: 4

Anzahl verschiedener Gebäude: 11

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 3



Gruppe 21

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk,
Installationsebene bzw. Konterlattung

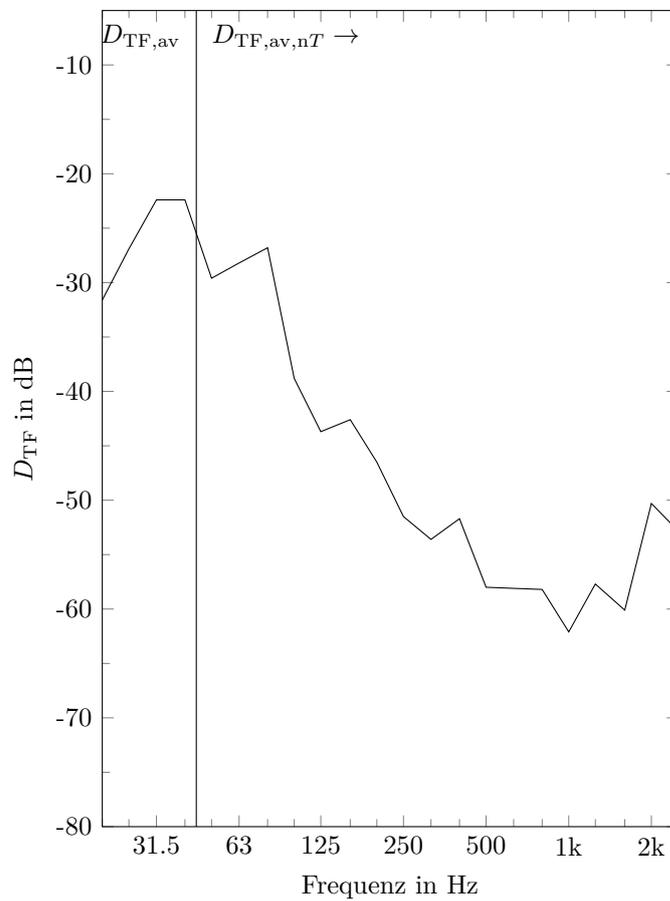
Vorsatzschale: Trockenbau (Metallprofil) oder Sanitärsystem

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 22

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk,
Installationsebene bzw. Konterlattung

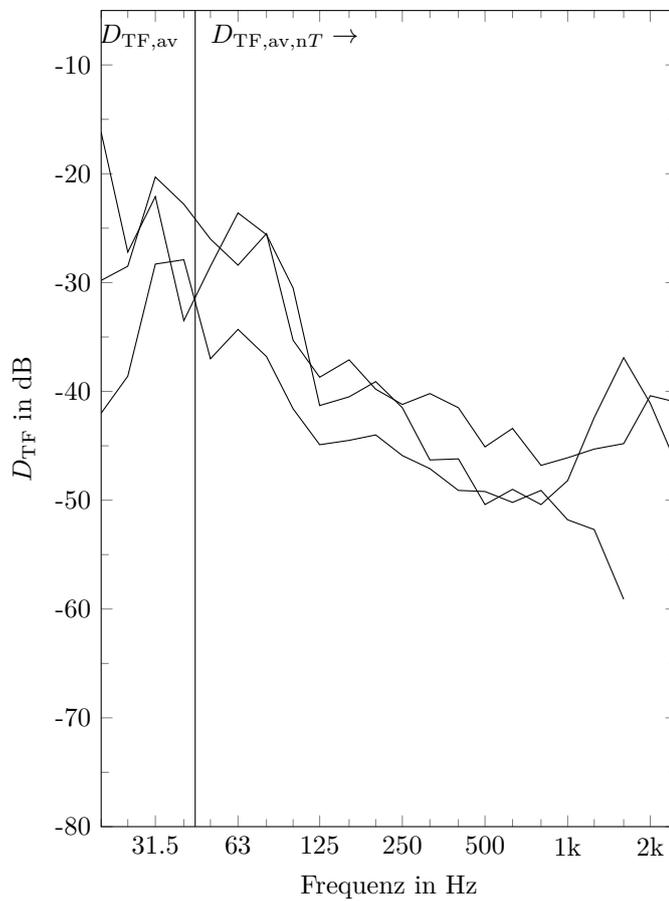
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 3

Anzahl verschiedener Hersteller: 3

Anzahl verschiedener Gebäude: 3

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 3



Gruppe 23

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal

Typ des angeregten Bauteils: Wohnungstrennwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, getrenntes Ständerwerk

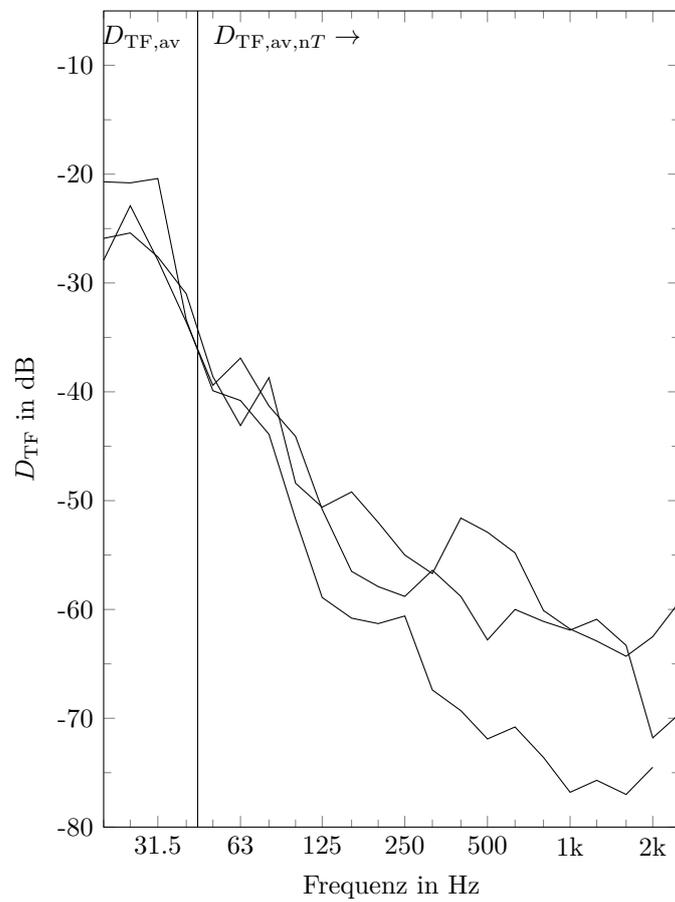
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 3

Anzahl verschiedener Hersteller: 3

Anzahl verschiedener Gebäude: 3

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 24

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal

Typ des angeregten Bauteils: Installationswand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Installationswand

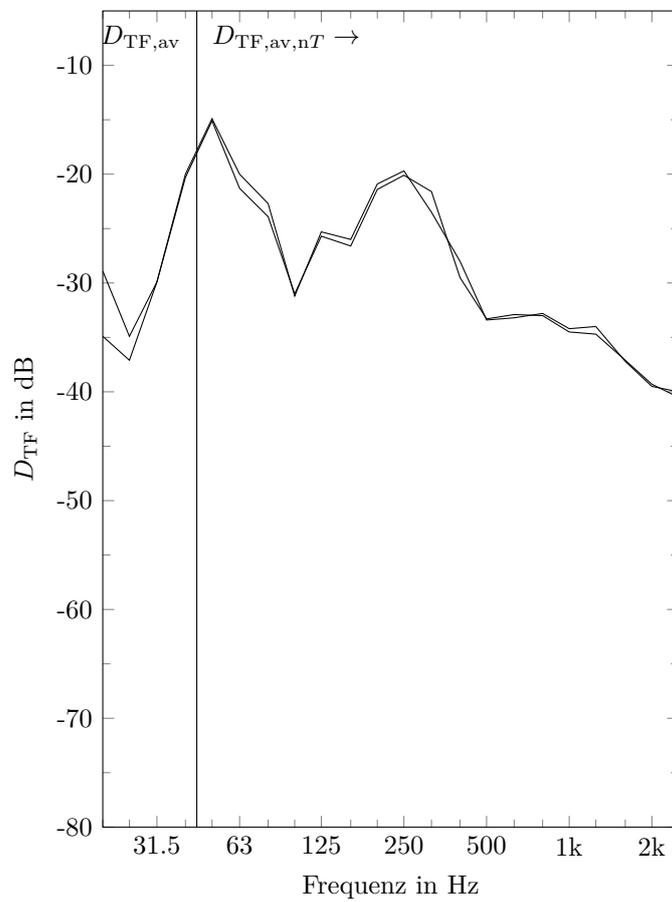
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 2

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 25

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal, 1 Raum dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

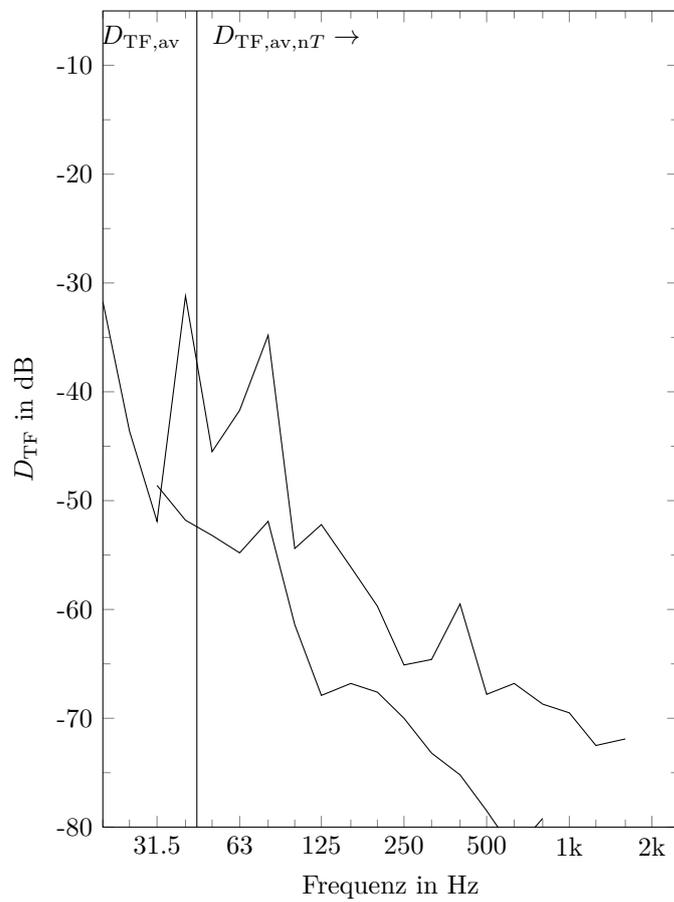
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 2

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 26

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal, 1 Raum dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Installationsebene bzw. Konterlattung

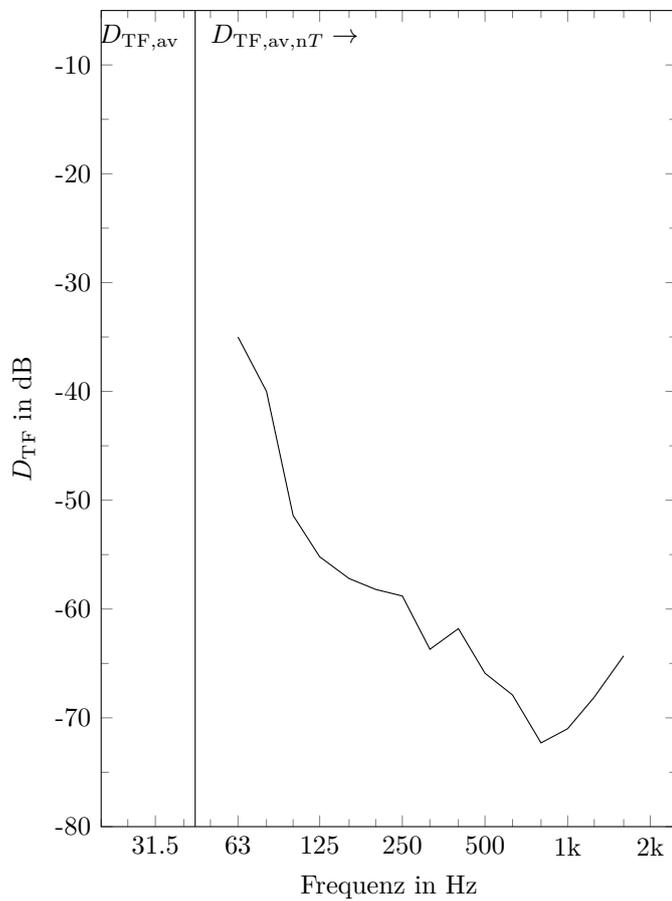
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Ergebnisse der Baumessungen

Gruppe 27

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal, 1 Raum dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Installationswand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Installationswand

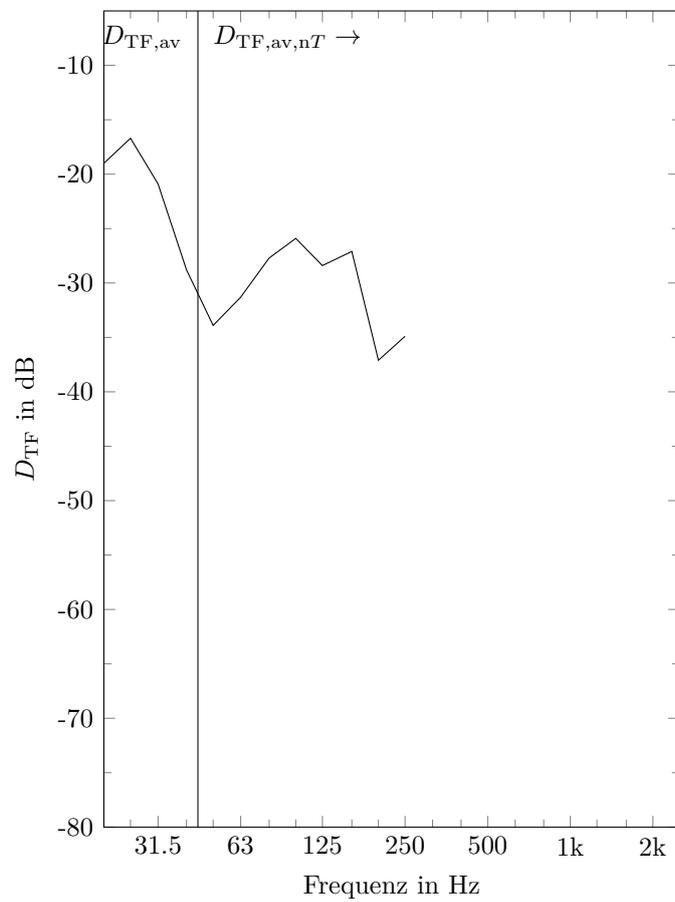
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 28

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal, 2 Räume dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

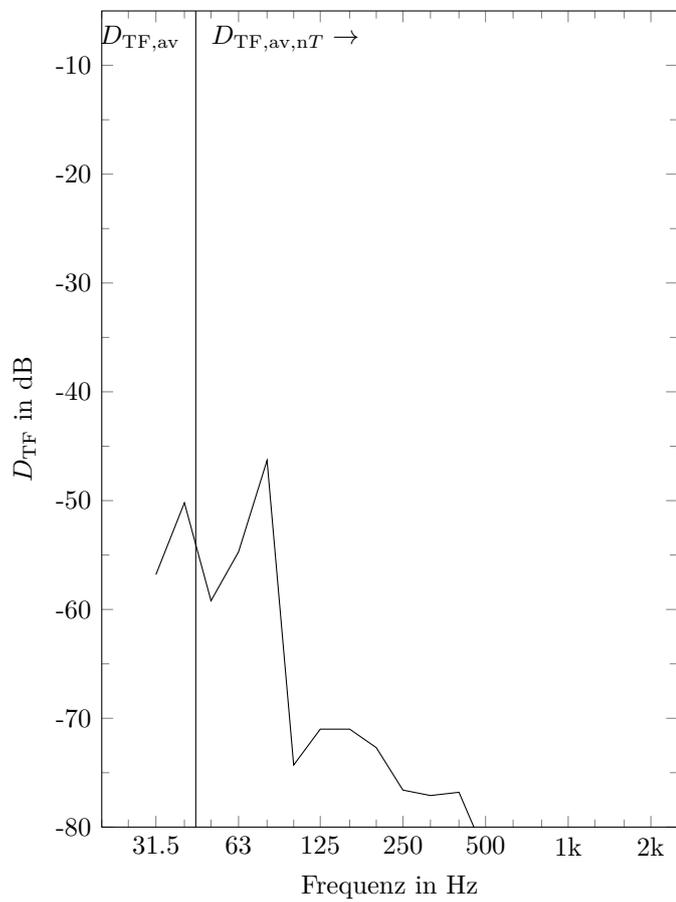
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 29

Übertragungspfad: Direkt, Horizontal, 2 Räume dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Installationsebene bzw. Konterlattung

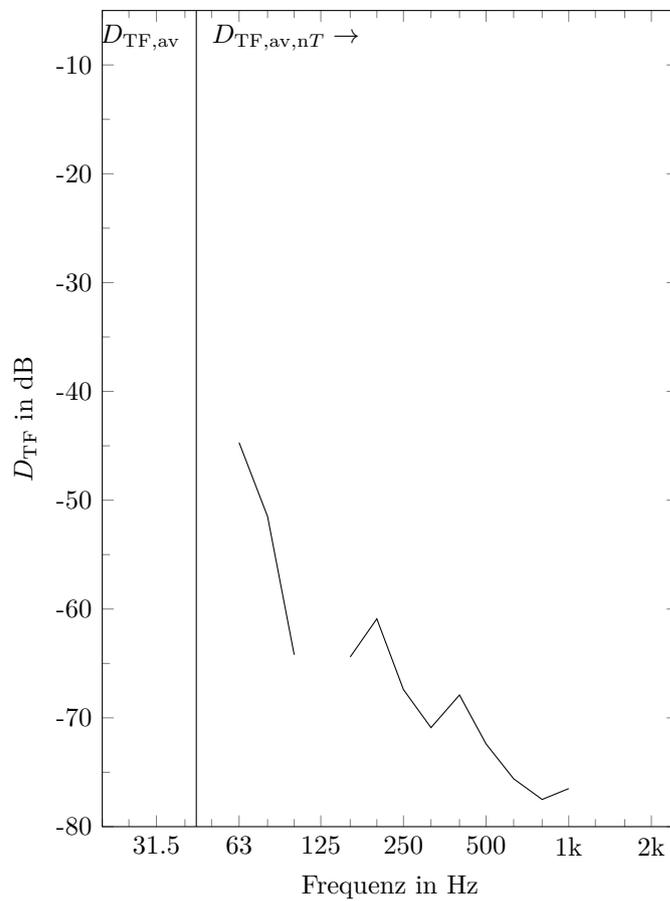
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 30

Übertragungspfad: Direkt, Vertikal

Typ des angeregten Bauteils: Boden, Trenndecke

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

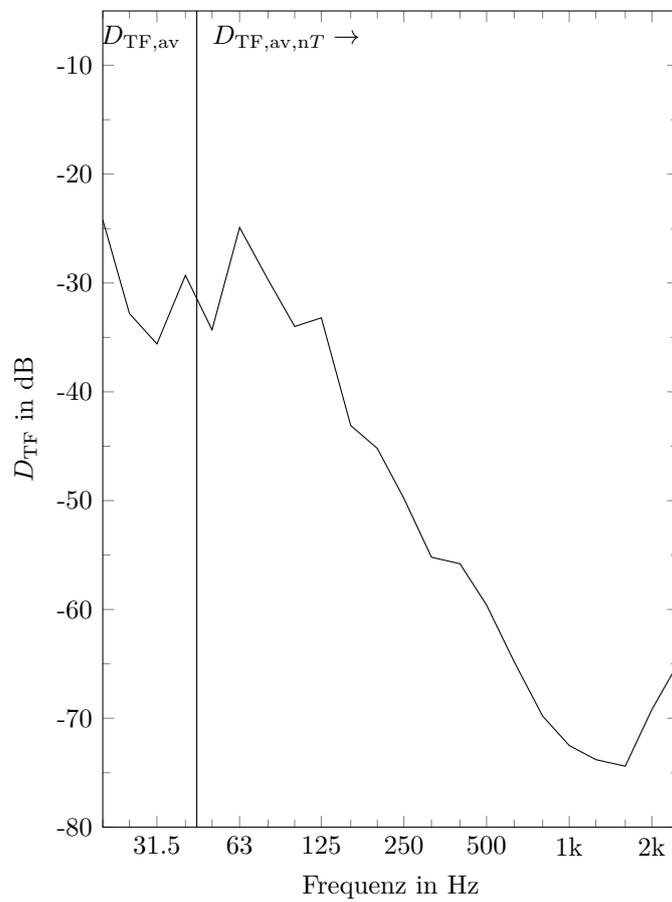
Vorsatzschale: Schwimmender Estrich

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Ergebnisse der Baumessungen

Gruppe 31

Übertragungspfad: Direkt, Vertikal

Typ des angeregten Bauteils: Boden, Trenndecke

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzbalkendecke

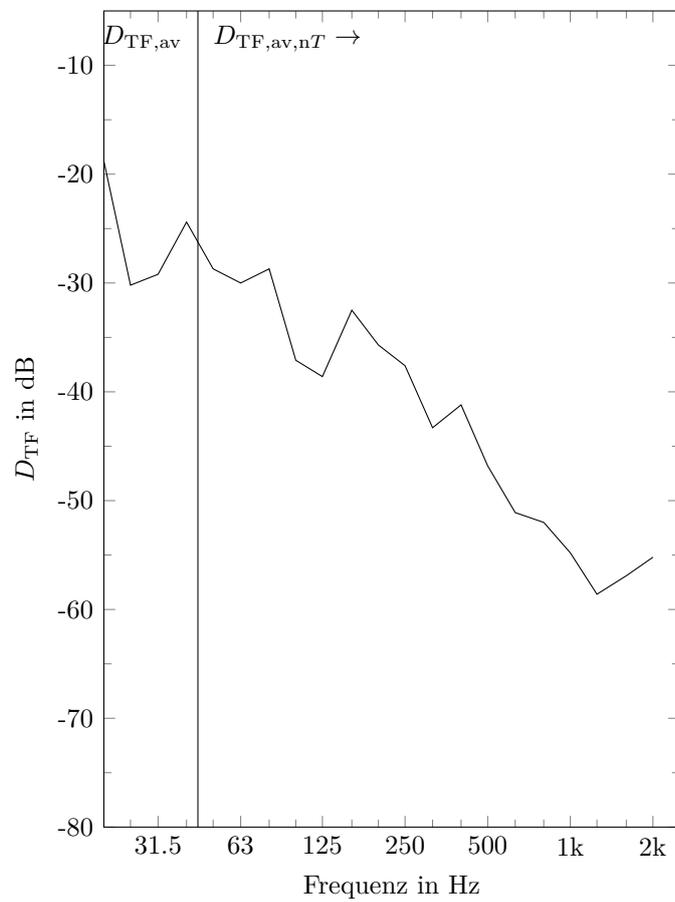
Vorsatzschale: Schwimmender Estrich

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 32

Übertragungspfad: Horizontal, Anregung Boden

Typ des angeregten Bauteils: Boden, Trenndecke

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzbalkendecke

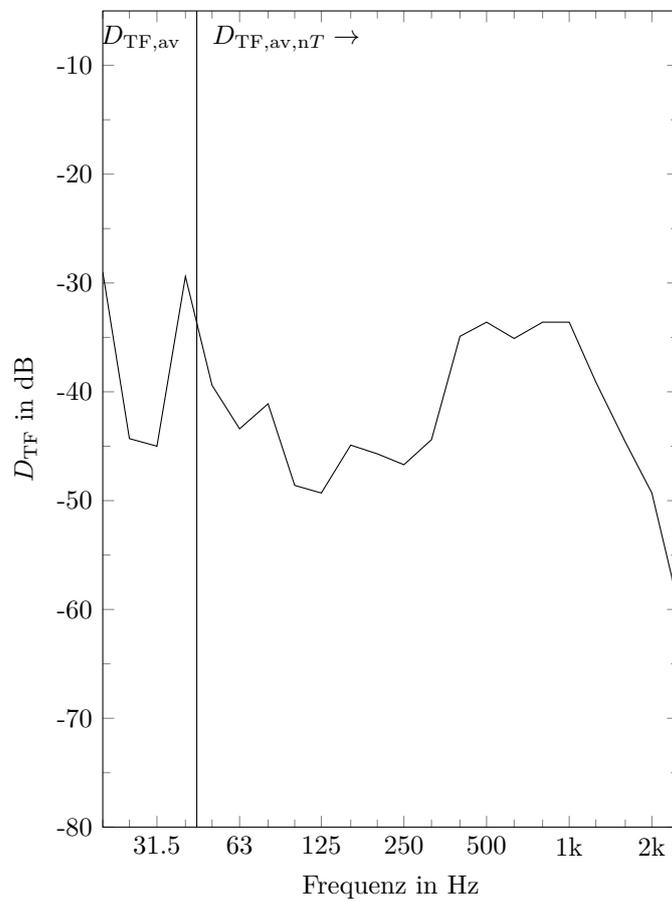
Vorsatzschale: Schwimmender Estrich

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 33

Übertragungspfad: Horizontal, Anregung Boden, 1 Raum dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Boden, Trenndecke

Konstruktion des angeregten Bauteils: Beton

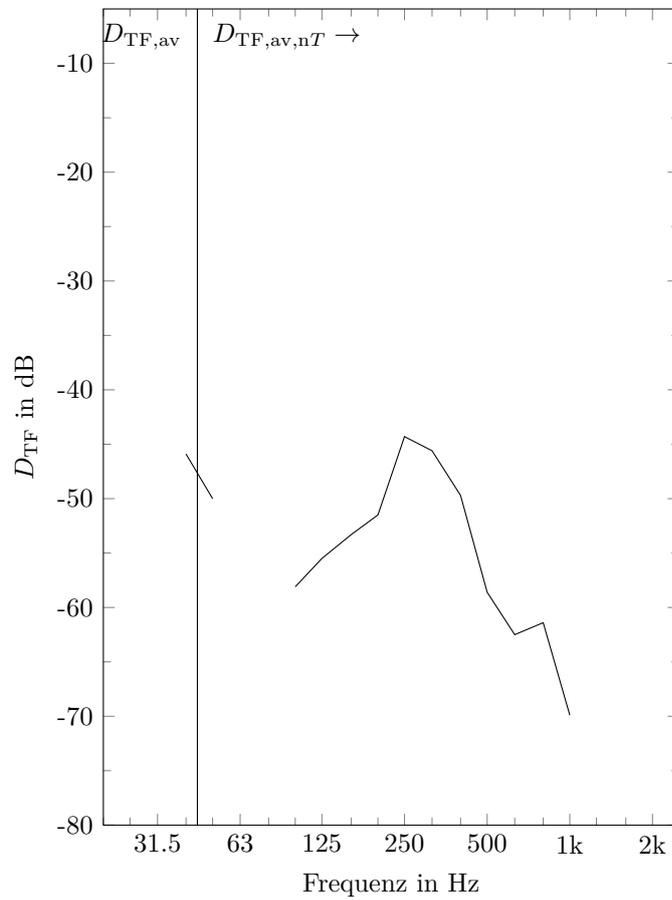
Vorsatzschale: Schwimmender Estrich

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 34

Übertragungspfad: Horizontal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Außenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

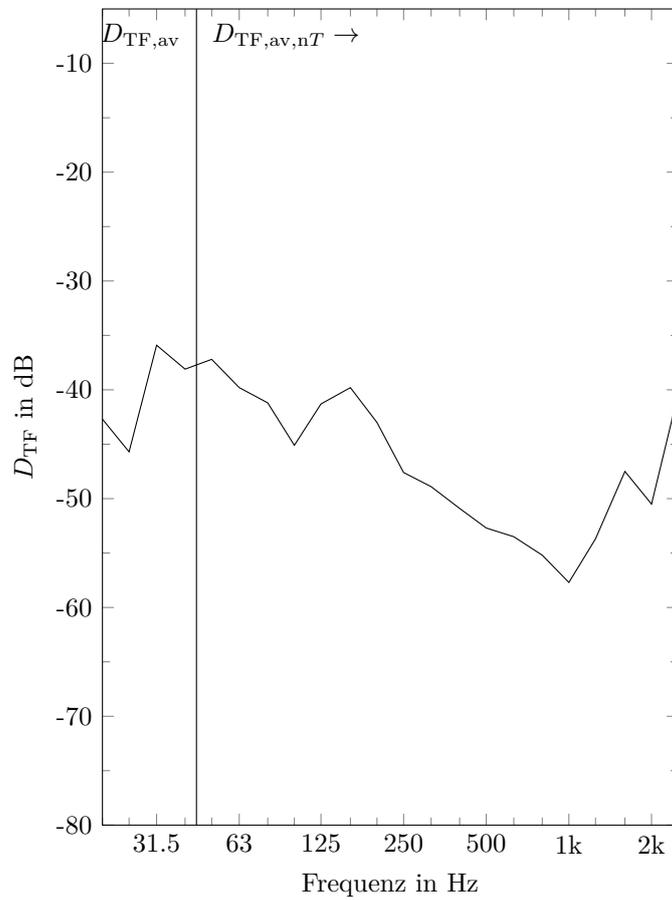
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 35

Übertragungspfad: Horizontal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Außenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Installationsebene bzw. Konterlattung

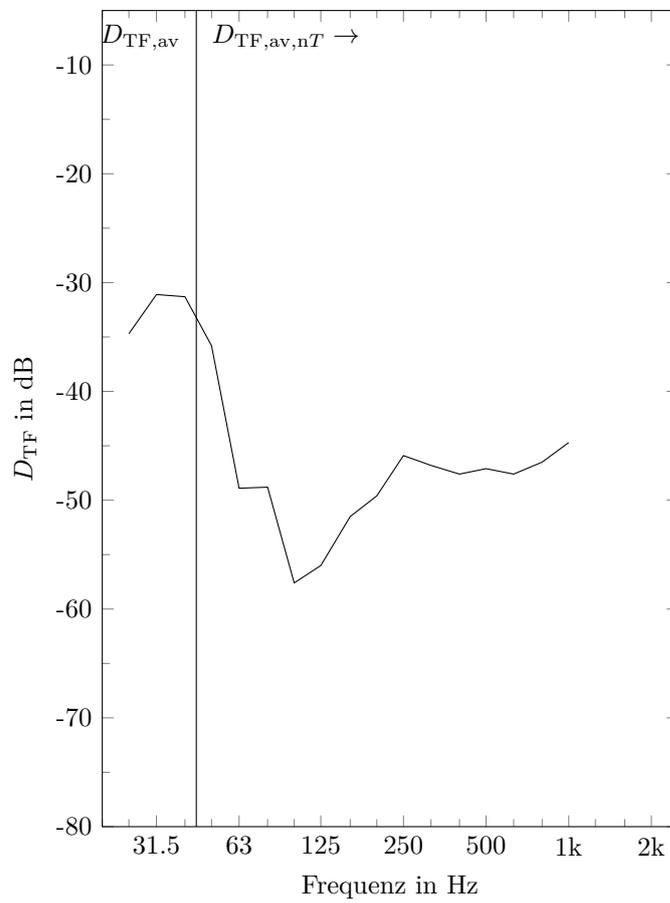
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 36

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß, 1 Geschoss dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Kellerwand, außen

Konstruktion des angeregten Bauteils: Beton

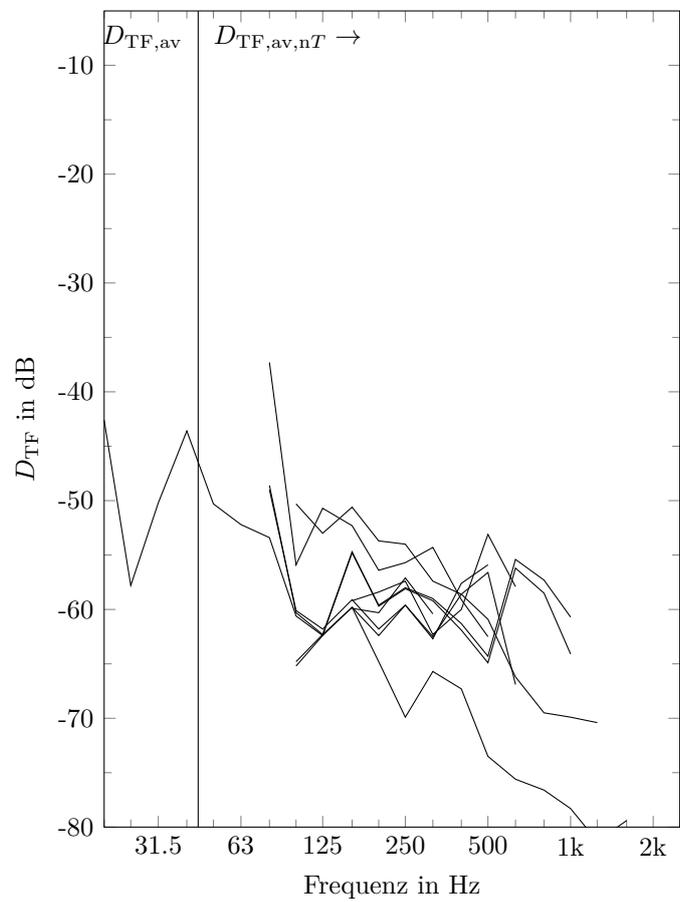
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 9

Anzahl verschiedener Hersteller: 3

Anzahl verschiedener Gebäude: 5

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Gruppe 37

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß, 1 Geschoss dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Kellerwand, innen

Konstruktion des angeregten Bauteils: Mauerwerk

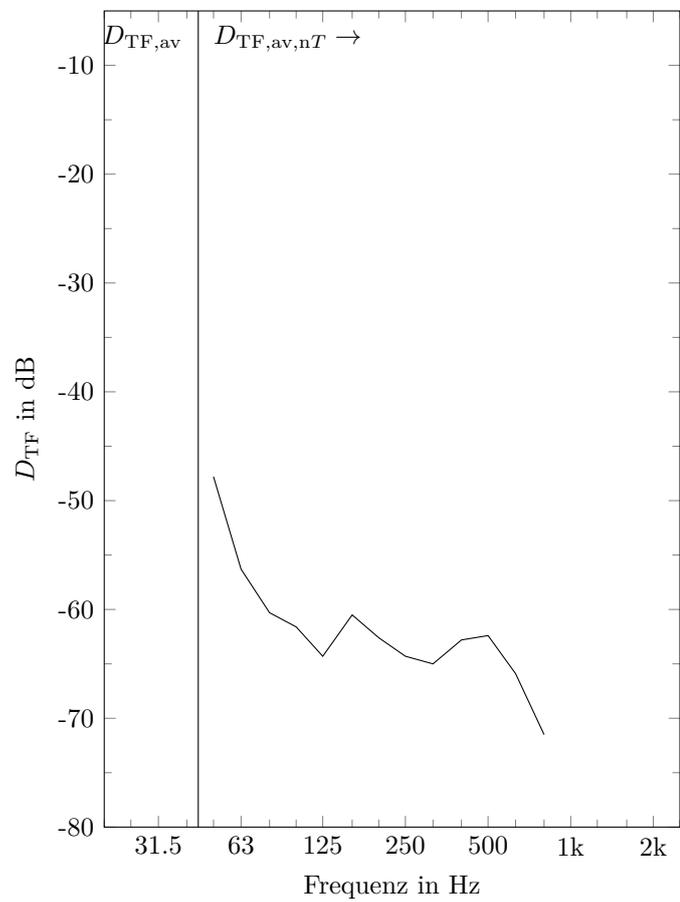
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 38

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß, 1 Geschoss dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Außenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

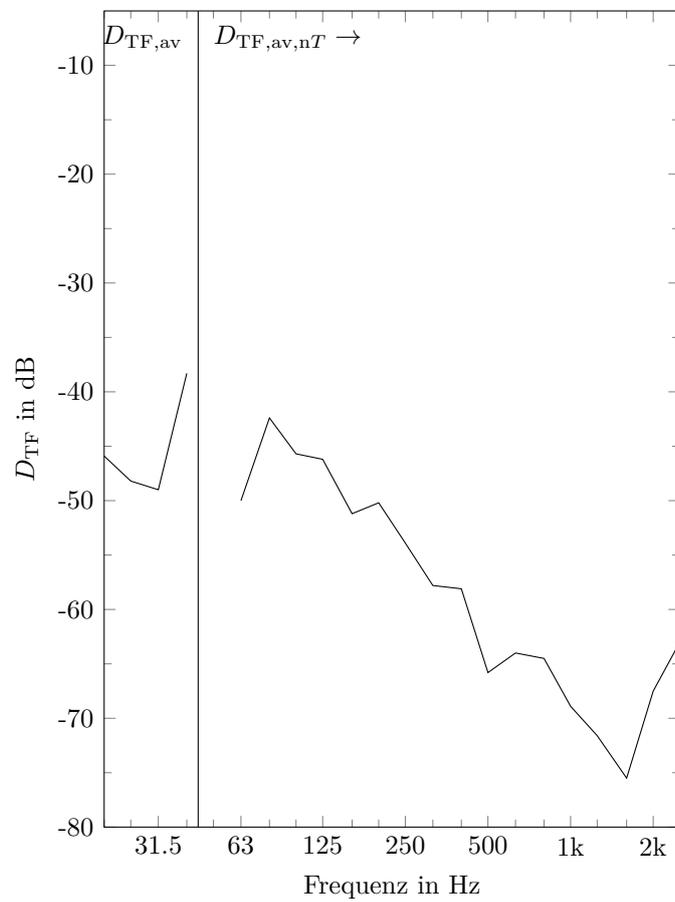
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Ergebnisse der Baumessungen

Gruppe 39

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß, 2 Geschosse dazwischen

Typ des angeregten Bauteils: Außenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

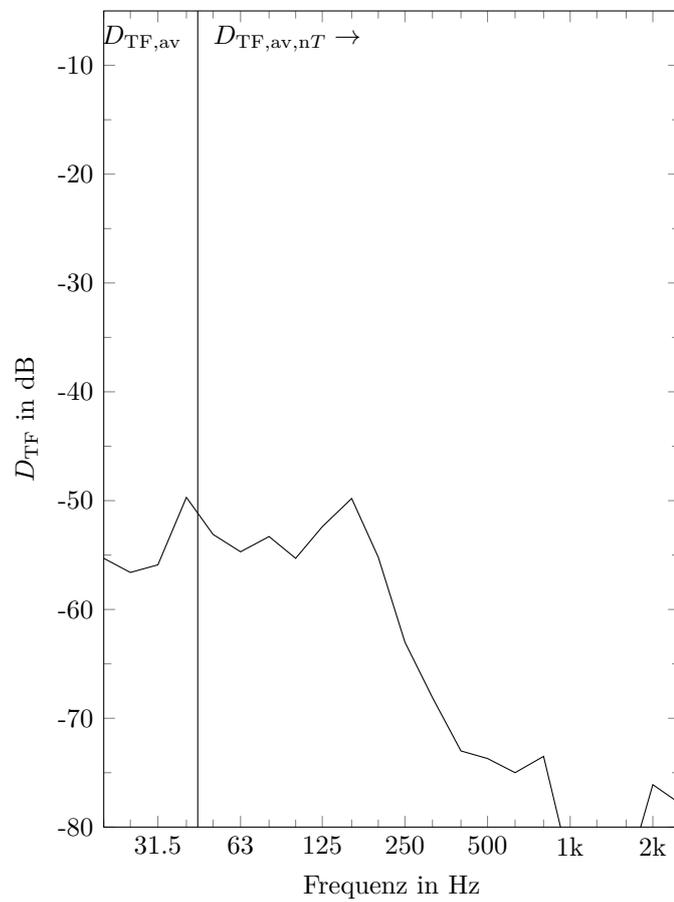
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 40

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Kellerwand, außen

Konstruktion des angeregten Bauteils: Beton

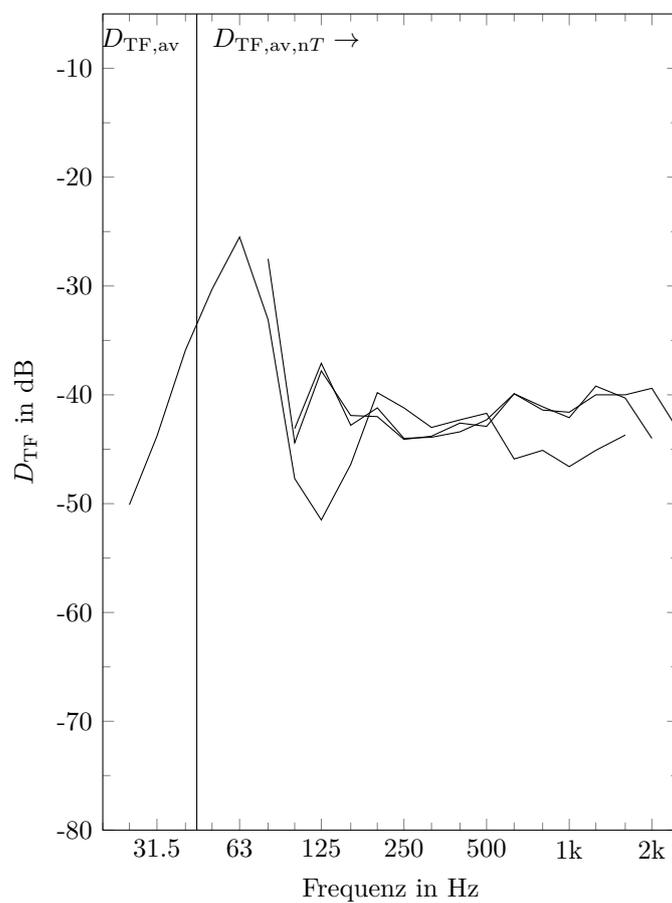
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 3

Anzahl verschiedener Hersteller: 2

Anzahl verschiedener Gebäude: 2

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 41

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Außenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

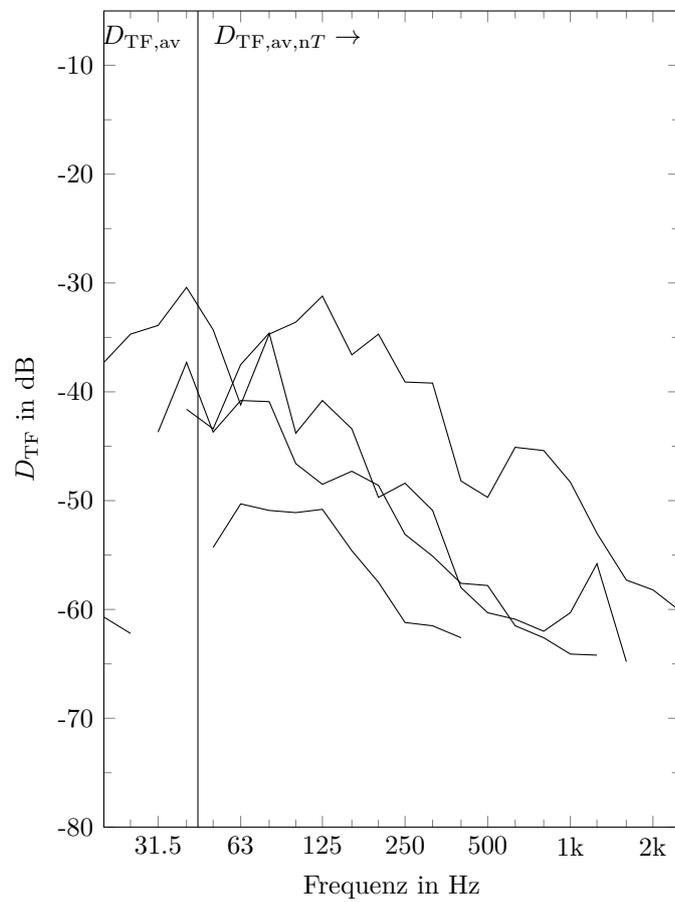
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 4

Anzahl verschiedener Hersteller: 2

Anzahl verschiedener Gebäude: 4

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Gruppe 42

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Außenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

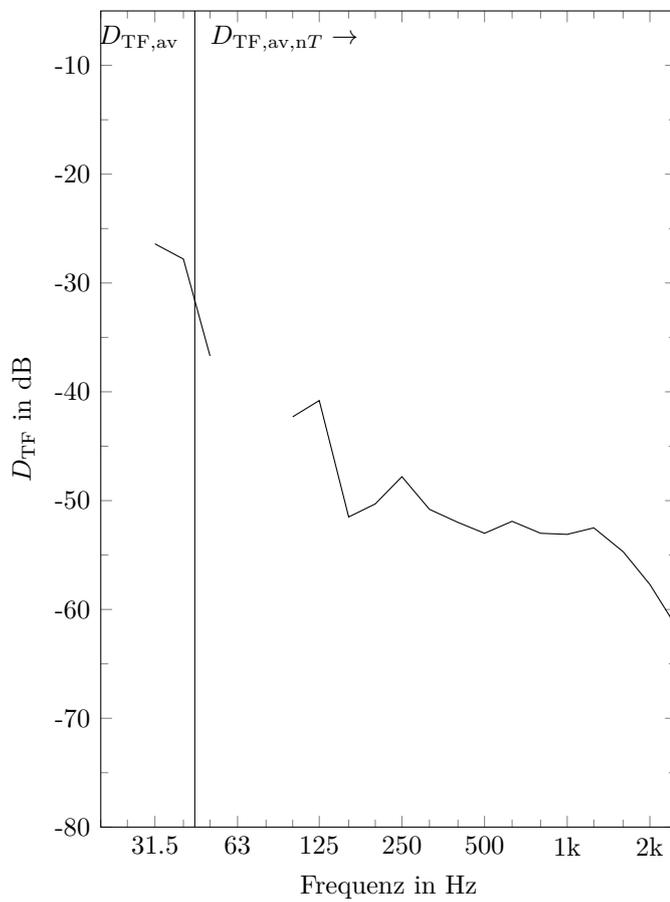
Vorsatzschale: Holzrahmenkonstruktion

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 43

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Außenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

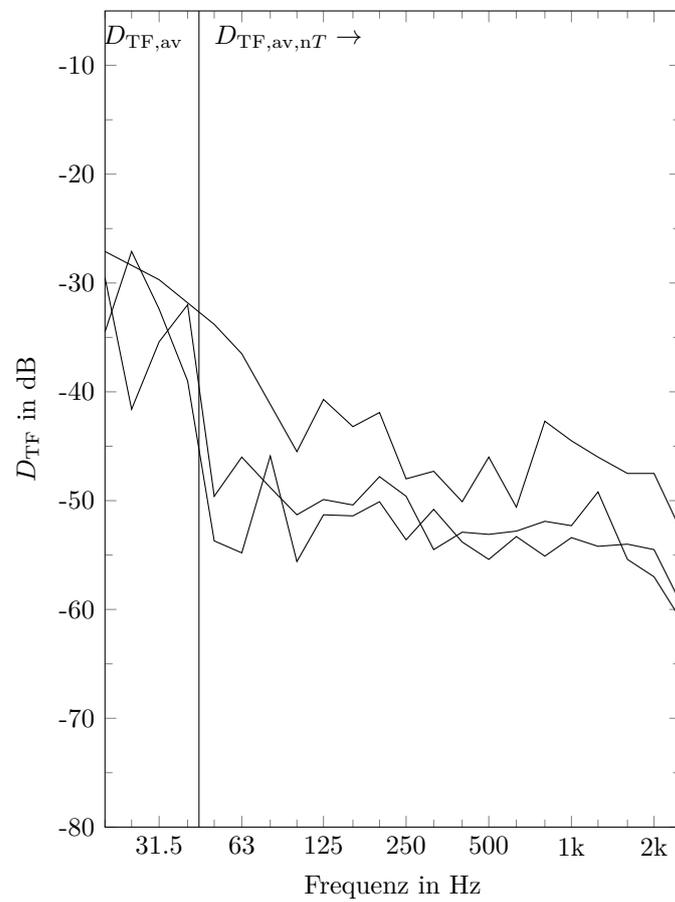
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 3

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 3

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 44

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Außenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Installationsebene bzw. Konterlattung

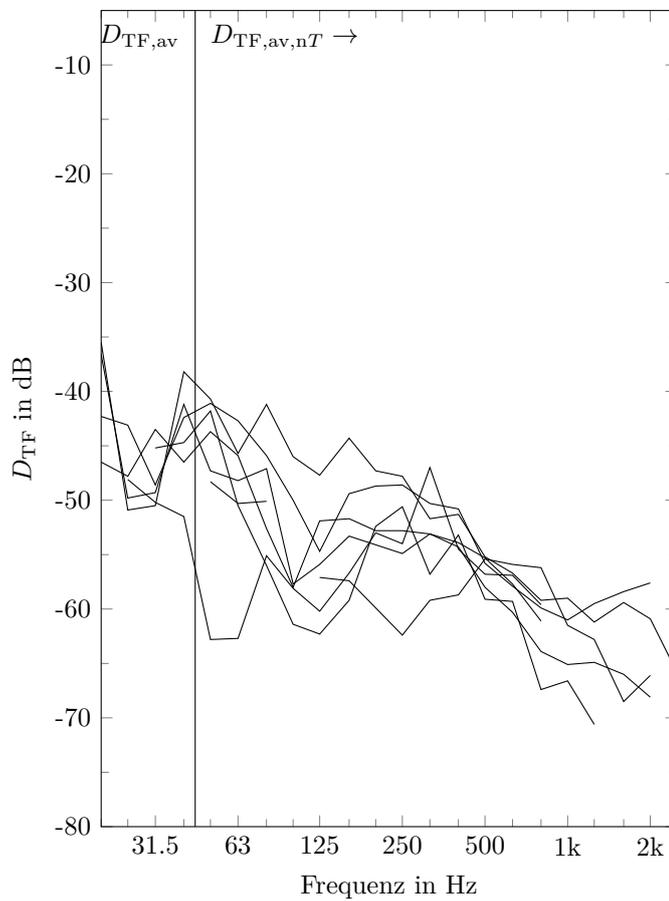
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 7

Anzahl verschiedener Hersteller: 2

Anzahl verschiedener Gebäude: 6

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Gruppe 45

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

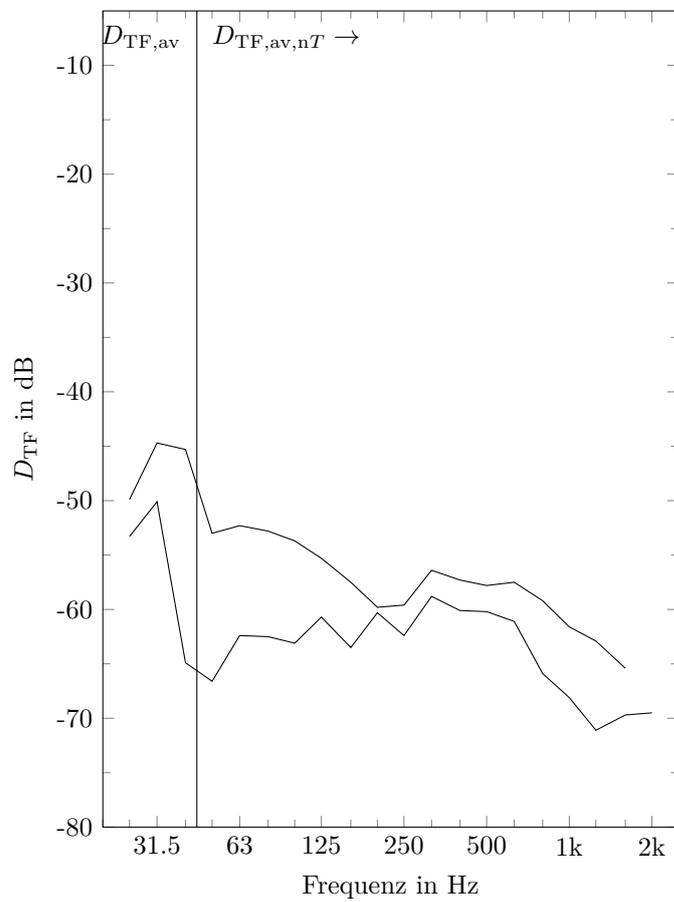
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 2

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 2

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Gruppe 46

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Installationsebene bzw. Konterlattung

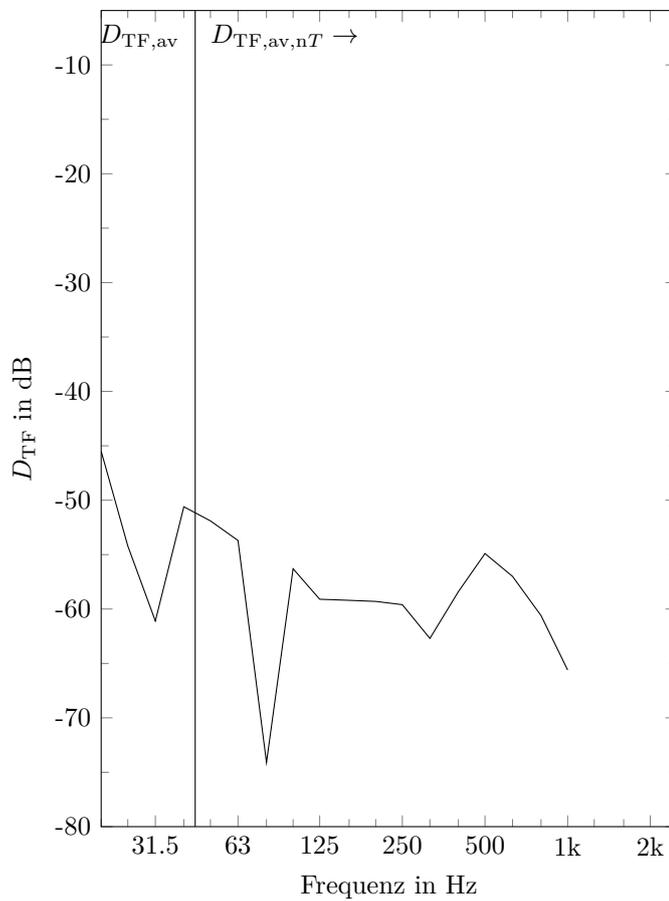
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 47

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Wohnungstrennwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, getrenntes Ständerwerk

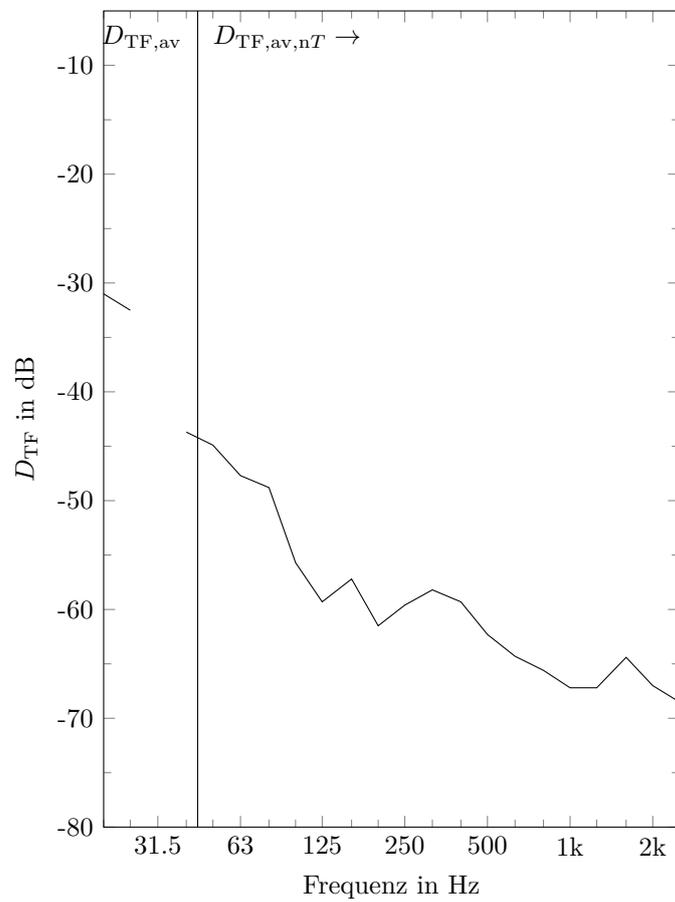
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 48

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, T-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Wohnungstrennwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk, Installationsebene bzw. Konterlattung

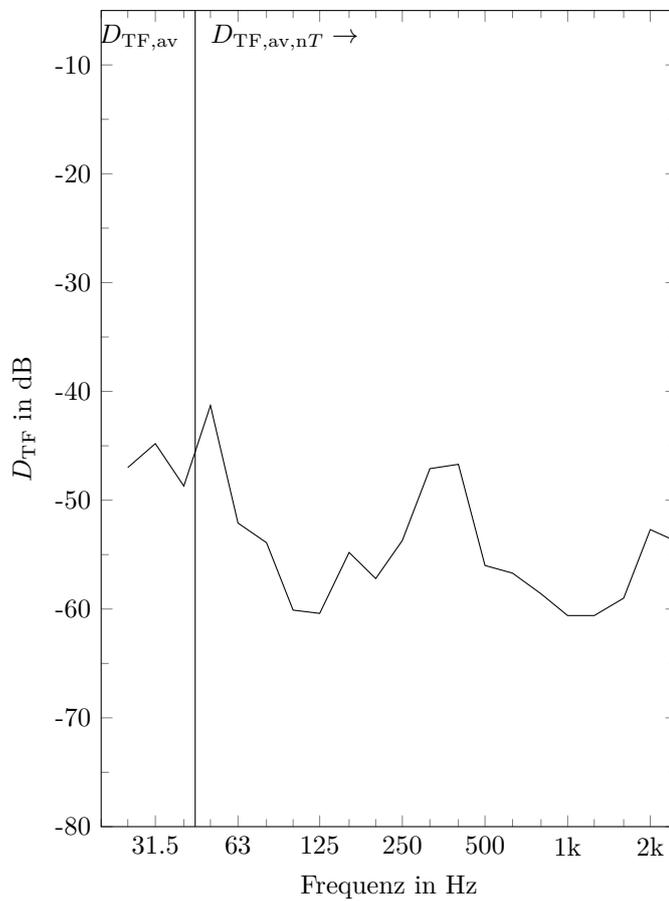
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 49

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, X-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzmassiv

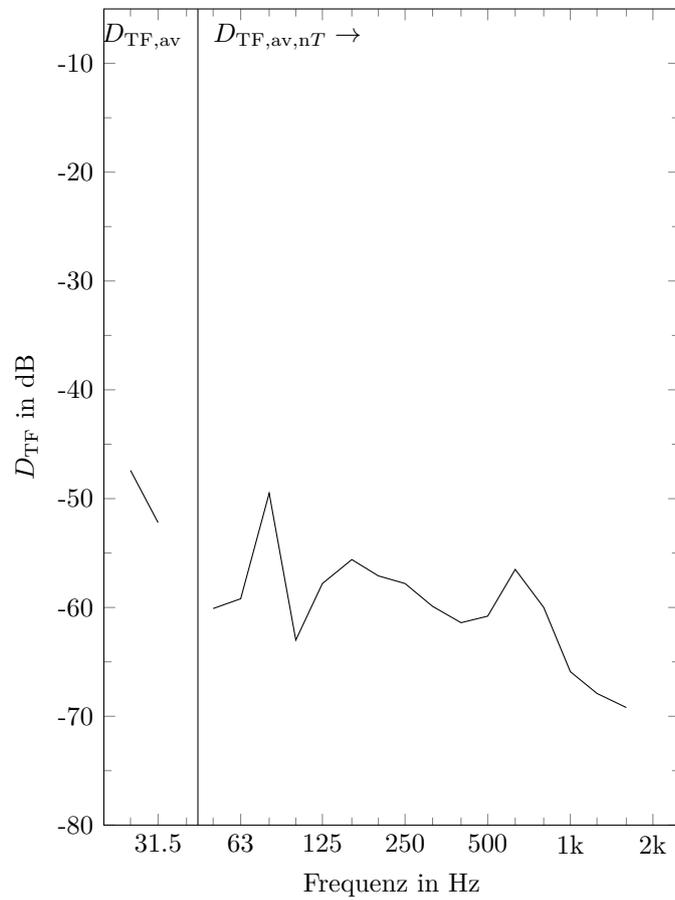
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 50

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, X-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Trockenbauwand (Metallprofile)

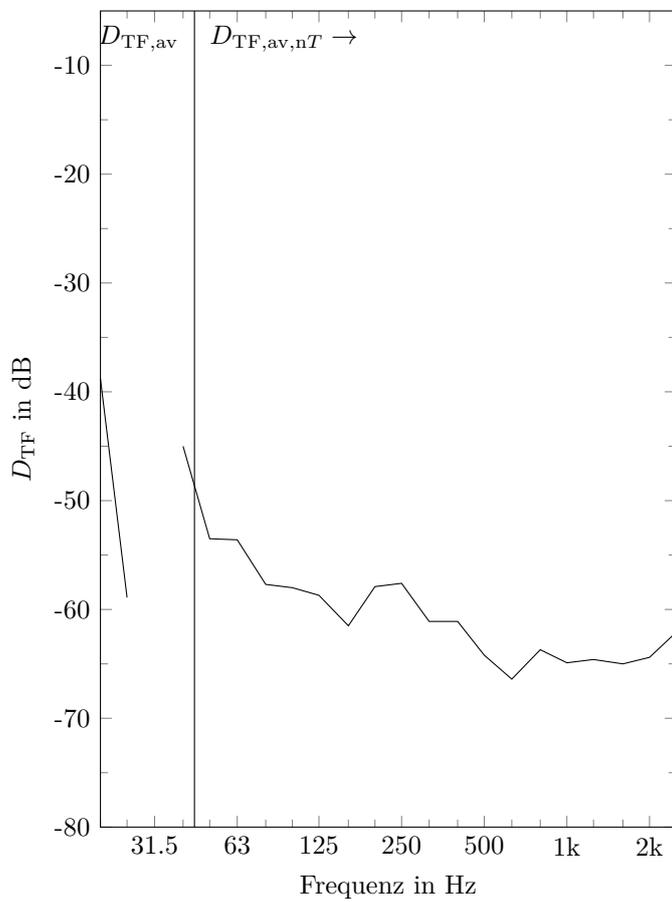
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 1

Anzahl verschiedener Hersteller: 1

Anzahl verschiedener Gebäude: 1

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 1



Gruppe 51

Übertragungspfad: Vertikal, Anregung flankierende Wand, X-Stoß

Typ des angeregten Bauteils: Innenwand

Konstruktion des angeregten Bauteils: Holzrahmenbau, Einfachständerwerk

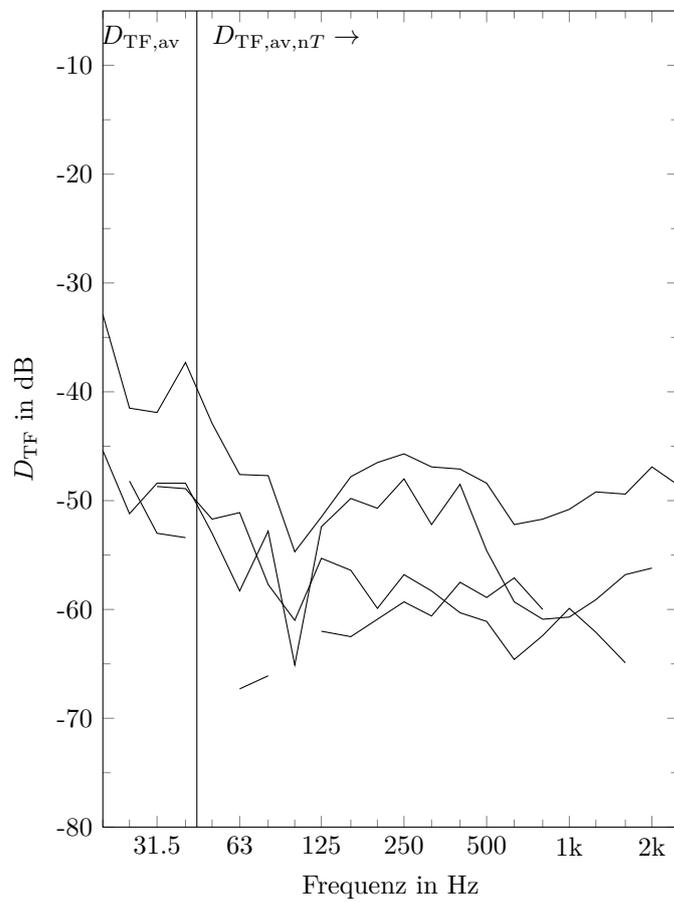
Vorsatzschale: Keine

Datensätze: 4

Anzahl verschiedener Hersteller: 2

Anzahl verschiedener Gebäude: 3

Anzahl verschiedener Gebäudetypen: 2



Literatur

- Arnold, Jörg und Oliver Kornadt (2014). „Beschreibung Körperschallinduzierter Schalldruckpegel mit Hilfe von Übertragungsfunktionen“. In: *Bauphysik Kalender 2014*. Hrsg. von Nabil A. Fouad. D-69451 Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, S. 641–663.
- Buhlert, Klaus-J. von und J. Feldmann (1979). „Ein Meßverfahren zur Bestimmung von Körperschallanregung und -übertragung“. In: *Acustica* 42.3, S. 108–113.
- Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Hrsg. (2015). *DEGA Memorandum 0104 - Schallschutz im eigenen Wohnbereich*.
- DIN 4109-1:2018-01. *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderung*.
- DIN 4109:1989-11 Beiblatt 2. *Schallschutz im Hochbau - Hinweise für die Planung und Ausführung - Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz - Empfehlungen für den Schallschutz inm eigenen Wohn- und Arbeitsbereich*.
- DIN EN 12354-5:2009-10. *Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 5: Installationsgeräusche*.
- DIN EN 15657:2017-10. *Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen*.
- DIN EN ISO 16283-1:2018-04. *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau: Teil 1: Luftschalldämmung (ISO 16283-1:2014 + Amd 1:2017)*;
- EN 12354-5:2009. *Building acoustics – Estimation of acoustic performance of building from the performance of elements: Part 5: Sound levels due to the service equipment*.
- Fischer, Heinz-Martin (2001). „Determination and use of transfer functions to describe structure-borne sound transmission caused by equipment and installations“. In: *ICA*. Hrsg. von International Commission for Acoustics.
- Fischer, Heinz-Martin u. a. (2017). *FHprofUnt 2012: Nachhaltiger Schallschutz gebäudetechnischer Anlagen in energetisch optimierten Gebäuden: Teilprojekt 1: Schlussbericht*.

- Gerretsen, Eddy (1993). „Estimation of air-borne and structure-borne sound transmission from machinery in buildings“. In: *Applied Acoustics* 40.3, S. 255–265.
- Hopkins, Carl und P. Turner (2005). „Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies“. In: *Applied Acoustics* 66, S. 1339–1382.
- ISO 10848-1:2017. *Acoustics – Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms: Part 1: Frame document*.
- Kornadt, Oliver u. a. (2012). „Prediction of the sound pressure level caused by technical equipment in buildings by analyzing transfer functions“. In: *Proceedings of Internoise 2012, 19-22- August, New York City, USA*.
- Mayr, Andreas R. (2009). *Vibro-acoustic sources in lightweight buildings*. Berlin: Logos Verlag.
- Mayr, Andreas R. und Barry M. Gibbs (2016). „Approximate method for obtaining source quantities for calculation of structure-borne sound transmission into lightweight buildings“. In: *Applied Acoustics* 110, S. 81–90.
- Mayr, Andreas R., Fabian Schöpfer u. a. (2018). „Measurement and prediction of structure-borne sound transmission from machinery in timber-frame buildings“. In: *Proceedings of Euronoise 2018*. (27.–31. Mai 2018). Crete, Greece.
- Schanda, Ulrich, Andreas R. Mayr und Fabian Schöpfer (2017). *FHprofUnt 2012: Nachhaltiger Schallschutz gebäudetechnischer Anlagen in energetisch optimierten Gebäuden: Teilprojekt 2: Schlussbericht*.
- Scheck, Jochen u. a. (2016). „Messung und Prognose der Luft- und Körperschallübertragung von gebäudetechnischen Anlagen im Massivbau“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (14.–17. März 2016). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Aachen.
- Schöpfer, Fabian (2017). „Körperschallübertragung im Holzbau: Übertragungsfunktionen“. In: *Forum Holzbau HBS*. (22.–23. März 2017). Bad Wörishofen, Germany.
- (2019a). „Prognose von Körperschall aus haustechnischen Anlagen – ein robustes und einfaches Tabellenverfahren für den Holzbau“. In: *Forum Holzbau HBS*. (12.–13. März 2019). Bad Wörishofen, Germany.
- (2019b). „Vibroacoustics of timber-frame structures excited by structure-borne sound sources“. Dissertation. Liverpool: University of Liverpool.
- Schöpfer, Fabian, Carl Hopkins u. a. (2017a). „Ansätze zur Prognose des Installationspegels im Holz-Leichtbau“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (6.–9. März 2017). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Kiel, Germany.

- (2017b). „Measurement of transmission functions in lightweight buildings for the prediction of structure-borne sound transmission from machinery“. In: *Acta Acustica united with Acustica* 103, S. 451–464.
- (2017c). „Prediction of noise from machinery in timber-frame buildings using transmission functions“. In: *Proceedings of ICSV24*. (23.–27. Juli 2017). London, UK.
- Schöpfer, Fabian, Andreas R. Mayr und Ulrich Schanda (2018). „Übertragungsfunktionen im Holzbau“. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA*. (19.–22. März 2018). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. München.
- (2019). „Structure-borne sound sources in timber buildings – prediction of machinery noise using measured transmission functions“. In: *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*. (9. Sep. 2019). Aachen, Germany.
- VDI 4100:2012-10. *Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure.
- Vercammen, Martijn L. S. und Peter H. Heringa (1989). „Characterising structure-borne sound from domestic appliances“. In: *Applied Acoustics* 28, S. 105–117.