

Tieffrequente Schallimmissionen - Einordnung im Kontext des Freizeitlärms

Lukas Roskosch ¹

¹ Technische Hochschule Mittelhessen, Fachbereich Management und Kommunikation

Zusammenfassung

Die Zunahme von tieffrequenten Schallimmissionen hat in unserer technisierten Gesellschaft viele Ursachen. Die Verdichtung von Ballungsräumen und der Verkehrsinfrastruktur, die Dezentralisierung von gebäudetechnischen Anlagen und die Zunahme von Großveranstaltungen tragen zu dieser Entwicklung bei. Das übergeordnete Ziel des Immissionsschutzes besteht darin, diese Geräusche zu beurteilen und unter Einhaltung von Richtwerten einen Schutz der Bevölkerung zu gewährleisten. Besonders im tieffrequenten Bereich ist die Messung und Beurteilung aufgrund von Wirkungsmechanismen erschwert. Durch eine strukturierte Recherche mit dem Fokus auf die Themen Wahrnehmung, Belästigung und Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen wurde in dieser Studie ein interdisziplinärer Überblick gegeben. Ergebnisse von Pionierstudien wurden neuen Erkenntnissen aus der Lärmforschung gegenübergestellt. Weiterhin wurden tieffrequente Immissionen im Kontext des Freizeitlärms eingeordnet und untersucht. Die Ergebnisse zeigen Forschungslücken in nahezu allen Teilbereichen. Es wurden Wahrnehmungsbesonderheiten identifiziert, die bisher kaum Berücksichtigung in der Bewertung tieffrequenter Geräusche finden. Der Vergleich internationaler Beurteilungsverfahren zeigt große Unterschiede und Kritik zu den einzelnen Messparametern. Im Rahmen eines Folgeprojektes sollen die Forschungsdefizite besonders im Bereich des Freizeitlärms bearbeitet und ein neues Mess- und Beurteilungsverfahren entwickelt werden.

1. Einleitung

Der Ausbau von Verkehrs- und Infrastruktur bei zeitgleicher Zunahme der Siedlungsdichten und Flugrouten, sowie eine Verdichtung von gebäudetechnischen und energiewirtschaftlichen Anlagen tragen dazu bei, dass tieffrequente Immissionen gerade in Ballungsgebieten zunehmen und in das umliegende Wohnumfeld propagieren (Eulitz et al., 2020). Demnach ist tieffrequenter Schall allgemein als ubiquitärer Bestandteil des modernen Lebens anzunehmen (Leventhall et al., 2003). Aufgrund besonderer Wirkungsmechanismen und physikalischer Eigenschaften verhält sich tieffrequenter Schall anders, als Schall im üblichen Hörbereich und kann bei Betroffenen als besonders belästigender Lärm wahrgenommen werden. Insbesondere in der eigenen Wohnung haben Anwohner das Bedürfnis nach Ruhe. Die Beschaffenheit von Gebäuden in betroffenen Gegenden

weisen jedoch typischerweise eine geringe Schalldämmung im tieffrequenten Bereich auf. Damit verschiebt sich das Belastungsempfinden hin zu tieffrequenten Geräuschen, wobei sich häufig die Ursache der Immission nur schwer aufklären lässt. Dadurch entstehen Konfliktsituationen für alle Beteiligten, die häufig zivilrechtlich entschieden werden müssen (Eulitz et al., 2020). Situationsgerechte Messungen und Beurteilungen tieffrequenter Immissionen sind aufgrund der Wahrnehmungsbesonderheiten tieffrequenten Schalls und der Vielfalt an Einflussfaktoren auf die Messung erschwert.

In einer Machbarkeitsstudie des Umweltbundesamtes (Krahé et al., 2014) konnten die Autoren 77,5% aller Lärmbeschwerden auf tieffrequente Geräusche zurückführen. Mit steigender Belastung durch tieffrequenten Lärm nehmen auch die gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen zu. Neben der Belästigungswirkung haben Forscher festgestellt, dass physiologisch und psychologisch ernstzunehmende Krankheiten durch tieffrequente Lärmbelastung hervorgerufen werden können (Araújo Alves et al., 2020).

Die vorliegende Studie wurde durchgeführt, um einen interdisziplinären Überblick über das Thema der tieffrequenten Immissionen zu geben. Im Hinblick auf ein anschließendes Forschungsprojekt sollten dabei die Besonderheiten im Freizeitlärm und die Mess- und

Korrespondenz zum Artikel

Lukas Roskosch

E-Mail: lukas.roskosch@muk.thm.de

Bitte zitieren als

Roskosch, L. (2023). Tieffrequente Schallimmissionen - Einordnung im Kontext des Freizeitlärms. *LiveCom-LAB Conference Proceedings*, 1, 36-45. <https://doi.org/10.25716/thm-229>

Beurteilungsverfahren berücksichtigt werden. Die thematische Relevanz des Themas spiegelt sich in der Zunahme von Lärmkonflikten und der mangelnden Kenntnis über Wirkungsmechanismen tieffrequenter Schalle wider.

In der Studie wurde eine strukturierte Literaturrecherche zu dem Thema tieffrequente Schallimmissionen durchgeführt. Die wichtigsten Pionierstudien der vergangenen Jahre, aber auch neue Erkenntnisse, insbesondere zu den Themen Wahrnehmung, Belästigung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche, wurden präsentiert. Die Zusammenstellung der Erkenntnisse gibt einen interdisziplinären Gesamtüberblick über das Thema und soll den angeführten Exkurs zu tieffrequenten Schallimmissionen im Rahmen des Freizeitlärms aufgreifen. Besondere Beachtung gilt in diesem Zusammenhang dem in Deutschland gültigen Beurteilungsverfahren für tieffrequente Geräusche, welches seit der Veröffentlichung 1997 im wissenschaftlichen Diskurs steht und im Kontext des Freizeitlärms anzuwenden ist.

2. Einordnung im Kontext des Freizeitlärms

Open-Air-Festivals und die Nutzung von Beschallungsanlagen auf Freiluftveranstaltungen sind Bestandteil der Gesellschaft und des kulturellen Lebens geworden. Die dabei entstehenden Geräuschemissionen haben heutzutage meist hohe Energieanteile im tieffrequenten Bereich, da moderne Beschallungsanlagen nach Stand der Technik in der Lage sind, diese Frequenzen entsprechend wiederzugeben. Zudem handelt es sich hierbei um Emissionen, bei denen von einem Adressaten (Veranstaltungsbesucher) eine bestimmte spektrale Zusammensetzung mit Signalanteilen im tieffrequenten Bereich unterhalb von 200 Hz erwünscht ist (Hill, 2020), die von anderen Adressaten (Anwohner) wiederum als lästig wahrgenommen werden. Die Herausforderung besteht darin, für das Publikum eine gute Klangqualität zu erzeugen, ohne dabei zu viel Schallenergie in das Umfeld zu verteilen. Folglich sind schalldämmende Maßnahmen direkt an der Quelle nicht möglich.

Eine Studie konnte zeigen, dass 10% der Beschwerden zu tieffrequentem Lärm auf den Betrieb von Beschallungsanlagen auf Veranstaltungen zurückzuführen sind (Krahé et al., 2014). In vielen Richtlinien unter anderem von der World Health Organisation (WHO) wird Musik unter Umgebungslärm zusammengefasst. Die europäische Initiative Live-DMA hat ein Whitepaper veröffentlicht, in dem statuiert wird, dass Live-Musik nicht als Lärm klassifiziert werden sollte. Darin wird der Musik ein höherer kultureller Stellenwert zugeschrieben. Mit der Möglichkeit des kostenlosen Streamings und dem Download von Musik stagnieren die Verkaufszahlen physischer Tonträger, wodurch das Touring vieler Künstler heutzutage deren Haupteinnahmequelle geworden ist. Diese Entwicklung führt global zu einer höheren Nachfrage nach Konzerten und Festivals und damit steigt das Potenzial einer Lärmbelastung durch Veranstaltungen.

Ederer et al. (2019) untersuchten Emissions- und Immissionspegel in Abhängigkeit der Richtwirkung von Beschallungsanlagen bei Großveranstaltungen. Ausgewertet wurden Messdaten von 86 Konzerten, die an 33 verschiedenen Freiluftbühnen durchgeführt wurden. Im Gegensatz zu Messwerten aus 2006 hat sich der Versorgungspegel für Groß- und Kleinbühnen bis 2018 im Mittel um 4 dB(A) erhöht. Im 40 Hz Terzband beträgt die Erhöhung des Schalldruckpegels 20 dB. Eine Methode zur Prognoseberechnung für Schallimmissionen beim Betrieb von Beschallungsanlagen wurde vorgestellt. Für die Reduzierung der Immissionspegel werden Maßnahmen zur Erzeugung einer Richtwirkung sowie dezentrale Beschallungssysteme genannt. Andere Messungen (Roy & Nicht, 2019) zeigen die Verschiebung des spektralen Maximums von 80 Hz herab zu 50 Hz.

Die Situation stellt besondere Anforderungen an den Immissionsschutz im Freizeitlärm. Es entstehen Bereiche mit saisonbedingter Dauerbelastung z.B. in der Nähe von Märkten, Kneipenmeilen, Veranstaltungsorten und Freilichtbühnen. Darüber hinaus werden von einigen Herstellern mittlerweile spezielle Lautsprecher entwickelt, die bis in den Infraschallbereich hohe Schalldruckpegel erzeugen können. Ein Beispiel dafür ist der VLFC Speaker der Firma Meyer Sound, bei dem der Frequenzbereich vom Hersteller von 13 Hz bis 30 Hz angegeben wird. Der überwiegende Teil an Veranstaltungen kann in Deutschland nur durch erhöhte Immissionsrichtwerte mit einer Ausnahmeregelung der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm), als sogenanntes seltenes Ereignis durchgeführt werden, wenn die Veranstaltung besonders kulturelle oder gesellschaftliche Bedeutung hat. Selbst in diesen Szenarien werden die statischen Anhaltswerte für den tieffrequenten Bereich nach DIN 45680 häufig überschritten, sodass in Deutschland kaum eine Veranstaltung genehmigt werden kann.

Durch die genannten Umstände scheint die gesamte Genehmigungssituation von Veranstaltungen in Deutschland instabil zu sein. Untersuchungen, die sich an die Gegebenheiten im Freizeitlärm bei dem Betrieb von Beschallungsanlagen richten, sind bisher kaum vorhanden. Dabei kann die perzeptive Störwirkung von tieffrequenten Immissionen, die von Beschallungsanlagen ausgehen, aufgrund ihrer Ton- und Informationshaltigkeit besonders hoch sein. Die genannten Komplikationen im Kontext des Freizeitlärms und im Zusammenhang mit der Beurteilungsmethode in Deutschland werden in einem Beitrag von Bernschütz und Latz (2020) beschrieben. Eine Publikation der Audio Engineering Society (Hill, 2020) geht ausführlich auf die Herausforderungen von Immissionen bei Veranstaltungen ein. Eine Datenbasis zu den situationsbedingten Umständen im Freizeitlärm soll durch ein Folgeprojekt erarbeitet werden.

3. Methodik

Das methodische Vorgehen stützt sich im Wesentlichen auf die strukturierte Literaturrecherche nach Döring und

Bortz (2016). Nach Briner und Denyer (2012) ist die strukturierte Literaturrecherche gut geeignet, um den Forschungsstand eines Themas systematisch aufzuarbeiten. Die Datenbanken von Google Scholar und EBSCOhost wurden herangezogen. Für die Abfrage der Datenbanken wurde die Technik der Keyword-Search in Anlehnung an Döring und Bortz (2016) angewandt. Die Auswahl der Keywords ergab sich nach Probesuchdurchläufen der jeweiligen Suchfelder (Wahrnehmung, Belästigung, Beurteilung) und nach Sichtung typischer Keywords konsultierter Literatur aus der Vorrecherche.

Die Keywords sind in Abbildung 1 dargestellt. Insgesamt wurden 502 Artikel in den Suchen gefunden. Bei jedem Suchdurchlauf wurden alle Ergebnisse gesichtet. Dabei wurde zunächst der Titel der Publikation gelesen. Falls der Titel eine Übereinstimmung zum Suchfeld aufwies, wurde im zweiten Schritt das Abstract gelesen. Falls das Abstract eine Eignung aufwies, wurde der Artikel als Suchergebnis für die Lektüre aufgenommen. So wurden insgesamt 33 Artikel zu allen drei Suchfeldern aufgenommen und anschließend ausgewertet.

Abbildung 1
Keywords der strukturierten Literaturrecherche

	Deutsch / Englisch	Keywords Englisch primär	Keywords Englisch sekundär	Keywords Deutsch primär	Keywords Deutsch sekundär
Suchfeld 1	perception and hearing thresholds at low frequencies	low frequency noise, low frequency sound, infrasound	perception, detection, hearing threshold	tieffrequente Geräusche, tieffrequenter Schall, Infraschall	Wahrnehmung, Hörschwelle
Suchfeld 2	annoyance of low frequency noise		annoyance, disturbance, Unpleasantness		Belästigung, Lästigkeit
Suchfeld 3	assessment of low frequency noise		assessment, measurement, evaluation		Bewertung, Beurteilung, Messung

4. Ergebnisse

Durch eine strukturierte Literaturrecherche wurde zu den verschiedenen Themengebieten sowohl der Stand der Forschung erfasst als auch ein Fokus auf neuere Erkenntnisse gesetzt. Die Ergebnisse zu den Themen Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche, Raumverhalten tieffrequenter Geräusche, gesundheitliche Auswirkungen und Beurteilung tieffrequenter Geräusche werden nachfolgend dargestellt.

4.1 Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche

Die sogenannte Hörschwelle beschreibt, ab welchem Schalldruckpegel der Mensch frequenzabhängig ein Geräusch wahrnehmen kann. Die Bestimmung dieser Hörschwelle beruht auf Untersuchungen mit normal hörenden Personen und reinen Sinustönen. Tieffrequente Schallimmissionen werden häufig als Ohrendruck, Vibration oder Unsicherheitsgefühl wahrgenommen (Przybilla, 2003), wobei der Übergang vom Hören eines Signales zum Fühlen fließend verläuft. Unter Lärmforschern hat sich der Begriff „Change Effekt“ geprägt, welcher beschreibt, dass eine Veränderung der Lärmsituation an einem Standort nicht unbedingt die erwartete

Reaktion der Betroffenen hervorruft, sondern eher ein erhöhtes Belästigungsempfinden auslöst (Guski, 2016).

Die auditive Wahrnehmung der Tonhöhe (Tonalität) ist nach Leventhall (2009) unterhalb von 16 Hz bis 18 Hz nicht mehr möglich. Im Gegensatz zur Tonhöhe wird die Veränderung der Lautstärke tieffrequenter Immissionen stärker wahrgenommen als im üblichen Hörbereich. Eine Studie von Yeowart et al. (1967) hat belegt, dass die Wahrnehmung von Lautstärkeunterschieden bei Frequenzen unterhalb von 25 Hz ab dem Überschreiten der Hörschwelle sehr sensibel ist. In den meisten Fällen hat eine Erhöhung des Lautstärkepegels um 1 dB gereicht, um die Einschätzung der Probanden von unhörbar zu deutlich wahrnehmbar zu verändern. Einige Personen klagen über tieffrequente Geräusche, die sie konstant als Brummtönen wahrnehmen. Die Quelle des sogenannten Brummtönen-Phänomens kann dabei selten lokalisiert und objektiv gemessen werden (Popkirov, 2020). Neben dem Gehör sind weitere Rezeptoren des menschlichen Körpers an der Wahrnehmung von tieffrequenter Schall beteiligt. Nach Schmidt (2016) ist davon auszugehen, dass für die Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche verschiedene Mechanismen zusammenwirken. Schmidt nennt Haut, Muskel und Sehnenrezeptoren für die Wahrnehmung von Körpervibrationen oberhalb von 15 Hz. Der Vestibularapparat

bestimmt die Wahrnehmung unterhalb von 15 Hz, wobei vermutlich weitere Barorezeptoren an der Schwingungsrezeption beteiligt sind. Die Annahme, dass ein bisher unbekannter Rezeptor zur Wahrnehmung tieffrequenten Schalls beiträgt, wird von einigen renommierten Forschern gehalten (Leventhall, 2009; Møller & Pedersen, 2004).

Durch die Ausprägung schallbezogener Variablen, wie der Impuls-, Ton- und Informationshaltigkeit sowie Frequenz- und Pegelschwankungen, können tieffrequente Geräusche besonders belästigend wirken. Die Tonhaltigkeit beschreibt die akustische Eigenschaft einer Schallemission, wenn innerhalb dieses Geräusches zusätzliche Einzeltöne deutlich hervortreten und hörbar sind. Analysen von Messungen in der Nachbarschaft von Industrie und Gewerbe haben gezeigt, dass Einzeltöne und tonale Geräusche als sehr unangenehm empfunden werden (Schmidt, 2015). Dabei ist es üblich, dass Einzeltöne durch periodisch arbeitende Systeme, wie z.B. Ventilatoren, auftreten. Auch bei Darbietungen von Musik ist eine erhöhte Tonhaltigkeit im tieffrequenten Bereich zu erwarten.

Die Impulshaltigkeit charakterisiert ein Geräusch, in dessen Verlauf periodisch oder nicht periodisch starke Änderungen des Schalldruckpegels auftreten. Laut Schmidt (2016) sind einzelne regelmäßige Schallimpulse in ihrer Lästigkeit wesentlich höher einzustufen als gleichmäßige Dauerschallpegel. Ist die Zeit, in der das Geräusch seinen Maximalwert erreicht (Anstiegszeit) kurz, kann die Lästigkeit zunehmen. Tieffrequente Geräusche haben häufig sehr kurze Anstiegs- und Abfallzeiten (Schmidt, 2016). Ein Vergleich nationaler Messverfahren von Poulsen und Mortensen hat gezeigt, dass die dänische Methode unter Anwendung eines Impulzschlages die beste Bewertung der Lästigkeit eines tieffrequenten Geräusches ermöglicht (Poulsen & Mortensen, 2000).

Wahrnehmungsbedingt haben Menschen eine höhere Aufmerksamkeit für Signale, die eventuell relevante Informationen enthalten. Besonders im Nachbarschafts- und Freizeitlärm handelt es sich häufig um Geräusche mit informativem Charakter (Niemann et al., 2005). Als Informationsgehalt kann auch ein rhythmischer Ablauf im Signalverlauf gelten. Bei musikalischen Darbietungen werden typischerweise durch die Instrumente und Signale im Bassbereich Signalspitzen in einem periodischen Rhythmus unterhalb von 100 Hz emittiert, wodurch sich sowohl eine hohe Impulshaltigkeit als auch ein hoher Informationsgehalt ausprägen kann.

In Untersuchungen von Abbasi et al. (2020) wurden 80 Studenten in einem Akustikraum einem tieffrequenten Geräusch mit einem Schalldruckpegel von 65 dB(A) ausgesetzt. Nach einer Stunde Schallexposition haben die Probanden die Noise Sensitivity Scale, Loudness Perception Scale und die Noise Annoyance Scale nach Weinstein (1978) ausgefüllt. Die sensitive Probandengruppe hat die Lästigkeit und die wahrgenommene Lautstärke signifikant höher bewertet als die Kontrollgruppe, die keinen Geräuschen ausgesetzt war. Das Bewusstsein über die Gefährdung durch Lärm führt

ebenfalls zu einer höher wahrgenommenen Lautstärke und hängt von der Einstellung des Betroffenen gegenüber dem Schallereignis ab. Sowohl die Sensitivität als auch das Bewusstsein über die Gefährdung sind nach Abbasi wichtige Faktoren für den Grad der Belästigung. Diese Laborstudien zeigen, dass eine höhere Sensitivität für tieffrequente Geräusche nicht nur von anderen Umwelteinflüssen abhängig ist. Demnach gibt es Personen, die allein auf das akustische Signal sensibel reagieren. Die untersuchten Parameter Lästigkeit, Sensitivität und Wahrnehmung haben gegenseitigen Einfluss aufeinander. Nach der statistischen Auswertung der Fragebögen konnte abgeleitet werden, dass Persönlichkeitsmerkmale (Neurotizismus, Extraversion) einen Zusammenhang mit der Sensitivität für tieffrequente Geräusche haben.

Neben psychoakustischen Faktoren spielen persönliche Faktoren, wie die Bewertung der Quelle, die Historie der Geräuschbelastung oder die Erwartungshaltung der betroffenen Person eine wichtige Rolle bei der Wahrnehmung und Belästigung durch tieffrequente Geräusche. Die Erkenntnisse der Recherche zeigen deutlich, dass die Hörschwelle individuellen Schwankungen unterliegt und nicht als einziges Kriterium für die Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche herangezogen werden sollte. Zusammengefasst kann die Ausprägung der genannten Wahrnehmungsparameter dafür sorgen, dass bestimmte Personen besonders sensibel auf Pegelerhöhungen reagieren oder tieffrequente Geräusche im Vergleich zu normalhörenden Personen schon bei geringeren Schalldruckpegeln wahrnehmen.

4.2 Raumverhalten tieffrequenter Geräusche

Besonders im eigenen Wohnraum haben Anwohner ein Bedürfnis nach Ruhe. Gerade in diesen Räumen können tieffrequente Geräusche perzeptiv in den Vordergrund treten, da die Transmission durch die Gebäudehülle im tieffrequenten Bereich leichter erfolgt. Weiterhin entstehen im Innenraum, bedingt durch die typischen Raummaße, Raummoden als Resonanzeffekt. Saliunas et al. (2016) haben eine physikalische Simulation eines Raumes im Maßstab 1:5 konstruiert, um daran das Transmissionsverhalten und den vorherrschenden Schalldruckpegel in Innenräumen bei Anregung durch ein breitbandiges Geräusch von außen zu untersuchen. Messungen im Modell haben gezeigt, dass sich die Schalldruckpegel in den einzelnen 1/3 Oktavbändern um bis zu 30 dB und bei diskreten Frequenzen um bis zu 50 dB unterscheiden können. Die Autoren behaupten, dass eine Berücksichtigung der modalen Eigenschaften für standardisierte Messverfahren sehr zeit- und ressourcenintensiv ist. Für eine Messung im Innenraum schutzbedürftiger Nutzungen, wie es nach DIN 45680 gefordert ist, sind diese Schwankungen zwischen einzelnen Messpositionen jedoch problematisch. Das Maß, in dem die Schalldämmung von Bauteilen angegeben wird, ist das sog. Bau-Schalldämm-Maß R. Das Bau-Schalldämm-Maß berücksichtigt dabei weitere situationsbedingte Umstände der Messumgebung, wie

die äquivalente Absorptionsfläche und die Nachhallzeit. Pirch und Nusser (2019) haben mehrere Messverfahren zur Bestimmung von Schalldämm-Maßen miteinander verglichen. Die Untersuchungen zeigen mit sinkender Frequenz steigende Streumaße. Das Bau-Schalldämm-Maß ist nach Vardaxis et al. (2018) kein adäquates Transmissionsmaß für die Luftschalldämmung bei tiefen Frequenzen. Die Berücksichtigung dieses Frequenzbereiches ist nach Vardaxis et al. (2018) für den Immissionsschutz besonders wichtig, um eine gerechte Bewertung zu ermöglichen. Seine Literaturrecherche zeigt, dass die Reaktionen auf Immissionen in schutzbedürftigen Nutzungen sehr komplex sind. Eine weitere Zusammenfassung von verschiedenen Untersuchungen zur Schallpegeldifferenz zwischen Innen- und Außenbereich von Gebäuden von Schultze (2021) zeigt, dass bei der Messung der Transmission von tieffrequentem Schall durch Gebäudehüllen hohe Streumaße auftreten. Einflussfaktoren sind unter anderem die ortsübliche Bebauung, die individuelle Beschaffenheit der Fassaden und Messunsicherheiten durch Resonanzeigenschaften der Räume.

4.3 Gesundheitliche Auswirkungen

Im Jahr 2000 hat die WHO tieffrequente Lärmimmissionen als umweltmedizinisches Problem definiert. In einer späteren Publikation der WHO (2011) wurde geschätzt, dass jährlich mehr als eine Million beschwerdefreie Lebensjahre (DALYs) durch Umgebungslärm allein in den europäischen Mitgliedsstaaten verloren gehen. Einem großen Anteil der recherchierten Studien zu gesundheitlichen Auswirkungen tieffrequenter Geräusche folgt die Aussage, dass diese vielfältig und ernst zu nehmen sind und dringend eine größere Beachtung benötigen (Araújo Alves et al., 2020; Baliatsas et al., 2016). Tieffrequenter Lärm kann sich auf unterschiedliche Weise auf die Gesundheit eines Menschen auswirken. Die Variationsbreite gesundheitlicher Risiken, die durch Schallexposition beim Menschen bestehen, ist in vielen Studien dargestellt (Griefhahn, 1996; Araújo Alves et al., 2020; Baliatsas et al., 2016). Araújo Alves et al. (2020) haben in einer strukturierten Literaturrecherche 39 peer-reviewed Journals aus den Jahren 2016 bis 2019 analysiert, um den aktuellen Forschungsstand zu gesundheitlichen Auswirkungen durch tieffrequente Immissionen darzustellen. Häufig untersuchte Auswirkungen sind Schlafstörungen, Unbehagen, Empfindlichkeit und Reizbarkeit durch Lärm, Belästigung, Hörverlust, und Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

4.4 Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche

Das übergeordnete Ziel des Immissionsschutzes besteht darin, mit geeigneten Mess- und Beurteilungsverfahren eine Immissionssituation zu bewerten und somit einen Schutz der Bevölkerung zu gewährleisten. Das Ausmaß einer Lärmbelastigung hängt nicht nur von akustischen Schalleigenschaften ab (Vgl. Müller & Möser, 2017). Um eine Immissionssituation zu

beschreiben, zu bewerten oder einen vergleichbaren Rückschluss auf andere Situationen zu ziehen, bedarf es Mess- und Beurteilungsverfahren, in denen weitere Einflussfaktoren (z.B. Ort und Zeit der Schalleinwirkung) berücksichtigt werden. Mithilfe objektivierbarer Einflussgrößen kann das Ausmaß der Lärmwirkung eingeschätzt und mit gegebenen Schutzziele verglichen werden. Nicht-akustische, situative, sowie individuelle Faktoren (z.B. seelische Verfassung oder Sensibilität der Betroffenen) haben größeren Einfluss auf die Reaktionen auf tieffrequenten Lärm als akustische Einflussfaktoren (Vgl. Job, 1998). Demnach besteht eine Abhängigkeit von nicht messbaren Faktoren, den sogenannten Moderatoren. Nach Schmidt (2016) erfordert die Erfassung der Lästigkeit kontinuierliche und langfristige Emissions- und Immissionsmessungen, die Ermittlung eines Gestörtheitsgrades auf einer Beurteilungsskala und die Erhebung von Daten durch einen qualifizierten Fragebogen bei einer repräsentativen Bevölkerungsgruppe. Anhand einer statistischen Auswertung der Korrelationen zwischen den Daten könnte die Qualität von Mess- und Beurteilungsverfahren und Grenzwerten geprüft werden.

In Deutschland wird zur Beurteilung tieffrequenter Schallimmissionen die DIN 45680 herangezogen. Die Anwendung der gültigen Fassung der DIN 45680 birgt zentrale Herausforderungen in bestimmten Immissionssituationen. So kann in einigen Fällen das Schutzniveau nicht eingehalten werden, wobei in anderen Situationen eine potenzielle Belästigung möglicherweise nicht erkannt wird. Die Anwendung der DIN 45680 im Freizeitlärm setzt nach Erfüllung eines Auslösekriteriums (Differenz aus C- und A-bewertetem äquivalenten Dauerschallpegel) eine Messung im Innenraum der zu schützenden Nutzung voraus, wodurch der Anwohner nicht geschützt, sondern besonders involviert wird. Der überwiegende Teil an Veranstaltungen kann nur durch erhöhte Immissionsrichtwerte mit einer Ausnahmeregelung der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm), als sogenanntes „seltenes Ereignis“ durchgeführt werden. Selbst in diesen Szenarien werden die statischen Anhaltswerte für den tieffrequenten Bereich nach DIN 45680 häufig überschritten, sodass in Deutschland kaum eine (Groß-) Veranstaltung genehmigt werden kann.

Von Zagubien und Wolniewicz (2020) wurden Schalldruckpegelmessungen in einer Schule durchgeführt, die an einer stark befahrenen Straße und in 500 Meter Abstand zu einer Windenergieanlage liegt. Die gemessenen Schalldruckpegel lagen im Bereich oberhalb von 25 Hz zum Teil deutlich über der Hörschwelle, wobei die Differenz der C- und A-bewerteten Dauerpegel ($L_{Ceq} - L_{Aeq}$) nicht über 15 dB lag und die Differenz der Maximalpegel nicht über 20 dB lag. Das Auslösekriterium nach DIN 45680 würde in dem Fall eine weitere Prüfung der Situation ausschließen, obwohl Personen in der Schule den tieffrequenten Schall deutlich wahrnehmen können. Im Infraschallbereich wurden keine Werte gemessen, die in der Nähe der Hörschwelle liegen.

Caniato hat die Beurteilungsmethoden mehrerer Länder an Lärmsituationen im Freizeitlärm angewandt und die einzelnen Kriterien für eine mögliche tieffrequente Geräuschbelastung betrachtet (Caniato et al., 2016). International unterscheiden sich die Mess- und Beurteilungsverfahren sehr stark. Caniato et al. haben nach der Prüfung diverser Beurteilungsmethoden eine neue Methode entwickelt und diese geprüft. Die vorgestellte Methode ermöglicht einen sicheren Rückschluss auf eine Geräuschbelastung, ist in ihrer Durchführung jedoch sehr aufwändig. Neben mehreren Messungen im Raum und an der Quelle muss der Fremdgeräuschpegel gemessen werden. Das Messumfeld, sowie die Messpositionen und Messdauer sind dabei genau definiert. Psychoakustische Kenngrößen, sowie Pegel- und Frequenzschwankungen werden jedoch nicht berücksichtigt. Eine Laborstudie von Krahé (2019) hat die Eignung bestimmter psychoakustischer Parameter untersucht, um die Belästigung durch tieffrequente Immissionen zu beschreiben. 23 Experten wurden 101 verschiedene akustische Stimuli ausgesetzt. Die Stimuli variierten stark in ihren Eigenschaften (Sinustöne, Frequenzmodulationen, Amplitudenmodulationen, White Noise, Brown Noise, Bassläufe, Pulssequenzen). Die Experten sollten jedem der 101 verschiedenen Stimuli Korrekturwerte von entweder 0 dB, 3 dB, oder 6 dB für die Eigenschaften zuordnen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Geräusch weniger belästigend wirkt, je breitbandiger seine Ausprägung ist. Es wurden Methoden vorgestellt, die die Bewertung der Geräuschbelastung nach DIN 45680 optimieren können. Die Berücksichtigung von Korrekturwerten und einer angepassten Frequenzbewertung liefert nach Krahé eine bessere Bewertung tieffrequenter Immissionen. Die Ergebnisse dieser Studie sind im neuen Normentwurf der DIN 45680 verankert.

Nach Schmidt (2016) können Einzeltöne bei stärkeren Frequenzschwankungen im Bereich bis 500 Hz subjektiv als besonders störend eingestuft werden, wenn die Modulationsfrequenz 4 Hz beträgt. Auch Frequenzschwankungen werden bisher nicht in den bestehenden Regelwerken zur Bildung von Beurteilungspegeln herangezogen. Moorhouse et al. (2009) haben Laboruntersuchungen mit fluktuierenden tieffrequenten Stimuli durchgeführt. Bei allen Probanden lag die Akzeptanzschwelle der fluktuierenden Geräusche zwischen 4 und 5 dB höher als bei gleichmäßigen Geräuschen. Nach Moorhouse et al. (2009) sollte eine Korrektur in Bezug auf Pegel- und Frequenzschwankungen in die Beurteilung tieffrequenter Geräusche integriert werden. Die Betrachtung und Auswertung des Frequenzverlaufes während der Immissionssituation könnte in die Beurteilung der Lästigkeit eines Geräusches integriert werden. Krahé et al. (2014) kritisieren nach einer strukturierten Literaturanalyse, dass Schwankungsparameter bisher gar nicht oder nur ansatzweise in bestehenden Mess- und Beurteilungsverfahren verankert sind. Nach Takahashi (2009) kann die Wahrnehmung von Vibrationen bei tieffrequenten Geräuschen ein maßgeblicher Faktor für die Bewertung einer Immissionssituation sein.

Eine Vielzahl an Studien belegt, dass die häufig angewandte A-Bewertung bei internationalen Mess- und Beurteilungsverfahren das Immissionsgeschehen bei tiefen Frequenzen nicht abbilden kann (Bengtsson, 2003, 2004; Findeis & Peters, 2004; Leventhall, 2009). Eine weitere Studie von Persson et al. (1990) hat empirisch bewiesen, dass die Lästigkeit von A-Bewerteten tieffrequenten Geräuschen im Vergleich zu A-Bewerteten Stimuli im mittel- und hochfrequenten Bereich unterschätzt wird. Leventhall (2009) hat die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen mit A-bewerteten Pegeln im Bereich zwischen 80 Hz und 1 kHz zusammengefasst, wobei der Grad der Belästigung bei tieffrequenten Geräuschen mit demselben A-bewerteten Pegel ebenfalls höher lag. Gemäß der Arbeit von Leventhall kann die A-Bewertung bei einer Immissionssituation keine sichere Aussage über die Belästigungswirkung unterhalb von 200 Hz treffen. In der strukturierten Recherche wurden weitere aktuelle Untersuchungen zur A-Bewertung gefunden. Neue Erkenntnisse sind dabei größtenteils mit Kritik an der A-Bewertung verbunden. Schmidt (2015) empfiehlt für die Beurteilung tieffrequenter Immissionen die Verwendung des unbewerteten Schalldruckpegels (Z-Bewertung). Berglund et al. (2000) behaupten in einer Publikation der WHO, dass sich die C-Bewertung besser zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche eignet. Goldstein und Kjellberg (1985) haben dagegen bisher den Standpunkt vertreten, dass die A-Bewertung die Belästigungswirkung unterschätzt und die C-Bewertung die Belästigungswirkung überschätzt. Montano (2020) hat untersucht, ob die A-Bewertung die Wahrnehmung und die tatsächlichen Auswirkungen von Lärm auf den Menschen widerspiegelt. Der Autor weist darauf hin, dass die Definition der A-Bewertung auf Untersuchungen mit rein tonalen Geräuschen beruht und die Wechselwirkung zwischen komplexen und tonalen Geräuschen somit nicht abbilden kann. Für die Messung von komplexen und tonalen tieffrequenten Geräuschen ist es nach Montano (2020) dringend notwendig, die bestehenden Mess- und Beurteilungsverfahren neu auszurichten und eine Alternative zur Nutzung der A-Bewertung zu finden.

4.5 Active Noise Control

Eine etwas neuere Methode zur Minderung tieffrequenten Schalls erfolgt auf Basis elektroakustischer Maßnahmen. Sogenannter Gegenschall kann eingesetzt werden, um gezielt bei bestimmten Frequenzen eine Auslöschung durch Interferenzen herbeizuführen. Der Einsatz von 180° phasengedrehtem Schall, der zum Störschall ausgegeben wird, wurde bereits 1933 von Lueg (1933) patentiert. Häufig wird diese Methode auch als Active Noise Cancellation (ANC) beschrieben. Der Wirkungsgrad von ANC ist unter Realbedingungen beschränkt, da schon kleinste physikalische Einflussfaktoren eine exakte Reproduktion des Ausgangssignals um 180° phasengedreht verhindern. Wise und Leventhall (2010) konnten zeigen, dass der Einsatz von ANC im tieffrequenten Bereich besonders effektiv sein kann.

5. Diskussion

Nach der ausführlichen Recherche zum Thema tieffrequente Immissionen ist aufgefallen, dass der Begriff „low frequency noise“ international teilweise sehr unterschiedlich interpretiert und mit sehr unterschiedlichen Frequenzbereichen definiert wird. Eine wissenschaftlich einheitliche Definition der Frequenzbereiche von tieffrequentem Schall und Infraschall sollte daher angestrebt werden. Die unterschiedlichen Angaben der Grenzfrequenzen sind darauf zurückzuführen, dass die Grenzen zwischen Hörschall, Infraschall und Ultraschall fließend verlaufen (Schmidt, 2015). Die unterschiedlichen Grenzfrequenzen ergeben sich häufig aus verschiedenen Anwendungsgebieten und den zugrundeliegenden Problematiken, die in einzelnen Studien und Normen behandelt werden. Es ist eindeutig zu erkennen, dass das Konfliktpotenzial durch tieffrequente Immissionen steigen kann. Die wichtigsten Gründe dafür, die in dieser Arbeit herausgestellt wurden, sind an dieser Stelle zusammengefasst:

- Die quantitative und qualitative (höhere Emissionen) Zunahme tieffrequenter Schallquellen
- Die physikalisch bedingt kaum gehinderte Ausbreitung tieffrequenten Schalls
- Die bautechnischen Elemente und Maßnahmen, die fast ausschließlich gegen mittel- und hochfrequenten Schall schützen
- Die Ausprägung von starken Resonanzen im Innenraum der schutzbedürftigen Nutzungen
- Die Wahrnehmungsbesonderheiten des Menschen bei tieffrequenten Geräuschen
- Die Anpassung der Regelwerke und Normen bei tieffrequenten Geräuschen
- Die gesundheitlichen Auswirkungen von tieffrequentem Lärm

Eine der großen Herausforderungen ist es, tieffrequente Lärmimmissionen ihrem Wirkungsgrad entsprechend zu bewerten und beurteilen. Die Vielfalt der Auswirkungen wird durch ebenso viele Faktoren bestimmt. Die bestehenden Mess- und Beurteilungsverfahren können die psychologischen Faktoren nicht berücksichtigen (Moorhouse et al., 2009). Eine Zusammenführung ist schwierig. Der neue Entwurf der DIN 45680 (2020) hat bereits einige Einflussfaktoren, wie spektrale Eigenschaften und Pegelschwankungen berücksichtigt. Es stellt sich dennoch die Frage, ob zukünftig von einer Messung im Innenbereich der zu schützenden Nutzung abgesehen werden kann. Hinweise auf zukünftige Konflikte mit tieffrequentem Schall kommen aus allen Fachrichtungen. Es wird häufiger zu einer Reduktion der Schallemissionen geraten (Basner et al., 2014). Basner et al. (2014) empfehlen auch die Einführung von Aufklärungskampagnen, damit die Bevölkerung sich durch gelerntes Verhalten besser an Lärmsituationen anpassen oder diese gar vermeiden kann.

Nach der strukturierten Recherche ist aufgefallen, dass sich der Fokus der Forschungsaktivitäten mit zunehmender Popularität der Thematik Infraschall und

Windenergieanlagen genähert hat, sodass dieses populäre Themengebiet häufiger behandelt wurde. Anhand der selektierten Studien wurden mögliche Messverfahren und Hörversuche zur Bestimmung und Beurteilung tieffrequenter Schallimmissionen identifiziert. Die häufigste Methode ist die klassische Schalldruckpegelmessung. Häufig wurden demographische und persönliche Informationen zu den Probanden gesammelt, um nicht-akustische Faktoren, wie z.B. die Vorprägung zu einer Lärmsituation zu erkennen. So konnten in vielen Untersuchungen besonders sensible Personen identifiziert werden. Die Darstellung des aktuellen Forschungsstand zu tieffrequenten Schallimmissionen hat gezeigt, dass viele Wirkungszusammenhänge tieffrequenten Schalls noch nicht hinreichend erforscht sind. Auch wenn die Relevanz des Themas sowie die Anzahl der Studien zugenommen hat, sind Untersuchungsparameter der zitierten Studien insgesamt sehr unterschiedlich. Die meisten Studien beziehen sich auf einen spezifischen Stimulus, der häufig anhand einer kleinen Probandengruppe untersucht wurde. Die Stimuli variieren in ihrer Bandbreite, Frequenzzusammensetzung, Hüllkurve und Expositionsdauer. Daher lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse auf der einen Seite kaum vereinheitlichen. Auf der anderen Seite spiegelt sich darin die Vielseitigkeit und die Komplexität der Wirkungsmechanismen tieffrequenter Immissionen wider. Unter allen recherchierten Studien finden sich sehr unterschiedliche Ansätze für optimierte Mess- und Beurteilungsverfahren. Aufgrund der unterschiedlichen Ansätze stehen sich die Aussagen einiger Studien entgegen. Häufig wird konstatiert, dass die Erfassung tieffrequenter Geräusche mit herkömmlichen Messmethoden nicht repräsentativ ist. Ein einheitliches Verfahren, welches international eingesetzt werden kann, steht noch nicht in Aussicht und ist nach aktuellem Stand nicht erstrebenswert. Zunächst müssen die besonderen Wirkungsmechanismen tieffrequenten Schalls weiter und interdisziplinär untersucht werden. Obwohl die Versuche sehr unterschiedlich ausgeprägt sind, wurden kaum Studien mit musikalischen Stimuli durchgeführt. Auf Grundlage der Rechercheergebnisse wurden weiterführende Fragen im Hinblick auf die Messung und Beurteilung tieffrequenter Immissionen abgeleitet:

- Welche Signalpfade sind von Bedeutung (Luftschall, sekundärer Luftschall, Körperschall)?
- Welche Normen und Messvorschriften sind adäquat?
- Welche Grenzwerte sollen für die Belästigung festgelegt werden?
- Kann ein spezifisches Messverfahren für die Besonderheiten im Freizeitlärm entwickelt werden?
- Sollte Musik künftig weiterhin als Umgebungslärm klassifiziert werden?
- Ist in diesem Zusammenhang auch Infraschall relevant?
- Gibt es Wahrnehmungsbesonderheiten in Abhängigkeit von Musikgenres bei tiefen Frequenzen?
- Inwiefern beeinflussen weitere Sinnesmodalitäten die perzeptive Störwirkung tieffrequenter Schalle?

Zusammenfassend besteht Forschungsbedarf bezüglich der Quellen, Entstehung, Minderung, Ausbreitung, Wirkung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche. Die Frage, ob eine Immissionsituation besser durch Einzahlwerte oder durch Werte der einzelnen Terz-Mittelfrequenzen bewertet werden kann, bleibt ungeklärt und ist häufig von den situationsbedingten Umständen der Lärmsituation abhängig. Die einfache Messbarkeit von frequenzbewerteten Einzahlwerten steht der präzisen Analyse von Schallpegelspektren gegenüber. In jedem Fall stellt jedoch eine Wahrnehmungsschwelle für tieffrequente Geräusche das zentrale Kriterium zur Beurteilung dar.

Eine ausführliche Untersuchung aller Teilbereiche hätte den Rahmen dieser Studie gesprengt. Somit kann diese Studie auf die Darstellung einzelner Themen (Raumverhalten tieffrequenter Schalle, gesundheitliche Auswirkungen, Active Noise Control) keine Vollständigkeit erheben. Die Hauptsuchfelder Wahrnehmung, Belästigung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche (Abbildung 1) wurden jedoch ausführlich recherchiert und diskutiert. Im Hinblick auf die Einordnung des Themas im Rahmen des Freizeitlärms wäre eine qualitative Untersuchung mit den Beteiligten an Konfliktsituationen denkbar.

6. Fazit

Die Zunahme der tieffrequenten Immissionen ausgehend von Beschallungsanlagen ist im Rahmen des Freizeitlärms eine besondere Herausforderung. Dies stellt den einzigen Fall dar, bei dem die Emissionen bewusst mit einer typischen spektralen Zusammensetzung erzeugt werden und entsprechend nicht an der Emissionsquelle gemindert werden können. Es gibt bereits Ansätze in der Branche, die zum besseren Umgang mit Immissionen beitragen, wie die Software NoizCalc von d&b Audiotechnik, mit der eine Prognose für die Schallausbreitung ausgehend von der Beschallungsanlage erstellt werden kann. Dennoch besteht bisher kein geeignetes Verfahren zur Beurteilung tieffrequenter Geräusche und großer Forschungsbedarf zu den Gegebenheiten im Freizeitlärm.

Für ein besseres Verständnis und einen adäquaten Umgang mit tieffrequenten Immissionen müssen neue Erkenntnisse schrittweise und möglichst interdisziplinär aus den Bereichen der Akustik, Psychoakustik, Bauakustik, Umweltmedizin, den Rechtswissenschaften und den Politikwissenschaften zusammengetragen werden. Eine maßgebliche Verbesserung der messbedingten Umstände würde eine Übertragungsfunktion bieten, die das Transmissionsverhalten von Schall vom Außenbereich in den Innenraum einer Wohnung beschreibt.

Die in dieser Arbeit zusammengetragenen Ergebnisse und Forschungslücken werden in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Folgeprojekt TIFL – „Tieffrequente Immissionen im Freizeitlärm“ aufgegriffen und umfangreich bearbeitet. Gegenstand des Folgeprojekts ist eine Analyse und Anpassung der bestehenden Mess- und Beurteilungs-

verfahren für tieffrequente Immissionen im Freizeitlärm. Eine entsprechende Datenbasis zu den besonderen Umständen im Freizeitlärm soll durch bauakustische Messungen, Immissionsmessungen auf Veranstaltungen und Hörversuche erarbeitet werden. Darüber hinaus wird im Rahmen des Projektes ein verteiltes Mess- und Lärmmanagementsystem entwickelt und eingesetzt.

Literaturverzeichnis

- Abbasi, M., Tokhi, M. O., Falahati, M., Yazdanirad, S., Ghaljahi, M., Etemadinezhad, S., & Jaffari Talaar Poshti, R. (2021). Effect of personality traits on sensitivity, annoyance and loudness perception of low- and high-frequency noise. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40(2), 643-655. <https://doi.org/10.1177/1461348420945818>
- Araújo Alves, J., Neto Paiva, F., Torres Silva, L., & Remoaldo, P. (2020). Low-frequency noise and its main effects on human health—A review of the literature between 2016 and 2019. *Applied Sciences*, 10(15), 5205. <https://doi.org/10.3390/app10155205>
- Baliatsas, C., van Kamp, I., van Poll, R., & Yzermans, J. (2016). Health effects from low-frequency noise and infrasound in the general population: Is it time to listen? A systematic review of observational studies. *Science of the Total Environment*, 557, 163-169. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.065>
- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383, 1325-1332. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(13\)61613-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(13)61613-x)
- Bengtsson, J., Waye, K. P., & Kjellberg, A. (2004). Sound characteristics in low frequency noise and their relevance for the perception of pleasantness. *Acta Acustica united with Acustica*, 90, 171-180.
- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (2000). New WHO Guidelines for Community Noise. *Noise and Vibration Worldwide*, 31, 24-29.
- Bernschütz, B. & Latz, J. (2020). "Tieffrequente Immissionen im Freizeitlärm – Wie gehen wir damit um?", DEGA, Tagungsband der Jahrestagung für Akustik, DAGA Hannover 2020.
- Briner, R. B., & Denyer, D. (2012). Systematic review and evidence synthesis as a practice and scholarship tool. *Handbook of evidence-based management: Companies, classrooms and research*, 112-129. New York University Press.
- Caniato, M., Bettarello, F., Patrizio, F., Marsich, L., Ferluga, A., & Schmid, C. (2016). Low frequency noise and disturbance assessment methods: A brief

- literature overview and a new proposal. *Proc. Meet. Acoust.*, 28. <https://doi.org/10.1121/2.0000341>
- DIN (1997). DIN 45680:1997-03, *Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft*. <https://doi.org/10.31030/7211690>
- DIN (2020). DIN 45680:2020-06, *Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen*.
- Döring, N., & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation*. Springer.
- Ederer, H. J., Händel, M., Nicht, A., Roy, A., Seifert, S., Stüber, C., & Zschaler, H. (2019). *Ergänzung zur Sächsischen Freizeitlärmstudie*.
- Eulitz, C., Zobel, P., Schröder, M., Ost, L., & Möhler, U. (2020). *Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, ISSN: 1862-4804.
- Findeis, H. und Peters, E. (2004). Disturbing Effects of low frequency sound immissions and vibrations in residential buildings. *Noise and Health*, 6, 29-36.
- Griefhahn, B. (1996). *Arbeitsmedizin*. Ferdinand Enke Verlag.
- Guski, R. (2016). NORAH overview. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Band 253, Seiten 784-788. Institute of Noise Control Engineering.
- Hill, A. J. (2020, May). *Understanding and managing sound exposure and noise pollution at outdoor events*. Audio Engineering Society.
- Job, R. F. S. (1998). Community response to noise: a review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 991-1001. <https://doi.org/10.1121/1.396524>
- Kjellberg, A., Tesarz, M., Holmberg, K., & Landström, U. (1997). Evaluation of frequency-weighted sound level measurements for prediction of low-frequency noise annoyance. *Environment international*, 23, 519-527. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(97\)00054-8](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(97)00054-8)
- Krahé, D. (2019, September). Proposal of a procedure assessing the annoyance of low-frequency noise and infranoise. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 259, No. 5, pp. 4882-4890). Institute of Noise Control Engineering.
- Krahé, D., Schreckenber, D., Ebner, F., Eulitz, C., & Möhler, U. (2014). *Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall*. Nummer 1948 in UBA-FB. Umweltbundesamt, Wuppertal [u.a.].
- Leventhall, G. (2003). *A review of published research on low frequency noise and its effects*, Department of Environment, Food, and Rural Affairs (DEFRA), UK. <http://archive.defra.gov.uk/environment/quality/noise/research/lowfrequency/documents/lowfregnoise.pdf>
- Leventhall, H. G. (2009). Low Frequency Noise. What we know, what we do not know, and what we would like to know. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 28, 79-104. <https://doi.org/10.1260/1475-4738.8.4.3>
- Lueg, P. (1933). *Verfahren zur Dämpfung von Schallwirkungen*. German patent, (655), 508.
- Møller, H. und Pedersen, C. S. (2004). Hearing at Low and Infrasonic Frequencies. *Noise and Health*, 6, 37-57.
- Montano, W. A. (2020). Low-Frequency Noise is underestimated by dBA. After 80 years, an LFN descriptor for rating annoyance is necessary. *Noise Theory and Practice*, 6.
- Moorhouse, A. T., Waddington, D. C., & Adams, M. D. (2009). A procedure for the assessment of low frequency noise complaints. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126, 1131-1141. <https://doi.org/10.1121/1.3180695>
- Müller, G., & Möser, M. (2017). *Fachwissen Technische Akustik*, Kapitel Beurteilung von Schallimmissionen. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55389-3>
- Niemann, H., Maschke, C., Hecht, K., & Huber, M. (2005). Nachbarschaftslärm bedingte Belästigung und Erkrankungsrisiko-Ergebnisse des Paneuropäischen LARES-Survey. *Fortschritte der Akustik*, 31(1), 373.
- Persson, K., Björkman, M., & Rylander, R. (1990). Loudness, annoyance and DBA in evaluating low frequency sounds. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 9(1), 32-45. <https://doi.org/10.1177/026309239000900104>
- Pirch, P., & Nusser, B. (2019). *Ermittlung der Schalldämm-Maße im tiefen Frequenzbereich nach EN ISO 10140 im Vergleich zum Diagonalverfahren*. DAGA 2019 Rostock.
- Popkirov, S. (2020). *Funktionelle Hörstörungen*. In *Funktionelle neurologische Störungen*, 123-129. Springer.
- Poulsen, T., & Mortensen, R. (2000). *Laboratory evaluation of annoyance of low frequency noise*. Danish Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment.
- Przybilla, T. (2003). *Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräusche*. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Jahresbericht 2003, 90-91.
- Roy, A., & Nicht, A. (2019). *Schall-Immissionsschutz bei Open-Air-Veranstaltungen, aktuelle Messergebnisse*. DAGA Rostock 2019.

- Saliunas, D., Volkovas, V., & Janusevicius, T. (2016). Study of measured indoor low-frequency noise levels resulting from outdoor noise sources, using a simplified physical model as well as empirical and FEM calculations. *Journal of Vibroengineering*, *18*, 2693-2713. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17248>
- Schmidt, M., & Martner, O. (2015). *Forschungsprojekt zu Kurven gleicher Lautstärke für DIN 45680*. München: Im Auftrag des DIN.
- Schulze, C., Eckert, L., & Hübelt, J. (2021). *Untersuchungen zur Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Geräuschen*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Heft 9/2021.
- Schmidt, M. (2016). *Forschungsvorhaben zur Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- Takahashi, Y. (2009). Vibratory Sensation Induced by Low-Frequency Noise: A Pilot Study on the Threshold Level. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, *28*, 245-253. <https://doi.org/10.1260/1475-4738.9.3.21>
- Vardaxis, N.-G., & Bard, D. (2018). Review of acoustic comfort evaluation in dwellings: Part II-airborne sound data associated with subjective responses in laboratory tests. *Building Acoustics*, *25*, 289-305. <https://doi.org/10.1177/1351010x18772026>
- WHO (2011). *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Wise, S., & Leventhall, G. (2010). Active Noise Control as a Solution to Low Frequency Noise Problems. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, *29*, 129-137. <https://doi.org/10.1260/0263-0923.29.2.129>
- Yeowart, N. S., Bryan, M. E., & Tempest, W. (1967). The monaural MAP threshold of hearing at frequencies from 1· 5 to 100 c/s. *Journal of Sound and Vibration*, *6*(3), 335-342. [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(67\)90206-4](https://doi.org/10.1016/0022-460x(67)90206-4)
- Zagubien, A., & Wolniewicz, K. (2020). The assessment of infrasound and low frequency noise impact on the results of learning in primary school - case study. *Archives of Acoustics*, *2020*, *45*(1), 93-102.