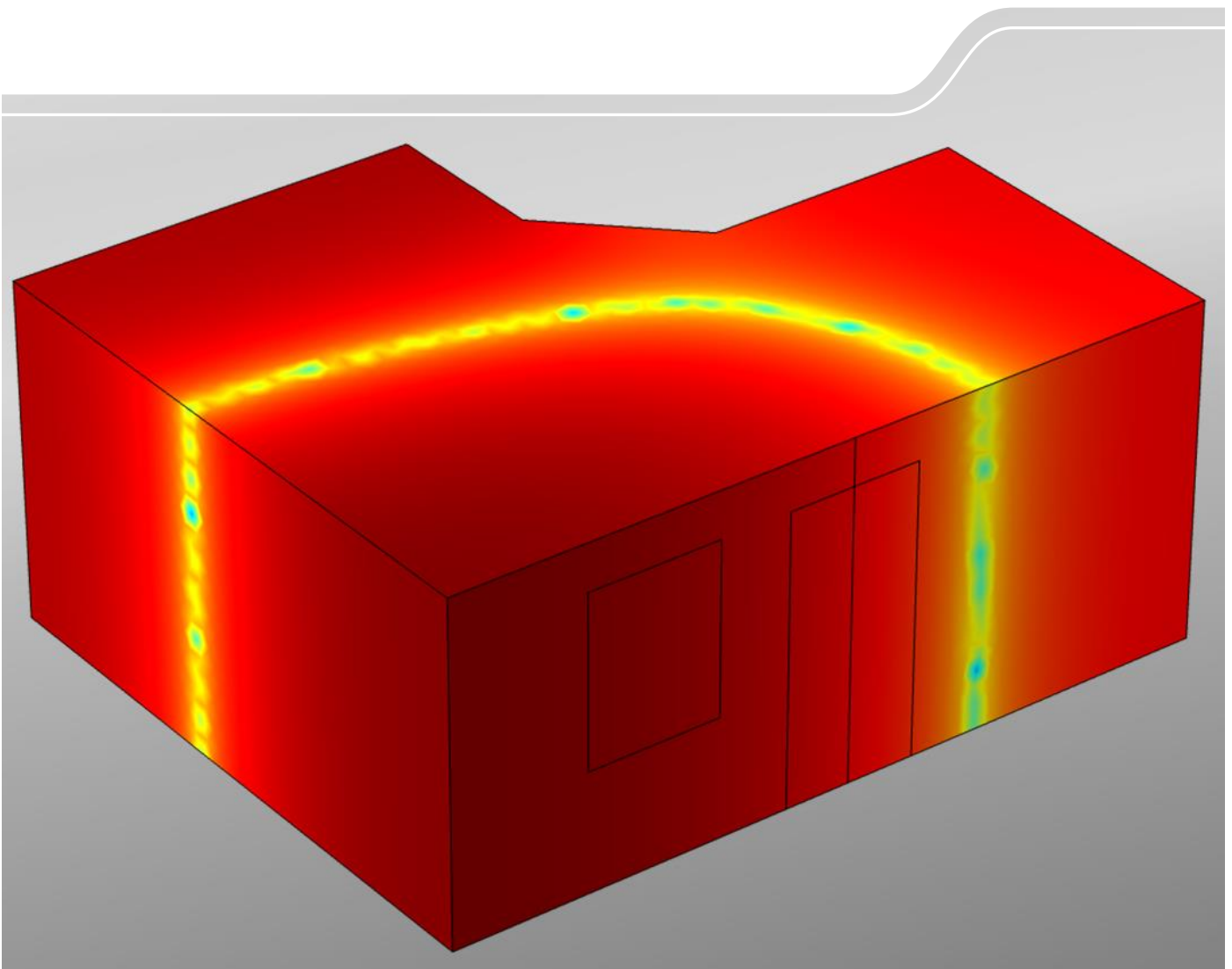




Untersuchungen zur Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Geräuschen

Schriftenreihe, Heft 9/2021



Untersuchungen zur Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Geräuschen

Dr.-Ing. Christian Schulze, Lucas Eckert, Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt
Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Problemlösungsstrategie.....	10
2	Literaturrecherche	11
2.1	Tieffrequente Schallimmissionen	11
2.2	Messverfahren innerhalb geschlossener Räume.....	13
2.3	Prognoseverfahren	19
2.4	Weitere Literaturhinweise.....	30
3	Messungen	32
3.1	Messaufbau	32
3.1.1	Schallquelle	32
3.1.2	Einfluss der Messposition im Raum	33
3.1.3	Einfluss der Quellposition.....	38
3.1.4	Festlegung des Messaufbaus	41
3.2	Raumauswahl	42
3.2.1	Recherche	42
3.2.2	Festlegung der Messorte	44
4	Auswertung	46
4.1	Schalldruckpegel.....	46
4.1.1	Messergebnisse.....	46
4.1.2	Simulationsergebnisse	48
4.2	Schalldruckpegeldifferenz	53
4.2.1	Einfluss der Messposition im Raum	53
4.2.2	Einfluss der Messpositionen außen.....	57
4.2.3	Einfluss geometrischer Raumparameter	59
4.2.4	Einfluss des trennenden Bauteils	61
4.3	Vergleich der Messergebnisse mit Literatur	67
5	Vertrauensbereich	71
6	Tonale Anregung	74
7	Prognoseverfahren	77
8	Zusammenfassung	81
	Literaturverzeichnis	83
	Anhang	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Simulierte Schalldruckverteilung innerhalb eines quaderförmigen Raumes	15
Abbildung 2:	Vergleich der mittleren Schalldruckpegeldifferenz bei verschiedenen Messmethoden	18
Abbildung 3:	Schallpegeldifferenzen für breitbandige Geräusche bei normaler und hoher Schalldämmung sowie für tonale Geräusche nach GILG (2001)	29
Abbildung 4:	Eingesetzte Schallquelle „Saxon Audio B215 E“	32
Abbildung 5:	Skizze des Messaufbaus zur Untersuchung des Einflusses der Messposition auf den Schalldruckpegel im Raum	33
Abbildung 6:	FFT-Spektrum des gemessenen Schalldruckpegels an den Mikrofonpositionen in einer der untersuchten Raumecken	34
Abbildung 7:	Differenz der gemessenen Terz-Schalldruckpegel $\Delta L_{p,i} = L_{p0,1m} - L_{p0,5m}$	35
Abbildung 8:	Differenz der gemessenen FFT-Spektren der Schalldruckpegel $\Delta L_{p,i} = L_{p0,1m} - L_{p0,5m}$	36
Abbildung 9:	Skizze des Messaufbaus zur Untersuchung des Einflusses der Quellposition	38
Abbildung 10:	FFT-Spektrum des gemessenen Schalldruckpegels L_p außen im Abstand von 0,5 m vor geöffnetem Fenster für drei verschiedene Quellpositionen	39
Abbildung 11:	Skizze des festgelegten Messaufbaus	41
Abbildung 12:	Gemessener Terz-Schalldruckpegel innen an allen Mikrofonpositionen von Messort 13	47
Abbildung 13:	Standardabweichung σ der gemessenen Terz-Schalldruckpegelspektren der jeweiligen Gruppen von Mikrofonpositionen innen, arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte	47
Abbildung 14:	FFT-Spektren des gemessenen Schalldruckpegels an den jeweiligen Gruppen von Mikrofonpositionen innen und außen, arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte	48
Abbildung 15:	Numerisch berechnete Eigenformen des leeren Raumvolumens an Messort 15	49
Abbildung 16:	Messaufbau und Simulationsmodell zur Ermittlung des Schalldruckpegels an definierten Mikrofonpositionen in den Raumecken	50
Abbildung 17:	FFT-Spektren des Schalldruckpegels an der Mikrofonposition 03 in der Raumecke im Abstand von 0,1 m zu den Raumbegrenzungsflächen von Messort 15	51
Abbildung 18:	Differenz der numerisch simulierten FFT-Spektren des Schalldruckpegels $L_{p0m} - L_{p0,1m}$ und $L_{p0m} - L_{p0,5m}$	52
Abbildung 19:	FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ für alle 35 untersuchten Messorte	54
Abbildung 20:	FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,M,T}$ für alle 35 untersuchten Messorte	54
Abbildung 21:	FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ und $D_{b,M,T}$, jeweils arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte	55
Abbildung 22:	FFT-Spektrum der Differenz $D_{b,M,T} - D_{b,E,T}$ der mittleren gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen	56
Abbildung 23:	FFT-Spektren (Ausschnitt) der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen der untersuchten Messorte 19 bis 21 mit kleinem Raumvolumen	56
Abbildung 24:	FFT-Spektrum der Differenz $L_{p,a,W} - L_{p,a,T}$ der mittleren gemessenen Schalldruckpegel außen	58
Abbildung 25:	FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen, jeweils arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte	58

Abbildung 26:	FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen D_b, E, T für Räume mit großem Raumvolumen	59
Abbildung 27:	FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen D_b, E, T für Räume mit kleinem Raumvolumen	60
Abbildung 28:	FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen D_b, E, T für Räume mit großer relativer Fensterfläche	60
Abbildung 29:	FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen D_b, E, T für Räume mit kleiner relativer Fensterfläche	61
Abbildung 30:	FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte aus Abbildung 25 ergänzt um analytisch berechnete Eigen- und Koinzidenzfrequenzen einer 0,5 m dicken Wand	66
Abbildung 31:	FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte aus Abbildung 25 ergänzt um analytisch berechnete Eigen- und Koinzidenzfrequenzen einer 0,5 m dicken Wand	66
Abbildung 32:	FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte aus Abbildung 21 ergänzt um Ergebnisse nach dänischer und schwedischer Messmethode	68
Abbildung 33:	Arithmetischer Mittelwert der Standardabweichung σ aller in einem Raum möglichen Kombinationen von Messpunkten nach dänischer (gelb) und schwedischer (lila) Messmethode	68
Abbildung 34:	Vergleich der Terz-Spektren der gemessenen mittleren Schalldruckpegeldifferenzen für breitbandige Anregung mit Ergebnissen der Literatur.....	69
Abbildung 35:	Terz-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz D_b, E, T	71
Abbildung 36:	FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz D_b, E, T	72
Abbildung 37:	Gegenüberstellung der Terz-Spektren der gemessenen mittleren Schalldruckpegeldifferenz D_b, E, T und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{b90, T}$ für breitbandige Anregung	73
Abbildung 38:	Differenz der Terz-Spektren der mittleren Schalldruckpegeldifferenz D_b, E, T für breitbandige Anregung und der mittleren Schalldruckpegeldifferenz D_t, E, T für tonale Anregung bezüglich des Messpunktes $MP_{a,T}$	75
Abbildung 39:	Terz-Spektren der mittleren Schalldruckpegeldifferenz D_b, E, T und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{b90, T}$ für breitbandige Anregung sowie der mittleren Schalldruckpegeldifferenz D_t, E, T und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{t90, T}$ für tonale Anregung bezüglich des Messpunktes $MP_{a,T}$	75
Abbildung 40:	Terz-Spektren der mittleren Schalldruckpegeldifferenz D_b, E, W und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{b90, W}$ für breitbandige Anregung sowie der mittleren Schalldruckpegeldifferenz D_t, E, W und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{t90, W}$ für tonale Anregung bezüglich des Messpunktes $MP_{a,W} - 6$ dB.....	76
Abbildung 41:	Vergleich der Terz-Spektren der ermittelten Schalldruckpegeldifferenzen mit Ergebnissen der Literatur	76
Abbildung 42:	Maximal zulässige Terz-Beurteilungspegel im Raum entsprechend den Anhaltswerten für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 tags bzw. nachts sowie Hörschwellenpegel nach verschiedenen Normen.....	77

Abbildung 43:	Berechnete maximal zulässige Terz-Immissionsschalldruckpegel am maßgeblichen Immissionsort außen nach TA Lärm ($MP_{a,T}$) für breitbandige bzw. tonale Geräusche entsprechend den aufgrund der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 tags im Raum maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegeln; Vergleich mit Literatur.....	78
Abbildung 44:	Berechnete maximal zulässige Terz-Immissionsschalldruckpegel am maßgeblichen Immissionsort außen nach TA Lärm ($MP_{a,T}$) für breitbandige bzw. tonale Geräusche entsprechend den aufgrund der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 nachts im Raum maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegeln; Vergleich mit Literatur.....	79
Abbildung 45:	Berechnete maximal zulässige Terz-Immissionsschalldruckpegel an einem freien Punkt am Immissionsort außen für breitbandige bzw. tonale Geräusche entsprechend den aufgrund der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 tags im Raum maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegeln; Vergleich mit Literatur	79
Abbildung 46:	Berechnete maximal zulässige Terz-Immissionsschalldruckpegel an einem freien Punkt am Immissionsort außen für breitbandige bzw. tonale Geräusche entsprechend den aufgrund der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 nachts im Raum maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegeln; Vergleich mit Literatur	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schalldruckpegeldifferenz, die statistisch von 80 % bis 90 % aller typischen dänischen Gebäude mindestens erreicht wird, nach JAKOBSEN (2012)	19
Tabelle 2: Frequenzabhängige Werte zur Berechnung der Schallimmission im Raum nach JAKOBSEN (2012).....	21
Tabelle 3: Prüfkriterien nach BGL (2012)	24
Tabelle 4: Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz nach TLUG (2013).....	25
Tabelle 5: Korrekturwerte KX_i der X-Frequenzbewertung nach SCHMIDT (2016)	26
Tabelle 6: Terz-Schalldämmung für 50 Hz bis 200 Hz nach THORSSON et al. (2018)	31
Tabelle 7: Terz-Schalldruckpegeldifferenz ΔL_p zwischen dem Schalldruckpegel außen unter Freifeldbedingungen und dem Schalldruckpegel innen für 20 Hz bis 200 Hz nach THORSSON et al. (2018)	31
Tabelle 8: Angaben der „Wohnungsbau-Genossenschaft e.G.“ und der „Eisenbahner-Wohnungsgenossenschaft Dresden eG“	43
Tabelle 9: Angaben der „Wohnungsgenossenschaft Aufbau Dresden eG“	43
Tabelle 10: Übersicht der geometrischen und akustischen Parameter der ausgewählten 35 Räume	45
Tabelle 11: Materialeigenschaften ausgewählter Baustoffe trennender Bauteile	63
Tabelle 12: Eigen- und Koinzidenzfrequenzen ausgewählter Baumaterialien trennender Bauteile	64

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A 1: Übersicht der geometrischen und akustischen Parameter der untersuchten Räume, Teil 1 ..	86
Tabelle A 2: Terz-Spektren der Schalldruckpegeldifferenzen zwischen außen und innen, Mittelwerte und untere Vertrauensbereichsgrenzen für 90-%ige Überschreitungswahrscheinlichkeit, bei breitbandiger und tonaler Anregung	88
Tabelle A 3: Terz-Schalldruckpegel außen, für welche bei Voraussetzung der Schalldruckpegeldifferenzen nach Tabelle A 3 die Anhaltswerte gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680:1997, Tabelle 1 für den Tag durch die Terz-Beurteilungspegel (DIN 45680:1997) innen eingehalten werden.....	89
Tabelle A 4: Terz-Schalldruckpegel außen, für welche bei Voraussetzung der Schalldruckpegeldifferenzen nach Tabelle A 3 die Anhaltswerte gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680:1997, Tabelle 1 für die Nacht durch die Terz-Beurteilungspegel (DIN 45680:1997) innen eingehalten werden.....	89

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
DfV	Dreifach-Verglasung
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
eG	eingetragene Genossenschaft
EN	Europäische Norm
e.V.	eingetragener Verein
FDTD	finite-difference time-domain method
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	fast Fourier transform (schnelle Fourier-Transformation)
GWZ	Gebäude- und Wohnungszählung
LWP	Luft-Wärme-Pumpen
LWWP	Luft-Wasser-Wärme-Pumpen
MP	Messposition
ISO	International Organisation for Standardization
RMS	root mean square
SNR	Signal-Rausch-Abstand (Signal to noise ratio)
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
TTS	temporary threshold shift
WEA	Windenergieanlage
WG	Wohnungs(bau)genossenschaft

1 Einleitung

1.1 Motivation

Für die immissionsschutzrechtliche Genehmigung einer Anlage, die tieffrequenten Schall emittiert wie beispielsweise ein Blockheizkraftwerk (BHKW), sind üblicherweise die höchstzulässigen Schallemissionswerte zu bestimmen, für welche die Einhaltung der Anhaltswerte gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680:1997-03 mit angemessener Sicherheit zu erwarten ist. Hierfür existiert kein genormtes Verfahren, da tieffrequente Schallimmissionen gemäß TA Lärm und DIN 45680 innerhalb geschlossener Räume zu beurteilen sind und genormte Verfahren für die Schallausbreitungsrechnung die Schallimmissionen nur für außen liegende Punkte berechnen.

Die Ausprägung tieffrequenter Geräuschimmissionen innerhalb von Räumen wird zum einen durch die Eigenschaften der trennenden Bauteile, insbesondere deren Koinzidenz- und Eigenfrequenzen, beeinflusst. Diese hängen vor allem von den Bauteil-Dimensionen sowie vom Material ab. In vielen Fällen bestimmen bei tiefen Frequenzen die Fenster die Schalldämmung. Sie wirken wie ein Tiefpassfilter. Zum anderen haben die Eigenfrequenzen (Raummoden) des Empfangsraumes neben den Schallabsorptionseigenschaften der Raumausstattung einen starken Einfluss auf die Amplitude und Verteilung des Schalldrucks im Raum. Die wesentlichen Bestandteile einer gesicherten Prognose sind daher:

- Kenntnis der spektralen Emissionswerte (Schalldleistung),
- Berechnung der Schallausbreitung (energetisch nach DIN ISO 9613-2 oder phasenrichtig, z. B. nach Nord 2000 (PLOVSING 2001)),
- Berechnung der Schalldämmung der trennenden Außen- und Innenbauteile (unter Berücksichtigung von Eigen- und Koinzidenzfrequenzen) auch winkelabhängig,
- Berechnung der Eigenmoden eines schutzbedürftigen Raumes, auch für komplexe Geometrien.

Die aufgeführten Berechnungen sind teilweise mit einem erheblichen Aufwand und gewissen Unsicherheiten verbunden, insbesondere die letzten beiden. Deshalb sollen hier anhand von Messungen der Schalldruckpegeldifferenzen zwischen außen und innen an vielen repräsentativen Räumen statistische Ergebnisse gewonnen werden, mit deren Hilfe es möglich ist, maximal zulässige Schalldruckpegel außen anzugeben, für welche innen die Einhaltung der oben genannten Anhaltswerte mit einer gewissen Sicherheit anzunehmen ist.

1.2 Problemlösungsstrategie

Im ersten Schritt erfolgt eine umfangreiche Literaturrecherche, die sich mit tieffrequenten Schallimmissionen beschäftigt und dabei insbesondere bereits durchgeführte Untersuchungen zu Messung und Prognose tieffrequenter Schalle betrachtet. Auf Grundlage der Ergebnisse der Literaturrecherche werden messtechnische Voruntersuchungen durchgeführt und ein Messaufbau für die durchzuführende Messkampagne konzipiert.

Im Anschluss an eine Recherche von 35 für Sachsen repräsentativen Aufenthaltsräumen werden mehranalige gleichzeitige Messungen innerhalb und außerhalb der schutzbedürftigen Räume im Frequenzbereich von 25 Hz bis 200 Hz (Terzband) bei Rauschanregung von außen durchgeführt und ausgewertet. Ermittelt werden dabei sowohl Terzspektren als auch FFT-Spektren mit einer Frequenzauflösung von weniger als 2 Hz. Die Auswertung beinhaltet die Bestimmung mittlerer und punktspezifischer Schalldruckpegeldifferenzen sowie deren Standardabweichungen. Des Weiteren wird ein numerisches Berechnungsmodell zur Vorhersage punktspezifischer Schalldruckpegeldifferenzen mit FEM erstellt, das am Beispiel eines geometrisch unregelmäßigen Raumes angewendet und anhand von Messungen validiert wird.

Von den gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen wird eine untere Vertrauensbereichsgrenze bestimmt. Außerdem wird durch den Vergleich der Terz- mit den FFT-Spektren ermittelt, in welcher Höhe bei tonaler Anregung Abweichungen von den mit breitbandiger Anregung ermittelten Schalldruckpegeldifferenzen auftreten.

Die ermittelten Schalldruckpegeldifferenzen und die daraus abgeleiteten, am Immissionsort außen maximal zulässigen Schalldruckpegel werden angegeben und den Ergebnissen verschiedener Prognoseverfahren gegenübergestellt.

Die technische Planung und Umsetzung der Schalldruckpegelmessungen fand im Rahmen einer Abschlussarbeit an der Hochschule Mittweida statt. Zur weiteren Einordnung der Ergebnisse soll hier auf ECKERT (2020) verwiesen werden.

2 Literaturrecherche

Anhand der Literaturrecherche soll insbesondere der Stand der Technik der Messung und der Prognose tieffrequenter Geräuschemissionen dargestellt werden.

2.1 Tieffrequente Schallmissionen

Tieffrequente Geräusche spielen eine besondere Rolle beim Schallmissionsschutz und werden immer häufiger thematisiert (MÖHLER & EULITZ 2017; KRAHÉ et al. 2014). Im Zuge der Energiewende kommt es zu einer Dezentralisierung der Energieerzeugung und zum vermehrten Einsatz von Wärmepumpen, Windkraftanlagen und BHKW nahe oder direkt in Wohngebieten (ALD 2016). Einige dieser Anlagen werden dauerhaft betrieben und emittieren somit auch dauerhaft Schall. Gleichzeitig steigen die Siedlungsdichte und der Wohnkomfort, insbesondere auch die Anzahl an Klima- und Lüftungsanlagen (ZOBEL & EULITZ 2016; MALSCH & HORNBERG 2007).

Untersuchungen zur Geräuscentwicklung in typischen Baugebieten auf der Grundlage von Absatzzahlen für Wärmepumpen und Klimageräte 2015 und 2030 (Prognose) kommen zu dem Schluss, dass die Lärmbelastung unabhängig vom untersuchten Gebiet frequenzabhängig zunehmen wird. Gerade in Dorfgebieten wird das Konfliktpotential steigen (ZOBEL & EULITZ 2016; MÖHLER & EULITZ 2017). Die zurzeit stetig wachsenden Absatzzahlen und Absatzprognosen für 2030 stützen diese These (SCHULZE et al. 2014; BWP 2019).

Wirkung

In KRAHÉ et al. (2014) sind aurale und extraaurale Wirkungen von tieffrequentem Schall, insbesondere Infraschall, aus verschiedenen Studien zusammengestellt. Extraaurale Wirkungen reichen dabei von subjektiv empfundenem Schwindelgefühl über Müdigkeit, Benommenheit und Apathie bis zu einer Verlängerung der Reaktionszeit von 30 % bis 40 % im Labor. Auch werden körperliche Reaktionen wie sinkende Hauttemperatur, Verringerung der Leistung der Herzmuskelkontraktion und Modulation der Stimme aufgeführt. Zu auralen Wirkungen werden Ohrendruck und die breitbandige Erhöhung der temporären Hörschwelle TTS (temporary threshold shift) genannt, wobei letztere nur bei einem Teil der aufgeführten Studien nachgewiesen wurde.

Im tieffrequenten Bereich, nach DIN 45680 also unterhalb von 90 Hz, wird das Tonhöhenempfinden immer schwächer, das „Hören“ des Schalls geht zunehmend in ein „Fühlen“ über. Deshalb wird meist von einer Wahrnehmungsschwelle anstatt einer Hörschwelle gesprochen (MALSCH & HORNBERG 2007; ALD 2016; DIN 45680). Generell steigt die Hörschwelle mit sinkender Frequenz an. Tieffrequente Geräusche können jedoch bereits im Bereich der Wahrnehmungs- oder Hörschwelle belästigend wirken. Auch ist die Hörfläche bei tiefen Frequenzen kleiner als bei mittleren und hohen Frequenzen, die Schmerzschwelle liegt demnach näher an der Hörschwelle. Somit führen tieffrequente Pegeländerungen zu einer stärkeren Änderung der Wahrnehmung. Eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 5 dB führt z. B. bei 25 Hz zu einer Verdoppelung der Lautheit. Bei 1 kHz ist dazu eine Pegelerhöhung von 10 dB nötig (DIN ISO 226; DIN 45680). Die Wahrnehmbarkeit steigt außerdem mit der Komplexität des Geräusches. So kann es auch zu einer Wahrnehmung kommen, wenn alle Einzelkomponenten des Geräusches unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen. Mit erhöhter Wahrnehmung kann

gleichermaßen eine erhöhte Lästigkeit einhergehen, jedoch kann eine junge Person trotz niedrigerer Hörschwelle eine höhere Akzeptanz zeigen (KRAHÉ et al. 2014; MALSCH & HORNBERG 2007). Schlafstörungen infolge tieffrequenter Geräusche können langfristig negative gesundheitliche Folgen haben, auch wenn die Störungen nicht bewusst wahrgenommen werden (THORSSON et al. 2018).

Eigenschaften

Nach DIN ISO 9613-2 sinkt der Luftdämpfungskoeffizient stark mit der Frequenz, weshalb die Schallpegelabnahme tiefer Frequenzen über lange Entfernungen im Gegensatz zu mittleren und hohen Frequenzen kaum durch Luftdämpfung bestimmt ist. Des Weiteren müssen Objekte, die den Schall zwischen Sender und Empfänger für tiefe Frequenzen abschirmen sollen, deutlich größere Abmessungen aufweisen als für mittlere und hohe Frequenzen, um die gleiche Einfügungsdämpfung zu erzielen. Nach DIN ISO 9613-2 hat die horizontale Ausdehnung des Schallschirms senkrecht zur Verbindungslinie zwischen Quelle und Empfänger größer zu sein als die betrachtete Wellenlänge λ , damit der Schirm für die jeweilige Frequenz überhaupt als solcher gilt. Bei gleichem Einfügungsdämmmaß muss ein Schallschirm nach DIN ISO 9613-2 umso höher sein, je tiefer die abzuschirmende Frequenz ist.

Tieffrequente Geräusche werden zudem deutlich geringer durch die trennenden Bauteile gedämmt als Geräusche mit hohen Frequenzen. Insbesondere Fenster, meist die schalltechnisch schwächsten Bauteile, agieren hier als Tiefpassfilter. Weiterhin können tiefe Anregungsfrequenzen von Aggregaten gerade bei dicken biegesteifen Bauteilen mit deren Koinzidenzfrequenz zusammenfallen. Die Koinzidenzeffekte sind dabei auch vom Winkel des einfallenden Schalls abhängig. Biegesteife Bauteile werden so ausgelegt, dass ihre Koinzidenzfrequenz unterhalb des Bauakustik-Frequenzbereiches liegt. Dieser umfasst im Normalfall jedoch nur die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von 100 Hz bis 3150 Hz, weshalb im Allgemeinen auch keine Ansprüche an das Schalldämmmaß von Bauteilen unterhalb dieses Bereiches bestehen. (SCHMIDT 2016; ALD 2016; FASOLD & VERES 2003; SCHIRMER 2006)

Das Schallfeld in geschlossenen Räumen ist bei tiefen Frequenzen stark durch Luftschalleigenfrequenzen (Raummoden), also stehende Wellen, beeinflusst. Fallen bei einem Schallereignis Vielfache der halben Wellenlänge mit einer Raumabmessung zusammen, so kommt es zu systematisch im Raum verteilten konstruktiven Überlagerungen (Überhöhungen) und destruktiven Überlagerungen (Auslöschungen) von einfallenden und reflektierten Schallwellen. Im Allgemeinen befinden sich an den Raumbegrenzungen Schalldruckmaxima. Im Raum sind Schalldruckmaxima und -minima je nach Ordnung der Mode verteilt. Die erste (tiefste) Raummode bildet sich aus, wenn die halbe Wellenlänge mit der längsten Raumabmessung (zumeist die Raumdiagonale) zusammenfällt. Je größer der Raum ist, desto tiefer ist demnach die erste Luftschalleigenfrequenz (FASOLD & VERES 2003). Allerdings kommt es in Folge von Möblierung und impedanzbelegten Flächen im Raum auch für Frequenzen ungleich der Raummoden zur Ausbildung von Schalldruckmaxima und -minima innerhalb des Raumes (PEDERSEN et al. 2007). Bei tiefen Frequenzen herrscht eine starke Ungleichverteilung des Schalldrucks im Raum vor. Deshalb ist es wichtig, die höchsten Schalldruckpegel innerhalb eines Raumes zuverlässig zu finden, da es eine betroffene Person nicht entlastet, wenn es an anderen Stellen als der lautesten im Raum leiser ist (PEDERSEN et al. 2007).

2.2 Messverfahren innerhalb geschlossener Räume

DIN 45680 – Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft
DIN 45680 legt ein Verfahren zur Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in Gebäuden fest. Die tiefen Frequenzen im Sinne der Norm umfassen dabei die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von 10 Hz bis 80 Hz. In Sonderfällen, wenn geräuschbestimmende Anteile diesem Bereich dicht benachbart sind, können zusätzlich die Terzen der Mittenfrequenzen von 8 Hz und 100 Hz betrachtet werden. Nach DIN 45680 können Belästigungen durch tieffrequente Geräusche auftreten, wenn die Differenz zwischen C- und A-bewertetem äquivalenten Dauerschallpegel bzw. zwischen C- und A-bewertetem maximalen Schalldruckpegel den Wert von 20 dB überschreitet.

Als maßgeblicher Messort ist der im Gebäude am stärksten betroffene Aufenthaltsraum und darin die Position der höchsten Belastung definiert, an der sich Personen regelmäßig aufhalten. Liegt der maßgebliche Immissionsort in Wandnähe, ist im Abstand von mindestens 0,5 m zur Wand zu messen. Im Anhang B der Norm ist vermerkt, dass die geometrische Raummitte aufgrund stehender Wellen (Raummoden) als Messort ungeeignet sein kann.

In der Auswertung werden auf Basis des äquivalenten Dauerschallpegels ein Terz-Beurteilungspegel für die zu betrachtenden Zeiträume Tag und Nacht erhoben und das Signal auf deutlich hervortretende Einzeltöne überprüft. Für die Bewertung der tieffrequenten Geräusche sind die ermittelten Terz-Beurteilungspegel anschließend mit den Werten der Hörschwelle unter Berücksichtigung der Anhaltswerte aus Beiblatt 1 zu DIN 45680 zu vergleichen. Werden die Anhaltswerte nicht überschritten, liegen im Allgemeinen keine erheblichen Belästigungen durch tieffrequente Geräuschimmissionen vor. Analog dazu erfolgt die Beurteilung der maximalen Terz-Schalldruckpegel.

PEDERSEN et al. (2007) – Indoor Measurements of Noise at Low Frequencies, Problems and Solutions

Die Autoren schreiben, dass es aufgrund der komplexen Stehwellenmuster, die sich innerhalb des Raumes ausbilden, nicht ausreichend ist, eine Messung an einem einzelnen Punkt durchzuführen, um das Schallfeld innerhalb eines Raumes zuverlässig zu beschreiben. In der Raummitte an verschiedenen Punkten gemessene und gemittelte Werte sind zwar üblich, jedoch ebenfalls nicht repräsentativ für tieffrequente Geräusche. Um deren Einwirkung adäquat zu beschreiben, sollen die Messungen die Maximalwerte des Schalldruckpegels im Raum zuverlässig aufzeigen.

Zur Untersuchung der Verteilung des Schalldrucks im Raum wurden numerische Berechnungen nach der „finite-difference time-domain method“ (FDTD) durchgeführt. Diese erfolgten für Räume unterschiedlicher Abmessungen bei verschiedenen Anregungsfrequenzen, wobei alle Raumbegrenzungen als schallhart angenommen wurden. Die Ergebnisse in Abbildung 1 zeigen starke Schwankungen des Schalldruckpegels in Abhängigkeit der Position innerhalb des Raumes in allen drei Raumdimensionen. Die Schalldruckverteilung folgt teils sehr komplexen Mustern, wodurch es vorkommen kann, dass auch an Wänden oder in Ecken des Raumes Schalldruckminima auftreten.

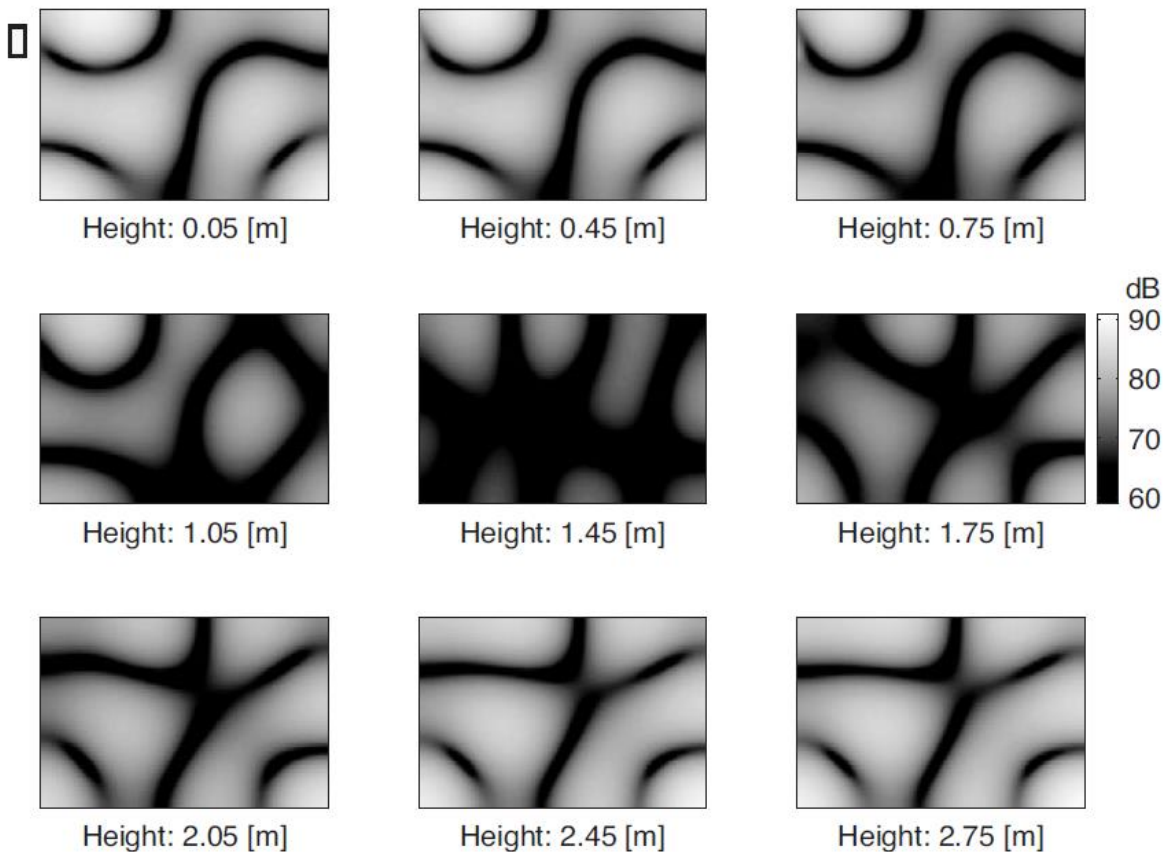
Die für die Darstellungen in Abbildung 1 verwendete Anregungsfrequenz fällt nicht mit einer Mode des Raumes zusammen, wodurch die Schalldruckverteilung keinem klaren Muster folgt und auch von der Quellposition abhängt. Fallen Anregungsfrequenz und Raummode zusammen, entspricht also ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge einer der Raumabmessungen (inkl. der Raumdiagonalen), folgt die Schalldruckverteilung symmetrischen Mustern in einer, zwei oder drei Raumdimensionen.

Dabei treten Schalldruckmaxima oder -minima z. B. auf der Hälfte der Ausdehnung der Raumdimension auf. Die Verteilung des Schalldrucks ist in diesem Fall nur geringfügig von der Quellposition abhängig. Wenn die Anregungsfrequenz mit einer Mode eines quaderförmigen Raumes übereinstimmt, treten in allen zur Ausbreitungsrichtung der Stehwelle normalen Raumkanten und allen Raumecken Schalldruckmaxima auf. Das ist bei nicht-raummodalen Anregungsfrequenzen nicht unbedingt der Fall.

Eine weitere Erkenntnis der Simulationen ist, dass die Positionen der Schalldruckmaxima weit in den Raum hineinreichen und teils schmale, stark abfallende Schalldruckminima vorliegen. Zudem tritt stets in mindestens einer der Raumecken ein Schalldruckmaximum auf, was diese Eckpositionen als sehr geeignet für die Repräsentation der höchsten Lärmbelastung innerhalb von Räumen erscheinen lässt. In der Nähe einer Schallquelle im Raum befindet sich nicht zwangsläufig auch ein Schalldruckmaximum. Wird die Quelle jedoch nahe einer Raumecke positioniert, kann es dort zu einer Überhöhung des Schalldrucks kommen, die nicht für den Raum repräsentativ ist.

In Anbetracht der durch die FDTD-Simulationen gewonnenen Erkenntnisse, dass der Schalldruck innerhalb von Räumen stark ortsabhängig ist, wurden von PEDERSEN et al. (2007) die zum damaligen Zeitpunkt vorherrschenden Messmethoden unterschiedlicher Länder zur Bestimmung des maßgeblichen Lärmpegels innerhalb von Räumen miteinander verglichen.

Die schwedische Messmethode für tieffrequente Geräusche umfasst die Terzen mit den Mittenfrequenzen von 31,5 Hz bis 200 Hz. Um die tieffrequente Lärmbelastung zu bestimmen, wird die Raumkante oder Raumecke mit dem höchsten C-bewerteten Schalldruckpegel gesucht und in die Messung einbezogen. Das geschieht durch Abscannen, vorzugsweise mit einem mobilen Schallpegelmesser. Der Scan wird im Abstand von 0,5 m zur Wand und in 0,5 m bis 1,5 m Abstand zu Decke oder Boden durchgeführt. Zur so ermittelten Eckposition werden noch zwei Messpositionen in der Mitte des Raumes ausgewählt, die typische Aufenthaltsorte der Bewohner repräsentieren. Diese dürfen nicht weniger als 0,5 m von der Wand entfernt sein und nicht an bestimmten Teilen (Viertel, Hälfte oder Dreiviertel) einer Raumdimension liegen. Die Höhe dieser Positionen muss 0,6 m, 1,2 m oder 1,6 m betragen. Dies entspricht der typischen Position der Ohren einer liegenden, sitzenden oder stehenden Person. Weiterhin sollte der Abstand der beiden Positionen in der Raummitte nicht kleiner als 1,5 m sein, wobei die Priorität auf der Auswahl typischer Aufenthaltsorte liegt. Die maßgebliche tieffrequente Lärmbelastung wird anschließend durch energetische Mittelung des Schalldruckpegels an den drei Messpositionen bestimmt.



Legende: Breite x Länge x Höhe des Raumes: 5,7 m x 3,8 m x 2,8 m bei Anregung von außen (kleiner Quader) mit einem Sinus-Signal bei 114 Hz; simuliert mit FDTD

Quelle: PEDERSEN et al. (2007)

Abbildung 1: Simulierte Schalldruckverteilung innerhalb eines quaderförmigen Raumes

DIN EN ISO 16032 zur Messung des Schalldruckpegels von haustechnischen Anlagen in Gebäuden übernimmt Teile der schwedischen Norm. Sie umfasst die Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen von 31,5 Hz bis 8 kHz. Ein Messpunkt liegt hier, wie in der schwedischen Norm, in der Ecke des höchsten C-bewerteten Schalldruckpegels, jedoch wird dieser an diskreten Punkten entlang der vertikalen Raumkante in 0,5 m, 1 m und 1,5 m Höhe gesucht. Die beiden anderen Messpositionen in der Raummitte werden mit geringfügigen Unterschieden zur schwedischen Norm gewählt.

Die dänische Richtlinie zur Messung tieffrequenter Geräusche und von Infraschall leitet ebenfalls Teile ihrer Messung von der schwedischen Messmethode ab. Ihr Frequenzbereich umfasst die Terzen mit den Mittenfrequenzen von 5 Hz bis 160 Hz. Dabei befinden sich zwei Messpositionen an typischen Aufenthaltsorten im Raum, jedoch, im Unterschied zur schwedischen Methode, in einer Höhe von 1 m bis 1,5 m. Zudem werden sie, wenn möglich, von den betroffenen Personen selbst angezeigt. Eine dritte Messposition liegt in einer zufällig gewählten Raumecke in einer Höhe von 1 m bis 1,5 m über dem Boden und mit einem Abstand zur Wand von 0,5 m bis 1 m. In kleinen Räumen mit einer Grundfläche von weniger als 20 m² können zwei Messpositionen in zufälligen Raumecken als einzige Positionen verwendet werden. Messpositionen in der Mitte des Raumes sollten nach der dänischen Richtlinie vermieden werden.

Messmethoden wie die deutsche DIN 45680 und die niederländischen, japanischen und amerikanischen Richtlinien sind in PEDERSEN et al. (2007) grob zusammengefasst, jedoch nicht näher erläutert, da sich die Studie im dritten Teil vor allem mit der dänischen und der schwedischen Methode auseinandersetzt. Aufgrund der Erkenntnisse der FDTD-Simulationen stellen PEDERSEN et al. (2007) noch eine eigene Messmethode vor, die die „dreidimensionalen“ Raumecken, in denen zumeist die absoluten Schalldruckmaxima auftreten, einbezieht. Die Messung an Positionen dieser „3D-Ecken“ geschieht in unmittelbarer Nähe zu den Raumecken, d. h. im Abstand von weniger als 0,1 m zu den nächsten Raumbegrenzungen.

Zur Bewertung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der schwedischen, der dänischen und der „3D-Ecken“-Messmethode wurde von PEDERSEN et al. (2007) die Schalldruckverteilung im gesamten Raum messtechnisch untersucht. Die Messungen erfolgten in einem Büro, einem Schlafzimmer und einem Wohnzimmer mit typischer Einrichtung. Dazu wurden zwei Schallquellen in angrenzenden Räumen positioniert, von denen eine 31,5 Hz und die andere 125 Hz jeweils in getrennten Messungen als Sinuston und als Terzbandrauschen emittierte. Für das Büro wurde zusätzlich eine Messung mit Schallquelle innerhalb des Raumes durchgeführt, jedoch ergab diese keine qualitativen Unterschiede. Die Räume wurden aufwändig örtlich und spektral hochauflösend abgescannt. An einem Stab wurde ein Mikrophon mit konstanter Geschwindigkeit entlang mehrerer Querbalken innerhalb paralleler Ebenen zu einer Wand bewegt. So wurden je Raum mehr als 480 m Gesamtweg sequenziell für 1/8-Teilvolumina des Raumes abgescannt.

Bei 31,5 Hz zeigt sich für beide Anregungsarten deutlich, dass sich der Schalldruckpegel bei der Bewegung von den Raumecken zur Mitte des Raumes im Allgemeinen kontinuierlich verringert. Bei 125 Hz ist dieses allgemeine Verhalten nicht mehr durchgehend zu erkennen, stattdessen liegen hier Schalldruckpegelmaxima und -minima sehr dicht beieinander und komplizierter verteilt. Die örtlichen Schalldruckpegelmaxima sind hierbei nicht auf die Raumecken beschränkt, sondern verteilen sich auf unterschiedliche Bereiche des Raumes. Für die Sinustöne treten Pegelunterschiede innerhalb desselben Raumes von 30 dB auf. Für das Terzbandrauschen liegen die absoluten Schalldruckmaxima und -minima bis zu 20 dB auseinander. Die Messergebnisse zeigen zudem, dass die Raumbegrenzungen in einer realen Messsituation im Gegensatz zur idealisierten Simulation nicht als komplett schallhart anzusehen sind. Das gilt umso mehr für tiefe Frequenzen.

Die Daten wurden in PEDERSEN et al. (2007) mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode analysiert. Um statistische Aussagen treffen zu können, wurden den verschiedenen Messmethoden entsprechende Positionen jeweils eintausendmal kombiniert. Um der starken Varianz der Schalldruckpegel im Raum gerecht zu werden, erfolgte die Formulierung einer Zielgrenze. Diese wurde so gewählt, dass 10 % der Schalldruckpegel im Raum über der Zielgrenze liegen, weshalb sie in PEDERSEN et al. (2007) mit L_{10} bezeichnet wird. Bei Betrachtung des energetischen Mittelwerts der Schalleistung im Raum, liegt dieser konstant 3 dB bis 4 dB unterhalb der L_{10} -Zielgrenze. Wäre die Schalleistung im Raum bekannt, wäre dies eine geeignete Methode, um die Zielgrenze L_{10} zu bestimmen. Da dies jedoch kompliziert zu ermitteln ist, lässt sich diese Methode nur selten in der Praxis anwenden.

Die nach dänischer Methode bestimmten Immissionsschalldruckpegel weisen eine starke Varianz auf, mit der stärksten Ausprägung für das Sinussignal bei 125 Hz. Somit kann bei ungeeigneter Wahl der Messpositionen das Ergebnis der Lärmbelastung sehr stark von den eigentlichen akustischen Eigenschaften des Raumes abweichen. Für stark hervortretende Einzeltöne verringert sich die Streuung deutlich, wenn die betroffene Person tatsächlich die maßgeblichen Positionen hoher Belastung auswählt. Die Methode weist zudem für alle Messungen Schalldruckpegel unterhalb des L_{10} -Ziels auf.

Die nach der schwedischen Methode bestimmten Immissionsschalldruckpegel sind in den meisten Fällen um das L_{10} -Ziel konzentriert oder liegen wenige Dezibel darunter. Die Varianz ist moderat, da die Raumecke, in der der höchste C-bewertete Schalldruckpegel auftritt, immer mit in die Berechnung der Lärmbelastung einbezogen wird. Jedoch hängt der maßgebliche Messort dadurch stark vom Quellspektrum ab, da die Messung des C-bewerteten Einzelpegels keine Geräuschbewertung in separaten Frequenzbändern darstellt. Werden bei einem realen Quellsignal belästigende spektrale Geräuschanteile nicht durch die C-Bewertung repräsentiert, so verfälscht auch die schwedische Methode die maximale Lärmbelastung des Raumes. In diesem Fall ist die „schwedische Ecke“ wie auch die „dänische Ecke“ somit eher zufällig gewählt.

Die in PEDERSEN et al. (2007) als Alternative vorgestellte 3D-Ecken-Methode zur messtechnischen Bestimmung des maßgeblichen Immissionsschalldruckpegels im Raum zu verwenden, liegt nahe, da die Raumecken die höchsten Schalldrücke im Raum repräsentieren. Je nach Frequenz variieren jedoch auch dort die Schalldruckpegel (insbesondere bei nicht exakt-quaderförmigen Räumen), weshalb die Auswahl einer einzelnen Eckposition als nicht ausreichend angesehen wird. Stattdessen schlägt PEDERSEN et al. (2007) vor, vier zufällige Ecken des Raumes zu wählen. Die Mikrofone sollen dabei einen Abstand von weniger als 0,1 m zu den nächsten Raumbegrenzungsflächen aufweisen. Die Auswahl der Raumecken soll so geschehen, dass der Einfluss jeder Raumbegrenzungsfläche (Wände, Boden, Decke) durch mindestens ein Mikrofon repräsentiert ist. Zu vermeiden sind weiterhin Positionen, die an möglichen offensichtlichen und konzentrierten Übertragungswegen zur Quelle liegen. Die Ergebnisse dieser Methode liegen sehr nah an der L_{10} -Zielgrenze und überschreiten diese sogar teilweise. Auch ist die Streuung der Ergebnisse deutlich geringer als bei den anderen Methoden, bei gleichzeitig messtechnisch relativ einfacher Umsetzbarkeit.

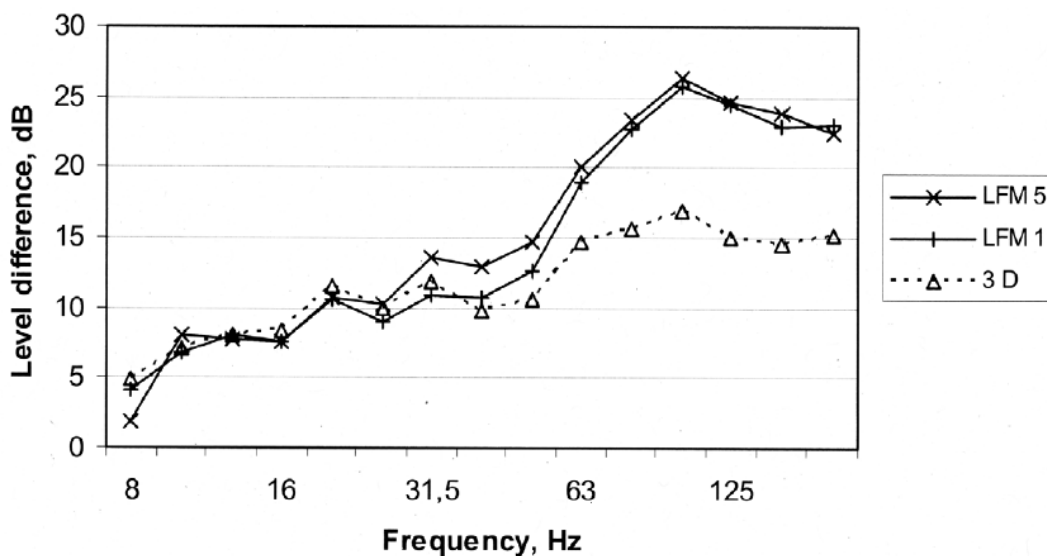
HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) – Sound Insulation of Dwellings at Low Frequencies

Im Zuge eines Projektes der dänischen Energiebehörde zur Untersuchung tieffrequenter Auswirkungen von Windenergieanlagen (WEA) wurde in HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) mithilfe zweier Methoden die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen für dänische Gebäude messtechnisch untersucht. Die erste Methode „3D“ verwendete vier Mikrofonpositionen in einem Abstand von 0,01 m bis 0,02 m von den dreidimensionalen Raumecken, wie in PEDERSEN et al. (2007) vorgeschlagen. Die zweite Messung erfolgte in Anlehnung an die in Dänemark für tieffrequente Lärmbelästigung vorgeschriebene Methode. Dabei wurden fünf Mikrofonpositionen verwendet, wovon sich zwei in der Nähe der Raumecken befanden (im Abstand von 0,5 m bis 1 m zu den Raumbegrenzungsflächen) und drei an typischen Aufenthaltsorten der Bewohner in der Raummitte. Gemessen wurde in neun Räumen, verteilt auf fünf Gebäude. Fünf der Räume waren Wohnzimmer und vier waren kleinere Räume, typisch für Schlafzimmer. Das Messvorhaben sollte dänische Landhäuser repräsentieren, die typisch für Sommerhäuser sind und teils mit großen Panoramafenstern, teils mit Leichtbauwänden ausgestattet sind.

Als Quelle diente ein großer Lautsprecher, der in mindestens 5 m Abstand und in einem Winkel von 45° zur Fassade positioniert wurde. Als Quellsignal kam rosa Rauschen zum Einsatz, das auf unter

250 Hz bandbegrenzt wurde. Zusätzlich wurde die spektrale Lautsprechercharakteristik mit Hilfe eines Equalizers kompensiert. Die Messungen erfolgten gleichzeitig an den für die beiden Methoden geltenden Messpositionen sowie außen unmittelbar vor der Fassade. Auch wurde das Hintergrundgeräusch bei abgeschalteter Quelle an denselben Messpositionen erfasst. Da die Fremdgeräuschpegelkorrektur nach DIN EN ISO 3744 erfolgte, die für Signal-Rausch-Abstände von weniger als 6 dB eine Begrenzung der Korrektur auf 1,3 dB vorsieht, kann es dabei ggf. zu einer Überschätzung des Innenschalldruckpegels gekommen sein. Um den Schalldruckpegel unter Freifeldbedingungen zu repräsentieren, wurde der unmittelbar vor der Fassade gemessene Außenschalldruckpegel um 6 dB reduziert.

Untersucht wurde in HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) die Schalldruckpegeldifferenz zwischen dem korrigierten Außenschalldruckpegel und dem energetischen Mittelwert des Schalldruckpegels an den innen verwendeten Messpositionen für die jeweilige Methode im Frequenzbereich von 8 Hz bis 200 Hz. Die in Abbildung 2 mit „3D“ betitelte Kurve repräsentiert die Ergebnisse der Methode mit vier Messpositionen unmittelbar in den Raumecken (im Abstand von 0,01 m bis 0,02 m von den angrenzenden Flächen). Die Kurve „LFM 5“ basiert in Anlehnung an die dänische Messmethode auf einer Messposition in einer Raumecke und zwei Messpositionen an typischen Aufenthaltsorten innerhalb des Raumes. Der Kurve „LFM 1“ liegt stattdessen die Verwendung von zwei Messpositionen in den Raumecken (im Abstand von 0,5 m bis 1 m von den angrenzenden Flächen) und einer zusätzlichen Messposition in der Raummitte zugrunde.



Legende: Ergebnisse von neun mit den Methoden „3D“, „LFM 5“ und „LFM 1“ vermessenen Räumen

Quelle: HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010)

Abbildung 2: Vergleich der mittleren Schalldruckpegeldifferenz bei verschiedenen Messmethoden

Die Ergebnisse der Methoden „LFM 1“ und „LFM 5“ zeigen generell über den gesamten Frequenzbereich eine gute Übereinstimmung. Unterhalb von ca. 31,5 Hz liegen alle drei Kurven sehr nah beieinander. Dies kann durch den Druckkammereffekt interpretiert werden, der unterhalb der ersten Eigenfrequenz des Raumes auftritt, und bei dem sich innerhalb des gesamten Raumes ein nahezu konstanter Schalldruckpegel einstellt. Je höher jedoch die Frequenz steigt, desto stärker weichen die Ergebnisse der Methoden „LFM 5“ und „LFM 1“ von den Ergebnissen der „3D“-Methode ab. Oberhalb von 63 Hz sind die Abweichungen zur „3D“-Methode mit bis zu 10 dB signifikant. Die Kurve der „3D“-Methode stagniert im Gegensatz zu den anderen beiden Kurven oberhalb von 63 Hz, was mit den Ergebnissen anderer Studien übereinstimmt (JAKOBSEN 2012) und in den Abschnitten 3.1.2 und 4.3 weiter diskutiert wird.

Für die Auswertung der Daten und die Erstellung einer für Dänemark typischen Schalldämmung zogen HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) zusätzlich eine ältere Messung von 17 Räumen aus dem Jahr 1996 heran, deren Ergebnisse sich relativ gut mit denen der Methode „LFM 5“ decken. Er berechnete die Standardabweichung der Messungen aller Räume und subtrahierte sie von den Messergebnissen, mit dem Ziel, eine Schalldämmung zu ermitteln, die statistisch von 80 % bis 90 % aller typischen dänischen Gebäude mindestens erreicht wird. Diese ermittelte Schalldämmung ΔL_{σ} ist in Tabelle 1 für die Terzmittenfrequenzen von 8 Hz bis 200 Hz aufgeführt.

Tabelle 1: Schalldruckpegeldifferenz, die statistisch von 80 % bis 90 % aller typischen dänischen Gebäude mindestens erreicht wird, nach JAKOBSEN (2012)

	Terzmittenfrequenz in Hz														
	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
ΔL_{σ} in dB	2,4	1,2	3,2	2,1	3,6	4,6	6,7	7,6	10,3	14,2	17,5	18,4	17,5	18,6	22,4

2.3 Prognoseverfahren

TA Lärm

Die Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) beinhaltet sowohl Mess- als auch Prognoseverfahren für die Bestimmung der Schallimmissionen. Der maßgebliche Immissionsort befindet sich dabei bei bebauten Flächen im Abstand von 0,5 m vor der Mitte des geöffneten Fensters des durch das Geräusch am stärksten betroffenen schutzbedürftigen Raumes nach DIN 4109, Ausgabe November 1989. Bei unbebauten Flächen bzw. Gebäuden ohne schutzbedürftige Räume wird der stärkste betroffene Rand der Fläche betrachtet, an dem es möglich ist, Gebäude mit schutzbedürftigen Räumen zu errichten. Bei Gebäuden, die mit einer zu beurteilenden Anlage baulich verbunden sind, wird der am stärksten betroffene schutzbedürftige Raum als maßgeblicher Immissionsort herangezogen.

Die erhöhte Störwirkung aufgrund bestimmter Geräuscheigenschaften und Einwirkzeiten am Immissionsort wird durch entsprechende Zuschläge für Ton- und Informationshaltigkeit, für Impulshaltigkeit sowie für Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit berücksichtigt. Für die relevanten Zeiträume tags und nachts existieren verschiedene Beurteilungszeiten. Zum Schutz der Allgemeinheit darf der Beurteilungspegel gebietsabhängig festgelegte Immissionsrichtwerte nicht überschreiten. Neben dem Beurteilungspegel werden kurzzeitige Geräuschspitzen anhand des maximalen A-bewerteten Schalldruckpegels mit der Zeitbewertung F berücksichtigt.

Tieffrequente Geräusche sind gemäß TA Lärm innerhalb von schutzbedürftigen Räumen bei geschlossenem Fenster zu beurteilen. Bei deutlich wahrnehmbaren tieffrequenten Geräuschen ist zunächst die Differenz zwischen dem äquivalenten C-bewerteten und dem äquivalenten A-bewerteten Dauerschall-druckpegel zu ermitteln. Falls diese Pegeldifferenz den Wert von 20 dB überschreitet, können gemäß TA Lärm schädliche Umwelteinwirkungen durch tieffrequente Geräusche auftreten und es wird auf DIN 45680, Ausgabe März 1997, und das zugehörige Beiblatt 1 verwiesen.

JAKOBSEN (2012) – Danish Regulation of Low Frequency Noise from Wind Turbines

In Dänemark wurden 1991 erstmals gesetzlich feste Grenzen für Schalldruckpegel von Windenergieanlagen (WEA) in ländlichen Gebieten und Vororten festgelegt. Bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s darf der A-bewertete Schalldruckpegel 45 dB(A) in Siedlungen bzw. 40 dB(A) in Wohngebieten nicht überschreiten. Im Jahr 2006 kamen Werte für eine Windgeschwindigkeit von 6 m/s dazu, und die Werte für 8 m/s wurden an die nun weiter verbreiteten größeren Maschinen angepasst. Bei 8 m/s galten ab diesem Zeitpunkt Grenzwerte von 44 dB(A) bzw. 39 dB(A) sowie bei 6 m/s von 42 dB(A) bzw. 37 dB(A). Maßgeblich ist hierbei der am stärksten betroffene Ort innerhalb der Siedlung oder des Wohngebiets, der nicht weiter als 15 m von einem Gebäude entfernt liegt.

Eine weitere Anpassung erfolgte 2011, wobei neue Regelungen hinzukamen. So darf nun im Innenraum der durch WEA verursachte Schalldruckpegel nicht größer als 20 dB(A) sein, unabhängig von Windsituation und Lage der WEA. Tieffrequent im Sinne dieser Richtlinie umfasst einen Frequenzbereich mit den Terzbändern von 10 Hz bis 160 Hz. Außerhalb von Gebäuden gelten weiterhin die Grenzwerte von 2006.

Durch die Anwesenheit zusätzlicher Hintergrundgeräusche sobald Wind vorhanden ist (vor allem durch Bäume und Büsche), ist es direkt am Immissionsort unmöglich, hinreichend präzise Messungen der Lärmbelastung durch WEA durchzuführen. Auch kann beispielsweise Verkehrslärm die Messung insbesondere bei tiefen Frequenzen beeinflussen. Deshalb werden die Emissionen der WEA gemessen. Anschließend erfolgt eine Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 zum am stärksten betroffenen Ort und in Verbindung mit einem definierten Schalldämpfungsspektrum in den Raum hinein.

Der Schalldruckpegel für tieffrequente Lärmbelastung durch WEA L_{pALF} für Terzbänder berechnet sich dabei zu

$$L_{pALF} = L_{WA,ref} - 10 \lg(l^2 + h^2) \text{ dB} - 11 \text{ dB} + \Delta L_{gLF} - \Delta L_{\sigma} - \Delta L_a \quad (1)$$

- l Distanz vom Fuß der WEA zum maßgeblichen Immissionsort in m
- h Höhe der Rotor-Achse der WEA über dem Boden in m
- 11 dB Korrektur für die Ausbreitung im Freifeld [$10 \lg(4\pi)$] dB
- $L_{WA,ref}$ A-bewertetes Referenz-Schalleistungs-Emissions-Spektrum der WEA in dB
- ΔL_{gLF} Korrektur für den Bodeneffekt unterschieden nach Onshore- und Offshore-Anlagen, nach Tabelle 2 in dB
- ΔL_{σ} Schalldämmung typischer dänischer Gebäude nach Tabelle 2 in dB
- ΔL_a Korrektur für die Luftabsorption, $\Delta L_a = \alpha_a \cdot \sqrt{l^2 + h^2}$ mit α_a nach Tabelle 2 in dB

Für die Bestimmung der Schalldämmung wurden 26 Messungen in 14 Gebäuden durchgeführt, die typisch für Gebäude auf dem dänischen Land sind. Als Quelle diente ein großer Lautsprecher in einiger Entfernung zur Fassade. Die Messpositionen innen wurden nach der dänischen Richtlinie ausgewählt (PEDERSEN et al. 2007). Zur Lage der Messposition außen sind keine Angaben gemacht. Die Schalldämmung ΔL_{σ} ist festgelegt als die spektrale Schalldruckpegeldifferenz, die von 67 % der Ergebnisse aller Messungen mindestens erreicht wird.

Der Bodeneffekt ΔL_{gLF} wird dabei differenziert betrachtet, je nachdem, ob Onshore- oder Offshore-Anlagen vorliegen. Tabelle 2 enthält für die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen 10 Hz bis 160 Hz sowohl die Bodeneffekt-Korrekturen als auch die Schalldämmung ΔL_{σ} typischer dänischer Gebäude sowie die Luftdämpfung α_a .

Die in Tabelle 2 angegebenen Werte sind auf gewisse Distanzen optimiert. Diese umfassen für Onshore-Anlagen Entfernungen zwischen der dänischen Minimaldistanz von WEA zu Siedlungen (4-fache Nabenhöhe) und dem Doppelten dieser. Die Genauigkeit der Berechnung wurde bis zum 4-fachen der Minimaldistanz überprüft. Bei der weitesten Entfernung betrug die Abweichung zwischen Messung und Prognose ca. 1 dB. Für Offshore-Windanlagen wurden die Werte für Distanzen zwischen der 1,4-fachen und der 8-fachen Minimaldistanz optimiert. Die Genauigkeit wurde zwischen der 1-fachen und der 16-fachen Minimaldistanz überprüft. Hier lagen die Abweichungen zwischen Messung und Prognose bei der kürzesten Distanz bei 0,7 dB und bei der weitesten Distanz bei 1,7 dB.

Tabelle 2: Frequenzabhängige Werte zur Berechnung der Schallimmission im Raum nach JAKOBSEN (2012)

		Terzmittenfrequenz in Hz												
		10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
$\Delta L_{gLF,on}$	dB	6,0	6,0	5,8	5,6	5,4	5,2	5,0	4,7	4,3	3,7	3,0	1,8	0,0
$\Delta L_{gLF,off}$	dB	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,9	5,9	5,8	5,7	5,5	5,2	4,7	4,0
ΔL_{σ}	dB	4,9	5,9	4,6	6,6	8,4	10,8	11,4	13,0	16,6	19,7	21,2	20,2	21,2
α_a	dB/km	0,0	0,0	0,0	0,0	0,02	0,03	0,05	0,07	0,11	0,17	0,26	0,38	0,55

Bayerisches Landesamt für Umwelt: Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen - Ein Leitfaden (LfU 2011)

Das Bayerische Landesamt für Umwelt veröffentlichte 2011 einen Leitfaden zum Umgang mit tieffrequenten Geräuschen bei den immer häufiger werdenden Luftwärmepumpen (LWP) und Biogasanlagen (LfU 2011). Darin sind unter anderem charakteristische Schallemissionen verschiedener Gasmotoren in Form von unbewerteten und A-bewerteten Schalleistungspegeln angegeben.

Eine der Anlagen (Anlage H), die auch für die weiteren Untersuchungen innerhalb des Leitfadens verwendet wurde, erzeugt einen unbewerteten Schalleistungspegel von 110 dB. Durch Anwendung der A-Bewertung verändert sich der Einzahlwert des Schalleistungspegels der Anlage auf 89 dB(A). Für die Prognose tieffrequenter Schallimmission wurden in verschiedenen Abständen zu dieser Biogasanlage außerhalb von Gebäuden Messungen durchgeführt und für dieselben Szenarien Schallausbreitungsrechnungen nach DIN ISO 9613-2 angestellt. Dabei ergab sich im Frequenzbereich von 63 Hz bis 100 Hz eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Angemerkt ist jedoch, dass die Terz-Schalldruckpegel auch in 400 m Entfernung zur Schallquelle die Hörschwellenpegel nach DIN 45680 noch überschreiten. Das liegt vor allem daran, dass Motoren tonale Geräusche enthalten. Im Fall der untersuchten Anlage gab es deutlich tonale Komponenten im Terzband von 80 Hz, die nach den Kriterien der DIN 45680 den Hörschwellenpegel um mehr als 5 dB überschritten und somit die Anhaltswerte für die Nacht nicht einhielten.

In LfU (2011) erfolgt die Schallimmissionsprognose in den schutzbedürftigen Raum ähnlich zu JAKOBSEN (2012) durch Berücksichtigung eines definierten Schalldämmmaßes. Da die meisten Hersteller von Außenbauteilen deren Schalldämmung nicht für den Bereich unter 100 Hz angeben, kommt in LfU (2011) eine überschlägige Prognose in Anlehnung an Gleichung (4) der TA Lärm zum Einsatz, die auf Erfahrungswerten beruht.

Der Terz-Schalldruckpegel im Innenraum $L_{\text{eq,Terz,Innen}}$ in dB ergibt sich demnach zu

$$L_{\text{eq,Terz,Innen}} = L_{\text{Weq,Terz}} + K_0 - 20 \lg\left(\frac{s}{1 \text{ m}}\right) \text{ dB} - 11 \text{ dB} - R. \quad (2)$$

$L_{\text{Weq,Terz}}$ unbewerteter Terz-Schalleistungspegel der Anlage in dB

K_0 Raumwinkelmaß, hier 3 dB

s Entfernung zwischen der Anlage und dem Wohngebäude in m

R mittleres Schalldämmmaß für die Außenbauteile des Wohngebäudes, aus Erfahrungswerten, hier 15 dB (frequenzunabhängig)

Die Schallausbreitung beeinflussende Effekte, wie der Bodeneffekt oder die Luftdämpfung, werden außer Acht gelassen. Das für alle Terzbänder gleichermaßen mit 15 dB angegebene Wanddämmmaß R stellt die Verschiebung des für die Prognose maßgeblichen Immissionsortes von außen nach innen dar. Für LWP ergeben sich gegenüber BHKW deutlich geringere Schalleistungspegel. So erzeugt eine Vielzahl innen aufgestellter LWP A-bewertete Schalleistungspegel von 55 dB(A) bis 60 dB(A). Für den überwiegenden Teil außen aufgestellter LWP reichen die Schalleistungspegel von 62 dB(A) bis 67 dB(A). Da der Betriebszustand der LWP wechseln kann (z. B. Abtauprozess), kann die Störwirkung einer solchen Anlage gegenüber einem stationären Quellsignal ggf. stärker ausfallen. Höhere Betriebsstufen weisen zwar Pegelmaxima bei höheren Frequenzen auf, müssen jedoch nicht zwangsläufig lauter sein.

Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus – Hinweise zur Genehmigung und Überwachung von Biogasanlagen in Mecklenburg-Vorpommern – Biogasleitfaden Mecklenburg-Vorpommern (BGL 2012)

Biogasanlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen ausgeschlossen sind. Abgasmündungen von BHKW, wie sie in Biogasanlagen eingesetzt werden, können Schall mit überwiegenden Energieanteilen im Frequenzbereich unterhalb von 90 Hz emittieren. In der Anlage 4 zum Biogasleitfaden ist deshalb ein überschlägiges Prognoseverfahren für tieffrequente Schallimmissionen aufgeführt, welches von dem Verfahren der DIN ISO 9613-2 abgeleitet ist. Demnach ergibt sich der äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{\text{Terz,eq,außen}}$ außerhalb schutzbedürftiger Räume je Terz zu

$$L_{\text{Terz,eq,außen}} = L_{\text{WTerz,eq}} - A_{\text{div}} - A_{\text{gr}} - A_{\text{bar}} \quad (3)$$

- $L_{\text{WTerz,eq}}$ *Terz-Schalleistungspegel des BHKW-Abgasgeräusches bei Vollast in dB*
- A_{div} *geometrische Ausbreitungsdämpfung: $A_{\text{div}} = [20 \lg(d/d_0) + 11]$ dB; mit $d_0 = 1$ m*
- d *Abstand der Abgaskaminmündung zum maßgeblichen Immissionsort*
- A_{gr} *Bodeneffekt: $A_{\text{gr}} = -3$ dB. Darin ist das Richtwirkungsmaß D_{Ω} für die Abstrahlung in den Halbraum enthalten.*
- A_{bar} *Dämpfung aufgrund von Abschirmung durch große Hindernisse entlang des Ausbreitungswegs in dB*

Die tieffrequente Beurteilung findet in den relevanten tiefen Frequenzbändern statt, vornehmlich in den Terzen mit den Mittenfrequenzen von 50 Hz bis 100 Hz. Die Überschreitung der Hörschwelle ist nach Tabelle 3 zu beurteilen. Eine direkte Prognose des Immissionsschalldruckpegels innerhalb von Räumen erfolgt nach BGL (2012) nicht. An besonders empfindlichen Standorten kann die Einhaltung von Nr. 1 der Tabelle 3 gefordert werden.

Tabelle 3: Prüfkriterien nach BGL (2012)

Nr.	Prüfkriterium in dB	Beurteilung	Aktion
1	$L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}} \leq -10$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden mit großer Sicherheit unterschritten.	Anlage ist ohne weitere Auflagen genehmigungsfähig. Eine Herstellerbescheinigung ist vorzulegen.
2	$-10 \leq L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}} \leq -3$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden unterschritten.	Die prognostizierten Schalleistungspegel je Terz $L_{\text{WTerz,eq}}$ sind durch Messung nach Inbetriebnahme zu überprüfen.
3	$L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}} > -3$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden möglicherweise überschritten.	Weitere schallmindernde Maßnahmen zur Absenkung der Schalleistungspegel sind zwingend erforderlich und im Genehmigungsverfahren nachzuweisen.

Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie – Ein Ansatz für die Schallimmissionsprognose tieffrequenter Geräusche (TLUG 2013)

Im Vortrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie werden zunächst der Prognoseansatz nach LfU (2011) und BGL (2012) analysiert und verglichen. Das Verfahren nach BGL (2012) sorgt demnach für eine hohe Sicherheit der Einhaltung der Anhaltswerte, während das Verfahren nach LfU (2011) eine überschlägige Prognose darstellt. Der Ansatz für eine Schallimmissionsprognose sollte nach TLUG (2013) sowohl realistische Schalldruckpegeldifferenzen für die Schallübertragung von außen in den Raum als auch gewisse Phänomene der Schallausbreitung berücksichtigen. Die Abschätzung für den Terz-Schalldruckpegel innen erfolgt daher in TLUG (2013) anhand gerundeter Schalldruckpegeldifferenzen zwischen außen und innen in Anlehnung an JAKOBSEN (2012).

Zur Bewertung tieffrequenter Geräusche ist für die betreffenden Terzbänder jeweils die Differenz des Hörschwellenpegels nach DIN 45680 zum innerhalb des Raumes sich nach folgender Gleichung ergebenden Terz-Schalldruckpegels mit dem entsprechenden Anhaltswert nach Beiblatt 1 zu DIN 45680 für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen für den Tag- oder Nachtzeitraum zu vergleichen.

$$L_{\text{eq, Terz, innen}} = L_{\text{Weq, Terz}} - A_{\text{div}} + K_{0, \text{mod}} - D \quad (4)$$

$L_{\text{Weq, Terz}}$ Terz-Schallleistungspegel in dB

A_{div} Abstandsmaß $A_{\text{div}} = \left[20 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \right]$ dB

$K_{0, \text{mod}}$ modifiziertes Raumwinkelmaß $K_{0, \text{mod}} = 2K_0$ in dB, d. h. 6 dB bei Abstrahlung in den Halbraum

D Schallpegeldifferenz außen-innen im Terzband in dB

Für die Schalldruckpegeldifferenz D sind gerundete, gegenüber JAKOBSEN (2012) leicht modifizierte Werte nach Tabelle 4 zu verwenden. Diese erfüllen das Bergersche Massegesetz bezüglich der Frequenzabhängigkeit von 6 dB/Oktave. Es sei jedoch angemerkt, dass das Bergersche Massegesetz in dem hier interessierenden, tiefen Frequenzbereich je nach Dicke und Material der Wand ggf. nicht oder nur bedingt gelten kann. Ein allgemeiner positiver Anstieg der Schalldämmung mit zunehmender Frequenz ist demnach nicht gesichert (vgl. Abschnitt 4.2.4).

Tabelle 4: Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz nach TLUG (2013)

Terzmittenfrequenz f in Hz	Schalldruckpegeldifferenz D in dB
25	8
31,5	10
40	12
50	14
63	16
80	18
100	20

Müller-BBM – Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680 (SCHMIDT 2016)

Ziel der Studie war die Entwicklung eines Verfahrens zur Messung und Bewertung der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten außerhalb und innerhalb von Gebäuden. Dies sollte auf Basis der Nachbildung des mittleren akustischen Empfindens und mit möglichst geringem technischem Aufwand geschehen. Weiterhin sollte ein konzeptioneller Ansatz für die Prognose in Terzen mit den Mittenfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz entwickelt werden und zur Novellierung der DIN 45680 beitragen.

Die Auswertung von 20 Beschwerdefällen in SCHMIDT (2016) ergab, dass die am häufigsten vorkommenden Störfrequenzen zwischen 16 Hz und 100 Hz liegen, in seltenen Fällen auch unter 16 Hz im Infraschallbereich. Die Autoren der Studie sehen eine tieffrequente Belästigung als ein medizinisch-soziologisches Phänomen an, das auch unter diesen Gesichtspunkten zu ermitteln ist, weshalb auch die empfindlichsten Personen zu schützen sind. Die 1%-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 ist eine untere Grenze der Wahrnehmung für tieffrequenten Schall, die, nach Literatur und praktischen Beschwerdefällen, die Empfindlichkeit von Personen berücksichtigt. Im Bereich des Infraschalls ist zwar keine Schallwahrnehmung im engeren Sinne über die Hörorgane möglich, jedoch sollten auch die

Wahrnehmungsschwellen anderer Körperteile beachtet werden. Innerhalb der Studie wurde daher eine neue Wahrnehmungsschwelle aus der 1%-Perzentil-Hörschwelle nach ISO 28961 und einer Ergänzung durch Extrapolation für die Terzen mit den Mittenfrequenzen von 8 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz und 16 Hz entwickelt. Anschließend wurde vorgeschlagen, diese neue Wahrnehmungsschwelle „WS“ mit in die DIN 45680 aufzunehmen.

Für die Bewertung der Lästigkeit wurden die Kriterien aus verschiedenen Ländern miteinander verglichen. Die Minimalkurve gleicher Lästigkeit aus der deutschen DIN 45680 bildet die niedrigste vorkommende Minimalkurve und eignet sich somit, als Ansatz für eine Grenze von 8 Hz bis 63 Hz zu dienen. Die international anerkannte NR 0-Geräuschbewertungskurve stimmt ab 20 Hz gut mit dieser Grenze überein. Die beiden Kurven wurden zur „Lästigkeitsgrenze LG1“ kombiniert, die von 8 Hz bis 100 Hz definiert ist. Gegenüber Einzahlwerten bietet das Grenzkurvenverfahren die Möglichkeit zur frequenzabhängigen Bewertung der Lärmbelastigung. Überdies ist es mit moderner Messtechnik problemlos möglich, frequenzabhängige Betrachtungen vorzunehmen. Die „Lästigkeitsgrenze LG1“ wurde anschließend ebenso zur Aufnahme in die DIN 45680 vorgeschlagen.

Wird die Wahrnehmungsschwelle „WS“ überschritten, so kann von einer Wahrnehmung des Schalls ausgegangen werden. Eine Person muss diesen Schall jedoch noch nicht als lästig empfinden. Wird die „LG1“-Grenze überschritten, kann angenommen werden, dass das Signal von einer dem Schall ausgesetzten Person als lästig eingestuft wird.

Sofern eine Urteilsunsicherheit in Kauf genommen wird, kann anstelle der frequenzabhängigen Bewertung durch den Vergleich mit Grenzkurven auch das Breitbandverfahren eingesetzt werden. Für die Ermittlung eines Beurteilungspegels L_r ist innerhalb von SCHMIDT (2016) die X-Frequenzbewertung eingeführt. Die Korrekturwerte K_{xi} sind in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Korrekturwerte K_{xi} der X-Frequenzbewertung nach SCHMIDT (2016)

Terzmittenfrequenz f in Hz	K_{xi} in dB
8	-103,0
10	-95,0
12,5	-87,0
16	-79,0
20	-71,0
25	-63,0
31,5	-55,5
40	-48,0
50	-41,0
63	-34,55
80	-30,0
100	-26,0

Der X-bewertete Gesamtschalldruckpegel $L_{X,eq}$ berechnet sich aus den X-bewerteten Terzpegeln, die die „Lästigkeitsgrenze LG1“ übersteigen zu

$$L_{X,eq} = 10 \lg \sum_i 10^{0,1(L_{Terz,eq,i} + K_{Xi})} \text{ dB.} \quad (5)$$

$L_{Terz,eq,i}$ Schalldruckpegel der i -ten Terz in dB (Schalldruckpegel, die „LG1“ nicht überschreiten, werden außer Acht gelassen.)

K_{Xi} Korrekturwerte der X-Bewertung nach Tabelle 5 in dB

Der Beurteilungspegel für tieffrequente Dauergeräusche außerhalb von Gebäuden wird gebildet nach

$$L_r = L_{X,eq} + \Delta L_T + \Delta L_I + \Delta L_{S,P} + \Delta L_{S,F}. \quad (6)$$

L_r Gesamtbeurteilungspegel für den Raum in dB

$L_{X,eq}$ X-bewerteter Gesamtschalldruckpegel für tieffrequenten Schall in Form der zusammen gefassten bewerteten Terzschalldruckpegel $L_{XTerz,eq}$ mit den Terz-Mittenfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz; in dB

ΔL_T Tonzuschlag in dB

ΔL_I Impulzzuschlag in dB

$\Delta L_{S,P}$ Pegelschwankungszuschlag in dB

$\Delta L_{S,F}$ Frequenzschwankungszuschlag in dB

Für veränderliche tieffrequente Geräusche kommt zusätzlich die Betrachtung der i zeitlichen Abschnitte unterschiedlicher Belastung hinzu. Der Beurteilungspegel berechnet sich dann nach

$$L_r = 10 \lg \left[\frac{1}{T_r} \sum_i^N T_i \cdot 10^{0,1(L_{X,eq,i} + \Delta L_{T,i} + \Delta L_{I,i} + \Delta L_{S,P,i} + \Delta L_{S,F,i})} \right] \text{ dB.} \quad (7)$$

T_r Beurteilungszeitraum in h

T_i Teilzeit i

Ist $L_r < 8$ dB(X), unabhängig von Tages- oder Nachtzeit, ist nach SCHMIDT (2016) von keiner erheblichen Belästigung auszugehen. Ob diese Werte auch für Pegel mit den Zuschlägen für z. B. Impulshaltigkeit gelten, ist laut Autoren noch zu ermitteln.

Als Vorschlag für die Messung, Bewertung und Beurteilung von tieffrequentem Schall innerhalb von Räumen soll zuerst eine Vorerhebung stattfinden. An Positionen höchster Belastung, an der sich Personen regelmäßig aufhalten, sollen der A- und der Z-bewertete Schalldruckpegel erhoben werden. Ist die Schalldruckpegeldifferenz $\Delta L = L_Z - L_A \leq 20$ dB, so sind die geltenden Verfahren für Hörschall anzuwenden. Ist $\Delta L > 20$ dB, so ist das Grenzkurvenverfahren oder das Breitbandverfahren anzuwenden.

Damit ein Nachweis über die Einhaltung der Schallimmissionsrichtwerte an den maßgeblichen Immissionsorten stattfinden kann, muss zumindest grundsätzlich die Schallimmission aus der Schallemission

bestimmt werden können. Das soll unter Berücksichtigung von Schalleistung, Richtcharakteristik der Quelle, Frequenzspektrum, Geometrie des Schallfeldes (Lage von Aufpunkt und Quelle zueinander, Boden, Hindernisse), Topografie, Bewuchs, Bebauung, Luftabsorption, Witterung, Schalldämmung der Außenbauteile des Gebäudes und den akustischen Eigenschaften der Räume geschehen. Die Körperschallübertragung wird hierbei außer Acht gelassen. Der Schalldruckpegel am Immissionsort in einem Raum berechnet sich schließlich zu

$$L_{\text{eq,Raum}} = L_{\text{WQuelle}} - D_{\text{Frei}} - D_{\text{Raum}} \quad (8)$$

mit

$$L_{\text{WQuelle}} = (L_{\text{W}} + D_{\text{I}} + K_{\text{0}}), \quad (9)$$

$$D_{\text{Frei}} = (D_{\text{s}} \pm D_{\text{r/i}} + D_{\text{z}} + D_{\text{L}} + D_{\text{B}} + D_{\text{M}} + D_{\text{G}}), \quad (10)$$

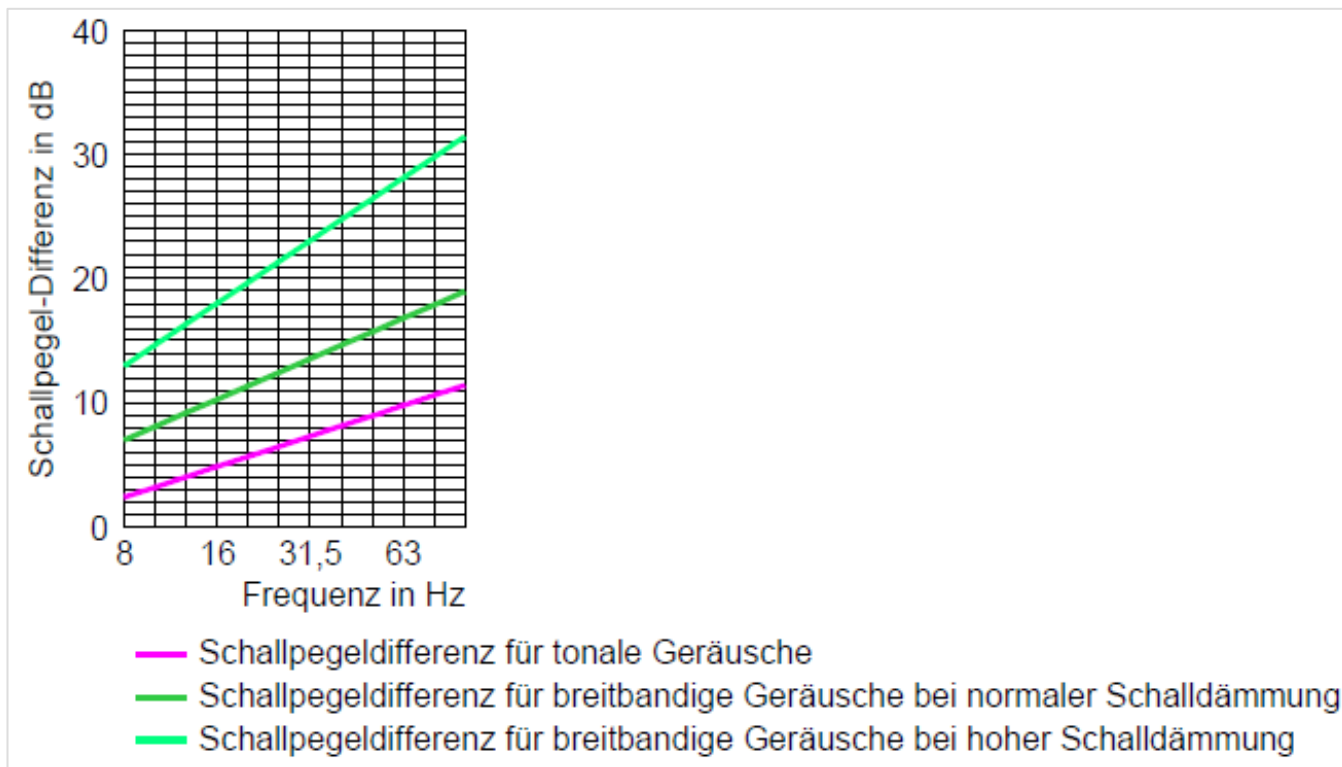
$$D_{\text{Raum}} = (D_{\text{W}} \pm K_{\text{R}}). \quad (11)$$

$L_{\text{eq,Raum}}$	<i>Äquivalenter Dauerschallpegel am Immissionsort innerhalb des Raumes in dB</i>
L_{WQuelle}	<i>Zusammenfassung der Quelleigenschaften als Schalleistungspegel in dB</i>
D_{Frei}	<i>Zusammenfassung aller Freifeldeinflüsse in dB</i>
D_{Raum}	<i>Zusammenfassung der Einflüsse der Raumeigenschaften und Schallübertragung von außen nach innen in dB</i>
L_{W}	<i>Schalleistungspegel der Schallquelle in dB</i>
D_{I}	<i>Richtwirkungsmaß der Schallquelle in dB</i>
K_{0}	<i>Raumwinkelmaß für die Aufstellung der Schallquelle in dB</i>
D_{s}	<i>Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung in dB</i>
$D_{\text{r/i}}$	<i>Schallpegelerhöhung durch Mehrfachreflexionen oder Verminderung durch Interferenz in dB</i>
D_{z}	<i>Dämpfung aufgrund der Abschirmung durch Hindernisse in dB</i>
D_{L}	<i>Dämpfung aufgrund der Luftabsorption in dB</i>
D_{B}	<i>Dämpfung aufgrund des Bodeneffektes in dB</i>
D_{M}	<i>Meteorologiedämpfungsmaß in dB</i>
D_{G}	<i>Bebauungsdämpfungsmaß in dB</i>
D_{W}	<i>Schallpegeldifferenz infolge der Schalldämmung des Außenbauteils in dB</i>
K_{R}	<i>Korrektur für eine Raumrückwirkung, hervorgerufen durch Raummoden in dB</i>

Die Betrachtung nach Gleichung (8) ist auch in Terzbändern möglich. In diesem Fall können ein Vergleich der Ergebnisse von Grenzkurvenverfahren und Breitbandverfahren sowie eine Vorerhebung stattfinden.

Bezüglich der Differenz der Schalldruckpegel zwischen den maßgeblichen Immissionsorten außerhalb und innerhalb des Raumes verweist SCHMIDT (2016) auf GILG (2001). In Abbildung 3 sind die in GILG (2001) ermittelten Schallpegeldifferenzen für normale und hohe Schalldämmung sowie für tonale Geräusche dargestellt. Diese wurden durch Auswertung von Ergebnissen verschiedener Literatur ermittelt. Die Schallpegeldifferenz für tonale Geräusche orientiert sich dabei an den Minimalwerten aller Ergebnisse. Im

Gegensatz dazu orientieren sich die Schallpegeldifferenzen für breitbandige Geräusche bei normaler bzw. hoher Schalldämmung am Mittelwert bzw. am Maximalwert aller Ergebnisse.



Quelle: Schmidt (2016)

Abbildung 3: Schallpegeldifferenzen für breitbandige Geräusche bei normaler und hoher Schalldämmung sowie für tonale Geräusche nach GILG (2001)

In SCHMIDT (2016) wird außerdem darauf hingewiesen, dass die bisher bekannten Prognoseverfahren für tieffrequente Geräusche aus LfU (2011), BGL (2012), GILG (2001) und TLUG (2013) physikalischer Untersuchungen bedürfen. Auch die Gleichungen der DIN ISO 9613-2 sind nicht ohne weiteres auf den tieffrequenten Bereich anwendbar, da eine standardisierte Prognose nach DIN ISO 9613-2 für Immissionsorte im Abstand zum Emissionsort von wenigen Wellenlängen physikalisch kaum zu rechtfertigen ist.

2.4 Weitere Literaturhinweise

Das Thema der tieffrequenten Geräusche und Lärmbelastung umfasst viele weitere Literaturstellen verschiedener wissenschaftlicher und akustischer Gebiete, aus denen nur einige kurz erwähnt werden sollen.

In SIMMONS (1997) werden verschiedene Messmethoden zur Bestimmung der tieffrequenten Lärmbelastung miteinander verglichen und ihrer Genauigkeit nach eingeordnet. Jedoch entsprechen die Maßstäbe für die Kategorisierung dem Stand der Technik von 1997. Des Weiteren wird es als nicht praktikabel angesehen, fünf oder mehr Messpositionen zur Bewertung der Lärmbelastung zu verwenden. Ferner kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass bereits kleine Veränderungen im Raum eine starke Auswirkung auf das Messergebnis haben können.

Hinweise zu den Schallemissionen von Luft-Wasser-Wärme-Pumpen (LWWP), deren Ermittlung und den Möglichkeiten zur Lärminderung enthält SCHULZE et al. (2014). Mit der Emission und der Immission tieffrequenter Schalle von Mikro-BHKW und dem Stand der jeweiligen Lärminderungstechnik beschäftigt sich HÜBELT & SCHULZE (2014).

Verschiedene Studien untersuchen zudem die Simulation und die Messung der Schalldämmung trennender Bauteile und der Schallabstrahlung in den Raum (MALUSKI & GIBBS 2000; OSIPOV et al. 1997; PRATO & SCHIAVI 2015).

THORSSON et al. (2018) prognostiziert für tiefe Frequenzen Differenzen zwischen dem Schalldruckpegel außerhalb und innerhalb eines Gebäudes auf Basis definierter Schalldämmwerte von Einzelbauteilen (vgl. Tabelle 6). Der berücksichtigte Frequenzbereich reicht dabei bis zu 20 Hz hinunter. Welche trennenden Bauteile am stärksten zum Immissionsschalldruckpegel innerhalb von Räumen beitragen, ist nicht sofort ersichtlich, jedoch sorgen bereits leicht geöffnete Fenster oder offene Belüftungsrohre für hohe Schalldruckpegel im mittleren bis hohen Frequenzbereich. Bei tiefen Frequenzen sind diese aufgrund ihrer kleinen Abmessungen jedoch oft von geringerer Bedeutung.

Tabelle 7 zeigt die ermittelten Differenzen zwischen dem Schalldruckpegel außen und innen. Die Daten sind in THORSSON et al. (2018) für geschlossenes und für leicht geöffnetes Fenster angegeben, unterscheiden sich jedoch unterhalb von 200 Hz nicht.

Tabelle 6: Terz-Schalldämmung für 50 Hz bis 200 Hz nach THORSSON et al. (2018)

Frequenz in Hz	R_{Wand} in dB	R_{Dach} in dB	R_{Fenster} in dB
50	17	22	17
63	18	23	16
80	19	24	15
100	14	25	14
125	16	26	12
160	19	28	10
200	20	30	20

Legende: R_{Wand} für Aufbau mit 22 mm Holzplatte, 150 mm Holzbalken, 19 mm Holzplatte; R_{Dach} für Aufbau mit Dachziegeln, Holzunterbau, Nässeschutz, 19 mm Holzplatte, 175 mm Dämmung zwischen den Sparren, 25 mm Holzplatte; R_{Fenster} für Aufbau mit 3 mm Glas, 40 mm Luftspalt, 3 mm Glas

Tabelle 7: Terz-Schalldruckpegeldifferenz ΔL_p zwischen dem Schalldruckpegel außen unter Freifeldbedingungen und dem Schalldruckpegel innen für 20 Hz bis 200 Hz nach THORSSON et al. (2018)

Frequenz in Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
ΔL_p in dB	3,0	3,0	3,2	4,1	4,7	5,6	6,7	8,0	9,4	11,2	14,0

3 Messungen

In diesem Abschnitt sind die Vorbereitungen für die messtechnische Ermittlung einer für Sachsen repräsentativen Schalldruckpegeldifferenz für tiefe Frequenzen beschrieben. Dazu erfolgten Voruntersuchungen zur Festlegung des Messaufbaus sowie eine Recherche von 35 für Sachsen repräsentativen Räumen.

3.1 Messaufbau

3.1.1 Schallquelle

Untersucht werden hier die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen 25 Hz bis 200 Hz. Dies entspricht einem Frequenzbereich von ca. 22,4 Hz bis 224 Hz. Als Schallquelle diente daher ein „Saxon Audio B215 E“ mit zwei 15-Zoll-Lautsprechern (Gewicht 62 kg) und einer Belastbarkeit von 1000 W (RMS) bei einer Impedanz von 8 Ohm. Die gewählte Schallquelle weist einen linearen Frequenzgang von 52 Hz bis 350 Hz auf. Als Verstärker kam ein „t.amp TA600 MK-X“ mit einer Leistung von je 300 W auf zwei Kanälen zum Einsatz. Um auch in den tiefsten interessierenden Frequenzbändern einen ausreichenden Signal-Rausch-Abstand (SNR) zu gewährleisten, wurde zusätzlich ein Equalizer angewendet. Zudem wurde als Quellsignal neben weißem Rauschen teilweise auch ein Sinus-Sweep eingesetzt. Je einer der beiden Kanäle des Verstärkers wurde mit konstanter Amplitudeneinstellung für eines der beiden Quellsignale verwendet, um vergleichbare Bedingungen für alle Messungen zu schaffen. Da der Fokus der akustischen Messungen nicht auf der Messung von absoluten, sondern relativen Messgrößen (Schalldruckpegeldifferenzen) liegt, ist dies jedoch von untergeordneter Bedeutung.



Abbildung 4: Eingesetzte Schallquelle „Saxon Audio B215 E“

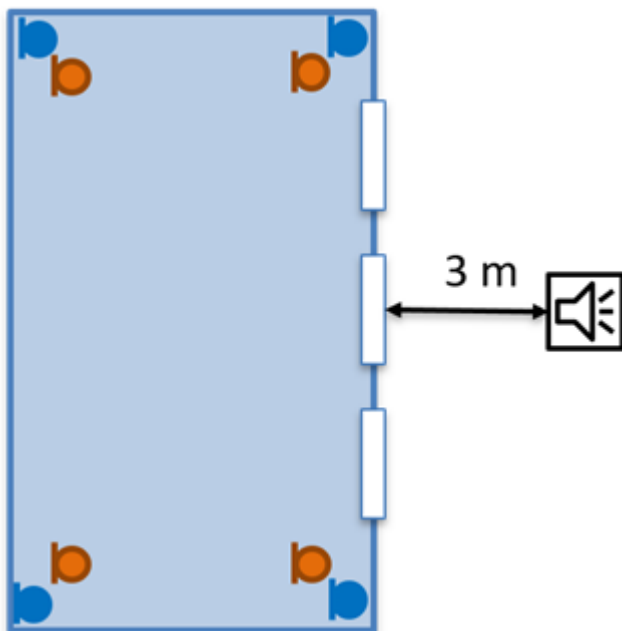
3.1.2 Einfluss der Messposition im Raum

Für die Messung der Schallimmission innerhalb des Raumes waren folgende Fragestellungen zu klären:

- Welche Messpositionen repräsentieren die höchsten Immissionsschalldruckpegel im Raum?
- Welche Messpositionen führen zu einer hohen Reproduzierbarkeit bzw. einer geringen Streuung der Messergebnisse?
- Wie kann der Messaufwand, insbesondere die Anzahl der zu verwendenden Messmikrofone, möglichst niedrig gehalten werden, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung von Repräsentation und Reproduzierbarkeit des Immissionsschalldruckpegels im Raum?

Wie weiter oben beschrieben, zeigt die in PEDERSEN et al. (2007) erfolgte Untersuchung, dass die Ergebnisse der dänischen Messmethode eine große Streuung aufweisen, wohingegen die schwedische Messmethode eine starke Abhängigkeit vom Quellspektrum besitzt. Des Weiteren ist es beiden Verfahren nicht möglich, das absolute Maximum des Immissionsschalldruckpegels im Raum frequenzunabhängig sicher abzubilden. Das in PEDERSEN et al. (2007) als Alternative vorgeschlagene Verfahren mit „3D-Ecken“, bei dem vier Mikrofone im Abstand von weniger als 0,1 m zu den Raumbegrenzungen so in den Ecken des Raumes anzuordnen sind, dass jede Raumbegrenzungsfläche von mindestens einem Mikrofon repräsentiert wird, soll diese Nachteile nicht aufweisen. Diese Aussage sollte durch eine erste Voruntersuchung bestätigt werden.

Dazu wurden Messmikrofone in fünf Ecken eines einfachen quaderförmigen Raumes im Abstand von jeweils 0,1 m sowie 0,5 m zu den Raumbegrenzungen angeordnet und die resultierenden Schalldruckpegelspektren bei äußerer Beschallung des Raumes ermittelt. Der beschriebene Messaufbau ist in Abbildung 5 skizziert.



Legende: Messmikrofone in den Raumecken im Abstand von 0,1 m (blau) und 0,5 m (orange) zu den Raumbegrenzungen

Abbildung 5: Skizze des Messaufbaus zur Untersuchung des Einflusses der Messposition auf den Schalldruckpegel im Raum

In Abbildung 6 ist exemplarisch das FFT-Spektrum des gemessenen Schalldruckpegels an den Mikrofonpositionen in einer der untersuchten Raumecken im Abstand von 0,1 m und 0,5 m zu den Raumbegrenzungen dargestellt (vgl. Abbildung 5). Dieses weist deutlich erkennbare lokale Minima und Maxima im Kurvenverlauf auf, bedingt durch die Eigenschaften der Außenbauteile und des Raumes.

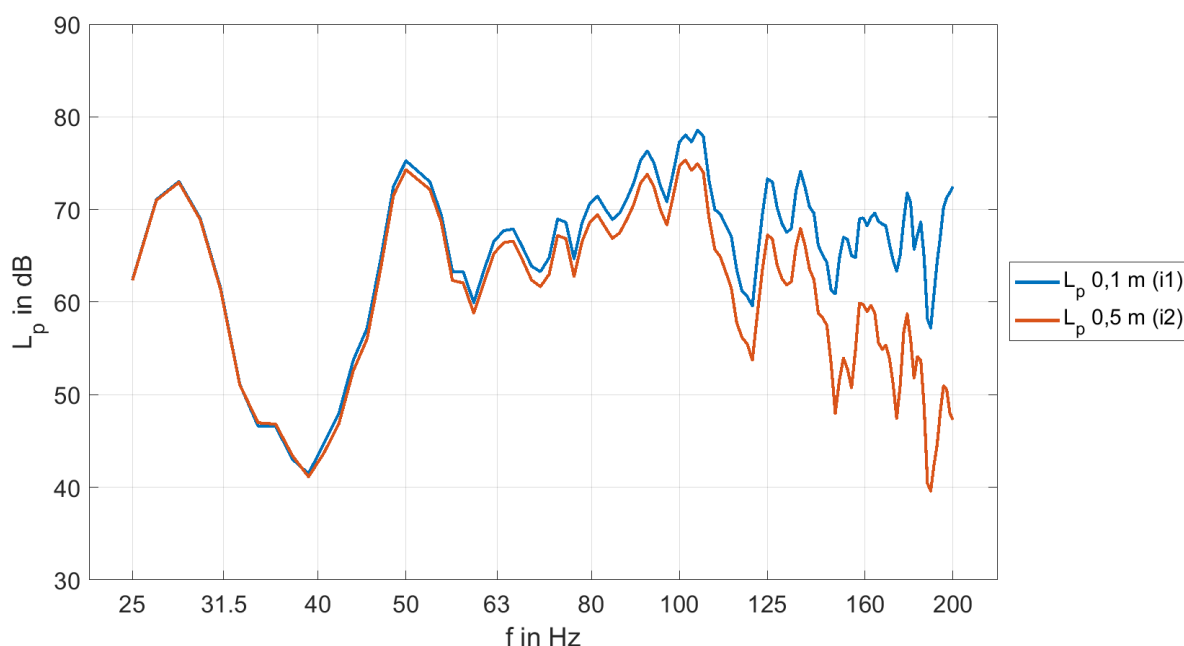
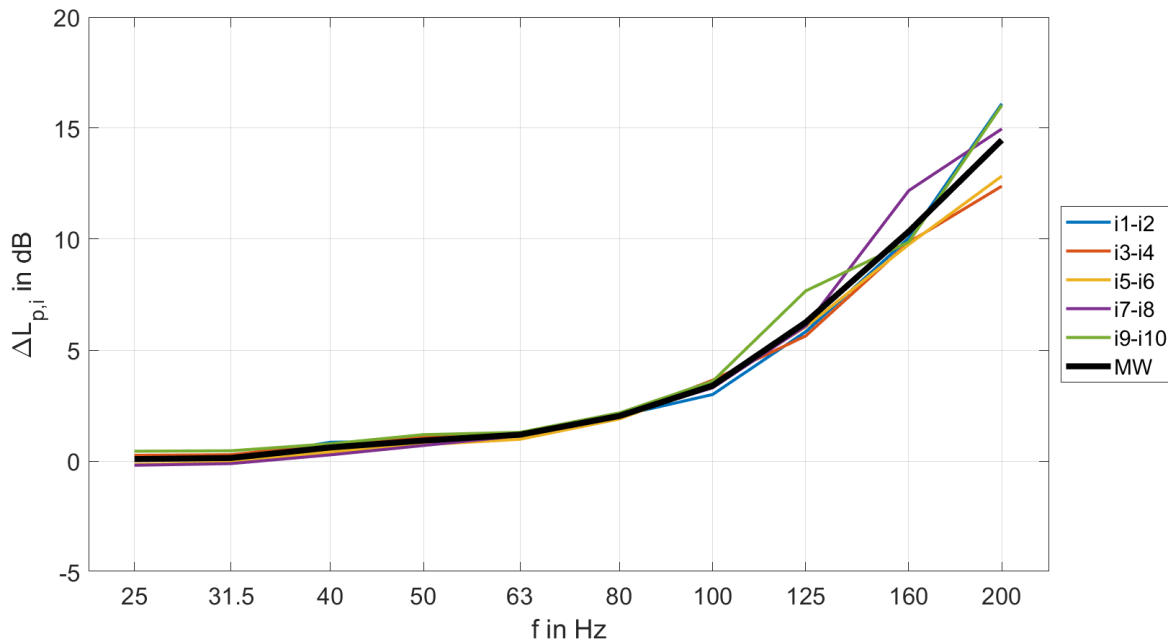


Abbildung 6: FFT-Spektrum des gemessenen Schalldruckpegels an den Mikrofonpositionen in einer der untersuchten Raumecken; vgl. Abbildung 5

Abbildung 7 zeigt die resultierenden Differenzen der gemessenen Terz-Schalldruckpegel $\Delta L_{p,i} = L_{p0,1m} - L_{p0,5m}$ an den Messmikrofonen in den fünf untersuchten Raumecken im Abstand von jeweils 0,1 m und 0,5 m zu den Raumbegrenzungsflächen. Dabei wurde jeweils der gemessene Schalldruckpegel in 0,5 m Abstand zu den Raumbegrenzungen (schwedische Messmethode) vom Schalldruckpegel in 0,1 m Abstand zu den Raumbegrenzungen (Verfahren mit „3D-Ecken“) subtrahiert.

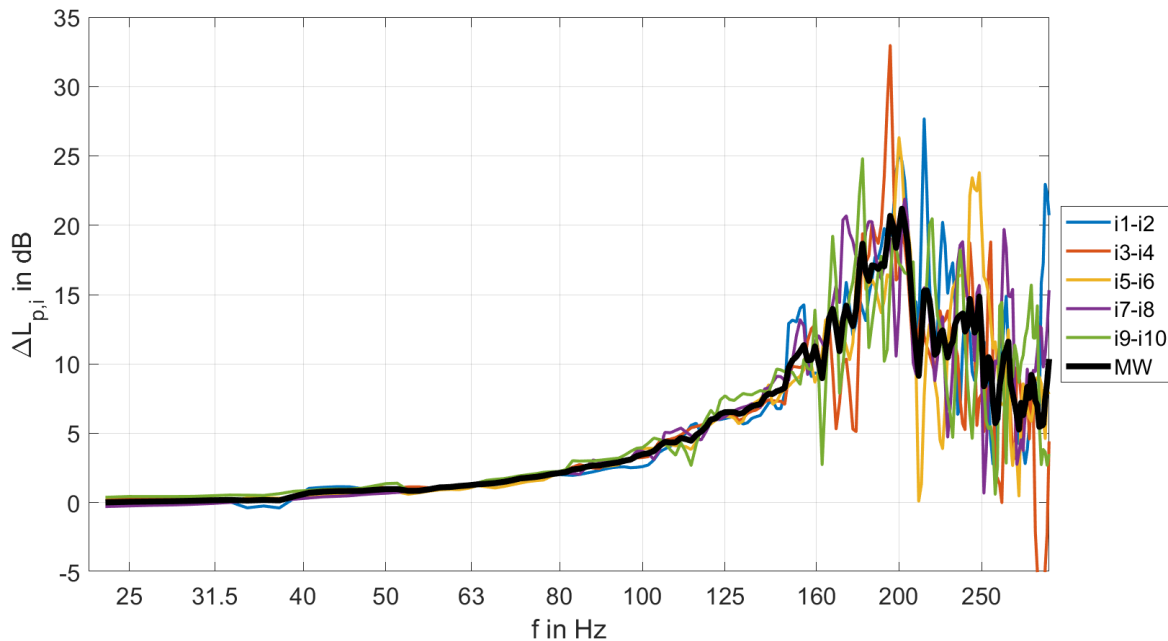


Legende: Ungerade Indikatoren i1, i3,...: Messmikrofone im Abstand von 0,1 m zu den Raumbegrenzungen;
 Gerade Indikatoren i2, i4, ...: Messmikrofone im Abstand von 0,5 m zu den Raumbegrenzungen;
 MW: arithmetischer Mittelwert der Differenzen

**Abbildung 7: Differenz der gemessenen Terz-Schalldruckpegel $\Delta L_{p,i} = L_{p0,1m} - L_{p0,5m}$;
 vgl. Abbildung 5**

Es ist zu erkennen, dass die mittlere Schalldruckpegeldifferenz bei 25 Hz nahezu 0 dB beträgt. Somit ist der Schalldruckpegel in der Raumecke im Abstand von 0,1 m zu den Raumbegrenzungen bei dieser Frequenz in etwa genauso groß wie im Abstand von 0,5 m zu den Raumbegrenzungen. Mit zunehmender Frequenz steigt die mittlere Schalldruckpegeldifferenz bis auf einen Wert von ca. 15 dB bei 200 Hz stetig an.

Bei Betrachtung des FFT-Spektrums der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen (Frequenzauflösung kleiner als 2 Hz) in Abbildung 8 fällt auf, dass die mittlere Schalldruckpegeldifferenz oberhalb von 200 Hz deutlich sinkt. Pegeldifferenzen einzelner Raumecken weisen bereits oberhalb von ca. 140 Hz deutliche lokale Minima und Maxima auf, sodass die FFT-Spektren der Schalldruckpegeldifferenzen der verschiedenen Raumecken mit zunehmender Frequenz immer stärker streuen. Ursache dafür sind Interferenzeffekte im Bereich der Raumbegrenzungen durch kohärente Überlagerung von einfallenden und reflektierten Schallwellen (Stehwellen).



Legende: Ungerade Indikatoren i1, i3,...: Messmikrofone im Abstand von 0,1 m zu den Raumbegrenzungen;
 Gerade Indikatoren i2, i4, ...: Messmikrofone im Abstand von 0,5 m Abstand zu den Raumbegrenzungen;
 MW: arithmetischer Mittelwert der Differenzen

Abbildung 8: Differenz der gemessenen FFT-Spektren der Schalldruckpegel $\Delta L_{p,i} = L_{p0,1m} - L_{p0,5m}$; vgl. Abbildung 5

Während sich unmittelbar vor schallharter Wand ein Schalldruckmaximum befindet, tritt die erste spektrale Auslöschung (Schalldruckminimum) vor schallharter Wand dort auf, wo der Abstand des Messmikrofons zur Wand einem Viertel der Wellenlänge entspricht. Für die Mikrofonpositionen mit einem Wandabstand von 0,5 m entspricht das einer Frequenz von 171,5 Hz ($c_0 = 343$ m/s). Bei Betrachtung des Abstands des Mikrofons zur Raumecke selbst von ca. 0,87 m sinkt die Frequenz des ersten Schalldruckminimums sogar auf ca. 100 Hz. Unterhalb dieser Frequenz sind in Abbildung 8 nur geringfügige Unterschiede zwischen den Schalldruckpegeldifferenzen der einzelnen Raumecken zu erkennen.

Mit steigender Frequenz nimmt die Streuung zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Raumecken, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, infolge der erhöhten der Komplexität der Schalldruckverteilung im Raum zu. Dies ist maßgeblich auf die größer werdende Anzahl der Raummoden sowie die Erhöhung des Einflusses der spektralen Oberflächenimpedanz von Raumbegrenzungsflächen (Wände, Türen, Fenster) und Objekten (Möbiliar) auf die spektrale Schallreflexion zurückzuführen. Ab einer bestimmten Frequenz lässt sich daher keine einheitliche Monotonie der mittleren Schallpegeldifferenz mehr erkennen. Je näher sich das Messmikrofon in der Raumecke befindet, desto geringer ist der Einfluss des raumabhängigen Modenfeldes und desto weniger sinkt der Schalldruckpegel gegenüber dem unmittelbar in der Raumecke befindlichen Schalldruckmaximum. Zudem lässt sich durch gleichzeitige Messung des Schalldruckpegels in mehreren Raumecken mit hoher Zuverlässigkeit für sämtliche interessierende Frequenzen das absolute Schalldruckmaximum im Raum finden, das sich außer in den Raumecken in Abhängigkeit vom Modenfeld des Raumes frequenzabhängig an verschiedenen Positionen im Raum einstellt. Damit finden auch tonale Raumcharakteristika in der Messung Berücksichtigung. Des Weiteren sinkt die Streuung zwischen einzelnen Messergebnissen und die Reproduzierbarkeit der Messung steigt. Dieses Ergebnis bestätigt damit die Aussage von PEDERSEN et al. (2007), dass das Verfahren

mit „3D-Ecken“ für die Ermittlung der maßgeblichen Lärmbelastung im Raum besser geeignet ist als die schwedische oder dänische Methode. Für die folgenden Messungen zur Ermittlung der Schalldruckpegeldifferenz wurden die „3D-Ecken“ daher als Messpositionen innen festgelegt.

Zusätzlich zu den vier in unmittelbarer Nähe zu den Raumecken (Abstand $<0,1$ m zu Wänden, Boden und Decke) positionierten Mikrofonen wurden zu Vergleichszwecken vier Mikrofone zufällig in der Mitte des Raumes verteilt.

Zwischen dem Schalldruckpegel an der Position der unmittelbaren Raumecke (unendlich nah an der Wand) und dem Schalldruckpegel im Abstand von $0,1$ m zu den Raumbegrenzungsflächen besteht im betrachteten Frequenzbereich nur ein vernachlässigbarer Unterschied (vgl. Abschnitt 4.1.2). Eine ungenaue Positionierung im Bereich weniger Zentimeter kann das Messergebnis damit nicht entscheidend beeinflussen. Überdies erhöht sich die Reproduzierbarkeit der Messmethode dadurch, dass sich bei der Verwendung von vier Mikrofonen in den „3D-Ecken“ oftmals drei Positionen an der Decke eignen. Dort sind in der Regel keine Möbel vorhanden, wodurch diese sehr gut zugänglich sind und das Schallfeld in der oberen Raumhälfte durch beispielsweise Veränderungen des Mobiliars nicht so stark beeinflusst wird.

Fazit der Untersuchung der Messpositionen innen

Die am Anfang des Abschnitts gestellten Fragen lassen sich somit wie folgt beantworten:

■ Welche Messpositionen repräsentieren die höchsten Immissionsschalldruckpegel im Raum?

Die höchsten Schalldruckpegel innerhalb des Raumes treten in den unmittelbaren Raumecken auf. Die in PEDERSEN et al. (2007) vorgeschlagenen „3D-Ecken“ eignen sich als Messpositionen, da sie sämtliche Raummoden abbilden und ihre Schalldruckpegel somit unabhängig von der Frequenz zuverlässig über denen der Messpositionen in der Mitte des Raumes liegen.

■ Welche Messpositionen führen zu hoher Reproduzierbarkeit bzw. geringer Streuung des Messergebnisses?

Da die „3D-Ecken“ weniger von der Komplexität der Schalldruckverteilung im Raum betroffen sind, ist die Standardabweichung der Messergebnisse geringer. Aufgrund des weniger fehleranfälligen Messaufbaus sowie der höheren Stabilität gegenüber Veränderungen der Raumausstattung ist ebenfalls eine hohe Reproduzierbarkeit gegeben.

■ Wie kann der Messaufwand, insbesondere die Anzahl der zu verwendenden Messmikrofone, möglichst niedrig gehalten werden, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Repräsentation und Reproduzierbarkeit des Immissionsschalldruckpegels im Raum?

Die Verwendung von vier Mikrofonen hält den Messaufwand vertretbar gering, bei gleichzeitig meist sehr guter Zugänglichkeit von drei der vier Raumecken an der Decke. Da eine zeitgleiche Messung bei stationären Signalen nicht erforderlich ist, können die Messungen in diesem Fall auch nacheinander mit einem einzelnen Mikrofon erfolgen.

3.1.3 Einfluss der Quellposition

Für die Festlegung der Quellposition ergeben sich drei grundlegende Probleme:

- Der Abstand der Quelle zum maßgeblichen Immissionsort nach TA Lärm im Abstand von 0,5 m vor geöffnetem Fenster ist ausreichend groß zu wählen, dass die Messung des Schalldruckpegels nicht systematisch durch Nahfeldeffekte der Schallquelle beeinflusst wird.
- Der Abstand der Quelle ist dahingehend zu begrenzen, dass für alle interessierenden tiefen Frequenzbänder innerhalb des Raumes ein ausreichender Signal-Rausch-Abstand gewährleistet werden kann. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass in der Praxis oftmals Straßen oder andere Hindernisse in mittleren Entfernungen zum Messort existieren, sodass ein bestimmter Quellabstand auch aus logistischer Sicht nicht überschritten werden kann, um an den untersuchten Objekten vergleichbare Messbedingungen zu gewährleisten.
- Der Quellwinkel ist so zu wählen, dass alle wesentlichen physikalischen Einflussparameter von trennendem Bauteil (z. B. Resonanzfrequenzen, Koinzidenzfrequenz) und angekoppeltem Raum (Resonanzfrequenzen) Berücksichtigung finden.

Um den Einfluss der Quellposition auf die Schallimmission zu untersuchen, wurden Messungen an einem nicht-symmetrischen Raum für drei verschiedene Quellpositionen vor dem Raum durchgeführt, ohne dabei die Position der Messmikrofone innen oder außen zu verändern. Abbildung 9 zeigt eine Skizze des Messaufbaus zur Untersuchung des Einflusses der Quellpositionen (QP) auf die Schallimmission. Die Messung der Schallimmission außen erfolgte im Abstand von 0,5 m vor geöffnetem Fenster. Die Mikrofone im Raum wurden gemäß Abschnitt 3.1.2 in den Raumecken und in der Mitte des Raumes positioniert.

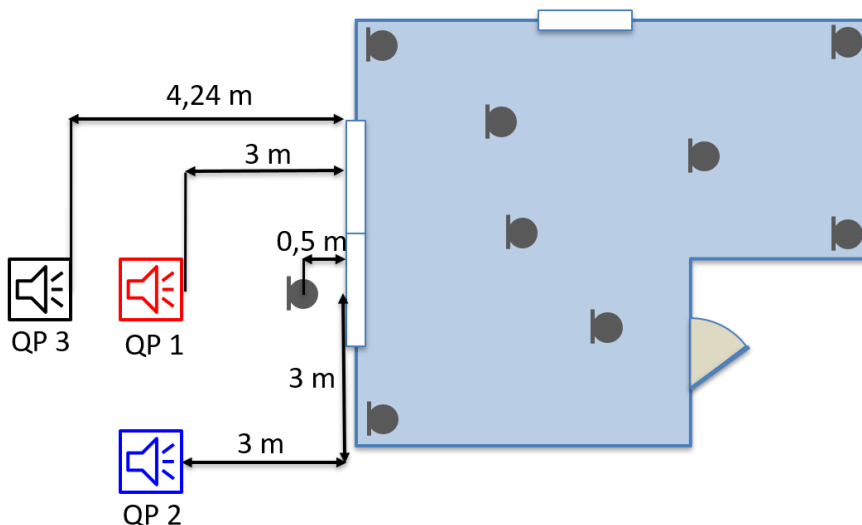


Abbildung 9: Skizze des Messaufbaus zur Untersuchung des Einflusses der Quellposition; Messung bei geschlossener Tür

Die untersuchten Quellpositionen befanden sich:

- in senkrechtem Abstand von 3 m vor der Mitte des Fensters (QP1)
- in senkrechtem Abstand von 3 m vor der Wand unter einem Winkel von 45° zur Mitte des Fensters (Abstand zur Mitte des Fensters von $3 \text{ m} \cdot \sqrt{2} = 4,24 \text{ m}$ (QP2) und
- in senkrechtem Abstand von 4,24 m vor der Mitte des Fensters (QP3).

QP2 und QP3 weisen demnach denselben Abstand zur Mitte des Fensters auf.

Abbildung 10 zeigt das FFT-Spektrum des gemessenen Schalldruckpegels außen im Abstand von 0,5 m vor geöffnetem Fenster für die drei verschiedenen untersuchten Quellpositionen aus Abbildung 9.

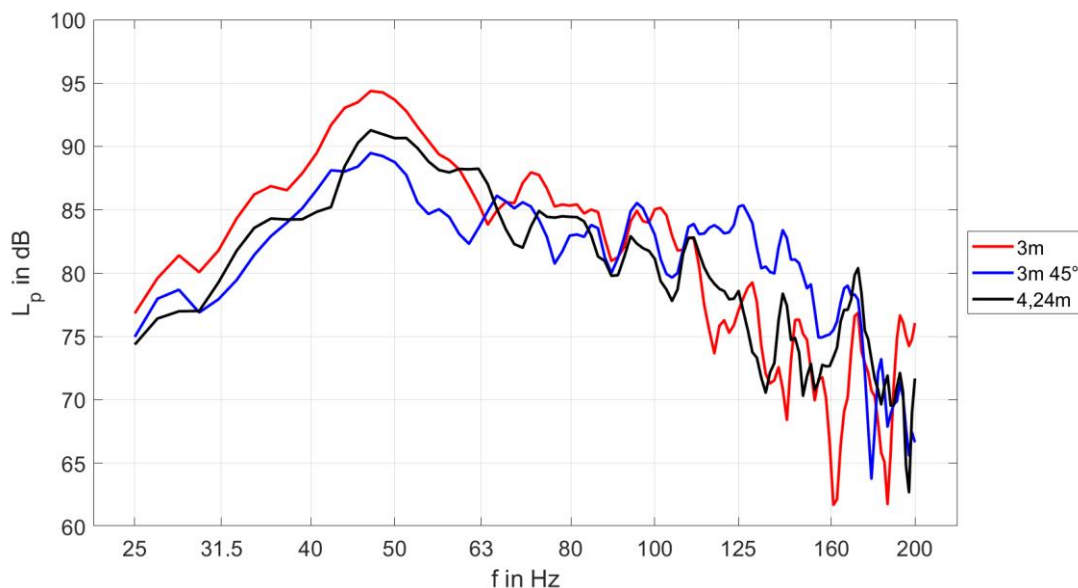


Abbildung 10: FFT-Spektrum des gemessenen Schalldruckpegels L_p außen im Abstand von 0,5 m vor geöffnetem Fenster für drei verschiedene Quellpositionen; vgl. Abbildung 9

Es ist zu erkennen, dass die rote Kurve unterhalb von 50 Hz einen höheren Schalldruckpegel aufweist als die beiden anderen Kurven. Dies ist auf Nahfeldeffekte zurückzuführen. Das akustische Nahfeld ist der Bereich um die Quelle, in dem wechselförmige Strömungsvorgänge stattfinden, die durch die Quelle selbst erzeugt werden. Innerhalb des Nahfeldes sind Schallschnelle und Schalldruck noch nicht in Phase, wodurch neben dem Wirkanteil der Schalleistung auch ein Blindanteil auftritt. Da die Schallschnelle im Nahfeld indirekt proportional zum quadratischen Radius ist, während der Schalldruck nur indirekt proportional zum Radius ist, ist die Schallschnelle maßgeblich für die Blindleistung im Nahfeld verantwortlich (SCHMIDT 2016). Der Übergang zwischen akustischem Nah- und Fernfeld ist fließend, weshalb die Abgrenzung nicht exakt möglich ist. Es gilt jedoch die Definition für das akustische Fernfeld (Schalldruck und Schallschnelle in Phase):

$$k \cdot r \gg 1 \quad (12)$$

$$k \text{ Kreiswellenzahl } k = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

r Abstand zwischen Schallquelle und Messposition

Aus Gleichung (12) ist ersichtlich, dass die Wellenzahl k mit der Frequenz steigt. Je tiefer die Frequenz ist, desto größer muss also der Radius sein, um das Kriterium für das Fernfeld zu erfüllen. Für die Quellposition QP1 und eine Frequenz von 25 Hz ist $kr = 1,14$. Das bedeutet zwar, dass das Kriterium des Nahfeldes ($kr \ll 1$) nicht mehr gilt, jedoch das Kriterium für das Fernfeld nach Gleichung (12) noch nicht ausreichend erfüllt ist. Dazu ist eine Vergrößerung des Abstands der Schallquelle zur Messposition außen erforderlich. Dies kann erreicht werden, indem der Abstand der Schallquelle zur Wand direkt erhöht wird (QP2) oder die Schallquelle unter einem Winkel von $> 0^\circ$ zur Mitte des Fensters bei gleichbleibendem Wandabstand positioniert wird (QP3).

Des Weiteren zeigt Abbildung 10, dass es oberhalb von 100 Hz zunehmend zum Auftreten lokaler Minima und Maxima kommt, die durch Interferenzeffekte hervorgerufen werden. Ursache dafür ist, dass es im betrachteten Frequenzbereich auch bei geöffnetem Fenster zu einer konstruktiven Überlagerung von einfallender und partiell reflektierter Schallwelle (Fresnel-Zone) kommt. Auch die Rückwirkung des Raumes kann das Schallfeld an der Messposition beeinflussen. Für die interessierenden tiefen Frequenzen ist der maßgebliche Messort in 0,5 m Abstand vor geöffnetem Fenster damit nicht als Freifeld-Messort anzusehen.

Für die Schallausbreitung relevant können zudem die akustischen Eigenschaften des Bodens sein, durch die es im interessierenden tieffrequenten Bereich zu einer Schallreflexion von Kugelwellen kommen kann, die anschließend ebenfalls mit dem Direktschall der Quelle interferieren. Nicht zuletzt deswegen kann eine Prognose des Schalldruckpegels außen gemäß DIN ISO 9613-2 im tieffrequenten Bereich den tatsächlichen Immissionsschalldruckpegel unterschätzen, da die beschriebenen Effekte der Schallausbreitung ausschließlich in detaillierteren Prognosemodellen, z. B. NORD 2000 (PLOVSING 2001) Berücksichtigung finden.

Abbildung 10 zeigt, dass sich die Interferenzeffekte, die bei senkrechter Beschallung an der Messposition außen auftreten, durch Positionierung der Schallquelle unter einem Winkel von 45° zur Wand (Q2) zu höheren Frequenzen verschieben lassen (blaue Kurve). Des Weiteren ermöglicht erst eine nicht-senkrechte Beschallung des trennenden Bauteils durch eine ebene Welle die Anregung des Koinzidenzeffekts, bei dem es zu einer optimalen Anregung der Biegewelle und damit zu einer Senkung der Schalldämmung des trennenden Bauteils kommen kann.

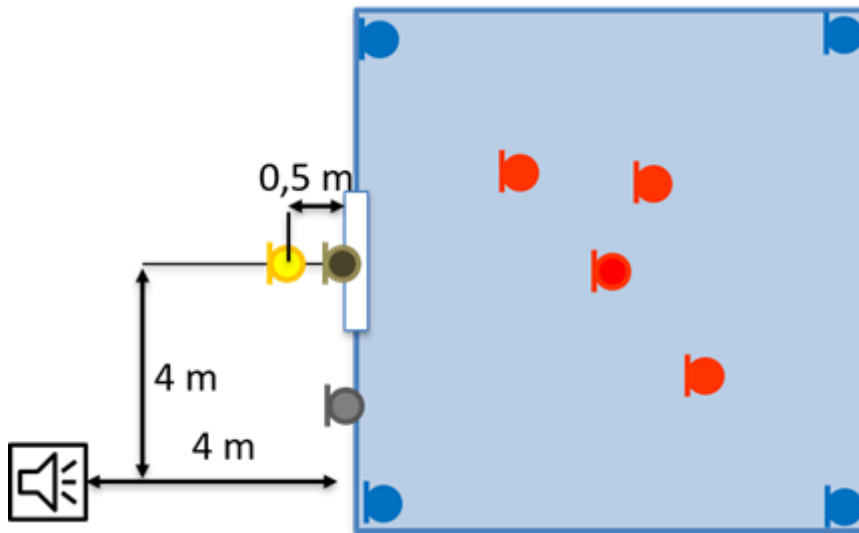
An den Mikrofonen im Raum lassen sich die außen unterhalb von 50 Hz ermittelten Nahfeldeffekte sowie die oberhalb von 100 Hz identifizierten Interferenzeffekte jedoch nicht beobachten. Sie beeinflussen damit ausschließlich den Schalldruck, der am Mikrophon vor geöffnetem Fenster auftritt. Eine deutliche Anregung der Koinzidenzfrequenzen der trennenden Bauteile durch die Positionierung der Schallquelle unter einem Winkel von 45° zur Mitte des Fensters ist in den innen gemessenen Schalldruckpegelspektren nicht zu erkennen. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die am trennenden Bauteil auftreffende Schallwelle im betrachteten Frequenzbereich primär den Charakter einer Kugelwelle und nicht den einer ebenen Welle aufweist, wodurch der Koinzidenzeffekt auch bei senkrechter Positionierung der Schallquelle angeregt wird.

Fazit der Untersuchung der Quellposition

Aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen zum Einfluss der Quellposition auf die Schallimmission wurde festgelegt, die Quelle unter einem Winkel von 45° zum Messort positionieren (vgl. QP2), den Wandabstand jedoch gleichzeitig auf mindestens 4 m zu erhöhen (Abstand zur Mitte des Fensters / Radius von 5,66 m). Diese Kriterien entsprechen zum einen den Anforderungen der Norm DIN EN ISO 16283-3:2016-09, die die Messung der Schalldämmung von Fassadenelementen regelt (Anforderungen: Quellwinkel von $45^\circ \pm 5^\circ$ zum Mittelpunkt des Prüfobjektes, Wandabstand $>3,5$ m, Radius >5 m). Zum anderen erhält das Fernfeldkriterium nach Gleichung (12) besser Berücksichtigung. Für Messungen im ersten Stock erhöht sich der Radius weiter auf bis ca. 7 m, bei einer Höhe des Messpunktes von 4 m. Die Positionierung der Schallquelle unter einem Winkel von 45° zur Mitte des Fensters ermöglicht neben der Verringerung der Interferenzeffekte im interessierenden Frequenzbereich eine ggf. stärkere Anregung des Koinzidenzeffekts des trennenden Bauteils sowie eine effektivere Platznutzung im Fall von Hindernissen (z. B. Straßen).

3.1.4 Festlegung des Messaufbaus

Zur messtechnischen Ermittlung der Schalldruckpegeldifferenz erfolgen bei geöffnetem und geschlossenem Fenster zeitgleich Messungen des Immissions Schalldruckpegels außerhalb und innerhalb der zu untersuchenden Räume bei Beschallung von außen. Auf Grundlage der Voruntersuchungen wurde der in Abbildung 11 skizzierte Messaufbau festgelegt. Zur einfacheren Beschreibung werden für die einzelnen Messpositionen Abkürzungen eingeführt und hinter der Beschreibung in Klammern angegeben.



Legende: Mikrofonpositionen innerhalb und außerhalb des Raumes; Quellposition außerhalb des Raumes

Abbildung 11: Skizze des festgelegten Messaufbaus

Innerhalb des Raumes sind vier Mikrofone nach der „3D-Ecken“-Methode in den Raumecken positioniert, mit einem Abstand von weniger als 0,1 m zu den drei Raumbegrenzungsflächen ($MP_{i,E}$). Zusätzlich sind vier Mikrofone im Raum verteilt, mit mindestens 0,5 m Abstand zur Wand ($MP_{i,M}$). Eines dieser Mikrofone ist, wenn möglich, im dreidimensionalen geometrischen Schwerpunkt des Raumes platziert.

Außerhalb des Raumes befindet sich die primäre Messposition mittig und im Abstand von 0,5 m vor dem geöffneten Fenster ($MP_{a,T}$). Sie repräsentiert damit den maßgeblichen Immissionsort für die Schallimmissionsmessung nach TA Lärm. Zwei weitere Mikrofone sind, sofern es die örtlichen Gegebenheiten zulassen (Zugänglichkeit), direkt auf der Fassade ($MP_{a,W}$) in mittelbarer Nähe des Fensters sowie unmittelbar vor dem geöffneten bzw. geschlossenen Fenster ($MP_{a,F}$) positioniert.

Die Quelle ist je nach Gegebenheiten des Messortes im Abstand von mindestens 4 m zur Wand und in einem Winkel von 45° zum für die Messung ausgewählten Fenster aufgestellt.

Bei der Messung der Schallimmissionen bei geöffnetem Fenster und bei geschlossenem Fenster bleibt der gesamte Messaufbau unverändert.

Durch Messung des Hintergrundgeräuschpegels bei ausgeschalteter Schallquelle erfolgt an sämtlichen Messpositionen eine Fremdgeräuschpegelkorrektur nach DIN EN ISO 3744.

3.2 Raumauswahl

3.2.1 Recherche

Um eine für Sachsen repräsentative Schalldruckpegeldifferenz zu ermitteln, sollen die für die Messungen ausgewählten Räume den derzeit in Sachsen vorherrschenden Verhältnissen entsprechen. Die letzte Gebäude- und Wohnungszählung (GWZ) wurde in Sachsen mit Stichtag 9. Mai 2011 für den Zensus 2011 durchgeführt. Dabei wurden ca. 834.000 Gebäude mit Wohnraum oder bewohnte Unterkünfte festgestellt, in denen sich ca. 2.350.000 Wohnungen befinden. Im Vergleich zu den zuvor erfolgten Zählungen im Freistaat zeigt sich seit 1961 ein stetiger Aufwärtstrend bei der Anzahl der Wohnungen, ebenso bei der Wohnfläche je Raum. Die Wohnfläche pro Raum betrug 2011 im Durchschnitt 18,9 m². Als Räume zählen hier alle Wohn-, Ess- und Schlafzimmer von mindestens 6 m² Raumgröße sowie abgeschlossene Küchen, unabhängig von ihrer Größe. Weder Bäder noch Toiletten, Flure oder Wirtschaftsräume werden hierbei miterfasst. Nach DIN 4109-1 zählen als schutzbedürftige Räume:

- Wohnräume, einschließlich Wohndielen und Wohnküchen,
- Schlafräume, einschließlich Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten,
- Bettenräume in Krankenhäusern und Sanatorien,
- Unterrichtsräume in Schulen, Hochschulen und ähnlichen Einrichtungen,
- Büroräume sowie
- Praxisräume, Sitzungsräume und ähnliche Arbeitsräume.

Damit erfasst die GWZ nicht alle schutzbedürftigen Räume, insbesondere nicht die gewerblich genutzten Flächen außer gewerblich genutzte Wohnungen. Sie berücksichtigt jedoch zusätzlich abgeschlossene Küchen. Laut GWZ sind 75 % der Wohngebäude in Sachsen Ein- oder Zweifamilienhäuser, die zusammen 32 % des Wohnungsbestandes darstellen. Leider enthalten die Statistiken der GWZ keine Angaben zur Spanne oder Varianz der Raumgrößen. Um Anhaltswerte dafür zu erhalten und die Werte der GWZ zu bestätigen oder Trends seit 2011 abschätzen zu können, wurden verschiedene Wohnungs(bau-)genossenschaften (WG) in Sachsen kontaktiert. In den meisten Fällen war keine Auskunft möglich. Die Angaben der „Wohnungsbau-Genossenschaft e.G.“ (WBG), die Wohnungen vor allem in Leipzig verwaltet, sind in Tabelle 8 dargestellt und berücksichtigen mehr als 15.000 Wohnungen. Die Tabelle enthält zusätzlich die Angaben der „Eisenbahner-Wohnungsgenossenschaft Dresden eG“ (EWG) zu mehr als 8.700 Wohnungen, die keine Unterscheidung der Wohnräume zwischen Wohn- und Schlafzimmer vornimmt, da sie ihren Mietern deren Nutzung freistellt. Nicht erfasst werden hierbei Küchen, Bäder, Toiletten, Flure, Abstellräume und Räume von weniger als 6 m² Grundfläche. Laut dem „Verband Sächsischer Wohnungsgenossenschaften e. V.“ zählen beide WG mit je über 5.000 Wohneinheiten zu den 14 größten WG in Sachsen (VSWG 2018).

Tabelle 8: Angaben der „Wohnungsbau-Genossenschaft e.G.“ (WBG) und der „Eisenbahner-Wohnungsgenossenschaft Dresden eG“ (EWG) zu den von ihnen erfassten Raumgrößen

Raumart	Raumgröße in m ²		
	Minimum	Durchschnitt	Maximum
WBG			
Wohnzimmer	10,7	18,5	38,6
Schlafzimmer	10,0	13,7	259,0
Küche	5,0	7,6	22,4
EWG			
Wohnräume	6,2	15,0	41,0

Die „Wohnungsgenossenschaft Aufbau Dresden eG“ stellte sehr umfangreiche Daten zu ihrem Wohnungsbestand zur Verfügung. Für über 14.900 Wohnungen sind die Raumgrößen nach Bautyp und Raumnutzungsart aufgeschlüsselt. Auf diese Weise konnten die in Tabelle 9 dargestellten detaillierten Angaben der Raumgrößen ermittelt werden.

Leider konnten keine Daten von WG von außerhalb der Großstädte Dresden und Leipzig gewonnen werden. Nach GWZ ist die durchschnittliche Wohnfläche je Raum jedoch sehr stabil, unabhängig von der Größe der Gemeinde. So liegt die Spanne der durchschnittlichen Raumgröße bei 18,5 m² bis 19,5 m², bei einem Durchschnitt von 18,9 m². Diese Angabe ist ebenfalls unabhängig davon, ob ein Ein- oder Zweifamilienhaus vorliegt oder ein Mehrfamilienhaus. In kleinen Gemeinden steigt zwar die Anzahl an freistehenden Häusern, aber auch die Anzahl an Räumen pro Gebäude. Damit bleibt die durchschnittliche Raumgröße unverändert (GWZ 2011).

Tabelle 9: Angaben der „Wohnungsgenossenschaft Aufbau Dresden eG“ zu den von ihnen erfassten Raumgrößen

Raumnutzungsart	Raumgröße in m ²			
	Minimum	Mittelwert	Maximum	σ
Wohnzimmer	14,0	18,8	22,4	1,6
Schlafzimmer	9,7	13,0	17,9	1,7
Kinderzimmer	7,8	10,9	17,9	1,5
Gesamt	7,8	14,6	22,4	3,7

Das Baujahr hat hingegen einen Einfluss auf die Raumgröße. Die WG in Sachsen verwalten derzeit überproportional viele noch in der DDR entstandene Wohngebäude. Auch wenn diese mittlerweile größtenteils saniert sind, hat das keinen wesentlichen Einfluss auf deren Größe oder die Größe der darin liegenden Räume. Seit 1981 ist die Wohnfläche je Wohnung um 23 % von 60,4 m² auf 74,4 m² gestiegen. Die Anzahl der Räume nahm im Gegensatz mit ca. 5 % nur geringfügig von 3,7 auf 3,9 Räume pro Wohnung zu. Aufgrund dessen liegen die Zahlen der WG unter denen der GWZ, die alle Wohnungen inklusive Eigentumswohnungen und Neubauten in ihrem gesamten sächsischen Bestand erfasst. Dies bestätigt sich ebenfalls durch die Daten der „WG Aufbau Dresden eG“, deren Daten nach Bautyp geordnet angegeben wurden. So sind über 4.700 Wohnungen vom Bautyp IW 62 bis IW 67, der in der DDR zwischen 1963 und 1980 erbaut wurde (MMPD 2020).

Nach DIN 4109-1 gelten nicht nur Wohnräume als schutzbedürftig. Aussagekräftige Statistiken existieren jedoch nur zu diesen. Die Statistiken zu Nichtwohngebäuden gliedern diese nicht nach Raumnutzung auf, wodurch nicht ersichtlich ist, welcher Anteil schutzbedürftig ist. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Büroräume im Durchschnitt eine größere Grundfläche aufweisen.

Für die Recherche nach geeigneten Messorten mit für Sachsen repräsentativer Nutzungsart und Raumgröße wurde sich an den Werten nach GWZ orientiert, gleichzeitig jedoch auch vom Durchschnitt abweichende kleinere und größere Wohnräume und Büros in die Untersuchungen einbezogen.

3.2.2 Festlegung der Messorte

Nach den oben aufgeführten Kriterien wurden 35 für Sachsen repräsentative Räume ausgewählt. Diese befanden sich in 16 verschiedenen Gebäuden und umfassten Wohnzimmer, Wohnküchen, Schlafzimmer, Kinderzimmer, Büros und Besprechungsräume. Neben der messtechnischen Erfassung der Schalldruckpegeldifferenz wurden verschiedene geometrische Parameter, wie z. B. die Abmaße des Raumes, die Dicke der Wände und die Lage und Größe der Fensterflächen aufgezeichnet. Diese Eigenschaften dienten anschließend der Bestimmung von Fensterflächenanteil, Grundfläche und Volumen des Raumes sowie der tiefsten Luftschalleigenfrequenz des Raumes. Eine Abschätzung der Koinzidenzfrequenz der Wände konnte nur sehr grob erfolgen, da der genaue geometrische sowie Materialaufbau der Wand zumeist unbekannt ist.

Tabelle 10 zeigt eine Übersicht der wichtigsten geometrischen und akustischen Parameter der untersuchten Räume, die sich vorrangig im Umkreis von Dresden befinden. Innerhalb einer ersten Messkampagne wurden vor allem Räume nach den Kriterien der WG und der GWZ ausgewählt und gemessen. Die Räume waren größtenteils einfachen geometrischen Aufbaus. Um die Effekte komplizierterer Geometrien und moderner Bauweisen zu untersuchen, lag der Fokus einer zweiten Messkampagne auf Räumen mit großem Fensterflächenanteil in Quellrichtung, großen Grundflächen, hohen Decken oder modernem Aufbau. So wurde auch sichergestellt, dass Büros, die tendenziell größer sind als die Räume nach GWZ, durch die Messkampagne repräsentiert werden. Auf diese Weise erklären sich die teils großen Maxima der geometrischen Raumparameter aus Tabelle 10.

Tabelle 10: Übersicht der geometrischen und akustischen Parameter der ausgewählten 35 Räume

	Minimum	Durchschnitt	Median	Maximum
Grundfläche in m ²	10,3	26,6	22,3	61,2
Raumvolumen in m ³	32,7	78,8	59,9	213,8
Raumhöhe in m	2,2	3,0s	2,7	5,8
Wanddicke in m	0,3	0,5	0,6	0,7
rel. Fensterfläche in %	10,0	37,0	29,3	90,0
abs. Fensterfläche in m ²	1,1	6,1	4,4	27,3
$f_{0,1}$ in Hz	11,8	22,6	23,1	29,0

Eine detaillierte Übersicht der geometrischen und akustischen Parameter der einzelnen untersuchten Messorte kann Anlage Anhang 1 des vorliegenden Berichts entnommen werden.

4 Auswertung

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen sowie der sich anschließenden Auswertung dargestellt. Dabei werden ausgehend von den innerhalb und außerhalb der Räume gemessenen Terz-Schalldruckpegeln Schalldruckpegeldifferenzen für breitbandige tieffrequente Geräusche ermittelt und hinsichtlich verschiedener Einflussparameter untersucht. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit Ergebnissen der Literatur.

Zur einfacheren Beschreibung werden an dieser Stelle die folgenden Messgrößen festgelegt:

- $L_{p,i,E}$... energetischer Mittelwert der Schalldruckpegel innen an den Mikrofonpositionen $MP_{i,E}$ in den Ecken des Raumes bei geschlossenem Fenster,
- $L_{p,i,M}$... energetischer Mittelwert der Schalldruckpegel innen an den Mikrofonpositionen $MP_{i,M}$ in der Mitte des Raumes bei geschlossenem Fenster,
- $L_{p,a,T}$... Schalldruckpegel außen am maßgeblichen Immissionsort $MP_{a,T}$ nach TA Lärm im Abstand von 0,5 m vor dem geöffnetem Fenster,
- $L_{p,a,W}$... Schalldruckpegel außen an der Mikrofonposition $MP_{a,W}$ unmittelbar vor der Wand bei geschlossenem Fenster,
- $L_{p,a,F}$... Schalldruckpegel außen an der Mikrofonposition $MP_{a,F}$ unmittelbar vor dem geöffneten / geschlossenen Fenster.

4.1 Schalldruckpegel

4.1.1 Messergebnisse

Abbildung 12 zeigt exemplarisch für Messort 13 die innerhalb des Raumes an $MP_{i,E}$ und $MP_{i,M}$ gemessenen Terz-Immissionsschalldruckpegel. Wie sich bereits in den Voruntersuchungen angedeutet hat, wiesen die Schalldruckpegelspektren der Mikrofone in den Raumecken im Allgemeinen eine größere Amplitude auf als die Schalldruckpegelspektren der Mikrofone in der Raummitte. Des Weiteren ist im Frequenzbereich von ca. 25 Hz bis 80 Hz zwischen den Schalldruckpegelspektren an $MP_{i,M}$ eine deutlich größere Streuung zu erkennen als zwischen den Schalldruckpegelspektren an $MP_{i,E}$. Abbildung 13 bestätigt diese Aussage anhand des berechneten arithmetischen Mittelwerts der Standardabweichung σ der gemessenen Terz-Schalldruckpegelspektren an $MP_{i,E}$ und $MP_{i,M}$ sämtlicher Messorte. Oberhalb von 80 Hz ist die Standardabweichung der Schalldruckpegelspektren beider Gruppen von Mikrofonpositionen vergleichbar. Auch unterhalb des interessierenden Frequenzbereichs treten nur geringe Unterschiede der mittleren Standardabweichung auf. Dies ist wiederum auf den weiter oben bereits erwähnten Druckkammereffekt zurückzuführen, der unterhalb der ersten Eigenfrequenz des Raumes auftritt. Die auf Basis der größten Raumdiagonale ermittelte durchschnittliche erste Eigenfrequenz aller untersuchten Räume ist in Tabelle 10 mit 22,6 Hz angegeben. Für nicht quaderförmige Räume komplexerer Geometrie bestimmt die Raumdiagonale nicht unbedingt die erste Eigenfrequenz.

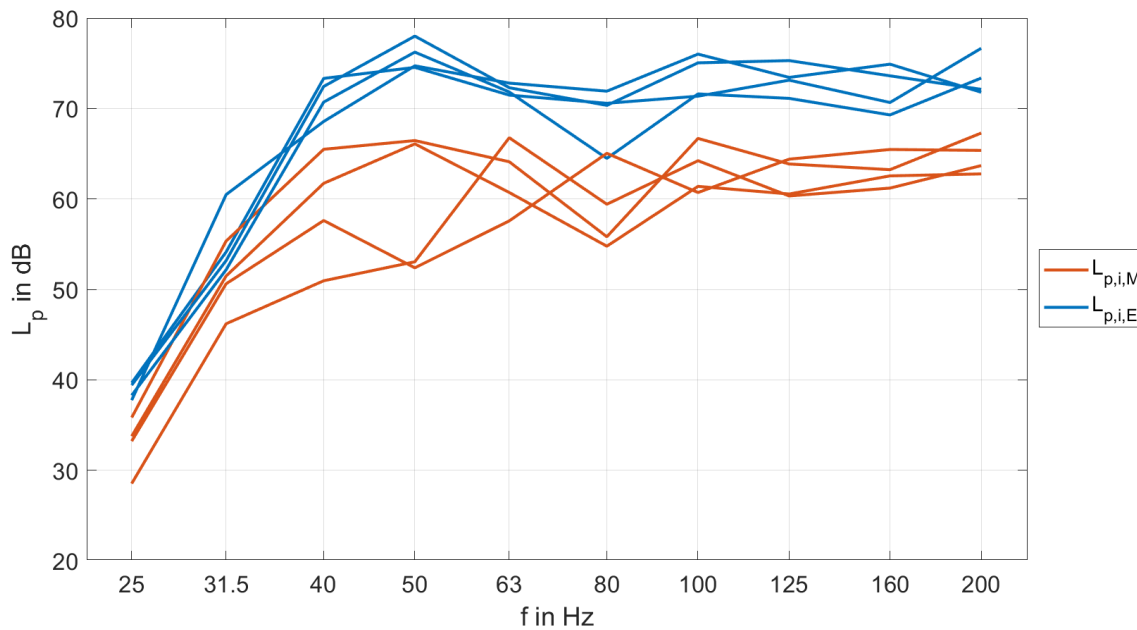


Abbildung 12: Gemessener Terz-Schalldruckpegel innen an allen Mikrofonpositionen von Messort 13

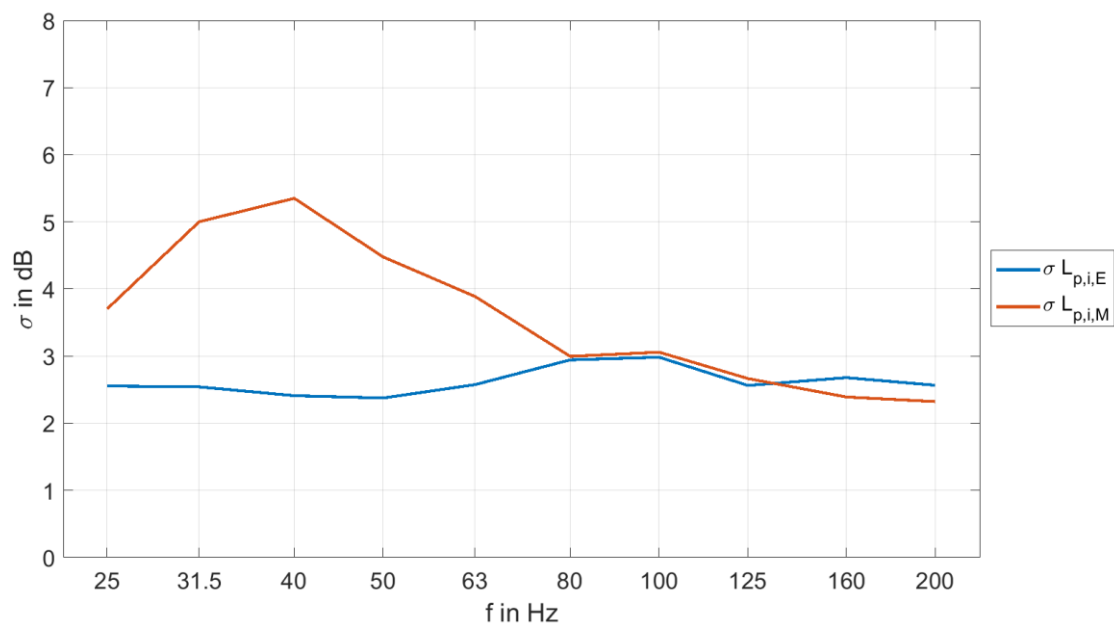


Abbildung 13: Standardabweichung σ der gemessenen Terz-Schalldruckpegelspektren der jeweiligen Gruppen von Mikrofonpositionen innen, arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte

In Abbildung 14 ist das arithmetische Mittel der FFT-Spektren des gemessenen Schalldruckpegels an $MP_{i,E}$, $MP_{i,M}$ und $MP_{a,T}$ sämtlicher Messorte dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass der Schalldruckpegel innen und außen aufgrund des Frequenzgangs der Schallquelle unterhalb von 50 Hz zu tiefen Frequenzen abfällt. Der ausschließlich außen zu beobachtende Abfall des Schalldruckpegels oberhalb von 50 Hz zu hohen Frequenzen wird durch die definierte Position von $MP_{a,T}$ im Abstand von 0,5 m vor geöffnetem Fenster verursacht (Interferenzeffekt, vgl. Abschnitt 4.2.2).

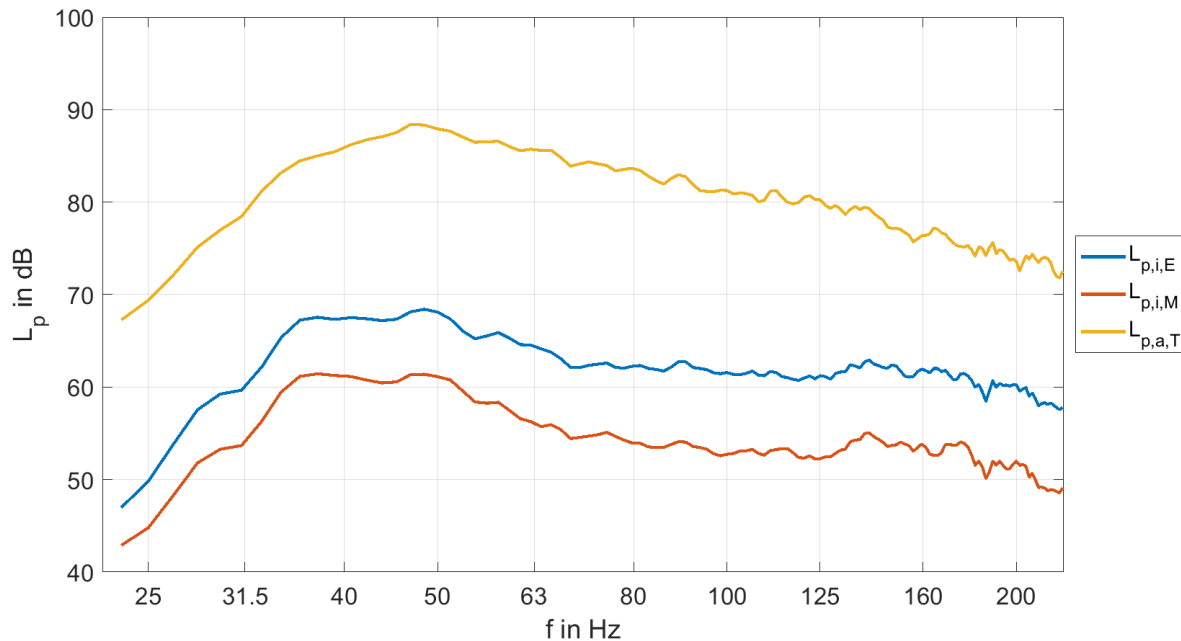


Abbildung 14: FFT-Spektren des gemessenen Schalldruckpegels an den jeweiligen Gruppen von Mikrofonpositionen innen und außen, arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte

4.1.2 Simulationsergebnisse

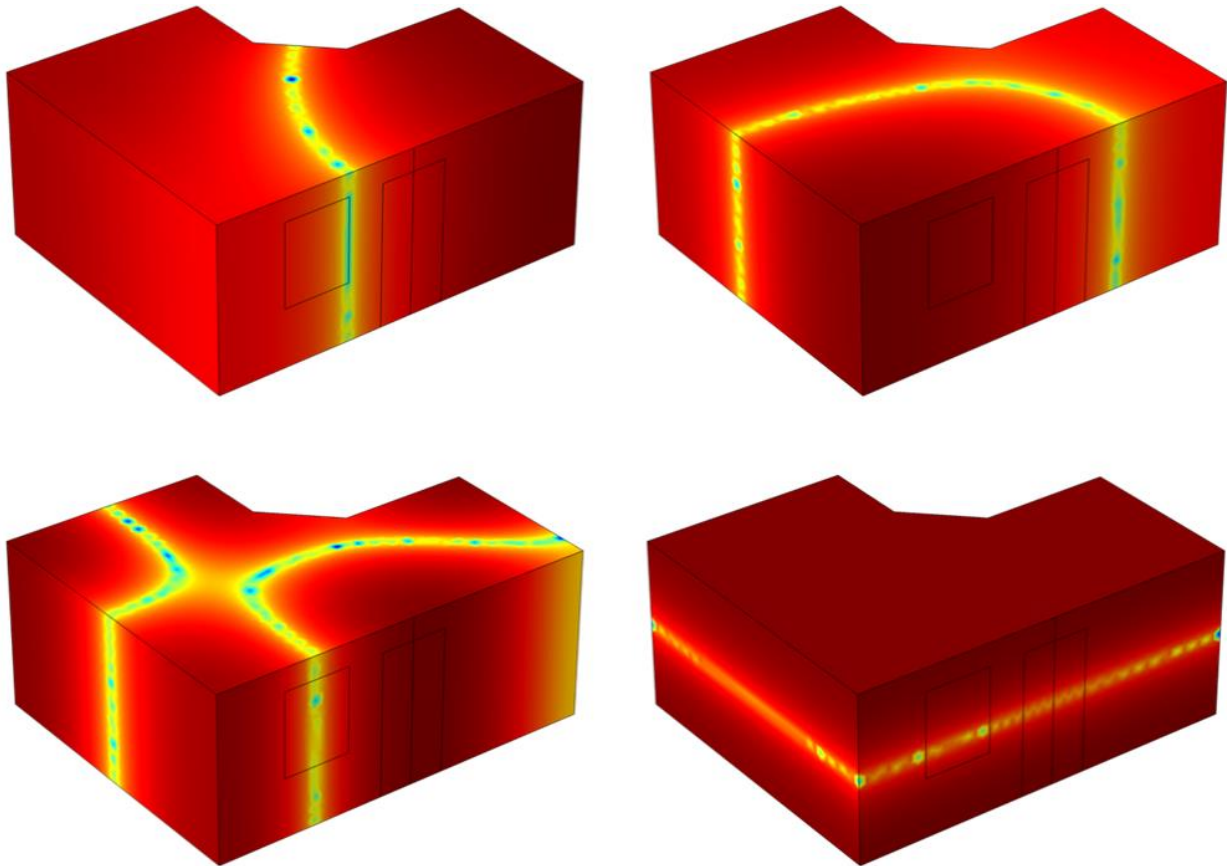
Zusätzlich zu den Messkampagnen wurden numerische Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Ziel der Simulationen war die Visualisierung der Schalldruckpegelverteilung innerhalb eines Raumes mit nicht-quaderförmiger komplexer Geometrie und der Abgleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen. Dazu wurden in der Modellierungssoftware COMSOL Multiphysics® der Comsol Multiphysics GmbH zwei verschiedene numerische Berechnungsmodelle des Raumes an Messort 15 erstellt.

Berechnung der Eigenformen:

In einem ersten Schritt erfolgte die Berechnung der Eigenformen des Raumvolumens. Dabei wurde der Raum als leerer Raum und alle Raumbegrenzungen inkl. Fenster als schallhart modelliert. Exemplarisch sind im oberen Teil von Abbildung 15 die ersten beiden berechneten Raummoden dargestellt, bei denen die Schalldruckverteilungen im Raum unabhängig von der Höhe im Raum sind, da sie unterhalb der ersten Raummode in vertikaler Raumrichtung liegen.

Der linke untere Teil von Abbildung 15 zeigt eine Raummode, die belegt, dass sich in leeren unsymmetrischen Räumen komplexer Geometrie frequenzabhängig eine Schalldruckverteilung ausbilden kann, bei der sich in einer Raumecke (hier: obere und untere rechte Raumecke) ein lokales Minimum befindet. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Möblierung und verschiedener Wandimpedanzen kann dies ggf. auch bei quaderförmigen Räumen auftreten. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass mindestens in einer der anderen Raumecken das absolute Maximum des Schalldruckpegels im Raum zu finden ist. Dies verdeutlicht nochmals, dass es zielführend ist, die maßgebliche Schallimmission im Raum nicht nur in einer einzelnen, sondern in mehreren Raumecken zu erfassen.

Der rechte untere Teil von Abbildung 15 zeigt die erste Raummode in vertikaler Raumrichtung, bei der die Schalldruckverteilung in einer definierten Höhe im Raum über die komplette Grundfläche des Raumes konstant ist.



Legende: Oben links: erste Eigenmode bei 27,6 Hz; Oben rechts: zweite Eigenmode bei 41,1 Hz;
Unten links: Eigenmode bei 67,8 Hz mit lokalem Minimum in Raumecke;
Unten rechts: erste Eigenmode in vertikaler Raumrichtung bei 69,8 Hz

Abbildung 15: Numerisch berechnete Eigenformen des leeren Raumvolumens an Messort 15

Im zweiten Schritt wurde das Fenster der Außenwand des Raumes, das bei messtechnischen Untersuchungen der Schallquelle am nächsten lag, als Flächenquelle modelliert (vgl. Abbildung 16), die breitbandig Schall in den Innenraum emittiert. Anschließend erfolgte die Berechnung der Schalldruckpegelspektren an Mikrofonpositionen in den Raumecken im Abstand von 0 m, 0,1 m und 0,5 m zu den Raumbegrenzungsflächen. Der Raum wurde dabei als leerer und als teilmöblierter Raum (Sofa) modelliert, die Fensterflächen mit einer Impedanz belegt und die übrigen Raumbegrenzungsflächen als schallhart definiert.

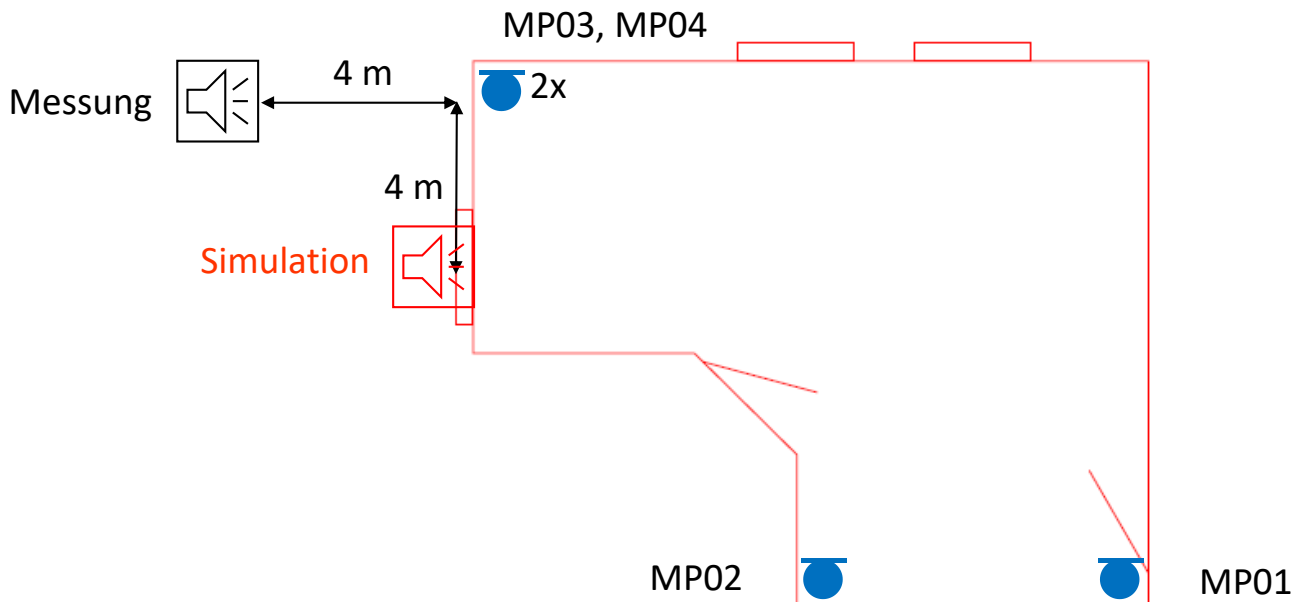
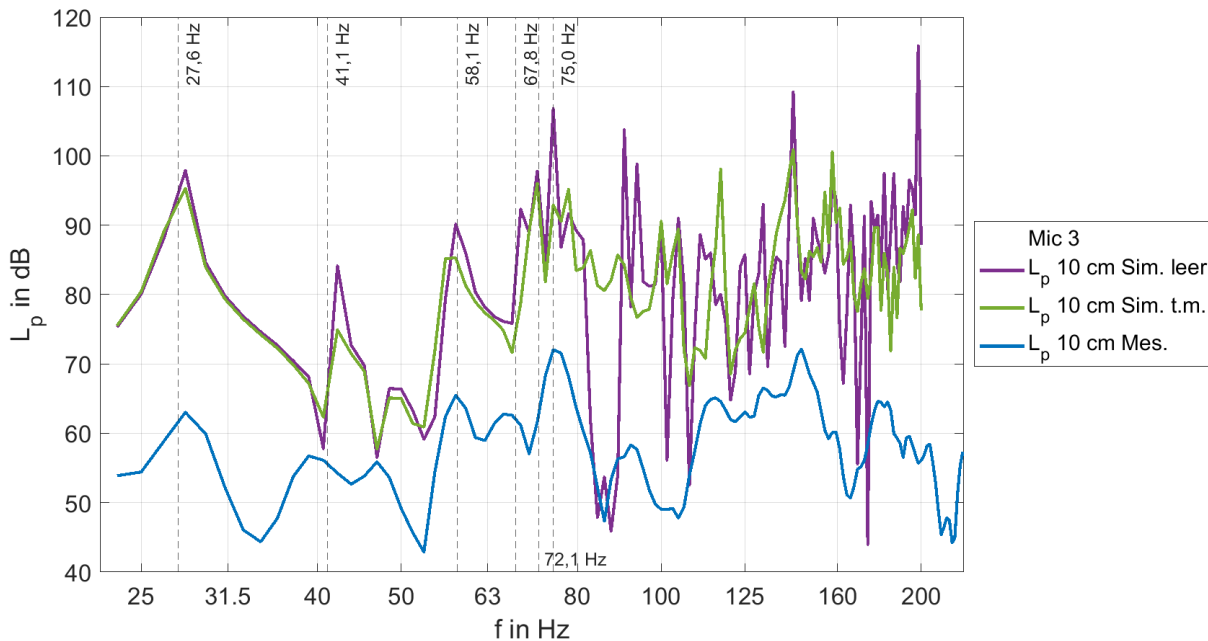


Abbildung 16: Messaufbau und Simulationsmodell zur Ermittlung des Schalldruckpegels an definierten Mikrofonpositionen in den Raumecken

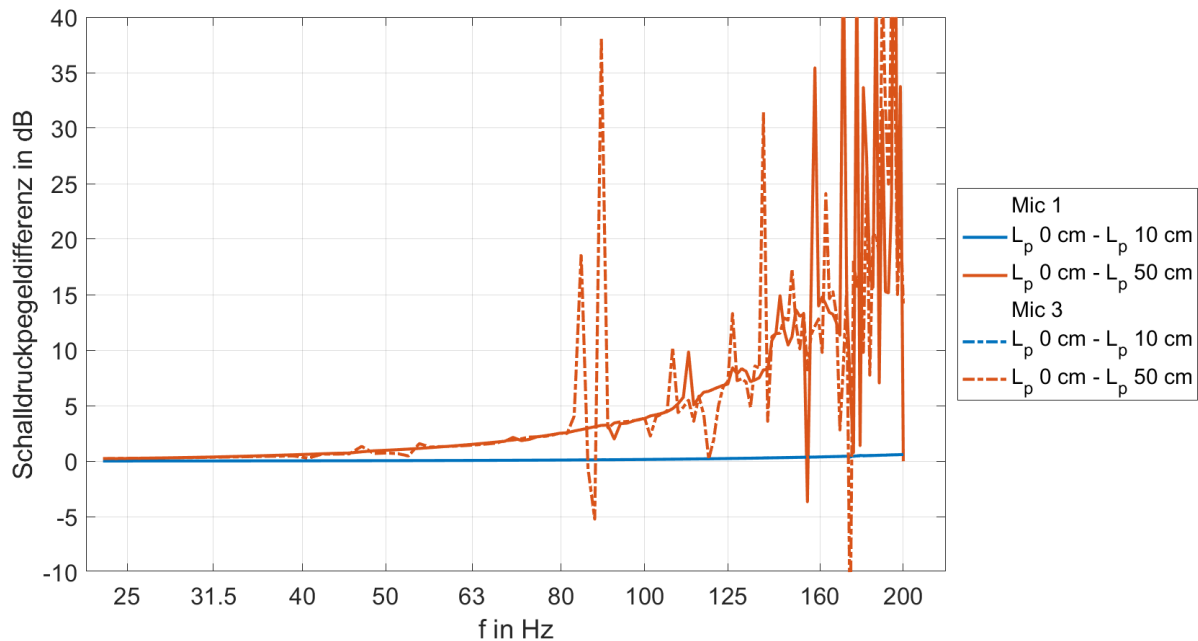
Abbildung 17 stellt exemplarisch die numerisch berechneten und die gemessenen FFT-Spektren des Immissionsschalldruckpegels an Mikrofonposition 03 in der Raumecke im Abstand von 0,1 m zu den Raumbegrenzungsflächen von Messort 15 gegenüber. Zusätzlich sind die numerisch berechneten Eigenfrequenzen des leeren Raumes im Diagramm gekennzeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Frequenzverlauf des simulierten Schalldruckpegels qualitativ sehr gut mit dem Verlauf des gemessenen Schalldruckpegels übereinstimmt. Insbesondere die relativen Maxima des Schalldruckpegels fallen im tieffrequenten Bereich erwartungsgemäß mit den numerisch berechneten Eigenfrequenzen des Raumes zusammen, obwohl der Raum in der Simulation nicht mit realer Möblierung modelliert wurde. Durch die Berücksichtigung einer teilweisen Möblierung reduziert sich die Amplitude der spektralen Minima und Maxima des simulierten Schalldruckpegelverlaufs. Dieser Effekt ist in den Messergebnissen bei realer Möblierung und Absorption im Raum nochmals deutlicher zu erkennen. Insgesamt weicht der simulierte Relativpegel vom gemessenen Absolutpegel ab, da ein absolutes Schalleistungsspektrum der modellierten Flächenquelle sowie spektrale Absorption im Raum nahezu keine Berücksichtigung fand. Auf eine Pegelanpassung der Simulationsergebnisse wurde jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit bewusst verzichtet.



Legende: Lila: Simulationsergebnis für leeren Raum; Grün: Simulationsergebnis für teilmöblierten Raum; Blau: Messergebnis für realen Raum; Senkrechte Strichlinien: numerisch berechnete Eigenfrequenzen des leeren Raumes

Abbildung 17: FFT-Spektren des Schalldruckpegels an der Mikrofonposition 03 in der Raumecke im Abstand von 0,1 m zu den Raumbegrenzungsflächen von Messort 15

Die Simulationsergebnisse zeigen damit, dass die durchgeführten Messungen plausible Ergebnisse liefern. Zudem bestätigt sich erneut, dass durch die Messung der Schallimmission in den Raumecken bei geringem Abstand zu den Raumbegrenzungsflächen, die absoluten Schalldruckmaxima der Schalldruckverteilung frequenzunabhängig erfasst werden. Ergänzend dazu zeigt Abbildung 18 die Differenz der numerisch simulierten FFT-Spektren des Immissionsschalldruckpegels $\Delta L_{p,i} = L_{p0m} - L_{p0,1m}$ und $\Delta L_{p,i} = L_{p0} - L_{p0,5m}$ an den Mikrofonpositionen 01 und 03 in zwei verschiedenen Raumecken im Abstand von 0 m und 0,1 m (blau) bzw. 0 m und 0,5 m (rot) zu den Raumbegrenzungsflächen von Messort 15.



Legende: Schalldruckpegeldifferenzen zwischen Mikrofonpositionen in zwei verschiedenen Raumecken im Abstand von 0 m und 0,1 m (blau) bzw. 0 m und 0,5 m (rot) zu den Raumbegrenzungsflächen von Messort 15; Durchgezogene Linien: Mikrofonposition 01; Strichlinien: Mikrofonposition 03

Abbildung 18: Differenz der numerisch simulierten FFT-Spektren des Schalldruckpegels $L_{p0m} - L_{p0,1m}$ und $L_{p0m} - L_{p0,5m}$

Ergänzend zu den Ergebnissen der Voruntersuchungen zum Einfluss der Messposition innerhalb des Raumes in Abbildung 8 ist erkennbar, dass sich die Differenz des Schalldruckpegels zwischen den unmittelbar in der Raumecke positionierten Mikrofonen (theoretische Annahme) und den Mikrofonen in der Raumecke im Abstand von 0,5 m zu den Raumbegrenzungsflächen mit steigender Frequenz im Allgemeinen stark erhöht. Infolge des nicht-möblierten Raumes weisen die simulierten Kurven in Abbildung 18 deutlich amplitudenstärkere Extrema auf als die gemessenen Kurven in Abbildung 8. Im Gegensatz dazu kann die Differenz des Schalldruckpegels zwischen den unmittelbar in der Raumecke positionierten Mikrofonen und den Mikrofonen in der Raumecke im Abstand von 0,1 m im interessierenden Frequenzbereich mit maximal 0,5 dB vernachlässigt werden.

4.2 Schalldruckpegeldifferenz

An dieser Stelle werden die folgenden Schalldruckpegeldifferenzen für breitbandige Anregung (Index b) definiert:

- **$D_{b,E,T}$... Schalldruckpegeldifferenz zwischen den Messpunkten $MP_{a,T}$ und $MP_{i,E}$ für breitbandige Geräusche**

$$D_{b,E,T} = L_{p,a,T} - L_{p,i,E} \quad (13)$$

$L_{p,a,T}$ Immissionsschalldruckpegel außen an der Mikrofonposition $MP_{a,T}$ am maßgeblichen Immissionsort nach TA Lärm im Abstand von 0,5 m vor geöffnetem Fenster

$L_{p,i,E}$ energetischer Mittelwert der Immissionsschalldruckpegel innen an den Mikrofonpositionen $MP_{i,E}$ in den Ecken des Raumes bei geschlossenem Fenster

- **$D_{b,M,T}$... Schalldruckpegeldifferenz zwischen den Messpunkten $MP_{a,T}$ und $MP_{i,M}$ für breitbandige Geräusche**

$$D_{b,M,T} = L_{p,a,T} - L_{p,i,M} \quad (14)$$

$L_{p,i,M}$ energetischer Mittelwert der Immissionsschalldruckpegel innen an den Mikrofonpositionen $MP_{i,M}$ in der Mitte des Raumes bei geschlossenem Fenster

- **$D_{b,E,W}$... Schalldruckpegeldifferenz zwischen einem freien Punkt außen und $MP_{i,E}$ für breitbandige Geräusche**

$$D_{b,E,W} = L_{p,a,W} - L_{p,i,E} - 6 \text{ dB} \quad (15)$$

$L_{p,a,W}$ Immissionsschalldruckpegel außen an der Mikrofonposition $MP_{a,W}$ unmittelbar vor der Wand bei geschlossenem Fenster

- **$D_{b,M,W}$... Schalldruckpegeldifferenz zwischen einem freien Punkt außen und $MP_{i,M}$ für breitbandige Geräusche**

$$D_{b,M,W} = L_{p,a,W} - L_{p,i,M} - 6 \text{ dB} \quad (16)$$

Um die Schalldruckpegeldifferenz zu einem freien Punkt vor dem Haus (d. h. bei Abwesenheit des Hauses) zu erhalten, wurde in den Gleichungen (15) und (16) der Außenschalldruckpegel vom Messpunkt unmittelbar vor der Wand eingesetzt und um 6 dB reduziert.

Die Definition von Schalldruckpegeldifferenzen für tonale Geräusche (Index t) erfolgt in Abschnitt 6.

4.2.1 Einfluss der Messposition im Raum

In Abbildung 19 sind die FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ für alle 35 untersuchten Räume dargestellt. Analog dazu zeigt Abbildung 20 die FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,M,T}$ für alle 35 untersuchten Räume. In beiden Diagrammen überdecken die dargestellten Schalldruckpegeldifferenzen einen vergleichsweise großen Wertebereich.

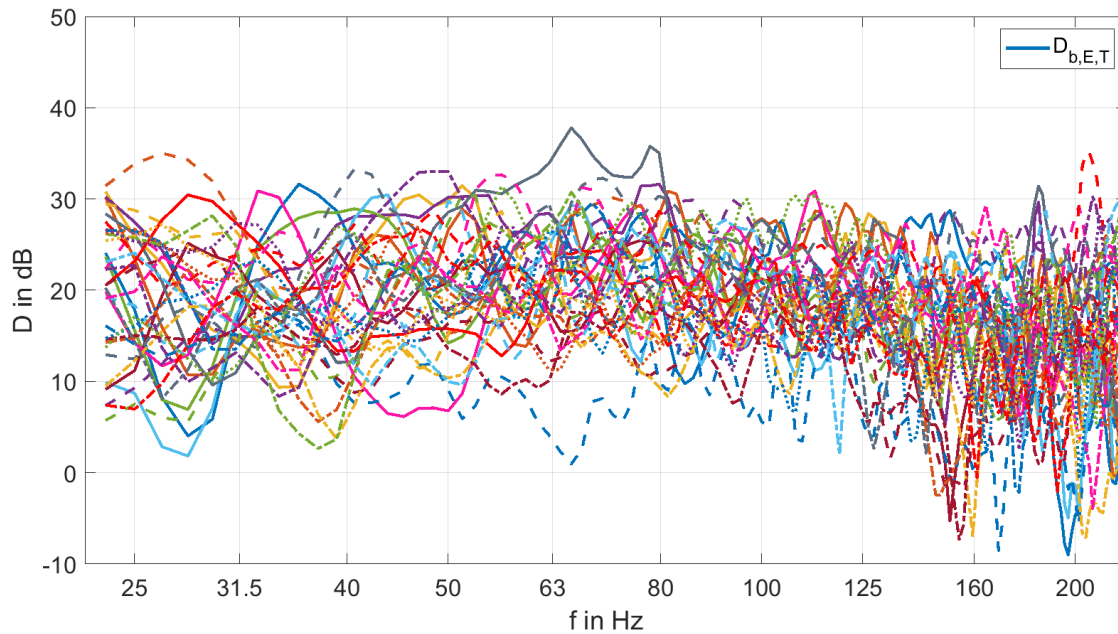


Abbildung 19: FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ für alle 35 untersuchten Messorte

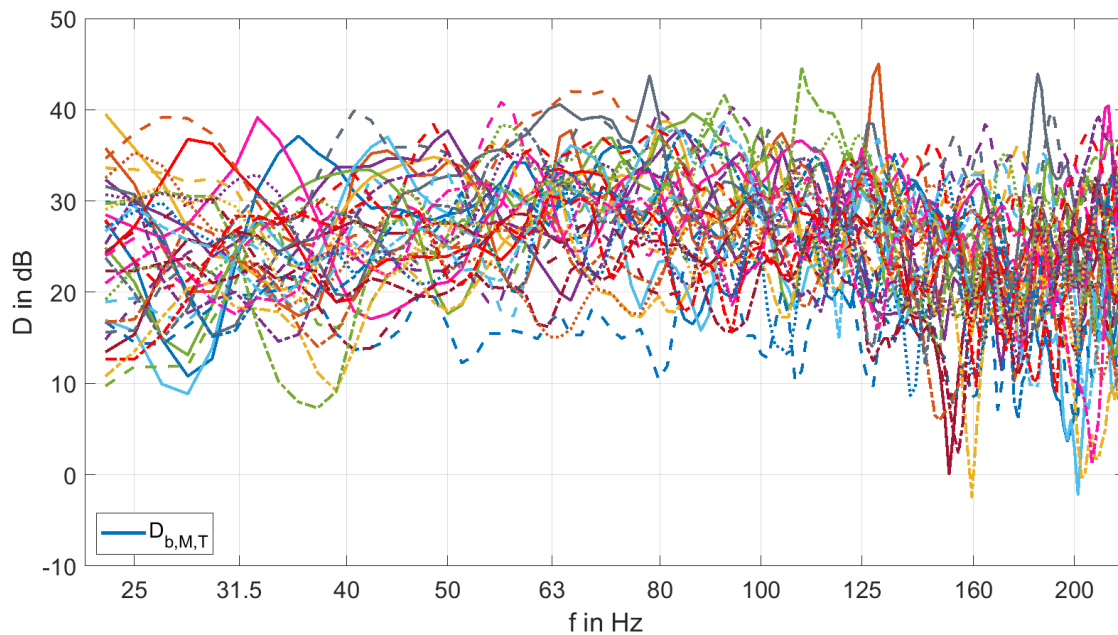


Abbildung 20: FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,M,T}$ für alle 35 untersuchten Messorte

In Abbildung 21 sind die arithmetischen Mittelwerte der FFT-Spektren der beiden gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ und $D_{b,M,T}$ über alle untersuchten Räume gegenübergestellt. Beide Schalldruckpegeldifferenzen weisen, analog zu den in Abbildung 14 gezeigten Schalldruckpegeln der beiden Mikrofongruppen innerhalb des Raumes, einen ähnlichen frequenzabhängigen Verlauf auf. Da der mittlere Schalldruckpegel an den Messpunkten $MP_{i,E}$ im gesamten interessierenden Frequenzbereich größere Werte annimmt als an den Messpunkten $MP_{i,M}$, liegt die dazugehörige mittlere Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ für alle untersuchten Frequenzen unterhalb der mittleren

gemessenen Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,M,T}$. Bei 25 Hz beträgt die Differenz $D_{b,M,T} - D_{b,E,T}$ zwischen beiden mittleren Schalldruckpegeldifferenzen ca. 4 dB, zu höheren Frequenzen steigt sie auf ca. 9 dB an (vgl. Abbildung 22). Der Pegelunterschied von 9 dB kann als Differenz des Schalldruckpegels interpretiert werden, die sich zwischen einem Mikrofon in der unmittelbaren Raumecke und einem Mikrofon im akustischen Diffusfeld im Raum theoretisch einstellt. Unterhalb der ersten Eigenfrequenz des Raumvolumens nehmen $D_{b,E,T}$ und $D_{b,M,T}$ vergleichbare Werte an (vgl. Abschnitt 2.2, Druckkammereffekt). Abbildung 23 zeigt dies exemplarisch am Beispiel der untersuchten Messorte 19 bis 21 mit kleinem Raumvolumen (erste Eigenfrequenz des Raumvolumens bei ca. 29 Hz). Aufgrund des ähnlichen Frequenz-Verlaufs der beiden Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ und $D_{b,M,T}$ und im Hinblick auf die angestrebte Ermittlung der maximalen Schalldruckpegel im Raum soll im weiteren Verlauf im Wesentlichen die Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ betrachtet werden.

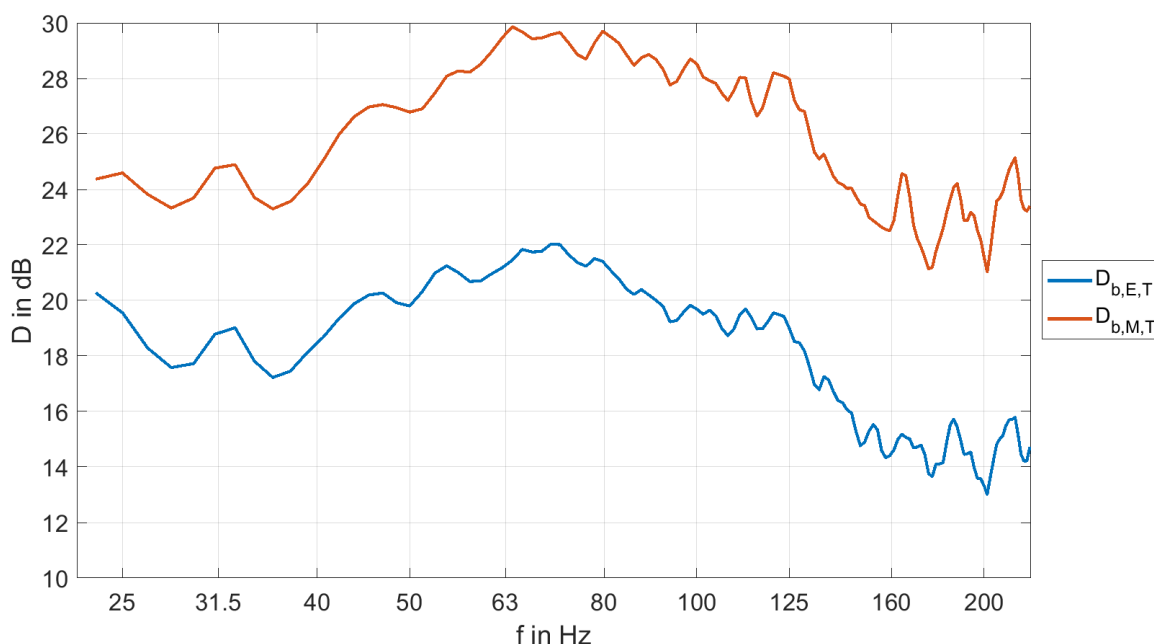


Abbildung 21: FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ und $D_{b,M,T}$, jeweils arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte

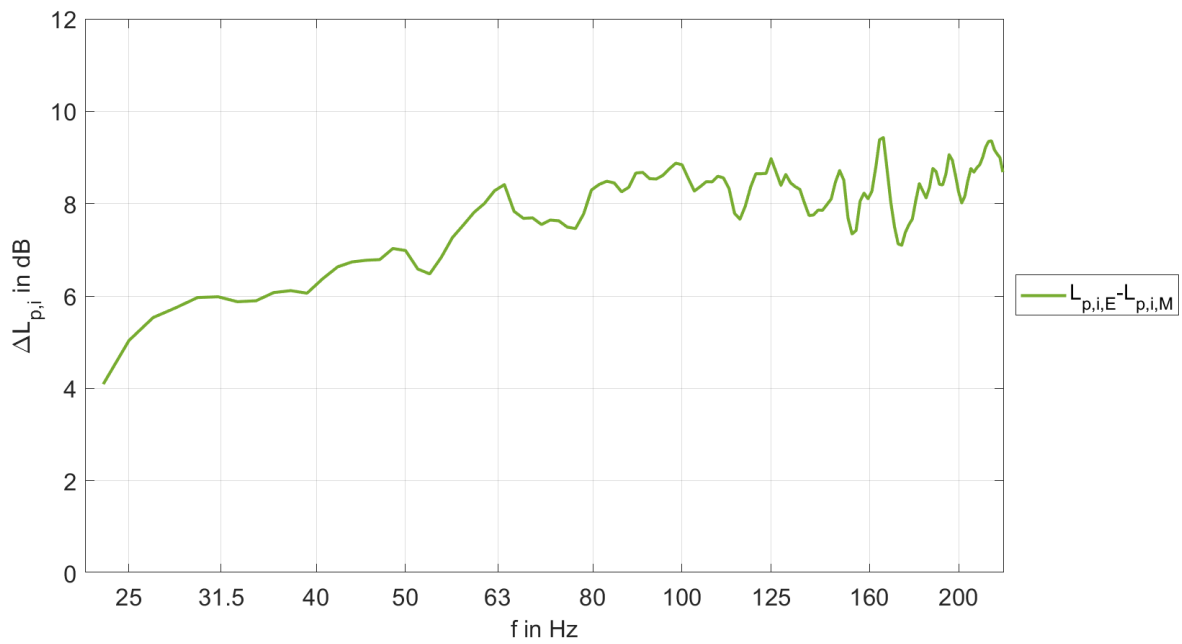


Abbildung 22: FFT-Spektrum der Differenz $D_{b,M,T} - D_{b,E,T}$ der mittleren gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen ; entspricht auch Differenz $L_{p,i,E} - L_{p,i,M}$ der mittleren gemessenen Schalldruckpegel im Raum

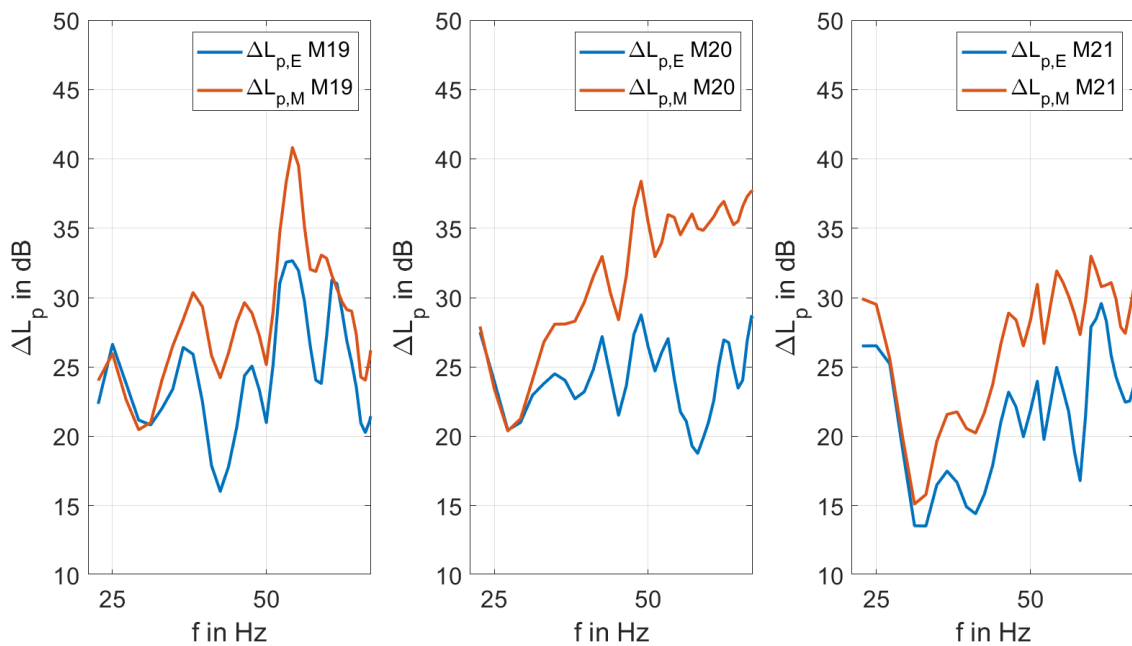


Abbildung 23: FFT-Spektren (Ausschnitt) der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen der untersuchten Messorte 19 bis 21 mit kleinem Raumvolumen; erste Eigenfrequenz des Raumvolumens bei ca. 29 Hz

4.2.2 Einfluss der Messpositionen außen

Die Definition des für Schallimmissionsmessungen außen nach TA Lärm angegebenen maßgeblichen Immissionsorts im Abstand von 0,5 m vor geöffnetem Fenster des am stärksten betroffenen schutzbedürftigen Raumes basiert auf der Annahme, dass sich das Messmikrofon durch das geöffnete Fenster im akustischen Freifeld befindet und rückwertige Schallreflexionen unterdrückt werden. Dass dies im hier betrachteten tieffrequenten Bereich nicht der Fall ist, verdeutlicht Abbildung 24. Dabei ist zu beachten, dass die Messung der Schallimmission außen unmittelbar vor der Wand aufgrund lokaler Gegebenheiten an nur 31 der 35 untersuchten Messorte möglich war. An den Messorten mit der größten relativen Fensterfläche wurde das Wandmikrofon unmittelbar vor der Fensterfläche positioniert.

Abbildung 24 zeigt die spektrale Differenz $L_{p,a,W} - L_{p,a,T}$ der mittleren gemessenen Schalldruckpegel außen. Im betrachteten Frequenzbereich ist das Messmikrofon im Abstand zum Fenster Interferenzeffekten ausgesetzt, die stark von der Frequenz abhängen. An der Mikrofonposition unmittelbar vor der Wand kann davon ausgegangen werden, dass es infolge einer nahezu schallharten Schallreflexion frequenzunabhängig zu einer Verdopplung des Schalldrucks gegenüber freier Schallausbreitung kommt. Da sich die wirksame Schallreflexionsfläche mit steigender Frequenz verringert (Fresnelzonen-Modell), ist zu erwarten, dass das geöffnete Fenster die Schallreflexion an der Wand erst bei höheren Frequenzen unterbindet und infolgedessen eine Konvergenz der in Abbildung 24 dargestellten Pegeldifferenz gegen einen Wert von 6 dB auftritt.

Zur Prognose des Schalldruckpegels in Räumen auf Basis von Schallimmissionsmessungen nach TA Lärm erscheint die definierte Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ zielführend. Für eine Prognose des Schalldruckpegels innen auf Basis von Schallausbreitungsberechnungen kommt die Anwendung der Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,W}$ in Frage. Die Gegenüberstellung beider Schalldruckpegeldifferenzen zeigt Abbildung 25. Dort weist $D_{b,E,W}$ im Vergleich zu $D_{b,E,T}$ infolge der entfernten Interferenzeffekte sowie der reduzierten Raumerückwirkung oberhalb von 63 Hz einen nahezu konstanten Verlauf auf. Unterhalb von 63 Hz steigt die Schalldruckpegeldifferenz tendenziell mit der Frequenz an.

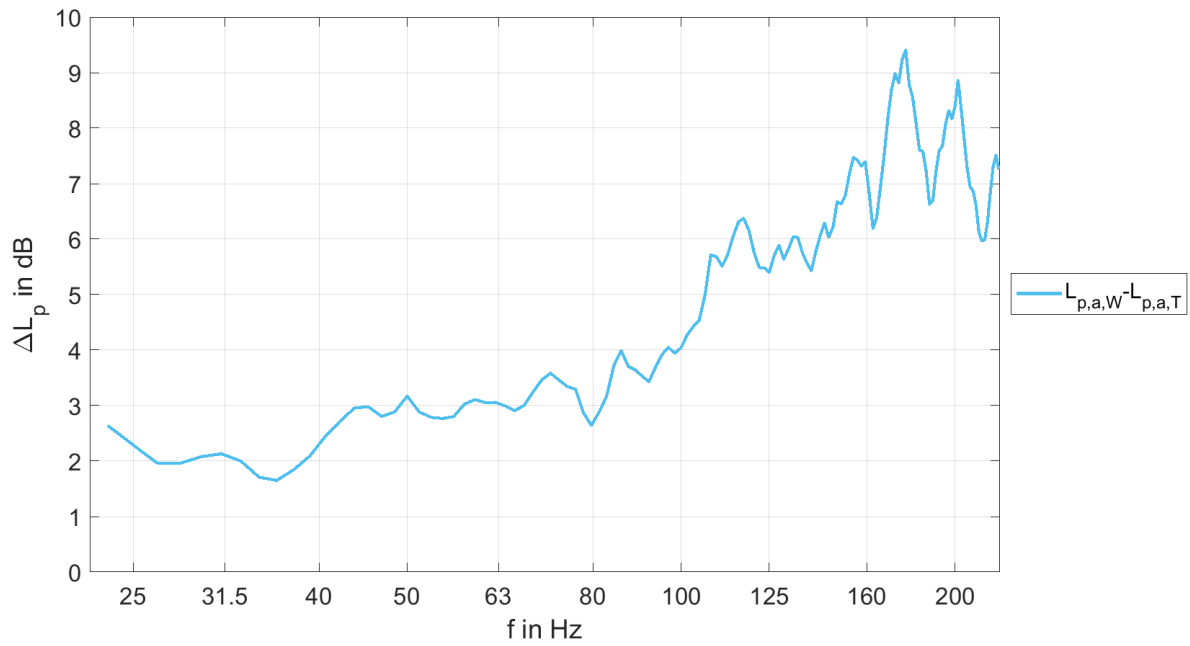


Abbildung 24: FFT-Spektrum der Differenz $L_{p,a,W} - L_{p,a,T}$ der mittleren gemessenen Schalldruckpegel außen

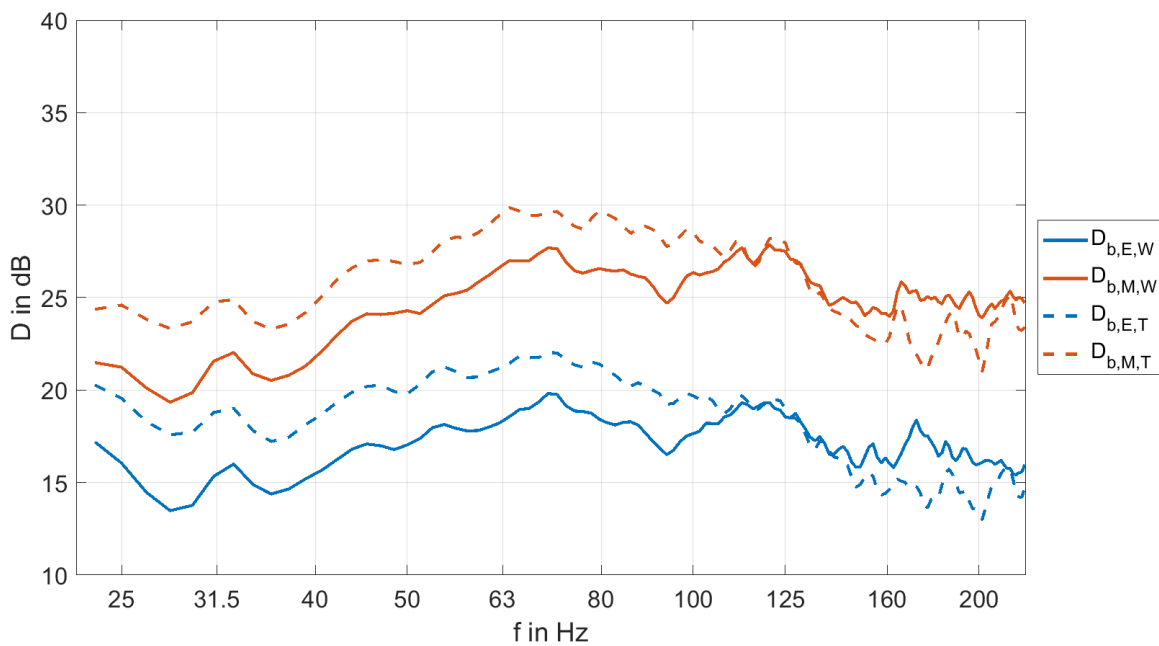


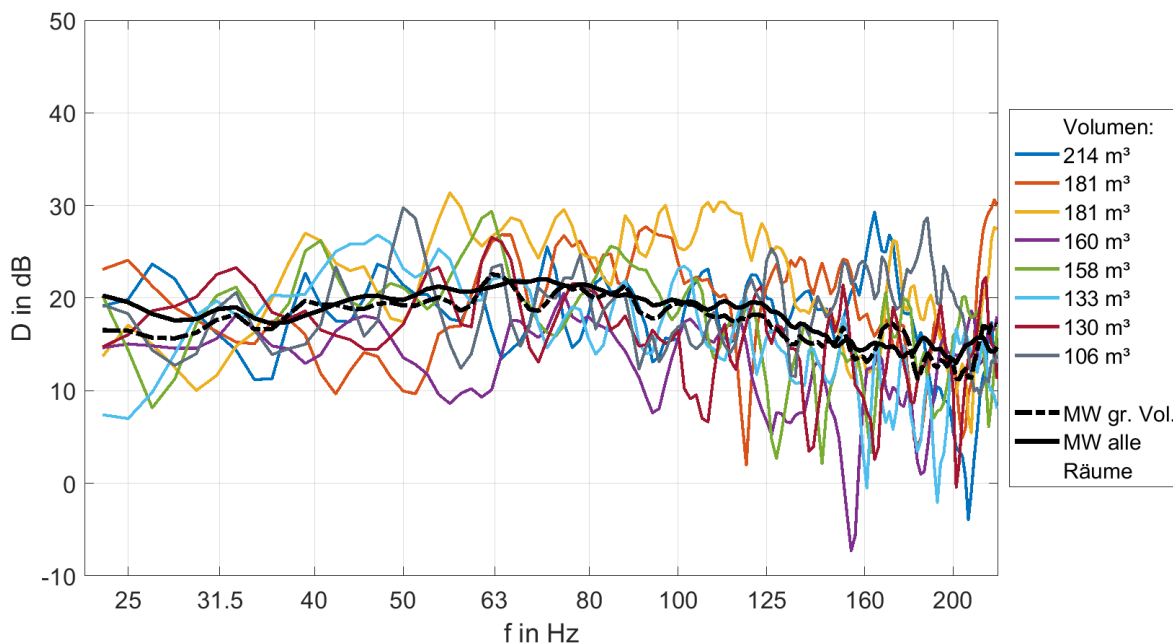
Abbildung 25: FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen, jeweils arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte

4.2.3 Einfluss geometrischer Raumparameter

An dieser Stelle soll untersucht werden, ob grundlegende Zusammenhänge zwischen der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz und diversen geometrischen Parametern bestehen.

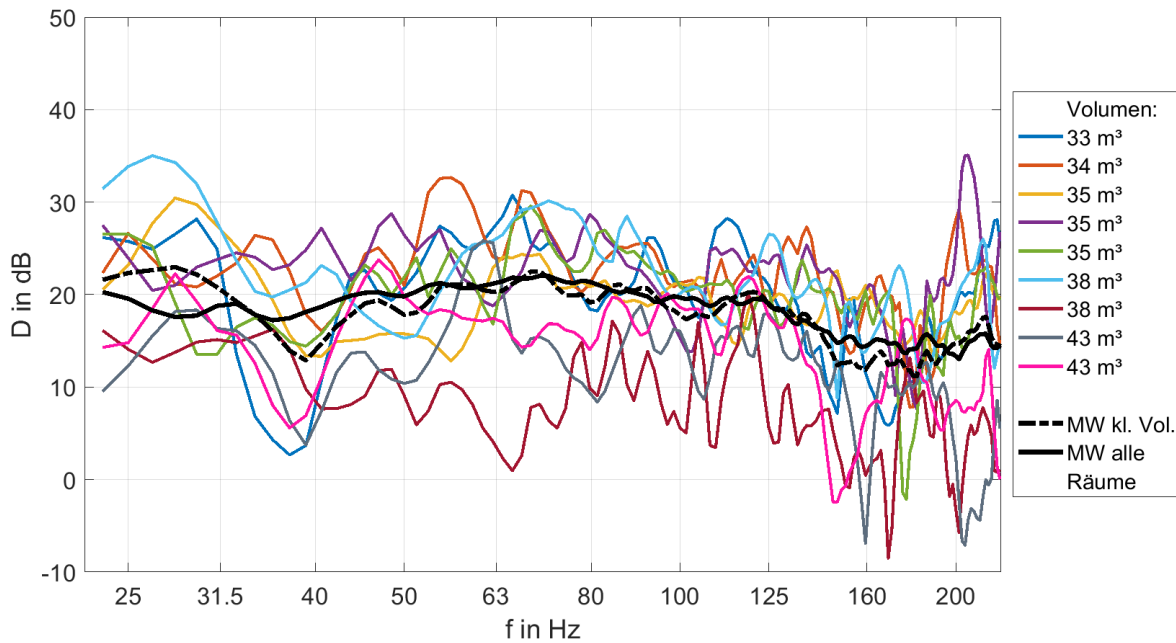
In Abbildung 26 ist beispielhaft das FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ der acht untersuchten Räume mit dem größten Raumvolumen dargestellt und dem arithmetischen Mittelwert von $D_{b,E,T}$, über diese acht Messräume sowie über alle 35 untersuchten Messräume, gegenübergestellt. Darin ist zu erkennen, dass sich beide Mittelwerte nahezu nicht voneinander unterscheiden. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei separater Darstellung der neun untersuchten Messorte mit dem kleinsten Raumvolumen (vgl. Abbildung 27). Ein klarer Zusammenhang zwischen dem Raumvolumen und der Schalldruckpegeldifferenz ist nicht ersichtlich. Dasselbe gilt für große und kleine Grundflächen oder Raumhöhen. Auch durch Vergleich der Schalldruckpegeldifferenz von Messorten im Obergeschoss mit der Schalldruckpegeldifferenz von Messorten im Erdgeschoss ließen sich erwartungsgemäß keine klaren Unterschiede feststellen.

Bei getrennter Betrachtung der Korrektur von Räumen mit besonders großer und besonders kleiner relativer Fensterfläche zeigt sich hingegen ein deutlicher Zusammenhang. So weisen die Räume mit besonders großer relativer Fensterfläche oberhalb von 40 Hz eine nahezu konstante um ca. 5 dB niedrigere Schalldruckpegeldifferenz auf als der Durchschnitt (vgl. Abbildung 28). Die Räume mit besonders kleiner relativer Fensterfläche zeigen analog oberhalb von 40 Hz eine im Vergleich zum Durchschnitt erhöhte Schalldruckpegeldifferenz (Abbildung 29). Dies erscheint plausibel, da die Fenster im Allgemeinen die Schwachstelle der Schalldämmung der Außenbauteile darstellen. Durch den Einsatz einer Dreifach-Verglasung (DfV) kann diese Schwachstelle jedoch relativiert werden. Die hellblaue Kurve in Abbildung 28 (Messort 28), die in einem breiten Frequenzbereich oberhalb der schwarzen Strichlinie liegt, belegt dies eindrucksvoll.



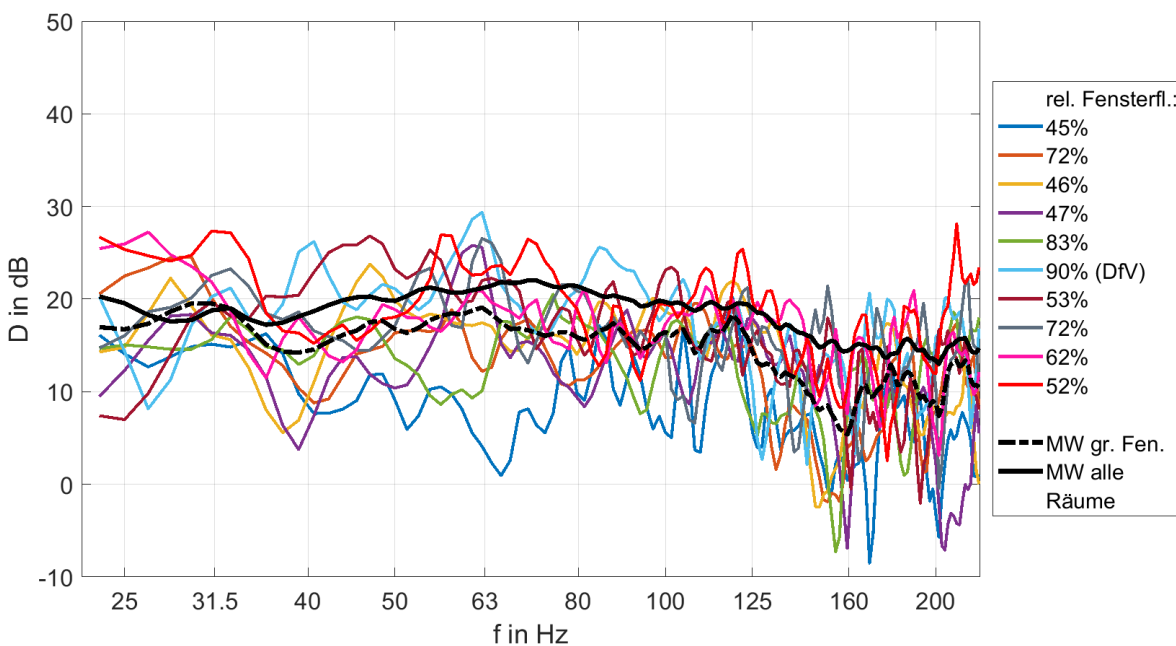
Legende: Farbige: Schalldruckpegeldifferenz der acht untersuchten Räume mit dem größten Raumvolumen; Schwarz, Strichlinie: arithmetisch gemittelt über diese acht Messorte; Schwarz, durchgezogene Linie: arithmetisch gemittelt über alle 35 untersuchten Messorte

Abbildung 26: FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ für Räume mit großem Raumvolumen



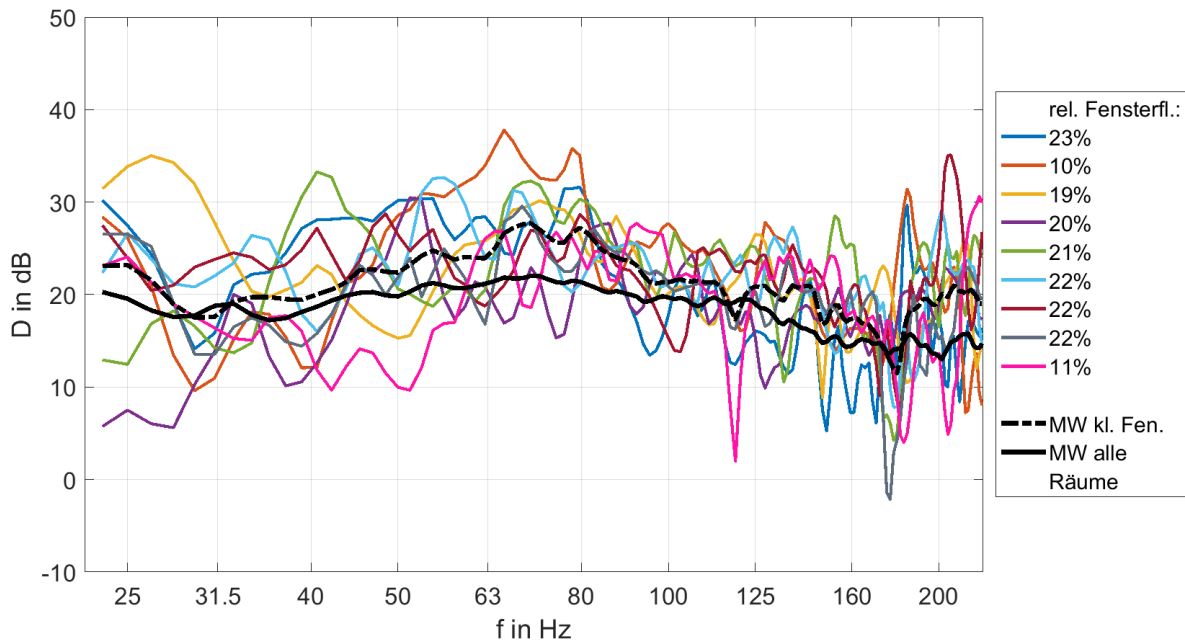
Legende: Farbige: Schalldruckpegeldifferenz der neun untersuchten Räume mit dem kleinsten Raumvolumen; Schwarz, Strichlinie: arithmetisch gemittelt über diese neun Messorte; Schwarz, durchgezogene Linie: arithmetisch gemittelt über alle 35 untersuchten Messorte

Abbildung 27: FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ für Räume mit kleinem Raumvolumen



Legende: Farbige: Schalldruckpegeldifferenz der zehn untersuchten Räume mit der größten relativen Fensterfläche; Schwarz, Strichlinie: arithmetisch gemittelt über diese zehn Messorte; Schwarz, durchgezogene Linie: arithmetisch gemittelt über alle 35 untersuchten Messorte

Abbildung 28: FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ für Räume mit großer relativer Fensterfläche



Legende: Farbige: Schalldruckpegeldifferenz der neun untersuchten Räume mit der kleinsten relativen Fensterfläche; Schwarz, Strichlinie: arithmetisch gemittelt über diese neun Messorte; Schwarz, durchgezogene Linie: arithmetisch gemittelt über alle 35 untersuchten Messorte

Abbildung 29: FFT-Spektren der gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ für Räume mit kleiner relativer Fensterfläche

4.2.4 Einfluss des trennenden Bauteils

Wie einleitend beschrieben werden die gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen maßgeblich durch die Eigenfrequenzen der Außenbauteile sowie des Raumvolumens beeinflusst. Abbildung 17 in Abschnitt 4.1.2 zeigt, dass eine Vielzahl von lokalen Maxima der Schalldruckpegel im Raum mit den Eigenfrequenzen des Raumes zusammenfällt und zu lokalen Minima der ermittelten Schalldruckpegeldifferenz führt. Der vorliegende Abschnitt soll nunmehr der Betrachtung des Einflusses der Körperschallfrequenzen der Außenbauteile auf die resultierende Schalldruckpegeldifferenz dienen. In der Literatur sind analytische Formeln angegeben, mit deren Hilfe sich Eigenfrequenzen, Koinzidenzfrequenzen und Resonanzfrequenzen von plattenförmigen ein- und zweischaligen Bauteilen unter Berücksichtigung von Aufbau, Randbedingungen und Materialeigenschaften überschlägig berechnen lassen.

Eigenfrequenzen

Für eine umseitig aufgestützte, ebene, einschalige Platte berechnen sich die Eigenfrequenzen f_n nach FASOLD (2003) zu

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B'}{m''} \left[\left(\frac{n_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{b}\right)^2 \right]} \text{ in Hz} \quad (17)$$

B' Biegesteifigkeit der Platte in Abhängigkeit von der Dicke in Nm
 m'' flächenbezogene Masse der Platte in kg/m²
 n_x, n_y Ordnung der Eigenfrequenz in x/y-Dimension der Fläche
 a, b Seitenlängen der Platte in m

mit

$$B' = \frac{E t^3}{12(1 - \mu^2)} \text{ in Nm} \quad (18)$$

E Elastizitätsmodul in Pa
 t Dicke der Platte in m
 μ Poissonzahl (Querkontraktionszahl); für Baustoffe typischerweise $\mu \approx 0,35$

und

$$m'' = t \rho \text{ in kg/m}^2. \quad (19)$$

ρ Rohdichte des Materials in kg/m³
 t Dicke der Platte in m

An den Stellen der Eigenfrequenzen weist das trennende Bauteil verminderte schalldämmende Eigenschaften auf. Den größten Einfluss auf die Schalldämmung besitzt dabei die erste Eigenfrequenz $f_{1,1}$ mit $n_x = n_y = 1$. Oberhalb der ersten Eigenfrequenz steigt die spektrale Schalldämmung einschaliger Bauteile mit 6 dB pro Oktave an (masse-dominierter Bereich; LONG (2014)).

Für den allseitig eingespannten Fall liegen die Eigenfrequenzen der Platte um einen Faktor von 1,8 bis 2,3 höher als nach Gleichung (17). Nach FASOLD (2003) kommt in der Praxis in der Regel keiner der idealisierten Fälle „eingespannt“ oder „aufgestützt“ vor, sodass die Eigenfrequenzen realer Bauteile im Bereich dazwischen liegen.

Koinzidenzfrequenzen

Der zweite Effekt, der die Schallübertragung durch die trennenden Bauteile maßgeblich beeinflusst, ist die Koinzidenz. Trifft Luftschall auf eine Platte, so entstehen in dieser erzwungene Biegewellen. Die freien Biegewellen, die durch Reflexion beispielsweise an den Plattenrändern entstehen, überlagern die erzwungenen Biegewellen. Stimmt die Wellenlänge der freien Biegewellen λ_B mit der Wellenlänge des Luftschalls λ_0 überein, so spricht man von Koinzidenz. Dieser Zusammenhang ist abhängig vom Einfallswinkel des Luftschalls φ zur Flächennormalen der Platte. Nach FASOLD (2003) gilt

$$\lambda_0 = \lambda_B \sin \varphi. \quad (20)$$

λ_B Wellenlänge der freien Biegewelle in m
 λ_0 Wellenlänge des Luftschalls in m
 φ Einfallswinkel des Luftschalls

Nach Gleichung (20) ergibt sich die tiefste Koinzidenzfrequenz für den streifenden Schalleinfall mit $\varphi = 90^\circ$. Für diesen Fall berechnet sich die Koinzidenzfrequenz f_c nach FASOLD (2003) zu

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B'}}. \quad (21)$$

B' Biegesteifigkeit der Platte in Abhängigkeit von der Dicke in Nm
 m'' flächenbezogene Masse der Platte in kg/m²
 c_0 Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s

Bei senkrechter Beschallung der Platte durch eine ebene Schallwelle ($\varphi = 0^\circ$) tritt der Koinzidenzeffekt nicht auf.

Je größer der innere Verlustfaktor eines Materials ist, desto mehr Schallenergie wird in Wärme umgewandelt und desto stärker wird der sich ausbreitende Körperschall gedämpft. Auch der Koinzidenzeffekt wirkt sich dadurch geringer aus. Die meisten Baumaterialien weisen geringe bis mittlere Verlustfaktoren auf (vgl. Tabelle 11). Vor allem Glas verfügt hier über sehr geringe Werte, weshalb der Einbruch der Schalldämmung an der Stelle der Koinzidenzfrequenz sehr stark ausfällt.

Tabelle 11: Materialeigenschaften ausgewählter Baustoffe trennender Bauteile

Materialart	Rohdichte ρ in 1000 kg/m ³	Elastizitätsmodul E in GPa	Innerer Verlustfaktor η_{int}
Kalksandstein	1,4 ... 2,0	3 ... 15	0,01 ... 0,02
Ziegelmauerwerk	1,4 ... 2,0	3 ... 16	0,01 ... 0,04
Glas	2,5	60 ... 80	0,0006 ... 0,002
Nadelholz	0,4 ... 0,7	1 ... 5	0,008 ... 0,01
Eichenholz	0,7 ... 1,0	2 ... 10	0,01

Quelle: FASOLD (2003)

Resonanzfrequenzen

Für mehrschalige trennende Bauteile sind weitere Resonanzeffekte zu beobachten. Bei doppelschaligen Systemen treten die Massen der beiden Einzelschalen mit der dazwischen befindlichen Feder bei einer Frequenz f_0 in Resonanz, wodurch es auch an der Stelle im spektralen Verlauf der Schalldämmung des Bauteils zu einem lokalen Minimum kommen kann.

Die Resonanzfrequenz f_0 für das Masse-Feder-Masse-System einer Doppelschale lässt sich nach FASOLD (2003) wie folgt berechnen:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s'' \left(\frac{1}{m_1''} + \frac{1}{m_2''} \right)} \text{ in Hz.} \quad (22)$$

s'' dynamische Steifigkeit der Feder (flächenbezogene Federkonstante)
 $m_{1/2}''$ flächenbezogene Masse der beiden Wandschalen in kg/m^2

Als Feder wird bei mehrschaligen Wandbauteilen in den meisten Fällen Luft verwendet. Bei Glasbauteilen kommen jedoch auch Edelgase, am häufigsten Argon, oder Gasgemische zum Einsatz. Die Berechnung der dynamischen Steifigkeit einer Luftfeder kann anhand der folgenden Gleichung erfolgen:

$$s'' = \frac{\rho_0 c_0^2}{d_L}. \quad (23)$$

ρ_0 Dichte der Luft in kg/m^3
 c_0 Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s
 d_L Dicke des Luftzwischenraumes in m

Exemplarische Berechnung

Die Wände der untersuchten Räume bestehen größtenteils aus Kalksandstein oder Ziegel, die nach FASOLD (2003) sehr ähnliche Eigenschaften aufweisen (vgl. Tabelle 11). Unter Berücksichtigung der hohen flächenbezogenen Masse und der vergleichsweise großen, für die 35 Messorte ermittelten durchschnittlichen Wanddicke von ca. 0,5 m können die Wände damit als biegesteife Bauteile modelliert werden.

In Tabelle 12 sind die berechneten ersten beiden Eigenfrequenzen und die tiefste Koinzidenzfrequenz verschiedener Wand- und Fensterbauteile aufgeführt. Als Materialparameter kamen die Durchschnittswerte nach Tabelle 11 zum Einsatz (z. B. E-Modul von 9 GPa). Die Wandbauteile wurden mit einer Ausdehnung von Höhe x Breite = 2,5 m x 5 m (gewöhnliche Wand), die Fensterbauteile mit einer Ausdehnung von Höhe x Breite = 2 m x 0,5 m (größere Doppelfenster-Hälfte) modelliert. Als Wanddicke für die Massivwände aus Kalksandstein und Ziegelmauerwerk wurde der Mittelwert für die untersuchten Messorte von 0,5 m gewählt (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 12: Eigen- und Koinzidenzfrequenzen ausgewählter Baumaterialien trennender Bauteile

Trennendes Bauteil	Dicke	Höhe x Breite	Eigenfrequenzen		Koinzidenzfrequenz
	in m	in m^2	$f_{n,1}$ in Hz	$f_{n,2}$ in Hz	f_c in Hz
Kalksandstein-Wand	0,5	2,5 x 5	111	178	52
Ziegelmauerwerk	0,5	2,5 x 5	114	183	51
Glas-Fenster	0,004	2 x 0,5	44	51	2.871
Nadelholz-Wand	0,2	2,5 x 5	45	72	130
Eichenholz-Wand	0,2	2,5 x 5	51	82	114

Sowohl bei den Wandbauteilen als auch bei den Fensterbauteilen liegen die ersten Eigenfrequenzen innerhalb des interessierenden tieffrequenten Bereichs und können damit einen Einfluss auf die Schalldämmung und die resultierende Schalldruckpegeldifferenz haben. Der Koinzidenzeffekt tritt bei den biegeweichen Fensterbauteilen im Allgemeinen oberhalb des für die Bauakustik relevanten Frequenzbereichs von 100 Hz bis 3150 Hz auf und besitzt damit keinen Einfluss auf die tieffrequente Schallimmission in Räumen. Bei den biegesteifen Wandbauteilen liegt die Koinzidenzfrequenz im Allgemeinen unterhalb des für die Bauakustik relevanten Bereichs, wodurch ein Einfluss auf die tieffrequente Schallimmission in Räumen nicht ausgeschlossen werden kann.

Nach FASOLD (2003) wirken verputzte Wände in Bezug auf ihre Schalldämmung als einschalige Systeme. Im Vergleich zu der hohen flächenbezogenen Masse der Wand ($m'' = 850 \text{ kg/m}^2$ für 0,5 m Kalksandstein) trägt dünn aufgetragener Putz ($m'' = 10 \text{ kg/m}^2$ für 0,01 m Gipsputz) im Allgemeinen nur geringfügig zur flächenbezogenen Gesamtmasse bei. Die Schalldämmung erhöht Gipsputz vor allem dann signifikant, wenn große durchgehende Poren im Baumaterial vorhanden sind, und er diese schließt. Da der Wandaufbau der meisten untersuchten Messorte unbekannt ist, konnte für Wände, die nicht als ein massives Bauteil erscheinen, keine Berechnung der Resonanzfrequenz hinsichtlich einer mehrschaligen Betrachtung erfolgen.

An beinahe allen Messorten weisen die Fenster eine Doppel-Verglasung auf. Mit Gleichung (22) ergibt sich für eine Doppel-Verglasung mit zwei 4 mm dicken Scheiben und einer Luftfeder von 16 mm eine Resonanzfrequenz von ca. 212 Hz. Für Argon nimmt die Resonanzfrequenz um ca. Faktor 1,1 höhere Werte an. Mit zunehmender Scheibendicke und steigendem Scheibenabstand sinkt die Resonanzfrequenz. Im hier interessierenden Frequenzbereich kann die Resonanzfrequenz der Fenster damit eine Rolle spielen.

Abbildung 30 zeigt das FFT-Spektrum der mittleren gemessenen Schalldruckpegeldifferenz für breitbandige Geräusche aus Abbildung 25 ergänzt um die analytisch berechneten Eigenfrequenzen- und Koinzidenzfrequenzen der 0,5 m dicken Kalksandstein-Wand gemäß Tabelle 12. Dabei zeigt sich zwischen den berechneten Eigen- und Koinzidenzfrequenzen und den Positionen der Minima der spektralen Schalldruckpegeldifferenz kein plausibler Zusammenhang. Da der in Tabelle 11 für Kalksandstein angegebene E-Modul mit 3 GPa bis 15 GPa einen verhältnismäßig großen Bereich abdeckt, wurde der E-Modul im zweiten Schritt iterativ auf einen Wert von 6,38 GPa angepasst. Infolgedessen verschieben sich die berechneten Eigen- und Koinzidenzfrequenzen (vgl. Abbildung 31).

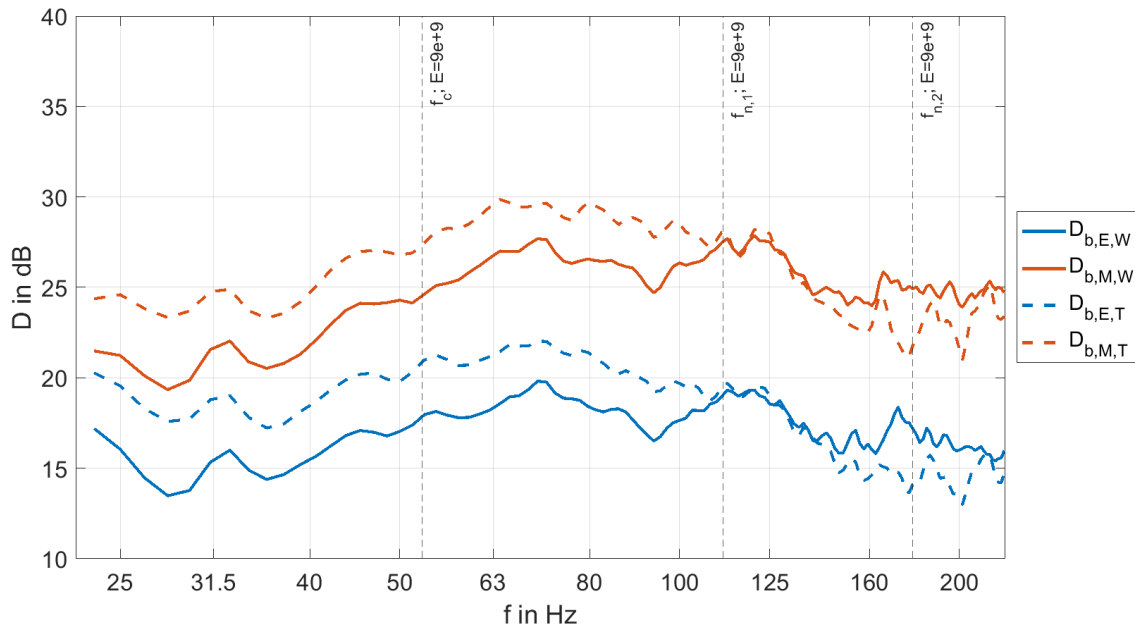


Abbildung 30: FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte aus Abbildung 25 ergänzt um analytisch berechnete Eigen- und Koinzidenzfrequenzen einer 0,5 m dicken Wand; ermittelt auf Basis von E-Modul von 9 GPa

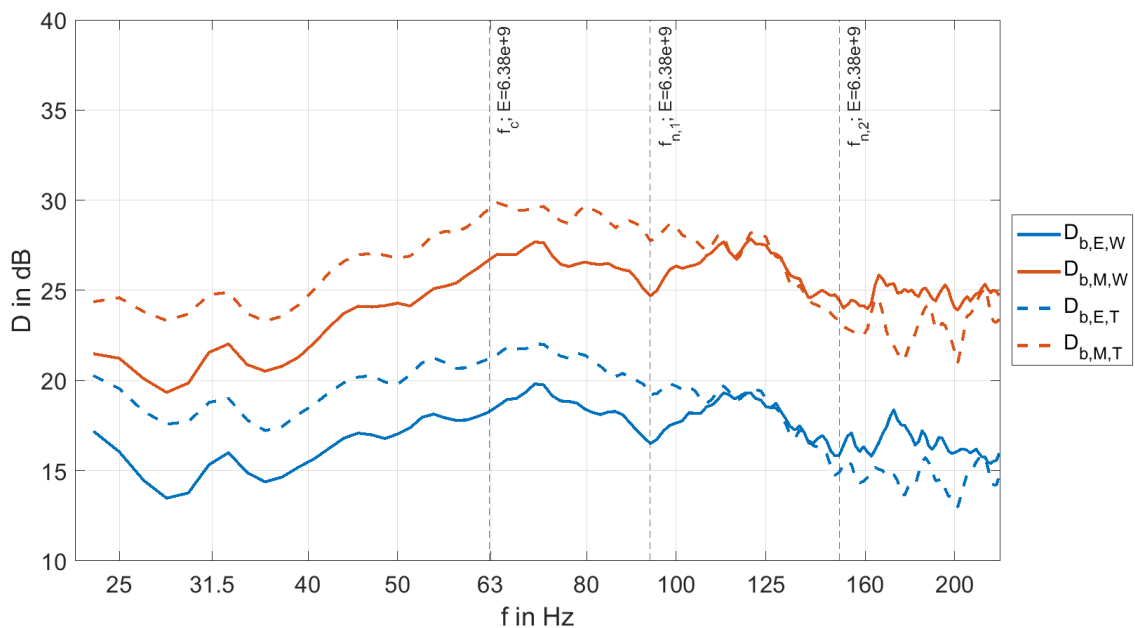


Abbildung 31: FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte aus Abbildung 25 ergänzt um analytisch berechnete Eigen- und Koinzidenzfrequenzen einer 0,5 m dicken Wand; ermittelt auf Basis von E-Modul von 6,38 GPa

Die Eigenfrequenzen fallen dadurch mit lokalen Minima der gemessenen mittleren Schalldruckpegeldifferenz zusammen, was aufgrund der nicht genauen Kenntnis des Aufbaus der trennenden Bauteile der untersuchten Messorte sowie der Mittelung der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz über 35 Messorte positiv überrascht. Lediglich die Koinzidenzfrequenz fällt in Abbildung 31 nicht mit einem lokalen Minimum der spektralen Schalldruckpegeldifferenz zusammen. Aufgrund der vorhandenen

inneren Verlustfaktoren der biegesteifen Wandelemente geht der Autor jedoch nicht von einem starken Einbruch der Schalldämmung durch den Koinzidenzeffekt aus.

Auch wenn Abbildung 31 lediglich eine qualitative Interpretation darstellt, soll damit veranschaulicht werden, dass innerhalb des hier interessierenden Frequenzbereiches von einer Beeinflussung der ermittelten gemessenen Schalldruckpegeldifferenz durch die Körperschalleigenschaften der trennenden Bauteile auszugehen ist.

4.3 Vergleich der Messergebnisse mit Literatur

Anwendung von dänischer und schwedischer Messmethode

Zur Einordnung der gemessenen mittleren Schalldruckpegeldifferenz in die Ergebnisse der Literatur wurden die Schallimmissionspegel in den Raumecken an $MP_{i,E}$ unter Anwendung der mittleren Schalldruckpegel-Differenz aus Abbildung 7 (schwarze Kurve) korrigiert und anschließend gemäß den Kriterien der dänischen und der schwedischen Messmethode ausgewählt sowie mit dem Schalldruckpegel in der Raummitte an $MP_{i,M}$ kombiniert. Anschließend erfolgte die Berechnung der Schalldruckpegeldifferenz unter Berücksichtigung des Schalldruckpegels an $MP_{a,T}$ sowie die arithmetische Mittelung der ermittelten Schalldruckpegeldifferenzen für alle in einem Raum möglichen Kombinationen von Messpunkten nach dänischer Messmethode zu $D_{b,Dan,T}$ und nach schwedischer Messmethode zu $D_{b,Swe,T}$.

Abbildung 32 zeigt das FFT-Spektrum der mittleren gemessenen Schalldruckpegeldifferenz für breitbandige Geräusche aus Abbildung 21 ergänzt um die Ergebnisse nach dänischer und schwedischer Messmethode. Oberhalb von 125 Hz stimmen die Ergebnisse von dänischer und schwedischer Messmethode näherungsweise mit $D_{b,M,T}$ überein. In diesem Frequenzbereich dominiert der Schalldruckpegel in der Raummitte die Schalldruckpegeldifferenz. Unterhalb von 50 Hz entsprechen $D_{b,Dan,T}$ und $D_{b,Swe,T}$ in etwa dem arithmetischen Mittelwert von $D_{b,E,T}$ und $D_{b,M,T}$. In diesem Frequenzbereich wird die Schalldruckpegeldifferenz durch den Schalldruckpegel in den Raumecken dominiert. Durch die beiden verschiedenen die Schalldruckpegeldifferenz dominierenden Messpositionen (unterhalb von 50 Hz: $MP_{i,E}$; oberhalb von 125 Hz: $MP_{i,M}$) entsteht ein Übergang im spektralen Verlauf der Schalldruckpegeldifferenz. Dieser Übergang erweckt den Anschein einer, mit zunehmender Frequenz steigenden Schalldruckpegeldifferenz, ähnlich dem Bergerschen Massegesetz. Dies kann zu Fehlinterpretationen führen. Grundlegend ist zu erkennen, dass die mittleren Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,Dan,T}$ und $D_{b,Swe,T}$ über den gesamten interessierenden Frequenzbereich nahezu identisch sind.

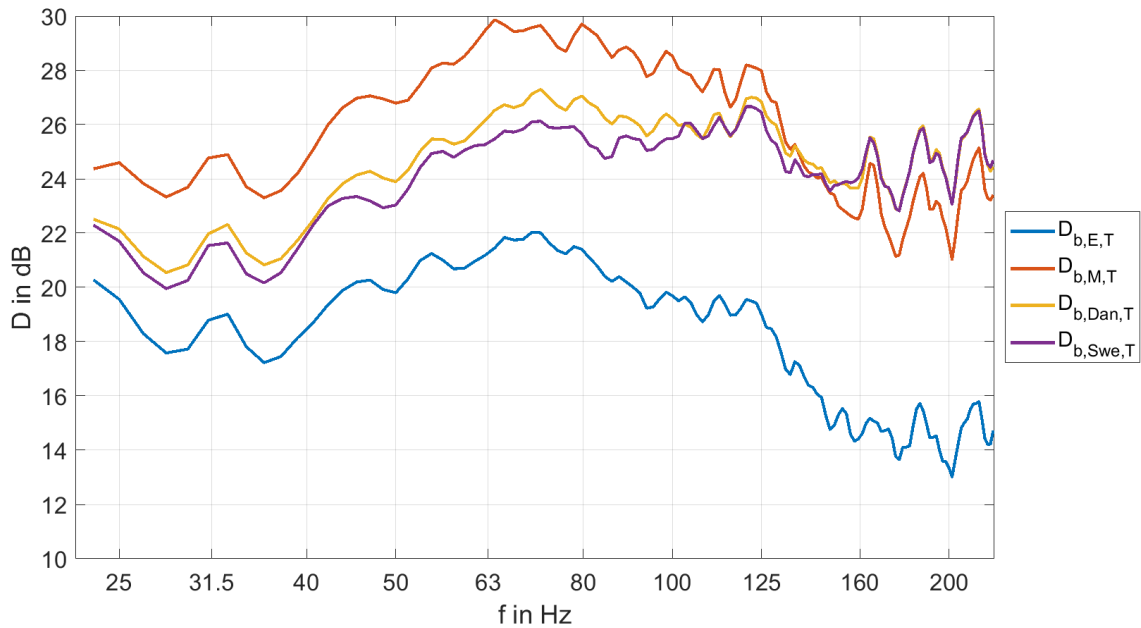


Abbildung 32: FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz arithmetisch gemittelt über alle untersuchten Messorte aus Abbildung 21 ergänzt um Ergebnisse nach dänischer und schwedischer Messmethode

Anders verhält es sich mit der Standardabweichung aller in einem Raum möglichen Kombinationen von Messpunkten gemäß der beiden Messmethoden (vgl. Abbildung 33). Diese ist für die dänische Methode unterhalb von 125 Hz etwa doppelt so groß wie für die schwedische Messmethode. Oberhalb von ca. 160 Hz nimmt die Standardabweichung beider Messmethoden vergleichbare Werte an, da die Schalldruckpegeldifferenz in diesem Frequenzbereich durch den Schalldruckpegel in der Raummitte dominiert wird. Dies bestätigt die Aussagen von PEDERSEN et al. (2007).

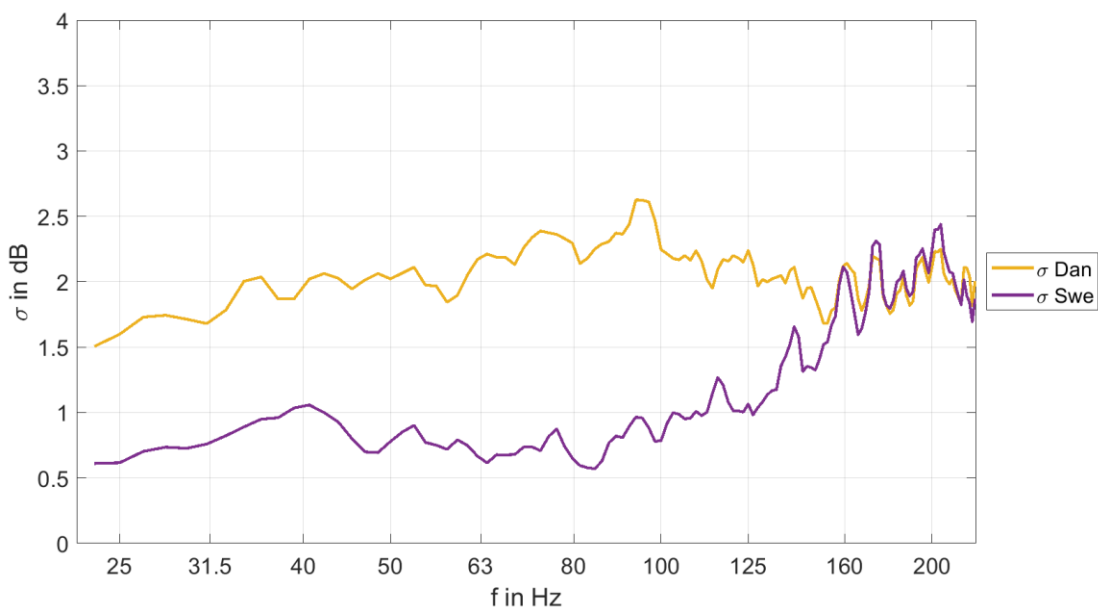
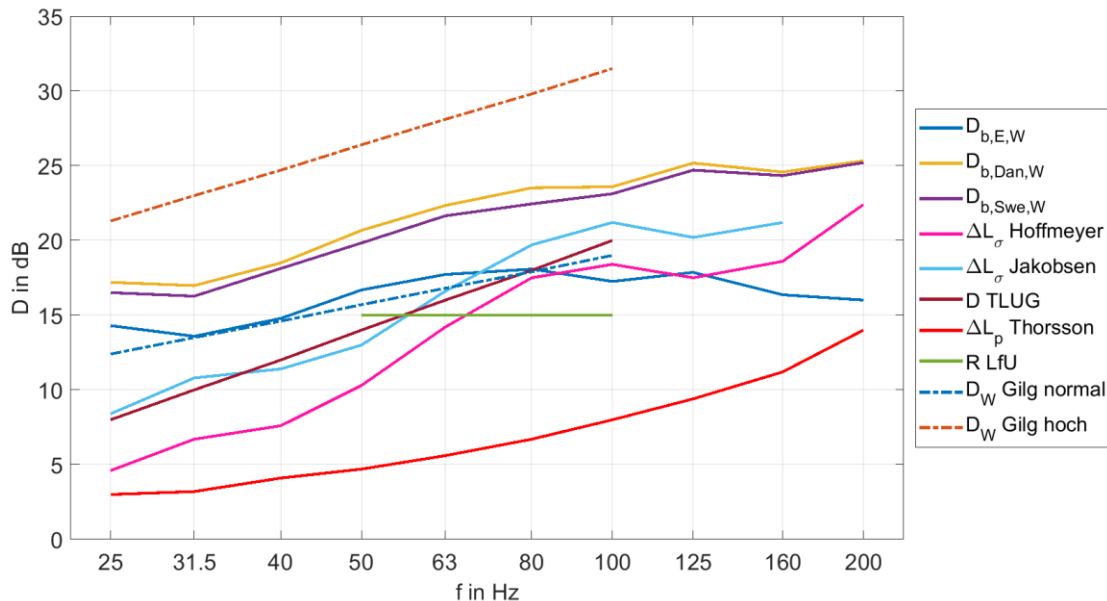


Abbildung 33: Arithmetischer Mittelwert der Standardabweichung σ aller in einem Raum möglichen Kombinationen von Messpunkten nach dänischer (gelb) und schwedischer (lila) Messmethode

Einordnung der Messergebnisse

In Abbildung 34 ist die mittlere Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,W}$ für breitbandige Geräusche den Ergebnissen der Literatur gegenübergestellt.



Legende: Blau: $D_{b,E,W}$ für Eck-Messpunkte innen, Gelb: $D_{b,Dan,W}$ nach dänischer Messmethode; Lila: $D_{b,Swe,W}$ nach schwedischer Messmethode; Rosa: Schalldruckpegeldifferenz nach HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010); Hellblau: Schalldämmung typischer dänischer Gebäude nach JAKOBSEN (2012); Braun: Schalldruckpegeldifferenz nach TLUG (2013); Rot: berechnete Schalldruckpegeldifferenz nach THORSSON et al. (2018) Grün: Schalldämmung nach LfU (2011); Blau, Strichlinie: normale Schalldämmung für breitbandige Geräusche nach GILG (2001); Braun, Strichlinie: hohe Schalldämmung für breitbandige Geräusche nach GILG (2001)

Abbildung 34: Vergleich der Terz-Spektren der gemessenen mittleren Schalldruckpegeldifferenzen für breitbandige Anregung mit Ergebnissen der Literatur

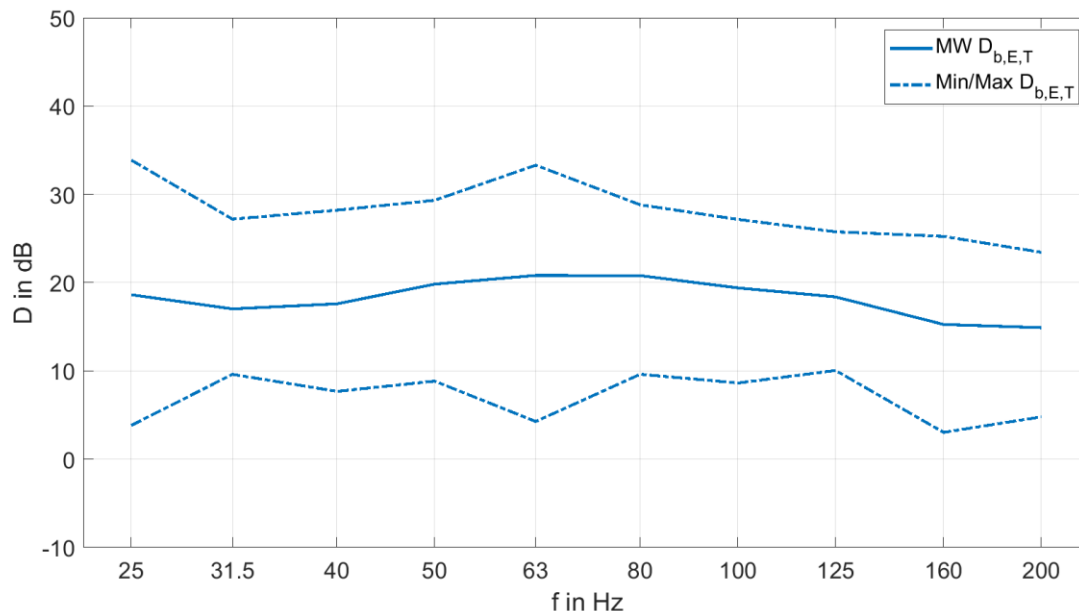
Folgende Aussagen lassen sich dazu treffen:

- Wie bereits in Abbildung 32 zu erkennen ist, sind die mittleren Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,Dan,W}$ und $D_{b,Swe,W}$ über den gesamten interessierenden Frequenzbereich nahezu identisch. Unter der Berücksichtigung, dass die Schalldruckpegeldifferenzen auf Basis derselben Messergebnisse an denselben Massivbauteilen ermittelt wurden, betrachtet die innerhalb des Forschungsvorhabens gemessene mittlere Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,W}$ die Lärmbelastung im Raum kritischer als die dänische und die schwedische Messmethode.
- Unterhalb von 63 Hz liegt die Schalldruckpegeldifferenz aus HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) unterhalb von $D_{b,E,W}$. Da sich die Messergebnisse in HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) auf für Dänemark typische und auf dem Land befindliche Gebäude beziehen und teilweise an Sommerhäusern mit Leichtbaufassaden (Holzwänden) sowie an modernen Gebäuden mit großen Panoramafenstern ermittelt wurden, erscheint dies plausibel. Mit zunehmender Frequenz steigt die Schalldruckpegeldifferenz aus HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) und nähert sich $D_{b,E,W}$ an. Oberhalb von 125 Hz übersteigen die Ergebnisse aus HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) die Werte aus $D_{b,E,W}$ deutlich, was jedoch ausschließlich auf die zugrunde liegende dänische Messmethode in HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) zurückzuführen ist.

- Die Schalldämmung aus JAKOBSEN (2012) zeigt eine näherungsweise Parallelverschiebung der Schalldruckpegeldifferenz von HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010). Da sich die Messergebnisse in JAKOBSEN (2012) wie die in HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010) auf für Dänemark typische und auf dem Land befindliche Gebäude beziehen, erscheint dies plausibel.
- TLUG (2013) interpretierte die Ergebnisse aus JAKOBSEN (2012) unterhalb von 100 Hz auf Basis des Bergerschen Gesetzes. Es sei jedoch angemerkt, dass das Bergersche Massegesetz in dem hier interessierenden tiefen Frequenzbereich, je nach Dicke und Material der Wand, ggf. nicht oder nur bedingt gelten kann. Ein allgemeiner positiver Anstieg der Schalldämmung mit zunehmender Frequenz ist demnach nicht gesichert (vgl. Abschnitt 4.2.4).
- Die berechnete Schalldruckpegeldifferenz aus THORSSON et al. (2018) unterschreitet $D_{b,E,W}$ im gesamten Frequenzbereich teilweise deutlich. Dies erscheint plausibel, da die Untersuchungen in THORSSON et al. (2018) als repräsentative Wand für schwedische ländliche Gegenden auf eine 12 cm bis 15 cm dicke Holzwand verweisen. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Räume und Gebäude weisen weitaus dickere Wandaufbauten aus Kalksandstein und Ziegel auf.
- Die auf Basis von Erfahrungswerten gewählte Schalldämmung nach LfU (2011) stimmt im Durchschnitt gut mit $D_{b,E,W}$ überein.
- Die Ergebnisse für normale Schalldämmung für breitbandige Geräusche nach GILG (2001) stimmen im gesamten Frequenzbereich sehr gut mit $D_{b,E,W}$ überein. Die geringen Unterschiede lassen sich dadurch interpretieren, dass die in GILG (2001) angegebenen Werte keinerlei Raumrückwirkung berücksichtigen, jedoch analog zum vorliegenden Forschungsvorhaben durch Mittelwertbildung über verschiedene Messorte ermittelt wurden.
- Die Ergebnisse für hohe Schalldämmung für breitbandige Geräusche nach GILG (2001) überschreiten $D_{b,E,W}$ im gesamten Frequenzbereich deutlich. Die großen Unterschiede lassen sich dadurch interpretieren, dass die in GILG (2001) angegebenen Werte keinerlei Raumrückwirkung berücksichtigen und durch Maximalwertbildung über verschiedene Messorte ermittelt wurden.

5 Vertrauensbereich

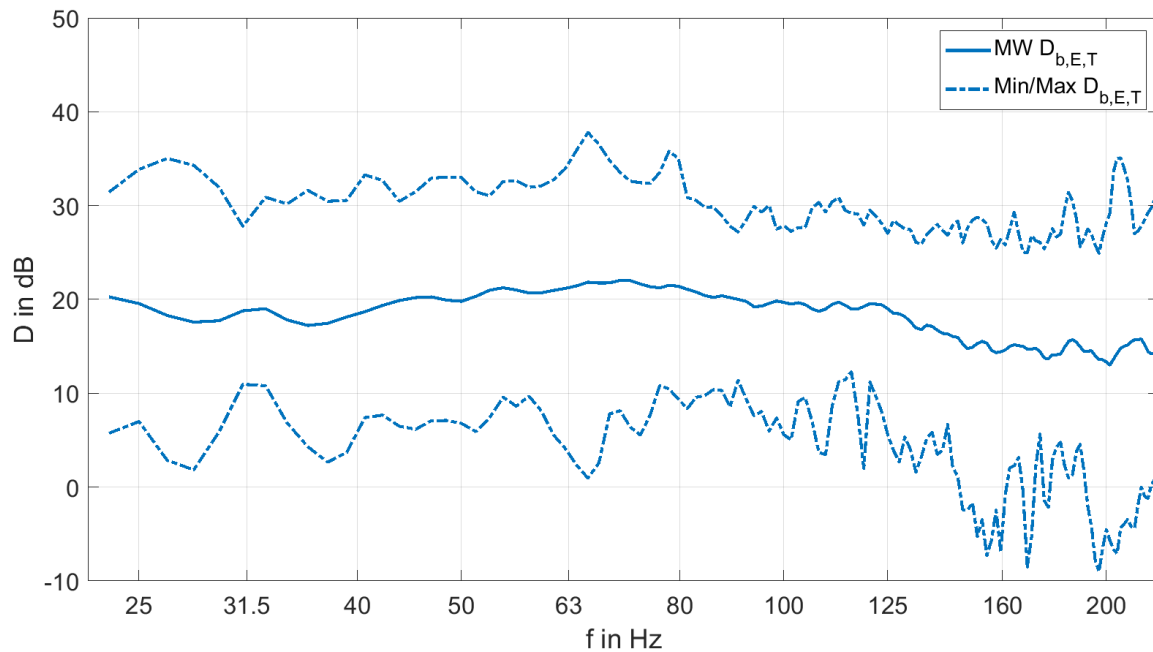
Abbildung 35 zeigt das mittlere Terz-Spektrum der Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ sowie die Minimal- und Maximalwerte über alle untersuchten Messorte. Es ist erkennbar, dass die Minimal- bzw. Maximalwerte das mittlere Spektrum um durchschnittlich ca. 10 dB unter- bzw. überschreiten.



Legende: Durchgezogene Linie: arithmetischer Mittelwert über alle untersuchten Messorte; Strichlinie: Minimal- und Maximalwerte über alle untersuchten Messorte

Abbildung 35: Terz-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$

Analog dazu ist in Abbildung 36 das FFT-Spektrum der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ sowie die Minimal- und Maximalwerte über alle untersuchten Messorte dargestellt. Darin fällt auf, dass die Minimalwerte der ermittelten Schalldruckpegeldifferenz die mittlere Schalldruckpegeldifferenz teilweise um bis zu ca. 20 dB unterschreiten. Oberhalb von ca. 140 Hz nimmt die Schalldruckpegeldifferenz einzelner Messorte teilweise sogar negative Werte an. Das bedeutet, dass der Schalldruckpegel im Raum für einzelne Frequenzen höher ist, als am maßgeblichen Immissionsort nach TA Lärm außen ($MP_{a,T}$). Dies ist vor allem auf die dort vorherrschenden Interferenzeffekte zurückzuführen.



Legende: Durchgezogene Linie: arithmetischer Mittelwert über alle untersuchten Messorte; Strichlinie: Minimal- und Maximalwerte über alle untersuchten Messorte

Abbildung 36: FFT-Spektrum der gemessenen Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit für Schallimmissionsprognosen mit einer gewissen Prognosesicherheit werden nun für die Schalldruckpegeldifferenzen $D_{b,E,T}$ und $D_{b,E,W}$ untere Vertrauensbereichsgrenzen für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 90 % eingeführt: $D_{b90,T}$ und $D_{b90,W}$. Diese entsprechen jeweils der Schalldruckpegeldifferenz, die von 90 % aller untersuchten Messorte mindestens erreicht wird.

Die untere Vertrauensbereichsgrenze $D_{x90,X}$ (einseitig) ergibt sich hier unter der Annahme, dass die Messwerte der Schalldruckpegel und deshalb auch deren Differenzen normalverteilt sind, wie folgt:

$$D_{x90,X} = D_{x,E,X} - t_{m,q} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_{x,E,X,i} - D_{x,E,X})^2}. \quad (24)$$

- $D_{x90,X}$ untere Vertrauensbereichsgrenze der Schalldruckpegeldifferenz $D_{x,E,X}$ mit Vertrauensniveau 90 %
 - $D_{x,E,X}$ arithmetischer Mittelwert der Schalldruckpegeldifferenz zu den Eck-Messpunkten innen über alle Räume
 - $t_{m,q}$ q -Quantil der t -Verteilung für $m=n-1$ Freiheitsgrade mit $q=0,9$
 - n Anzahl der Messwerte
 - $D_{x,E,X,i}$ Schalldruckpegeldifferenz zu den Eck-Messpunkten innen am Raum i
- Unter der Wurzel steht der Schätzer für die Streuung s^2 .
Die Indizes x und X sind jeweils entsprechend zu ersetzen.

In Abbildung 37 ist zu erkennen, dass die untere Vertrauensbereichsgrenze $D_{b90,T}$ im betrachteten Frequenzbereich um ca. 6 dB bis 9 dB unterhalb der mittleren gemessenen Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ liegt.

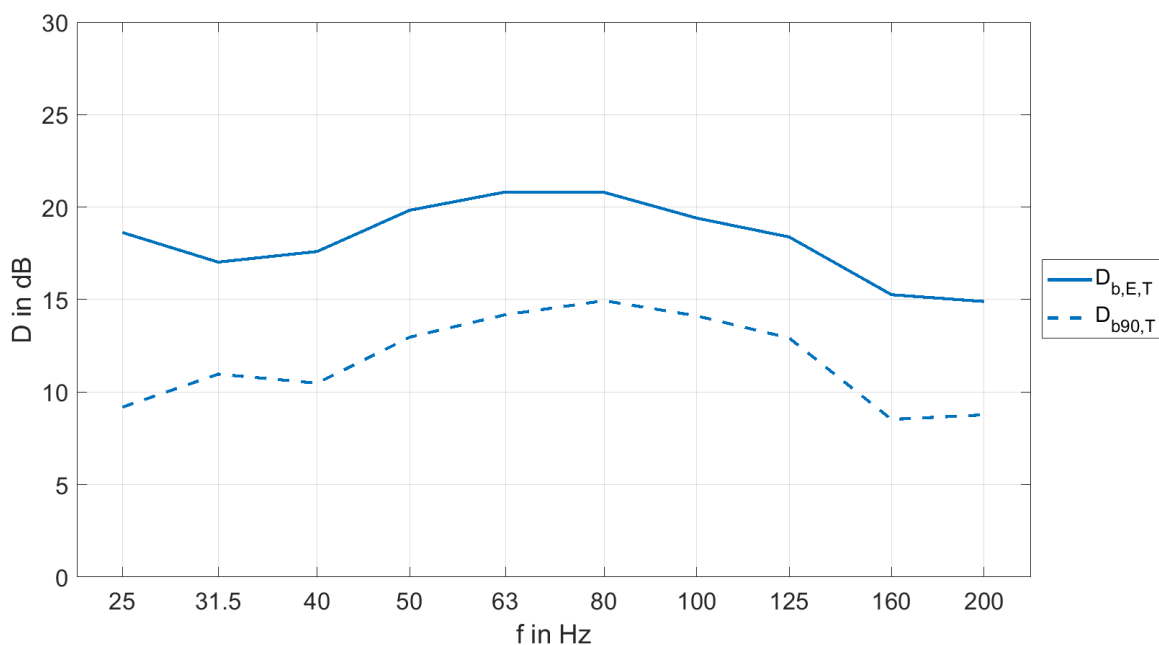


Abbildung 37: Gegenüberstellung der Terz-Spektren der gemessenen mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{b90,T}$ für breitbandige Anregung

6 Tonale Anregung

Frequenzabhängige Unterschiede der Schalldruckpegeldifferenz innerhalb eines Terzbandes können bei tonaler Anregung entsprechend wirksam werden. Im ungünstigsten Fall wird die geringste Schalldruckpegeldifferenz getroffen. Dies wird durch die wie folgt definierten Schalldruckpegeldifferenzen für tonale Geräusche berücksichtigt:

- **$D_{t,E,T}$... Schalldruckpegeldifferenz zwischen den Messpunkten $MP_{a,T}$ und $MP_{i,E}$ für tonale Anregung**

$$D_{t,E,T}(f_m) = \text{Minimum}\{D_{b,E,T}(f) \mid f_u(f_m) < f < f_o(f_m)\} \quad \text{in dB}, \quad (25)$$

f_m Mittenfrequenz der betrachteten Terz in Hz
 f_u untere Grenzfrequenz der betrachteten Terz in Hz
 f_o obere Grenzfrequenz der betrachteten Terz in Hz

- **$D_{t,E,W}$... Schalldruckpegeldifferenz zwischen einem freien Punkt außen und $MP_{i,E}$ für tonale Anregung**

$$D_{t,E,W}(f_m) = \text{Minimum}\{D_{b,E,W}(f) \mid f_u(f_m) < f < f_o(f_m)\} \quad \text{in dB}. \quad (26)$$

Dabei entspricht der jeweilige Terz-Wert der Schalldruckpegeldifferenz für tonale Anregung dem minimalen Wert des FFT-Spektrums der Schalldruckpegeldifferenz in derselben Terz.

Abbildung 38 zeigt die Differenz der Terz-Spektren der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ für breitbandige Anregung und der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{t,E,T}$ für tonale Anregung bezüglich des Messpunktes $MP_{a,T}$. Darin ist zu erkennen, dass die Schalldruckpegeldifferenz für tonale Geräusche unterhalb von 63 Hz ca. 3 dB unterhalb der Schalldruckpegeldifferenz für breitbandige Geräusche liegt. Zu höheren Frequenzen steigt die Differenz, infolge der an $MP_{a,T}$ zunehmenden Interferenzeffekte, zwischen beiden Schalldruckpegeldifferenzen auf mehr als 10 dB bei 200 Hz an. Dies erscheint für eine allgemeine Schalldruckpegeldifferenz ohne getrennte Berücksichtigung von breitbandigen und tonalen Geräuschen zu kritisch.

Auch für die Anregung durch tonale Geräusche werden entsprechend Abschnitt 5 untere Vertrauensbereichsgrenzen der Schalldruckpegeldifferenzen eingeführt, welche jeweils der Schalldruckpegeldifferenz entsprechen, die von 90 % aller untersuchten Messorte bei tonaler Anregung mindestens erreicht wird: $D_{t90,T}$ und $D_{t90,W}$. Diese liegen im betrachteten Frequenzbereich um ca. 6 dB bis 11 dB unterhalb der jeweiligen mittleren Schalldruckpegeldifferenz (vgl. Abbildung 39 und Abbildung 40).

In Abbildung 41 ist die mittlere Schalldruckpegeldifferenz $D_{t,E,W}$ für tonale Geräusche den Ergebnissen der Literatur aus Abbildung 34 ergänzend gegenübergestellt. Dazu lässt sich folgende Aussage treffen:

Die Ergebnisse der Schalldämmung für tonale Geräusche nach GILG (2001) stimmen im gesamten Frequenzbereich sehr gut mit $D_{t,E,W}$ überein. Die geringen Unterschiede lassen sich dadurch interpretieren, dass die in GILG (2001) angegebenen Werte keinerlei Raumrückwirkung berücksichtigen.

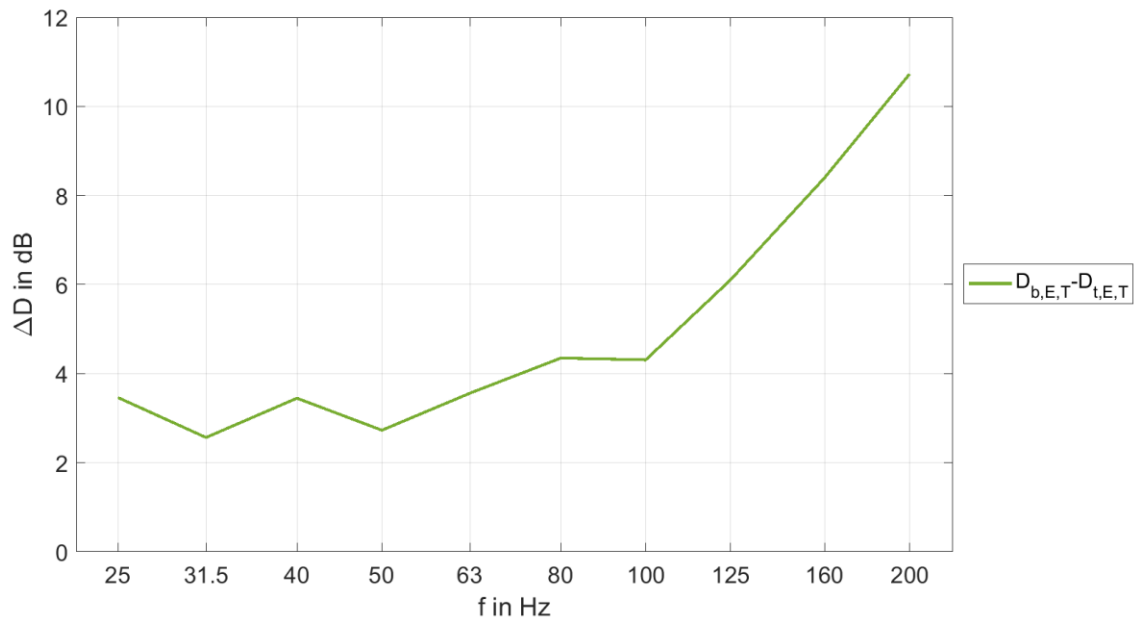


Abbildung 38: Differenz der Terz-Spektren der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ für breitbandige Anregung und der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{t,E,T}$ für tonale Anregung bezüglich des Messpunktes $MP_{a,T}$

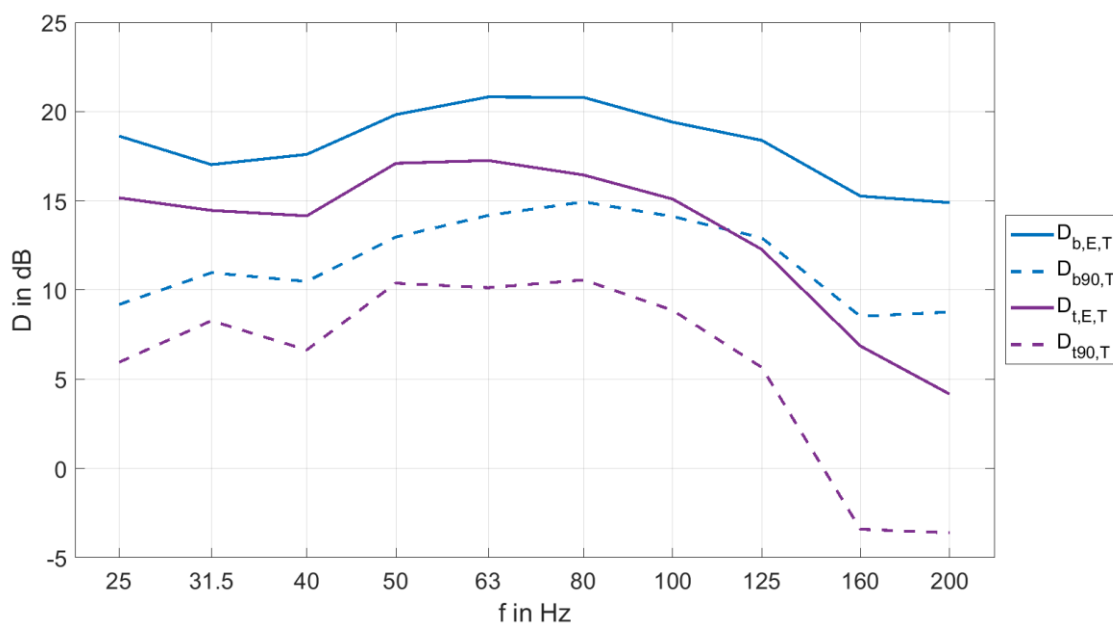


Abbildung 39: Terz-Spektren der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,T}$ und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{b90,T}$ für breitbandige Anregung sowie der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{t,E,T}$ und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{t90,T}$ für tonale Anregung bezüglich des Messpunktes $MP_{a,T}$

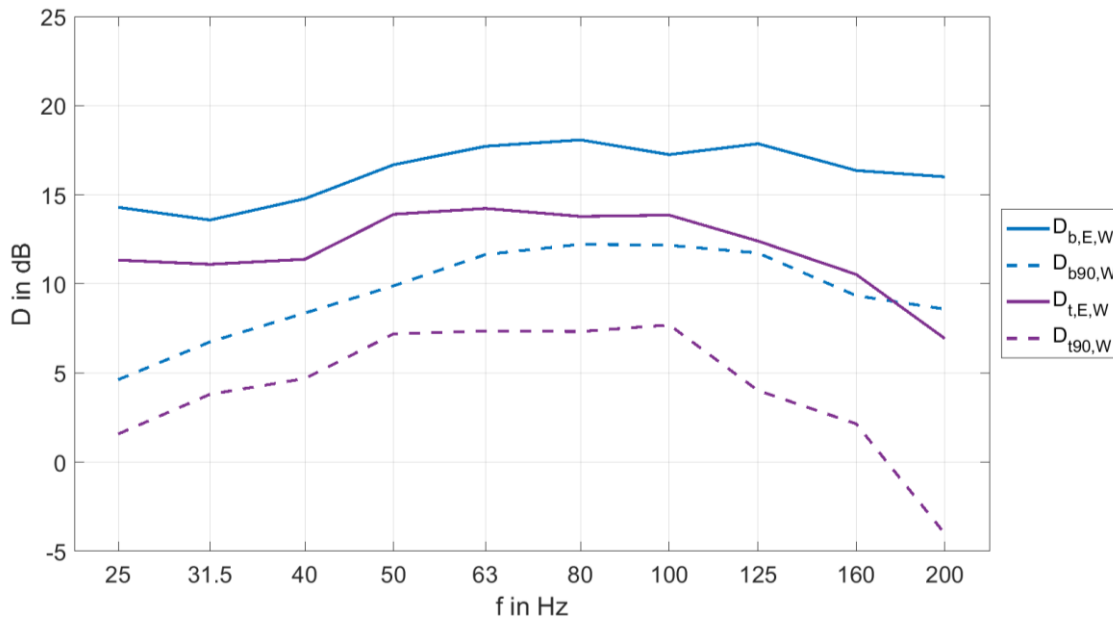
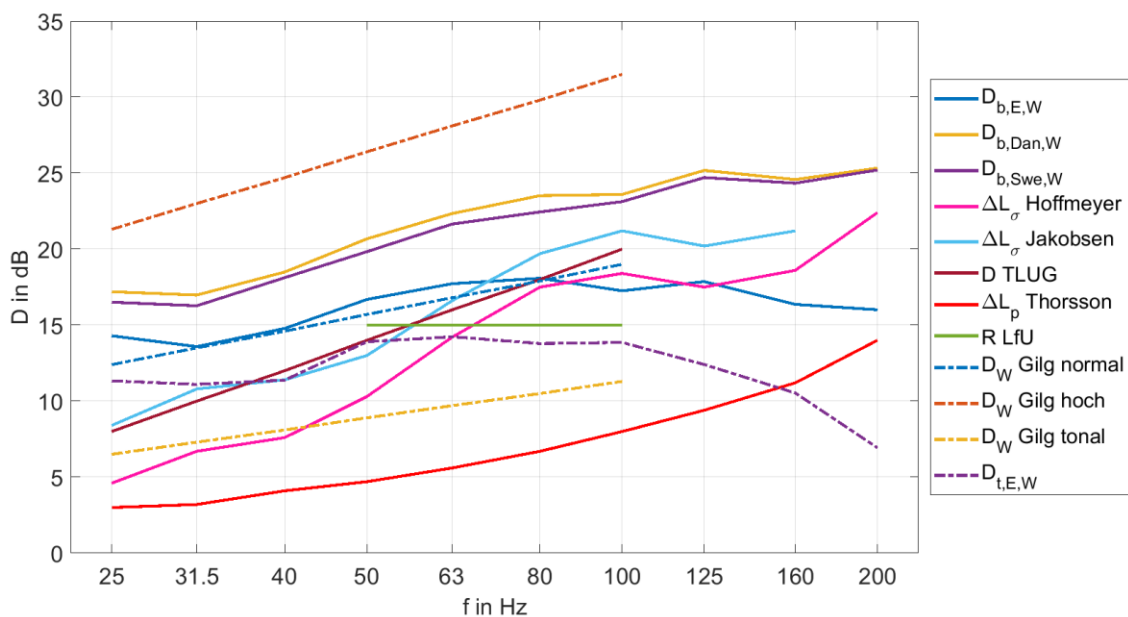


Abbildung 40: Terz-Spektren der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{b,E,W}$ und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{b90,W}$ für breitbandige Anregung sowie der mittleren Schalldruckpegeldifferenz $D_{t,E,W}$ und der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{t90,W}$ für tonale Anregung bezüglich des Messpunktes $MP_{a,W} - 6$ dB



Legende: Blau: $D_{b,E,W}$ für breitbandige Anregung, Eck-Messpunkte innen; Gelb: $D_{b,Dan,W}$ nach dänischer Messmethode; Lila: $D_{b,Swe,W}$ nach schwedischer Messmethode; Rosa: Schalldruckpegeldifferenz nach HOFFMEYER & JAKOBSEN (2010); Hellblau: Schalldämmung typischer dänischer Gebäude nach JAKOBSEN (2012); Braun: Schalldruckpegeldifferenz nach TLUG (2013); Rot: berechnete Schalldruckpegeldifferenz nach THORSSON et al. (2018); Grün: Schalldämmung nach LfU (2011); Blau, Strichlinie: normale Schalldämmung für breitbandige Geräusche nach GILG (2001); Braun, Strichlinie: hohe Schalldämmung für breitbandige Geräusche nach GILG (2001); Gelb, Strichlinie: Schalldämmung für tonale Geräusche nach GILG (2001); Lila, Strichlinie: $D_{t,E,W}$ für tonale Anregung, Eck-Messpunkte innen

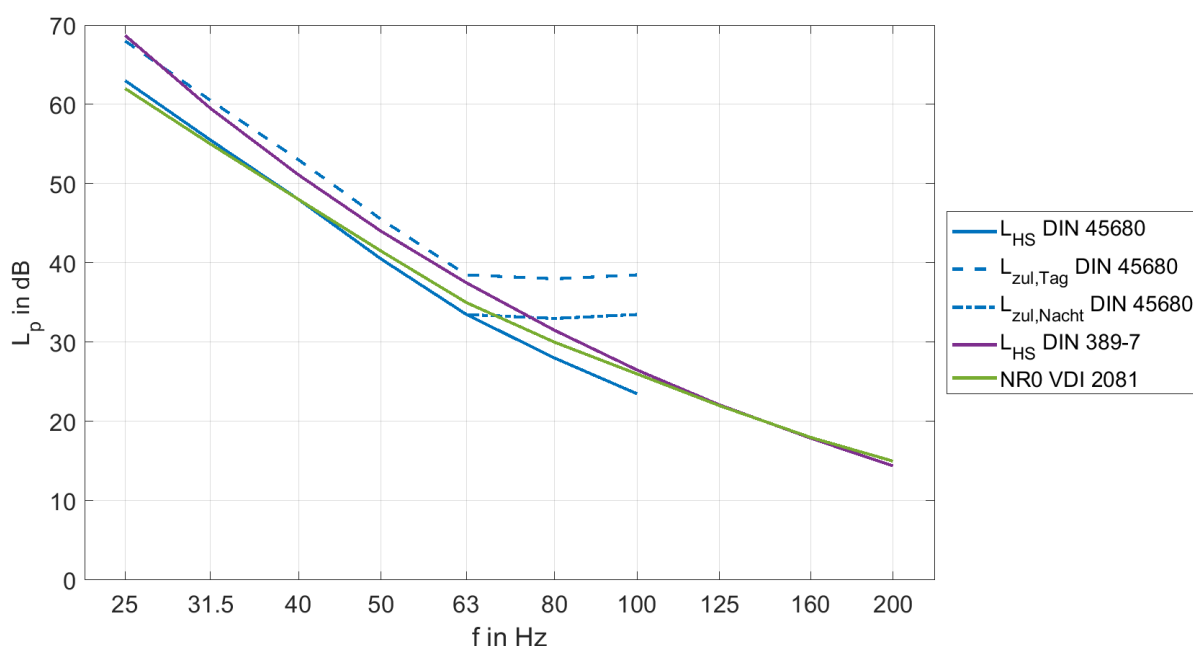
Abbildung 41: Vergleich der Terz-Spektren der ermittelten Schalldruckpegeldifferenzen mit Ergebnissen der Literatur

7 Prognoseverfahren

Die ermittelten unteren Vertrauensbereichsgrenzen der Schalldruckpegeldifferenzen für breitbandige und tonale Geräusche bezüglich der Messorte $MP_{a,T}$ bzw. $MP_{a,W}$ sollen nunmehr verwendet werden, um einen Immissionsschalldruckpegel außen am maßgeblichen Immissionsort nach TA Lärm ($MP_{a,T}$) bzw. an einem freien Punkt ($MP_{a,W}$) zu bestimmen, für welchen innerhalb des Raumes die Einhaltung der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 tags bzw. nachts mit ausreichender Sicherheit gewährleistet ist.

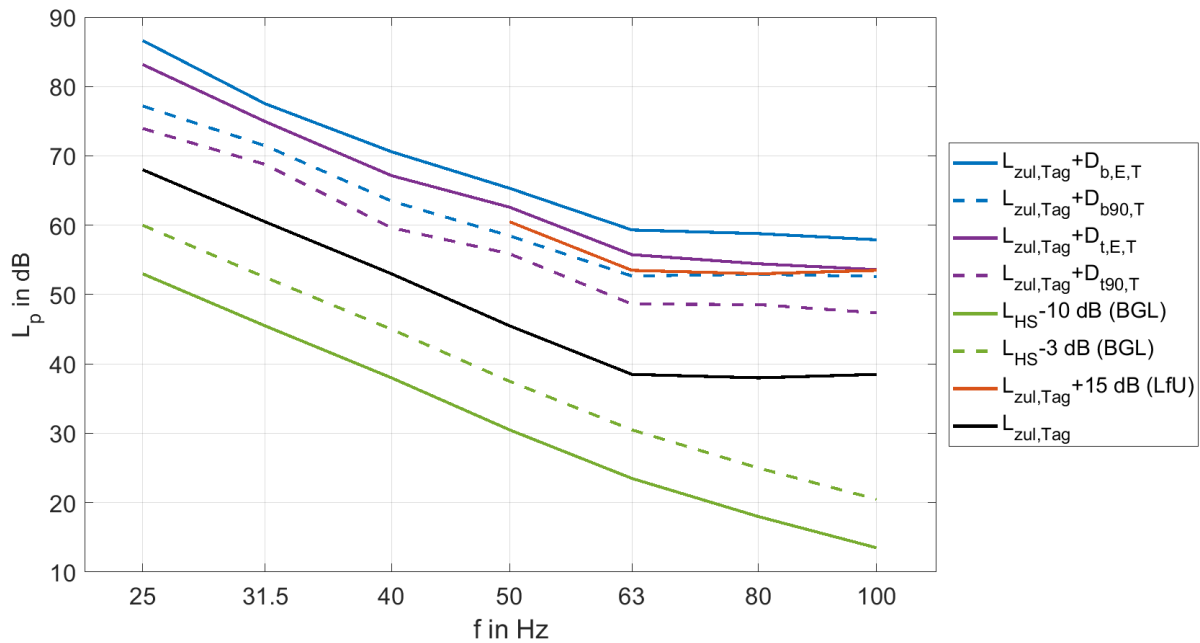
Abbildung 42 zeigt die sich aus den Anhaltswerten für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 ergebenden tags bzw. nachts maximal zulässigen Schalldruckpegel im Raum sowie Hörschwellenpegel nach verschiedenen Normen.

Durch Addition der entsprechenden unteren Vertrauensbereichsgrenze der Schalldruckpegeldifferenz für breitbandige bzw. tonale Geräusche zum im Raum maximal zulässigen Schalldruckpegel, lässt sich nunmehr der maximal zulässige Immissionsschalldruckpegel außen ermitteln. Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen diesen für den maßgeblichen Immissionsort nach TA Lärm ($MP_{a,T}$). Die Werte können für die Prognose anhand von Messergebnissen nach TA Lärm herangezogen werden. Die maximal zulässigen Immissionsschalldruckpegel für einen freien Punkt sind in Abbildung 45 und Abbildung 46 dargestellt. Diese können für den Vergleich mit Ergebnissen der Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 bzw. TA Lärm herangezogen werden.



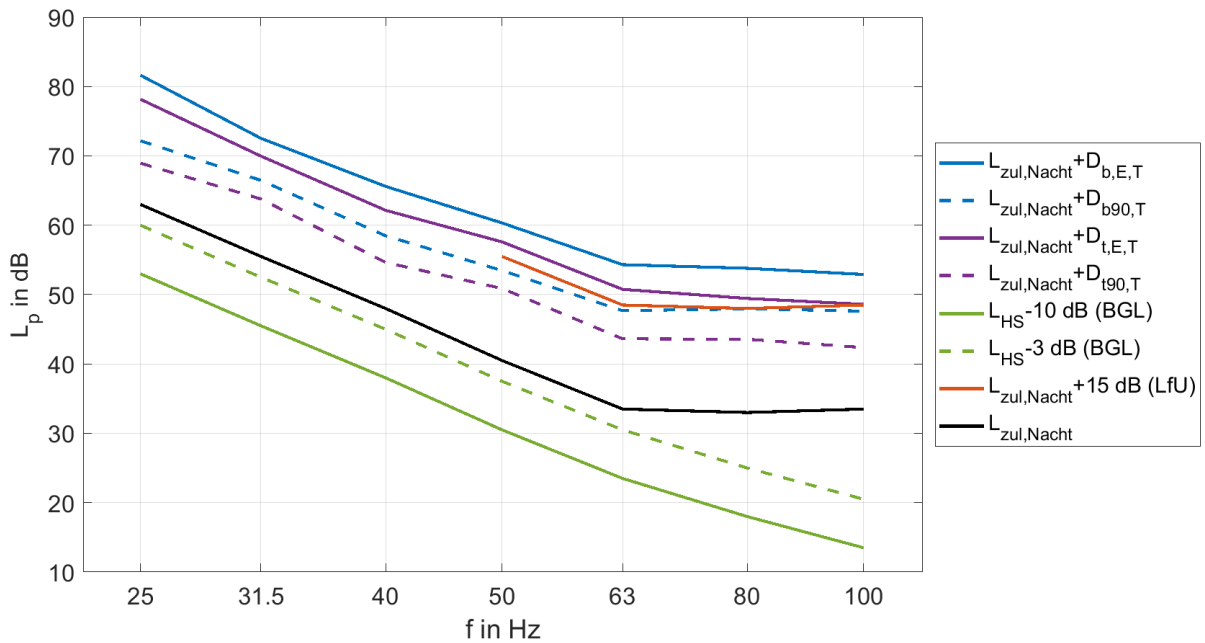
Legende: Blau, durchgezogene Linie: Hörschwellenpegel nach DIN 45680; Blau, Strichlinie: maximal zulässige Terz-Beurteilungspegel entsprechend Anhaltswerten nach Beiblatt 1 zu DIN 45680 tags; Blau, Punkt-Strichlinie: maximal zulässige Terz-Beurteilungspegel entsprechend Anhaltswerten nach Beiblatt 1 zu DIN 45680 nachts; Hörschwellenpegel nach DIN 389-7; Grün: Geräuschbewertungskurve NR0 nach VDI 2081

Abbildung 42: Maximal zulässige Terz-Beurteilungspegel im Raum entsprechend den Anhaltswerten für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 tags bzw. nachts sowie Hörschwellenpegel nach verschiedenen Normen



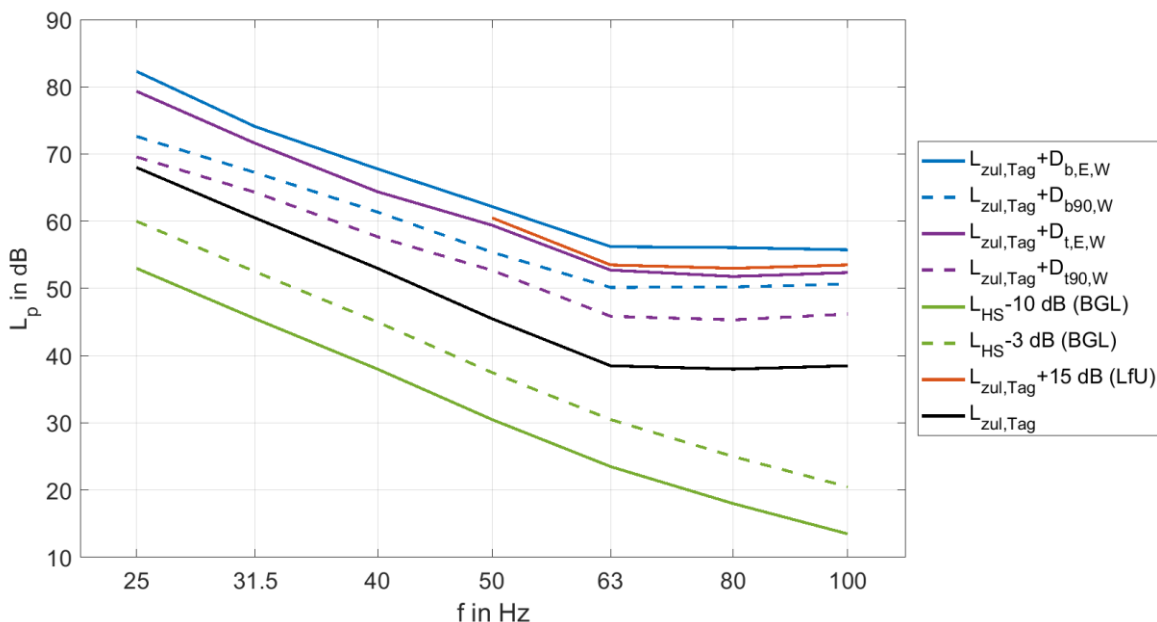
Legende: Grün: nach BGL (2012) auf Basis der Hörschwellenpegel nach DIN 45680 (vgl. Tabelle 3); Rot: nach LfU (2011) auf Basis der Anhaltswerte; Schwarz: innen maximal zulässige Terz-Beurteilungspegel nach den Anhaltswerten

Abbildung 43: Berechnete maximal zulässige Terz-Immissionsschalldruckpegel am maßgeblichen Immissionsort außen nach TA Lärm ($MP_{a,T}$) für breitbandige bzw. tonale Geräusche entsprechend den aufgrund der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 tags im Raum maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegeln; Vergleich mit Literatur



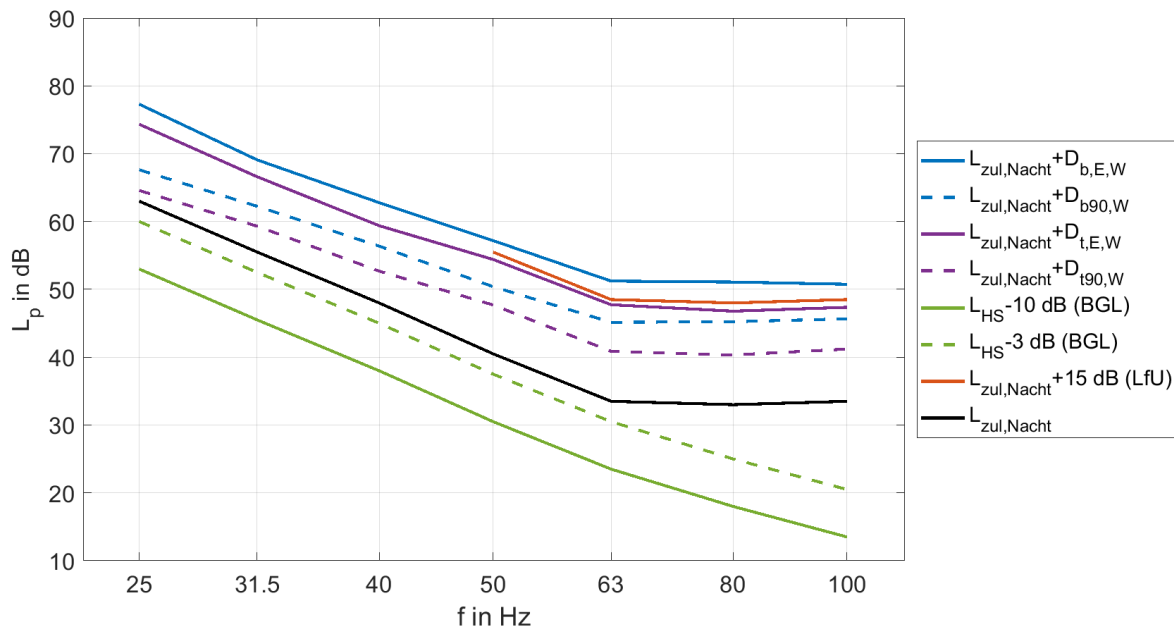
Legende: Grün: nach BGL (2012) auf Basis der Hörschwellenpegel nach DIN 45680 (vgl. Tabelle 3); Rot: nach LfU (2011) auf Basis der Anhaltswerte; Schwarz: innen maximal zulässige Terz-Beurteilungspegel nach den Anhaltswerten

Abbildung 44: Berechnete maximal zulässige Terz-Immissionsschalldruckpegel am maßgeblichen Immissionsort außen nach TA Lärm ($MP_{a,T}$) für breitbandige bzw. tonale Geräusche entsprechend den aufgrund der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 nachts im Raum maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegeln; Vergleich mit Literatur



Legende: Grün: nach BGL (2012) auf Basis der Hörschwellenpegel nach DIN 45680 (vgl. Tabelle 3); Rot: nach LfU (2011) auf Basis der Anhaltswerte; Schwarz: innen maximal zulässige Terz-Beurteilungspegel nach den Anhaltswerten

Abbildung 45: Berechnete maximal zulässige Terz-Immissionsschalldruckpegel an einem freien Punkt am Immissionsort außen für breitbandige bzw. tonale Geräusche entsprechend den aufgrund der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 tags im Raum maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegeln; Vergleich mit Literatur



Legende: Grün: nach BGL (2012) auf Basis der Hörschwellenpegel nach DIN 45680 (vgl. Tabelle 3); Rot: nach LfU (2011) auf Basis der Anhaltswerte; Schwarz: innen maximal zulässige Terz-Beurteilungspegel nach den Anhaltswerten

Abbildung 46: Berechnete maximal zulässige Terz-Immissionschalldruckpegel an einem freien Punkt am Immissionsort außen für breitbandige bzw. tonale Geräusche entsprechend den aufgrund der Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 nachts im Raum maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegeln; Vergleich mit Literatur

Die Diagramme enthalten zum Vergleich die Anforderungen des Biogasleitfadens aus Mecklenburg-Vorpommern (BGL 2012) für den maximal zulässigen Immissionschalldruckpegel außen. Es ist zu erkennen, dass diese Anforderungen im kritischsten Fall um ca. 19 dB bis 30 dB (bezüglich $MP_{a,T}$) bzw. um ca. 12 dB bis 27 dB (bezüglich $MP_{a,W}$) unterhalb des nachts maximal zulässigen Immissionschalldruckpegels liegen, der auf Basis der unteren Vertrauensbereichsgrenze der Schalldruckpegeldifferenz für tonale Anregung berechnet wurde.

Gegenüber den Werten nach LfU (2011) nimmt der auf Basis der unteren Vertrauensbereichsgrenze $D_{b90,T}$ bzw. $D_{b90,W}$ berechnete maximal zulässige Immissionschalldruckpegel außen um ca. 0 dB bis 5 dB ($D_{b90,T}$) bzw. um ca. 3 dB bis 10 dB ($D_{b90,W}$) kleinere Werte an. Der Pegelunterschied steigt dabei zu niedrigen Frequenzen an.

Die entsprechend den Anhaltswerten für tieffrequente Geräusche mit deutlich hervortretenden Einzeltönen gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 außen maximal zulässigen Immissionschalldruckpegel sind bis zu einer Frequenz von 100 Hz angegeben. Für Frequenzen oberhalb von 100 Hz kann alternativ die Geräusch-Bewertungskurve NR0 nach VDI 2081 herangezogen werden.

Eine tabellarische Darstellung der hier definierten Schalldruckpegeldifferenzen bzw. der daraus resultierenden maximalen Immissionschalldruckpegel außen kann Anlage Anhang 2 bzw. Anhang 3 des vorliegenden Berichts entnommen werden.

8 Zusammenfassung

Ziel der Untersuchung war die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der höchstzulässigen tief-frequenten Schallemission einer Anlage. Dieses soll die Einhaltung der Anhaltswerte gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 an umliegenden Immissionsorten mit angemessener Sicherheit gewährleisten.

Im Rahmen des Projektes erfolgten jeweils gleichzeitige Messungen des Immissionsschalldruckpegels außerhalb und innerhalb von 35 schutzbedürftigen, für Sachsen repräsentativen Räumen bei Beschallung von außen und geöffnetem bzw. geschlossenem Fenster. Der Messaufbau wurde auf Basis der Ergebnisse einer detaillierten Literaturrecherche sowie messtechnischer Voruntersuchungen zur Wahl der Messpositionen im Raum sowie der Quellposition gewählt.

Anhand der Messergebnisse erfolgte die Definition verschiedener Schalldruckpegeldifferenzen zwischen außen und innen. Die Wahl der heranzuziehenden Schalldruckpegeldifferenz hängt zum einen vom Anwendungsfall und zum anderen von der Geräuschzusammensetzung der zu bewertenden Anlage ab. Um Innen-Schalldruckpegel mit angemessener Sicherheit prognostizieren zu können, wurden untere Vertrauensbereichsgrenzen der Schalldruckpegeldifferenzen für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 90 % eingeführt, welche jeweils der Schalldruckpegeldifferenz entsprechen, die von 90 % aller untersuchten Messorte mindestens erreicht wird.

Als Ergebnis des vorliegenden Projekts stehen damit folgende Schalldruckpegeldifferenzen und zugehörige untere Vertrauensbereichsgrenzen zur Verfügung:

- $D_{b,E,T}$ und $D_{b90,T}$... zur Berechnung des Schalldruckpegels im Raum auf Basis von Messergebnissen nach TA Lärm am maßgeblichen Immissionsort in 0,5 m Abstand zur Mitte des geöffneten Fensters bei Anregung durch breitbandige tieffrequente Geräusche,
- $D_{t,E,T}$ und $D_{t90,T}$... zur Berechnung des Schalldruckpegels im Raum auf Basis von Messergebnissen nach TA Lärm am maßgeblichen Immissionsort in 0,5 m Abstand zur Mitte des geöffneten Fensters bei Anregung durch tonale tieffrequente Geräusche,
- $D_{b,E,W}$ und $D_{b90,W}$... zur Berechnung des Schalldruckpegels im Raum auf Basis von Berechnungsergebnissen wie z. B. nach DIN ISO 9613-2 bei Anregung durch breitbandige tieffrequente Geräusche,
- $D_{t,E,W}$ und $D_{t90,W}$... zur Berechnung des Schalldruckpegels im Raum auf Basis von Berechnungsergebnissen wie z. B. nach DIN ISO 9613-2 bei Anregung durch tonale tieffrequente Geräusche.

Der vorliegende Bericht liefert des Weiteren Terz-Spektren des maximal zulässigen Schalldruckpegels außen, die auf Basis der Anhaltswerte für den maximal zulässigen Schalldruckpegel im Raum gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680 für die Beurteilungszeiträume tags und nachts berechnet wurden und unmittelbar zur Bewertung von Ergebnissen von Schallimmissionsmessungen bzw. Schallimmissionsprognosen herangezogen werden können.

Abschließend sei angemerkt, dass eine Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 im hier interessierenden tieffrequenten Bereich den tatsächlichen Immissions Schalldruckpegel unterschätzen kann, da es in diesem Frequenzbereich zu einer Schallreflexion von Kugelwellen kommt, die anschließend mit dem Direktschall der Quelle interferieren. Diese Effekte der Schallausbreitung finden ausschließlich in detaillierteren Prognosemodellen, z. B. NORD 2000 (PLOVSING 2001) Berücksichtigung. Im nächsten Schritt erscheint es daher zielführend, parallele Messungen nach TA Lärm und DIN 45680 sowie Prognosen nach DIN ISO 9613-2 und NORD 2000 (Plovsing 2001) an realen Anlagen durchzuführen, um die definierten Schalldruckpegeldifferenzen zu erproben sowie den Einfluss der Kugelwellenausbreitung über impedanzbelegten Böden auf den prognostizierten Schallimmissionspegel zu untersuchen.

Anmerkung des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG):

Das LfULG hat aus den hier vorliegenden Untersuchungsergebnissen ein Verfahren für die Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Geräuschen abgeleitet und in einem Bericht dargestellt. Der Bericht kann wie auch der hier vorliegende Untersuchungsbericht aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen heruntergeladen werden. Der Bericht „Verfahren für die Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Geräuschen“ ist abrufbar unter: [Link zum Bericht „Verfahren der Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Geräuschen“](https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/37427) (<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/37427>).

Literaturverzeichnis

- ALD (2016). Arbeitsring Lärm der DEGA (ALD) (2016): Energiewende und Lärmschutz. ALD-Schriftenreihe, Band 2. https://www.ald-laerm.de/fileadmin/ald-laerm.de/Publikationen/Druckschriften/ALD-Broschuere_Energiewende-Laermschutz_Web.pdf (Zuletzt abgerufen am 18.05.2020).
- BGL (2012). Hinweise zur Genehmigung und Überwachung von Biogasanlagen in Mecklenburg-Vorpommern (Biogasleitfaden). Erlass des Ministeriums für Wirtschaft, Bau und Tourismus.
- Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. (2019). BWP Marktzahlen 2018: Nachhaltiges Wachstum mit Luft nach oben, deutliches Signal für die Politik. <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/bwp-marktzahlen-2018-nachhaltiges-wachstum-mit-luft-nach-oben-deutliches-signal-fuer-die-politik/#content> (Zuletzt abgerufen am 10.12.2019).
- DIN 4109-1:2018-01, Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen <https://doi.org/10.31030/2764537>
- DIN 45680:1997-03, Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft <https://doi.org/10.31030/7211690>
- DIN 45680 Beiblatt 1:1997-03, Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft – Hinweise zur Beurteilung bei gewerblichen Anlagen <https://dx.doi.org/10.31030/7211681>
- DIN EN ISO 3744:2011-02, Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO 3744:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3744:2010 <https://doi.org/10.31030/1642409>
- DIN EN ISO 16032:2004-12: Akustik - Messung des Schalldruckpegels von haustechnischen Anlagen in Gebäuden - Standardverfahren (ISO 16032:2004); Deutsche Fassung EN ISO 16032:2004 <https://doi.org/10.31030/9503298>
- DIN EN ISO 16283-3:2016-09, Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 3: Fassadenschalldämmung (ISO 16283-3:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16283-3:2016 <https://doi.org/10.31030/2347540>
- DIN ISO 226:2003, Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003) <https://doi.org/10.31030/9671460>
- DIN ISO 9613-2:1999-10, Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996) <https://doi.org/10.31030/8139606>
- FASOLD, W. & VERES, E. (2003). Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen (2. Aufl.). Huss-Medien GmbH. Berlin.
- ECKERT (2020). Handlungsanleitung zur Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Schallemissionen. Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Medien, Bachelorarbeit.
- GILG, J. (2001). Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TA Lärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren – Mustergutachten und Handlungsanleitung. Studie im Auftrag des Staatlichen Umweltamtes Kiel. Müller-BBM GmbH. Planegg.
- GINN, K. B. (1978). Architectural Acoustics (2. Aufl.). Brüel & Kjaer.
- GÖHLER, W. & RALLE, B. (1987). Höhere Mathematik: Formeln und Hinweise (10., überarbeitete Aufl.). VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig.
- GWZ (2011). Sonderbericht des Zensus 2011. Gebäude- und Wohnungszählung im Freistaat Sachsen am 9. Mai 2011: Teil 1 – Gebäude und Wohnungen. Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (2011).

- HOFFMEYER, D. & JAKOBSEN, J. (2010). Sound Insulation of Dwellings at Low Frequencies. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 29(1), 15-23.
- HÜBELT, J. & SCHULZE, C. (2014). Lärminderung bei Mikro-BHKW (SILENA-Studie). Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 8/2014
- KRAHÉ, D., et al. (2014). Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall. Entwicklung von Untersuchungsdesigns für die Ermittlung der Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen durch unterschiedliche Quellen. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_40_2014_machbarkeitsstudie_zu_wirkungen_von_infraschall.pdf (Zuletzt abgerufen am 21.12.2019)
- LfU (2011). Bayerisches Landesamt für Umwelt (2011): Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen – Ein Leitfaden. https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_lae_00053.htm
- LONG, M. (2014): *Architectural Acoustics* (2. Aufl.). Elsevier/Academic Press.
- MALSCH, A. K. F. & HORNBERG, C. (2007). Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland?: Mitteilung der Kommission „Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin“. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*, 50(12), 1582-1589. Springer Medizin Verlag. Berlin.
<https://doi.org/10.1007/s00103-007-0407-3>
- MALUSKI, S. & GIBBS, B. (2000). Application of a Finite-Element Model to Low-Frequency Sound Insulation in Dwellings. *Journal of the Acoustic Society of America* 108 (4), 1741-1751.
<https://doi.org/10.1121/1.1310355>
- MMPD (2020). <http://www.machmaplazda.com/plattenbauweise.html> (Zuletzt abgerufen am 29.01.2020)
- MÖHLER, U. & EULITZ, C. (2017). Tieffrequente Geräusche im Wohnumfeld: Ein Leitfaden für die Praxis (Für Mensch & Umwelt). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/170313_uba_fb_tieffrequente_gerauesche_bf.pdf (Zuletzt abgerufen am 23.01.2020)
- OSIPOV, A., MEES, P. & VERMEIR, G. (1997). Low-Frequency Airborne Sound Transmission through Single Partitions in Buildings. *Applied Acoustics*, 52(3-4), 273-288. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(97\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(97)00031-5)
- PEDERSEN, S., MØLLER, H. & WAYE, K. P. (2007). Indoor Measurements of Noise at Low Frequencies – Problems and Solutions. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 26(4), 249-270. <https://doi.org/10.1260/026309207783571389>
- PLOVSING, B. & KRAGH, J. (2001). Nord2000 - Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction. DELTA Acoustics & Vibration Report AV 1849/00.
- PRATO, A. & SCHIAVI, A. (2015). Sound Insulation of Building Elements at Low Frequency: a Modal Approach. *Energy Procedia*, 78, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.127>
- SCHIRMER, W. (Hrsg.). (2006). *Technischer Lärmschutz: Grundlagen und praktische Maßnahmen an Maschinen und in Arbeitsstätten zum Schutz des Menschen vor Lärm und Schwingungen*. Springer-Verlag. Berlin.
- SCHMIDT, M. (2016). Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680. Müller-BBM GmbH. Planegg.
<https://www.din.de/resource/blob/186474/d594186130efc9d7ae9c1ba9e2968298/abschlussbericht-mueller-bbm-data.pdf> (Zuletzt abgerufen am 20.12.2019).
- SCHULZE, C., et al. (2014). Ermittlung der Geräuschemissionen und Möglichkeiten zur Lärminderung bei Luft-Wasser-Wärmepumpen. Umweltbundesamt. Texte 71/2014.

- SIMMONS, C. (1997). Measurement of Sound Pressure Levels at Low Frequencies in Rooms: Comparison of Available Methods and Standards with Respect to Microphone Positions – Proposal for New Procedures. Nordic Innovation Centre. Oslo, Norwegen.
http://www.nordtest.info/images/documents/nt-technical-reports/NT%20TR%20385_Measurement%20of%20Sound%20Pressure%20Levels%20at%20Low%20Frequencies%20in%20Rooms_Nordtest%20Technical%20Report.pdf
- TA Lärm. Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). Vom 28. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503), zuletzt geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5).
- THORSSON, P., et al. (2018). Low-Frequency Outdoor-Indoor Noise Level Difference for Wind Turbine Assessment. The Journal of the Acoustical Society of America, 143(3), 206-211.
<https://doi.org/10.1121/1.5027018>, (Zuletzt abgerufen am 15.08.2019).
- TLUG (2013). Ein Ansatz für die Schallimmissionsprognose tieffrequenter Geräusche. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. https://www.thueringen.de/imperia/md/content/tlug/abt1/v-referate/2013/17_2013/ansatz_prognose_tieffrequenter_ger.pdf, (Zuletzt abgerufen am 23.08.2019).
- VSWG (2018). Jahresstatistik 2018. Verband Sächsischer Wohnungsgenossenschaften e. V.
- ZOBEL, P. & EULITZ, C. (2016). Betrachtung tieffrequenter Geräusche in ausgewählten Wohnbaugebieten mit geometrischen Ausbreitungsmodellen. DAGA 2016 Aachen.

Anhang

Inhaltsverzeichnis Anhang

Anhang 1	Raumparameter	86
Anhang 2	Zahlenwerte der ermittelten Schalldruckpegeldifferenzen	88
Anhang 3	Zahlenwerte der maximal zulässigen Terz-Schalldruckpegel außen.....	89

Anhang 1 Raumparameter

Tabelle A 1: Übersicht der geometrischen und akustischen Parameter der untersuchten Räume, Teil 1

Nr.	Raumart	Etage	Grundfläche in m ²	Volumen in m ³	Höhe in m	1. Eigenfrequenz $f_{0,1}$ in Hz	Wanddicke in m	Relative Fensterfläche in %	Absolute Fensterfläche in m ²
1	Werkstatt	EG	22,3	75,7	3,4	21,2	0,58	29	4,4
2	Büro	EG	25,8	87,9	3,4	20,3	0,58	26	4,4
3	Büro	EG	26,4	87,0	3,3	21,3	0,58	28	4,3
4	Büro	EG	27,2	89,7	3,3	21,1	0,58	27	4,3
5	Büro	EG	15,8	52,4	3,3	24,1	0,58	23	4,4
6	Büro	EG	22,6	74,7	3,3	21,5	0,58	32	6,7
7	Essen	1.OG	29,6	67,5	2,3	17,6	0,55	27	4,8
8	Wohnen	1.OG	20,4	45,2	2,2	24,2	0,55	10	1,1
9	Wohnen	1.OG	24,5	59,9	2,5	22,2	0,33	29	4,5
10	Wohnen	EG	15,5	34,6	2,2	28,7	0,33	29	2,6
11	Büro	EG (HP)	14,3	38,1	2,7	27,2	0,40	45	4,1
12	Schlafen	EG	14,4	37,5	2,6	28,1	0,70	19	2,2
13	Wohnen	EG	22,7	60,6	2,7	23,5	0,70	29	4,1
14	Schlafen	EG	18,7	45,8	2,5	24,9	0,46	29	3,3
15	Wohnen	EG	20,9	51,2	2,5	22,1	0,46	20	1,2
16	Büro	1.OG	29,2	106,8	3,7	20,0	0,58	31	5,6
17	Küche	1.OG	16,1	47,7	3,0	26,7	0,55	72	9,1
18	Wohnen	EG (HP)	25,8	75,9	3,0	23,1	0,55	21	2,5
19	Kind	1.OG	14,3	34,4	2,4	29,0	0,33	22	1,8
20	Schlafen	1.OG	14,6	35,0	2,4	28,8	0,33	22	1,8

Fortsetzung Tabelle A1: Übersicht der geometrischen und akustischen Parameter der untersuchten Räume, Teil 1

Nr.	Raumart	Etage	Grundfläche in m ²	Volumen in m ³	Höhe in m	1. Eigenfrequenz $f_{0,1}$ in Hz	Wanddicke in m	Relative Fensterfläche in %	Absolute Fensterfläche in m ²
21	Kind	1.OG	14,6	35,1	2,4	28,8	0,33	22	1,8
22	Wohnen	EG	16,4	43,2	2,6	27,0	0,41	46	4,3
23	Wohnen/ Küche	EG	16,6	42,8	2,6	26,7	0,41	47	4,3
24	Wohnen	1.OG	15,7	49,4	3,2	25,9	0,57	39	4,1
25	Wohnen/ Küche	1.OG	10,3	32,7	3,2	27,9	0,57	34	2,4
26	Büro	EG	36,9	181,0	4,9	15,6	0,60	11	4,7
27	Wohnen/ Küche	EG	61,1	160,0	2,6	11,8	0,33	83	27,3
28	Wohn/ Küche	EG	59,2	158,1	2,7	14,3	0,55	90	18,5
29	Wohnen	EG	45,3	213,8	5,8	18,0	0,60	38	11,8
30	Büro	EG	45,1	133,1	2,9	17,2	0,60	53	11,1
31	Wohnen/ Küche	EG	53,0	130,8	2,5	14,6	0,33	72	15,4
32	Wohnen	EG	29,0	73,1	2,5	21,4	0,45	35	5,0
33	Büro	EG	17,7	59,6	3,4	24,9	0,55	62	9,8
34	Büro	EG	17,2	57,7	3,4	25,3	0,55	52	8,0
35	Büro	EG	61,2	180,6	2,9	15,0	0,55	29	6,6

Anhang 2 Zahlenwerte der ermittelten Schalldruckpegel- differenzen

Tabelle A 2: Terz-Spektren der Schalldruckpegeldifferenzen zwischen außen und innen, Mittelwerte und untere Vertrauensbereichsgrenzen für 90-%ige Überschreitungswahrscheinlichkeit, bei breitbandiger und tonaler Anregung

Terzmittenfrequenz in Hz	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
$D_{b,E,T}$ in dB	18,6	17,0	17,6	19,8	20,8	20,8	19,4	18,4	15,3	14,9
$D_{b90,T}$ in dB	9,2	11,0	10,5	13,0	14,2	14,9	14,1	12,9	8,5	8,8
$D_{t,E,T}$ in dB	15,2	14,5	14,2	17,1	17,3	16,5	15,1	12,3	6,9	4,2
$D_{t90,T}$ in dB	6,0	8,3	6,6	10,4	10,1	10,6	8,9	5,7	-3,4	-3,6
$D_{b,E,W}$ in dB	14,3	13,6	14,8	16,7	17,7	18,1	17,3	17,9	16,4	16,0
$D_{b90,W}$ in dB	4,6	6,7	8,4	9,9	11,7	12,2	12,2	11,7	9,3	8,6
$D_{t,E,W}$ in dB	11,3	11,1	11,4	13,9	14,2	13,8	13,9	12,4	10,5	6,9
$D_{t90,W}$ in dB	1,6	3,8	4,7	7,2	7,4	7,3	7,7	4,0	2,2	-4,0

Bedeutung der Indizes:

b breitbandige Anregung

t tonale Anregung

E arithmetische Mittelwerte über alle Räume, bezogen auf Eck-Messpunkte innen

90 untere Vertrauensbereichsgrenze für 90-%ige Überschreitungswahrscheinlichkeit, bezogen auf Eck-Messpunkte innen

T bezogen auf den TA-Lärm-Messpunkt (0,5 m vor geöffnetem Fenster)

W bezogen auf einen freien Punkt außen (Messung auf der Wand abzüglich 6 dB)

Anhang 3 Zahlenwerte der maximal zulässigen Terz-Schalldruckpegel außen

Tabelle A 3: Terz-Schalldruckpegel außen, für welche bei Voraussetzung der Schalldruckpegeldifferenzen nach Tabelle A 3 die Anhaltswerte gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680:1997, Tabelle 1 für den Tag durch die Terz-Beurteilungspegel (DIN 45680:1997) innen eingehalten werden

Terzmittenfrequenz in Hz	25	31,5	40	50	63	80	100
$L_{zul,Tag} + D_{b,E,T}$ in dB	86,6	77,5	70,6	65,3	59,3	58,8	57,9
$L_{zul,Tag} + D_{b90,T}$ in dB	77,2	71,5	63,5	58,5	52,7	53,0	52,6
$L_{zul,Tag} + D_{t,E,T}$ in dB	83,2	75,0	67,2	62,6	55,8	54,5	53,6
$L_{zul,Tag} + D_{t90,T}$ in dB	74,0	68,8	59,6	55,9	48,6	48,6	47,4
$L_{zul,Tag} + D_{b,E,W}$ in dB	82,3	74,1	67,8	62,2	56,2	56,1	55,8
$L_{zul,Tag} + D_{b90,W}$ in dB	72,6	67,3	61,4	55,4	50,2	50,2	50,7
$L_{zul,Tag} + D_{t,E,W}$ in dB	79,3	71,6	64,4	59,4	52,7	51,8	52,4
$L_{zul,Tag} + D_{t90,W}$ in dB	69,6	64,3	57,7	52,7	45,9	45,3	46,2

Tabelle A 4: Terz-Schalldruckpegel außen, für welche bei Voraussetzung der Schalldruckpegeldifferenzen nach Tabelle A 3 die Anhaltswerte gemäß Beiblatt 1 zu DIN 45680:1997, Tabelle 1 für die Nacht durch die Terz-Beurteilungspegel (DIN 45680:1997) innen eingehalten werden

Terzmittenfrequenz in Hz	25	31,5	40	50	63	80	100
$L_{zul,Nacht} + D_{b,E,T}$ in dB	81,6	72,5	65,6	60,3	54,3	53,8	52,9
$L_{zul,Nacht} + D_{b90,T}$ in dB	72,2	66,5	58,5	53,5	47,7	48,0	47,6
$L_{zul,Nacht} + D_{t,E,T}$ in dB	78,2	70,0	62,2	57,6	50,8	50,5	48,6
$L_{zul,Nacht} + D_{t90,T}$ in dB	69,0	63,8	54,6	50,9	43,6	43,6	42,4
$L_{zul,Nacht} + D_{b,E,W}$ in dB	77,3	69,1	62,8	57,2	51,2	51,1	50,8
$L_{zul,Nacht} + D_{b90,W}$ in dB	67,6	62,3	56,4	50,4	45,2	45,2	45,7
$L_{zul,Nacht} + D_{t,E,W}$ in dB	74,3	66,6	59,4	54,4	47,7	46,8	47,4
$L_{zul,Nacht} + D_{t90,W}$ in dB	64,6	59,3	52,7	47,7	40,9	40,3	41,2

Bedeutung der Indizes:

b breitbandige Anregung

t tonale Anregung

E arithmetische Mittelwerte über alle Räume, bezogen auf Eck-Messpunkte innen

90 untere Vertrauensbereichsgrenze für 90-%ige Überschreitungswahrscheinlichkeit, bezogen auf Eck-Messpunkte innen

T bezogen auf den TA-Lärm-Messpunkt (0,5 m vor geöffnetem Fenster)

W bezogen auf einen freien Punkt außen (Messung auf der Wand abzüglich 6 dB)

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
(LfULG)

Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: +49 351 2612-0

Telefax: +49 351 2612-1099

E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de

www.lfulg.sachsen.de

Autoren:

Christian Schulze, Lucas Eckert, Jörn Hübelt

Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH

Blumenstraße 80, 01307 Dresden

Telefon: +49 351 811309-40

Telefax: +49 351 811309-50

E-Mail: info@akustikforschung.de

Redaktion:

Christoph Fritzsche

Abteilung 5 / Referat 52 Immissionsschutz, Lärm

LfULG, Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: +49 351 2612-5209

Telefax: +49 351 2612-5099

E-Mail: christoph.fritzsche@smul.sachsen.de

Foto:

Lucas Eckert

Redaktionsschluss:

31.01.2021

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de