

TEXTE

40/2014

Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall

Entwicklung von Untersuchungsdesigns für die
Ermittlung der Auswirkungen von Infraschall auf den
Menschen durch unterschiedliche Quellen

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3711 54 199
UBA-FB 001948

Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall

**Entwicklung von Untersuchungsdesigns für die
Ermittlung der Auswirkungen von Infraschall auf
den Menschen durch unterschiedliche Quellen**

von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Krahé
Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal

Dirk Schreckenberg
ZEUS GmbH, Hagen

Fabian Ebner, Christian Eulitz, Ulrich Möhler
Möhler + Partner Ingenieure AG

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/machbarkeitsstudie-zu-wirkungen-von-infraschall> verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung
der Studie: Möhler + Partner Ingenieure AG
Paul-Heyse-Str. 27
80336 München

Abschlussdatum: März 2014

Herausgeber: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet I 3.4 Lärminderung bei Anlagen und Produkten,
Lärmwirkungen
Dr. Jens Ortscheid

Dessau-Roßlau, Juni 2014

Kurzbeschreibung

In der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde der Stand des Wissens über die Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen, die Identifizierung von Infraschallquellen und die potentiellen Betroffenheiten in Deutschland durch Infraschall erarbeitet. Darüber hinaus wurde ein Studiendesign für eine Lärmwirkungsstudie über Infraschallimmissionen entwickelt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Vorschläge für die Weiterentwicklung des Regelwerkes zum Immissionsschutz unterbreitet. Die Studie kommt zu folgenden Ergebnissen:

- Aus der Literaturrecherche kann kein einheitliches Bild zur Ermittlung und Beurteilung von tieffrequenten Schallen abgeleitet werden. Insbesondere in Deutschland existieren nur wenige Untersuchungen, die sich mit Infraschall beschäftigen. Für weitere Vorhaben wurde eine Datenbank erstellt.
- Für die akustische Identifizierung und Bewertung wurden Erhebungsinstrumente entwickelt, die eine erste akustische Beschreibung und Einordnung von potentiellen Infraschallquellen zulassen.
- Die Befragungen der Immissionsschutzbehörden der Länder und die Auswertung von Internetkommunikationen zum Infraschall zeigen eine etwas höhere Belästigung im süddeutschen Raum. Dabei wurden vor allem Belästigungen durch raumluftechnische Anlagen und Biogasanlagen genannt. In der behördlichen Praxis finden bei Konflikten mit Infraschall im Allgemeinen die TA Lärm und die DIN 45680 Anwendung.
- Es wurde ein Studiendesign für eine interdisziplinäre Feldstudie entwickelt und die wesentlichen Befragungsinhalte und Quellen definiert.
- Zur Bewertung des tieffrequenten Lärms (< 100 Hz) kann die DIN 45680 „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft“ verwendet werden. Speziell zur Erfassung von Infraschallimmissionen (< 20 Hz) gibt es die internationale Norm ISO 7196 „Acoustics – Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements“. Die Forschungsarbeiten zeigen, dass diese Normen im Hinblick auf die Beurteilung von Infraschall Defizite aufweisen und deshalb weiterentwickelt werden sollten. Die derzeitige Überarbeitung der DIN 45680 weist einen Weg, wie Inkonsistenzen im tieffrequenten Bereich behoben werden können.

Abstract

This feasibility study evaluated the state of knowledge about the effects of infrasound on human beings, the identification of infrasound sources and the potential concerns in Germany due to infrasound. Furthermore, a study design was developed for a noise impact study concerning infrasound immissions. Based on these findings, recommendations for the further development of regulations on immission control were made. The study led to the following conclusions:

- The literature review does not present a coherent picture about the determination and assessment of low frequency sounds. Especially in Germany, there are just a few studies that deal with infrasound. A database was created for further research projects.
- Survey tools that allow for an initial acoustic description and classification were developed for the acoustic identification and assessment of potential infrasound sources.
- The surveys of the immission control authorities of the *Länder* (German states) and the evaluation of Internet communication on infrasound show a somewhat higher level of noise pollution in Southern Germany. Above all, noise pollution from air-conditioning systems and biogas facilities were mentioned. In the official practice, the Technical Instructions on Noise Abatement and DIN 45680 generally apply in cases of conflicts concerning infrasound.
- A study design was developed for an interdisciplinary field study and the essential survey contents and sources were defined.
- The DIN 45680 Measurement and Assessment of Low Frequency Noise Immissions in the Neighbourhood can be used for the assessment of low frequency noise (<100 Hz). The international standard ISO 7196 Acoustics – Frequency-Weighting Characteristic for Infrasound Measurements was especially created for the measurement of infrasound immissions (<20 Hz). The research findings indicate that these standards have deficits with regards to the assessment of infrasound and should be further developed. The current revision of DIN 45680 shows a path for how inconsistencies in the area of low frequency sounds can be rectified.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungen	12
1 Zusammenfassung	13
2 Summary	27
3 Einleitung.....	42
4 Historischer Abriss	44
5 Aufbereitung des Wissensstands über Infraschallauswirkungen	46
5.1 Aufgabenstellung	46
5.2 Methodik	47
5.3 Stand des Wissens	50
5.3.1 Literaturanalyse	50
5.3.2 Technisch/akustische Aspekte	53
5.3.3 Wirkungen von Infraschall auf den Menschen	57
5.4 Forschungsdefizite.....	64
6 Identifizierung von Quellen, von denen erhebliche tieffrequente oder Infraschallemissionen ausgehen können.....	69
6.1 Aufgabenstellung	69
6.2 Quellenidentifikation und -ortung.....	70
6.3 Entwicklung eines Klassifizierungssystems.....	71
6.3.1 Wirkungsradien und Betroffenheit.....	71
6.3.2 Klassifizierungsmöglichkeiten	72
6.3.3 Vorschlag für eine Klassifizierung	73
6.4 Erhebung- und Klassifizierungsbogen.....	79
6.5 Bewertung des Klassifizierungssystems.....	83
7 Feststellung der potentiellen Betroffenheiten in Deutschland	85
7.1 Aufgabenstellung	85
7.2 Methodik	85
7.3 Potentielle Betroffenheit in Deutschland.....	92
7.4 Bewertung.....	93
8 Konzeption eines Studiendesigns	95
8.1 Aufgabenstellung	95
8.2 Designvorschlag.....	97
8.2.1 Stichprobenplan.....	97

8.2.2	Auswahl der Untersuchungsgebiete und Untersuchungspersonen.....	100
8.2.3	Schallexposition	101
8.2.4	Befragungsmethodik	101
8.2.5	Fragebogenkonstruktion.....	104
8.2.6	Statistische Analysen.....	107
8.2.7	Schätzung des Aufwands zur Durchführung einer Lärmwirkungsstudie zu Infraschallimmissionen	107
9	Vorschläge zur Weiterentwicklung des bestehenden Regelwerks zum Immissionsschutz.....	109
9.1	Aufgabenstellung	109
9.2	Methodik.....	109
9.3	Beurteilungssystematik und Normen zum Infraschall.....	110
9.4	Messverfahren zum Infraschall.....	112
9.5	Prognoseverfahren zum Infraschall.....	115
9.6	Bewertung und Ausblick.....	116
10	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	118
11	Quellenverzeichnis	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Auswertung der Betroffenheitsanalyse der Behörden, Darstellung der gemeldeten Beschwerdefälle inkl. Internetrecherche	21
Abbildung 2:	Prozentuale Verteilung der Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche auf die Quellengruppen (Gr.I bis Gr.XII) der Klassifizierung gemäß Abschnitt 7.2.1	22
Abbildung 3:	Map of Germany with registered complaints (incl. complaints resulting of web research).....	36
Abbildung 4:	Distribution in percentage of complaints regarding Infrasound and low frequency noises	37
Abbildung 5:	Darstellung der Frequenzbereiche des Schalls.....	45
Abbildung 6:	Verteilung der recherchierten Beiträge nach ihrem Erscheinungsjahr im Zeitraum 1950 bis 2012	48
Abbildung 7:	Oberfläche des Datenbankprogramms unter JabRef	49
Abbildung 8:	Verteilung der Veröffentlichungen über die Jahre 1980 bis 2012 zu den Themengruppen I, II und III unter Einbezug von Priorität 1 und 2	52
Abbildung 9:	Aufnahme des Off-Shore-Windparks Horns Rev 1 von Vattenfall aus [70].....	57
Abbildung 10:	Pegel-/ Frequenzdarstellung dokumentierter Infraschalleffekte	63
Abbildung 11:	Zwischen 1989 und 2001 gemessene Hörschwellen bei tiefen Frequenzen	64
Abbildung 12:	Ausschnitt obere Hälfte der ersten Seite des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens.....	79
Abbildung 13:	Ausschnitt untere Hälfte der ersten Seite des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens.....	80
Abbildung 14:	Ausschnitt obere Hälfte der zweiten Seite des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens.....	81
Abbildung 15:	Ausschnitt untere Hälfte der zweiten Seite des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens.....	82
Abbildung 16:	Verwendeter Fragebogen für die Abfrage der Beschwerdesituation bei den Unteren Immissionsschutzbehörden	86
Abbildung 17:	Ergebnis der Rückmeldung zur Anfrage über die Beschwerdesituation im Bereich Infraschall bzw. tieffrequenten Geräuschen.....	86
Abbildung 18:	Anzahl der gemeldeten Beschwerdefälle bei Infraschall- und tieffrequente Geräuscheinwirkungen, Unterteilung nach der Jahreszahl der Beschwerden	87
Abbildung 19:	Häufigkeitsverteilung der Beurteilung im Beschwerdefall nach TA Lärm bzw. DIN 45680, N= 231.....	88
Abbildung 20:	Häufigkeit der beschriebenen Beeinträchtigung der Beschwerdeführer in den gemeldeten Fällen	88

Abbildung 21:	Häufigkeitsverteilung der festgestellten Einwirkungen im Beschwerdefall (N=231).....	89
Abbildung 22:	Prozentuale Verteilung der Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche auf die Quellengruppen (Gr.I bis Gr.XII) der Klassifizierung gemäß Abschnitt 7.2.1	90
Abbildung 23:	Verteilung der Geräuschquellen innerhalb der Quellengruppen.....	91
Abbildung 24:	Auswertung der Betroffenheitsanalyse der Behörden, Darstellung der gemeldeten Beschwerdefälle inkl. Internetrecherche	93
Abbildung 25:	Veranschaulichung eines in Pegelklassen eingeteilten Untersuchungsgebietes.....	98
Abbildung 26:	Frequenzbewertungskurven A, C und Z mit Grenzabweichungen nach Tabelle 2 der DIN EN 61672-1:2003 im Bereich unter 100 Hz (oG = obere Grenzabweichung, uG = untere Grenzabweichung)	112
Abbildung 27:	Frequenzbewertungskurven G nach ISO 7196:1995(E) und A, Ausschnitt bis 1.000 Hz	113
Abbildung 28:	Auswirkung von verschiedenen Windschirmen bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,2 m/s innerhalb eines Rotationsdruckfeldes, Mittelungszeit 60s.....	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mögliches Studiendesign einer Felduntersuchung zur Ermittlung der Wirkung von Infraschall	24
Tabelle 2:	Possible study design for a field study to determine the effects of infrasound	39
Tabelle 3:	Verteilung der Klassifizierungsmerkmale (Stand Juli 2013).....	50
Tabelle 4:	Anzahl der Beiträge mit Priorität 1 nach Länderzuordnung.....	51
Tabelle 5:	Referenzwerte in den Richtlinien verschiedener Länder für tieffrequenten Schall und in der ISO 226 nach [98].....	53
Tabelle 6:	Tätigkeitsabhängige spektrale Anhaltswerte für Infraschall entsprechend dem polnischen Standard PN-86/N-01338 aus [10]	54
Tabelle 7:	Übersicht Klassifizierungsmerkmale und deren „Ober- und Untergrenze“	76
Tabelle 8:	Punktematrix zur gewichtenden Bewertung der Merkmale.....	77
Tabelle 9:	Merkmalspunkte der Belästigungsklassen	78
Tabelle 10:	Mögliches Studiendesign einer Felduntersuchung zur Ermittlung der Wirkung von Infraschall	99
Tabelle 11:	Vorschlag von Befragungsinhalten im Rahmen einer Befragungsstudie zur Wirkung von Infraschallgeräuschen	105
Tabelle 12:	Schätzung des Aufwand einer Lärmwirkungsstudie über Infraschallimmissionen	108

Abkürzungen

dB	Dezibel, Hilfsmaßeinheit zur Kennzeichnung von Pegeln
f	Frequenz
Hz	Hertz, SI-Einheit für die Frequenz
L_{eq}	zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses eines über die Zeit T gemittelten Schalldruckquadrates zum Quadrat des Bezugsschalldruckes p_0 , en: equivalent continuous sound pressure level
$L_{F, max}$	zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des höchsten Wertes des Quadrates des gleitenden Effektivwertes des Schalldruckes bei gegebener Frequenz- und Zeitbewertung zum Quadrat des Bezugsschalldruckes p_0 (hier: Frequenzbewertung "Z" und Zeitbewertung "fast"), en: maximum level
L_N	N% - Überschreitungspegel Perzentilpegel, Schalldruckpegel bei gegebener Frequenz- und Zeitbewertung, der in N % der Fälle, z. B. der Messzeitintervalle, überschritten wird; N ist anzugeben, en: exceedance level
$L_{pA,LF}$	zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Quadrates des Effektivwertes des Schalldruckes bei einer gegebenen Frequenz- und Zeitbewertung zum Quadrat des Bezugsschalldruckes p_0 (hier Frequenzbewertung A, im tieffrequenten Frequenzbereich nach [169]), en: weighted sound pressure level
L_{Terz}	Schalldruckbandpegel, Schalldruckpegel in einem bestimmten Terzband; dabei ist das Frequenzband anzugeben, en: band sound pressure level
BibTeX	BibTeX ist ein Hilfsprogramm zur Erstellung bibliographischer Datenbanken, das Oren Patashnik entwickelt hat
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionschutzverordnung
BHKW	Block-Heizkraftwerk
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EEG	Elektroenzephalografie, eine Methode zur Messung der elektrischen Aktivität des Gehirns durch Aufzeichnung der Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche bzw. die grafische Darstellung der Messergebnisse
EMF	Elektromagnetische Felder
GPL-Lizenz	General Public License
ICBEN	International Commission on Biological Effects of Noise
ISO/TS	International Organization for Standardization/ Technical Specification
NORAH	Noise-Related Annoyance, Cognition, and Health; Lärmwirkungsstudie
oG	obere Grenzabweichung
RLT	Raumluftechnische Anlage
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TTS	Temporäre Hörschwellenverschiebung (Temporary Threshold Shift)
uG	untere Grenzabweichung

1 Zusammenfassung

Einleitung

Seit einigen Jahren klagen Bürgerinnen und Bürger vermehrt über Beeinträchtigungen durch Infraschall oder sog. Brummtöne. Dabei treten Fälle auf, in denen die Einwirkungen sowohl durch identifizierbare technische Anlagen als auch durch unbekannte Lärmquellen verursacht werden. Gerade bei anlagenbedingten Immissionen treten neben Infraschalleinwirkungen auch tieffrequente Schallimmissionen im Hörbereich auf. Aufgrund der großen Wellenlänge von Infraschallphänomenen von mehreren Metern und der äußerst geringen Abnahme von Infraschall über den Abstand gibt es auch zahlreiche Fälle von nicht identifizierbaren Infraschallimmissionen.

Die Bewertung und Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen erfolgt derzeit in Deutschland nach der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) in der Fassung von 1998 zusammen mit der DIN 45680 „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft“ von 1997. Diese Regelungen berücksichtigen nur Geräuschanteile, die eine definierte (mittlere) Hörschwelle überschreiten. Jedoch wird zunehmend in der Öffentlichkeit auf das als unzureichend erlebte Schutzniveau bei tieffrequenten Immissionen Bezug genommen und eine stärkere Begrenzung gefordert. Die mögliche enge kausale Bindung von akustischer Wahrnehmbarkeit (Hörschwelle) und Belästigungserleben muss dahingehend überdacht werden, dass es Personen mit abgesenkter Hörschwelle gibt. Gerade bei tiefen Frequenzen ist die Dynamik zwischen gerade wahrnehmbaren Geräuschen und der Schmerzschwelle im Vergleich zu den mittleren Frequenzen des Hörbereichs geringer. Es ist deshalb zu vermuten, dass bei Personen mit abgesenkter Hörschwelle bereits Belästigungen auftreten können, obwohl die mittlere Hörkurve noch nicht überschritten wird. Dabei ist derzeit noch weitgehend ungeklärt, welche extraauralen Wirkmechanismen zusätzlich zu einer Lästigkeit führen können.

Es besteht somit Forschungsbedarf bezüglich der Häufigkeit des Auftretens, Art und Umfang von Beeinträchtigungen sowie von möglichen Gefährdungen der menschlichen Gesundheit durch tieffrequente Geräusche und Infraschall. Ziel der Machbarkeitsstudie ist es, die Immissionsbelastung durch Infraschall und tieffrequente Geräusche wissenschaftlich aufzubereiten und damit eine Grundlage für weitergehende Untersuchungen zu schaffen. Hierzu wurden fünf Arbeitspakete bearbeitet:

1. Aufbereitung des Standes des Wissens über Infraschallauswirkungen auf den Menschen,
2. Identifizierung von Quellen, von denen Infraschallemissionen in nicht unerheblichem Maß ausgehen können,
3. Feststellung der potentiellen Betroffenheit der Bevölkerung in Deutschland durch Infraschall- und tieffrequente Geräuscheinwirkungen,
4. Entwicklung eines Studiendesigns für Wirkungsuntersuchungen über Infraschallimmissionen auf den Menschen,
5. Vorschläge für die Weiterentwicklung der vorhandenen Regelwerke zum Immissionsschutz hinsichtlich der Behandlung von Infraschall.

Aufbereitung des Standes des Wissens über Infraschallauswirkungen auf den Menschen

Der Ausgangspunkt der Untersuchung war eine eingehende Literaturrecherche. Hierfür wurden alle Literaturquellen herangezogen, die relevante Information versprochen. Über das Internet wurden fachspezifische Datenbanken wie PubMed und Medline abgefragt, die Datenbestände wissenschaftlicher Verbände aus der Akustik, von nationalen und internationalen Konferenzen und von Verlagen durchsucht. Zudem wurde über das Internet in Suchmaschinen mittels Stichworten recherchiert. Dabei wurden auch Foren von Bürgerinitiativen, Beiträge von Verbänden und Presseberichte ausgewertet. Der zusätzliche Informationsgewinn war allerdings beschränkt, da häufig bereits Bekanntes zitiert wird, die angegebenen Quellen oft nicht nachvollziehbar sind oder Meinungen dargestellt werden. Darüber hinaus wurde in Universitätsbibliotheken recherchiert. Konnten über das Internet zumeist nur Kurzfassungen von Beiträgen heruntergeladen werden, so wurden über die Bibliotheken ausschließlich Volltext-Fassungen bezogen.

Die Recherche reicht zurück bis in das Jahr 1950. In den frühen Veröffentlichungen stand meist die direkte physische Wirkung von tieffrequentem Schall und Infraschall im Mittelpunkt, die in der Regel mit Schalldruckpegeln oberhalb von 100 dB verbunden ist. Untersuchungen mit niedrigeren Pegeln waren dagegen selten und konzentrierten sich auf die Frage nach der Hörschwelle.

Betrachtet man einige exemplarische Untersuchungsergebnisse, wird deutlich, dass Infraschall ab gewissen Pegelhöhen vielfältige negative Auswirkungen auf den menschlichen Körper haben kann. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass viele der negativen Auswirkungen von Infraschalleinwirkungen die Bereiche Herz-Kreislaufsystem, Konzentration und Reaktionszeit, Gleichgewichtsorgane, das Nervensystem und die auditiven Sinnesorgane betreffen. Probanden klagten häufig über Schwindel- und Unbehaglichkeitsempfindungen bei Infraschallexposition.

Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse hat gezeigt, dass negative Auswirkungen von Infraschall im Frequenzbereich unter 10 Hz auch bei Schalldruckpegeln unterhalb der Hörschwelle nicht ausgeschlossen sind. Die ersten negativen Auswirkungen wurden bereits bei Schalldruckpegeln von ca. 75 dB festgestellt, wobei die Effekte auch aus Schallanteilen über der Hörschwelle (> 20 Hz) resultieren können. Für eine negative Auswirkung von Infraschall unterhalb der Wahrnehmungsschwelle konnten bislang keine wissenschaftlich gesicherten Erkenntnisse gefunden werden, auch wenn zahlreiche Forschungsbeiträge entsprechende Hypothesen postulieren.

Im Vergleich dazu beträgt die in den meisten Regelwerken des Lärmschutzes angewendete A-Frequenzbewertung ca. -70 dB bei 10 Hz. Der Immissionsrichtwert der TA Lärm von 25 dB(A) ist im Innenraum nachts noch zulässig, somit kann ein unbewerteter Schalldruckpegel von 95 dB nach der derzeitigen Rechtslage im Aufenthaltsraum einer Wohnung noch zulässig sein (ausgenommen sind Einzeltöne), die deutlich über den ersten beobachteten Infraschalleffekten bei ca. 75 dB liegen.

Aus einer Gesamtauswertung der erfassten Literaturstellen und Veröffentlichungen, ergeben sich wesentliche Fragestellungen und Unzulänglichkeiten im Hinblick auf den Infraschall:

- In der Literatur wird beschrieben, dass die Schwankungsstärke einen deutlichen Einfluss auf den Grad der Belästigung hat. Nimmt sie zu, nimmt die Belästigung zu. Dabei ist nicht allein das Maß der Pegelschwankung (Modulationsgrad), sondern auch die Frequenz der Pegelschwankung (Modulationsfrequenz) relevant. Dieser Einfluss wird in den bestehenden Verfahren zur Beurteilung der Belästigung von tieffrequenten

Geräuschen und Infraschall entweder gar nicht oder nur ansatzweise berücksichtigt. Hier besteht ein konkreter Ansatz für eine Verbesserung, da viele störende Geräuschsituationen eine deutliche Schwankung oder sogar Impulshaltigkeit aufweisen.

- Es fehlen Untersuchungen zu Wirkungsmechanismen in denen die Verbindung von Infraschall, tieffrequenter Schall und Hörschall einbezogen wird. Dabei wären in enger Zusammenarbeit von Medizinern und Akustikern entsprechende akustische Szenarien messtechnisch zu erfassen oder zu generieren, um praktische Problemfälle zu erforschen.
- Vielfach wird unterstellt oder beruht sogar auf eigenen Erfahrungen, dass man sich scheinbar an gewisse Dinge auf Dauer gewöhnen kann, so auch an Lärm, wenn er zum Beispiel nicht zu laut ist (Habituation). Im Allgemeinen tritt jedoch ein Gewöhnungseffekt nur scheinbar auf und ist oft das Resultat einer Verdrängungsstrategie. Eine solche Strategie scheint aber bei tiefen Frequenzen nur schwer möglich zu sein, denn mit steigender Dauer der Exposition nimmt die Empfindlichkeit zu (Sensibilisierung). Das wirft die Fragen auf: Gibt es dazu ein physiologisches Korrelat, das diesen Vorgang verstehen lässt? Gibt es eine Möglichkeit, diese Sensibilisierung auszuhalten oder sogar wieder rückgängig zu machen?
- Wird der Vorgang der Sensibilisierung verstanden, ist vielleicht auch erklärbar, warum nur ein gewisser Anteil der Bevölkerung sehr empfindlich reagiert? In sämtlichen Untersuchungen fehlt eine Erklärung, wodurch sich diese besonders belastigende Wirkung ergibt. Besteht ein direkter Einfluss auf mentale Prozesse? Von der Beantwortung dieser Frage hängt im Wesentlichen ab, welche Qualität ein Schutz gegen tieffrequenten Schall und Infraschall haben muss.
- Inwieweit eine Verbindung zu anderen medizinischen Phänomenen besteht ist bislang nicht geklärt. Eine Hypothese ist, dass durch tieffrequenten Schall und Infraschall neuronale Prozesse verursacht werden, die bei einem mehr oder minder leichten Anstoß durch einen akustischen Stimulus ein andauerndes „Eigenleben“ entwickeln.
- Unklar ist, ob die Wahrnehmungen von Infraschall rein akustischer Natur sind? Multimodale Stimulanz ist keine Seltenheit. Die Wirkungen modal verschiedener Reize können sich gegenseitig verstärken. Vibration in Kombination mit tieffrequentem Schall oder Infraschall kann besonders bei den Führern eines Verkehrsmittels (z. B. LKW, Bus) zu Störungen führen. In der Literatur wird diese Problematik nur vereinzelt behandelt.
- Eine im Zusammenhang mit Infraschall häufig untersuchte Geräuschquelle sind Windenergieanlagen. Die Veröffentlichungen zeigen, dass die Erfassung von Abstrahlung und Ausbreitung der Geräusche von Windenergieanlagen mit Unsicherheiten behaftet sind, die eine fundierte Geräuschprognose erschweren. Mit wachsender Höhe der Windenergieanlagen durchschneiden die Rotorblätter ein stärker variierendes Windprofil. Es ist daher fraglich, ob das Abstrahlungs- und Ausbreitungsmodell für kleinere Windenergieanlagen auf moderne, große Anlagen übertragbar ist. Aufgrund theoretischer Betrachtungen von Strömungsakustikern ist nicht davon auszugehen. Ein erweitertes Wissen über die genannten Vorgänge wäre aber nicht nur eine notwendige Voraussetzung für eine bessere Immissionsprognose. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten auch Hinweise für eine bessere Lärminderung von Windenergieanlagen liefern.
- Defizite zeigen sich auch in der Literatur im Hinblick auf einen Schutz gegen tieffrequenten Schall und Infraschall. Die physikalischen Gegebenheiten von ausgeprägt tieffrequenten Schallen erschweren einen wirksamen Lärmschutz. Sollen effektive bauliche Schallschutzmaßnahmen getroffen werden, so ist der Aufwand bezüglich eingesetzter Massen oder Volumina umgekehrt proportional zu den Frequenzen. Bei tieffrequentem Schall oder sogar bei Infraschall bedeutet dies in der Regel einen kaum

realisierbaren Aufwand. Eine Lösung des Problems bei Frequenzen unterhalb von 100 Hz könnte in der Anwendung der aktiven Lärminderung liegen, wie in verschiedenen Veröffentlichungen gezeigt wird. Dabei werden die Abstrahlungs- oder Ausbreitungsbedingungen durch aktive Systeme – bestehend aus Sensor (z. B. Mikrofon), Signalverarbeitung und Aktor (z. B. Lautsprecher) - verändert.

Als Ergebnis der Literaturrecherche liegt eine Datenbank mit ca. 1.200 Beiträgen vor. Die Beiträge sind nach Schlüsselwörtern und Relevanzkriterien abgelegt. Aus Gründen des Urheberrechtes ist es nicht möglich, die Datenbank mit den Volltexten öffentlich zugänglich zu machen. Eine Version, die zumindest die Quellenhinweise und – soweit vorhanden – Kurzfassungen enthält, wurde aber auf einem öffentlich zugänglichen Server abgelegt. Nähere Details zur Datenbank können auf der Webseite zu dem Forschungsvorhaben <http://www.infraschallstudie.de> abgerufen werden.

Identifizierung von Quellen, von denen Infraschallemissionen in nicht unerheblichem Maß ausgehen können

Für eine Bewertung und sinnvolle Begrenzung der Immissionen durch tieffrequente Geräusche und Infraschall wurde zunächst versucht die unterschiedlichen Phänomene (Infraschall, Brummen, tieffrequente Geräusche, sekundärer Luftschall) zu identifizieren und zu klassifizieren. Dies ist notwendig, weil mögliche unterschiedliche Wirkungsweisen auch unterschiedliche Herangehensweisen bei der Bewertung erfordern. Vermutlich ist eine Trennung zwischen Infraschall außerhalb des hörbaren Frequenzbereichs und tieffrequente Geräusche im hörbaren Frequenzbereich sinnvoll. Bei der Literaturschau zeigte sich allerdings, dass sowohl die Begriffe Infraschall und tieffrequenter Schall häufig synonym verwendet werden und auch eine klare Trennung im Hinblick auf die Wirkung, Ermittlung und Beurteilung nach derzeitigen Erkenntnissen nicht sinnvoll möglich ist. Als Grundlage wurde zunächst eine Bestandsaufnahme zum Auftreten und zu den Quellen von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen vorgenommen. Auf Basis einer Zusammenstellung der potentiellen Geräuschquellen wurden die folgenden Quellengruppen (Gr.I bis Gr.XII) anhand des technischen Charakters ermittelt:

- Gr.I. Raumluftechnische Anlagen, Bsp. Klima- und Lüftungsanlagen
- Gr.II. Baumaschinen, Bsp. Dieselrammen, Rüttelwalzen
- Gr.III. Anlagen von Energieerzeugung und -transport, Bsp. Windenergieanlagen, Biogasanlagen, Umspannwerke, Koronageräusche von Überlandleitungen
- Gr.IV. Verkehrstechnische Einrichtungen, Bsp. Schiffe, Lkw, Bahn
- Gr.V. Sieb- und Sortieranlagen, Bsp. Plansichter, Doppeldeckersieb
- Gr.VI. Kompressoren und Pumpen, Bsp. Hochdruckreiniger, Dampfstrahler
- Gr.VII. Transport, Bsp. Förderbänder, Vibrationsrinnen, Rohrleitungen
- Gr.VIII. Sonstige technische Anlagen, Bsp. Sägegatter, Auspacktrommeln, Druckmaschinen
- Gr.IX. Natürliche Quellen, Bsp. Erdbeben, Vulkanausbrüche, Meeresbrandung, Tiere
- Gr.X. Veranstaltungen, Bsp. Diskotheken, Openair-Veranstaltungen
- Gr.XI. Produktionsstätten, Bsp. Herstellungs- und Fertigungsbetriebe
- Gr.XII. Sonstiges, Bsp. Geschütze, Explosionen, Raketenstarts

Diese Auflistung zeigt, dass sich die möglichen Infraschallmittenten über nahezu sämtliche technischen Bereiche erstrecken und diese Quellen räumlich betrachtet häufig in unserer Umgebung bzw. unmittelbaren Nachbarschaft vorhanden sein können.

Die verschiedenen Einzelquellen und Quellengruppen können auch im tieffrequenten bzw. Infraschallbereich unterschiedliche Schwerpunkte in einzelnen Frequenzbereichen haben. Für ausgeprägt tieffrequente Geräusche kommen häufig auch natürliche Quellen in Frage. Gerade bei tieffrequenten Geräuschen ist zudem oftmals eine monochromatische Ausprägung (Tonhaltigkeit) gegeben. Insbesondere bei tonhaltigen Geräuschen können im Einwirkungsbereich (d. h. in Aufenthaltsräumen von Gebäuden) die raumakustischen Eigenschaften einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Immissionen haben. Aufgrund ihrer hohen Wellenlänge ($\lambda/2$ (20 Hz) $\approx$ 8,5 m) bilden tieffrequente Geräusche stehende Wellen in Räumen mit den entsprechenden Abmessungen aus (Raummoden), die den Höreindruck in Abhängigkeit von der Position im Raum verstärken können. Auch die raumakustischen Randbedingungen sollen daher bei der Klassifizierung betrachtet werden.

Klassifikation

Eine Systematik für die Beurteilung der Erheblichkeit von Infraschallimmissionen existiert bislang nicht. Daher wird die Beschreibung von Schallquellen, Ursachen und Wirkungen auf Basis von standardisierten Merkmalen durchgeführt. Auf dieser Basis können Zusammenhänge (zum Beispiel Lärmwirkungskorrelationen) erarbeitet werden. Hierzu ist eine Klassifizierung der Erkenntnisse über Infraschall und ausgeprägt tieffrequente Geräusche notwendig.

Ein klassischer Ansatz für eine Klassifizierung ist die Top-Down Klassifizierung. Hierbei werden zunächst die Klassen vorgegeben, anschließend die Merkmale ausgewählt und schließlich die Klassengrenzen gezogen. Als allgemeine Anforderungen an die Klassifizierung von Schallquellen können folgende Bedingungen genannt werden: Die Klassifizierung muss invariant gegenüber äußeren Einflüssen sein. Die Klassifizierung der Quellen sollte also möglichst unabhängig von den spezifischen Standortbedingungen (Orografie, Meteorologie, Abstand, Untergrundverhältnisse usw.) sein. Zudem müssen die Quellen eindeutig einer der Klassen zugeordnet werden können.

Aus der Heterogenität und Vielschichtigkeit der bekannten Infraschallquellen ergibt sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Parametern und Merkmalen anhand derer sich die Quellen charakterisieren und in Klassen einteilen lassen. Hierfür wurden wesentliche Klassen und Merkmale herausgearbeitet.

Aus der beim Immissionsschutz im Vordergrund stehenden Fragen nach der Art der schädlichen Umwelteinwirkung, dem betroffenen Schutzgut und dem Umfang oder dem Ausmaß der Beeinträchtigung ergibt sich eine sinnvolle Klassendefinition. Für Geräuscheinwirkungen durch Infraschall auf das Schutzgut Mensch, die geeignet sind, Gefahren, Nachteile oder Belästigungen herbeizuführen, ist der Grad der Beeinträchtigung des Wohlbefindens maßgebend. Deshalb wurden die Klassen mit Fokus auf das mit den Quellen einhergehende Belästigungspotential und dessen Umfang vorgenommen, sogenannte Lästigkeitsklassen gebildet.

Da die Klassifikation in vorliegender Arbeit nach dem Belästigungspotential der Quellen erfolgt, mussten hierfür geeignete Merkmale zur Quantifizierung gewählt werden. Des Weiteren sollte es möglich sein, anhand der Merkmale die zuvor festgelegten Klassen hinreichend zu definieren und zu beschreiben.

Grundsätzlich können unabhängig der zuvor definierten Klassen alle zu einer Quelle erhebbaren Daten als mögliche Merkmale herangezogen werden. Die erhebbaren Daten

entsprechen somit der Grundgesamtheit möglicher Merkmale. Da es möglich sein soll eine Quelle anhand der Merkmale eindeutig einer der Klassen zuordnen zu können, müssen auch klare Merkmalsgrenzen definiert werden können.

Im Hinblick auf die sich an der Belästigungssituation orientierenden Klassen und den zuvor genannten Anforderungen an die Merkmale, kommen nur Parameter in Frage, die in direkter Korrelation zur potentiellen Belästigung durch eine Quelle stehen und somit eine konkrete Aussage diesbezüglich liefern können.

Die Klassifizierung soll eine Unterscheidung des Belästigungspotentials von Infraschallquellen ermöglichen. Deshalb werden folgende Klassen vorgeschlagen:

- Klasse I: Starkes Belästigungspotential
- Klasse II: Mäßiges Belästigungspotential
- Klasse III: Bedingtes/Leichtes Belästigungspotential
- Klasse IV: Kein Belästigungspotential

Aufgrund der Zielsetzung, der hier vorgeschlagenen Klassifizierung, sowie den genannten Anforderungen an die Klassifizierung selbst und deren Merkmale, haben sich folgende akustischen Parameter als Merkmale als sinnvoll gezeigt:

- Überdeckung
- Pegel
- Frequenzbereich
- Pegelzeitverlauf
- Impulshaltigkeit
- Tonhaltigkeit.

Die zur Klassifizierung herangezogenen Daten beschränken sich im Wesentlichen auf bewährte Messgrößen, deren Ermittlung mit relativ hoher Genauigkeit im Freifeld durchgeführt werden kann. Unter welchen besonderen Voraussetzungen, Messbedingungen oder mit welchen besonderen Messverfahren diese Daten einer Infraschalleinwirkung ermittelt werden müssen sowie die damit einhergehenden Messfehler und Unsicherheiten sind bisweilen unbekannt.

Auf Basis der klassifizierten Merkmale der Schallquellen können Anlagen-Datenblätter erstellt und in einem Verzeichnis archiviert werden. Ziel der Anlagen-Datenblätter ist die systematische Erfassung von Geräuschquellen. Für das Anlagendatenblatt wurde ein konkreter Vorschlag erstellt. Auf dieser Grundlage könnten potentielle Gefährdungssituationen erkannt und ggf. bereits in der Herstellungs-, Projektierungs- oder Planungsphase vermieden werden. In der Untersuchung sind exemplarische Anlagendatenblätter als Lese- und Ausfüllbeispiele dargestellt.

Anhand eines dreistufigen Punktesystems kann eine differenzierte Gewichtung der einzelnen Merkmale in Form von Merkmalsstufen erfolgen.

Derzeit ist noch nicht abschließend geklärt, ob die Merkmalspunkte dem Belästigungspotential der einzelnen Kriterien umfassend gerecht werden. Um einen unterschiedlich starken Einfluss bzw. eine kombinatorische Wirkung der einzelnen Merkmale auf das Belästigungspotential zu berücksichtigen, werden zusätzlich Gewichtungsfaktoren berücksichtigt mit denen die Merkmalspunkte gegeneinander gewichtet werden. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass einzelne Quellen oder Quellgruppen unterschiedliche Merkmalspunkte benötigen, erfolgt der

Ansatz eines Gewichtungsfaktors. Hierdurch wird sichergestellt, dass die einzelnen Merkmale unterschiedlich stark und physiologisch korrekt (sofern notwendig) in der Klassifikation berücksichtigt werden können. Anhand der Summe der an eine Quelle vergebenen gewichteten Merkmalspunkte kann schließlich eine Zuordnung zu einer der Belästigungsklassen erfolgen. Die spezifische Gewichtung der einzelnen Merkmale sollte anhand von Laborstudien der Infraschallwirkung kalibriert werden.

Bewertung Klassifizierungssystem

Bezugnehmend auf die hier vorgeschlagene Klassifizierung gilt es in zukünftigen Untersuchungen insbesondere folgende Fragen zu klären:

- Inwiefern sind Synergieeffekte von Infraschall mit Hörschall vorhanden, und wie verhalten sich diese im Bezug auf das Belästigungspotential?
- Bei welchen Infraschallpegeln treten in welchem Umfang signifikante Effekte auf den Menschen auf?
- Welche Mess- und Beurteilungsgrößen (Pegel oder Ähnliches) sind geeignet, um den Infraschall zu beschreiben?
- Geht von Infraschallimmissionen in bestimmten Frequenzen ein besonderes Belästigungspotential und negative gesundheitliche Auswirkungen aus?
- Kommt es bei bestimmten Zeitverläufen von Infraschalleinwirkungen zu besonderen Belästigungssituationen (zum Beispiel Periodizitäten)?
- Geht von impuls- und tonhaltigen Infraschallimmissionen die gleiche belästigende Wirkung wie von derartigen Immissionen im Hörschallbereich aus?
- Haben bestimmte Merkmalskombinationen der vorgeschlagenen Klassifizierung besonders zu berücksichtigende Auswirkungen?

Unabhängig von den im Rahmen der Klassifizierung benötigten Parametern sind als Datenquellen die Herstellerangaben, Genehmigungsunterlagen und Befragung von Betroffenen zu nennen. Technische Literatur, die Messungen in Prüfständen bzw. generell Emissions- und Immissionsmessungen sind derzeit die wichtigsten Informationsquellen.

Mögliche Konflikte der vorgeschlagenen Klassifikation bestehen nach heutigem Kenntnisstand vor allem bei Situationen, in denen Infraschall oder tieffrequenter Schall durch maßgebend lästig empfundene „hochfrequente“ Geräuschanteile überdeckt werden oder umgekehrt und die jeweils überdeckten Geräuschanteile dadurch weniger störend empfunden werden. So sind beispielsweise Konfliktsituationen bekannt, die erst nach der Beseitigung einer tieffrequenten Lärmemission einer Heizungsanlage, durch die verstärkte Wahrnehmung von als störend empfundenem Gaststätten- oder Nachbarschaftslärm innerhalb eines Wohn- und Geschäftshauses, entstanden sind. Der Mechanismus zur Maskierung störender Umgebungsgeräusche wird beim Soundscape gezielt eingesetzt. Viele Betroffene nutzen zur Maskierung von störenden Hörschallen auch Beschallungsanlagen, Zimmerbrunnen oder Ähnliches.

In welchem Umfang solche Situationen auftreten, und wie mit ihnen umzugehen ist, wird sich erst in der Praxis zeigen und muss im Einzelfall geprüft und beurteilt werden. Die Erweiterung der vorgeschlagenen Klassifikation um eine „Sonderklasse“ für solche Anlagen könnte sich jedoch als notwendig erweisen.

Feststellung der potentiellen Betroffenheit der Bevölkerung in Deutschland durch Infraschall- und tieffrequente Geräuscheinwirkungen

Aus der Bevölkerung kommen immer wieder Hinweise auf das Auftreten von tieffrequenten Schallen, insbesondere dann, wenn diese nach Art und Ausmaß geeignet sind, Belästigungen hervorzurufen. Anlaufstelle für Beschwerden über Lärmbelästigungen sind in Deutschland im Regelfall die jeweiligen Immissionsschutzbeauftragten der Landkreise. In besonderen Konfliktsituationen (unter die tieffrequente Geräusche und Infraschalleinwirkungen wohl zumeist fallen dürften) werden auch die Fachaufsichtsbehörden, die Landesumweltämter, eingebunden. Bislang ist die Betroffenheit der Bevölkerung durch Infraschall und tieffrequente Geräusche wenig dokumentiert.

Zur Ermittlung einer konkreten Belastungssituation und der Häufigkeit von Beschwerden über tieffrequente Geräuschemissionen wurde eine Behördenabfrage zu dieser Thematik durchgeführt. Die Behördenabfrage erfolgte in drei Stufen:

1. In einem ersten Schritt wurden die Landesämter für Umwelt angeschrieben, um sich zu der Beschwerdesituation und der Betroffenheit der Bevölkerung gegenüber Infraschall zu äußern. Anschließend wurden ausgewählte Landesumweltämter telefonisch kontaktiert, um weitergehende Informationen zu erhalten.
2. Im nächsten Schritt wurden die Unteren Immissionsschutzbehörden in den einzelnen Ländern angeschrieben. Erste telefonische Kontaktaufnahmen bei einzelnen Unteren Immissionsschutzbehörden in Bayern haben ergeben, dass Beschwerdekataster individuell geregelt werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Fragebogen erstellt.
3. In der dritten Stufe wurden die Fragebögen Anfang 2013 versendet. Dabei wurden bundesweit rund 400 Untere Immissionsschutzbehörden angeschrieben. Die Rückmeldung und Auswertung der Fragebögen wurde im Juni 2013 abgeschlossen. Die Beteiligung (der Rücklauf) lag bei 34,2 %.

Die Analysen der Rückmeldungen haben gezeigt, dass bislang kein einheitliches Beschwerdekataster geführt wird, zudem fehlen standardisierte Methoden für eine vergleichbare und systematisch geordnete Datenbasis. Diese Problematik wird dadurch verschärft, dass derzeit den Infraschallbereich (0,1 Hz bis 20 Hz) keine allgemeingültige Mess- und Beurteilungsvorschrift existiert.

Bei den Beschwerden fehlen objektive Nachweise über die Höhe der Geräuscheinwirkungen häufig vollständig. Eine Vielzahl von Interessenvertretungen mit Internetseiten und Öffentlichkeitsarbeit führt zu einer unübersichtlichen Betroffenheitssituation in den Broadcasts. Hier dominieren die Einträge von einzelnen Betroffenen, die meist nur stark verkürzt ihre Vermutungen über die Ursache der Geräuscheinwirkungen äußern und ihre Symptome qualitativ beschreiben, ohne einen Bezug zu akustischen Kenngrößen oder anderen objektiven Daten anzugeben.

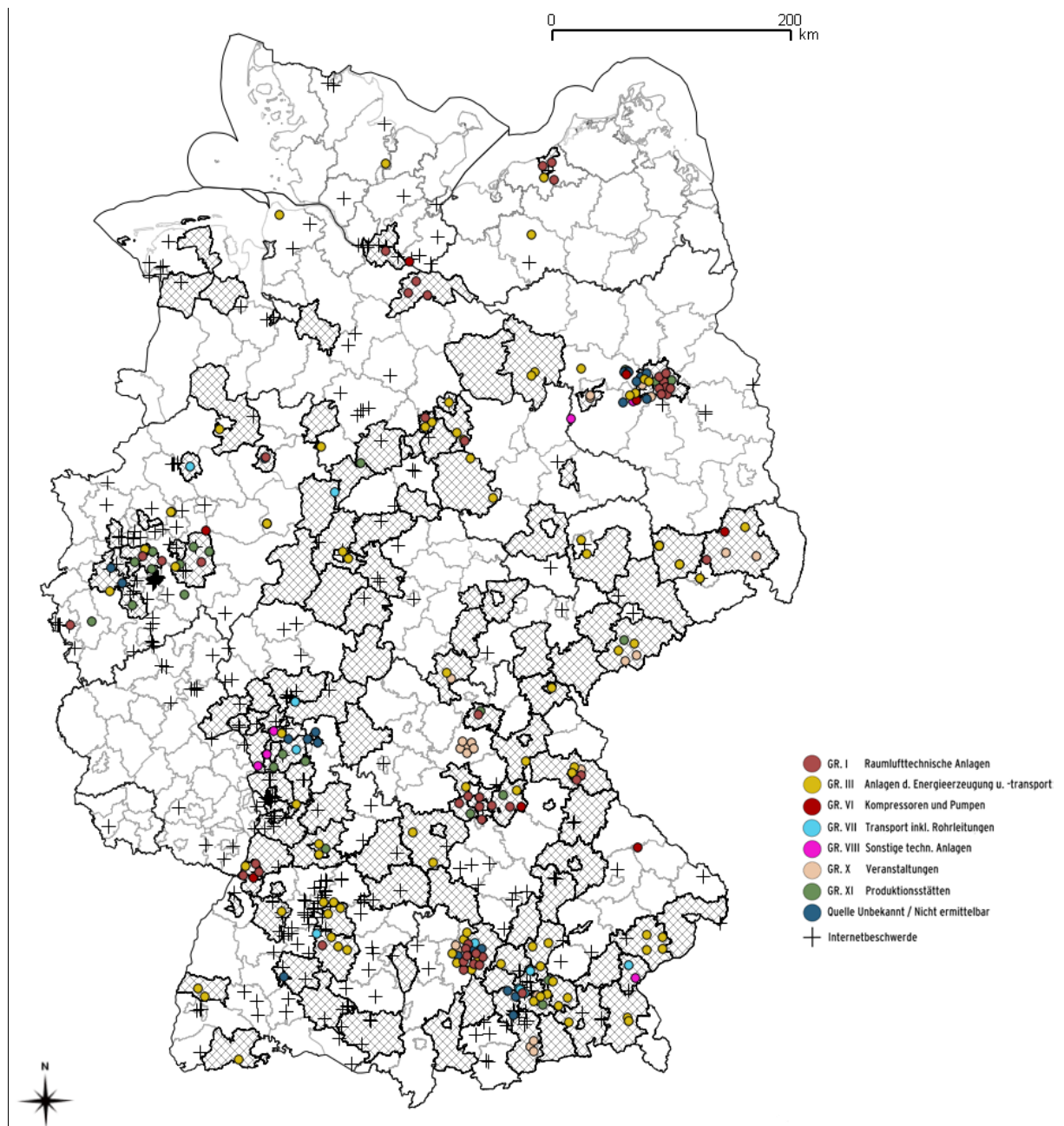
Zukünftig wären der Aufbau und die Pflege eines einheitlichen zentralen Beschwerdekatasters für Infraschall und tieffrequente Geräusche sinnvoll. Eine Archivierung von vorhandenen Messungen der linearen Terzpegel des Schalldrucks nach DIN 45680 im Frequenzbereich von 8 bis 100 Hz könnte für eine erste vergleichende Auswertung akustischer Kenndaten genutzt werden. Hierzu können behördliche Messungen und Sachverständigengutachten, aber auch anlassbezogenes Monitoring durch die Betroffenen selbst herangezogen werden. Allerdings sollten im Zusammenhang mit Schallpegelmessungen zukünftig möglichst auch die Mess- und

Mittelungszeiten, die Klassenmerkmale (gemäß der vorgeschlagenen Klassifizierung) und weitere Kenngrößen, die für eine erhöhte Belästigung ursächlich sein können (zum Beispiel Vibrationen, Sekundäreffekte, meteorologische Einflüsse etc.) erhoben werden. Die Angaben könnten als Grundlage für eine mögliche multidimensionale Grenzwertfindung für den Infraschallbereich genutzt werden.

Zusammenfassend ergeben sich aus der durchgeführten Betroffenheitsanalyse folgende Erkenntnisse:

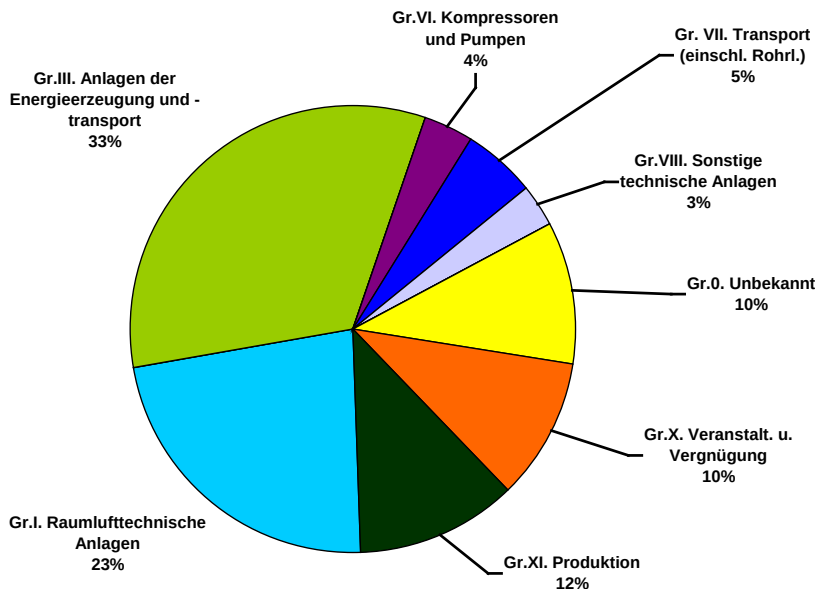
- Regionale Schwerpunkte konnten nicht mit statistisch hinreichender Sicherheit gefunden werden. Hierfür war insbesondere die Anzahl und Repräsentanz der übermittelten Beschwerdefälle zu gering. Tendenziell wurde in Süddeutschland eine höhere Anzahl an Beschwerdefällen genannt.

Abbildung 1: Auswertung der Betroffenheitsanalyse der Behörden, Darstellung der gemeldeten Beschwerdefälle inkl. Internetrecherche



- Am Häufigsten führten Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes (33,0 % der Fälle) sowie Raumluftechnische Anlagen (22,8 % der Fälle) zu Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche.

Abbildung 2: Prozentuale Verteilung der Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche auf die Quellengruppen (Gr.I bis Gr.XII) der Klassifizierung gemäß Abschnitt 7.2.1



- Als häufigste Quellenart für Beschwerden wurden Wärmepumpen mit einem Gesamtanteil von 9,3 % genannt. Von den Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes führten Biogasanlagen mit 8,4 %, Blockheizkraftwerke mit 6,5 % und Windenergieanlagen mit 3,3 % am Häufigsten zu Konflikten.
- Praktisch relevante Quellen sind Wärmepumpen, Biogasanlagen, Blockheizkraftwerke, Windenergieanlagen, Kälte- und Klimaanlage, Lüftungen und Gebäudeheizungen sowie Pressen/Stanzen in der Gruppe der Produktionsstätten.
- Für die systematische Erforschung der Lärmwirkungen sollten Anlagen mit einer hohen Anzahl von Betroffenen gewählt werden, wie zum Beispiel Blockheizkraftwerke, Windenergieanlagen und Pressen/ Stanzen von Produktionsbetrieben. Zur praktischen Konfliktvermeidung und Verbesserung der Wohnqualität im Hinblick auf Infraschall und tieffrequente Geräusche wären daher vorrangig Forschungen über Wärmepumpen, Kälte- und Klimaanlage, Lüftungs- und Heizungsanlagen im Wohnungsumfeld geeignet.

Es gilt es zu beachten, dass die Befragung der Behörden nur einen kleinen Teil der tatsächlich vorhandenen Konfliktsituation bezüglich der Einwirkungen von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen widerspiegelt. So ist davon auszugehen, dass die individuelle Toleranzschwelle der betroffenen Bürgerinnen und Bürger dazu führen kann, dass nur ein geringer Anteil von Konflikten den Behörden gemeldet wird. Um ein genaueres Bild der Situation zu erhalten, könnte zum Beispiel die Häufigkeit von Einwendungen in Planverfahren und gerichtlichen Auseinandersetzungen ausgewertet werden.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein mögliches Studiendesign ausgearbeitet, das insbesondere auf die Erforschung der Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen ausgelegt wurde. Für eine Studie sollten Anlagen mit einer hohen Anzahl von

Betroffenen gewählt werden. Dabei sind insbesondere geeignete Messmethoden, Prognoseverfahren und die Festlegung von Zumutbarkeitsgrenzen zu untersuchen.

Entwicklung eines Studiendesigns für Wirkungsuntersuchungen über Infraschallimmissionen auf den Menschen

Aufbauen auf den Erkenntnissen aus der Literaturanalyse, der Identifikation und Klassifikation von Anlagen/Quellen und der Abschätzung der potentiellen Betroffenheit in der bundesdeutschen Bevölkerung wurde in diesem Arbeitspaket ein Studiendesign zu detaillierten Wirkungsuntersuchungen konzipiert. Im Vordergrund steht dabei die Wirkung von technischen Infraschallquellen.

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse ist eine Feldstudie einer Laborstudie vorzuziehen. Das Prinzip der konzipierten Feldstudie ist es, die Wirkungen bei Menschen, die nicht oder nur in geringem Maße einer Infraschallquelle ausgesetzt sind mit den Wirkungen bei Menschen, die in höherem Maße von einer Infraschallquelle betroffen sind zu vergleichen. Die Infraschall-Exposition stellt dabei die unabhängige Variable und die zu betrachtenden Wirkungen die abhängigen Variablen dar. Entsprechend kommen für die Feldstudie die (quasi-experimentellen) Ansätze der sozio-akustischen Lärmwirkungsforschung in Betracht. Grunddesign ist dabei ein nach verschiedenen Expositionsabstufungen geschichtete Zufallsstichprobe von Untersuchungsteilnehmern aus Wohngebieten im Umfeld einer Infraschallquelle.

Für die Feldstudie zum Infraschall wird empfohlen die Stichprobe von Untersuchungspersonen in einem Untersuchungsgebiet geschichtet nach einem für die Detektion von Infraschall geeigneten Pegelmaß (z. B. L_{eq} mit Z- und G-Bewertung) zu ziehen. Dabei sollen wenigstens drei Einteilungen (niedrige, mittlere, hohe Pegelklasse) vorgesehen werden. Pro zu untersuchende Art von Infraschallquelle sollen, um wissenschaftliche Wirkungsaussagen über lokale Verhältnisse hinaus verallgemeinern zu können, je Pegelklasse wenigstens zwei räumlich getrennte Untersuchungsräume definiert werden. Das heißt, es sollten pro Art der Infraschallquelle mindestens zwei Quellenstandorte und deren umgebende Wohngebiete ausgewählt werden. Die genannten sechs Klassifizierungsmerkmale werden als akustische Beschreibungsgrößen der zu untersuchenden Infraschallquellen herangezogen um den jeweiligen Effekt der einzelnen Merkmale auf die untersuchten Wirkungen zu analysieren.

Im Hinblick auf die genannten Infraschallquellen wird vorgeschlagen, zwei verschiedene Quellentypen zu untersuchen: Einen Typ mit einer Infraschallbelastung nur tagsüber, dies wäre etwa eine Gewerbeanlage (zum Beispiel ein Sägewerk) und einen Typ mit einer Infraschallbelastung tags und nachts (zum Beispiel Blockheizkraftwerk, Windenergieanlage).

Weiterhin gilt es abzugrenzen, in welchem Maße sich die Wirkung von Infraschall ändert, wenn eine Fremd- bzw. Störschallquelle (z. B. Verkehrslärm, Lärm aus der Nachbarschaft oder Überlagerung durch Lärm von der Infraschallquelle im hörbaren Schallbereich) vorhanden ist. Deshalb wird angeregt, bei der Auswahl der Infraschallquellen und Untersuchungsgebiete noch die Unterscheidung mit hohem / geringem Anteil durch Fremdschall einzuführen.

Ausgehend von dem vorgeschlagenen Mindeststichprobenumfang würde ein Untersuchungsplan mit den Faktoren Infraschallpegel (3 Stufen), Quellentyp (2 Stufen), Fremdschallquelle (2 Stufen) und Standort pro Infraschallquelle (2 Stufen) eine Anzahl von $3 \times 2 \times 2 \times 2 = 24$ Untersuchungszellen à 30 bis 40 Personen resultieren. Die Gesamtstichprobengröße läge bei ca. 720 bis 960 Personen.

Das in folgender Tabelle abgebildete Untersuchungsdesign fasst die vorgeschlagenen Aspekte des Studienplans zusammen.

Tabelle 1: Mögliches Studiendesign einer Felduntersuchung zur Ermittlung der Wirkung von Infraschall

Infraschall- belastung (Quellentyp)	Bsp. Quelle	Fremdschall- quelle	Untersuchungsstandort pro Art der Infraschallquelle					
			Standort A			Standort B		
			Pegelklasse (z.B. L_{Geq})					
			niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
Belastung tags	Gewerbeanlage (z. B. Sägewerk)	hoch	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40
		gering	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40
Belastung tags und nachts	Blockheizkraftwerk, Windenergieanlage	hoch	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40
		gering	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40
Summe			120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160
			360 - 480			360 - 480		
			720 - 960					

Grob eingeteilt erfolgt die Durchführung der Infraschall-Feldstudie in vier Schritten:

- 1) Auswahl der zu untersuchenden Infraschallquellen und Wohngebiete inklusive Screeningmessungen.
- 2) Akustische, messtechnische Grundlagenermittlung zur Erfassung der individuellen Infraschallexposition von Untersuchungsteilnehmern.
- 3) Durchführung der Wirkungserhebungen in den ausgewählten Wohngebieten.
- 4) Schallmessungen in den Wohnräumen der an der Untersuchung teilnehmenden Personen.

Die Feldstudie kann dabei modularartig aufgebaut werden, in dem zunächst in einem Modul der Quellentyp „Belastung tags“ und in einem weiteren Modul der Quellentyp „Belastung tags und nachts“ untersucht werden kann.

Statistische Analysen

Die statistischen Analysen zielen im Wesentlichen darauf ab, Aussagen zur Expositions-Wirkungsbeziehungen treffen zu können.

In deskriptiven Analysen sollten die Häufigkeitsverteilungen der erhobenen Expositionsmaße und Befragungsvariablen zunächst dargestellt werden.

In Zusammenhangsanalysen (Korrelationsberechnungen) werden Richtung und Stärke der Zusammenhänge zwischen Expositionsmaßen und den Wirkungsvariablen zum Infraschall untersucht. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Expositionsmaße zu identifizieren, die die engsten Beziehungen zu den erhobenen Wirkungen aufweisen. Aber auch zwischen den weiteren in den Befragungen erhobenen Variablen (Moderatoren/Mediatoren) einerseits und den Expositions- als auch Wirkungsvariablen andererseits sollen statistische Zusammenhangsanalysen vorgenommen werden. Daran schließen sich regressions- und varianzanalytische Auswertungsverfahren zur Modellierung der Wirkung von Infraschalllärm anhand von Expositionsmaße und weiteren identifizierten Einflussfaktoren.

Für die konzipierte Feldstudie erfolgte eine Grobkostenschätzen, die einen Rahmen für den erforderlichen Aufwand aufzeigt.

Weiterentwicklung des Normenwerkes

Bisher erfolgt die Ermittlung und Beurteilung von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen in der Verwaltungspraxis ausschließlich nach TA Lärm und DIN 45680. Die darin stark an der Bewertung von Geräuschen im - eindeutig als Hörbereich zuordenbaren - Frequenzbereich angelegte Vorgehensweise sollte derart ergänzt werden, dass die Besonderheiten bei der Wahrnehmung und die Wirkungen von Infraschall umfassend und adäquat berücksichtigt werden. Dabei sollte jedoch nicht ausschließlich auf die Hörwahrnehmung Rücksicht genommen werden, auch der Frequenzbereich unter 8 Hz sollte im ganzheitlichen Immissionsschutz berücksichtigt werden.

Grundlage für eine regelungsspezifische Bewertung ist allerdings eine einheitliche Vorgehensweise bei der Messung und insbesondere der Prognose von Immissionen aus Infraschall und ausgeprägt tieffrequenten Geräuschen zur Quantifizierung der belästigenden Einwirkung.

Da tieffrequente Schalle besonders innerhalb von Aufenthaltsräumen zu Belästigungen führen, ist ein ausreichender Schutz im Innenraum anzustreben. Somit ist sowohl bei der Prognose als auch bei der Messung die bau- bzw. raumakustische Situation zu berücksichtigen.

Für die beiden Ermittlungswege (Prognose und Messung) sind im Rahmen von weiteren Untersuchungen Konzepte zu erarbeiten, die die Besonderheiten von tieffrequenten Schallen und Infraschall auch im Hinblick auf Ihre Wirkungen angemessen berücksichtigen. Das Ziel, die Abschätzung einer Belästigung aus den Messwerten praxistauglich zu gestalten, kann mit dem Einbezug weiterer psychoakustischer Größen verbessert werden.

Vielfach wird von Betroffenen die (relativ langsame) Modulation des Geräusches als ein sehr störendes Merkmal aufgeführt. Eine psychoakustische Größe, mit der dies beispielsweise zu erfassen wäre, ist die Schwankungsstärke.

Es ist davon auszugehen, dass höhere Frequenzanteile der Geräusche zu den bekannten Belästigungen führen. Die Annahme stützt sich darauf, dass die Spektren zu höheren Frequenzen (zweistelliger Hertzbereich) in der Regel weniger steil abfallen als die Hörschwelle, sodass es in diesem Bereich häufiger zu einer Überschreitung der Hörschwelle bzw. aurale Wahrnehmungsschwelle kommt.

Auch wenn zunächst hilfsweise die Hörschwelle als Maßstab herangezogen wird, bleiben noch Fragen offen. Die den Standards zugrunde gelegte Hörschwelle beruht auf Messungen bei Normalhörenden mit einzelnen Sinustönen. Es kann aber gezeigt werden, dass komplexe Geräusche auch schon dann wahrnehmbar sind, wenn die einzelnen Komponenten unterhalb der Hörschwelle liegen. Eine weitere Diskrepanz besteht darin, dass die tieffrequenten Geräusche häufig in der Amplitude stark schwanken (soz. pulsieren) und damit Adaptionsvorgänge im Gehör auslösen, die ebenfalls zu einer erhöhten Wahrnehmung führen. Über dies hinaus scheinen die tieffrequenten Schalle und der Infraschall bei längerer Exposition bei den Betroffenen zu einer erhöhten Wahrnehmung zu führen.

Eine weitere offene Frage ist, weshalb die Betroffenen in der Regel stark mental beeinträchtigt sind. Ähnliche Beobachtungen sind bei anderen Lärmeinwirkungen bislang nicht zu machen. Ob ein direkter Einfluss auf Hirnfunktionen besteht und dieser deshalb besteht, weil die Hirnaktivitäten den gleichen Frequenzbereich belegen, bleibt zunächst eine noch nicht belegte

Hypothese. Die Vorstellung, dass dies so sein könnte, verstärkt die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen in dieser Richtung.

Neuronale Messungen von Betroffenen (zum Beispiel EEGs) könnten hier weiteren Aufschluss geben. Sie können möglicherweise auch darüber Aufschluss geben, weshalb tendenziell nur ein (geringer?) Teil der Bevölkerung sehr empfindlich ist. Es sollte eine Hauptaufgabe einer erweiterten Untersuchung sein, diesen vielfach gemachten Beobachtungen auf den Grund zu gehen.

Eine nachhaltige Konfliktbewältigung erfordert eine ganzheitliche Beurteilung, die Festlegung von Grenzwerten sowie standardisierte und genormte Prognoseverfahren. Pauschale Ansätze, die eine Prognosesituation mit dem Ziel einer Konfliktbewältigung einseitig überschätzen, wie beispielsweise die Festlegung von Mindestabständen, erscheinen ohne fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse über die Wirkmechanismen der Geräuschquellen als nicht sachgerecht.

2 Summary

Introduction

Citizens have increasingly complained about detrimental effects caused by infrasound or the so-called hum phenomena in recent years. This includes cases in which these effects were caused by both identifiable technical installations and unknown sources of noise. Especially in the case of immissions from technical installations, infrasound effects also occur in addition to low frequency sound immissions in the audible range. Due to the long wavelength of infrasound phenomena of multiple metres and the extremely small absorption of infrasound over the distance, there are also many cases of non-identifiable infrasound immissions.

The assessment and evaluation of low frequency noise is currently performed in Germany according to the Technical Instructions on Noise Abatement (*TA Lärm*) in its 1998 version together with DIN 45680 Measurement and Assessment of Low Frequency Noise Immissions in the Neighbourhood of 1997. These regulations just consider noise components that exceed a defined (medium) auditory threshold. However, the public increasingly refers to the insufficient level of protection against low frequency immissions and demands stronger limitations. The potentially close causal relationship between acoustic perceptibility (auditory threshold) and the experiencing of noise pollution must be reconsidered with regard to persons who have a lowered auditory threshold. Especially in cases of low frequencies, the dynamics between perceptible noises and the pain threshold are lower in comparison to the medium frequencies of the audible range. This is why there is a suspicion that persons with a lowered auditory threshold could already experience annoyances even though the hearing curve for medium frequencies has not yet been exceeded. It is still largely unclear at present which extra-auditory mechanisms of action could lead to additional annoyance.

Consequently, there is a need for research with regards to the frequency of occurrence, type and scope of adverse effects, as well as the potential hazards to human health due to low frequency noise and infrasound. The objective of the feasibility study is the scientific analysis of noise pollution caused by infrasound and low frequency noise immissions and creating a basis for further research. Five work packages were compiled for this purpose:

1. Processing the state of knowledge about the effects of infrasound on human beings
2. Identification of sources from which significant infrasound emissions could originate
3. Determination of how much the population in Germany is potentially affected by infrasound and low frequency noise exposure
4. Development of a study design to research the effects of infrasound immissions on human beings
5. Generation of suggestions for the further development of existing regulations on immission control concerning the treatment of infrasound

Processing the State of Knowledge about the Effects of Infrasound on Human Beings

An extensive literature review was the starting point of this study. All literature sources that promised relevant information were used. Subject-specific databases such as PubMed and Medline were scanned and the databases of scientific associations in the field of acoustics, national and international conferences and publishers were searched. Furthermore, Internet research was performed with search engines using keywords. Forums of citizens' initiatives, contributions of associations and press reports were also evaluated. However, the additional gain of information was limited because familiar facts are often cited, the quoted sources are not traceable or opinions were presented. Moreover, research was performed in university libraries. Just short versions of articles were usually available for download from the Internet, so the full text versions were exclusively obtained from the university libraries.

The research extends back to 1950. The direct physical effect of low frequency sound and infrasound that was generally related to sound pressure levels above 100 dB was the focus of early publications. In contrast, studies with lower levels were rather rare and concentrated on the issue of the auditory threshold.

A look at some of the research findings makes it apparent that infrasound can have a multitude of adverse effects on the human body at certain sound levels. In summary it can be stated that many of infrasound's adverse effects have an impact on the cardiovascular system, concentration and reaction times, organs of equilibrium, the nervous system and the auditory sense organs. Test persons frequently complained about vertigo and sensations of uneasiness when exposed to infrasound.

A comparison of the research findings has shown that the adverse effects of infrasound in the frequency range below 10 Hz also cannot be excluded at sound pressure levels below the auditory threshold. The first adverse effects were already observed at sound pressure levels of approx. 75 dB. However, these effects could result from the part of sound (> 20 Hz) above the hearing threshold. Currently there is no scientifically validated knowledge about negative effects of Infrasound below the hearing threshold, even if many research contributions postulate corresponding hypotheses.

In comparison to this, most noise protection regulations use an A-weighting of approx. 70 dB at 10 Hz. The binding immission values of the Technical Instructions on Noise Abatement of 25 dB(A) is still permissible in interior spaces at night, which means that a non-valuated sound pressure level of 95 dB could still be permissible in the living spaces of a dwelling according to the current legal situation (except individual sounds), significantly exceeding the initially observed infrasound effects at approx. 75 dB.

A complete evaluation of literature sources and publications results in essential issues and inadequacies with regard to infrasound:

- According to the literature, the amplitude of the fluctuation has a clear impact on the degree of annoyance. If it increases, the annoyance increases. Not only the degree of modulation, but also the modulation frequency is relevant in this case. This influence is either not considered at all (or just to some extent) in the existing assessment methods for the degree of annoyance for low frequency noise and infrasound. This represents a concrete approach for improvement because many disturbing noise situations exhibit significant variation or even impulsiveness.
- There is a lack of studies on interaction mechanisms that integrate the combination of infrasound, low frequency sound and audible sound. This would necessarily include the

close cooperation of physicians and acousticians to record or generate measurements of respective acoustic scenarios for researching problematic cases in the practice.

- It is often suggested or reported on the basis of an individual's experience that people can seemingly become accustomed to certain things over time such as noise if it is not too loud (habituation). However, this habituation effect just ostensibly appears in general and is often the result of a repression strategy. Such a strategy seems to be hardly possible in the case of low frequencies because sensitivity increases with rising duration of the exposure (sensibilisation). This brings up new questions: Are there any physiological correlates that help in understanding the process? Is it possible to endure this sensibilisation or even reverse it?
- Once the process of sensibilisation is understood, it is maybe also possible to explain why just a small portion of the population reacts in an extremely sensitive way. All studies lack an explanation for what causes this particularly annoying effect. Does it have a direct influence on mental processes? The required quality of the protection against low frequency sound and infrasound largely depends on the answer to this question.
- The degree to which there is a correlation with other medical phenomena is still unclear. One hypothesis states that low frequency sound and infrasound trigger neuronal processes that develop a permanent "life of their own" following a more or less minor acoustic stimulus.
- It is unclear whether the perception of infrasound has a purely acoustic nature. Multi-modal stimulation is not uncommon. The effects of various modal stimuli can amplify each other. Vibration in combination with low frequency sound or infrasound can especially result in disturbances for drivers of vehicles (such as trucks and buses). This issue is only occasionally covered in the literature.
- Wind energy plants are a frequently studied source of noise in connection with infrasound. The publications show that the measurement of emission and propagation of noise from wind energy plants is plagued by uncertainties that complicate a substantiated noise forecast. With an increasing height of the wind energy plants, the rotor blades cut through an even more varied wind profile. It is therefore questionable whether the emission and propagation models of smaller wind energy plants can be applied to more modern and larger wind farms. This is very unlikely given the theoretical observations of aeroacoustic scientists. Deeper knowledge of the above-mentioned processes would not only be a prerequisite of better immission forecasting, but the acquired knowledge could also provide information for an improved noise reduction of wind energy plants.
- Deficits in the literature are also prevalent with regard to the protection against low frequency sound and infrasound. The physical realities of distinct low frequency sounds complicate effective noise protection. For effective structural noise abatement measures, the effort concerning deployed mass or volumes is reciprocally proportional to the frequencies. In case of low frequency sound or even infrasound this generally means a hardly feasible effort. One solution for the problem with frequencies below 100 Hz could be in the application of active noise abatement as is shown in various publications. In this process, the emission and propagation conditions are modified by active systems that consist of a sensor (e.g. microphone), signal processor and actor (e.g. loudspeaker).

A database containing approx. 1,200 articles is available as the result of the literature review. The articles are filed by keywords and relevance criteria. It is not possible to provide public access to full texts in the database due to copyright reasons. However, one version that at least contains source references and abstracts (if any) is available on a publicly accessible server.

More details on the database can be accessed on the website of this research project at <http://www.infraschallstudie.de>.

Identification of Sources from Which Significant Infrasound Emissions Could Originate

For the assessment and meaningful limitation of immissions through low frequency noise and infrasound, an initial attempt was made to identify and classify the different phenomena (infrasound, humming sound, low frequency noise and secondary airborne sound). This is necessary because possibly varying mechanisms of action also require different approaches in their assessment. It presumably makes sense to separate between infrasound outside of the audible frequency range and low frequency noise within the audible frequency range. However, the literature review showed that the two terms of infrasound and low frequency sound were frequently used synonymously and that a clear separation with regard to their impact, determination and assessment is not possible in a meaningful way on the basis of current knowledge. To establish a foundation, an initial survey was performed on the occurrence and sources of infrasound and low frequency noise. On the basis of a compilation of potential noise sources, the following groups of sources (Group I to Group XII) were determined according to their technical character:

- Gr.I. Air-conditioning and ventilation systems
- Gr.II. Construction machinery, e.g. diesel hammers and vibratory rollers
- Gr.III. Energy generation or transport facilities, e.g. wind energy plants, biogas plants, substations and aureole noise of transmission lines
- Gr.IV. Transportation facilities for ships, trucks and trains
- Gr.V. Sieving and sorting plants, e.g. sifters and double deck sifters
- Gr.VI. Compressors and pumps, e.g. high pressure cleaners and steam blasters
- Gr.VII. Transport, e.g. conveyor belts, vibration chutes and pipelines
- Gr.VIII. Other technical facilities, e.g. saw gates, shake out drums and printing machines
- Gr.IX. Natural sources, e.g. earthquakes, volcano eruptions, sea surf and animals
- Gr.X. Events, e.g. discotheques and open-air events
- Gr.XI. Production facilities, e.g. manufacturing and production plants
- Gr.XII. Other, e.g. cannons, explosions and rocket launches

This list illustrates that the range of possible infrasound emitters covers virtually all technical areas and that these sources could frequently be present in our environment and/or immediate vicinity from a spatial perspective.

The various individual sources and the groups of sources can also have differing focuses in individual frequency ranges in the low frequency and/or infrasound range. Natural sources are frequently the source of pronounced low frequency noise. Furthermore, especially low frequency noises often also exhibit monochromatic characteristics (tonality). Particularly in the case of tonal noises, room acoustic properties can have an influence on the perception of immissions in its sphere of influence (i.e. in living spaces of a dwelling). Due to their long wavelength ($\lambda/2$ (20 Hz) $\approx$ 8.5 m), low frequency noises build standing walls in rooms with the corresponding dimensions (room modes) that can amplify the hearing impression depending on the position in the room. Therefore, the room acoustic framework conditions should also be considered in the classification process.

Classification

A classification system for assessing the relevance of infrasound immissions does not exist at this time. The description of sound sources, causes and effects is therefore performed on the basis of standardised characteristics. Connections (such as noise impact correlations) can be developed on this basis. This requires a classification of the findings about infrasound and distinct low frequency noise.

The top-down classification is a traditional approach to classification. In this process, the classes are first designated, then the characteristics are selected and finally the class boundaries are defined. The following conditions are general requirements for the classification of sound sources: The classification must be invariant towards external influences. The classification of sources should be as independent as possible from specific local conditions (orography, meteorology, distance, subsoil conditions, etc.). Furthermore, it must be possible to unambiguously assign the sources to one of the classes.

The heterogeneity and complexity of the known infrasound sources results in a multitude of different parameters and characteristics by means of which the sources can be characterised and assigned to classes. Major classes and characteristics were developed for this purpose.

A meaningful definition of classes can be derived from the issues that stand in the foreground of immission control such as the type of adverse environmental impact, the affected good to be protected and the scope or degree of the annoyance. The degree of the impairment on the protective good of human well-being is decisive for adverse noise exposure caused by infrasound that are capable of causing danger, disadvantages or annoyances. This is why the classes were established with a focus on the sources together with their noise pollution potential and their scope, which is called the annoyance classes.

Since the classification in this study is performed according to the noise pollution potential of the sources, it was necessary to select suitable characteristics for their quantification. Furthermore, it should be possible to adequately define and describe the previously determined classes with these characteristics.

In principle, all data that can be collected on a source may be used as a possible characteristic independent from the previously defined classes. The collectable data therefore corresponds with the basic population of all possible characteristics. Since it should be possible to unambiguously assign a source to a class by means of the characteristics, it is also necessary to define clear boundaries for the characteristics.

With regard to the noise pollution situations oriented upon these classes and the previously mentioned requirements of the characteristics, only those parameters are acceptable that have a direct correlation to the potential annoyance by one source and are therefore capable of providing a concrete statement concerning this matter.

The classification should facilitate a differentiation in the annoyance potential of infrasound sources. Consequently, the following classes are proposed:

- Class I: Strong annoyance potential
- Class II: Moderate annoyance potential
- Class III: Limited/low annoyance potential
- Class IV: No annoyance potential

Based on the objective of this proposed classification, as well as the above-mentioned requirements on the actual classification and their characteristics, the following acoustic parameters have shown themselves to be meaningful characteristics:

- overlapping
- level
- frequency range
- course of time
- impulsiveness
- tonality

The data used for the classification are essentially limited to proven measurement values that can be determined during the field study with relatively high accuracy. The special prerequisites, measuring conditions or special measuring methods with which these data on infrasound effects must be determined, as well as the accompanying measurement errors and uncertainties, are unknown at this time.

On the basis of the classified characteristics of sound sources, it is possible to prepare data sheets and archive them in a directory. The objective of the source data sheets is the systematic recording of noise sources. A concrete proposal was made for the source data sheet. Potentially hazardous situations can be identified and, if necessary, already be prevented in the phase of production, project development or planning phase on this basis. Sample source data sheets are illustrated as reading and fill-out examples in the study.

The use of a three-stage point system allows for a differentiated weighting of the individual characteristics in form of characteristic levels.

At this point, there has not yet been conclusive clarification as to whether the characteristic points meet the individual criteria of noise pollution in a comprehensive manner. In order to consider a different degree of influence and/or a combinatorial effect of individual characteristics on the noise pollution potential, additional weighting factors are included to balance the characteristic points against each other. A weighting factor approach is used since the possibility that individual sources or groups of sources require different characteristic points cannot be excluded. This ensures that the individual characteristics are considered to a different degree and physiologically correctly (to the necessary extent) in the classification. Based on the sum of the assigned weighted characteristic points, it is ultimately possible to assign them to one of the noise pollution classes. The specific weighting of the individual characteristics should be calibrated using laboratory studies on the effects of infrasound.

Evaluation of the Classification System

In reference to the classification proposed here, it will be necessary to especially clarify the following questions in future studies:

- To what extent are synergy effects of infrasound present in audible sound and how do they behave with regard to noise pollution potential?
- At what infrasound levels do significant effects appear in human beings?
- Which measurement or assessment values (level or the like) are suitable for describing infrasound?

- Do certain frequencies of infrasound immissions present a special noise pollution potential and cause adverse health effects?
- Do certain infrasound effects result in special noise pollution situations over time (e.g. periodicities)?
- Do impulse and tonal infrasound immissions emanate the same annoying effect as those immissions in the audible sound range?
- Do certain combinations of characteristics in the proposed classification have effects that require special consideration?

Independent of the parameters required within the scope of the classification, the manufacturer data, authorisation documents and survey of affected persons must be reported as data sources. Technical literature, the measurements in test stations and/or general emission and immission measurements in general are the most important sources of information at this time.

According to the current state of knowledge, possible conflicts of the proposed classification particularly exist for situations in which infrasound or low frequency sound is overlaid by high frequency noise portions that are decisively experienced as annoying or conversely as resulting in an experience of the respectively overlaid noise portions as less annoying. For example, conflict situations are familiar in which just the removal of low frequency noise emission of a heating system led to the increased perception of disturbing noise created by restaurant operations and neighbours inside a mixed-use residential and commercial building. The mechanism of masking disruptive surrounding noise is used in a targeted manner by Soundscape. Many of the affected people also use sound systems, indoor fountains or similar devices to mask disturbing audible sound.

The extent to which such situations occur and how to deal with them will only be seen in practice and must be examined and evaluated on a case-by-case basis. However, the extension of the proposed classification by a “special” class for such facilities could prove to be necessary.

Determination of the German Population's Potential Concernment Caused by Infrasound and Low Frequency Noise Exposure

The population has repeatedly provided information about the prevalence of low frequency sounds, especially when their type and magnitude is sufficient to cause annoyances. The point of contact concerning noise pollution in Germany is generally the respective responsible immission control officers of the counties. The supervisory authorities at the state environmental agencies of the *Länder* are also included in special conflict situations (under which low frequency noise and infrasound effects probably fall in most cases). There has been little documented information about the population that is affected by infrasound and low frequency noise up to now.

In order to determine a concrete noise pollution situation and the frequency of complaints about low frequency noise immissions, a survey of public authorities was conducted on this topic. The polling of authorities occurred in three stages:

1. In the first step, the environmental agencies of the *Länder* were contacted to evaluate the complaint situation and how much the population was affected concerning infrasound. Subsequently, selected *Länder* environmental agencies were contacted via telephone to acquire additional information.

2. In the next step, the subordinated immission control authorities were contacted by mail. Initial telephone contacts with specific subordinated immission control authorities in Bavaria revealed that complaint registries are handled on an individual basis. A questionnaire was developed based on these insights.
3. In the third step, the questionnaire was distributed at the beginning of 2013. About 400 lower-level immission control authorities were contacted by mail at this time. The feedback and evaluation of the questionnaires was completed in June 2013. The response rate was 34.2%.

The analyses of the feedback showed the existing lack of a uniform complaint registry. Furthermore, there are no standardised methods for a comparative and systematically ordered database. This problem is amplified by the fact that there are currently no generally accepted measurement and evaluation regulations regarding the infrasound range (from 0.1 to 20 Hz).

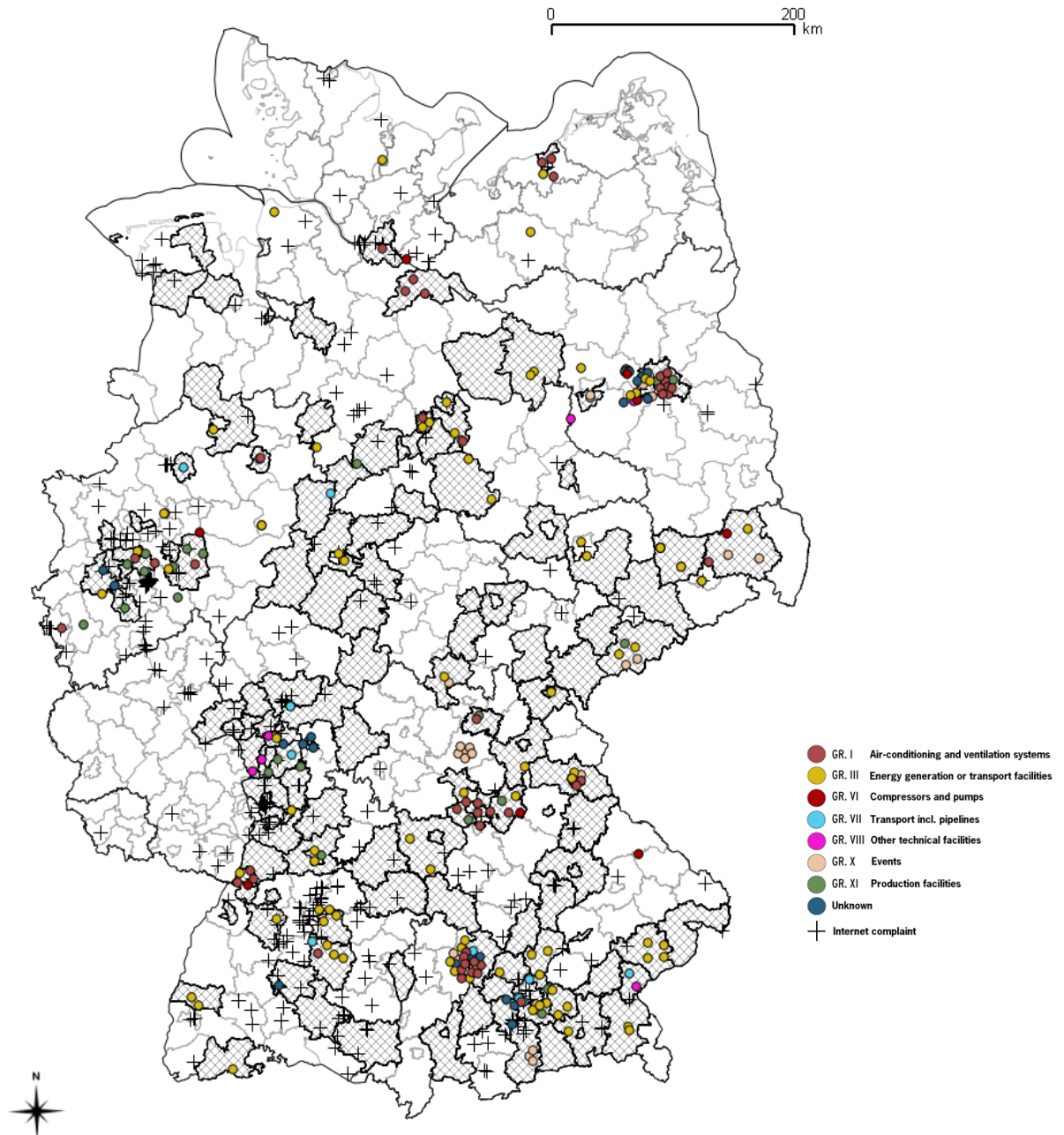
The complaints often completely lack objective proof about the magnitude of the noise exposure. Many representations of interests with Internet pages and public relations work result in a confusing situation of affected people in the broadcasts. This is dominated by reports of individually affected persons, who most often only state their presumptions about the cause of the noise exposure in a strongly abbreviated form and describe their symptoms in a qualitative way without indicating a reference to acoustic values or other objective data.

The development and maintenance of a uniform centralised complaint registry for infrasound and low frequency noise would be meaningful in the future. The archiving of existing measurements of the linear octave levels of sound pressure according to DIN 45680 in the frequency range from 8 to 100 Hz could be used for the initial comparative analysis of key acoustic parameters. Official measurements and expert opinions, as well as event-related monitoring by the affected persons themselves, can be used for this purpose. However, measurement and average times, the class characteristics (according to the proposed classification) and additional key values that could be the cause of the increased noise pollution (e.g. vibrations, secondary effects, meteorological effects, etc.) should also be collected within the scope of future sound level measurements. The information could be used as the basis of a possible multi-dimensional threshold determination for the infrasound range.

In summary, the following findings resulted from the conducted analysis of the affected population:

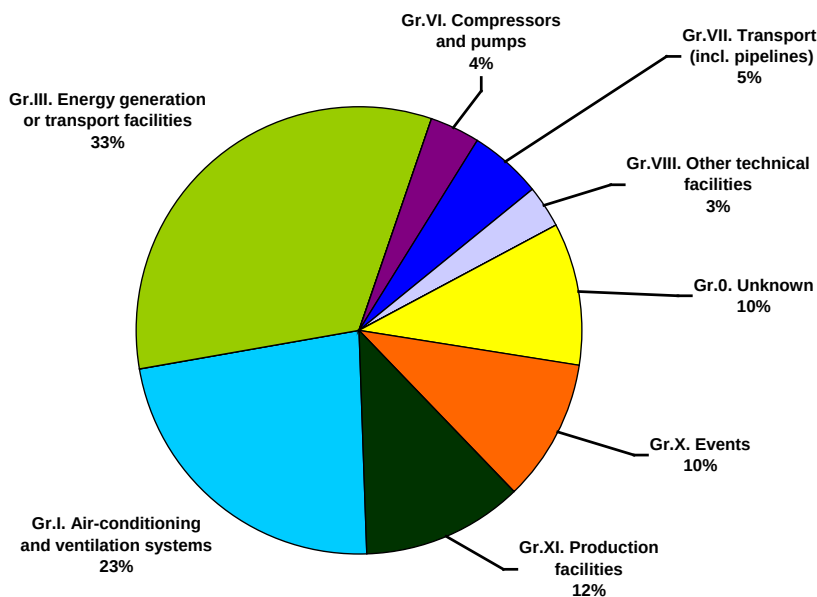
- Regional focal points could not be statistically determined with sufficient certainty. In particular, the quantity and representative value of the submitted complaints was too low for this purpose. The general tendency showed a higher number of complaints in Southern Germany.

Abbildung 3: Map of Germany with registered complaints (incl. complaints resulting of web research)



- Most of them indicated power plants or energy transport (33.0% of the cases), as well as air-conditioning and ventilation systems (22.8% of the cases), in reference to their complaints about infrasound and low frequency noise.

Abbildung 4: Distribution in percentage of complaints regarding Infrasound and low frequency noises



- Heat pumps were mentioned as the most frequent source for complaints with an overall share of 9.3%. Among facilities for energy generation and transport, biogas plants (8.4%), thermal power stations (6.5%) and wind energy plants (3.3%) most frequently lead to conflicts.
- Practically relevant sources include heat pumps, biogas plants, thermal power stations, wind parks, cooling and air-conditioning systems, ventilation and building heating systems, as well as presses and punching machines in the group of production facilities.
- For the purpose of systematic study of noise impact, installations with a high number of affected persons should be selected such as thermal power stations, wind energy plants and presses and punching machines in production plants. Therefore, primarily the research in heat pumps, cooling and air-conditioning systems, heating and ventilation system in a residential environment would be suitable for preventing practical conflicts and improving the quality of living conditions in relation to infrasound and low frequency noise.

It must be noted that the survey of authorities reflects just a small portion of the actually existing conflict situations regarding the effects of infrasound and low frequency noise. It must be presumed that individual tolerance levels of affected citizens could possibly lead to just a small fraction of conflicts being reported to the authorities. In order to achieve a more accurate picture of the situation, the frequency of objections in planning procedures and legal disputes could be analysed.

A possible study design was developed by building on the acquired knowledge that was especially designed for the effects of infrasound on human beings. For the purpose of a study, installations with a high number of affected persons should be selected. This process should evaluate suitable measuring methods, forecast methods and the definition of reasonable limits.

Development of a Study Design to Research the Effects of Infrasound Immissions on Human Beings

The concept of a study design with a detailed examination of effects was developed in this work package based on the findings of the literature review, the identification and classification of installations/sources and estimation of how many people may be affected in the German population. Its focus is on the effect of technical infrasound sources.

Given the current state of knowledge, a field study would be preferable to a laboratory-based study. The principle of the field study design is to compare the effects on people who are never exposed to an infrasound source or just exposed to a small degree with the effects on people who are exposed to an infrasound source at a higher level. Infrasound exposure represents an independent variable in this case and the effects to be observed represent the dependent variables. Correspondingly, the (quasi-experimental) approaches of socio-acoustic noise impact research come into question for the field study. The basic design of this is a stratified random sample of study participants with different levels of exposure from residential areas within an infrasound source's surroundings.

The recommended field study on infrasound should draw the random sample of test persons stratified by a suitable sound pressure level for the detection of infrasound (e.g. L_{eq} with Z and G assessment). At least three graduations (low, medium and high pressure level) are intended for this purpose. For each type of infrasound source to be examined, at least two spatially separated examination rooms should be defined for each pressure level in order to generalise scientific statements regarding the effects beyond local conditions. This means that at least two source locations and their surrounding residential areas should be selected for each type of infrasound source. The six above-mentioned classification characteristics are used as descriptive acoustic values for the infrasound sources to be subjected to the examination in order to analyse the respective effect of individual characteristics on the studied effects.

With regard to the above-mentioned infrasound sources, the proposal is to investigate two different source types: one type with an infrasound exposure during the day, as would be the case with an industrial facility (such as a sawmill), and another type of infrasound exposure that occurs day and night (such as a thermal power station or a wind power plant).

Furthermore, it is essential to differentiate the degree to which the effect of infrasound changes when an extraneous or interfering sound source (e.g. traffic noise, noise from the neighbourhood or overlapping of noise from the infrasound source in the audible sound range) is present. This is the reason for suggesting that the differentiation of high/low share of extraneous sound in the selection of infrasound sources and study areas should also be included.

Based on the proposed minimum scope of the sample, a study plan with the factors of infrasound level (3 levels), source type (2 levels), extraneous sound source (2 levels) and location per infrasound source (2 levels) would result in a number of $3 \times 2 \times 2 \times 2 = 24$ study cells with 30 to 40 persons each. The overall sample size would be approximately 720 to 960 persons.

The study design illustrated in the following table summarises the proposed aspects of the study plan.

Tabelle 2: Possible study design for a field study to determine the effects of infrasound

Infrasound exposure (source type)	Example source	Extraneous sound source	Study location per type of infrasound source						
			Location A			Location B			
			Level class (e.g. L _{Geq})						
			low	medium	high	low	medium	high	
Noise level day	Industry facility (e.g. sawmill)	high	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	
		low	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	
Noise level day and night	Thermal power station, wind power plant	high	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	
		low	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	
Total			120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160	
			360 - 480			360 - 480			
			720 - 960						

The execution of the infrasound field study can be roughly divided into four steps:

- 1) Selection of infrasound sources and residential areas to be assessed, including screening measurements.
- 2) Acoustic, metrological measurement of fundamental data to record individual infrasound exposure of study participants.
- 3) Performance of the impact surveys in the selected residential areas.
- 4) Sound measurements in the living quarters of persons participating in the study.

The field study can be designed on a modular basis by initially evaluating the module of the source type “Noise level day” and in an additional module with the source type “Noise level day and night.”

Statistical Analyses

The main objective of the statistical analyses is to make statements about the relationship between exposure and impact.

Descriptive analyses should illustrate the frequency distribution for the collected degree of exposure and survey variables.

The correlation analyses regarding the direction and strength of the correlations between degree of exposure and the impact variables on infrasound will be studied. The objective is to identify the degree of exposure that has the closest relationship to the surveyed effects. But statistical correlation analyses should also be performed on the other collected variables (moderators/mediators) in the survey on the one hand and the exposures and impact variables on the other hand. This will be followed by a regression analysis and analysis of variance to model the effect of infrasound noise based on the degree of exposure and additional identifiable influential factors.

A rough cost estimate was conducted for the designed field study that demonstrates the scope of the required expenses.

Further Development for Set of Standards

So far the determination and assessment of infrasound and low frequency noise in the administrative practice is exclusively performed according to the Technical Instructions on Noise Abatement and DIN 45680. The containing approach that is strongly modelled on the assessment of noises in the clearly audible frequency range should be supplemented in such a way that comprehensively and adequately considers the peculiarities in the perception and the effects of infrasound. However, this should not exclusively be limited to auditory perception; the frequency range below 8 Hz should also be considered within the scope of comprehensive immission control.

However, the foundation for a regulatory assessment is a uniform procedure for measuring and especially forecasting immissions of infrasound and distinctly low frequency noise to quantify its disturbing effects.

Since low frequency sounds especially cause annoyances in living quarters, the aim should be to provide sufficient protection in interior spaces. Therefore, structural and room acoustic situations must be considered in both the forecast and the measurement.

Concepts must be developed for the two investigation methods (forecast and measurement) within the scope of further studies that also adequately consider the peculiarities of low frequency sounds and infrasound with respect to their effects. The objective of making the forecast of noise pollution based on measurement values applicable in the practice can be achieved by incorporating additional psycho-acoustic values.

The affected persons often indicate the (relatively slow) modulation of the noise as a very annoying characteristic. A psycho-acoustic measurement with which this could be recorded is amplitude of the fluctuation, for example.

It can be assumed that higher frequencies of noise lead to the known annoyances. This assumption is based on the observation that spectrums of higher frequencies (in the double-digit hertz range) generally fall away less sharply than the auditory threshold. This means that it exceeds the auditory threshold and/or the aural threshold of perception.

Even if the auditory threshold is used as an alternative standard, some questions will still remain. The basis of the auditory threshold in the standards is based on measurements with people who have normal hearing and individual sinusoidal tones. However, it can be demonstrated that complex noises can already be perceived when the individual components are still below the auditory threshold. A further discrepancy exists in that low frequency noises frequently have strongly fluctuating amplitudes (pulsate) and therefore trigger adaptation processes in the hearing that also lead to a heightened perception. Furthermore, it appears that low frequency sounds and infrasound lead to a heightened perception in the affected persons in case of extended exposure.

Another open question is why the affected persons are strongly affected in general with regard to their mental state. Similar observations could not be made for other types of noise exposure to date. Whether there is a direct influence on brain functions and this exists because brain activities occur within the same frequency range still remains an unproven hypothesis at this time. The notion that this could be the case reinforces the necessity of further research in this direction.

Neuronal measurements of affected persons (e.g. EEGs) could be informative in this case. They may possibly also provide information about why there is a tendency for just a (small?) fraction of the population to be very sensitive. It should be the main task of an extended study to investigate these frequent observations.

A long-term conflict resolution requires a comprehensive assessment, the definition of threshold values and standardised, uniform forecasting methods. Blanket approaches that unilaterally overestimate the forecasting situation with the goal of conflict resolution, such as the definition of minimum distances, appear to be inappropriate without well-founded scientific findings on the mechanisms of action for noise sources.

3 Einleitung

Seit einigen Jahren klagen Bürgerinnen und Bürger vermehrt über Beeinträchtigungen durch Infraschall oder sog. Brummtophonphänomene. Dabei treten Fälle auf, in denen die Einwirkungen sowohl durch identifizierbare technische Anlagen als auch durch unbekannte Lärmquellen verursacht werden. Gerade bei anlagenbedingten Immissionen treten neben Infraschalleinwirkungen auch tieffrequente Schallimmissionen im Hörbereich auf. Aufgrund der großen Wellenlänge von Infraschallphänomenen von mehreren Metern und der äußerst geringen Abnahme von Infraschall über den Abstand gibt es auch zahlreiche Fälle von nicht identifizierbaren Infraschallimmissionen.

Im Grenzbereich von Hörschall zu Infraschall ist zu klären, inwieweit Belästigungen durch die Hörwahrnehmung verursacht werden oder ob neben den Hörwahrnehmungen andere Wahrnehmungsarten Belästigungsreaktionen auslösen können. Infraschalleinwirkungen stören - so die Beschwerdeführer - insbesondere den Nachtschlaf und werden von den Betroffenen mit einer breiten Palette von Krankheitsbildern in Zusammenhang gebracht.

Die Bewertung und Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen (definiert als Frequenzbereich zwischen 8 und 100 Hz) erfolgt derzeit in Deutschland nach der „Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm [136]“ mit der DIN 45680 „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft“ [27]. Diese Regelung berücksichtigt nur Geräuschanteile, die eine definierte (mittlere) Hörschwelle überschreiten. Jedoch wird zunehmend in der Öffentlichkeit auf das als unzureichend erlebte Schutzniveau bei tieffrequenten Immissionen Bezug genommen und eine stärkere Begrenzung gefordert. Die mögliche enge kausale Bindung von akustischer Wahrnehmbarkeit (Hörschwelle) und Belästigungserleben muss daher dahin gehend überdacht werden, dass es Personen mit abgesenkter Hörschwelle gibt. Gerade bei tiefen Frequenzen ist die Dynamik zwischen gerade wahrnehmbaren Geräuschen und der Schmerzschwelle im Vergleich zu den mittleren Frequenzen des Hörbereichs geringer. Es ist deshalb zu vermuten, dass bei Personen mit abgesenkter Hörschwelle bereits Belästigungen auftreten können, die nach der der DIN 45680 zu Grunde liegenden mittleren Hörkurve noch nicht zu erwarten wären. Darüber hinaus ist derzeit noch weitgehend ungeklärt, welche extraauralen Wirkmechanismen zu einer Lästigkeit führen können.

Es besteht somit Forschungsbedarf insbesondere bezüglich der Häufigkeit des Auftretens, Art und Umfang von Beeinträchtigungen sowie möglichen Gefährdungen der menschlichen Gesundheit durch tieffrequente Geräusche und Infraschall. Diese Aspekte sollen schwerpunktmäßig in diesem Forschungsvorhaben untersucht werden. Mit der vorliegenden Machbarkeitsstudie sollen die Grundlagen für wissenschaftlich begründete und praxistaugliche Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Wirkungen tieffrequenter Geräusche geschaffen werden. Hierzu werden fünf Arbeitspakete bearbeitet:

1. Stand des Wissens über Infraschallauswirkungen auf den Menschen
2. Identifizierung von Quellen, von denen Infraschallemissionen in nicht unerheblichem Maß ausgehen können
3. Feststellung der potentiellen Betroffenheit der Bevölkerung in Deutschland durch Infraschall- und tieffrequente Geräuscheinwirkungen
4. Entwicklung eines Studiendesigns für Wirkungsuntersuchungen über Infraschallimmissionen auf den Menschen

5. Vorschläge für die Weiterentwicklung der vorhandenen Regelwerke zum Immissionsschutz hinsichtlich der Behandlung von Infraschall.

4 Historischer Abriss

Vor allem während des ersten Weltkriegs wuchs das Interesse der Wissenschaft für die Infraschalltechnologie und später noch einmal während der Kernwaffentests. So wurde Infraschall als langwellige mechanische Strahlung insbesondere als Waffe und für Aufklärungszwecke erprobt. Als jedoch durch den Atomwaffenteststoppvertrag 1963 die Atomspaltungen eingeschränkt wurden, ging das Interesse an Infraschalltechnologie deutlich zurück.

Die ersten Veröffentlichungen zum Thema tieffrequente Geräusche und Infraschall im Kontext des Arbeits- bzw. Immissionsschutzes stammen aus dem Jahr 1950. Dabei wurde zunehmend Anfang der 1970er Jahre die gesundheitlichen Aspekte und die Lästigkeit von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen im Lärmschutz thematisiert. Im deutschsprachigen Raum kann hier auf die Feldversuche von Wietlake (1983) [164] und Kubicek (1989) [72] verwiesen werden. Auf dieser Basis wurden in den Jahren 1990 bis 1992 ein erster Entwurf für eine Norm zur Ermittlung und Beurteilung von tieffrequenten Geräuschemissionen (DIN 45680) erarbeitet. Im März 1997 wurde die DIN 45680 als „Weißdruck“ herausgegeben, so dass in Verbindung mit dem zugehörigen Beiblatt 1 der DIN 45680 seit 1997 ein Regelwerk existiert. Die Norm ermöglicht eine Beurteilung von Geräuschen im erweiterten Frequenzbereich von 100 Hz bis hinunter zu 8 Hz (Terzmittenfrequenz).

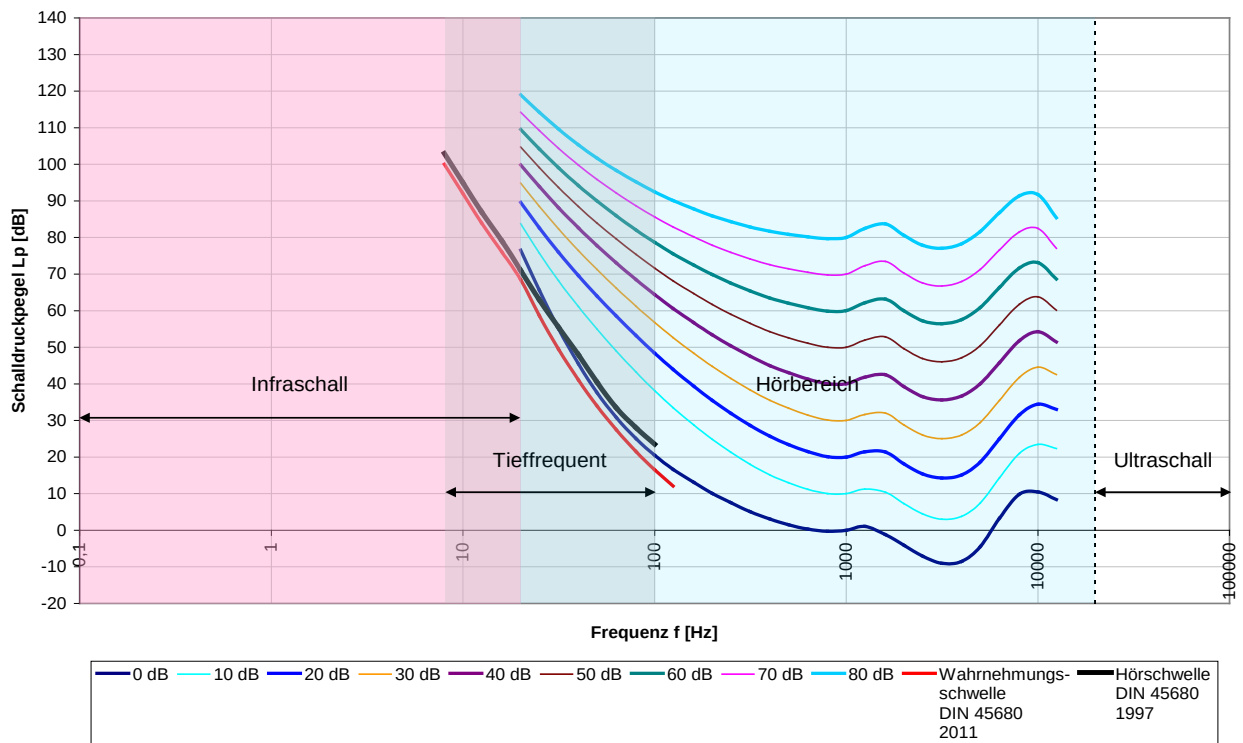
Seit der Neufassung der TA Lärm im August 1998 ist gemäß deren Ziffer 7.3 die DIN 45680 für gewerbliche Anlagen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) verbindlich bei tieffrequenten Geräuschen anzuwenden. Insofern existiert in Deutschland ein Regelwerk zur Ermittlung und Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen, das auch einen Teil des Infraschalls (Terzmittenfrequenz 8 Hz bis 20 Hz) abdeckt.

In den Jahren 1999 und 2000 häuften sich in Baden-Württemberg Beschwerden über ein Brummen, das nach Aussage der Betroffenen ein im Kopf auftretendes Dröhn-, Schwingungs- oder Druckgefühl auslöste. Diese Beschwerden waren häufig mit Angst- und Unsicherheitsempfindungen sowie einer Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit verbunden. Die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg führte daraufhin in der Zeit von August bis November 2001 bei Betroffenen an insgesamt 13 Orten Messungen der Schall-, Erschütterungs- und Magnetfeldimmissionen durch. Die Messungen konnten jedoch das Brummen-Phänomen nicht eindeutig klären (vgl. [152]).

Seit dem Jahr 2000 hat die Anzahl der Veröffentlichungen zum Thema Infraschall deutlich zugenommen. Ab ca. 2005 werden zudem regelmäßig Internetforen zum Brummen und anderen tieffrequenten Geräuscheinwirkungen geführt und veröffentlicht.

In der Anwendungspraxis der DIN 45680 i. d. F. von 1997 zeigten sich wiederholt Unzulänglichkeiten bei der Beurteilung von harmonischen und zeitlich schwankenden tieffrequenten Geräuschen, so dass eine Überarbeitung der DIN 45680 für einen umfassenderen Immissionsschutz sinnvoll erschien. Damit wurde im September 2005 begonnen. Seit August 2011 liegt der Entwurf einer überarbeiteten DIN 45680 vor, der auf neueren Untersuchungsergebnissen basiert. Der Frequenzbereich ist dabei wie bereits in der Vorgängerversion auf über 8 Hz (Terzmittenfrequenz) beschränkt, so dass weiterhin nur ein Teil des Infraschallbereichs durch die Norm abgedeckt ist (s. Abbildung 1).

Abbildung 5: Darstellung der Frequenzbereiche des Schalls



Im Rahmen dieser Untersuchung wird Infraschall als Schall im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 20 Hz definiert. Üblicherweise wird die 16-Hz-Oktave noch vom Hörbereich ausgenommen und grenzt damit den Infraschall- vom Hörbereich ab. Aus diesem Grund wird die obere Terz der 16-Hz-Oktave mit der Terzmittenfrequenz von 20 Hz meist noch dem Infraschallbereich zugerechnet, wenngleich dieses Terzband per Definition nicht vollständig im Infraschallbereich liegt.

5 Aufbereitung des Wissensstands über Infraschallauswirkungen

5.1 Aufgabenstellung

Die Belästigung und Störungen durch Infraschall und - erweitert - tieffrequenten Schall führen oftmals zu Lärmbeschwerden. Dabei werden Angstgefühle, Konzentrationsschwäche, Schlaflosigkeit und Depressionen genannt. Beispielhaft sind in diesem Zusammenhang Veröffentlichungen von Leventhall (2003) [82], Moorhouse et al. (2005) [98] und Møller / Lydolf (2002) [92] anzuführen. Während auf diesem Gebiet noch ein beträchtlicher Forschungsbedarf besteht, gibt es ein breites, abgesichertes Wissen über die aurale¹ Wirkung von Infraschall und tieffrequentem Schall auf den Menschen. Ergebnisse von diesbezüglichen Untersuchungen aus den Jahren vor 2000 werden in verschiedenen Reviews zusammengefasst (vgl. [163][14][134][104]).

Es ist nicht klar, ob die Ursache für die Betroffenheit bei relativ geringen Pegeln eine besonders niedrige Hörschwelle ist oder ob andere Gegebenheiten eine Rolle spielen. Da die Geräusche bei den Betroffenen häufig zu einer irritierenden Empfindung führen, ist nicht auszuschließen, dass es Betroffene gibt, die unter den genannten Symptomen leiden, ohne sich bewusst zu sein, dass möglicherweise tieffrequenter Schall die Ursache ist. Daher ist es schwer den Prozentsatz an der Gesamtbevölkerung anzugeben, der in besonderer Weise für die Wirkung von Infraschall und tieffrequentem Schall disponiert ist. Eine der wenigen Aussagen dazu findet man bei Leventhall [81], der diesen Anteil mit 2,5 % beziffert.

Zwar sind Untersuchungen zur Wahrnehmung und Wirkung von tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall bei weitem nicht so umfangreich durchgeführt und publiziert worden, wie zu Schall in anderen Frequenzbereichen, dennoch gibt es eine nicht unerhebliche Anzahl davon. Bei der Bewertung dieser Untersuchungen ergab sich die Schwierigkeit, dass die Art der Erregung und die Rahmenbedingungen, die Messmethode von Untersuchung zu Untersuchung stark variieren. Dies ist bedeutsam, weil diese Faktoren einen starken Einfluss auf die Ergebnisse haben. Trotzdem wurde versucht, ein möglichst stimmiges Bild über die Wahrnehmung und Wirkung von Infraschall und tieffrequentem Schall zu erhalten.

Zunächst wurde der Frage nachgegangen, ob die genannten Symptome auf bestimmte physiologische Vorgänge zurückzuführen sind und ob diese wiederum durch Infraschall bzw. tieffrequenten Schall hervorgerufen werden können. Konzentrationstests bei Beschallung mit tieffrequentem Schall zeigten bei den Probanden eine Leistungsminderung. Dies lässt auf eine direkte mentale Wirkung des tieffrequenten Schalls schließen und weist auf die Beeinflussung von physiologischen Prozessen im Gehirn hin (vgl. [103][7][120][75][147][115]). Nur in vereinzelt veröffentlichten (vgl. Pawlacyk-Luszczynska et al. (2005) [109]) wird kein signifikanter Einfluss festgestellt, was – wie darin selbst festgestellt wird – auch mit der Auswahl der Probanden zusammenhängen kann. Hinweise auf die Art der Zusammenhänge können möglicherweise die spezifischen Eigenheiten von tieffrequenten Stimuli erbringen, die als besonders belästigend gelten. Eng damit verbunden scheint der Umstand zu sein, dass zahlreiche Betroffene in weitgehend ruhigen Gegenden wohnen und viele der Betroffenen versuchen, den belastenden Schall durch andere Schallquellen zu maskieren (vgl. Persson Wayne et al. (2003) [116]).

Häufig werden Infraschall und tieffrequenter Schall von Vibrationen verursacht und von ihnen begleitet. Betroffene berichten mitunter davon, dass sie zugleich Vibrationen wahrnehmen

¹ Aural [lat. auris 'Ohr'] = auf das Ohr bezogen

oder empfinden. Eine andere bekannte Form der multimodalen Reizung ist der Schattenwurf bei Windenergieanlagen in Kombination mit tieffrequentem Schall. Dies wirft die Frage auf, ob sich solche Reize gegenseitig verstärken und damit zu einer überhöhten Wirkung führen können.

Da es für die Betroffenen in der Regel sehr schwierig ist, ihre Wahrnehmung verbal zu beschreiben, ist weiter zu diskutieren, ob mittels eines Programms zur interaktiven Auralisation (Vorgehensweise zum Beispiel wie beim Erstellen eines Phantombildes) die kennzeichnenden Parameter des störenden Schalls ermittelt werden können. Wesentliche Charakteristika und ihre Parameter sind zum Beispiel ein tonaler Charakter (Frequenz, Stärke, Modulation der Komponenten), ein rauschartiger Charakter (Bandbreite, Formung des Spektrums, Modulation), ein impulshaltiger Charakter (Impulsform, Impulsfrequenz). Auch Mischformen sind möglich. Die Parameter sollen (nach Anleitung) interaktiv vom Betroffenen selbst so verändert werden können, dass das generierte Geräusch möglichst dem belästigenden entspricht. Mit der Touch-Screen-Technik, wie sie zum Beispiel von Tablet PCs oder Smartphones her gekannt ist, könnte eine intuitive Bedienung realisiert werden.

Ziel wäre es, die gemessenen und wahrgenommenen Schalle auf Übereinstimmungen hin zu analysieren, um z. B. zu ergründen, ob eines und gegebenenfalls welches der messtechnisch erfassten Geräusche mit der Belästigung im Zusammenhang steht. Neben einer rein auditiven Reizung könnte zusätzlich eine Reizung durch Vibration implementiert werden.

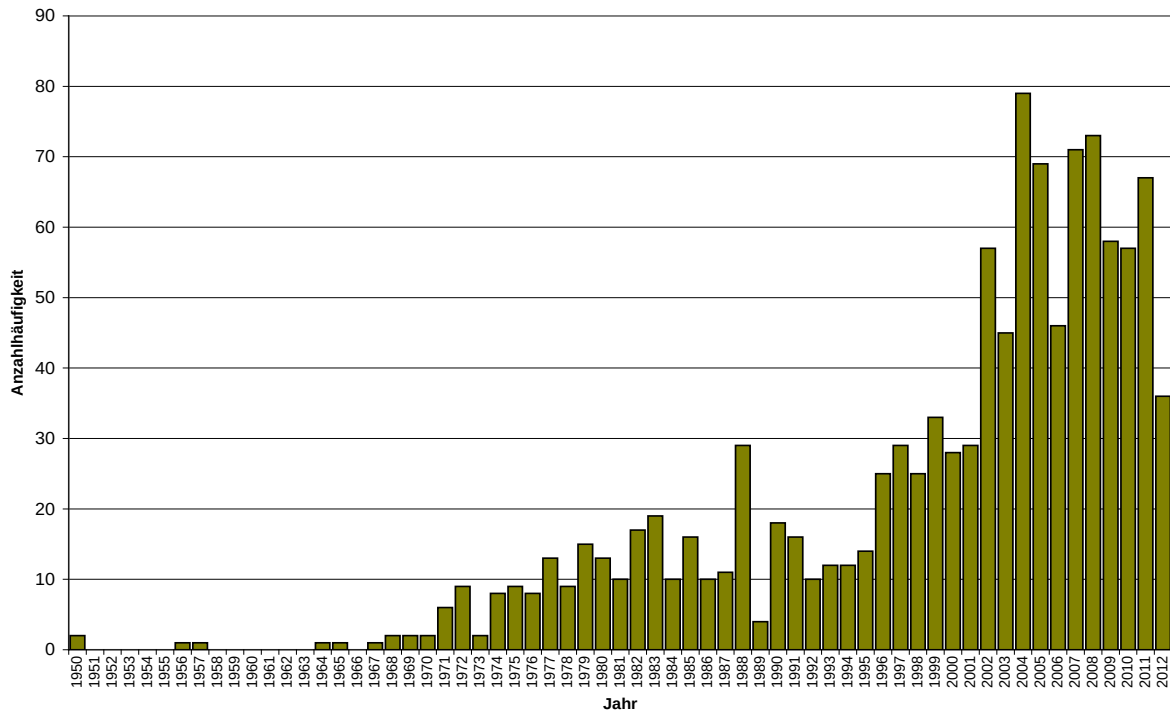
5.2 Methodik

Ausgangspunkt der Voruntersuchung war eine eingehende Literaturrecherche. Hierfür wurden alle Quellen herangezogen, die relevante Information versprochen. Über das Internet wurden fachspezifische Datenbanken wie PubMed und Medline abgefragt, die Datenbestände wissenschaftlicher Verbände aus der Akustik, von nationalen und internationalen Konferenzen und von Verlagen durchsucht. Zudem wurde über das Internet in Suchmaschinen mittels Stichworten recherchiert. Dabei wurden auch Foren von Bürgerinitiativen, Beiträge von Verbänden und Presseberichte ausgewertet. Der zusätzliche Informationsgewinn war allerdings beschränkt, da häufig bereits Bekanntes zitiert wird, die angegebenen Quellen oft nicht nachvollziehbar sind oder Meinungen dargestellt werden. Darüber hinaus wurde in Universitätsbibliotheken recherchiert. Konnten über das Internet zumeist nur Kurzfassungen von Beiträgen heruntergeladen werden, so wurden über die Bibliotheken ausschließlich Volltext-Fassungen bezogen.

Die Recherche reicht zurück bis in das Jahr 1950. In den früheren Veröffentlichungen stand die direkte physische Wirkung von tieffrequentem Schall und Infraschall im Mittelpunkt, die meist mit Schalldruckpegeln oberhalb 100 dB verbunden ist. Untersuchungen mit niedrigeren Pegeln waren dagegen selten und konzentrierten sich auf die Frage nach der Hörschwelle. Eine Zusammenstellung ist zum Beispiel bei Schust [134] (1997) und Fidell et al. [38] (2010) zu finden.

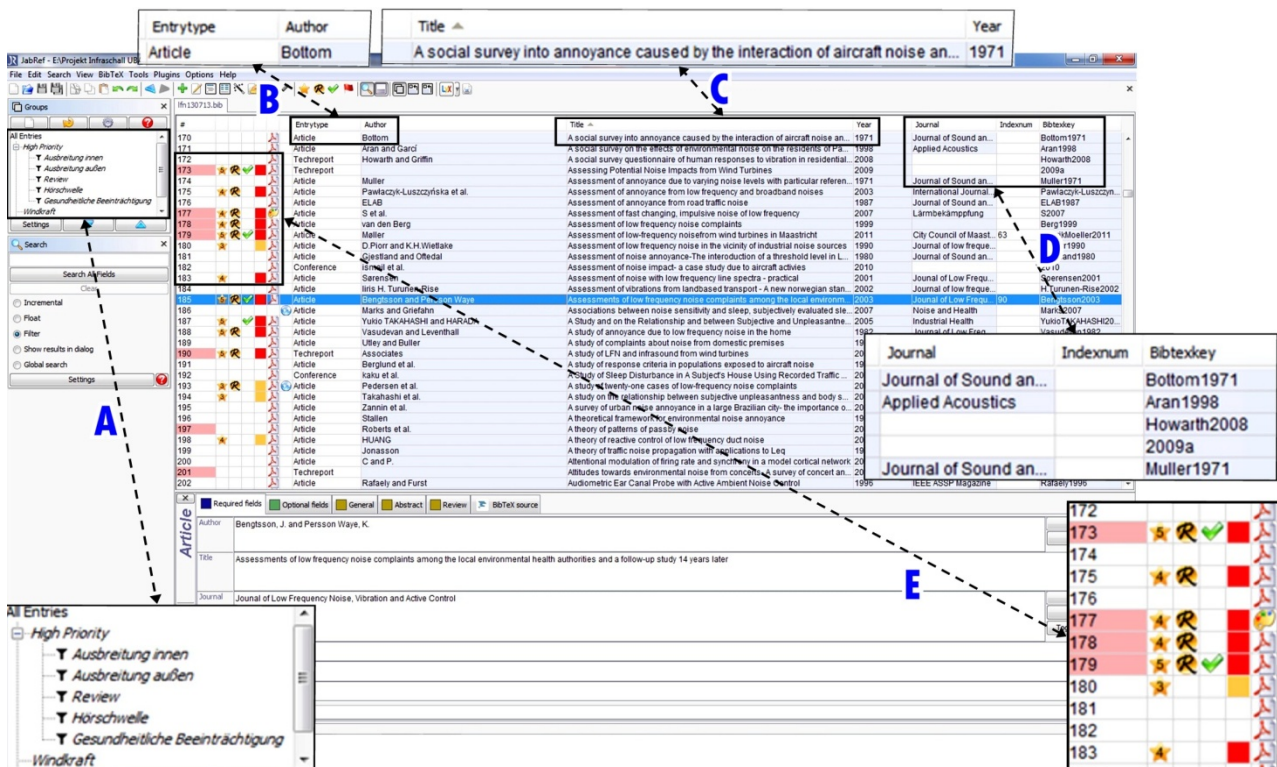
Schon bei den Untersuchungen in den 1980er Jahren von Broner / Leventhall (vgl. [15][18][16][17]) und Andresen / Møller (vgl. [2][91]) wurde festgestellt, dass tieffrequenter Schall in besonderer Weise belästigend wirken kann. Eine deutlich gestiegene Anzahl von Publikationen befasst sich daher seit Ende der 1990er Jahre mit der Frage der Belästigung durch tieffrequenten Schall. Das gewachsene Interesse an diesem Thema erklärt sich durch eine zunehmende Anzahl potenzieller tieffrequenter Quellen und eine scheinbar erhöhte Empfindlichkeit gegenüber deren Geräusche. Abbildung 6 zeigt die Verteilung der recherchierten Beiträge nach ihrem Erscheinungsjahr im Zeitraum 1950 bis 2012.

Abbildung 6: Verteilung der recherchierten Beiträge nach ihrem Erscheinungsjahr im Zeitraum 1950 bis 2012



Die gesammelten Beiträge wurden in einer Datenbank abgelegt, die insgesamt ca. 1.200 Einträge umfasst. Bis auf einige Ausnahmen liegen diese Beiträge als Volltexte im durchsuchbarem Textformat vor. Die Datenbank ist in dem weitverbreiteten BibTeX-Format angelegt und kann mit verschiedenen Literaturverwaltungsprogrammen gelesen und bearbeitet werden. Eines davon ist JabRef, das über das Internet frei zugänglich ist (GPL-Lizenz) und von dort heruntergeladen werden kann. Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt das Datenbankformat in JabRef. Aus Gründen des Urheberrechtes ist es nicht möglich, die Datenbank mit den Volltexten öffentlich zugänglich zu machen. Eine Version, die zumindest die Quellenhinweise und – soweit vorhanden – Kurzfassungen enthält, wurde aber auf einem öffentlich zugänglichen Server abgelegt. Zum Suchen und Lesen bietet sich neben JabRef alternativ auch das Programm Zotero an, das ebenfalls aus dem Internet heruntergeladen werden kann. Nähere Details zur Datenbank können auf der Webseite zu dem Forschungsvorhaben <http://www.infraschallstudie.de> werden.

Abbildung 7: Oberfläche des Datenbankprogramms unter JabRef



Die erfassten Beiträge sind unterschiedlich in inhaltlicher Relevanz, Qualität und Umfang. Zur Strukturierung wurden sie unter diesen Gesichtspunkten mit Prioritäten und Schlüsselwörtern (im Programm ‚Keywords‘ genannt) versehen. Die Schlüsselwörter wie zum Beispiel Quellen, Abstrahlung, Ausbreitung, Spektrum, Bewertung, Lästigkeit, Feldstudien, Laborstudien, Beurteilung, Wahrnehmung, Grenzwerte, Psychologie und Physiologie wurden zur Klassifizierung den Beiträgen zugeordnet (auch bei englischsprachigen Beiträgen in Deutsch) und unterstützen eine zielgerichtete Textsuche (siehe Abbildung 7, Ausschnitt A). Weiterhin können Titel und Abstracts mit Stichwörtern in der jeweiligen Sprache zur inhaltlichen Filterung herangezogen werden. Dies ist nützlich, da Beiträge vielfach nicht thematisch eng ausgerichtet sind, sondern verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit tieffrequentem Schall bzw. Infraschall behandeln.

Obwohl sich die Literaturrecherche auf tieffrequenten Schall und Infraschall konzentriert, wurden auch solche Beiträge in der Datenbank aufgenommen, die weder im Titel noch im Abstract die beiden Begriffe aufführen. Meist trifft dies dann auch auf den Volltext zu. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, weil die Publikationen mögliche Hinweise und Anregungen enthalten könnten, deren Relevanz sich nicht abschließend einschätzen lässt.

Neben der inhaltlichen Klassifizierung wurden die Beiträge nach folgenden vier Merkmalen evaluiert (vgl. Abbildung 7, Ausschnitt E):

- Relevanz > ja / nein Symbol: R
- Besondere Qualität > ja / nein Symbol: grünes Häkchen
- Ranking > Skala von 1 bis 5 und ohne Angabe Symbol: Stern mit Ziffer
- Priorität > 1 (hoch) bis 3 (niedrig) und ohne Angabe Symbol: Ampelfarben

Das Merkmal der Relevanz wird bejaht, wenn der Inhalt eines Beitrages einen engen thematischen Bezug zu den Fragestellungen in dieser Studie aufweist. Die besondere Qualität eines wissenschaftlichen Beitrags wird befunden, wenn dieser sich substantiell von den Beiträgen zum gleichen Thema abhebt. Eine weitere Form der Differenzierung bietet das Ranking. Es kann als relatives Maß für den Informationsgehalt eines Beitrages gesehen werden, bei dem u. a. auch der Umfang oder die Originalität berücksichtigt wird. Die Einstufung stellt damit keine Bewertung im üblichen Sinne des Rankings dar. Zusammenfassend gibt die Priorität eine Orientierung in der Reihung der Publikationen bei der Auswertung.

Beiträge mit der Priorität 1 wurden zunächst in der weiteren Bearbeitung berücksichtigt, gefolgt von denen entsprechend ihrer geringeren Priorität. Beiträge ohne Priorität stehen sozusagen in einer Warteschlange und sind möglicherweise bei neu aufkommenden Fragestellungen heranzuziehen. Die nachfolgende Tabelle fasst zusammen, wie die Klassifizierungsmerkmale in Kombination mit den verschiedenen Prioritäten auftreten.

Tabelle 3: Verteilung der Klassifizierungsmerkmale (Stand Juli 2013)

		Anzahl der Beiträge mit Merkmal						
Zugeordnete Priorität	Anzahl der Beiträge	Qualität	Relevanz	Ranking 5	Ranking 4	Ranking 3	Ranking 2	Ranking 1
Priorität 1	338	59	292	225	106	7	0	0
Priorität 2	117	0	21	5	35	63	13	1
Priorität 3	40	0	2	1	1	1	12	25

5.3 Stand des Wissens

5.3.1 Literaturanalyse

Die Intensität, mit der man sich in den verschiedenen Staaten mit Infraschall und tieffrequentem Schall wissenschaftlich befasst, ist unterschiedlich ausgeprägt. Zwar lässt sich anhand der Datenbank keine genaue Aussage über die Quantität der landesspezifischen Aktivitäten machen, da die Beiträge zum Teil in internationaler Kooperation entstanden sind. Die Häufigkeit, mit der Autoren bestimmter Institute genannt werden, lässt jedoch eine geografische Schwerpunktbildung erkennen. Dies zeigt ebenfalls eine Auswertung, der in der Datenbank mit der Priorität 1 und dem Ranking 5 versehenen Beiträge nach Länderzugehörigkeit. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 4: Anzahl der Beiträge mit Priorität 1 nach Länderzuordnung

Land	Anzahl der Beiträge
Großbritannien	41
Dänemark	29
USA	29
Deutschland	22
Japan	21
Niederlande	17
Schweden	17
Australien	11
Kanada	11
China	7
Polen	6
Portugal	6
Belgien	2
Neuseeland	2
Finnland	1
Frankreich	1
Italien	1
Norwegen	1

Nach dieser Auswertung beschäftigt man sich insbesondere in Großbritannien, aber auch in Dänemark, den USA, Japan, den Niederlanden und Schweden mit Infraschall und tieffrequentem Schall intensiver, häufig im Zusammenhang mit Windenergieanlagen. Dass Deutschland von der Anzahl der Veröffentlichungen her in diesem Kreis zu finden ist, ist mehr auf den Einbezug auch nicht-wissenschaftlicher Themen zurückzuführen, als auf ein umfassendes wissenschaftliches Engagement in diesem Bereich.

Weiterhin ist von Interesse, welche Forschungsfragen schwerpunktmäßig bearbeitet werden. Hierfür wurden Themengruppen mit dazugehörigen Fragen gebildet:

Themengruppe I „Schallabstrahlung“: Welchen Schall strahlen welche Quellen ab?

Themengruppe II „Schallausbreitung“: Wie breitet sich der Infraschall und tieffrequenter Schall aus?

Themengruppe III „Lärmwirkungen“: Wie wirkt sich Infraschall und tieffrequenter Schall auf den Menschen aus?

Diesen Fragen wurden jeweils geeignete Schlüsselwörter zugeordnet.

Zur Frage I gehören die Schlüsselwörter (einzeln oder kombiniert):

- Quelle, Abstrahlung

Zur Frage II gehören die Schlüsselwörter (einzeln oder kombiniert):

- Ausbreitung, Meteorologie Außen, Innen, Schallschutz, Ortung

Zur Frage III gehören die Schlüsselwörter (einzeln oder kombiniert):

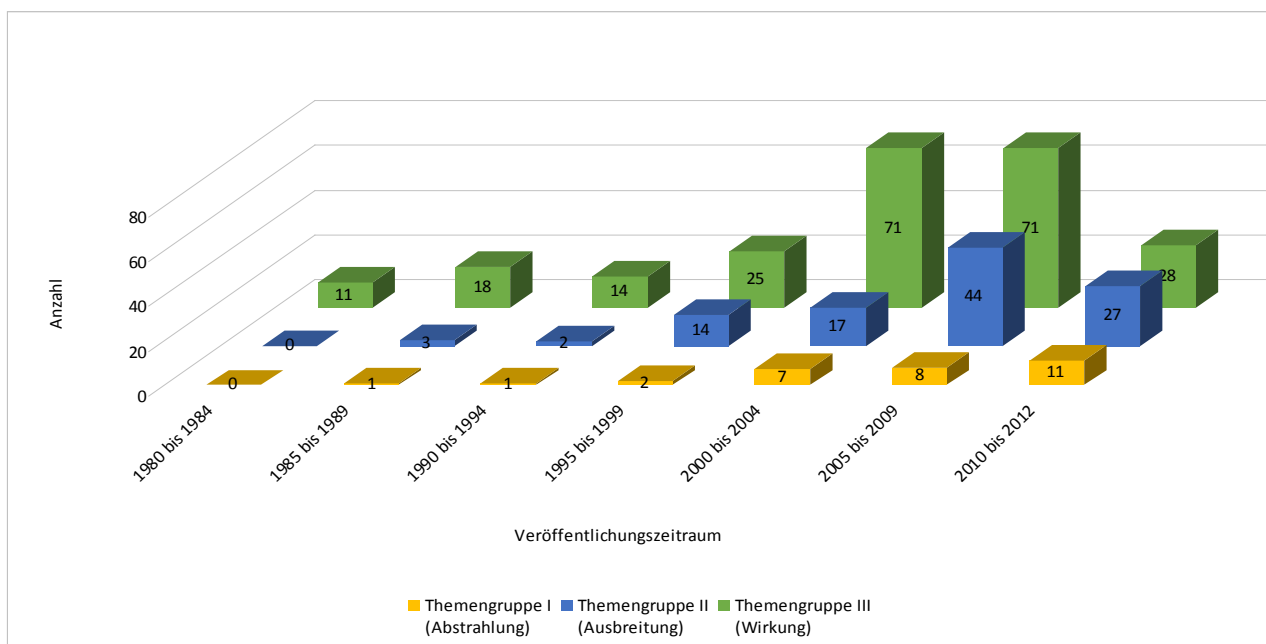
- Lästigkeit, Leistungsminderung, Gesundheit, Beurteilung, Medizin, Physiologie, Psychologie, Wahrnehmung

Daneben gibt es noch allgemeine Schlüsselwörter, die entweder für sich alleine stehen können oder mit den Schlüsselwörtern in den Gruppen I, II und III kombinierbar sind:

- Feldstudien, Laborstudien, Messung, Grenzwerte, Spektrum, Zeitverlauf, Bewertung, Statistik, Modell, Standard, Review, Politik, Bürgerinitiative

Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 8 dargestellt. Sie zeigt die Häufigkeit der Veröffentlichungen zu den Themengruppen I bis III für die Erscheinungsjahre 1980 bis 2012².

Abbildung 8: Verteilung der Veröffentlichungen über die Jahre 1980 bis 2012 zu den Themengruppen I, II und III unter Einbezug von Priorität 1 und 2



Die Abbildung lässt einen starken Anstieg in Themengruppe III („Lärmwirkungen“) um die Jahrtausendwende erkennen. Dies dürfte auf die angefachte Diskussion über Anlagen für erneuerbare Energien zurückzuführen sein. Auch das Interesse an Fragen der Schallausbreitung (Gruppe II) – besonders im Bereich der Bauakustik – hat deutlich zugenommen. Dazu gehört auch die Frage nach der Ortbarkeit von tieffrequenten Quellen, die sich immer wieder stellt. Deutlich geringer und nur langsam anwachsend sind dagegen die Publikationen, die sich mit der Schallabstrahlung befassen (Themengruppe I). Ein Grund dafür mag die lange verbreitete Ansicht sein, dass tieffrequente Quellen ausschließlich ungerichtet

² Der scheinbare Rückgang der Publikationszahlen in den Jahren 2010 bis 2012 ist darin begründet, dass nur drei Jahre betrachtet wurden und die Sichtung der Beiträge Mitte 2012 endete.

(omnidirektional) abstrahlen, so dass hierfür nur einfache Modelle erforderlich sind. Neuere Erkenntnisse über die Richtcharakteristik tieffrequenter Quellen deuten jedoch daraufhin, dass wesentlich komplexere Modelle notwendig sind.

5.3.2 Technisch/akustische Aspekte

Immissionsrichtwerte

Eine Beschreibung verschiedener europäischer Lärmschutzregelungen gegen tieffrequente Geräusche ist z. B. Moorhouse et al. (2005) [98] zu entnehmen, eine Bewertung findet sich in Poulsen (2005) [123]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die zugrunde gelegten Immissionsrichtwerte variieren. Ebenso sind die Eckfrequenzen, innerhalb derer die jeweilige Richtlinie für tieffrequenten Schall anzuwenden ist, unterschiedlich. Tabelle 5 gibt einen Überblick über ausgewählte nationale und internationale Richtwerte für tieffrequenten Schall.

Tabelle 5: Referenzwerte in den Richtlinien verschiedener Länder für tieffrequenten Schall und in der ISO 226 nach [98]

Frequenz in Hz	Richtwert in dB					
	Deutschland	Dänemark	Schweden	Polen	Niederlande	ISO 226
8	103					
10	95	90,4		80,4		
12,5	87	83,4		73,4		
16	79	76,7		66,7		
20	71	70,5		60,5	74	78,5
25	63	64,7		54,7	64	68,7
31,5	55,5	59,4	56	49,3	55	59,5
40	48	54,6	49	44,6	46	51,1
50	40,5	50,2	43	40,2	39	44
63	33,5	46,2	41,5	36,2	33	37,5
80	28	42,5	40	32,5	27	31,5
100	23,5	39,1	38	29,1	22	26,5
125		36,1	36	26,1		22,1
160		33,4	34	23,4		17,9
200			32	20,9		14,4
250				18,6		11,4

Die für Deutschland in der Tabelle angegebenen Werte entstammen der DIN 45680 [27] von 1997. Diese Norm wird zum derzeitigen Zeitpunkt, 2013, überarbeitet. Die Entwurfsfassung der neuen DIN 45680 enthält zwar niedrige Richtwerte, es wurde aber auch das Bewertungsverfahren geändert (vgl. Krahé (2012) [71]). Ein Vergleich beider Versionen anhand verschiedener Fälle wird in Krahé (2012) [68] vorgenommen.

Strenge Lärmschutzanforderungen gegenüber tieferen Frequenzen weist eine polnische Richtlinie auf. Zudem hebt sich die Ausweitung bis zu 250 Hz von den anderen Richtlinien ab. Der Hintergrund für diese Regelungen liegt offensichtlich darin, dass in Polen eine Richtlinie für Infraschall existiert, die die Belastung am Arbeitsplatz in Abhängigkeit von der Tätigkeit regelt. Es geht also nicht nur darum, den Schutz gegen physische Beeinträchtigungen zu gewährleisten, sondern auch eine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit im Rahmen der Berufsausübung zu vermeiden. Tabelle 6 stellt die Werte vor.

Tabelle 6: Tätigkeitsabhängige spektrale Anhaltswerte für Infraschall entsprechend dem polnischen Standard PN-86/N-01338 aus [10]

Zulässiger Schalldruckpegel [dB] „Lärmdosis“	Mittenfrequenz des Oktavbandes			
	4	8	16	31,5
1. Kategorie Gesundheitsschäden <i>kursiv: maximal zulässiger Pegel</i>	110	110 <i>137</i>	110 <i>137</i>	105 <i>132</i>
2. Kategorie Überwachungsaufgaben	90	90	90	85
3. Kategorie Verwaltungsaufgaben; Konstruktions- -Büro; theoretische Arbeiten	85	85	85	80

Lärmmessverfahren

Der komplexen Natur der Hörwahrnehmung stehen Lärmmessverfahren gegenüber, die im technischen Aufwand und der Handhabung praxisgerecht ausgelegt sind und anhand derer die Belästigung zu beurteilen ist. Abgesehen von den Richtwerten selbst werden in den Richtlinien die Messwerte vorgegeben, die zu den Richtwerten in Relation zu setzen sind. In der noch gültigen Fassung der DIN 45680 [27] sind dies der Mittelwert L_{eq} und die maximalen Pegel $L_{f,max}$ in den Terzbändern angegeben. In der Regel führen die L_{eq} -Werte zu der Bestätigung einer Belästigung. In der Entwurfsfassung der DIN 45680 wird anstatt des L_{eq} der 5%-Überschreitungspiegel L_5 herangezogen. Damit soll dem Umstand Rechnung getragen werden, dass primär die Pegelwerte oberhalb des Mittelwertes die Belästigung bestimmen. Ob damit auch die Wirkung der Fluktuation / Schwankungsstärke sachgerecht erfasst wird, kann noch nicht abschließen beurteilt werden und muss zunächst in der Praxis erprobt werden. Wie durch Krahé und Krahé / Borgmann (2012) [71][68] gezeigt wird, tendiert das neue Verfahren dahin, zwar breitbandigere Geräusche etwas strenger, dafür aber tonale Geräusche ein wenig unkritischer zu bewerten.

Als besonders positive Merkmale der Entwurfsfassung der DIN 45680 sind hervorzuheben,

- dass zur Feststellung der tieffrequenten Situation, die Differenz zwischen dem C- und A-bewerteten Pegel nicht mehr 20 dB, sondern nur noch 15 dB betragen muss. Damit ist es dann grundsätzlich nicht mehr möglich, bei einer Differenz von zum Beispiel 19,5 dB die besondere Situation einer tieffrequenten Belastung ohne weitere Prüfungen zu verneinen. Diese Änderung ist von erheblicher Bedeutung, da dann entsprechend der Richtlinie die Terzanalyse zugrunde gelegt wird und, ganz wesentlich, innerhalb der Wohnung an der auffälligsten Stelle gemessen wird.

- dass tagsüber wie bereits vorher nachts, die lauteste Stunde herangezogen wird.

Frequenzbewertung

Die A-Bewertung wird in der Literatur vielfach als ungeeignet angesehen, um tieffrequente Geräusche in ihrer Belästigung richtig einschätzen zu können (vgl. [151][117][118][77][139][167]). Eine modifizierte Form wird in Dänemark angewendet, wo der A-bewertete Pegel des auf den Frequenzbereich von 10 bis 160 Hz begrenzten Geräusches gemessen wird, dies allerdings außen. Die entsprechende Norm [169] gilt für Industrieanlagen, zu denen auch Windenergieanlagen gezählt werden. Es werden zwar in dieser Norm bestimmte Innenpegel angestrebt - der anspruchsvollste Wert ist ein $L_{pA,LF} = 20$ dB für die Nacht, doch diese werden nur kalkulatorisch überprüft (Umrechnung auf den Innenpegel). Dabei wird von einer bestimmten Übertragungsfunktion von außen nach innen ausgegangen. Ein Wert von $L_{pA,LF} = 20$ dB wird zwar auch von kritischen Wissenschaftlern als eine vernünftige Zielsetzung betrachtet (vgl. Møller et al. (2011) [96]), doch die kalkulatorische Grundlage macht einiges zunichte, denn eine Fehlkalkulation kann nach Møller et al. (2011) [95] schnell einige dB betragen. In Anbetracht des Umstandes, dass schon beim Erreichen der Hörschwelle eine Beeinträchtigung nicht auszuschließen ist, wiegt dies schwer. So stößt diese Lösung in Dänemark vermehrt auf Widerstand (vgl. The Telegraph (2010) [25]).

Lärmmessung im Innenraum

Das Problem der Messung in Räumen ist Gegenstand zahlreicher Publikationen (u. a. [100][106][137][111][112][105]). Durch die häufig ausgeprägten Raummoden ergeben sich selbst innerhalb eines Raumes starke Pegelunterschiede, so dass Außenmessungen bevorzugt werden. Sinnvoll scheinen die Messpositionen zu sein, die von den Betroffenen als besonders kritisch benannt werden. Diese Regelung wird z. B. in der DIN 45680 [27] getroffen. Mit welcher Genauigkeit eine Messung im Innenraum durch eine Außenmessung ersetzt werden kann, ist noch zu klären.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob ein A-bewerteter oder ein anderer bewerteter Einzahlpegelwert als Maß ausreichend ist, um von außen sachgerecht auf einen Innenpegel zu schließen. Ein so erfasstes Geräusch kann bei gleichem Wert in seiner spektralen Zusammensetzung dennoch stark unterschiedlich sein. Ebenso kann bei verschiedenen Gebäuden die Außen/Innen-Übertragungsfunktion spektral sehr unterschiedlich sein. Eine genaue Voruntersuchung wäre also immer notwendig, um die Möglichkeiten eines wirksamen Lärmschutzes einschätzen zu können. Allerdings ist es derzeit kaum möglich, sich wirksam gegen den tieffrequenten Lärm von außen zu schützen (vgl. [53][94][50]). Unter Umständen können neue technische Verfahren der aktiven Lärminderung zukünftig eine Verbesserung erbringen (vgl. [85][47][141][83]). Sie sind aber zurzeit noch nicht für einen breiten Einsatz verfügbar.

Immissionsprognose

Eine Prognose der Schallverhältnisse am Immissionsort (außen) auf Basis der Gegebenheiten am Emissionsort (außen) ist trotz der angesprochenen, fast ungehinderten Schallausbreitung schwierig. Sie ist nur dann zutreffend, wenn

- a) ein geeignetes Quellenmodell angewendet wurde und
- b) der Abstand zwischen den beiden Orten nicht zu groß ist.

Diese Rahmenbedingungen sind häufig nicht gegeben und so ist erklärbar, dass Prognosen nicht selten von den gemessenen Ergebnissen erheblich abweichen. Ebenso schwierig ist der Rückschluss von den Gegebenheiten am Immissionsort auf die verursachende Quelle.

Zu a): Liegt kein geeignetes Quellenmodell vor, so besteht die Gefahr, dass die Gegebenheiten am Emissionsort nicht repräsentativ erfasst werden und damit die Basis für eine fundierte Prognose fehlt. Bei Windenergieanlagen scheint dieses Problem vorzuherrschen, denn bei entsprechenden Untersuchungen werden häufig Abweichungen zwischen Modell und Messung (vgl. [4][60]) festgestellt. Zur Verbesserung der Prognose werden deshalb nach Turnbull et al. (2012) [150] Alternativen zum Kugelwellenmodell vorgeschlagen, mit denen eine Abstandsverdopplung mit einer Reduktion von 6 dB verbunden wäre. Hierdurch würden allerdings die Pegel am Immissionsort regelmäßig unterschätzt werden. Bei einem Zylinderwellenmodell, von dem bei größeren Windenergieanlagen eine Verbesserung der Prognose erwartet wird (vgl. [94][54]), wären dies nur 3 dB pro Verdopplung. Wahrscheinlich ist aber auch dieses Modell zu einfach. Das charakteristische pulsierende Geräusch von Windenergieanlagen, das lange Zeit mit dem Passieren eines Rotorblatts am Turm erklärt wurde, wird derzeit mit dem Durchschneiden verschiedener Schichten im Windprofil erklärt. Dabei entstehende Turbulenzen könnten nach Kameier et al. (2103) [65] einen impulshaltigen Charakter verursachen. Bei solchen Turbulenzen können sich Wirbel ablösen, die auch über größere Entfernungen sehr formstabil zu einer stark gerichteten Abstrahlung führen können. Ein mittlerweile schon berühmtes Bild (Abbildung 9) kann dafür als Beleg herangezogen werden. Es ist die Aufnahme des Off-Shore-Windparks Horns Rev 1. Die meteorologischen Bedingungen sind so, dass die Luftfeuchte knapp unter der Sättigungsgrenze liegt. Die leichte Druckerhöhung durch die Luftwirbel löst eine Kondensation aus. Damit zeigen die Kondensationsfahnen die Verteilung der Druckwelle an. Auch die Betreiber von Windenergieanlagen interessieren sich für dieses Phänomen, da Windenergieanlagen, die in Wirbelschleppen von anderen Anlagen liegen, weniger effektiv Strom erzeugen (Parkeffekt).

Abbildung 9: Aufnahme des Off-Shore-Windparks Horns Rev 1 von Vattenfall aus [70]



© Photograph: Christian Steiness

Zu b): Ein großer Abstand zwischen Emissions- und Immissionsort verstärkt den Einfluss der Meteorologie. Dies kann bei instabilen Wetterlagen schlagartig andere Ausbreitungsverhältnisse und damit stark schwankende Pegel zur Folge haben. Die von vielen Betroffenen gemachte Beobachtung, dass nachts die Geräusche von Windenergieanlagen lauter wären, wurde früher mit einer erhöhten Empfindlichkeit / Aufmerksamkeit der Betroffenen hinsichtlich der Geräusche erklärt. Durch Van den Berg (2006) [156] konnte aber nachgewiesen werden, dass nachts systematisch andere Ausbreitungsbedingungen vorliegen, die auch dafür verantwortlich sind. Nicht selten ist festzustellen, dass Pegel mit zunehmendem Abstand nicht kontinuierlich abnehmen, sondern auch zunehmen können. Dieser Effekt ist durch das Windprofil bedingt.

5.3.3 Wirkungen von Infraschall auf den Menschen

Eine detaillierte Analyse der verfügbaren Literatur zeigt, dass weitgehend auf den tieffrequenten Bereich konzentrierter Schall schon bei niedrigen Pegeln das mentale Wohlbefinden deutlich beeinträchtigen kann. Mit zunehmender Verschiebung zu tiefen Frequenzen bis in den Infraschallbereich verstärkt sich dieser Effekt. Das ist das Ergebnis verschiedener Untersuchungen im Feld und im Labor (vgl. [162][26][69][113][9][159][8]). Schwierig ist dabei eine Grenzziehung, ob eine Belästigung wirklich einer messbaren Belastung zuzuordnen ist, wie z. B. Van den Berg (2000/2012) [155][157] feststellt. Eine Konzentration des Schalls auf den tieffrequenten Bereich tritt im Alltag immer häufiger auf. Als wesentliche Gründe hierfür sind zu nennen:

- das vermehrte Vorhandensein tieffrequenter Quellen
- die physikalisch bedingte fast ungehinderte Ausbreitung des tieffrequenten Schalls
- die baulichen Schallschutzmaßnahmen (z. B. Schallschutzfenster), die fast ausschließlich gegen den Schall im mittleren und höheren Frequenzbereich schützen (konventionelle Bautechnik),

- die Ausbildung von starken Raumresonanzen, die durch moderne Architektur und Wohnungseinrichtungen gefördert werden.

In einer sehr leisen Umgebung – z. B. in einer sehr ruhigen Wohngegend in der Nacht – kann eine mentale Wirkung schon eintreten, wenn der Schall gerade wahrnehmbar ist. Konsequenterweise orientieren sich die einschlägigen Regelwerke an der Hörschwelle.

Die Hörschwellen der einzelnen Menschen variieren. In Møller / Pedersen (2004) [93] wird davon gesprochen, dass individuelle Hörschwellen bis zu 20 dB unterhalb der mittleren Hörschwelle liegen können. Neben diesem individuellen Faktor gibt es weitere Faktoren, die dazu beitragen, dass ein Geräusch auch unterhalb der festgelegten Hörschwelle hörbar ist. Diese wurde nämlich mit Sinustönen ausgemessen. Vielfach wurde belegt, dass komplexere Geräusche zu einer niedrigeren Hörschwelle führen, d. h. das ein Geräusch mit einer höheren Wahrscheinlichkeit hörbar ist, auch wenn alle seine Komponenten unterhalb der festgelegten Hörschwelle liegen (vgl. Møller / Pedersen (2004) [93]). Da die unterste Frequenzgruppe bis 100 Hz reicht, kann dies auf eine summarische Wirkung der einzelnen Komponenten zurückzuführen sein. In der Regel sind Geräusche, die auf ein schmales Frequenzband begrenzt sind, in ihrer Einhüllenden stark fluktuierend. Dies ist ein weiteres Merkmal, das zu einer erhöhten Wahrnehmbarkeit des Geräusches führt. Bislang wird dieses Merkmal aber nur in einer dänischen Richtlinie [169] in Form eines Zuschlags berücksichtigt, wenn die Differenz zwischen dem 10er- und dem 90er-Perzentil 5 dB übersteigt. In Anbetracht des Umstandes, dass in den einschlägigen Veröffentlichungen einhellig die Meinung vertreten wird, dass Pegelschwankungen einen starken Einfluss haben und zu berücksichtigen sind (vgl. [123][101][99][12][74][79][86][154]), könnte hier noch mehr getan werden. Allerdings besteht in der Wissenschaft kein Einvernehmen über das geeignete Maß, denn die Perzentildifferenz allein reicht für eine fundierte Aussage über die erhöhte Wahrnehmbarkeit nicht aus. Daneben ist nach Bengtsson et al. [9] auch die Frequenz von Bedeutung, mit der die Einhüllende variiert.

Dass mit einer erhöhten Wahrnehmbarkeit eine erhöhte Lästigkeit einhergehen kann, ist nachvollziehbar. Trotzdem müssen Personen mit einer niedrigeren Hörschwelle nicht zwangsweise stärker belästigt sein. So können jüngere Personen zwar eine niedrigere Hörschwelle haben, gleichzeitig aber eine höhere Akzeptanz gegenüber tieffrequenten Geräuschen aufweisen. Auf der anderen Seite gibt es einen gewissen Prozentsatz von Personen, der allerdings nicht genau beziffert werden kann, die insbesondere gegenüber tieffrequenten Geräuschen sehr empfindlich sind. Bei ihnen fallen die Hör- und die Akzeptanzschwelle zusammen, d. h. sobald sie das Geräusch hören, fühlen sich sehr belästigt (vgl. [97][168]).

Ein großer Anteil der Veröffentlichungen befasst sich mit der Frage der Abschätzung der empfundenen Belästigung auf Grundlage der gemessenen Belastung. Dabei kristallisiert sich kein einheitliches Bild heraus. In manchen Untersuchungen (z. B. [103][73][142][58][56]) wird extra darauf hingewiesen, dass die Probanden Normalhörende (häufig jüngere Leute) sind, die zum Teil vor dem Test daraufhin untersucht wurden. Falls solche Tests bei Studien nicht durchgeführt wurden, trug die Gruppe der besonders empfindlichen Personen bei der Analyse zu erhöhten Varianzen bei. Die Untersuchungen, die den Umstand der besonderen Empfindlichkeit als Merkmal erfassten, weisen daher oft eindeutige Forschungsergebnisse aus (vgl. [168][102][122][160][41][3][78][123]).

Es lässt sich diskutieren, ob eine solche Sonderbehandlung gerechtfertigt ist. Schließlich ist fast jeder Mensch in irgendeiner Hinsicht biologisch gesehen empfindlich und wird trotzdem nicht zum Maßstab genommen. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die Situation anders bewertet werden könnte, wenn jemand durch eine Exposition erst empfindlich wird. Die Forschungen von A. Salt (2010 – 2012) [128] [130][129] befassen sich mit Mechanismen, anhand derer dies

erklärbar wäre. Aus dem Umstand, dass die äußeren Haarzellen im Innenohr fest mit der darüber liegenden Tektorialmembran verbunden sind, während die inneren Haarzellen nur in den mit der Tektorialmembran gebildeten Flüssigkeitsspalt hineinragen, resultiert bei tiefen Frequenzen ein prinzipiell unterschiedliches Verhalten. Ausgelöst durch Bewegungen der Basilarmembran führt die Tektorialmembran Scherbewegungen gegenüber den Haarzellen aus, die auch bei beliebig langsamen Bewegungen die äußeren Haarzellen verbiegen. Diese reagieren mit merklich evozierten Potenzialen. Demgegenüber kann die Flüssigkeit mit abnehmender Frequenz immer weniger die Bewegung auf die inneren Haarzellen übertragen, da die übertragbaren Kräfte proportional zur Geschwindigkeit sind. Die inneren Haarzellen sind die eigentlichen Sensoren, die ihre Anregung über afferente³ Hörnerven an das Gehirn weiterleiten. Die äußeren Haarzellen fungieren als Aktoren. Ihre Verbindung zum Gehirn besteht im Wesentlichen aus efferenten Nervenfasern (vom Gehirn kommend), doch ein kleiner Teil ist auch afferenter Natur. Sie könnten damit in einen komplizierten Regelungsmechanismus eingebunden sein, der bei Daueranregung zu anormalen Reaktionen führen könnte.

Weiterhin hat A. Salt (2012) [128] bei Tieren eine erhöhte Reaktion nahe der Spitze (Bereich zuständig für tiefe Frequenzen) der Cochlea⁴ in vivo⁵ festgestellt, wenn im Stimulus höhere Frequenzanteile fehlen. Möglicherweise ist dies ein physiologisches Korrelat für die erhöhte Lästigkeit von konzentriert tieffrequenten Geräuschen. Ein weiteres Phänomen, dem Salt nachgegangen ist, ist die Bildung so genannter Hydrops (Volumenerweiterungen) in der Scala media. Untermauert von den Ergebnissen mittels einer neuen Messmethode konnten die Vorgänge, die zur Bildung von Hydrops führen, nachvollzogen werden (vgl. Salt (2010) [128]). Es wird angenommen, dass über eine Verbindung zum Gleichgewichtsorgan die Volumenerweiterung auf dieses Organ wirken kann. Dadurch könnten die gelegentlich beschriebenen Irritationen wie Schwindelgefühle ausgelöst werden, die die Wahrnehmung von tieffrequenten Geräuschen begleiten.

Nachfolgend sind die wichtigsten Untersuchungen aufgeführt, aus denen eine quantifizierbare Beurteilung von Infraschall abgeleitet wird:

Extraaural (vegetative Wirkung)

Evans (1972) [36] setzte 20 männliche und fünf weibliche Probanden Frequenzen von 2 Hz bis 10 Hz bei Pegeln von 130 dB bis 146 dB aus. Festgestellt wurden ein vertikaler Nystagmus⁶ und ein subjektiv empfundenes Schwingungsgefühl. Diese Effekte waren bei einer Frequenz von 7 Hz am stärksten ausgeprägt. Außerdem verlängerte sich die Reaktionszeit im Labor um 30 bis 40% bei Pegeln von 115 dB bis 120 dB im Bereich 1 Hz bis 20 Hz.

Karpova (1970) [66] setzte männliche Probanden industriellem Infraschall (5/10 Hz mit 100/135 dB) aus. Dabei wurden Müdigkeit, Benommenheit, Apathie, Depressionen, Konzentrationseinbußen und Schwingungen der inneren Organe festgestellt. Weiterhin war die Leistung der Herzmuskelkontraktion verringert.

³ Zum zentralen Nervensystem laufende Nervenfasern

⁴ Teil des Innenohrs Hörschnecke, Ist das Rezeptorfeld für die Hörwahrnehmung,

⁵ Am lebenden Organismus

⁶ Nystagmus = unkontrolliert, rhythmisches Zucken der Augen

Slarve (1975) [138] stellte bei den Probanden während Infraschalleinwirkung im Bereich von 1 Hz bis 30 Hz bei Schalldruckpegeln von 120 dB bis 144 dB eine Modulation der Stimme und ein Gefühl der Schwingung des Körpers fest.

Ising (1979) [58] exponierte 28 Personen über einen Zeitraum von acht Stunden. Dabei wurden im Vorversuch Töne mit Schalldruckpegeln von 70 dB und 80 dB bei 7 Hz und 100 bis 125 dB bei 5 bis 20 Hz sowie Terzrauschen von 12,5, 16 und 20 Hz bei 70 und 80 dB eingespielt. Des Weiteren wurden über Kopfhörer Einzeltöne von 5 bis 15 Hz bei 100 bis 140 dB eingespielt. Im Hauptversuch wurden die Testpersonen im Infraschalldruckfeld bei 12,5 Hz Terzrauschen und einem äquivalenten Dauerschallpegel von 110 dB untersucht. Am stärksten war bei den Probanden die Konzentration beeinflusst. Es konnte auch ein leichter Anstieg des Blutdrucks und eine Herzratenveränderung beobachtet werden. Diese Reaktionen waren bei den Personen stärker, die sich subjektiv stärker beeinflusst fühlten.

In einer späteren Studie untersuchte Ising (1982) [57] 18 Probanden, die über zehn Arbeitstage für acht Stunden einem Oktavrauschen verschiedener Frequenzen (3 bis 24 Hz bei 110 dB) und oder Verkehrslärm bei 75 dB(A) ausgesetzt waren. Es wurden teilweise frequenzabhängige Veränderungen registriert. Der Anstieg des Blutdrucks wurde mit zunehmender Frequenz verstärkt. Bei abnehmender Frequenz verringerte sich die Respirationsfrequenz⁷ (bei Oktavrauschen 3 bis 6 Hz sogar hochsignifikant). Die Adrenalinausschüttung hingegen war unabhängig von der Frequenz konstant erhöht.

Faustov (1993) [37] stellte nach einer Exposition im Schallfeld bei 10 Hz und 100 dB über 24 Tage (sechs Stunden täglich), ab der vierten Stunde der Einwirkung eine anfängliche Aktivierung des vegetativen Nervensystems, eine veränderte Gerinnungsfähigkeit und einen veränderten Sauerstoffgehalt des Blutes fest.

Danielson (1985) [23] setzte männliche Probanden zwischen 20 und 30 Jahren für 20 Minuten (zwischen den Tests lag eine Ruhezeit der gleichen Zeitdauer) einem Schalldruck von 125 dB bei Frequenzen von 6, 12 und 16 Hz aus. Zusätzlich wurden Schalldruckpegel von 95, 110 und 125 dB bei einer Frequenz von 16 Hz getestet. Bei einem zweiten Versuch betrug die Expositionsdauer eine Stunde (zwischen den Tests lag eine Ruhezeit der gleichen Zeitdauer), wobei entweder mit 16 Hz und 125 dB, oder mit 50 Hz und 50 dB(A) (= 80,2 dB) beschallt wurde. Die Infraschalleinwirkung rief eine starke Veränderung des Blutdrucksystems hervor. Dieser Effekt war für den diastolischen Blutdruck am größten. Während des Versuchs war die Herzfrequenz bei allen Probanden signifikant erniedrigt.

Landstroem (1983) [76] führte einen Laborversuch mit zehn normal hörenden und zehn tauben Probanden durch. Die Expositionsdauer betrug 20 Minuten bei 6 Hz und 110 dB. Bei den Normalhörenden kam es zu einer Verminderung der Aufmerksamkeit, des Blutdrucks und der Herzfrequenz. Bei den Tauben traten diese Effekte nicht auf.

Takigawa (1988) [143] setzte 34 Personen für fünf Minuten einem breitbandigen tieffrequenten Rauschen von 0,1 bis 10 Hz, 5 Hz und 16 Hz bei 95 dB(C) aus. Hierbei wurde festgestellt, dass beim Schließen der Augen die konfusen Körperschwingungen⁸

⁷Respirationsfrequenz = Atemfrequenz

⁸ Körpereigenresonanzeffekte gemessen mit EEG

verringert wurden. Daraus ergab sich für ihn die Annahme, dass die Erregbarkeit des Gleichgewichtorgans durch Infraschall beschleunigt wird.

Wysocki (1980) [166] setzte 40 Probanden für einen in Abhängigkeit von der Stabilisierung der untersuchten vegetativen Parameter und dem Befinden der Probanden variierenden Zeitraum einer Frequenz von 2,4 bis 30 Hz bei einem Schallpegel von 75 dB bis 85 dB aus. Es wurden sinkende Tendenzen bei der Herzfrequenz, der elektrischen Leitfähigkeit der peripheren Gefäße⁹, der Hauttemperatur und der Leistung bei der Lösung serieller Wahlreaktionsaufgaben beobachtet. Die Ausgangswerte dieser Kenngrößen wurden auch 40 Minuten nach der Exposition nicht wieder erreicht.

Doroschenko (1983) [30] führte eine Querschnittsstudie mit 216 Arbeitern durch. Diese waren über einen Zeitraum von einem bis mehr als 20 Jahren täglich 6 bis 6,5 Stunden Infraschall ausgesetzt. Die Geräusche wurden mit Kompressoren mit Schalldruckpegeln von 91 bis 119 dB erzeugt. Zusätzlich waren die Probanden tieffrequentem Lärm des Hörbereichs mit 84 bis 97 dB ausgesetzt. Das Alter der Untersuchten lag zwischen 20 und 50 Jahren. Es wurden Beeinträchtigungen der Haltungs- und Bewegungskoordination, anormale Befunde beim kalorischen Test¹⁰ und bei der Drehpendelprüfung¹¹ festgestellt. Weiterhin klagten die Untersuchten über Schwindelanfälle, Müdigkeit, Schlafstörungen, Schmerzen in der Herzgegend und Atembeschwerden. Zusätzlich wurde eine Kontrollgruppe von 220 Arbeitern untersucht. Diese Gruppe war normalem Industrielärm, jedoch ohne wesentliche Infraschallanteile ausgesetzt. Die Auswertung der Studie ergab, dass es eine signifikante Verschlechterung des Hörvermögens bei der Gruppe mit Infraschallexposition gab. Die Differenzen im Hörvermögen, im Vergleich zur Kontrollgruppe, stiegen mit der Anzahl der Expositionsjahre.

Tsunekawa (1987) [149] untersuchte in einer Feldstudie die menschliche Wahrnehmung von Infraschall. Die Tests wurden mit 6 männlichen Probanden an unterschiedlichen Orten mit vorherrschenden Infraschallanteilen wie beispielsweise unter Brücken, innerhalb eines Kfz und in der Nähe von Kühltürmen durchgeführt. Im Frequenzbereich zwischen 6 Hz und 23 Hz wurde bei 20% der Probanden eine Nachweisgrenze von etwa 6 dB unterhalb der Hörschwelle (50% Nachweisgrenze) festgestellt. Das Reaktionsniveau von Brust und Bauch lag 6 dB bis 9 dB oberhalb des absoluten Reaktionsniveaus (einschließlich Gehör und Kopf).

Verzini (1999) [160] beschallte 22 Probanden (im Alter zwischen 18 und 25 Jahren) für 30 Minuten mit einem 10 Hz-Ton bei 110 dB und einem 10 Hz-Terzbandrauschen bei 105 ± 2 dB. Bei den Probanden wurden während der Infraschallexposition signifikante Auswirkungen auf Körperresonanzen und subjektive Wahrnehmungen im Vergleich zu den Kontrollbedingungen festgestellt. Physiologische Veränderungen wurden nicht festgestellt.

Ljungberg (2003) [62] untersuchte die Auswirkungen eines Hubschraubergeräusches (21 Hz) auf jeweils 27 männliche und weibliche Personen. Es wurden drei Gruppen gebildet. Die erste wurde mit 77 dB(A), die zweite 81 dB(A) und die übrigen 86 dB(A) beschallt. In

⁹ Unter der Haut liegende Blutgefäße

¹⁰ Spülung der Gehörgänge mit kaltem und warmen Wasser zur Stimulation der Gleichgewichtsorgane

¹¹ Test des Gleichgewichtssystems mittels einer Kombination aus Dreh- und Pendelbewegungen

einer Reihe von Tests wurde die Reaktionszeit der Probanden untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass in dem mittleren Pegelbereich ein Zusammenhang zwischen der Intensität des wirkenden Schalls und der Beeinträchtigung der Reaktionszeit feststellbar ist.

Kaczmarska (2007) [64] führte Untersuchungen zum Einfluss tieffrequenter Schalle und Infraschall auf Arbeitnehmer bei der Durchführung geistiger Arbeiten durch. Bei der Laborstudie wurde aus einer Gruppe von 189 Freiwilligen 60 Probanden (30 Frauen und 30 Männer) ausgewählt. Die Probanden absolvierten psychologische Tests in vier unterschiedlichen Geräuschumgebungen. Die Untersuchungsergebnisse zeigten signifikante Unterschiede in der subjektiven Wahrnehmung der Belästigung durch tieffrequente Geräusche und Infraschall in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht der Probanden.

Aural (das Ohr betreffend)

Karpova (1970) [66] setzte männliche Probanden für 15 Minuten einem Schalldruck von 100 dB und 135 dB bei einer Frequenz von 5 und 10 Hz aus. Es wurde von einem Druck in den Ohren berichtet.

Slarve (1975) [138] beschallte Probanden mit 144 dB bei einer Frequenz von einem bis 20 Hz für acht Minuten. Das Ergebnis war ebenfalls ein schmerzloser Druck auf den Ohren.

Mohr (1965) [90] stellte eine Stunde nach einer zweiminütigen Beschallung mit 10 Hz bzw. 20 Hz bei Pegeln von 150 dB bis 154 dB kein TTS¹² fest.

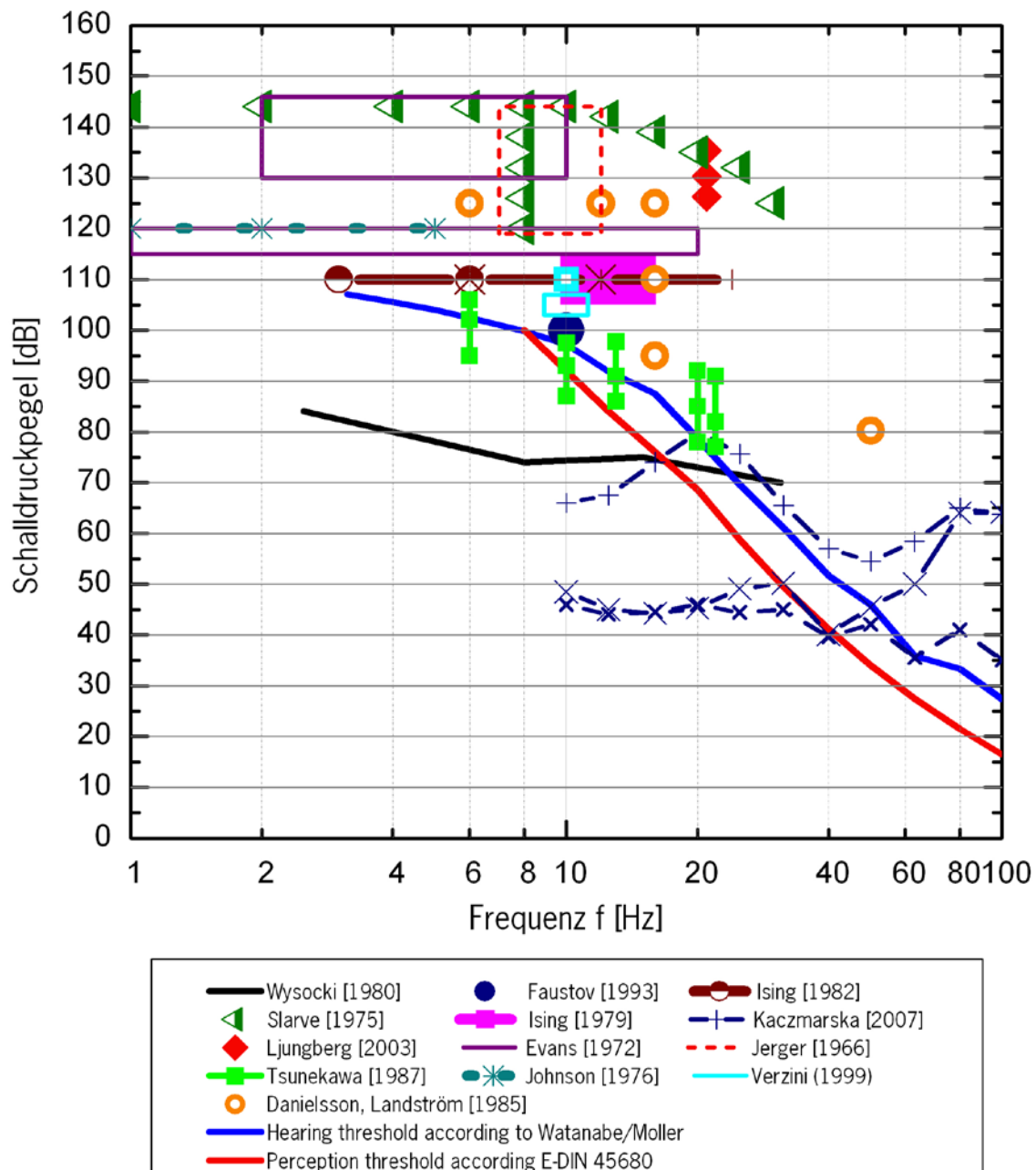
Johnson (1989) [63] beschallte seine Probanden für 15 Minuten bei 7 Hz mit 142 dB und stellte dabei kein TTS fest.

Jerger (1966) [61] stellte nach der Exposition bei 11 von 19 Probanden eine TTS von 10 bis 22 dB in einem Frequenzbereich von 3 bis 8 kHz fest. Die Expositionsdauer betrug drei Minuten (wiederholte 3-minütige Expositionszeit) bei 7 bis 12 Hz mit Schallpegeln von 119 bis 144 dB.

Betrachtet man die exemplarisch aufgeführten Untersuchungsergebnisse, wird deutlich, dass Infraschall ab gewissen Pegelhöhen vielfältige negative Auswirkungen auf den menschlichen Körper haben kann. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass viele der negativen Auswirkungen von Infraschalleinwirkungen die Bereiche Herz-Kreislaufsystem, Konzentration und Reaktionszeit, Gleichgewichtsorgane, das Nervensystem und die auditiven Sinnesorgane betreffen. Probanden klagten häufig über Schwindel- und Unbehaglichkeitsempfindungen bei Infraschallexposition. In nachfolgender Abbildung 10 sind die Pegel- und Frequenzbereiche der hier aufgeführten Untersuchungen, bei denen negative Auswirkungen festgestellt wurden, grafisch dargestellt.

¹² TTS = Temporäre Hörschwellenverschiebung (Temporary Threshold Shift)

Abbildung 10: Pegel-/ Frequenzdarstellung dokumentierter Infraschalleffekte



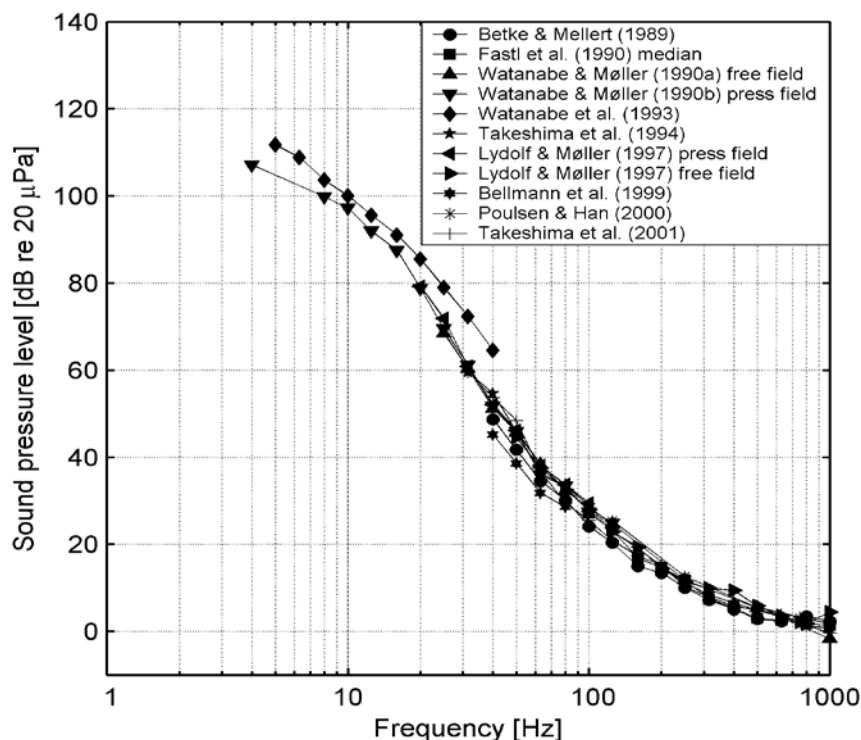
Vergleicht man die Untersuchungsergebnisse, wird deutlich, dass negative Auswirkungen von Infraschall im Frequenzbereich unter 10 Hz auch bei Schalldruckpegeln unterhalb der Hörschwelle nicht ausgeschlossen sind. Die ersten negativen Auswirkungen wurden bei einer Untersuchung (Wysocki [166]) bereits bei Schalldruckpegeln von ca. 75 dB festgestellt, wobei aufgrund des dabei verwendeten Geräuschspektrums Auswirkungen des Schallanteils über der Hörschwelle (> 20 Hz) nicht ausgeschlossen werden kann. Bei den bisherigen Untersuchungen einer unterschweligen Infraschallwirkung war es praktisch nicht möglich, den Schallanteil oberhalb von 20 Hz soweit zu reduzieren, dass ein Effekt dieser Anteile bei den Untersuchungsergebnissen zuverlässig ausgeschlossen werden konnte. Auf der anderen Seite ist bei Konflikten mit ausgeprägt tieffrequenten Schallen selten von einer singulären Infraschalleinwirkung sondern von kombinatorischen Wirkmechanismen auszugehen. Für eine

negative Auswirkung von ausschließlich Infraschall unterhalb der Wahrnehmungsschwelle konnten bislang keine wissenschaftlich gesicherten Erkenntnisse gefunden werden, auch wenn zahlreiche Forschungsbeiträge entsprechende Hypothesen postulieren.

Aus Abbildung 10 geht hervor, dass keine Erkenntnisse zu Belästigungswirkungen vorliegen, die ausschließlich aus dem Infraschallbereich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle resultieren. Zu Lösung dieses Defizits wäre eine Laborstudie durchzuführen, in der unter kontrollierten Bedingungen die Effekte (aural und extraural) von tieffrequenten Geräuschen mit und ohne Infraschall mit konstantem Geräuschanteil oberhalb von 100 Hz (beispielsweise über den Vergleich mit einer Kontrollgruppe) untersucht.

Tendenziell ist in den tieferen Frequenzen des Infraschalls (1 Hz bis 10 Hz) eine höhere Toleranz gegenüber Infraschalleinwirkungen als bei Frequenzen oberhalb von 10 Hz zu erkennen. Diese Aussage wird durch, in der Vergangenheit, durchgeführte Hörschwellenuntersuchungen gestützt (vgl. Abbildung 11). Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „EARS“ [31] wurde unter anderem erforscht, wie und unter welchen Bedingungen die Wahrnehmung von Infraschall über das menschliche Ohr erfolgt. Die ersten Messergebnisse zeigen eine große Übereinstimmung mit der Hörschwelle von Møller [96], so dass trotz des Alters der dargestellten Hörschwelle und den damit einhergehenden messtechnischen Voraussetzungen eine Gültigkeit unterstellt werden kann.

Abbildung 11: Zwischen 1989 und 2001 gemessene Hörschwellen bei tiefen Frequenzen



© Møller [96]

5.4 Forschungsdefizite

Auf der Grundlage der in den vorangegangenen Analysen gewonnenen Erkenntnisse werden Forschungsdefizite aufgezeigt. Was die Untersuchungen über die Wirkung auf den Menschen betrifft, ist zunächst auf die Publikation von Schust aus dem Jahr 2004 [135] hinzuweisen. Schust gab folgende Empfehlungen für kommende Untersuchungen:

- Untersuchung des Einflusses verschiedener Pegelspektren
- länger dauernde Exponierung in Laborversuchen
- Durchführung epidemiologischen Längsschnittuntersuchungen
- Durchführung epidemiologischer Untersuchungen bei deutlichen Emissionsänderungen im Untersuchungszeitraum
- Beachtung individueller Differenzen, einschl. Messung individueller Eigenheiten
- Einbezug verschiedener Risikogruppen
- Untersuchung des Einflusses von impulshaltigen und tonalen Geräuschen
- Untersuchen des Einflusses von Vibrationen
- Entwicklung von Methoden zur Dämpfung und Kontrolle von tieffrequentem Lärm.

Diese Empfehlungen haben auch heute noch Bestand, wurden aber in den nachfolgenden Jahren weniger beachtet. Insbesondere jüngere Veröffentlichungen befassen sich intensiver mit physiologischen Fragestellungen im Zusammenhang mit tieffrequentem Schall und Infraschall. Dies ist die Folge verbesserter Technik, die neue Einblicke auch in den lebenden Organismus gestattet, gepaart mit einem breiteren Interesse verschiedener Fachdisziplinen. Hier ist besonders die Forschungsarbeit von Medizinern zu begrüßen, deren Fachkompetenz unabdingbar ist, um zu neuen Erkenntnissen zu gelangen, die dem Akustiker sonst verschlossen blieben. Die Arbeiten von Salt (2010/2011) [128][129] sind ein hervorragender Beleg dafür.

Im Folgenden soll anhand wichtiger Fragestellungen der bestehende Forschungsbedarf aufgezeigt werden. Dabei sind die Wirkungen von tieffrequentem Schall und Infraschall auf den Menschen von besonderem Interesse:

- a) Sind die bestehenden Verfahren zur Beurteilung der Belästigung in der Prognosesicherheit verbesserbar?

In der Literatur (vgl. [9][101][99][12]) wird beschrieben, dass die Schwankungsstärke einen deutlichen Einfluss auf den Grad der Belästigung hat. Nimmt sie zu, nimmt die Belästigung zu. Dabei ist nicht allein das Maß der Pegelschwankung (Modulationsgrad), sondern auch die Frequenz der Pegelschwankung (Modulationsfrequenz) maßgeblich. Dieser Einfluss wird in den bestehenden Verfahren entweder gar nicht oder nur ansatzweise berücksichtigt. Hier würde ein konkreter Ansatz eine Verbesserung darstellen, weil viele Geräusche eine deutliche Schwankung oder sogar Impulshaltigkeit aufweisen.

Einer weiteren Klärung bedarf auch die Frage, wie höhere Frequenzkomponenten oder allgemein die spektrale Form des Geräusches in einem Verfahren zu berücksichtigen ist.

- b) In welchen Wirkungsmechanismen können Infraschall und tieffrequenter Schall verbunden sein?

Die Untersuchungen von Salt (2010 bis 2012) [128][130][129], die auch bei sehr tiefen Frequenzen von einer Erregbarkeit des Innenohrs – genauer der äußeren Haarzellen – ausgehen, geben weiteren Untersuchungen eine neue Perspektive. Mit bewährter und

neuerer Medizintechnik sollte diesem Phänomen nachgegangen werden. Dabei wäre zu klären, ob eine dauerhafte Beschallung mit tiefen Frequenzen eine neuronale Dauerbelastung ist, auch wenn der Schall nicht wahrnehmbar ist. Weitere Fragestellungen wären: Kann ggf. diese Dauerbelastung direkt oder indirekt auditive Wahrnehmungsmechanismen verändern (vgl. Hensel (2007) [52])? Können sie direkt eine mentale Belastung darstellen oder indirekt eine solche auslösen? Das sind nur einige Fragen, die erforscht werden sollten. Entsprechende Untersuchungen wären in enger Zusammenarbeit von Medizinern und Akustikern durchzuführen, die mit der Thematik vertraut sind, die entsprechende akustische Szenarien messtechnisch erfassen oder generieren können und die eine praktische Erfahrung mit betreffenden Problemfällen haben.

- c) Führt eine langanhaltende Exposition zu Habituation¹³ oder zu einer Sensibilisierung?

Vielfach wird unterstellt oder beruht sogar auf eigenen Erfahrungen, dass man sich scheinbar an gewisse Dinge auf Dauer gewöhnen kann, so auch an Lärm, wenn er z. B. nicht zu laut ist (Habituation). Im Allgemeinen tritt jedoch ein Gewöhnungseffekt nur scheinbar auf und ist oft das Resultat einer Verdrängungsstrategie. Eine solche Strategie scheint aber bei tiefen Frequenzen nur schwer möglich zu sein, denn mit steigender Dauer der Exposition nimmt die Empfindlichkeit zu (Sensibilisierung) (vgl. Persson / Rylander (2001) [119]). Das wirft folgende Fragen auf: Gibt es dazu ein physiologisches Korrelat, das diesen Vorgang verstehen lässt? Gibt es eine Möglichkeit, diese Sensibilisierung auszuhalten oder sogar wieder rückgängig zu machen?

- d) Warum wirken Infraschall und tieffrequenter Schall so belästigend und warum ist nur ein gewisser Prozentsatz der Bevölkerung besonders empfindlich demgegenüber?

Wird der Vorgang der Sensibilisierung verstanden, ist vielleicht auch erklärbar, warum nur ein gewisser Anteil der Bevölkerung sehr empfindlich reagiert? Diese besondere Empfindlichkeit bedeutet aber nicht, dass andere Personen den betreffenden Schall positiv bewerten. Auch von ihnen wird er in der Mehrzahl als belästigend empfunden, aber eben bei höheren Pegeln. Allgemein fehlt eine Erklärung, wodurch sich diese besonders belästigende Wirkung ergibt. Besteht ein direkter Einfluss auf mentale Prozesse? Von der Beantwortung dieser Frage hängt im Wesentlichen ab, welche Qualität ein Schutz gegen tieffrequenten Schall und Infraschall haben muss.

- e) Gibt es eine Verbindung zu anderen medizinischen Phänomenen?

Eine Hypothese ist, dass durch tieffrequenten Schall und Infraschall neuronale Prozesse verursacht werden, die bei einem mehr oder minder leichten Anstoß durch einen akustischen Stimulus ein andauerndes „Eigenleben“ entwickeln. Das mag eine sehr bildhafte Vorstellung zu sein, sie passt aber auch zu anderen Phänomenen. Gedacht wird hier an den Tinnitus und die Epilepsie. Beide sind an sich keine Krankheiten, sondern nur Symptome von Vorgängen, die sehr unterschiedliche Ursachen haben können. Eine gewisse Gemeinsamkeit zu den hier beschriebenen Vorgängen ist nicht erkennbar. Wie flackerndes Licht einen epileptischen Anfall auslösen kann, so kann

¹³ Gewöhnung an einen länger anhaltenden Reiz, erlernte Verhaltensunterdrückung

nach Branco und Daly et al. (1999/1957) [13][22] ein wummerndes Geräusch zu starken Irritationen führen und sogar bei einer entsprechenden Prädisposition¹⁴ zu epileptischen Anfällen führen. Bei vielen Betroffenen können Geräusche einen Tinnitus auslösen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage warum häufig der Tinnitus ebenso wie die Empfindlichkeit gegenüber tieffrequentem Schall vermehrt ab einem Alter von etwa 50 Jahren auftritt (vgl. Eggermont et al. (2012) [33]). Eine weitere Verbindung kann darin gesehen werden, dass wie beim Tinnitus eine individuelle Verzögerung zwischen Vorhandensein des Stimulus und der subjektiven Wahrnehmung bestehen kann (vgl. Møller / Lydolf (2002) [92]). Nicht selten führt dieser Umstand in der Praxis dazu, dass bei fehlender enger zeitlicher Korrelation zwischen einem Messergebnis und einer berichteten Empfindung (z. B. beim kurzen Ein- oder Ausschalten einer in Verdacht stehende Quelle) ein Tinnitus beim Betroffenen unterstellt wird, der aber in keinem ursächlichen Zusammenhang mit einer gemessenen Belastung gesehen wird.

f) Sind die Wahrnehmungen rein akustischer Natur?

Multimodale Stimulanz ist keine Seltenheit. Die Wirkungen modal verschiedener Reize können sich gegenseitig verstärken. Vibration in Kombination mit tieffrequentem Schall oder Infraschall kann besonders bei den Führern eines Verkehrsmittels (z. B. LKW, Bus) zu Problemen führen. In der Literatur wird diese Problematik nur vereinzelt behandelt (vgl. [45][125][51]). Weitere Untersuchungen dazu erscheinen notwendig.

Bezüglich der Schallausbreitung besteht vor allem Forschungsbedarf hinsichtlich folgender Fragestellungen:

g) Wird die Abstrahlung und Ausbreitung der Geräusche von Windenergieanlagen hinreichend erfasst, um daraus eine fundierte Prognose für die Immission ableiten zu können?

Mit wachsender Höhe der Windenergieanlagen durchschneiden die Rotorblätter ein stärker variierendes Windprofil. Es ist daher fraglich, ob das Abstrahlungs- und Ausbreitungsmodell für kleinere Windenergieanlagen auf moderne, große Anlagen übertragbar ist. Aufgrund theoretischer Betrachtungen von Strömungsakustikern ist nicht davon auszugehen (vgl. Kameier et al. (2013) [65]). Neben dem Detail, wie der Schall sich räumlich ausbreitet, stehen allgemein die Einflüsse im Mittelpunkt des Interesses, die den Schall in seiner spektralen wie zeitlichen Charakteristik bei der Abstrahlung und der Ausbreitung prägen.

Ein erweitertes Wissen über die genannten Vorgänge wäre aber nicht nur eine notwendige Voraussetzung für eine bessere Immissionsprognose. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten auch Hinweise für eine bessere Lärminderung von Windenergieanlagen liefern. Bei einem sorgfältigen Design können solchen Maßnahmen zudem mit einer Verbesserung des Wirkungsfaktors der Anlagen einhergehen.

¹⁴ Veranlagung, Empfindlichkeit, Anfälligkeit für eine bestimmte Krankheit

h) Gibt es einen Schutz gegen tieffrequenten Schall und Infraschall?

Die physikalischen Gegebenheiten, die die nahezu ungehinderte Ausbreitung von tieffrequentem Schall und Infraschall zugrundeliegen sind dieselben, die einen wirksamen Lärmschutz gegenüber diesen Schallarten sehr erschweren. Sollen effektive bauliche Schallschutzmaßnahmen getroffen werden, so ist der Aufwand bezüglich eingesetzter Massen oder Volumina umgekehrt proportional zu den Frequenzen. Bei tieffrequentem Schall oder sogar bei Infraschall bedeutet dies in der Regel einen kaum realisierbaren Aufwand. Die Schallschutzbestimmungen für den Wohnungsbau beschränken sich deshalb auf einen Frequenzbereich bis hinunter zu 100 Hz.

Eine Lösung des Problems bei Frequenzen unterhalb von 100 Hz könnte in der Anwendung der aktiven Lärminderung bestehen, wie in verschiedenen Veröffentlichungen gezeigt wird (vgl. [85][47][141][83]). Dabei werden die Abstrahlungs- oder Ausbreitungsbedingungen durch aktive Systeme – bestehend aus Sensor (z. B. Mikrofon), Signalverarbeitung und Aktor (z. B. Lautsprecher) - verändert. Dies erfordert räumlich wie zeitlich eine möglichst genaue Erfassung und Nachbildung des Schallfeldes. Vorteilhafterweise ist dies bei tiefen Frequenzen (also große Wellenlängen) einfacher als bei höheren. Mit der Entwicklung in der Signalverarbeitung sowie von preisgünstigen elektroakustischen Komponenten können Lösungen, die auf dieser Technik beruhen, heute und in Zukunft vermehrt, nicht nur die effektivere, sondern auch die kostengünstigere Lösung sein. Allerdings besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um diese Technik auch auf breiterer Ebene einsetzen zu können.

6 Identifizierung von Quellen, von denen erhebliche tieffrequente oder Infraschallemissionen ausgehen können

6.1 Aufgabenstellung

Für eine Bewertung und sinnvolle Begrenzung der Immissionen durch tieffrequente Geräusche und Infraschall müssen zunächst die unterschiedlichen Phänomene (Infraschall, Brummtön, tieffrequente Geräusche, sekundärer Luftschall) identifiziert und klassifiziert werden. Dies ist notwendig, weil gerade durch mögliche unterschiedliche Wirkungsweisen auch unterschiedliche Herangehensweisen bei der Bewertung erfordern. Häufig werden die Begriffe Infraschall und tieffrequente Schalle synonym verwendet. Vermutlich ist jedoch eine Trennung zwischen Infraschall außerhalb des hörbaren Frequenzbereichs und tieffrequenten Geräuschen im hörbaren Frequenzbereich sinnvoll. Daher soll zunächst als Grundlage eine Bestandsaufnahme zum Auftreten und zu den Quellen von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen vorgenommen werden. Aus der einschlägigen Literatur ist u. a. bekannt, dass beispielsweise folgende Quellen als Verursacher in Frage kommen:

- Industrieanlagen (Verfahrenstechnik/Anlagenbau)
- Bautätigkeiten und temporäre Emissionen (Baustellen, Tiefenbohrungen, Sprengungen im Tagebau)
- Haustechnische Anlagen (Heizungsanlagen, RLT¹⁵/Kältetechnik, Haushaltsgeräte)
- Einrichtungen der Energieversorgung (Windenergieanlagen, Koronageräusche von Überlandleitungen, Geothermiekraftwerke)
- Sekundärluftschall durch Erschütterungen aus Verkehrswegen
- Natürliche Phänomene (Seismologische und meteorologische Phänomene, Vulkaneruptionen).

Diese unterschiedlichen Quellengruppen können auch im tieffrequenten bzw. Infraschallbereich unterschiedliche Schwerpunkte im Frequenzbereich haben. Für ausgeprägt tieffrequente Geräusche kommen häufig natürliche Quellen in Frage. Gerade bei tieffrequenten Geräuschen ist zudem oftmals eine monochromatische Ausprägung (Tonhaltigkeit) gegeben. Insbesondere bei tonhaltigen Geräuschen können im Einwirkungsbereich (d. h. in Gebäuden) die raumakustischen Eigenschaften einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Immissionen haben. Aufgrund ihrer hohen Wellenlänge ($\lambda/2$ (20 Hz) $\approx$ 8,5 m) bilden tieffrequente Geräusche stehende Wellen in Räumen mit den entsprechenden Abmessungen aus (Raummoden), die den Höreindruck in Abhängigkeit von der Position im Raum verstärken können. Auch diese raumakustischen Randbedingungen sollen daher bei der Klassifizierung betrachtet werden.

In diesem Abschnitt sollen daher die in Frage kommenden Quellentypen identifiziert und eine Charakterisierung und Einteilung der Quellen vorgenommen werden. Als Kriterien können zum Beispiel Frequenzbereich, Tonhaltigkeit und die Abhängigkeit von raum- und bauakustischen Phänomenen verwendet werden.

¹⁵ RLT = Raumlufthechnische Anlagen (Lüftungen, Klimageräte, Heizungen)

6.2 Quellenidentifikation und -ortung

Für die Praxis von großer Relevanz ist das Problem der Quellenidentifikation und -ortung. Da es z. B. auch durch das Zuschlagen einer Tür zu Luftdruckschwankungen im Infraschallbereich kommt, ist Infraschall mit Schalldruckpegeln weit unterhalb der Wahrnehmungsschwelle nahezu überall in unserer Umwelt vorhanden. Allerdings müssen schon gewisse Schalldruckpegel überschritten werden (Sinustöne ab ca. 75 dB), die nach derzeitigem Kenntnisstand eine Lästigkeit für Menschen oder Tiere auslösen könnten. Eine Lästigkeit von Infraschall bei Schalldruckpegeln unter 75 dB wurde bislang noch nicht dokumentiert.

Anhand der Entstehungsursache können zwei große Gruppen unterschieden werden:

- Natürliche Infraschallquellen
z. B. Wetterphänomene (Fönwinde und Gewitter), die Brandung an Küsten, plattentektonische Vorgänge wie Erdbeben oder Vulkanausbrüche
- Technische Infraschallquellen

Von relevanter Bedeutung für Infraschall technischer Quellen sind laut Heinen [124] und Borgmann [127] Anlagen, bei deren Betrieb große Luftmassen oder Oberflächen in Bewegung sind bzw. in Bewegung versetzt werden; Anlagen, die durch ihre Eigenart (Größe und Betriebsmodalitäten usw.) geeignet sind, Erschütterungen zu verursachen sowie Einrichtungen, von denen energiehaltige Schallimpulse erzeugt werden (z. B. Knalle). Somit ergibt sich eine Vielzahl von potentiellen Quellen durch die es zu tieffrequenten Schallemissionen mit möglichem Infraschallanteil kommt. In Anlage 1 ist eine Liste der gefundenen potentiellen Infraschallquellen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, enthalten. Die aufgeführten Quellen ergeben sich aus der Recherche der Literatur (exemplarisch [28], [84], [133], [144], [145], [146], [124], [87]). Bei denen nach [144], [145], [146] ermittelten Quellen ist anzumerken, dass die Literatur aufgrund der gängigen Messpraxis lediglich Terzspektren mit einer niedrigsten Terz-Mittenfrequenz von 25 Hz liefert. Da bei 25 Hz jedoch unbewertete Schalldruckpegel von bis zu 145 dB (vgl. Zangenbagger lfd. Nr. 17 in [145]) auftreten, liegt der Verdacht nahe, dass hier auch Schallemissionen im Infraschallbereich erzeugt werden.

Anhand des technischen Charakters können die potentiellen Emittenten unter folgenden Quellengruppen zusammengefasst werden:

- Gr.I. Raumluftechnische Anlagen, Bsp. Klima- und Lüftungsanlagen
- Gr.II. Baumaschinen, Bsp. Dieselrammen, Rüttelwalzen
- Gr.III. Anlagen von Energieerzeugung und -transport, Bsp. Windenergieanlagen, Biogasanlagen, Umspannwerke, Koronageräusche von Überlandleitungen
- Gr.IV. Verkehrstechnische Einrichtungen, Bsp. Schiffe, Lkw, Bahn
- Gr.V. Sieb- und Sortieranlagen, Bsp. Plansichter, Doppeldeckersieb
- Gr.VI. Kompressoren und Pumpen, Bsp. Hochdruckreiniger, Dampfstrahler
- Gr.VII. Transport, Bsp. Förderbänder, Vibrationsrinnen, Rohrleitungen
- Gr.VIII. Sonstige technische Anlagen, Bsp. Sägegatter, Auspacktrommeln, Druckmaschinen
- Gr.IX. Natürliche Quellen, Bsp. Erdbeben, Vulkanausbrüche, Meeresbrandung, Tiere
- Gr.X. Veranstaltungen, Bsp. Diskotheken, Openair-Veranstaltungen
- Gr.XI. Produktionsstätten, Bsp. Herstellungs- und Fertigungsbetriebe

Gr.XII. Sonstiges, Bsp. Geschütze, Explosionen, Raketenstarts

Diese Auflistung zeigt, dass sich die möglichen Infrasschallemittenten über nahezu sämtliche technischen Bereiche erstrecken und diese Quellen räumlich betrachtet häufig in unserer Umgebung vorhanden sind. Die Ortung dieser Schallquellen erweist sich in der Praxis häufig mehr als ein mühseliges Suchen als ein gezieltes Ausmessen der Umgebung, um bei einer festgestellten Exposition den Verursacher zu finden. Fast unlösbar wird die Aufgabe, wenn vermutlich mehrere Verursacher in Betracht kommen. Das mag eine Erklärung dafür sein, dass trotz der praktischen Relevanz sich nur wenige Veröffentlichungen mit diesem Problem befassen (vgl. Ostendorf (2009) [107]). Mögliche weitere Untersuchungen zur Thema Infraschall werden hierfür sachgerechte Lösungsansätze finden müssen. Dabei kann auf die Erfahrungen bisheriger Studien aufgebaut werden (vgl. [162][24][108][67][114]).

6.3 Entwicklung eines Klassifizierungssystems

6.3.1 Wirkungsradien und Betroffenheit

Auf Grund der großen Wellenlängen des Infraschalls und der dadurch bedingten sehr geringen Dämpfungseffekte im Ausbreitungsmedium Luft und anderer Strukturen können die „Wirkungsradien“ bzw. Ausbreitungsdistanzen um eine Infrasschallquelle mehrere Kilometer betragen. Betrachtet man zusätzlich die Liste potentieller Infrasschallemittenten, die nahezu überall in unserer Umwelt vorhanden sind, ergibt sich hieraus ein enormer Umfang potentiell betroffener Bürgerinnen und Bürger in Deutschland.

Weitere Anhaltswerte über das Ausmaß der Betroffenheit können aus der Betrachtung der üblichen Abstände der zuvor identifizierten potentiellen Infrasschallquellen zu schutzbedürftigen Nutzungen gewonnen werden. So sind raumluftechnische Anlagen, Brenner von Heizungsanlagen und verkehrstechnische Einrichtungen in aller Regel in unmittelbarer Nähe zu Wohnbebauung vorhanden oder werden in ihr betrieben. Anlagen der dezentralen regenerativen Energieerzeugung sind, auch aufgrund der Privilegierung im Baurecht, in zunehmendem Maß mit sehr geringen Abständen zu benachbarter Wohnbebauung zu finden. Rechtlich verbindliche Mindestabstände gibt es bislang nicht. Infrasschall erzeugende Baumaschinen sind auf Baustellen jeder Größe denkbar und somit auch in der Regel, wenn auch nur zeitlich begrenzt, in kurzem Abstand zu Wohnbebauungen zu finden. Anlagen und Maschinen, die unter die Begriffe „Transport“, „Sortier- und Siebanlagen“, „Kompressoren und Pumpen“ und „Sonstige technische Anlagen“ fallen, sind vorwiegend in industriell und gewerblich genutzten Bereichen vorhanden. Von denen vor allem kleinere Gewerbebetriebe in direkter Nachbarschaft zu Wohnbebauung vorhanden sein können.

Lediglich die Abstandserlässe einiger Bundesländer nennen konkrete Werte bezüglich empfohlener Mindestabstände zu Wohngebieten für die nach der 4. BImSchV [161] genehmigungsbedürftigen Anlagen: Nach dem Abstandserlass des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen [55] werden die genehmigungsbedürftigen Anlagen nach BImSchG [46] in sieben Gruppen eingeteilt, für die Mindestabstände von 100 Metern bis 1.500 Metern empfohlen werden. Allerdings finden sich bei den Mindestabständen keine Hinweise auf eine explizite Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche.

Eine umfassende Erhebung der Betroffenheit von Bürgerinnen und Bürgern durch tieffrequenten Schall und Infraschall in Deutschland wird im Rahmen des gegenständlichen Forschungsvorhabens, in Kapitel 7 mittels Auswertungen der Beschwerdesituation in den einzelnen Bundesländern durchgeführt.

6.3.2 Klassifizierungsmöglichkeiten

Eine Systematik für die Beurteilung der Erheblichkeit von Infraschallimmissionen existiert bislang nicht. Daher wird die Beschreibung von Schallquellen, Ursachen und Wirkungen auf Basis von standardisierten Merkmalen durchgeführt. Auf dieser Basis können Zusammenhänge (z. B. Lärmwirkungskorrelationen) erarbeitet werden. Hierzu ist eine Klassifizierung der Erkenntnisse über Infraschall und ausgeprägt tieffrequente Geräusche notwendig.

Ein klassischer Ansatz für eine Klassifizierung ist die Top-Down Klassifizierung. Hierbei werden zunächst die Klassen vorgegeben, anschließend die Merkmale ausgewählt und schließlich die Klassengrenzen gezogen. Als allgemeine Anforderungen an die Klassifizierung von Schallquellen können folgende Bedingungen genannt werden: Die Klassifizierung muss invariant gegenüber äußeren Einflüssen sein. Die Klassifizierung der Quellen sollte also unabhängig von den Standortbedingungen (Orografie, Meteorologie, Abstand usw.) sein. Zudem müssen die Quellen eindeutig einer der Klassen zugeordnet werden können.

Aus der Heterogenität und Vielschichtigkeit der Infraschallquellen ergibt sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Parametern und Merkmalen anhand derer sich die Quellen charakterisieren und in Klassen einteilen lassen. Hierfür werden in den nachfolgenden Abschnitten wesentliche Klassen und Merkmale herausgearbeitet.

Klassen

Beispielsweise wäre eine Festlegung der Klassen anhand des technischen Zweckes der Quellen denkbar. Hieraus würden sich Klassen wie etwa Verkehrswesen, Baustellen und Energieversorgung ergeben. Eine andere Möglichkeit wäre die Einteilung in Abstandsklassen hinsichtlich des Abstandes der Quellen zu schutzbedürftigen baulichen Einrichtungen. Diese würde sich jedoch nicht auf die Quelle (den Verursacher), sondern deren Lage beziehen.

Nachfolgend sind noch einige weitere denkbare Einteilungen aufgeführt:

- Einteilung der Infraschallquellen anhand ihres abgestrahlten Infraschallpegels in entsprechende Pegelklassen
- Einteilung anhand der Mobilität der Anlage (mobil/stationär/teilstationär)
- Einteilung anhand des Frequenzbereiches des abgestrahlten Infraschalls
- Einteilung anhand des Abstrahlmechanismus (Luftschall/Körperschall)
- Einteilung anhand der Wirkzeiten von Belästigungen (kurzzeitig/dauerhaft).

Aus den beim Immissionsschutz im Vordergrund stehenden Fragen nach der Art der schädlichen Umwelteinwirkung, dem betroffenen Schutzgut und dem Umfang oder Ausmaß der Beeinträchtigung ergibt sich eine andere mögliche Klassendefinition. Für Geräuscheinwirkungen durch Infraschall auf das Schutzgut Mensch, die geeignet sind, Gefahren, Nachteile oder Belästigungen herbeizuführen, ist der Grad der Beeinträchtigung des Wohlbefindens maßgebend. Somit sollte die Wahl der Klassen mit Fokus auf das mit den Quellen einhergehende Belästigungspotential und dessen Umfang erfolgen, so genannte Lästigkeitsklassen.

Merkmale

In der vorliegenden Arbeit werden die Infraschallquellen nach ihrem Belästigungspotential klassifiziert. Hierfür müssen Merkmale gewählt werden, anhand derer sich dieses quantifizieren lässt. Des Weiteren muss es möglich sein, anhand der Merkmale die zuvor festgelegten Klassen hinreichend zu beschreiben und zu definieren.

Grundsätzlich können unabhängig von den Klassen alle zu einer Quelle erhebbaren Daten als mögliche Merkmale herangezogen werden. Diese Daten entsprechen bilden die Grundgesamtheit möglicher Merkmale. Da es möglich sein soll eine Quelle anhand der Merkmale eindeutig einer der Klassen zuordnen zu können, müssen klare Merkmalsgrenzen definiert werden. Im Hinblick auf die sich an der Belästigungssituation orientierenden Klassen und den zuvor genannten Anforderungen an die Merkmale kommen nur Parameter in Frage, die in direkter Korrelation zur potentiellen Belästigung durch eine Quelle stehen.

6.3.3 Vorschlag für eine Klassifizierung

Die Klassifizierung soll eine Unterscheidung des Belästigungspotentials von Infraschallquellen ermöglichen. Deshalb werden folgende Klassen vorgeschlagen:

- Klasse I: Starkes Belästigungspotential
- Klasse II: Mäßiges Belästigungspotential
- Klasse III: Bedingtes/Leichtes Belästigungspotential
- Klasse IV: Kein Belästigungspotential

Eine Zusammenstellung der zu einer Anlage erhebbaren Daten, und somit auch der potentiell möglichen Merkmale ist in Abschnitt 6.4 ohne Anspruch auf Vollständigkeit enthalten. Aufgrund der Zielsetzung, der hier vorgeschlagenen Klassifizierung, sowie den genannten Anforderungen an die Klassifizierung selbst und deren Merkmale, werden folgende akustischen Parameter als Merkmale berücksichtigt:

- Überdeckung
- Pegel
- Frequenzbereich
- Pegelzeitverlauf
- Impulshaltigkeit
- Tonhaltigkeit.

Da jede Quelle anhand aller Merkmale beschrieben werden kann, und eine eindeutige Zuordnung einzelner Quellen zu der jeweiligen Belästigungsklasse erfolgen sollte, müssen klare Klassengrenzen gezogen werden. Da jedoch die Infraschalleinwirkungen auf den Menschen bisher noch nicht ausreichend erforscht sind, ist es an dieser Stelle noch nicht möglich, zuverlässige Klassengrenzen zu ziehen. Lediglich der Rahmen, in dem sich die Merkmalsgrenzen nach heutigem Kenntnisstand bewegen, kann hinreichend genau definiert werden.

Weitere denkbare Merkmale, die die Klassifizierung beeinflussen sind:

- **Wirkzeit:** Als untere Merkmalsgrenze der Wirkzeit, bei deren Unterschreiten nach heutigem Stand des Wissens von keiner schädlichen Umwelteinwirkung ausgegangen werden kann, bietet sich das unter Nr. 7.2 der TA Lärm [136] oder Nr. 1.5 des Anhangs der 18. BImSchV [1] genannte Kriterium für seltene Ereignisse an. Als obere Merkmalsgrenze kann von dem ganzjährigen Dauerbetrieb ausgegangen werden. Die Stärke der empfundenen Belästigung in Abhängigkeit von der Einwirkungszeit und Einwirkungsdauer ist bisweilen unbekannt. Effekte wie die Adaption von Geräuschen oder psychoakustische Effekte wären zu berücksichtigen.
- **Abstand der Schallquelle zu schutzbedürftigen Aufenthaltsräumen:** Die Quelle kann z. B. im ungünstigsten Fall (obere Merkmalsgrenze) im Gebäude mit der schutzbedürftigen Nutzung in unmittelbarer Nachbarschaft installiert und betrieben sein; im günstigsten Fall (untere Merkmalsgrenze) befindet sich die schutzbedürftige Nutzung weit außerhalb des Einwirkungsbereiches der Anlage.

Aufgrund der speziellen Anforderung an die Klassifizierung, unabhängig von anderen Einflussparametern zu sein, kommen diese Merkmale nicht in Betracht.

Überdeckung

Viele Infraschallquellen emittieren Schalle über ein breites Spektrum von 0,1 Hz bis über 20 kHz hinaus, somit nicht ausschließlich im Infraschallbereich. Die Überdeckung gibt Aufschluss darüber, inwiefern und ob der vorhandene Infraschallanteil des Geräusches überhaupt wahrnehmbar ist und einen Beitrag zur auralen Belästigung durch die Gesamteinwirkung hat.

So kann beispielsweise eine technische Anlage, deren Infraschallabstrahlung durch Frequenzanteile, die über 20 Hz liegen, überdeckt ist, aufgrund dieser Gegebenheit eine ganz andere Belästigungssituation hervorrufen als reine Infraschallabstrahlung. Inwiefern sich die Belästigungssituation bei einer durch Hörschall überdeckte Infraschalleinwirkung gegenüber einer „reinen“ Infraschalleinwirkung verhält, ist nach heutigem Stand des Wissens unbekannt. Als Merkmalsgrenzen kann jedoch eine „reine Infraschallabstrahlung“ sowie eine „stark überdeckte Infraschallabstrahlung“ angenommen werden.

Pegel

Der erzeugte Pegel ist die wesentliche Mess- und Beurteilungsgröße zur Quantifizierung der Lärmimmission. Das Potential der Gesundheitsschädigung und der Einwirkungsbereich von Infraschallquellen werden durch geeignete Pegelgrößen beschrieben.

Als untere Merkmalsgrenze könnte in erster Näherung von der Wahrnehmungsschwelle ausgegangen werden. Da die Effekte von Infraschalleinwirkung unterhalb der Wahrnehmungsschwelle jedoch noch nicht abschließend geklärt sind, muss eventuell von einem niedrigeren Pegel ausgegangen werden. Als obere Merkmalsgrenze könnte die Schmerzschwelle angesetzt werden. Anhand welcher Pegelgröße sich eine zuverlässige Beurteilung einer Infraschalleinwirkung durchführen lässt, kann aktuell nicht abschließend bewertet werden. Bezug nehmend auf die in der Vergangenheit durchgeführten Lärmwirkungsstudien und den darin beobachteten Effekten bei langzeitiger sowie kurzzeitiger Exposition erscheint jedoch eine Betrachtung von Dauerschalldruckpegeln und Spitzenpegeln als sinnvoll. Der im Normentwurf E-DIN 45680 [28] zur Anwendung kommende 5%-Perzentilpegel L_5 stellt beispielsweise eine Kombination dieser Pegel dar und könnte hier relevant sein. Im Gegensatz zu dem über die Messzeit energetisch gemittelten äquivalenten

Dauerschallpegel (L_{eq}) ist der 5%-Perzentilpegel (L_5) der kennzeichnende Schalldruckpegel, der in lediglich 5% der Messzeit überschritten wird. Bei dem Ansatz der ungünstigsten vollen Stunde ist somit nicht der Stundenmittelwert, sondern im Fall von zeitlich schwankenden Geräuschen der in einem Zeitraum von 180 Sekunden pro Stunde auftretende höchste Schalldruckpegel maßgebend. Für ein stationäres Geräusch ist das 5%-Perzentil gleich dem äquivalenten Dauerschallpegel. Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen erhöhen den L_{eq} durch die logarithmische Mittelung in höherem Maße als das 5%-Perzentil, so dass der Einfluss von Einzelereignissen (Geräuschimpulse wie zum Beispiel ein einzelner Knall) ebenso reduziert wird, wie der Einfluss von Zeiträumen ohne Geräusche (zum Beispiel regelungstechnische Abschaltzeiten von Kältemaschinen, Musikpausen o. Ä.). Insofern ist das 5%-Perzentil eine geeignete Kenngröße.

Frequenzbereich

Ob im Infraschallbereich bestimmte Frequenzen unterschiedlich stark als störend empfunden werden, ist ungeklärt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass Immissionen gewisser Frequenzen als besonders störend empfunden werden oder besondere Effekte auslösen. So wurde beispielsweise von Evans (1972) [36] besonders bei einer Frequenz von 7 Hz ein Nystagmus und „Schwingungsgefühl“ bei den Probanden dokumentiert. Als untere Merkmalsgrenze könnte mit Bezug auf den Immissionsschutz die Terz mit einer Mittenfrequenz von 1 Hz betrachtet werden, da diese Frequenz noch messtechnisch mit vertretbarem Aufwand und Unsicherheit ermittelt werden kann und Infraschall tieferer Frequenzen hauptsächlich von natürlichen Quellen erzeugt wird. Diese natürlichen Quellen können zwar indirekt auch vom Mensch beeinflusst sein (Klimawandel), es erscheint jedoch nicht praktikabel durch aktive oder passive Lärmschutzmaßnahmen Einfluss zu nehmen. Die obere Merkmalsgrenze folgt aus der Definition des Infraschalls und kann mit 20 Hz angesetzt werden, so dass zusammenfassend der Bereich 1 Hz bis 20 Hz betrachtet werden sollte. Nach derzeitigem Kenntnisstand gilt der Bereich um 4 Hz als besonders lästig, da der Sprachrhythmus bei ungefähr 4 Silben pro Sekunde liegt, vgl. Maximum der Schwankungsstärke bei der Modulationsfrequenz von 4 Hz in der Psychoakustik.

Pegelzeitverlauf

Ein weiteres Merkmal zur Beurteilung des Belästigungspotentials stellt der Zeitverlauf der Geräuscheinwirkungen dar. Es ist nicht auszuschließen, dass es durch bestimmte schwankende oder periodische Infraschalleinwirkungen zu besonderen Belästigungssituationen kommen kann. Des Weiteren sind unter gewissen Randbedingungen (Bsp. Pegelzeitverlauf mit Sägezahncharakteristik und sehr flachen Flanken) Situationen möglich, in denen anhand des Impulshaltigkeitskriteriums eine solche Geräuschcharakteristik nicht als lästig erfasst und berücksichtigt wird. Als untere Merkmalsgrenze kann ein stationärer Pegelzeitverlauf und als obere Merkmalsgrenze ein Verlauf mit starker Periodizität betrachtet werden; wobei die Begriffe noch durch physikalische Kenngrößen (Flankensteilheit, Anstiegszeit, Zeitkonstanten o. ä.) definiert werden müssten. In welcher Ausprägung ein besonderer Zeitverlauf der Infraschalleinwirkungen besonderes Belästigungspotential aufweist, kann aktuell nicht beurteilt werden.

Impulshaltigkeit

Das Merkmal der Impulshaltigkeit nach A.2.5.3. der TA Lärm [136] dient zur Berücksichtigung des erhöhten Belästigungspotentials von Geräuschen, die Impulse beinhalten (z. B. Explosionen, Knalle, Peitschenschläge).

Bei Impulshaltigkeit als Indikator des Belästigungspotentials kann als untere Merkmalsgrenze eine nicht vorhandene Impulshaltigkeit, und als obere Merkmalsgrenze eine stark ausgeprägte Impulshaltigkeit betrachtet werden. Welches Pegelkriterium bei Infraschalleinwirkungen maßgebend sein könnte und bei welchen Pegeldifferenzen von einer stark ausgeprägten „Infraschall-Impulshaltigkeit“ gesprochen werden kann, ist bisweilen ungeklärt. Als Unterschied zum Merkmal „Zeitverlauf“ ist eine steile Anstiegsflanke und gewisse Anstiegshöhe des Zeitsignals charakteristisch.

Tonhaltigkeit

Die Tonhaltigkeit eines Geräusches kann in immissionsschutzfachlichen Betrachtungen zu der Vergabe eines Pegelzuschlages führen. Im Hinblick auf die Besonderheiten des Infraschalls bezüglich Tonhöhenempfinden und Geräuschwahrnehmung kann die Tonhaltigkeit hier jedoch nicht im Sinne der Tonhaltigkeit nach A.2.5.2. der TA Lärm [136], als das Vorhandensein eines Tones verstanden werden. Sie bezieht sich hier auf den physikalischen Charakter bzw. den Energieanteil der schmalbandigen Geräuschkomponente. Als untere Merkmalsgrenze kann eine nicht vorhandene „Tonhaltigkeit“ und als obere Grenze ein durch die Quelle erzeugter „Einzelton“ angenommen werden.

Zusammenstellung von Merkmalen und Merkmalsgrenzen

In nachfolgender Tabelle 7 sind die zuvor beschriebenen, in der Klassifizierung betrachteten, Merkmale und deren Grenzen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7: Übersicht Klassifizierungsmerkmale und deren „Ober- und Untergrenze“

Zusammenstellung der Klassifizierungsmerkmale und Merkmalsgrenzen	
Überdeckung, Ü:	Erzeugter Pegel, P:
$\ddot{U}_{\max}$: reine Infraschallabstrahlung $\ddot{U}$: mittlere Überdeckung $\ddot{U}_{\min}$: stark überdeckte Infraschallabstrahlung	$P_{\max}$: Schmerzschwelle P : mittlere Wahrnehmung $P_{\min}$: Wahrnehmungsschwelle
Frequenz, F:	Pegelzeitverlauf, V:
$F_{\max}$: 20 Hz F : > 7 Hz $F_{\min}$: 1 Hz	$V_{\max}$: stark periodisch V : mittlere Periodizität $V_{\min}$: stationär
Impulshaltigkeit, I:	Tonhaltigkeit, T:
$I_{\max}$: stark ausgeprägte Impulshaltigkeit I : mittlere Impulshaltigkeit $I_{\min}$: keine Impulshaltigkeit	$T_{\max}$: Abstrahlung eines Einzeltons T : mittlere Tonhaltigkeit $T_{\min}$: keine Tonhaltigkeit

Um eine zuverlässige Zuordnung einer Infraschallquelle zu einer der „Belästigungsklassen“ zu erhalten, muss die Gesamtheit der Merkmale betrachtet werden. In der Praxis ist davon auszugehen, dass bei der Bestimmung der Merkmale einer Quelle, diese die „Merkmalsstufen“ unterschiedlicher Klassen besitzt, und somit eine Zuordnung zu einer Klasse in der Regel nicht ohne weiteres möglich ist. Aus diesem Grund müssen die einzelnen Merkmalsstufen und die Merkmale selbst unterschiedlich stark in die Beurteilung eingehen können.

Gewichtung der Merkmale

Anhand eines Punktesystems kann eine differenzierte Gewichtung der einzelnen Merkmale und Merkmalsstufen erfolgen. Nachfolgend ist ein mögliches Punktesystem dargestellt. Dabei sind die Merkmale ihrer Merkmalsstufen entsprechend, mit einem, zwei oder drei Merkmalspunkten zu bewerten.

Derzeit ist noch nicht abschließend geklärt, ob die Merkmalspunkte dem Belästigungspotential der einzelnen Kriterien umfassend gerecht werden. Um einen unterschiedlich starken Einfluss bzw. eine kombinatorische Wirkung der einzelnen Merkmale auf das Belästigungspotential zu berücksichtigen, werden zusätzlich Gewichtungsfaktoren eingeführt mit denen die Merkmalspunkte gegeneinander gewichtet werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass die einzelnen Merkmale unterschiedlich stark und physiologisch korrekt in der Klassifikation berücksichtigt werden. Anhand der Summe der für eine Quelle vergebenen Merkmalspunkte kann schließlich eine Zuordnung zu einer der Belästigungsklassen erfolgen. Die spezifische Gewichtung der einzelnen Merkmale kann anhand von Laborstudien der Infraschallwirkung kalibriert werden.

Tabelle 8: Punktematrix zur gewichtenden Bewertung der Merkmale

Mögliche Punktematrix zu den Klassifizierungsmerkmalen			
Überdeckung, Ü	Gewichtung: X-fach	Erzeugter Pegel, P	Gewichtung: X-fach
Ü _{max} : reine Infraschallabstrahlung	3	P _{max} : Schmerzschwelle	3
Ü: mittlere Überdeckung	2	P: mittlere Wahrnehmung	2
Ü _{min} : stark überdeckte Infraschallabstrahlung	1	P _{min} : Wahrnehmungsschwelle	1
Frequenz, F	Gewichtung: X-fach	Pegelzeitverlauf, V	Gewichtung: X-fach
F _{max} : 20 Hz	3	V _{max} : stark periodisch	3
F: > 7 Hz	2	V: mittlere Periodizität	2
F _{min} : 1 Hz	1	V _{min} : stationär	1
Impulshaltigkeit, I	Gewichtung: X-fach	Tonhaltigkeit, T	Gewichtung: X-fach
I _{max} : stark ausgeprägt	3	T _{max} : Abstrahlung eines Einzeltons	3
I: mittlere Impulshaltigkeit	2	T: mittlere Tonhaltigkeit	2
I _{min} : keine Impulshaltigkeit	1	T _{min} : keine Tonhaltigkeit	1

Die in Tabelle 6 dargestellte Punktematrix ermöglicht eine differenzierte Betrachtung. Im Weiteren wird für sämtliche Merkmalsgewichtungen vereinfacht der Faktor 1 vergeben. Für Merkmale gemäß Tabelle 8, die nicht vorhanden sind, werden keine Merkmalspunkte vergeben. Dementsprechend liegen das Minimum des Punktesystems bei 0 und das Maximum bei 18 Merkmalspunkten. Eine Einteilung in die Belästigungsklassen kann anhand der Summe der Merkmalspunkte, wie in folgender Tabelle dargestellt, erfolgen.

Tabelle 9: Merkmalspunkte der Belästigungsklassen

Darstellung der Belästigungsklassen	
0 - 4 Merkmalspunkte	Klasse IV
5 - 9 Merkmalspunkte	Klasse III
10 - 14 Merkmalspunkte	Klasse II
15 - 18 Merkmalspunkte	Klasse I

Die endgültige Verteilung der jeweiligen Merkmals- und Gewichtungspunkte kann erst erfolgen, wenn eine abschließende Beurteilung des Beitrags zum Belästigungspotential der einzelnen Merkmale und deren daraus festgelegten Merkmalsstufen erfolgt ist. Aus diesem Grund wird für die beispielhaften Erhebungs- und Klassifizierungsbögen im Anhang der Gewichtungsfaktor einheitlich mit eins vergeben.

Die Klassifikation des Belästigungspotentials von Infraschallquellen erfolgt also anhand der festgestellten Ausprägung (Merkmalsstufe) der einzelnen, zuvor beschriebenen Merkmale (Überdeckung, erzeugter Pegel, Frequenz, Pegelzeitverlauf, Impulshaltigkeit, Tönhaltigkeit). Um einen unterschiedlich starken Einfluss der einzelnen Merkmale auf das Belästigungspotential zu berücksichtigen, werden Gewichtungsfaktoren festgelegt mit denen die Merkmalspunkte multipliziert werden. Anhand der Summe der „gewichteten“ Merkmalspunkte erfolgt abschließend die Zuordnung der Infraschallquelle zu einer der Belästigungsklassen.

6.4 Erhebung- und Klassifizierungsbogen

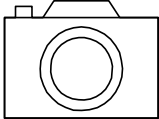
Unter dem Gesichtspunkt der vielen relevanten Einflussgrößen im Zusammenhang mit Infraschallwirkungen sollten im Rahmen einer Erhebung von potentiellen Infraschallquellen möglichst wenig Parameter außer Acht gelassen werden. Hierfür wurde ein Erhebungs- und Klassifizierungsbogen entwickelt. Anhand der globalen Betrachtung der mit diesem Bogen erfassten Daten, wie beispielsweise Betriebszeiten, Wirkzeiten oder Abständen zu angrenzender Bebauung, können Konfliktsituationen identifiziert und prognostiziert sowie mögliche Lärminderungsmaßnahmen vorgeschlagen werden.

Der Erhebungs- und Klassifizierungsbogen besteht aus vier Hauptteilen:

1. Anlagenbezogene Daten und Messbedingungen
2. Messergebnisse und Angaben zum Messverfahren
3. Angaben zur Messumgebung und akustischen Randbedingungen
4. Raum für weitere Pegelgrößen und Durchführung der Klassifikation

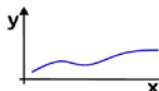
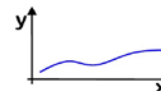
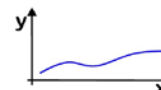
Aus nachfolgenden Abbildungen ist der Aufbau des Klassifizierungs- und Erhebungsbogens, mit den darin zu erfassenden Daten, ersichtlich.

Abbildung 12: Ausschnitt obere Hälfte der ersten Seite des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens

Bezeichnung der Anlage: 		Immissionsmessung oder Emissionsmessung (Außen / Innen):		
Hersteller:	Zweck d. M.:	Baujahr:	Leistung:	
Gewicht:	LxBxH:	Durchsatz:	Drehzahl:	
Schallschutz- / Kompensationsmaßnahmen:				
Art der Aufstellung:		 Foto der Anlage		
Betriebszustand	Gemessen:			
	Volllastbetrieb:			
Geräuschenstehung:				
Abstrahlung: Ls/ Ks/ sLs:				
Einleitungsweg:				
Wirkungsradius:				
Messzeit:		Optischer Zustand:		
Witterung:		Subj. Beschr.:		
Messverfahren (Einpunktmessung, Mehr-Quellen-Industrieanlagen, Hüllfläche, Array; Schallintensität, etc.):				
Abstrahlcharakteristik: (Halbkugel, Punkt, Linie, Fläche, Zylinder, etc.):				
Messort:		Abstand vom akustischen Zentrum:		

In der oberen Hälfte des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens erfolgt im Wesentlichen die Erfassung der kennzeichnenden, anlagenbezogenen Daten sowie der Messbedingungen. Diese Daten können einer ersten Grobklassifikation dienen, insbesondere der Differenzierung zwischen Messungen an der Quelle (Emissionsmessung) und am Immissionsort (Immissionsmessung).

Abbildung 13: Ausschnitt untere Hälfte der ersten Seite des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens

Messergebnisse	L_{eq}	L_{AF95}	L_{AF5}	L_{Ceq}	L_{Geq}	L_{Zeq}	$L_{AFeq} - L_{AFeq}$	$L_{Ceq} - L_{Aeq}$
 Darstellung Pegel-Frequenz-Zeitverlauf (Sonogramm)				 Darstellung Terspektrum				
(Beschreibung Diagramm)				(Beschreibung Diagramm)				
Messgeräte:				 Darstellung Pegelzeitverlauf				
Mess-Sensor: Kapsel:								
Filter:								
Auswertegerät:								
Dauer der Messung:								
Anzahl Messungen:								
Standardabweichung:				(Beschreibung Diagramm)				
Genauigkeit der Messeinrichtung und des Messverfahren (Klasse):								
Seite 1	Datum:			Messinstitut (Logo)				

Die untere Hälfte des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens enthält im Wesentlichen die Darstellung der kennzeichnenden, gemessenen Pegelgrößen sowie eine grafische Darstellung der Messergebnisse. Des Weiteren sind hier die Angaben zu den benutzten Messgeräten, Mikrofonen oder Frequenzfilter aufgeführt. Anhand der akustischen Kenngrößen und deren grafischen Darstellungen lässt sich die gemessene Anlage/Schallquelle charakterisieren sowie die im Rahmen der Klassifizierung zu vergebenden Merkmalspunkte aus den gemessenen Pegelgrößen ableiten. Darüber hinaus sind drei grafische Darstellungen der Messergebnisse enthalten: Sonogramm im Frequenzbereich von 0 bis 500 Hz (Darstellung des Frequenz-, Pegel-, Zeitverlaufs), Darstellung des unbewerteten Terzspektrums des Geräusches als Balkendiagramm mit zusätzlicher Abbildung des C- und A-Bewerteten Terzspektrums als Balkenkontur und Liniendarstellung des Pegelzeitverlaufs.

Abbildung 14: Ausschnitt obere Hälfte der zweiten Seite des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens

Angaben zum Arbeitszyklus der Anlage:		
Beschreibung des Fremdgeräusches (falls feststellbar):	Störschallpegel (bei abgeschalteter Anlage):	
	L_{Aeq} :	L_{AF95} :
		
Beschreibung der Messumgebung (Lage Messraum, Einrichtung):		
Raumakustische Parameter (optional): Nachhallzeit, Raumabmessungen, Oberflächen, Geometrie, u.a.:		

Weiterhin werden im Erhebungs- und Klassifizierungsbogen Angaben zum vorherrschenden Fremdgeräusch, zum Messort und der Messumgebung erfasst. Hierdurch wird es möglich, die gemessenen Daten hinsichtlich ihrer Aussagekraft zu quantifizieren. Des Weiteren lassen sich anhand der raumakustischen Eigenschaften Rückschlüsse über etwaige Besonderheiten wie vorhandene Raummoden treffen. Folgende Daten und Abbildungen sind enthalten: Angaben zum Arbeitszyklus der Maschine, Beschreibung des Fremdgeräusches (falls vorhanden) sowie die Pegelgrößen L_{Aeq} und L_{AF95} des Fremdgeräusches (gemessen bei abgeschalteter Anlage), Lage des Messraumes und dessen Einrichtung, raumakustische Parameter der Messumgebung. Zusätzlich ist ein Übersichtslageplan mit den Messpunkten und der Schallquelle enthalten.

Abbildung 15: Ausschnitt untere Hälfte der zweiten Seite des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens

(Frei)				(Frei)						
(Frei)				Ordnungssystem (Gesamtanlage/ Subsystem):						
				Identifikationsnummer:						
Raum für andere Pegel- größen				Klassifizierung						
Anmerkungen, Notizen:				Merkmal	Bewertung	Bewertungs- klassen: $<4 = \text{IV}$ $5 - 9 = \text{III}$ $10 - 14 = \text{II}$ $15 - 18 = \text{I}$				
				Überdeckung Ü						
				Erzeugter Pegel P						
								Frequenz F		
								Pegelzeitverlauf V		$\Sigma =$
								Impulshaltigkeit I		Ermittelte Klasse
								Tonhaltigkeit T		
Seite 2		Datum		Messinstitut (Logo)						

Die Abbildung 11 zeigt die vierte von vier Hälften des Erhebungs- und Klassifizierungsbogens für Infraschallquellen. Darin sind Platzhalter für zusätzliche und bisher nicht erfasste Daten bzw. Pegelgrößen sowie Notizen vorhanden. Abschließend erfolgt hier die Einordnung der Schallquelle in das zuvor vorgestellte Klassifizierungssystem. Es werden die Merkmalspunkte zu den einzelnen Klassifizierungsmerkmalen vergeben, deren Summe gebildet und somit die Belästigungsklasse ermittelt.

Der vorgeschlagene Erhebungs- und Klassifizierungsbogen ist jeweils für eine Schallquelle (Anlage) vorgesehen. In der Praxis treten häufig n-dimensionale Quellsysteme auf. Da diese jedoch meist technologisch nicht unabhängig voneinander betrieben werden können, stellt eine einzelne Anlage die kleinste zweckmäßig klassifizierbare Einheit dar. Zum Beispiel bei einer Biogasanlage finden sich verschiedene Quelle. Im ersten Ansatz würde die Biogasanlage insgesamt als eine Anlage mit Motor und Generator, Zu- und Abluftöffnungen, Abgaskamin, Rührwerke, Speicher, Fördereinrichtungen und Gasfackel usw. klassifiziert werden. Bei weiteren Untersuchungen werden in einem nächsten Schritt einzelne Betriebseinheiten genauer betrachtet und einzeln klassifiziert. Dabei wären z. B. der BHKW-Block oder die Gasfackel jeweils als eine Anlage (Subsystem der Biogasanlage) zu klassifizieren. Durch die Nutzung eines geeigneten Ordnungssystems kann diese Differenzierung abgebildet und archiviert werden.

Die beschriebenen Merkmale stellen keine abschließende Auflistung der zu erhebenden Daten dar. Bisher wurden ausschließlich Parameter und Messgrößen der technischen Akustik betrachtet. Es ist jedoch denkbar, auch Kenngrößen der Psychoakustik wie die Lautheit in Sone, die Schärfe in Acum, die Tonhöhe in Mel oder die Rauigkeit in Asper als relevante Klassifizierungsgrößen zu verwenden. Diese sind derzeit noch nicht ausreichend praxiserprobt

und werden deshalb und auch im Hinblick auf die Klassifikation bestehender Datensätze nicht berücksichtigt.

6.5 Bewertung des Klassifizierungssystems

Das vorgeschlagene Klassifizierungssystem ermöglicht eine systematische Klassifikation des Belästigungspotentials von Infraschallquellen. Die hierfür herangezogenen Daten beschränken sich im Wesentlichen auf bewährte Messgrößen, deren Ermittlung mit relativ hoher Genauigkeit im Freifeld durchgeführt werden kann. Dagegen ist noch nicht hinreichend geklärt, unter welchen Voraussetzungen, Messbedingungen oder mit welchen besonderen Messverfahren die Daten einer Infraschalleinwirkung am besten ermittelt werden können. Darüber hinaus sind vor allem folgende Fragen zu klären:

- a) Inwiefern sind Synergieeffekte von Infraschall mit Hörschall vorhanden, und wie verhalten sich diese im Bezug auf das Belästigungspotential?
- b) Bei welchen Infraschallpegeln treten in welchem Umfang signifikante Effekte auf den Menschen auf?
- c) Welche Mess- und Beurteilungsgrößen (Pegel o. Ä.) sind geeignet, um den Infraschall zu beschreiben?
- d) Besitzen Infraschallimmissionen in bestimmten Frequenzen besonderes Belästigungspotential und negative gesundheitliche Auswirkungen?
- e) Kommt es bei bestimmten Zeitverläufen von Infraschalleinwirkungen zu besonderen Belästigungssituationen (z. B. Periodizitäten)?
- f) Geht von impuls- und tonhaltigen Infraschallimmissionen die gleiche belästigende Wirkung wie von Immissionen im Hörschallbereich aus?
- g) Haben bestimmte Merkmalskombinationen der vorgeschlagenen Klassifizierung besonders zu berücksichtigende Auswirkungen?

Dies zeigt, dass noch erheblicher Forschungsbedarf zum Thema Infraschall besteht.

Hinsichtlich der Datenlage lässt sich sagen, dass unabhängig von den im Rahmen der Klassifizierung benötigten Parametern Herstellerangaben, Genehmigungsunterlagen und Befragung von Betroffenen als Datenquellen verwendet werden können. Technische Literatur, die Messungen in Prüfständen bzw. generell Emissions- und Immissionsmessungen sind derzeit die wichtigsten Informationsquellen.

Auf Basis der klassifizierten Merkmale der Schallquellen können Erhebungs- und Klassifizierungsbögen erstellt und in einem Verzeichnis archiviert werden. Damit können potentielle Gefährdungssituationen erkannt und ggf. bereits in der Planungsphase vermieden werden. Beispiele für Erhebungs- und Klassifizierungsbögen sind in Anlage 2 enthalten.

Mögliche Konflikte der vorgeschlagenen Klassifikation bestehen nach heutigem Kenntnisstand vor allem bei Situationen, in denen Infraschall oder tieffrequenter Schall durch maßgebend lästig empfundene „hochfrequente“ Geräuschanteile überdeckt werden oder umgekehrt und die jeweils überdeckten Geräuschanteile dadurch weniger störend empfunden werden. So ist es beispielsweise in der Praxis bereits mehrfach vorgekommen, dass es nach der Beseitigung einer tieffrequenten Lärmemission einer Heizungsanlage zur verstärkten Wahrnehmung von als störend empfundenem Gaststätten- oder Nachbarschaftslärm innerhalb eines Wohn- und Geschäftshauses gekommen ist. Der Mechanismus zur Maskierung störender Umgebungsgeräusche wird beim Soundscape gezielt eingesetzt.

In welchem Umfang solche Situationen auftreten, und wie mit ihnen umzugehen ist, wird sich erst in der Praxis zeigen und muss im Einzelfall geprüft und beurteilt werden. Die Erweiterung der vorgeschlagenen Klassifikation um eine „Sonderklasse“ für solche Anlagen könnte sich jedoch als notwendig erweisen.

7 Feststellung der potentiellen Betroffenheiten in Deutschland

7.1 Aufgabenstellung

Aus der Bevölkerung kommen immer wieder Hinweise auf das Auftreten von tieffrequenten Schallen, insbesondere dann, wenn sie nach Art und Ausmaß geeignet sind, Belästigungen hervorzurufen. Anlaufstelle für Beschwerden über Lärmbelästigungen sind in Deutschland im Regelfall die jeweiligen Immissionsschutzbeauftragten der Landkreise. Bei außergewöhnlichen Fällen (unter die tieffrequente Geräusche wohl zumeist fallen dürften) werden auch die Fachaufsichtsbehörden, die Landesumweltämter, eingebunden.

Die Betroffenheit der Bevölkerung durch Infraschall und tieffrequente Geräusche ist bislang wenig dokumentiert. Es ist zu vermuten, dass verschiedene Quellen unterschiedlich starke Betroffenheiten in der Bevölkerung auslösen. So kann beispielsweise die in den letzten Jahren vermehrte Nutzung von Windkraft auch in dichter besiedelten Gebieten zu einer allgemeinen Zunahme der Betroffenheiten durch tieffrequente Geräusche geführt haben. Andererseits dürften sich bestimmte Quellen auf regionale Gebiete verstärkt auswirken. So sind Sprengungen im Tagebau und die damit verbundenen Emissionen nur in entsprechenden Abbaugebieten zu erwarten. Aber auch natürliche, oder ungeklärte Infraschallphänomene zeigen häufig regionale Schwerpunkte.

Für die Ermittlung der quellenspezifischen und regionalen Betroffenheiten wurden zunächst die Beschwerdesituationen bei den einzelnen Umweltbehörden durch eine standardisierte Abfrage erhoben. Zeigte sich bei dieser Abfrage in einzelnen Fällen eine Häufung der Beschwerden, wurden die jeweiligen Behörden gezielt kontaktiert, um zusätzliche Detailinformationen einzuholen und daraus etwaige Gemeinsamkeiten abzuleiten. Ergänzend dazu wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt sowie die Ergebnisse aus eigenen Messungen und Erhebungen berücksichtigt. Die so erhaltenen Daten zur Betroffenheit durch tieffrequente Schalle und Infraschall wurden im Hinblick auf Quellen, Ausmaß der Betroffenheit und regionale Schwerpunkte ausgewertet.

7.2 Methodik

In einem ersten Schritt wurden die Landesämter für Umwelt angeschrieben, um sich zu der Beschwerdesituation und der Betroffenheit der Bevölkerung gegenüber Infraschall zu äußern. Anschließend wurden ausgewählte Landesumweltämter telefonisch kontaktiert, um weitergehende Informationen zu erhalten. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass nach Auskunft der Umweltämter

- keines der Umweltämter ein Beschwerdekataster für tieffrequente Geräusche oder Infraschalleinwirkungen führt,
- im Fall von Beschwerden aus der Bevölkerung die Unteren Immissionsschutzbehörden als Anlaufstelle fungieren und dort vermutlich weitergehende Kenntnisse über Beschwerden vorliegen,
- Untersuchungen durch einzelne Landesumweltämter im Zusammenhang mit Windenergieanlagen beauftragt oder selbst durchgeführt und für diese Auswertung zur Verfügung gestellt wurden.

Im nächsten Schritt wurden die Unteren Immissionsschutzbehörden in den einzelnen Ländern angeschrieben. Erste telefonische Kontaktaufnahmen bei einzelnen Unteren Immissionsschutzbehörden in Bayern haben ergeben, dass Beschwerdekataster individuell

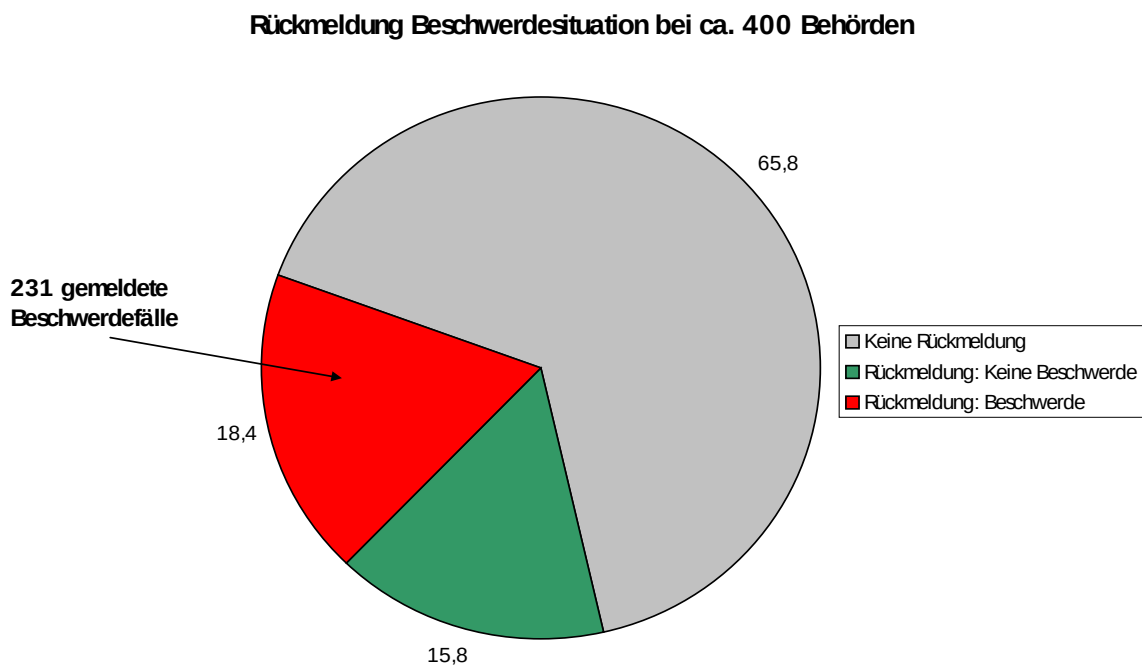
geregelt werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine tabellarische Abfrage erstellt (Abbildung 16).

Abbildung 16: Verwendeter Fragebogen für die Abfrage der Beschwerdesituation bei den Unteren Immissionsschutzbehörden

Sp.1	Sp.2	Sp.3	Sp.4	Sp.5	Sp.6	Sp.7	Sp.8	Sp.9	Sp.10	Sp.11
Datum	Anlage Verursacher / Quelle	Sp.2 bekannt(b) / vermutet(v)	Ort der Beschwerde	Beschreibung der Beeinträchtigung	Bereich Infraschall (I) Tieffrequent (T) nicht bekannt (N)	Durchführung Messung?	Art der Messung Lärm (L), Schwingung (S) EMF (M)	Beurteilung nach DIN 45680?	Befund	Bemerkung

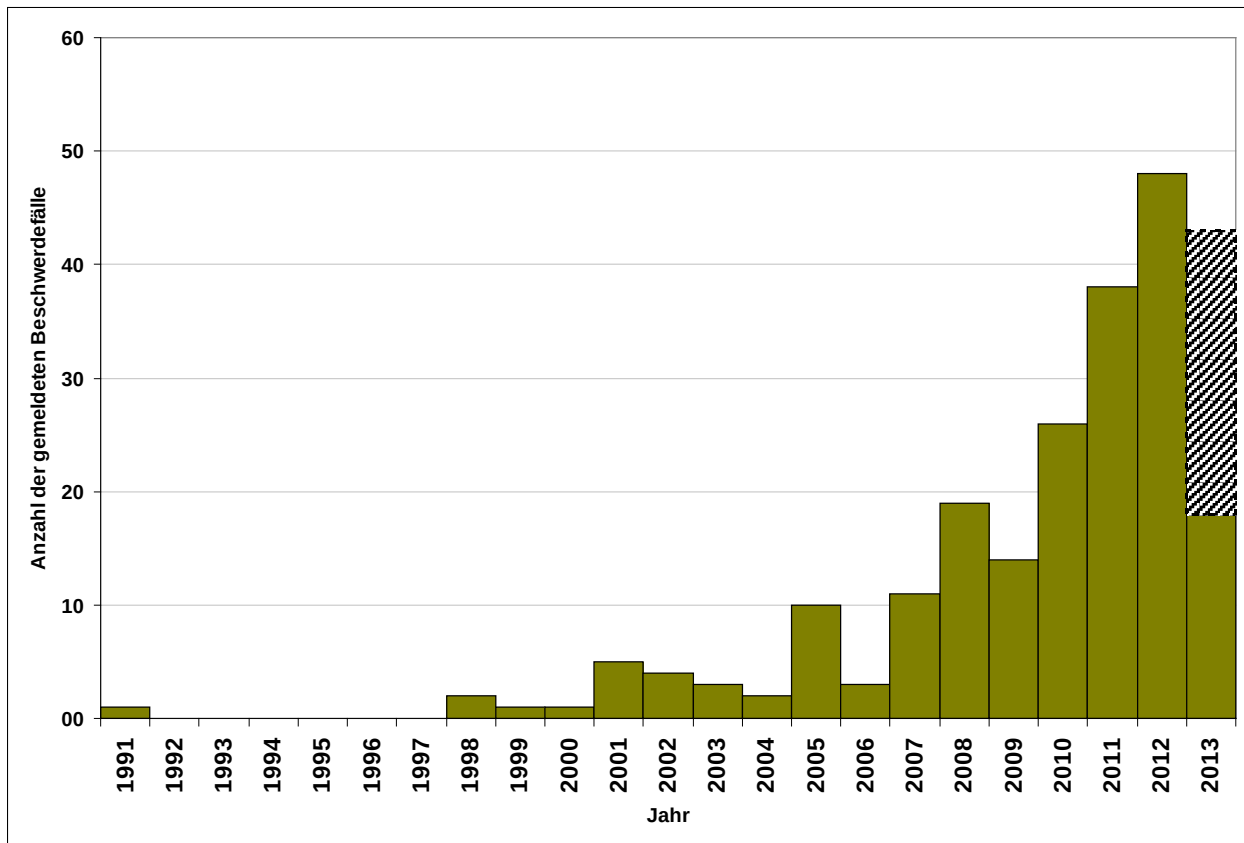
Die Fragebögen wurden im Zeitraum von Januar bis April 2013 versendet. Dabei wurden rund 400 Behörden angeschrieben. Die Rückmeldung und Auswertung der Fragebögen wurde im Juni 2013 abgeschlossen. Der Rücklauf lag bei 34,2 %. Von den Behörden, die eine Rückmeldung auf den Fragebogen gegeben haben, wurde von nahezu der Hälfte die Anfrage dahingehend beantwortet, dass keine Beschwerden zu Infraschall oder tieffrequenten Geräuschen aktenkundig seien. Dies wurde zum Teil damit begründet, dass in ihrem Zuständigkeitsbereich keine infraschallrelevanten Anlagen betrieben werden oder nicht die nötige technische und personelle Ausstattung zur eigenständigen Prüfung von Beschwerden im Bereich Infraschall bzw. tieffrequente Geräusche (einschl. Schwingungsimmissionen und elektromagnetische Felder) vorhanden seien. Diese Fälle würden dann von den Oberen Immissionsschutzbehörden bearbeitet werden. Die Rückmeldung zur Anfrage ist aus folgender Abbildung ersichtlich.

Abbildung 17: Ergebnis der Rückmeldung zur Anfrage über die Beschwerdesituation im Bereich Infraschall bzw. tieffrequenten Geräuschen



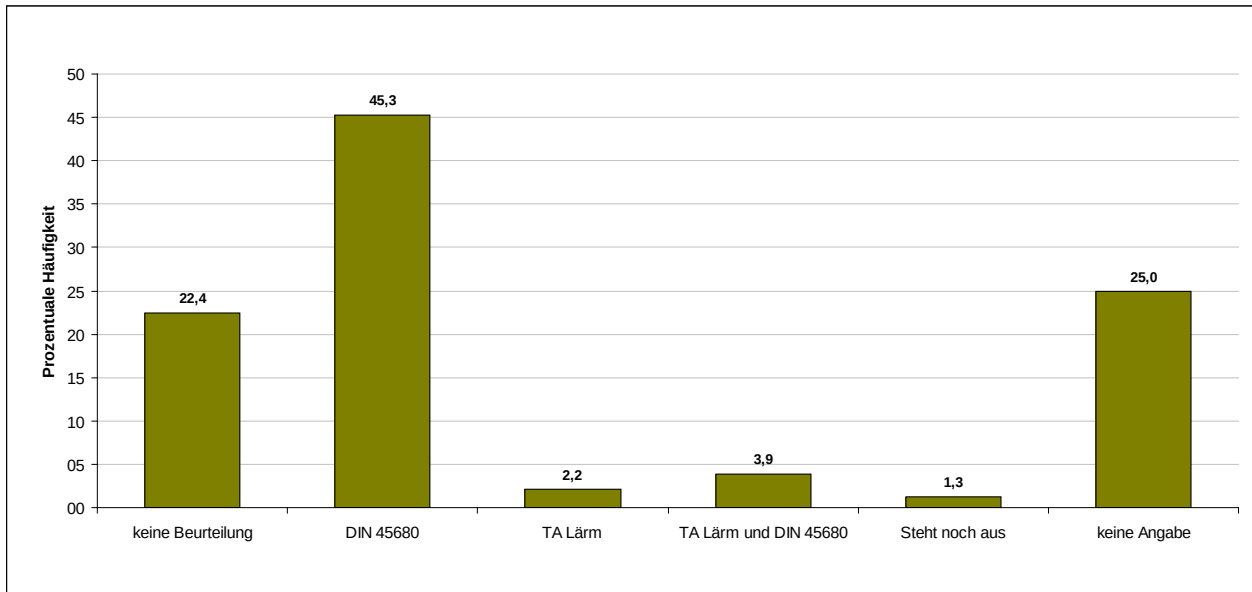
Der Zeitraum der gemeldeten Beschwerdefälle ist in Abbildung 18 dargestellt. Sie zeigt in den vergangenen drei Jahren eine deutliche Zunahme der Beschwerdefälle bei Infraschall- und tieffrequenten Geräuscheinwirkungen gegenüber den Vorjahren.

Abbildung 18: Anzahl der gemeldeten Beschwerdefälle bei Infraschall- und tieffrequenten Geräuscheinwirkungen, Unterteilung nach der Jahreszahl der Beschwerden



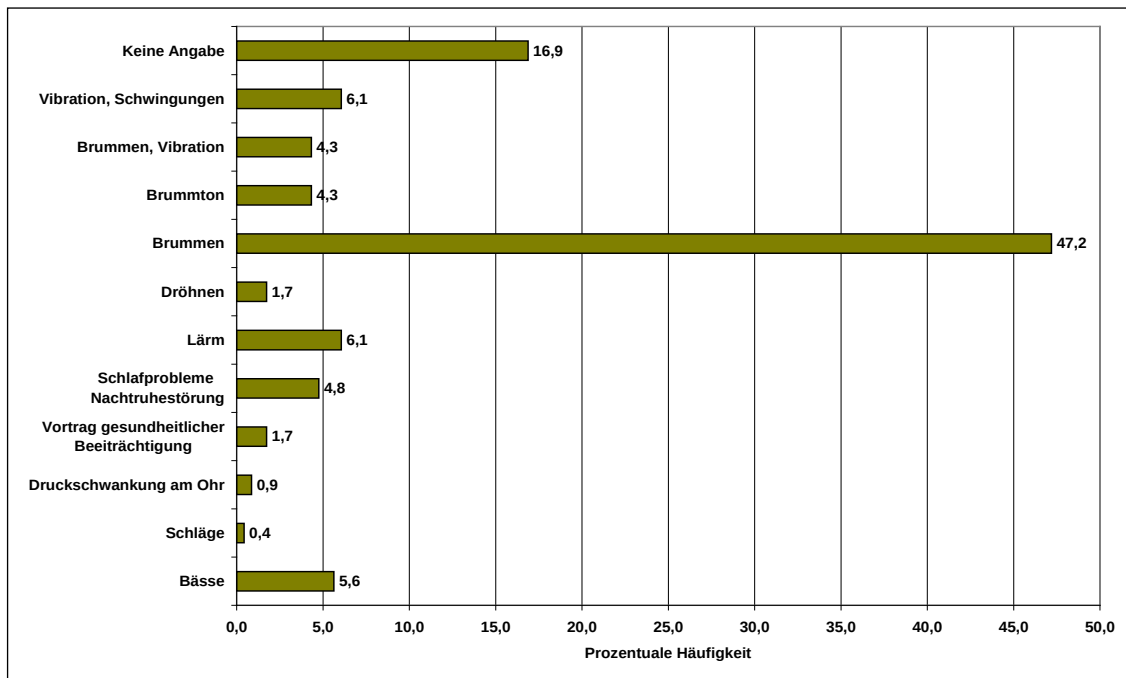
Im Beschwerdefall über Infraschall- bzw. tieffrequente Geräuschbelästigungen erfolgt in der gängigen Verwaltungspraxis derzeit in mehr als der Hälfte der Fälle eine Beurteilung nach DIN 45680 bzw. TA Lärm (51,4 % für die Summe der Häufigkeiten in den Kategorien DIN 45680 und TA Lärm). Bemerkenswert ist weiterhin, dass bei nahezu jeder vierten Beschwerde offenbar keine Beurteilung erfolgt ist. Dies kann darin begründet sein, dass die Lärmsituation zwar wahrnehmbar ist, jedoch nicht messbar war und/oder nach den gängigen Vorschriften nicht beurteilt werden konnte (z. B. bei Frequenzen unter 8 Hz). Die Rückmeldungen ohne Angabe zur Beurteilung konnten auch nach einer Detailprüfung der Einzelfälle keiner Gruppe eindeutig zugeordnet werden. Abbildung 19 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Beurteilung im Beschwerdefall.

Abbildung 19: Häufigkeitsverteilung der Beurteilung im Beschwerdefall nach TA Lärm bzw. DIN 45680, N= 231



Eine weitergehende Auswertung der verschiedenen Beschwerdefälle zeigte, dass unbestimmte Beschwerden über ein Brummen am häufigsten sind (siehe Abbildung 20). Addiert man hierzu noch die ähnlich gelagerten Beschwerdefälle über Brummtöne und dem von Vibrationen begleiteten Brummen, so machen diese Beschwerden mehr als die Hälfte aller Fälle aus.

Abbildung 20: Häufigkeit der beschriebenen Beeinträchtigung der Beschwerdeführer in den gemeldeten Fällen



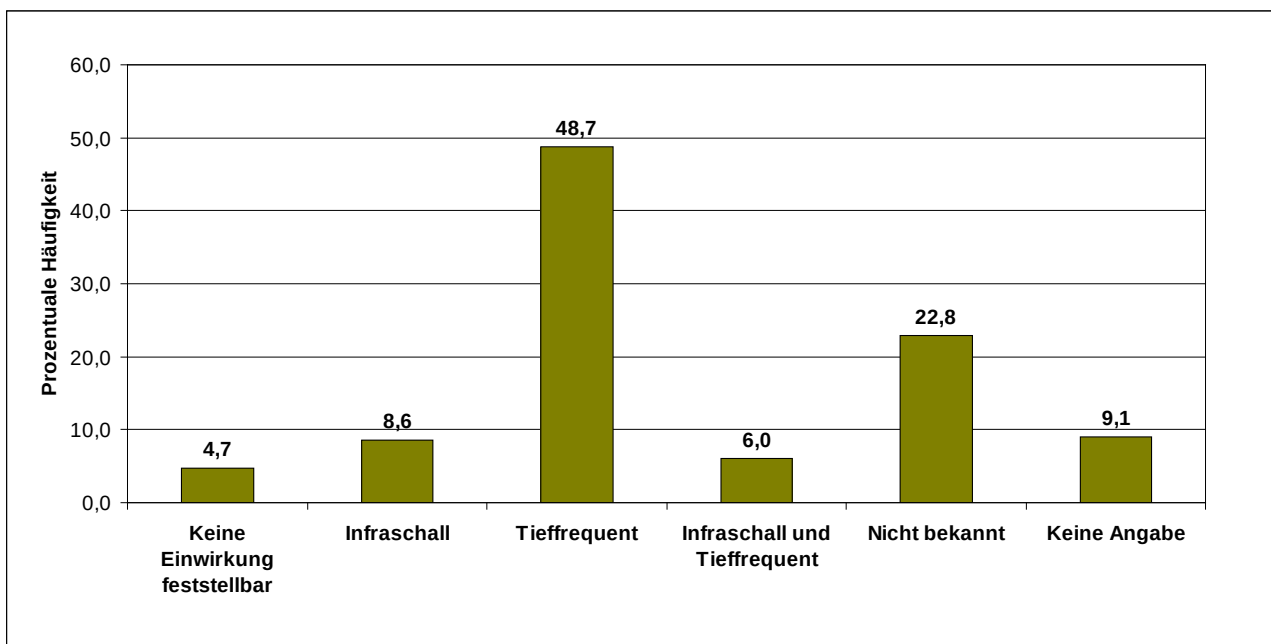
In 16,9 % der Beschwerdefälle wurden keine Angaben über die empfundene Art der Beeinträchtigung gemacht. Dies kann auf das in der Literatur häufig beschriebene körperliche Unbehaglichkeitsempfinden zurückgeführt werden, dass keine genaue Beschreibung der Art der Belästigung zulässt und in der Praxis wiederholt auftritt.

Als Ursache für die betrachteten Beschwerdefälle wurden von den befragten Behörden folgende Gründe genannt: In 48,7 % der Beschwerdefälle waren tieffrequente Geräusche ursächlich für die Beschwerde. In 1,7% der Fälle wurden von Betroffenen gesundheitliche Beeinträchtigungen vorgetragen die nicht unter dem Begriff der Belästigung im Sinne des BImSchG zusammenzufassen sind. Lediglich 4,7% der Beschwerden führten zu keiner feststellbaren Einwirkung. Die Beschwerden, bei denen Infraschall alleine oder in Verbindung mit tieffrequenten Geräuschen thematisiert wurde, spielen mit 14,6 % nur eine untergeordnete Rolle.

Konflikte mit Infraschall werden in Genehmigungsverfahren und sonstigen Planungsprozessen nahezu mit der gleichen oder sogar einer höheren Priorität wie tieffrequente Geräusche thematisiert. Das hat häufig zur Folge, dass Beschwerden über Infraschall nach Realisierung der Planungen in einem geringeren Umfang auftreten.

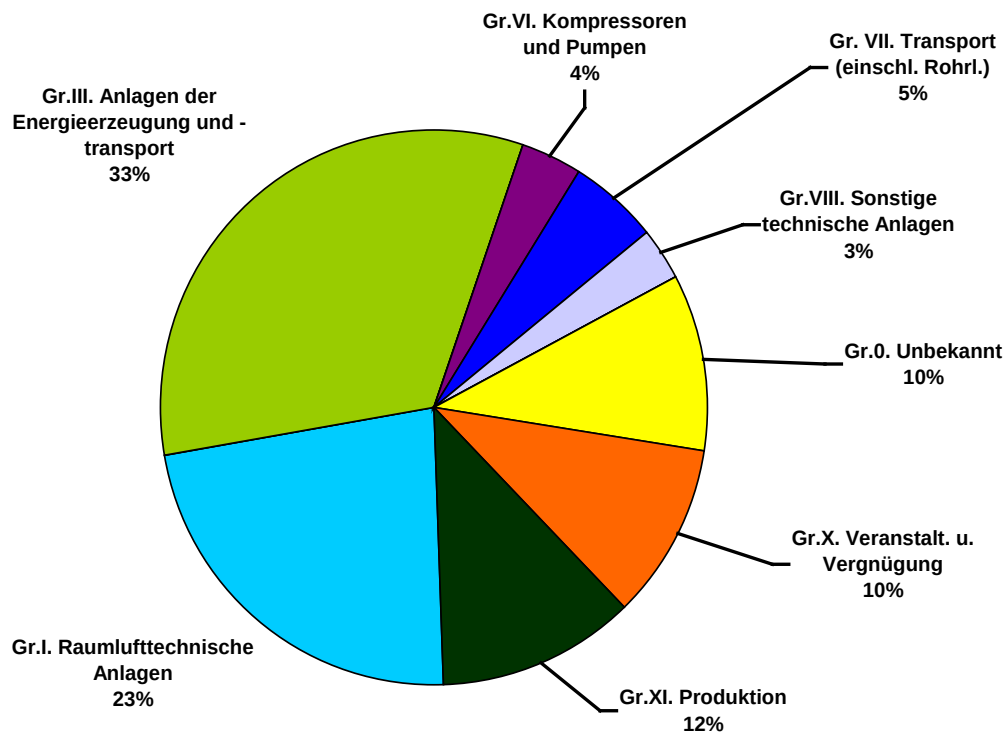
Die Häufigkeit der nicht bekannten oder nicht benannten Wirkarten ist mit 31,9 % nahezu doppelt so groß ist wie die der unbekannten Beeinträchtigungen. Daraus kann abgeleitet werden, dass zumindest 15 % der Beschwerdefälle durch eine nicht bekannte Schallquelle verursacht werden.

Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der festgestellten Einwirkungen im Beschwerdefall (N=231)



Die weiteren Auswertungen der Befragungen konzentrierten sich deshalb auf die Frage nach der Quellart und die örtliche Verteilung der Beschwerdefälle in Deutschland. In Abschnitt 7.2.1 wurde eine Klassifizierung der Quellen aufgrund des technischen Charakters vorgenommen. Die Auswertung der Beschwerdefälle unter diesem Aspekt ermöglichte eine Zuordnung zu den einzelnen Quellengruppen (Gr.I bis Gr.XII). In der nachfolgender Abbildung ist die prozentuale Verteilung der Beschwerden auf die entsprechenden Quellgruppen dargestellt. Quellgruppen, denen keine Beschwerdefälle zugeordnet werden konnten (Gr.II und Gr.IV), sind nicht dargestellt.

Abbildung 22: Prozentuale Verteilung der Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche auf die Quellengruppen (Gr.I bis Gr.XII) der Klassifizierung gemäß Abschnitt 7.2.1



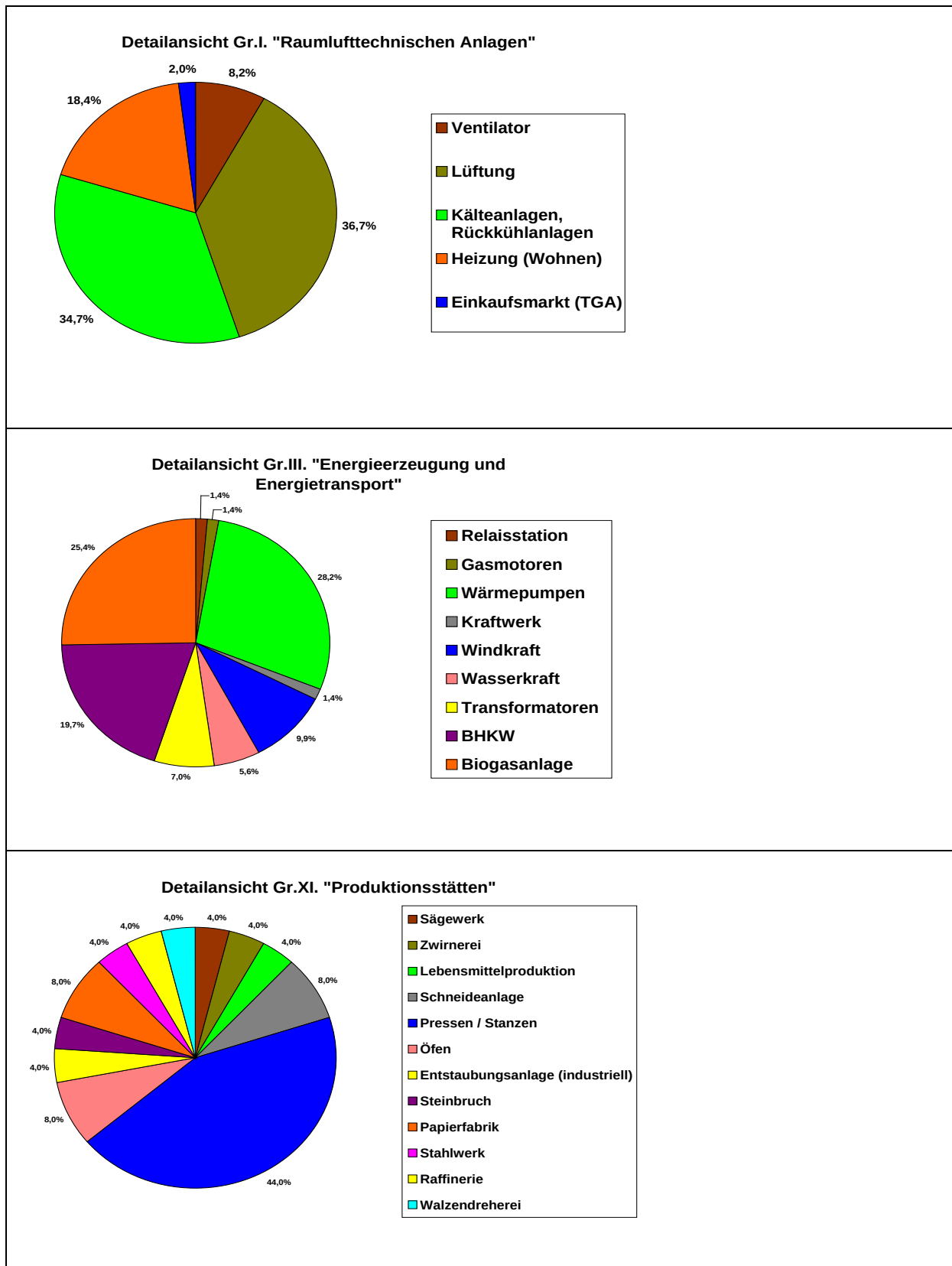
Am häufigsten führten Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes (33,0 % der Fälle) sowie raumluftechnische Anlagen (22,8 % der Fälle) zu Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche.

Bei etwa jeder zehnten Beschwerde ist die Ursache unbekannt. Bei den Quellengruppen Baumaschinen (Gr.II.), Verkehrstechnische Einrichtungen (Gr.IV.), Sieb- und Sortieranlagen (Gr.V.) sowie natürliche Quellen (Gr.IX.) und sonstige Quellen (Gr.XII.) wurden keine Beschwerden verzeichnet. Diese Quellen sind somit für weitere Studien zunächst nicht als primäre Untersuchungsziele einzustufen. Weitere Studien sollten somit Untersuchungsschwerpunkte bei Raumluftechnischen Anlagen (Gr.I.) und Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes (Gr.III.) bilden.

In Abbildung 23 ist die Verteilung der einzelnen Quellen innerhalb der drei häufigsten Quellgruppen dargestellt. Die häufigste Quelle für Beschwerden bezüglich Infraschall und tieffrequenten Geräuschen sind Wärmepumpen mit 28,2 %. Der Gesamtanteil beträgt 9,3 %. Bei jedem zehnten amtlich dokumentierten Beschwerdefall war also eine Wärmepumpe ursächlich.

Relativ häufig sind weiterhin Lüftungs- und Kälteanlagen mit einem Anteil von 8,5 % bzw. von 8,0 %. Bei den Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes (Gr.III.) führten Biogasanlagen mit 8,4 %, Blockheizkraftwerke mit 6,5 % und Windenergieanlagen mit 3,3 % von allen Beschwerdefällen am Häufigsten zu Konflikten. Unter den zehn häufigsten Beschwerdeursachen befindet sich auch die Geräuschquelle „Pressen/Stanzen“ aus der Gruppe der Produktionsanlagen (Gr.XI).

Abbildung 23: Verteilung der Geräuschquellen innerhalb der Quellengruppen



7.3 Potentielle Betroffenheit in Deutschland

Ausgehend von den Ergebnissen der Betroffenheitsanalysen wurden die registrierten Beschwerden bzgl. Infraschall und tieffrequenter Geräusche kartographisch aufbereitet und anschließend regional statistisch untersucht.

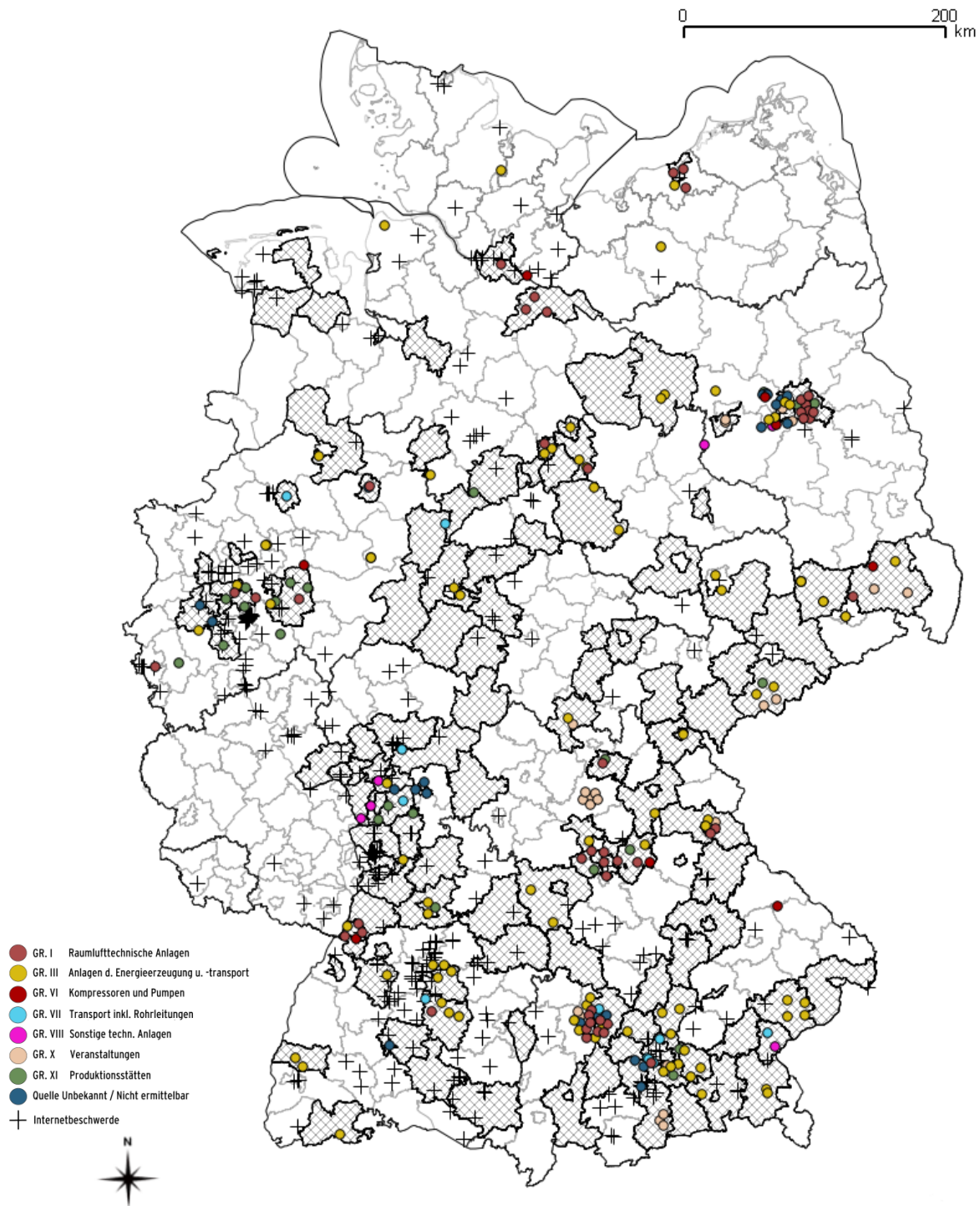
Parallel zu den Anfragen der Behörden wurde eine Internetrecherche zur Betroffenheit durch tieffrequente Geräusche und Infraschall durchgeführt. Die in den Ballungsgebieten häufigen Kartierungen für Brummtöne, wurden nicht berücksichtigt, es sei denn, die Brummtöne wurden von den Betroffenen als ausgeprägt tieffrequent beschrieben. Die Foreneinträge und Internetseiten der Betroffenen beruhen in der Regel ausschließlich auf subjektiven Einschätzungen.

Eine Übersicht über die Gesamtbeschwerdesituation ergibt sich aus der Überlagerung der offiziell registrierten Beschwerdefälle mit den Internetmeldungen, die in Abbildung 24 dargestellt ist. Darin sind die behördlich dokumentierten Beschwerdefälle in Quellengruppen eingeteilt und mit farbigen Punkten gekennzeichnet worden. Häufig war aus datenschutzrechtlichen Gründen keine genaue Angabe über den Beschwerdeort möglich. In diesem Fall wurde die Beschwerde zentral in den Landkreis bzw. die kreisfreie Stadt gesetzt. Damit Rückmeldungen ohne Beschwerdefälle auch dokumentiert werden, wurden alle Landkreise und kreisfreien Städte, die sich an der Befragung beteiligt haben, mit schraffierten Flächen gekennzeichnet. Daraus ergeben sich zwei Rückschlüsse:

- a) Behördlich dokumentierte Beschwerdefälle (farbige Punkte in Abbildung 24), die nicht auf einer schraffierten Fläche liegen, wurden von den Landesumweltämtern gemeldet und
- b) Schraffierte Flächen, auf denen keine behördlich dokumentierten Beschwerdefälle gekennzeichnet sind, veranschaulichen, dass dort keine Beschwerden zu tieffrequenten Geräuschen oder Infraschall von den angeschriebenen Behörden gemeldet wurden.

Die Interneteinträge zu Belästigungen durch Infraschall und tieffrequente Geräusche haben gegenüber den behördlich gemeldeten Fällen den Nachteil, dass diese Beschwerdefälle meist nicht nachvollziehbar dokumentiert wurden und zum Teil von Einzelnen eine Belästigung an mehreren Orten beschrieben wurde. Deshalb wurden diese Beschwerdefälle mit anderem Symbol markiert.

Abbildung 24: Auswertung der Betroffenheitsanalyse der Behörden, Darstellung der gemeldeten Beschwerdefälle inkl. Internetrecherche



7.4 Bewertung

Die ausführlichen Analysen haben gezeigt, dass bislang kein einheitliches Beschwerdekataster geführt wird, zudem fehlen standardisierte Methoden für vergleichbare Datengrundlagen. Diese Problematik wird dadurch verschärft, dass derzeit für den Infraschallbereich keine allgemein gültige Mess- und Beurteilungsvorschrift vorhanden ist. Bei den Beschwerden fehlen objektive Nachweise über die Höhe der Geräuscheinwirkungen häufig vollständig. Eine Vielzahl von Interessenvertretungen mit Internetseiten und Öffentlichkeitsarbeit führt zu einer

unübersichtlichen Betroffenheitssituation in den Broadcasts. Hier dominieren die Einträge von einzelnen Betroffenen, die meist nur stark verkürzt ihre Vermutungen über die Ursache der Geräuscheinwirkungen äußern und ihre Symptome qualitativ beschreiben, ohne einen Bezug zu akustischen Kenngrößen anzugeben.

Zukünftig wären der Aufbau und die Pflege eines einheitlichen zentralen Beschwerdekatasters für Infraschall sinnvoll. Eine Archivierung von Messungen der linearen Terzpegel des Schalldrucks nach DIN 45680 im Frequenzbereich von 8 bis 100 Hz kann für eine vergleichende Auswertung akustischer Kenndaten genutzt werden. Hierzu können behördliche Messungen und Sachverständigengutachten, aber auch anlassbezogenes Monitoring durch die Betroffenen selbst herangezogen werden. Allerdings sollten im Zusammenhang mit Schallpegelmessungen zukünftig möglichst auch die Mess- und Mittelungszeiten, die Klassenmerkmale (gemäß Tabelle 7) und weitere Kenngrößen, die für eine erhöhte Belästigung ursächlich sein können (zum Beispiel Vibrationen, Sekundäreffekte, meteorologische Einflüsse etc.) erhoben werden. Die Angaben könnten mit dem in Abschnitt 6.4 vorgeschlagenen Erhebungs- und Klassifizierungsbogen erfasst und als Grundlage für eine mögliche multidimensionale Grenzwertfindung für den Infraschallbereich genutzt werden.

Die Befragung der Behörden spiegelt nur einen kleinen Teil der tatsächlich vorhandenen Konfliktsituation bezüglich der Einwirkungen von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen wider. So ist davon auszugehen, dass die individuelle Toleranzschwelle der betroffenen Bürgerinnen und Bürger dazu führen kann, dass nur ein geringer Anteil von Konflikten den Behörden gemeldet wird. Um ein genaueres Bild der Situation zu erhalten, könnte zum Beispiel die Häufigkeit von Einwendungen in Planverfahren und gerichtlichen Auseinandersetzungen ausgewertet werden.

Zusammenfassend ergeben sich aus der durchgeführten Betroffenheitsanalyse folgende Erkenntnisse:

- Regionale Schwerpunkte konnten nicht mit statistisch hinreichender Sicherheit gefunden werden. Hierfür war insbesondere die Anzahl und Repräsentanz der übermittelten Beschwerdefälle zu gering. Tendenziell wurde in Süddeutschland eine höhere Anzahl an Beschwerdefällen genannt.
- Am häufigsten führten Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes (in 33,0 % der Fälle) sowie RLT-Anlagen (in 22,8 % der Fälle) zu Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche.
- Als häufigste Quellenart für Beschwerden wurden Wärmepumpen mit einem Gesamtanteil von 9,3 % genannt. Von den Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes führten Biogasanlagen mit 8,4 %, Blockheizkraftwerke mit 6,5 % und Windenergieanlagen mit 3,3 % am häufigsten zu Konflikten.
- Praktisch relevante Quellen sind Wärmepumpen, Biogasanlagen, Blockheizkraftwerke, Windenergieanlagen, Kälte- und Klimaanlage, Lüftungen und Gebäudeheizungen sowie Pressen/Stanzen in der Gruppe der Produktionsstätten.
- Für die systematische Erforschung der Lärmwirkungen sollten Anlagen mit einer hohen Anzahl von Betroffenen gewählt werden, wie zum Beispiel Blockheizkraftwerke, Windenergieanlagen und Pressen/ Stanzen von Produktionsbetrieben. Zur praktischen Konfliktvermeidung und Verbesserung der Wohnqualität im Hinblick auf Infraschall und tieffrequente Geräusche wären daher vorrangig Forschungen über Wärmepumpen, Kälte- und Klimaanlage, Lüftungs- und Heizungsanlagen im Wohnungsumfeld geeignet.

8 Konzeption eines Studiendesigns

8.1 Aufgabenstellung

Aus den vorangegangenen Arbeitspaketen (Literaturanalyse, Identifikation von Anlagen/Quellen und Abschätzung der potentiellen Betroffenheit in der bundesdeutschen Bevölkerung sowie der vorgenommenen Klassifizierung der Infraschallquellen) leitet sich in dem hier beschriebenen Arbeitspaket 4 die Entwicklung eines Studiendesigns zu detaillierten Wirkungsuntersuchungen ab. Es soll die Wirkung von Infraschall auf Menschen im Feld untersucht werden, so dass entsprechend hierfür die Konzeption einer Felduntersuchung vorgesehen ist. Im Vordergrund steht dabei die Wirkung von technischen Infraschallquellen, die entsprechend der Ausführungen in Kapitel 6 eingeordnet werden können in:

- Raumluftechnische Anlagen
- Baumaschinen
- Anlagen der Energieerzeugung
- Verkehrstechnische Einrichtungen
- Sortier- und Siebanlagen
- Kompressoren und Pumpen
- Transport
- Sonstige technische Anlagen (z.B. Sägegatter, Auspacktrommeln, Druckmaschinen)
- Sonstiges (z. B. Geschütze, Explosionen).

Auswertungen von Beschwerden (Vasudevan / Gordon (1977) [159]; zit. nach Leventhall (2003) [82]) haben gezeigt, dass den Beschwerden über tieffrequenten bzw. Infraschall oftmals folgende gemeinsame Faktoren zugrunde liegen (Leventhall, 2003, S. 36 [82]):

- Die Probleme treten eher in ruhigen, suburbanen Gebieten auf.
- Die Geräusche liegen nah an der Hörschwelle und werden von einer Minderheit der exponierten Personen gehört.
- Die Geräusche sind typischerweise im Innenraum und nicht im Außenbereich zu hören.
- Die Geräuschcharakteristik wird als klopfend bzw. tief, rollend bezeichnet.
- Die meisten Beschwerden stammen von Personen im Alter von 55 bis 70 Jahren.
- Die Beschwerdeführer sind normalhörend.
- Tinnitus wurde bei den Beschwerdeführern medizinisch ausgeschlossen.

Als Spektrum der Wirkungen von Infraschall wurden im Rahmen der Literaturanalyse folgende Wirkungsbereiche identifiziert.

- Veränderung im Herz-/Kreislaufsystem (z. B. Änderung des Blutdrucks, Herzrate)
- Konzentrationsschwäche, Reaktionszeitänderungen im Leistungstest
- Einwirkung auf auditive Sinnesorgane und auf das Gleichgewichtsorgan
- mit den o. g. physischen Wirkungen einhergehende psychovegetative Störungen bzw. erlebtes Unbehagen (Schwindel, Müdigkeit, Benommenheit, Druckgefühl am Trommelfell, Vibrationsgefühl)

- (erlebte) Schlafstörungen, Störungen der Konzentration bei (geistigen) Tätigkeiten und Belästigung.

Die Belästigung durch Lärm wird insbesondere im Bereich des Hörschalls in der Lärmwirkungsforschung als Ausdruck des Unmuts darüber verstanden, dass wir etwas hören müssen, was wir nicht hören wollen, dass wir bei einer Tätigkeit gestört werden und dass wir gegen die Quelle des Geräusches relativ machtlos sind (Guski (2002) [49]). Diese Definition schließt vor allem eine emotionale Beurteilung des hörbaren Geräusches (Intensität, Anzahl, Dauer usw.) selbst, der dadurch verbundenen Störung sowie der Möglichkeit der Bewältigung der Störung ein. Eine Reihe von akustischen wie auch nicht-akustischen (personenbezogenen, sozialen, situativen) Faktoren beeinflussen dabei das Belästigungsurteil (u. a. Fields (1993) [40]; Guski (1999) [48]; Miedema & Vos (1999) [88]).

Bei Infraschall, gerade am Rande oder sogar unterhalb der Hörschwelle sprechen die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Befunde eher dafür, dass sich die abgefragte Belästigung verstärkt auf die Wahrnehmung der körperlichen Reaktionen und auf das damit verbundene Unbehagen bezieht. Dabei wird die Ursache einer bestimmten Infraschallquelle zugeschrieben. Insofern entspricht die Belästigung durch (hörbaren) Lärm qualitativ nicht exakt der durch Infraschall. Dies ist bei Wirkungserhebungen entsprechend zu beachten.

Nach dem bisherigen Kenntnisstand sind für eine Feldstudie zur Beeinträchtigungswirkung durch Infraschall insgesamt folgende Aspekte zu beachten:

- Exposition: Quellengruppe des Infraschalls, Charakteristik des Infraschalls (Pegel, Frequenz, Zeitverlauf, Impulshaltigkeit, Tonhaltigkeit, etc.), Umgebungsgeräusche bzw. Luft-/Körperschallkopplung(Überdeckung),
- Wirkungen: Art der Beeinträchtigung (aurale, das Hörvermögen betreffende, und nicht-aurale Wirkungen)
- Situative Rahmenbedingungen: zeitlicher Verlauf der erlebten Beeinträchtigung, Tageszeit, Aktivität des Betroffenen (Schlafen, Lesen/Konzentrieren, Kommunizieren), Aufenthaltsort (inner-, außerhäusig), Witterungsbedingungen/Jahreszeit, Wohnsituation (Einfamilienhaus, Reihenhaushaus, Wohnung, Raumgröße, Einrichtung/Raumakustik usw.)
- Personenbezogene Merkmale: Soziodemographie (Alter, Geschlecht, Sozialstatus, Einstellungen zur Infraschallquelle, zu den als verantwortlich für die Planungen zur Infraschallquelle wahrgenommenen Personen bzw. Institutionen)

Das vorgeschlagene Design einer Feldstudie bezieht sich auf folgende Aspekte:

- die Belästigung durch Infraschallquellen,
- körperliche Reaktionen und das damit einhergehende Gefühl des Unbehagens
- mit der Einwirkung von Infraschall assoziierte Beeinträchtigung bzw. Störung von Tätigkeiten, Ruhe, Konzentration etc.
- und mit Infraschall assoziierte (berichtete) Schlafstörungen

Die nachfolgende Darstellung des Designvorschlags zur Feldstudie über die Wirkung von Infraschall untergliedert sich in die Punkte

- 1) Stichprobenplan
- 2) Auswahl der Untersuchungsgebiete und Untersuchungspersonen
- 3) Schallexposition: Infraschallexposition, andere Schallexposition (Eigenüberdeckung durch Hörschall, Abgrenzung zu Sekundärschall, Vibrationen, andere Infra-

Schallquellen), Expositions-Monitoring (akustische Messung, Wind-, Temperaturmessung, usw.)

4) Wirkungserfassung: Befragungsmethodik, Fragebogenkonstruktion

5) Statistische Analysen

(Vgl. u. a. auch Fidell et al. 2010 [38]).

8.2 Designvorschlag

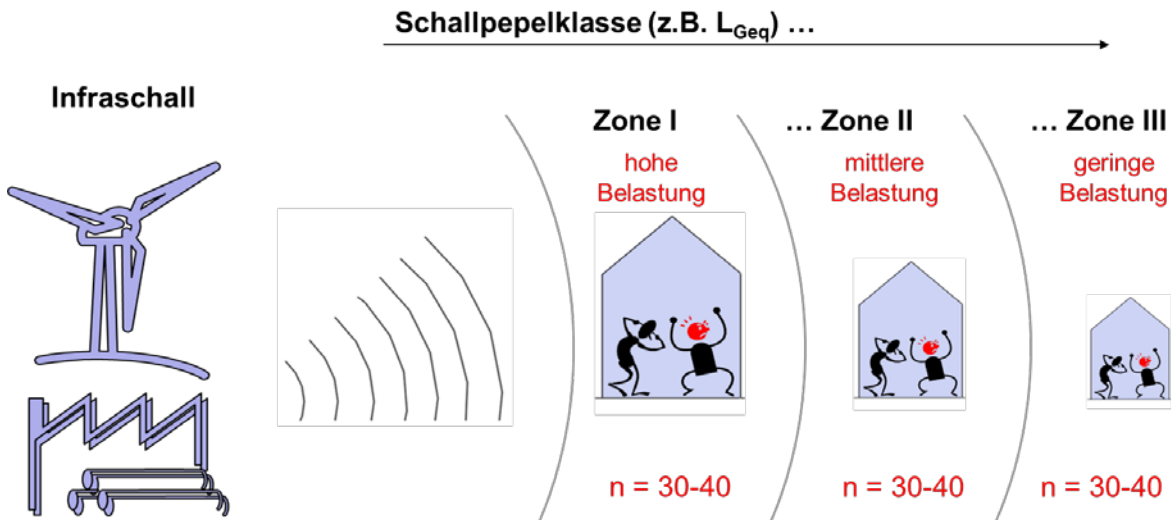
8.2.1 Stichprobenplan

Das Prinzip der zu konzipierenden Feldstudie ist es, die Wirkungen in den genannten Bereichen bei Menschen, die nicht oder nur in geringem Maße einer Infraschallquelle ausgesetzt sind zu vergleichen mit den Wirkungen bei Menschen, die in höherem Maße von einer Infraschallquelle betroffen sind. Die Infraschall-Exposition stellt dabei die unabhängige Variable und die zu betrachtenden Wirkungen die abhängigen Variablen dar. Entsprechend kommen für die Feldstudie die (quasi-experimentellen) Ansätze der sozio-akustischen Lärmwirkungsforschung (Bassareb et al. 2009 [6]) in Betracht.

Grunddesign ist dabei ein, nach verschiedenen Expositionsabstufungen geschichtete Zufallsstichprobe von Untersuchungsteilnehmern aus Wohngebieten im Umfeld einer Infraschallquelle. Beim Verkehrslärm z. B. liegt eine Reihe von Studien vor, in denen die Stichprobenziehung geschichtet nach L_{Aeq} -Stufen erfolgt. Das lässt sich vertreten, da in dem Bereich etablierte Expositions-Wirkungskurven bezogen auf Dauerschall- bzw. Beurteilungspegel (L_{Aeq} , L_{den} , etc). vorliegen, die hinreichende Korrelationsstärken mit Lärmreaktionen in der Bevölkerung zeigen.

Für eine Feldstudie zum Infraschall wird analog empfohlen die Stichprobe von Untersuchungspersonen in einem Untersuchungsgebiet geschichtet nach einem für die Detektion von Infraschall geeigneten Pegelmaß (z.B. L_{eq} mit G-Bewertung) zu ziehen. Dabei sollte wenigstens drei Einteilungen (niedrige, mittlere, hohe Pegelklasse) vorgesehen werden (s. Abbildung 25). Für jede zu untersuchende Art von Infraschallquelle sollten, um wissenschaftliche Wirkungsaussagen über lokale Verhältnisse hinaus verallgemeinern zu können, pro Pegelklasse wenigstens zwei räumlich getrennte Untersuchungsräume definiert werden. Das heißt, es sollten pro Art der Infraschallquelle mindestens zwei Quellenstandorte und deren umgebende Wohngebiete ausgewählt werden.

Abbildung 25: Veranschaulichung eines in Pegelklassen eingeteilten Untersuchungsgebietes



Eine differenziertere Betrachtung der Infraschallexposition im Hinblick auf das Belästigungspotential wurde mit der im Rahmen des Abschnitts 5 vorgestellten Klassifizierung von Infraschallquellen vorgestellt. Danach kann die Infraschallexposition anhand der sechs Merkmale (Eigen-) Überdeckung, Pegel, Frequenzbereich, Zeitverlauf, Impulshaltigkeit und Tonhaltigkeit unterschieden werden.

Für eine Feldstudie wäre ein darauf bezogenes ausbalanciertes sechsfaktorielles Studiendesign nicht realisierbar; bei jeweils mindestens zwei Abstufungen pro Merkmal würde ein $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$ -Design mit 64 Untersuchungszellen resultieren, die jeweils mit mindestens zwei räumlich getrennten Wohngebieten mit ausreichender Zahl von Wohneinheiten zu besetzen wären. Stattdessen wird vorgeschlagen, die genannten sechs Merkmale als akustische Beschreibungsgrößen der zu untersuchenden Infraschallquellen heranzuziehen und den jeweiligen Effekt der einzelnen Merkmale auf die untersuchten Wirkungen zu analysieren.

Im Hinblick auf die bei den vorliegenden Beschwerden genannten Infraschallquellen wird vorgeschlagen, zunächst zwei verschiedene Quellentypen zu untersuchen: Einen Typ mit einer Infraschallbelastung nur tagsüber, dies wäre etwa eine Gewerbeanlage (z. B. ein Sägewerk), und einen Typ mit einer Infraschallbelastung tags und nachts (z. B. Blockheizkraftwerk, Windenergieanlage). Weiterhin gilt es abzugrenzen, in welchem Maße sich die Wirkung von Infraschall ändert, wenn eine Fremdschallquelle (z. B. Verkehrslärm, Lärm aus der Nachbarschaft oder Überlagerung durch Lärm von der Infraschallquelle im hörbaren Schallbereich) vorhanden ist. Deshalb wird angeregt, bei Auswahl der Infraschallquellen und Untersuchungsgebiete noch die Unterscheidung mit hohem / geringem Anteil der Fremdschallquellen einzuführen.

Geht man von einem für regressions- und varianzanalytische Analysemethoden mindestens erforderliche Stichprobengröße von 30 bis 40 Personen pro Untersuchungszelle aus, dann ergibt sich für eine z. B. nach Pegelklassen geschichtete Stichprobe ein Mindestumfang von ca. 100 Personen (3 Pegelklassen $\times$ 30 bis 40 Personen). Die Gesamtstichprobengröße erhöht sich entsprechend der im Weiteren zu berücksichtigenden Faktorstufen. Die Festlegung der Gesamtstichprobengröße und -ziehung sollte ausgehend von der Pegelklasse mit dem geringsten Bevölkerungsanteil und den dort bei einer kalkulatorisch festgelegten Ausschöpfungsquote realisierbaren Teilnehmerzahl vorgenommen werden. Der o. g. Mindeststichprobenumfang sollte dabei nicht unterschritten werden.

Ausgehend von diesem Mindeststichprobenumfang würde ein Untersuchungsplan mit den Faktoren Infraschallpegel (3 Stufen), Quellentyp (2 Stufen), Fremdschallquelle (2 Stufen) und Standort pro Infraschallquelle (2 Stufen) eine Anzahl von $3 \times 2 \times 2 \times 2 = 24$

Untersuchungszellen à 30 bis 40 Personen. Die Gesamtstichprobengröße läge bei ca. 720 bis 960 Personen. Die Besetzung der Untersuchungszellen kann mit Personen aus räumlich getrennten Untersuchungsteilräumen (in Untersuchungsplan als "Gebiet A" bzw. "Gebiet B" gekennzeichnet) erfolgen, ohne dass sich die Gesamtzahl der Untersuchungsteilnehmer dadurch erhöhen muss, da diesem räumliche Aspekt lediglich eine Kontrollfunktion zukommt (Vermeidung der Bündelung lokaler Besonderheiten).

Das in Tabelle 8 abgebildete Untersuchungsdesign fasst die genannten vorgeschlagenen Aspekte des Studienplans zusammen. Die beispielhaft genannten Infraschallquellen zeichnen sich dadurch aus, dass sie in ihrer Ausbreitung einen Einzugsbereich von Immissionspunkten umfassen, der eine zu erwartende ausreichend hohe Stichprobengröße wahrscheinlich macht. Wegen des höheren Einzugsbereichs wird etwa dem Blockheizkraftwerk gegenüber einer Wärmepumpe als zu untersuchende Infraschallquelle der Vorzug gegeben.

Tabelle 10: Mögliches Studiendesign einer Felduntersuchung zur Ermittlung der Wirkung von Infraschall

Infraschall- belastung (Quellentyp)	Bsp. Quelle	Fremdsc hall- quelle	Untersuchungsstandort pro Art der Infraschallquelle					
			Standort A			Standort B		
			Pegelklasse (z.B. L_{Aeq})					
			niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
Belastung tags	Gewerbeanla- ge (z. B. Sägewerk)	hoch	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40
		gering	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40
Belastung tags und nachts	Blockheizkra- ftwerk, Windenergie anlage	hoch	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40
		gering	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40	30 - 40
Summe			120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160	120 - 160
			360 - 480			360 - 480		
			720 - 960					

Grob eingeteilt erfolgt die Durchführung der Infraschall-Feldstudie in vier Schritten:

- 1) Auswahl der zu untersuchenden Infraschallquellen und Wohngebiete inklusive Screeningmessungen
- 2) Akustische, messtechnische Grundlagenermittlung zur Erfassung der individuellen Infraschallexposition von Untersuchungsteilnehmern.
- 3) Durchführung der Wirkungserhebungen in den ausgewählten Wohngebieten
- 4) Schallmessungen in den Wohnräumen der an der Untersuchung teilnehmenden Personen.

Die Feldstudie kann modulartig aufgebaut werden, in dem zunächst in einem Modul der Quellentyp „Belastung tags“ und in einem weiteren Modul der Quellentyp „Belastung tags und nachts“ untersucht wird.

8.2.2 Auswahl der Untersuchungsgebiete und Untersuchungspersonen

Die Auswahl der Untersuchungsgebiete richtet sich nach der zu untersuchenden Infraschallquelle, d. h. die Untersuchungsgebiete werden entsprechend in der Nähe der betrachteten Infraschallquelle ausgewählt. Dabei werden innerhalb der Untersuchungsräume verschiedene Pegelklassen definiert. Betrachtet man die Verteilung von Beschwerden zum Infraschall in Deutschland, so finden sich Schwerpunkte in Süddeutschland, Hessen und Nordrhein-Westfalen sowie im Norden in Schleswig-Holstein. Entsprechend können dort auch die Untersuchungsgebiete unter Beachtung des Untersuchungsdesigns ausgewählt werden. Die in den Beschwerden genannten wesentlichen Infraschallquellen sind in Kapitel 7 aufgeführt und stellen entsprechend der Häufigkeit ihrer Nennung eine relevante Auswahlgrundlage für die in einer künftigen Infraschallstudie zu untersuchenden Quellen dar.

Der Gesamtumfang eines Untersuchungsgebiets kann aufgrund des großen Wirkradius einer Infraschallquelle bis zu einem Kilometer betragen. Der mögliche Wirkradius einer Infraschallquelle ist zwar unter Umständen noch größer, allerdings wird bei größerer Distanz die eindeutige Zuordnung der Wirkung zu einer Quelle und der Ausschluss bzw. die Kontrolle von Fremdschalleinwirkungen immer schwieriger. Bei der Entscheidung für die Ausdehnung des Untersuchungsgebiets ist nicht der Außen- sondern der Innenschallpegel relevant. Das bedeutet, dass die Bausubstanz der Wohngebäude eine wesentliche Rolle spielt. So ist der Wirkradius einer Infraschallquelle bei älteren Gebäuden (Baujahr vor 1950) größer als bei neueren Gebäuden (Baujahr ab 1950). Insgesamt stellt ein maximaler Radius von einem Kilometer um die Infraschallquelle einen Kompromiss dar, bei dem der Infraschall einer Quelle noch mit vertretbarer Messsicherheit erfasst werden kann.

Die Gebietsauswahl sollte mit großer Sorgfalt geplant und durchgeführt werden; es ist ein höherer Aufwand anzusetzen, als es in Untersuchungen zur Wirkung von hörbarem Lärm üblicherweise der Fall ist. So sind Screeningmessungen zur groben Abschätzung der Belastungssituationen erforderlich und die Bausubstanz der in die Untersuchung einzubeziehenden Wohngebäude sollte erfasst werden. Dazu gehört die Berücksichtigung des Baujahres, des Baumaterials (z. B. Stein, Holz), der Fensterart, -größe, aber auch Einbauqualität, die Einrichtung in den Wohnräumen (wg. Innenraumreflexionen), Größe der Wohnräume, usw.

Neben der Erfassung der vor Ort im Untersuchungsraum vorherrschenden Infraschall- und anderen Emissionen ist die Charakteristik der betroffenen Kommunen, die dort vorherrschenden ggf. im Zusammenhang mit dem Betreiber der Infraschall produzierenden Anlage auftretenden politischen Diskussionen zu beachten.

Wenn möglich, empfiehlt sich optional eine studienbegleitende Medienanalyse (z. B. über regionale Pressespiegel, Google Alert, etc.). Dabei geht es nicht um den Nachweis einer kausalen Wirkung von Medien auf Infraschall-Beeinträchtigungen in der Bevölkerung – das wäre ein eigenes, komplexes Forschungsvorhaben. Vielmehr soll eine solche Analyse zumindest die Abschätzung von Assoziationen und zeitlicher Korrespondenz von medialen, regionalen Informationen/Diskussionen und der erlebten Beeinträchtigung durch Infraschall in der Bevölkerung ermöglichen.

Schallexposition

Die Erfassung der Infraschallexposition erfolgt auf zwei Ebenen:

In gröberer Form anhand von Außenmessungen und stichprobenartigen Innenraummessungen im Rahmen des Screenings zur Auswahl geeigneter Untersuchungsgebiete bzw. Untersuchungswohneinheiten.

In differenzierterer Form im Rahmen der individuellen Expositionsbestimmung wird vorgeschlagen an mehreren Stellen im Wohngebiet Messungen im Innenraum vorzunehmen. Bei den im Abschnitt 8.2.1 genannten Mindeststichprobenumfängen werden Messungen in der Wohnung jeder teilnehmenden Person nicht im vertretbaren Umfang möglich sein. Die Messstellen sollten so ausgewählt und im Untersuchungsraum verteilt sein, dass mit jeweils einer Messstelle eine homogene Wohnumgebung (z. B. definiert durch gleiche Bausubstanz und großer Nähe von Wohnungen untereinander) abgedeckt wird.

Der Durchführung der Messungen im Innenraum sollte eine messtechnische Grundlagenermittlung vorgeschaltet werden, in der u. a. die folgenden Punkte geprüft und festgelegt werden sollte

- Anzahl der erforderlichen Messgeräte pro Untersuchungsgebiet (u. a. abhängig von der Homogenität der Wohnumgebung im Untersuchungsraum)
- erforderliche Güteklasse der Messgeräte, der Mikrofone
- Anzahl der Kanäle des Aufnehmers.

Vorbehaltlich der Ergebnisse dieser Grundlagenermittlung erscheint es sinnvoll, pro Wohnung die Messungen in zwei Räumen vorzunehmen (Schlafraum und Hauptwohnraum) und innerhalb eines Raumes vier Messpunkte in den Raumecken.

8.2.3 Befragungsmethodik

Die zu erfassenden Wirkungen des Infraschalls umfassen im Wesentlichen die Belästigung durch den Infraschall, körperliche Reaktionen und Unbehagen sowie auf Infraschall als Ursache attribuierte Störungen von Alltagstätigkeiten bzw. mit Infraschall verbundene Störungen des Schlafs. Zusammengefasst lassen sich im Feld diese Wirkungen am besten im Rahmen von Befragungen erheben.

Die physiologische Messung körperlicher Reaktionen auf Infraschall erlaubt zwar eine Wirkungserfassung unabhängig vom bewussten und in Befragungen berichteten Erleben der Untersuchungsteilnehmer. Zur Interpretation ist aber die Erfassung zusätzlicher Personenmerkmale und weitere potentielle Einflussfaktoren der physiologisch untersuchten Reaktionen erforderlich, die dann zumindest in begleitenden Befragungen erhoben werden. Allerdings sind physiologische Erhebungen im Feld sehr aufwändig und schwerer zu kontrollieren. Außerdem liegen gute Befragungsinstrumente auch zur Erfassung von zumindest bewusst wahrnehmbarer körperlicher Reaktionen bzw. Beschwerden vor. Da das damit erlebte Unbehagen auch im Fokus steht können die zugrundeliegenden körperlichen Beschwerden in Befragungen mit erfasst werden.

Es lassen sich verschiedene Befragungsformen unterscheiden: schriftlich-postalische, telefonische, persönliche (face-to-face), Online-Befragung und ihre Mischungen daraus (Mixed-Mode-Befragung).

Face-to-face-Interviews gelten als Königsmethode unter den Befragungsarten, da mit ihnen

- gegenüber übrigen Befragungsmethoden eine höhere Ausschöpfung erzielbar ist (u.a. Bortz / Döring, 2009 [11]; Porst, 1996 [121])
- geschulte Interviewers die Befragung führen und damit das Verständnis der Fragen geklärt werden kann,
- sicher gestellt werden kann, dass die richtige Person befragt wird (und kein anderes Haushaltsmitglied einen Fragebogen ausfüllt),
- neben dem Interview weitere situative Sachverhalte im Haus/in der Wohnung oder im Wohngebiet (je nach Fragestellung Dämmung, Fensterart und -stellung, Sichtverbindung zur Lärmquelle, ggf. Vorlage verwendeter Medikamente, etc.) vom Interviewer vor Ort direkt erfasst werden können,
- die Methode die Anwendung von Zufallsauswahlverfahren unterstützt.

In den letzten Jahren hat der Anteil telefonischer Befragungen im Lärmwirkungsbereich zugenommen. Gegenüber face-to-face-Interviews haben Telefonbefragungen den Vorteil, dass sie kosteneffizienter sind, eine schnelle Sammlung von Daten mit direkter Überführung in die EDV während des Interviews ermöglichen und eine bessere Supervision der Interviewsituation erlauben. Ihre Ausschöpfungsquote liegt in der Regel zwischen schriftlich-postalischen und face-to-face Befragungen. Gegenüber schriftlich-postalischen Befragung haben Telefoninterviews den Vorteil, dass sie von geschulten Interviewern durchgeführt werden, eine engere Kopplung mit der EDV aufweisen, die Interviewsituation zentral kontrolliert wird und sichergestellt werden kann, dass die richtige (per Zufall ausgewählte) Zielperson die Fragen beantwortet.

Bei Telefonbefragungen sind Forscher allerdings zunehmend mit der Situation konfrontiert, dass der Anteil in Telefonbücher/Telefondatenbanken eingetragener Rufnummern zusehend abnimmt. Zum einen, weil immer weniger Menschen ihre Telefonnummern eintragen lassen, zum anderen weil der Anteil derjenigen Personen, die nur über ein Mobiltelefon verfügen (mobile-onlys) zunimmt. Bevölkerungsrepräsentative Telefonbefragungen bleiben dennoch weiterhin möglich. Dazu werden Rufnummern über die Generierung von Zufallszifferfolgen ermittelt und schließen damit eingetragene als auch nicht eingetragene Telefonnummern ein (sogenannte Random-Digit-Dial-Verfahren; Gabler & Häder (1997) [44]; AAPOR (2011) [148]).

Dies funktioniert allerdings dann nicht, wenn bereits zum Zeitpunkt der Stichprobenziehung die geographische Lage bzw. Wohnadresse der zu befragenden Personen bekannt sein muss. Dies ist gerade in Lärmwirkungsstudien der Fall, wenn eine räumlich auf die Nähe zu im Fokus stehenden Lärmquellen (ggf. noch nach Lärmbelastung gestufte) Stichprobenziehung erfolgt. Dann ist der Ausgangspunkt keine Zufallsrufnummer, sondern spezifische Wohnadressen von potentiellen Untersuchungsteilnehmern innerhalb eines definierten Untersuchungsraums.

In dem Fall stellen Einwohnermeldedaten die beste Datenquelle für eine (geschichtete) Zufallsziehung von Personen innerhalb des definierten Untersuchungsgebiets dar. Man kann zwar im Anschluss an eine solche Ziehung zu den gezogenen Personen die Telefonnummern recherchieren, läuft dann aber wie oben dargestellt Gefahr, nur eingetragene Rufnummern zuordnen zu können. Um weiterhin an Telefonbefragungen festhalten zu können besteht ein Ausweg, um bevölkerungsrepräsentative Daten zu erhalten, in der Anwendung eines Mixed-Mode-Ansatzes, wie er z. B. bei den bundesweiten Erhebungen zur Mobilität und Verkehrsmittelwahl in Deutschland (MiD 2008; Follmer et al. 2010 [43]) durchgeführt wird. Im MiD 2008 wurde eine Kombination von Telefonbefragung und schriftlicher Kontaktaufnahme durchgeführt, bei schriftlicher Kontaktaufnahme mit den Optionen die Befragung postalisch, online oder per Telefon durchzuführen. Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt die NORAH-

Studie¹⁶ zur Wirkung von Verkehrslärm in einem der Studienmodule zur Belästigungswirkung von Verkehrslärm (Schreckenberget al. 2012 [132]).

Eine andere Alternative ist – bei Befragungen im größeren Umfang – die schriftliche Befragung – postalisch und/oder online – wobei auch hier die Stichprobenziehung auf Basis von Einwohnermeldedaten erfolgen sollte. Denn ein großer Nachteil schriftlich-postalischer Befragungen besteht nicht etwa in grundsätzlich geringen Ausschöpfungsquoten, sondern in der sehr breiten Streuung in der Ausschöpfungsquote von 10-90% nach Bortz/Döring [11]. Das heißt aber auch, dass hohe Ausschöpfungsquoten (höhere als bei Telefonbefragungen üblich; in der Regel ca. 20 bis 30%) möglich sind, je nach Umfang von Nachfassaktionen und/oder Incentives.

Bei Erhebungen im kleineren Stichprobenumfang bzw. in Untersuchungsräumen mit räumlich überschaubarer Ausdehnung ist schließlich – bei entsprechend verfügbarem Budget – die face-to-face-Befragung den anderen Verfahren vorzuziehen. Insbesondere dann, wenn im Falle der Wirkungserfassung von Infraschall ausführliche Messungen vor Ort erforderlich sind, lässt sich dies gut mit Face-to-face-Interviews kombinieren. Gegenüber schriftlich-postalischen Befragungen ist das gerade auch dann angezeigt, wenn nicht nur standardisierte Fragen mit geschlossenen Antwortformaten (zum Ankreuzen) gestellt werden, sondern auch offene Fragen gestellt werden; deren Verwendung – neben geschlossenen Fragen – sind gerade bei den teils diffusen Wirkungen von Infraschall angezeigt.

In der Lärmwirkungsforschung seltener verwendet werden Mixed-Mode-Befragungen. Ein positives Beispiel hierfür stellen die Untersuchungen von Lercher und Kollegen zum Verkehrslärm (Schienen-/Straßenverkehr) im Wipptal dar (Lercher et al. (2008) [80]), in der telefonische Einstiegsinterviews mit tiefergehenden face-to-face-Befragungen kombiniert wurden. Ähnliches ist auch für eine Infraschall-Feldstudie denkbar, wenn etwa parallel zu Screeningmessungen und ersten Eruierung von Untersuchungsgebieten bzw. Wohneinheiten in relevanten Wohngebieten schriftlich-postalische Einstiegsbefragungen zur Wohn- und Lebensqualität und insbesondere zur möglichen Beeinträchtigung durch Infraschall (optional mit zusätzlichem Angebot der Online-Durchführung der Befragung) durchgeführt werden. Nach erfolgtem Screening und finalen Definition des Untersuchungsraums werden dann die Untersuchungspersonen in face-to-face-Befragungen zur Beeinträchtigung durch Infraschall vertiefter befragt. Die Angaben im Einstiegsinterview (zu baulichen Gegebenheiten, Art und Zeitpunkt des Auftretens von Infraschall, Vorhandensein etwaiger ebenfalls beeinträchtigender Lärmquellen, etc.) selbst können mit zur finalen Auswahl der Untersuchungseinheiten verwendet werden.

¹⁶ In der NORAH-Studie (www.norah-studie.de) im Auftrag der hessischen Umwelt- und Nachbarschaftshaus gGmbH, Kelsterbach, wird vor allem am Flughafen Frankfurt sowie teils an drei weiteren, deutschen Flughäfen die Wirkung von Flug-, Schienen- und Straßenverkehrslärm in drei Modulen im Hinblick auf die Lärmbelästigung, Schlafstörungen, physische Gesundheit in der Bevölkerung sowie die Lebensqualität und kognitiven Leistung von Grundschulkindern untersucht. Im Modul 1 (Belästigung & Lebensqualität) werden vorrangig telefonische Interviews durchgeführt, hierzu sind per Zufall anhand von Melderegisterdaten ausgewählte Personen angeschrieben und um Befragungsteilnahme – telefonisch oder alternativ online – gebeten worden. Am Flughafen Frankfurt sind die angeschriebenen Personen, sofern ihre Rufnummern nicht recherchiert werden konnten, darüber hinaus gebeten worden, zur Befragungsteilnahme ihre Rufnummer oder e-Mailadresse bekannt zu geben.

8.2.4 Fragebogenkonstruktion

In Befragungen zur Wirkung von Umgebungslärm wird oftmals – teils explizit, teils implizit – von einem stresstheoretischen Ansatz ausgegangen. Danach ist Umgebungslärm eine Umweltbelastung (Umweltstressor), die zu Stress führt, d. h. zu einem physischen und/oder psychischen Ungleichgewicht zwischen Umweltanforderung und individuellen Bewältigungsmöglichkeiten (vgl. Lazarus / Launier (1978) [78]; Babisch (2000) [3]; Van Kamp (1990) [158]; Stallen (1999) [140]). Auf psychischer Ebene wird dieses Ungleichgewicht individuell wahrgenommen, auf physischer Ebene treten eine Reihe von autonomen, spezifischen und unspezifischen Reaktionen des Organismus als Antwort auf die Anforderung auf.

Während der Umgebungslärm durch Messungen oder Berechnung der Schallexposition bestimmt wird, erfolgt in Lärmwirkungsbefragungen die Erfassung der (Stress-) Wirkungen sowie der hierauf bezogenen nicht-akustischen situativen, sozialen und personalen Einflussfaktoren (sog. Moderatoren bzw. Mediatoren nach Baron / Kenny (1986) [5]; Rohrmann et al. (1978) [126]). Insbesondere jene Faktoren sind dabei mit den erhobenen Wirkungen assoziiert, die auf das Bewältigungsvermögen und die damit verbundenen individuell erlebte Kontrolle über die Wohn-/Lebenssituation unter Lärm einwirken (Schreckenberg et al. 2010 [132]). Entsprechend sind Lärmwirkungsfragebögen in der Regel nach einem SMR-Konzept - Stimulus (Geräusch), Moderator (nicht-akustisch Einflussgrößen), Reaktion (Lärmwirkung, z.B. Störungen, Belästigung) – aufgebaut.

Der nachfolgende Vorschlag von Befragungsinhalten für eine Befragung zur Wirkung von Infraschall knüpft daran an. Der Vorschlag orientiert sich an entsprechenden entworfenen bzw. verwendeten Fragebögen zur Wirkung von Umgebungslärm (insb. Verkehrslärm; vgl. Finke et al. (1980) [42], Möhler et al. (2000) [89], Schreckenberg / Meis (2007) [131]), zu Infraschallquellen, u. a. Hubschrauber; vgl. Fidell et al. (2010) [38], Fields / Powell (1985) [39]), zu Windenergieanlagen; vgl. Pedersen et al. (2009) [110]) und Wärmepumpen/Lüftungsanlagen; vgl. Perrson Waye / Rylander (2001) [119]). Darüber hinaus sollte der Fragebogen – unter Berücksichtigung der Besonderheiten der Wirkung des Infraschalls wie der vermutete höhere Anteil des Gefühls des Unbehagens im Belästigungsurteil zum Infraschall im Vergleich zur Belästigung durch Hörschall - an internationale Standards anknüpfen. Beispiel hierfür ist die Erfassung der Lärmbelästigung, bei der sich ein internationaler Standard auf Basis der Empfehlungen der International Commission on Biological Effects of Noise (ICBEN) entwickelt hat (ISO/TS 15666 [56]).

Insgesamt sind die Fragen in folgende Blöcke eingeteilt:

- „Reaktionsvariablen“: Fragen zur Beeinträchtigung durch Infraschall (Belästigung, Störungen, gesundheitliche Beeinträchtigung).
- Einflussgrößen (Moderatorvariablen, Mediatorvariablen, Co-Determinanten): Variablen, die die Beziehung zwischen der Infraschallbelastung und den Wirkungen (Reaktionsvariablen) beeinflussen, selbst aber nicht von der Infraschallbelastung abhängen, sind Moderatorvariablen. Sie üben in Wechselwirkung (Interaktion) mit der Infraschallbelastung einen Einfluss auf die Wirkungsgröße aus. Mediatoren sind solche Faktoren, die zwischen der Infraschallbelastung und der interessierenden Reaktion „vermitteln“. Ohne ihr „Dazutun“ hätte der Infraschall keine oder eine geringere Auswirkung auf die betrachtete Reaktion. Co-Determinanten haben zusätzlich zur Infraschallbelastung einen (additiven) Einfluss auf die betrachtete Beeinträchtigungsreaktion. Dritteinflussfaktoren beeinflussen. In der nachfolgenden Tabelle werden zwei Unterblöcke definiert:

- o situative (auf die Wohnsituation bezogene) Co-Determinanten
- o personale und soziale (einstellungsbezogene) Co-Determinanten.
Soziodemographische Variablen können auch Einflussgrößen darstellen, dienen darüber hinaus aber auch der Beschreibung der Stichprobe. Sie werden diesem Unterblock mit zugeordnet.

Die Unterteilung in Reaktions- und Einflussgrößen (Moderatoren, Mediatoren, Co-Determinanten) ist nur vorläufig, da die Grenzen teils fließend sind. So können die als Reaktionen eingestuft Gesundheitsprobleme auch Moderatoren in dem Sinne darstellen, das vorliegende gesundheitliche Probleme das Vermögen zur Bewältigung von Umweltbelastungen mindern und damit die Beeinträchtigungsreaktionen erhöhen. Umgekehrt kann die als situative Einflussgröße eingestufte Wohnzufriedenheit auch eine weitere, sekundäre Reaktion auf die Infraschallbelastung sein. In jedem Fall ist also die Einstufung der erhobenen Variablen nach Datenerhebung statistisch zu überprüfen.

Tabelle 11: Vorschlag von Befragungsinhalten im Rahmen einer Befragungsstudie zur Wirkung von Infraschallgeräuschen

Vorschlag von Befragungsinhalten der Feldstudie	
Befragungsthema	Befragung zu Wohn- und Lebensbedingungen In den meisten sozialwissenschaftlichen Lärmwirkungsbefragungen wird die Befragung den Befragungspersonen als eine über Wohn- und Lebensbedingungen vorgestellt. Das erklärt zum einen, dass über die interessierende Lärmquelle(n) hinaus Fragen zur Wohnsituation gestellt werden. Zum anderen soll damit ermöglicht werden, dass zumindest zu Beginn der Befragung zunächst möglichst unvoreingenommen allgemeine Angaben zu den Wohn- und Lebensbedingungen beantwortet werden, ohne dass die Befragten gleich an die spezifische, im Fokus der Studie stehende Lärmquelle denken.
<i>Einstiegsfragen zur Wohnsituation, situative Einflussgrößen (Moderatoren, Mediatoren, Co-Determinanten)</i>	
Einstieg: Wohn- und Lebensbedingungen	Die ersten Fragen beziehen sich auf die allgemeinen Wohn- und Lebensbedingungen der befragten Person. Dazu zählen Wohndauer, Wohnzufriedenheit innen/außen (als Einzelfragen sowie als Skala bestehend aus mehreren Wohnzufriedenheits-Items, vgl. Van den Berg et al. (2009) [153]; Wirth (2004) [165]), positive/störende Lebensbedingungen (offene Fragen), Wohneigentum, Haustyp, Etage der Wohnung, ggf. vorhandene Schalldämmung, Fensterart, überwiegende Fensterstellung
Belästigung durch Umwelteinflüsse	Belästigungen durch Umwelteinflüsse im Wohngebiet (Lärm, Vibration, Geruch, Landschaftsbild/Ästhetik) – gesamt, außen, bei Aufenthalt im Innenraum
Wahrnehmung körperlicher Veränderungen	Psycho-vegetative Beschwerden (Müdigkeit, Unkonzentriertheit, Kopfschmerzen, Niedergeschlagenheit, ...) Beschwerdedruck, Unbehagen, Wahrnehmung von Änderungen im Hörsystem, Gleichgewichtsorgan (Druckgefühl), Vibrationsgefühl
Gesundheitsprobleme	Ärztlich diagnostizierte Erkrankungen (insbesondere des Herz-Kreislaufsystems), allgemeine Gesundheitsbeschwerden, gesundheitsbezogene Lebensqualität (HQoL ¹⁷ , z.

¹⁷ HQoL = health-related quality of life (englisch für „gesundheitsbezogene Lebensqualität“)

	B. mittels der standardisierten Testverfahren „SF36“, „SF12“ oder „SF8“ ¹⁸ ; Bullinger & Kirchberger (1998) [19]; Ellert et al. (2005) [34]; Schlafqualität (z.B. „Pittsburger Sleep Quality Index PSQI“; Buysse et al. (1989) [21])
<i>Beeinträchtigung durch Infraschall und andere Immissionen („Reaktionsvariablen“)</i>	
Lärmbelästigung	Belästigung durch Umgebungslärm (Verkehrslärm, Industrie-/Gewerbelärm, Nachbarschaftslärm, Lärm von der Infraschallquelle) – gesamt, tags, nachts (erfasst gemäß ISO/TS 15666 [56], zu bestimmten Tagesstunden (nach ISO/TS 15666 und/oder offen: Tagesstunden, in denen Infraschallquelle besonders stört oder belästigt)
Weitere Beeinträchtigung durch Infraschallquelle	Beurteilung der Folgen der Infraschallquelle, je nach Art der Quelle: Lärm, Licht (z. B. Schattenwurf bei Windenergieanlagen), Abgase/Geruch, Landschaftsbild/Ästhetik – gesamt, außen/innen, verschiedene Tageszeiten, Belästigung durch Vibration
Tätigkeiten, die durch Infraschallquelle gestört werden	Tags: Ruhe, Konzentration/Arbeit, Kommunikation, bei Nachtschichtarbeitern: Schlaf (analog ISO/TS 15666) Nachts: Schlaf (analog ISO/TS 15666) Besondere Situationen, in denen Infraschallquelle besonders auffällt/stört (offene Frage)
Charakteristik der Infraschallquelle	Hörbarkeit und wahrgenommene Charakteristik der Infraschallquelle (z. B. mittels des sematischen Differentials ¹⁹)
<i>Personale und soziale Einflussgrößen (Moderatoren, Mediatoren, Co-Determinanten), Soziodemographie</i>	
Einstellung bzgl. Infraschallquelle	Einstellung-Skala zur Infraschallquelle: Zustimmung zu Aussagen, die z.B. über Beschwerden ermittelt werden; semantisches Differential zur Infraschallquelle;
Vertrauen in Verantwortliche	Erfassung, welche Personen/Institutionen als verantwortlich für den Betrieb bzw. Minderung der Störung durch Infraschallquelle wahrgenommen werden; Einschätzung der Bereitschaft dieser Personen/Institutionen sich für die Störungsminderung und den Schutz der Bevölkerung vor der Infraschallquelle einzusetzen.
Generelle Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen (Disposition)	Empfindlichkeit: Lärmempfindlichkeit, Empfindlichkeit gegenüber Gerüchen, Vibrationen, Wetter, Umweltstress
Einschätzung der Gewöhnbarkeit an	Gewöhnbarkeit an Lärm, Vibrationen, Gerüche, Wetter, Umweltstress

¹⁸ SF = Short Form Health Survey (Kurzfragebogen zur Erfassung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität). Die Ziffern 36, 12, 8 stehen für die Anzahl der Fragen (Items).

¹⁹ Das semantische Differential ist ein psychologisches Verfahren zur Erfassung von Einstellungen gegenüber Sachverhalten oder Personen. Dabei wird eine Liste von mehrstufigen Skalen, deren Endpole mit jeweils gegensätzlichen (bipolaren) Eigenschaften (z. B. bei Geräuschen: laut/leise, hoch/tief, schrill/gedämpft) bezeichnet sind, vorgelegt. Aufgabe ist es, anhand der Skalen anzugeben, mit welchen Eigenschaften der zu bewertende Sachverhalt bzw. die zu beurteilende Person assoziiert wird.

Umweltbelastungen	
Soziodemographie	Alter, Geschlecht, Schul- und Berufsausbildung, Einkommen, Haushaltsgröße, Familienstand (Kinder), Stunden außer Haus (nicht durch Infraschallquelle im Wohnort exponiert)

8.2.5 Statistische Analysen

Die statistischen Analysen zielen im Wesentlichen darauf ab, Aussagen zur Expositions-Wirkungsbeziehungen treffen zu können.

In deskriptiven Analysen sollten die Häufigkeitsverteilungen der erhobenen Expositionsmaße und Befragungsvariablen zunächst dargestellt werden.

In Zusammenhangsanalysen (Korrelationsberechnungen) werden Richtung und Stärke der Zusammenhänge zwischen Expositionsmaßen und den Wirkungsvariablen zum Infraschall untersucht. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Expositionsmaße zu identifizieren, die die engsten Beziehungen zu den erhobenen Wirkungen aufweisen. Aber auch zwischen den weiteren in den Befragungen erhobenen Variablen (Moderatoren/Mediatoren) einerseits und den Expositions- als auch Wirkungsvariablen andererseits sollen statistische Zusammenhangsanalysen vorgenommen werden. Daran schließen sich regressions- und varianzanalytische Auswertungsverfahren zur Modellierung der Wirkung von Infraschalllärm anhand von Expositionsmaße und weiteren identifizierten Einflussfaktoren).

8.2.6 Schätzung des Aufwands zur Durchführung einer Lärmwirkungsstudie zu Infraschallimmissionen

Auf der Grundlage des oben beschriebenen Studiendesigns ergibt sich für die einzelnen Bearbeitungsschritte folgende grobe Aufwandsschätzung in Personentagen (PT):

- 1) Grundlagenermittlung ca. 60 PT
- 2) Akustische, messtechnische Grundlagenermittlung zur Erfassung der individuellen Infraschallexposition von Untersuchungsteilnehmern ca. 120 PT
- 3) Auswahl der zu untersuchenden Infraschallquellen und Wohngebiete inklusive Screeningmessungen 24 Untersuchungsgebiete ca. 120 PT
- 4) Durchführung der Wirkungserhebungen in den ausgewählten Wohngebieten ca. 800 Probanden ca. 200 PT
- 5) Schallmessungen in den Wohnräumen der an der Untersuchung teilnehmenden Personen ca. 400 PT
- 6) Auswertungen Bericht ca. 100 PT

Gesamt ca. 1000 PT

Insbesondere der Aufwand für die Erfassung der akustischen Belastung der Probanden durch Infraschallimmissionen erscheint derzeit sehr aufwändig, da mangels verlässlicher Berechnungsverfahren Schallmessungen sowohl bei der Gebietssuche als auch bei der Wirkungsuntersuchung erforderlich werden. Wir schlagen daher vor, der Hauptstudie eine Pilotuntersuchung vorzuschalten, um geeignete Mess- und Berechnungsverfahren für die akustischen Erhebungen zu entwickeln. Möglicherweise können daraus Kosteneinsparungen für die Hauptstudie abgeleitet werden.

Teilt man die Feldstudie nach Quellentyp in einzelne Module ein, so verteilen sich die Personentage wie folgt:

Tabelle 12: Schätzung des Aufwand einer Lärmwirkungsstudie über Infraschallimmissionen

Modul	ca. Personentage
• Grundlagenermittlung - Pilotstudie	180
• Modul 1: Gebietsauswahl	120
• Modul 2: Belastung tags	350
• Modul 3: Belastung tags/nachts	350

9 Vorschläge zur Weiterentwicklung des bestehenden Regelwerks zum Immissionsschutz

9.1 Aufgabenstellung

Die in der Öffentlichkeit zunehmend als nicht befriedigend empfundene Regelungssituation zu Infraschall und tieffrequenten Geräuschen soll auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse zu Wirkungen und Betroffenheiten weiterentwickelt werden. Die bisher stark an der Bewertung von Geräuschen im - eindeutig als Hörbereich zuordenbaren - Frequenzbereich angelehnte Vorgehensweise soll derart ergänzt werden, dass die Besonderheiten bei der Wahrnehmung und die Wirkungen von Infraschall adäquat berücksichtigt werden. Dabei muss nicht ausschließlich auf die Hörwahrnehmung Rücksicht genommen werden.

Grundlage für eine regelungsspezifische Bewertung ist jedoch eine einheitliche Vorgehensweise bei der Messung und insbesondere der Prognose von Immissionen aus Infraschall und ausgeprägt tieffrequenten Geräuschen, zur Quantifizierung der belästigenden Einwirkung.

Da tieffrequente Schalle besonders innerhalb von Aufenthaltsräumen zu Belästigungen führen, ist der ausreichende Schutz im Innenraum (wie bisher auch) anzustreben. Somit ist sowohl bei der Prognose als auch bei der Messung die bauakustische Situation zu berücksichtigen. Dies kann bei der Prognose zum Beispiel durch die Zugrundelegung einer üblichen mittleren oder besonders ungünstigen –legislativ vorgegebenen oder tatsächlich vorhandenen - bauakustischen Situation erfolgen. Hierfür werden insbesondere Simulationen und theoretische Überlegungen zur Ausbreitung von tieffrequenten Schallen in Gebäuden notwendig. Bei der messtechnischen Bewertung von Infraschallimmissionen müssen sowohl die konkrete bauakustische Situation entsprechend dem Stand der Bautechnik in die Bewertung eingehen, als auch die Messmethoden und die Messtechnik an die zu bewertenden Schalle angepasst werden.

Für beide Ermittlungswege (Prognose und Messung) sind im Rahmen von weiteren Untersuchungen Konzepte zu erarbeiten, die die Besonderheiten von tieffrequenten Schallen und Infraschall auch im Hinblick auf Ihre Wirkungen angemessen berücksichtigen.

9.2 Methodik

Eine Differenzierung zwischen Infraschall und tieffrequentem Schall ist aus der Sicht der Hörakustik schwierig. Nicht nur, dass beide Frequenzbereiche sich in ihrer Definition überschneiden (tieffrequenter Schall nach DIN 45680 [27] im Bereich 8 Hz bis 100 Hz und Infraschall im Bereich kleiner 20 Hz), sondern auch Komponenten beider Bereiche als Lärmbelastung in der Regel gemeinsam auftreten. Da zudem unterhalb von etwa 30 Hz keine differenzierte Tonhöhenwahrnehmung besteht, ist eine Aussage der Betroffenen, welchen dieser beiden Frequenzbereiche sie wahrnehmen, wenig belastbar. Betroffene gehen häufig in einem Beschwerdefall davon aus, von Infraschall belästigt zu sein, wenn ihre Symptome mit den beschriebenen Merkmalen für eine Einwirkung im tieffrequenten Bereich übereinstimmt und Messungen nach der DIN 45680 für tieffrequenten Schall bis hinunter zu 8 Hz keine Überschreitung von Anhaltswerten erbringen, sie sich aber dennoch stark belästigt fühlen. Sie suchen dies dann damit zu begründen, dass die Messeinrichtung nicht geeignet war, Infraschall unterhalb von 8 Hz richtig zu erfassen. Demgegenüber zweifeln die Betroffenen deutlich seltener an einer sachgerechten Messung und Beurteilung von tieffrequenten Geräuschen und Hörschall innerhalb der definierten Grenzwerte (8 Hz bis 20 kHz).

Die bei solchen Messungen üblich eingesetzten Messmikrofone (1/2“, Klasse 1) haben eine untere Grenzfrequenz bei etwa 3 Hz, unterschreiten also den Messbereich der DIN 45680 noch mehr als eine Oktave. Mit 1“-Mikrophonen oder speziellen Infraschallmessmikrofonkapseln kann Schall bis zu ca. 0,5 Hz hinunter erfasst werden, und die in den Messsystemen eingesetzte Signalverarbeitung kann in der Regel Komponenten beliebig tiefer Frequenzen verarbeiten. Dennoch wurde in der Diskussion um die Überarbeitung der DIN 45680 auf eine grundsätzliche Erweiterung des Frequenzbereiches zu tieferen Frequenzen hin verzichtet, da damit schwierige Probleme verbunden sind (z. B. Einfluss von Fremdgeräuschen, Einschränkung der Dynamik, aufwändige Kalibrierung und trotzdem eine höhere Messunsicherheit). Über eine Erweiterung zu tieferen Frequenzen wäre dennoch in speziellen Fällen nachzudenken. So zeigen beispielsweise die Spektren der Geräusche von Windenergieanlagen im Bereich von 1 Hz bis 8 Hz häufig ausgeprägte harmonische Anteile, die sich damit von zum Beispiel windinduzierten Geräuschen deutlich absetzen. Dies könnte bei der Identifizierung von Quellen weiterhelfen.

Zunächst soll die aktuelle Beurteilungssystematik und die Normen zum Infraschall in Deutschland sowie wichtige internationale Normen zum Infraschall (ISO 7196:1995 Acoustics – Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements [59]) dargestellt werden. Anschließend werden prinzipielle Gedanken zu Messverfahren aufgeführt und es folgen Forschungsdefizite und ein Ausblick.

9.3 Beurteilungssystematik und Normen zum Infraschall

Die Bewertung und Beurteilung von ausgeprägt tieffrequenten Geräuschen, definiert als Frequenzbereich zwischen 10 und 80 Hz bzw. 8 bis 100 Hz im erweiterten Bereich, erfolgt derzeit in Deutschland nach TA Lärm in Verbindung mit DIN 45680. Die darin festgelegte Beurteilungssystematik wird entsprechend der Auswertung der Beschwerdesituation in der Verwaltungspraxis in der Regel zweistufig gehandhabt:

In der ersten Stufe erfolgt eine grundsätzliche Einschätzung gemäß Ziffer 7.3 der TA Lärm, inwieweit von einem Geräusch, das vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich unter 90 Hz aufweist, schädliche Umwelteinwirkungen ausgehen. Als Kriterium für eine weitergehende Prüfung auf schädliche Umwelteinwirkungen wird in der TA Lärm die Differenz der Pegelgrößen $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ von mehr als 20 dB innerhalb von geschlossenen schutzbedürftigen Räumen i. S. der DIN 4109 definiert (sog. 20dB-Kriterium). Wird das 20dB-Kriterium nicht überschritten, so wird der Beschwerdefall ohne weitere Untersuchungen mit einem negativen Befund abgeschlossen, eine weitergehende Untersuchung erfolgt dann nicht mehr.

Im zweiten Schritt erfolgt - sofern das 20dB-Kriterium überschritten wurde - gemäß Anhang A.1.5 der TA Lärm die Anwendung der DIN 45680. Schädliche Umwelteinwirkungen sind demnach nicht zu erwarten, sofern die Anhaltswerte des Beiblattes 1 der DIN 45680 i. d. F. vom September 1997 nicht überschritten werden. Nach DIN 45680 erfolgt die Beurteilung auf Grundlage von Messungen innerhalb von geschlossenen schutzbedürftigen Räumen i. S. der DIN 4109.

Aus der derzeit in Deutschland festgelegten Beurteilungssystematik für tieffrequente Geräusche können verschiedene Rückschlüsse gezogen werden:

1. Die Beurteilung tieffrequenter Geräusche nach DIN 45680 erfasst den Bereich des Infraschalls von 8 Hz bis 20 Hz (Terzmittenfrequenzen). Der Infraschallbereich unterhalb von 8 Hz kann derzeit nicht adäquat beurteilt werden.

2. Die Beurteilung erfolgt derzeit auf Grundlage von akustischen Messungen innerhalb von geschlossenen schutzbedürftigen Räumen i. S. der DIN 4109. Mit diesem Verfahren können somit ausschließlich Bestandssituationen festgestellt und beurteilt werden, ein genormtes oder anderweitig festgelegtes Prognoseverfahren für Neuplanungen existiert nicht.
3. Akustische Messungen innerhalb von geschlossenen Räumen werden im Bereich tieffrequenter Geräusche und Infraschall in besonders hohem Maße durch die spezifischen Eigenarten des Immissionsortes beeinflusst. Dies sind zum Beispiel das Schalldämm-Maß der Außenbauteile, raumakustische Randbedingungen (Nachhallzeit, Raummoden usw.) oder Sekundäreffekte (Körperschallabstrahlungen u. Ä.).

Im Fall von genehmigungsbedürftigen Anlagen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) muss das Ausmaß tieffrequenter Geräusche im Rahmen des Genehmigungsverfahrens bzw. der Überwachungen eingeschätzt und beurteilt werden. Da bei tieffrequenten Geräuschen der Immissionsort einen erheblichen Einfluss auf die Beurteilung der Geräuschbelastung hat, sind in der Praxis häufig pauschalierende Annahmen für die Dämmwirkung notwendig, die zu Fehleinschätzungen der tatsächlichen Betroffenheitssituation in benachbarten Wohnnutzungen führen können. Im Fall von nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen (z. B. haustechnische Anlagen, Wärmepumpen, Klima- und Lüftungsgeräte) erfolgt in der Praxis bislang meist ausschließlich eine überschlägige Überprüfung der Geräuschsituation anhand von Tabellenwerten (A-bewerteter Schallleistungspegel L_{WA} bzw. mit dem linearen Terzbandpegel bei 250 Hz, Abstandsmaß). Somit wird bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen bisher die tieffrequente Geräuschsituation üblicherweise erstmalig im Rahmen von Lärmbeschwerden nach der Inbetriebnahme überprüft. Zu diesem Zeitpunkt sind nachträgliche Maßnahmen zur Minderung der tieffrequenten Geräusche meist deutlich aufwändiger als dies bei der Neuplanung derartiger Anlagen der Fall wäre.

Selbst wenn nachweislich die Anhaltswerte der DIN 45680 i. d. F. vom September 1997 eingehalten werden, wird in vielen Fällen seitens der Betroffenen beanstandet, dass dieses Schutzniveau bei der Einwirkung tieffrequenter Geräusche nicht immer ausreiche. Mit dem Entwurf der DIN 45680 i. d. F. vom August 2011 soll eine weitergehende Bewertung erfolgen, so dass diesem Umstand auch mit der aktuellen Entwicklung der Normung Rechnung getragen wird.

Die gerade abgeschlossene Erarbeitung eines Vorschlags zur Neufassung der DIN 45680 vom September 2013 weist einen Weg, wie Inkonsistenzen im tieffrequenten Bereiche behoben werden können. Die in der noch geltenden Fassung bestehende Unterscheidung zwischen tonalen und atonalen Geräuschen ergab nicht selten, dass geringste Pegelunterschiede darüber entschieden, ob nach Definition die eine oder andere Situation vorlag, wobei aber die Anhaltswerte, die in beiden Situationen zum Ansatz gebracht werden, bei deutlich unterschiedlichen Pegelwerten erreicht werden. Deshalb setzt der Vorschlag des aktuellen Normentwurfs der DIN 45680 auf dem der Lautheit zugrunde liegenden Mechanismus der Flankenerregung auf, der die erhöhte Lästigkeit eines tonalen Geräusches ohne Fallunterscheidung integrativ berücksichtigt. Somit sollen Regelwerke stärker auf die Erkenntnisse der Psychoakustik eingehen und sie als Grundlage für ein durchgängig stimmiges Regelwerk berücksichtigen. Damit soll unter anderem verhindert werden, dass es an Frequenzbereichsgrenzen (Infraschall, tieffrequenter Schall, sonstiger Schall) zu wenig nachvollziehbaren Unstetigkeiten in der Beurteilung kommt.

Die derzeit geplante Änderung der 32. BImSchV [35] versucht den Konflikten durch im Freien motorbetriebene Geräte und Maschinen innerhalb von Wohngebieten zu begegnen, in dem

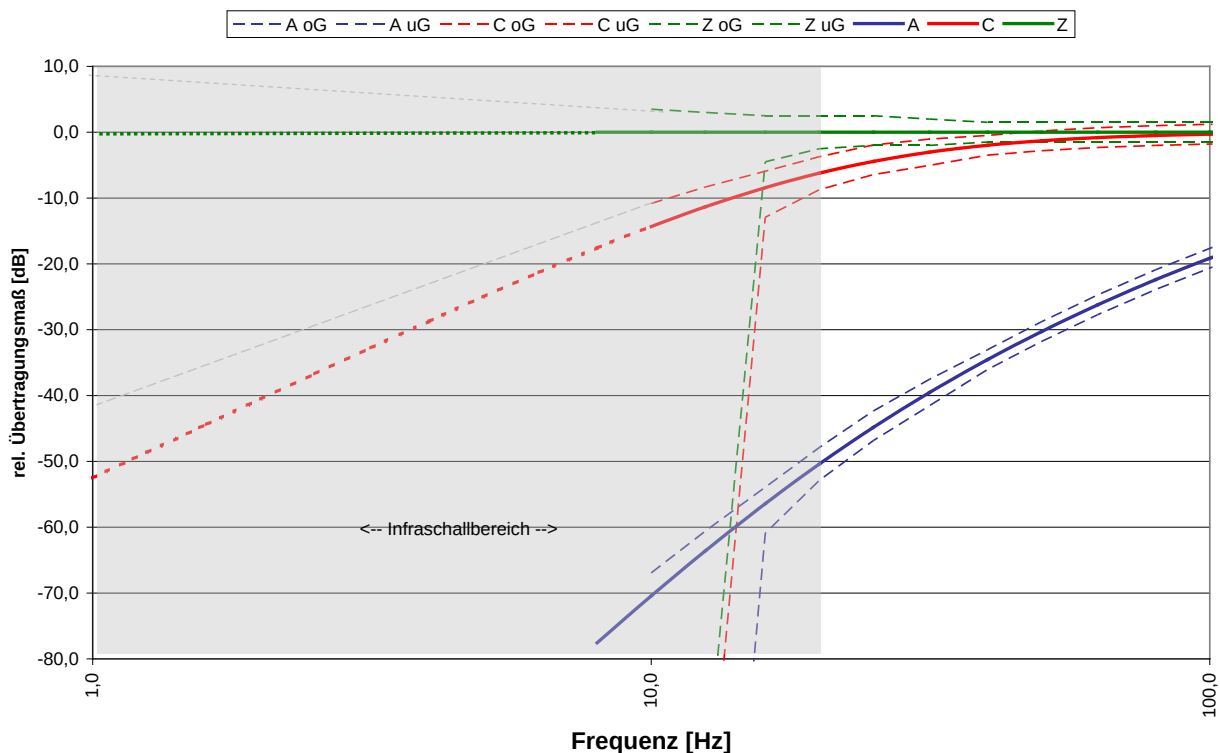
bereits auf die Anwendung der Beurteilungssystematik des aktuellen Entwurfs der DIN 45680 verwiesen wird. Im § 11 (2) des Verordnungsentwurfs [35] wird zudem beim Betrieb von Klein-Kraftwärmekopplungs-Anlagen, bei dem Betrieb als gebäudetechnische Einrichtungen in Wohngebieten, eine Prüfung des C-bewerteten Schalldruckpegels $L_{pC,1m,max}$ gefordert.

Dennoch ist zu erwarten, dass auch bei Anwendung eines strengeren Regelwerkes nicht alle Nutzungskonflikte durch tieffrequente Geräusche und Infraschall gelöst werden können, da die Konfliktbewältigung eine ganzheitliche Beurteilung, die Festlegung von Grenzwerten sowie standardisierte und genormte Prognoseverfahren für die Neuplanung erfordert.

9.4 Messverfahren zum Infraschall

Derzeit ist es in Deutschland gängige Praxis tieffrequente Geräusche und Infraschall nach DIN 45680 zu ermitteln und zu beurteilen. Im Hinblick auf den Frequenzbereich ergibt sich aus dem Entwurf der überarbeiteten DIN 45680 keine Änderung, so dass auch zukünftig Infraschalleinwirkungen unter 8 Hz praktisch nicht beurteilt werden. Aus Sicht von Betroffenen von tieffrequenten Geräuscheinwirkungen/ Infraschall wird diese unvollständige Beurteilung häufig als unzulänglich kritisiert. Insofern erscheint die Ermittlung und Darstellung der Geräuschimmissionen im messbaren Bereich von 0,5 bis 8 Hz sinnvoll, auch wenn für diese Immissionen keine eigenen Richt- oder Anhaltswerte existieren. Die üblichen Klasse 1 (eichfähige) Schallpegelmessgeräte weisen nach DIN EN 61672-1 [29] bei einer Nennfrequenz von 10 Hz bereits eine Grenzabweichung von + 3,5 dB bis - ∞ auf (s. Abbildung 26).

Abbildung 26: Frequenzbewertungskurven A, C und Z mit Grenzabweichungen nach Tabelle 2 der DIN EN 61672-1:2003 im Bereich unter 100 Hz (oG = obere Grenzabweichung, uG = untere Grenzabweichung)

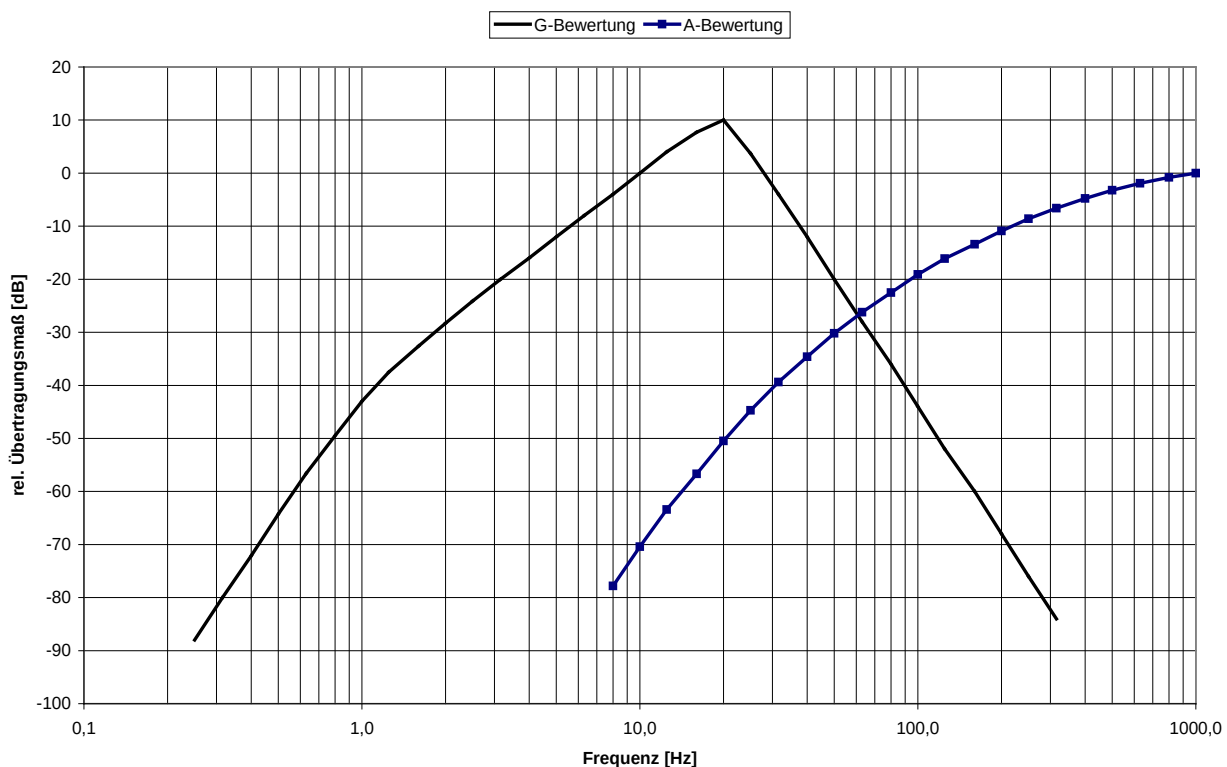


Bei einer linearen Extrapolation der Grenzabweichungen ist von einer Fehlergrenze des Schallpegelmessgerätes von bis zu ca. +10 dB bei 1 Hz (Terzmittenfrequenz) auszugehen. Diese Fehlergrenze erscheint zunächst groß, im Vergleich zu den Pegelminderungen der A- und C-

Bewertung in diesem Frequenzbereich ist jedoch trotz dieser Abweichung eine grundsätzliche Bewertung eines relevanten Infraschallanteils möglich.

Neben den in Deutschland für Schallpegelmesser genormten Frequenzfiltern für Schallpegel existiert die international genormte G-Bewertung [59]. Die G-Bewertung ist so definiert, dass die Geräusche bei 10 Hz mit einem relativen Übertragungsmaß von 0 dB und bei 20 Hz mit der maximalen Gewichtung von +10 dB bewertet werden. Aufgrund dieser Definition ist die G-Bewertung im Gegensatz zu den verbreiteten Bewertungsfiltern (A-, C- und Z-Bewertung, vgl. Abbildung 27) ausschließlich für den tieffrequenten Geräuschbereich von 0,25 bis 315 Hz relevant, der Bereich des Hörschalls wird mit zunehmender Frequenz (Abnahme 24 dB/Oktav) stark beschnitten. Folgende Abbildung 27 zeigt einen Vergleich der G-Bewertung mit der A-Bewertung im Frequenzbereich unter 1.000 Hz. Die in Deutschland gängigen Anhalts-, Richt- und Grenzwerte werden mit der Frequenzbewertung A zwischen 20 Hz und 20 kHz gewichtet.

Abbildung 27: Frequenzbewertungskurven G nach ISO 7196:1995(E) und A, Ausschnitt bis 1.000 Hz

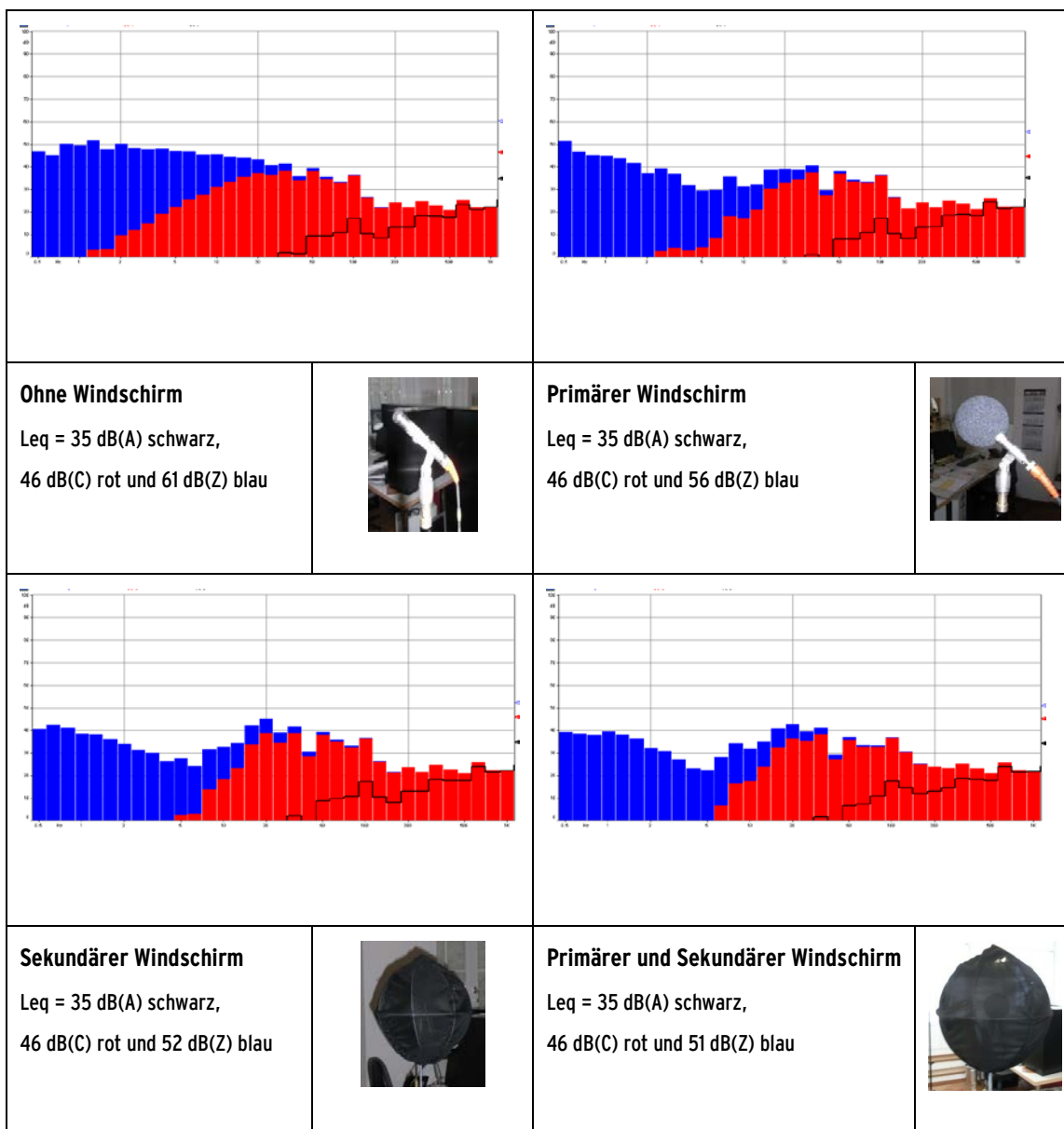


Es ist ersichtlich, dass der Hörschallbereich bei der G-Bewertung kaum berücksichtigt wird. Da es für G-bewertete Schalldruckpegel derzeit keine konkreten Richt- oder Grenzwerte gibt - Infraschall im Bereich von 90 bis 100 dB(G) gilt im Allgemeinen als wahrnehmbar - ist die G-Bewertung in der Praxis wenig gebräuchlich. Für die Bewertung tieffrequenter Geräusche hat sich ein terzbandselektiver Vergleich von unbewerteten Schalldruckpegeln mit der Hörschwelle bzw. der Wahrnehmbarkeitsschwelle etabliert. Für weitere Untersuchungen kann zum Beispiel im Rahmen des Klassifizierungssystems der G-bewertete Schallpegel als Einzelwert zur Beschreibung des Infraschallanteils einer Quelle herangezogen werden. Dieser hat lediglich informativen Charakter, aufgrund der komplexen Wirkmechanismen von Infraschall und tieffrequenten Geräuschen bedeutet bei Schallereignissen ein höherer dB(G)-Pegel nicht auch eine größere Wahrnehmbarkeit bzw. Lästigkeit der Einwirkungen. Diese Folgerung könnte nur für überwiegend isoliert von Hörschallen auftretende Infraschallereignisse zutreffen, die bei technischen Geräuschquellen praktisch kaum vorkommen.

Problematisch im Bezug zu den Messverfahren des Infraschalls sind weiterhin windinduzierte Geräusche, da Luftdruckschwankungen vom Sensor als Infraschall detektiert werden. Außerhalb von Gebäuden ist zum einen eine erhöhte Unsicherheit durch Windanregungen zu berücksichtigen, zum anderen ist eine Prognose der Außenpegel auf den geschlossenen Innenraum in der Regel nicht möglich. Die Gründe hierfür liegen insbesondere in unzureichenden Erkenntnissen über die Schalldämmung bei Frequenzen unter 100 Hz, Resonanzeffekten sowie raumakustische Effekte und Schwingungsanregungen.

In der Praxis sollten Infraschallmessungen auch im Innenraum mit Windschirmung durchgeführt werden, um den Einfluss strömungsinduzierter Anregungen des Sensors zu minimieren (vgl. Ebner et. al (2013) [32]). Abbildung 28 zeigt die Auswirkung verschiedener Windschirmkonfigurationen bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von $0,2 \pm 0,05$ m/s am Mikrofon bei einer Versuchsmessung im Innenraum.

Abbildung 28: Auswirkung von verschiedenen Windschirmen bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 0,2 m/s innerhalb eines Rotationsdruckfeldes, Mittelungszeit 60s



Aus der exemplarischen Darstellung für eine Versuchskonfiguration ist ersichtlich, dass der Infraschallbereich von unter 20 Hz besonders empfindlich auf strömungsinduzierte Anregungen reagiert. Bereits bei den geringen Windgeschwindigkeiten ändern sich der A- und der C-bewertete Summenschalldruckpegel nicht relevant, wohingegen der lineare Schalldruckpegel (dB(Z)) erheblich (10 dB) beeinflusst wird. Daraus folgt, dass Messungen bei höheren Windgeschwindigkeiten auch deutlich höhere Schwankungen im Infraschallbereich erwarten lassen. Zudem ist das Kriterium $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ bei isolierter Infraschallanregung nicht grundsätzlich geeignet, um besonders tieffrequente Geräusche vollständig zu detektieren: In allen vier Spektren von Abbildung 28 beträgt die Differenz $L_{Ceq} - L_{Aeq} = 11$ dB.

Daraus lässt sich folgende Erkenntnis ableiten: Falls die dargestellten Spektren bei der Überwachung einer Anlage tatsächlich als Geräusche gemessen worden wären, d.h. das Spektrum oben links bei eingeschalteter Anlage (Infraschallquelle) und die übrigen Spektren bei abgeschalteter Anlage erhoben worden wären, wäre aus den bisherigen Regelwerken kein Hinweis auf besonders tieffrequente Geräusche oder Infraschall erkennbar gewesen. Der Grund hierfür liegt darin, dass die gemessenen Infraschallanteile durch die Bedingung von Ziffer 7.3 der TA Lärm nicht erkannt werden. In diesem Fall wäre somit die Betrachtung von A- und C-bewerteten Pegeln alleine nicht aussagekräftig. Um den nennenswerten Infraschallanteil im Summenschallpegel detektieren zu können, wäre neben der Anwendung einer speziellen Bewertungskurve (G-Bewertung) auch die Betrachtung anhand der Pegelgröße L_{Zeq} (im gemessenen Frequenzbereich 0,5 Hz bis 20 kHz) in die Bewertung einzubeziehen: Neben dem tieffrequenten Anteil aus dem Verhältnis $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ wäre zum Beispiel das Verhältnis $L_{Zeq} - L_{Ceq}$ als Indikator sowie eine aus diesen beiden Differenzen gebildete Pegelverhältnisgröße notwendig. Hierzu besteht ein weiterer Untersuchungsbedarf.

Zusammenfassend soll das Beispiel auch zeigen, dass neben den bekannten Unsicherheiten bei der Messung von tieffrequenten Geräuschen und Infraschall, wie zum Beispiel die Feststellung des Ortes der größten Betroffenheit im Aufenthaltsraum, die Messung von Vibrationen und Sekundäreffekten, weitere Unsicherheiten bestehen. Diese sollten berücksichtigt werden, um solide Ergebnisse zu erhalten.

9.5 Prognoseverfahren zum Infraschall

Ein genormtes Prognoseverfahren existiert derzeit in Deutschland nicht. Dies gilt nicht nur für den Infraschallbereich, der bei Prognosen bislang in der Regel nicht behandelt wird, sondern auch für ausgeprägt tieffrequente und tonal tieffrequente Geräusche, die derzeit nach dem Beiblatt 1 der DIN 45680 beurteilt werden. Die einschlägigen Verfahren zur Schallausbreitung im Freien (zum Beispiel DIN EN ISO 9613) zielen letztendlich auf A-bewertete Summenschallpegel ab, bei denen ausgeprägt tieffrequente Geräuschanteile keine Rolle spielen. Deshalb ist die 63 Hz-Oktave in der Regel die niedrigste Frequenz, die bei der Schallausbreitung im Freien berücksichtigt wird, so dass bis 50 Hz (Terzmittenfrequenz) genormte Verfahren zur Schallprognose im Freien vorliegen. Neben einer Prognose der tieffrequenten Anteile der spektralen Außenlärmpegel im Freien fehlt bislang ein Übertragungsmaß der Außenlärmpegel in den Innenraum. Verschiedene Veröffentlichungen (vgl. BMWi (2007) [20]) treffen Annahmen für das Übertragungsmaß.

Wie die Auswertung der Literatur gezeigt hat, treten bei der Prognose der Schallverhältnisse bei tieffrequenten Geräuschen und Infraschall zusätzliche, derzeit ungelöste Probleme im Hinblick auf ein geeignetes Quellenmodell für die Emission und den Abstandseinfluss auf. Daher können im Rahmen von Planungen Fehlprognosen auftreten.

Pauschale Ansätze, die die Situation mit dem Ziel einer Konfliktbewältigung einseitig überschätzen, wie zum Beispiel die Festlegung von Mindestabständen, erscheinen ohne wissenschaftlich abgesicherte Grundlagen über die Auswirkungen der Quellen nicht sachgerecht. Auf der anderen Seite kann das Fehlen von Standards, wie einem genormten Prognoseverfahren, in der Praxis zu einer Unterschätzung der Gegebenheiten und der Neuplanung von Konflikten führen. Insofern erscheint für die Konfliktbewältigung eine ganzheitliche Betrachtung, die Festlegung von Grenzwerten sowie standardisierte und genormte Prognoseverfahren notwendig.

9.6 Bewertung und Ausblick

Das Ziel, die Abschätzung einer Belästigung aus den Messwerten praxistauglich zu gestalten, kann mit dem Einbezug weiterer psychoakustischer Größen verbessert werden. Vielfach wird von Betroffenen die (relativ langsame) Modulation des Geräusches als ein sehr störendes Merkmal aufgeführt. Eine psychoakustische Größe, mit der dies beispielsweise zu erfassen wäre, ist die Schwankungsstärke. Bisher wird dieses Merkmal in Deutschland entweder gar nicht oder wie in manchen Staaten lediglich durch Hilfskonstruktionen wie zum Beispiel durch Perzentildifferenzen von Schalldruckpegeln berücksichtigt.

Die Erkenntnisse der Psychoakustik können das Verständnis für physiologische Vorgänge vertiefen. Gerade in diesem Bereich sind in den letzten zehn Jahren erhebliche Fortschritte erzielt worden. Daraus lassen sich möglicherweise Erklärungen ableiten, wie verschiedene Sinneswahrnehmungen (hier vornehmlich Schall und Vibration) interagieren und sich gegenseitig verstärken können. In zukünftigen Befragungen und korrespondierenden Messungen sollte dies auf jeden Fall ein Punkt sein, der zu überprüfen ist.

Es darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die gewonnen Erkenntnisse in ein Regelwerk einfließen sollen, das nicht beliebig komplex werden darf. Aufgrund der Erkenntnisse aus der Behördenabfrage wird teilweise bereits die Anwendung der speziellen Regelungen der DIN 45680 als aufwändig im behördlichen Vollzug erachtet. Andererseits ist fast schon in jedem Handschallpegelmesser ein Computer integriert. Deshalb sollte der Rahmen, welche Information aus welchen Messwerten für eine Prognose und Abschätzung der Belästigung herangezogen und wie diese verarbeitet werden, zunächst nicht zu eng gezogen werden.

Es ist aber davon auszugehen, dass höhere Frequenzanteile der Geräusche zu den bekannten Belästigungen führen. Die Annahme stützt sich darauf, dass die Spektren zu höheren Frequenzen (zweistelliger Hertzbereich) in der Regel weniger steil abfallen als die Hörschwelle, sodass es in diesem Bereich häufiger zu einer Überschreitung der Hörschwelle kommen kann. Auch wenn zunächst hilfsweise die Hörschwelle als Maßstab herangezogen wird, bleiben noch Fragen. Die den Standards zugrunde gelegte Hörschwelle beruht auf Messungen mit einzelnen Sinustönen. Es kann aber gezeigt werden, dass komplexe Geräusche auch schon dann wahrnehmbar sind, wenn die einzelnen Komponenten unterhalb der Hörschwelle liegen (J. Ryu et al.: Hearing thresholds for low-frequency complex tones of less than 150 Hz, JLFNVAC, 2011). Eine weitere Diskrepanz besteht darin, dass die tieffrequenten Geräusche häufig in der Amplitude stark schwanken und damit Adaptionsvorgänge im Gehör auslösen, die ebenfalls zu einer erhöhten Wahrnehmung führen. Über dies hinaus scheinen die tieffrequenten Schalle und der Infraschall bei längerer Exposition bei den Betroffenen zu einer erhöhten Wahrnehmung zu führen.

Eine weitere offene Frage ist, weshalb die Betroffenen in der Regel stark mental beeinträchtigt sind. Ähnliche Beobachtungen sind bei anderen Lärmeinwirkungen nicht zu machen. Ob ein direkter Einfluss auf Hirnfunktionen besteht und dieser deshalb besteht, weil die

Hirnaktivitäten den gleichen Frequenzbereich belegen, bleibt zunächst eine noch nicht belegte Hypothese. Die Vorstellung, dass dies so sein könnte, verstärkt die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen in dieser Richtung. Messungen des EEGs der Betroffenen könnten hier weiteren Aufschluss geben. Sie können möglicherweise auch darüber Aufschluss geben, weshalb tendenziell nur ein vermutlich geringer Teil der Bevölkerung sehr empfindlich ist. Es sollte eine Hauptaufgabe einer erweiterten Untersuchung sein, diesen vielfach gemachten Beobachtungen auf den Grund zu gehen.

Im Rahmen der Überarbeitung der DIN 45680 wurde auf die Erweiterung des Frequenzbereiches zu tieferen Frequenzen hin verzichtet, so dass der Infraschallbereich unter 8 Hz (Terzmittenfrequenz) derzeit nicht eigens beurteilt werden kann. Eine Erweiterung zu tieferen Frequenzen sollte für die Identifizierung von Quellen sowie für weitere Grundlagenuntersuchungen vorgenommen werden. Es ist zu erwarten, dass auch bei Anwendung eines strengeren Regelwerkes nicht alle Nutzungskonflikte durch tieffrequente Geräusche und Infraschall gelöst werden können.

10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ziel der vorliegenden Machbarkeitsstudie ist es, die in der Öffentlichkeit zunehmend thematisierte Immissionsbelastung durch Infraschall und tieffrequente Geräusche wissenschaftlich aufzubereiten und damit eine Grundlage für weitergehende Untersuchungen zu schaffen. Ausgehend von den Ergebnissen einer umfangreichen Literatur- und Internetrecherche wurde ein Konzept zur systematischen Erfassung von infraschallrelevanten Geräuschquellen in Form eines Erhebungs- und Klassifizierungsbogens erarbeitet. Da neben der Pegelhöhe noch weitere Kenngrößen für die Lästigkeit verantwortlich sind, wurde eine mehrdimensionale Beurteilungsgrundlage mit Klassifizierungsmerkmalen entwickelt.

Im Rahmen der Betroffenheitsanalyse konnten keine regionalen Schwerpunkte mit einer statistisch hinreichenden Sicherheit gefunden werden. Am meisten führten Anlagen der Energieerzeugung und des Energietransportes sowie raumluftechnische Anlagen zu Beschwerden über Infraschall und tieffrequente Geräusche. Als häufigste Quellenart für Beschwerden wurden Wärmepumpen mit einem Gesamtanteil von 9,3 % genannt. Für etwa jede zehnte Beschwerde war keine Ursache bekannt. Praktisch relevante Quellen sind Wärmepumpen, Biogasanlagen, Blockheizkraftwerke, Windenergieanlagen, Kälte- und Klimaanlage, Lüftungen und Gebäudeheizungen sowie Pressen/Stanzen aus der Gruppe der Produktionsstätten.

Aus dem Rücklauf der Abfrage der Immissionsschutzbehörden zeigte sich ein Bedarf nach einer systematischen Erhebung und Archivierung von Messdaten sowie nach einem einheitlichen Beschwerdekataster.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein mögliches Studiendesign ausgearbeitet, das insbesondere auf die Erforschung der Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen ausgelegt wurde. Dabei sollten Anlagen mit einer hohen Anzahl von Betroffenen gewählt werden, wie zum Beispiel Blockheizkraftwerke, Windenergieanlagen und Pressen/Stanzen von Produktionsbetrieben. Zur praktischen Konfliktvermeidung und Verbesserung der Wohnqualität im Hinblick auf Infraschall und tieffrequente Geräusche wären vorrangig Forschungen zur Lärmbelastung und Lärmbelästigung über Wärmepumpen, Kälte- und Klimaanlage, Lüftungs- und Heizungsanlagen im Wohnungsumfeld geeignet. Darüber hinaus werden Empfehlungen für weiteren Forschungsbedarf gegeben; insbesondere sind geeignete Messmethoden, Prognoseverfahren und die Festlegung von Zumutbarkeitsgrenzen zu untersuchen.

Die Bewertung und Beurteilung von ausgeprägt tieffrequenten Geräuschen und zum Teil Infraschall erfolgt derzeit in Deutschland nach TA Lärm in Verbindung mit DIN 45680. Im Rahmen der Überarbeitung der DIN 45680 wurde auf die Erweiterung des Frequenzbereiches zu tieferen Frequenzen hin verzichtet, so dass der Infraschallbereich unter 8 Hz derzeit nicht beurteilt werden kann. Es ist zu erwarten, dass auch bei Anwendung eines strengeren Regelwerkes nicht alle Nutzungskonflikte durch tieffrequente Geräusche und Infraschall gelöst werden können, da die Konfliktbewältigung eine ganzheitliche Beurteilung, die Festlegung von Grenzwerten sowie standardisierte und genormte Prognoseverfahren erfordert. Pauschale Ansätze, die eine Prognosesituation mit dem Ziel einer Konfliktbewältigung einseitig überschätzen, wie zum Beispiel die Festlegung von Mindestabständen, erscheinen ohne fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse über die Wirkmechanismen der Geräuschquellen nicht sachgerecht.

11 Quellenverzeichnis

- [1] Achtzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Sportanlagenlärmschutzverordnung) vom 18. Juli 1991 (BGBl. I S. 1588, 1790), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 9. Februar 2006 (BGBl. I S. 324) geändert worden ist
- [2] Andresen, J., Møller, H. (1984). Equal annoyance contours for low frequency noise. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, (3), 1-9
- [3] Babisch, W. (2000). Gesundheitliche Wirkungen von Umweltlärm. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 47(3), 95-102.
- [4] Bakker, H.H.C., Rapley, B.I. (2011). Problems measuring low frequency sound levels near wind farms. *Proceedings of Acoustics 2011*
- [5] Baron R.M., Kenny D.A. (1986). The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of Personality and Social Psychology* 51, 1173-1182.
- [6] Bassarab, R., Sharp, B., Brandon, R. (2009). An Updated Catalog of 628 Social Surveys of Residents' Reaction to Environmental Noise (1943-2008). Wyle Report 09-18. Arlington, VA: Wyle Laboratories, Inc.
- [7] Bengtsson, J. (2003). Low frequency noise during work effects on performance and annoyance. Dissertation, Universität Göteborg
- [8] Bengtsson, J. (2004). Is a pleasant low frequency noise also less annoying. *Journal of Sound and Vibration*, (227), 535-537
- [9] Bengtsson, J., Persson Waye, K., Kjellberg, A. (2004). Sound Characteristics in Low Frequency Noise and their Relevance for the Perception of Pleasantness. *Acta Acoustica united with Acoustica*, (90), 171-180
- [10] Borgmann, R. (2005). Leitfaden -Nichtionisierende Strahlung - Infraschall. Fachverband für Strahlenschutz, FS-05-136-AKNIR
- [11] Bortz, J. Döring, N. (2009). *Forschungsmethoden und Evaluation* (4. Auflage). Heidelberg: Springer.
- [12] Bowdler, D. (2008). Amplitude modulation of wind turbine noise - a review of the evidence. *Institute of Acoustics, Bulletin* 33(4), 1-9
- [13] Branco, C. (1999). The clinical stages of vibroacoustic disease. *Aviation, space, and environmental medicine*, (70), 32-39
- [14] Broner, N. (1978). The effects of low frequency noise on people. *Journal of Sound and Vibration*, (58), 483-500
- [15] Broner, N., Leventhall, H.G. (1982). A criterion for predicting the annoyance due to higher level low frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, (84), 433-448

- [16] Broner, N., Leventhall, H.G. (1984). The annoyance, loudness and unacceptability of lower level low frequency noise. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, (3), 154-166
- [17] Broner, N., Leventhall, H.G. (1985). Annoyance loudness and unacceptability of higher level low frequency noise. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, (4), 1-11
- [18] Broner, N., Leventhall, H G. (1983). Low frequency noise annoyance assessment by Low Frequency Noise Rating Curves. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, (2), 20-28
- [19] Bullinger, M., Kirchberger, I. (1998). SF-36 Fragebogen zum Gesundheitszustand—Manual; Hogrefe: Göttingen.
- [20] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2007), Forschungsverbund „Leiser Verkehr“ Bereich 2000 „Lärmwirkung“
- [21] Buysse D.J., Reynolds III C.F., Monk T.H., Berman S.R., Kupfer D.J.. The Pittsburgh Sleep Quality Index: A new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Research* 1989, 28: 193-213.
- [22] Daly, D.D., Barry, M.J. (1957). Musicogenic Epilepsy. *Psychomatic Medicine*, XIX(5), 399-408
- [23] Danielsson, A., Landstrom, U. (1985). Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. *Acta Med. Scand.* 217, (1985) 531-535
- [24] Danish Energy Authority (2010). Low Frequency Noise from Large Wind Turbines. EFP-06 Project, AV 1272/10, Project-No. A401929
- [25] The Telegraph (2012), “An ill wind blows for Denmark´s green energy revolution, <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/europe/denmark/7996606/An-ill-wind-blows-for-Denmarks-green-energy-revolution.html>
- [26] Di, G., Li, Z., Zhang, B., Shi, Y. (2011). Adjustment on subjective annoyance of low frequency noise by adding additional sound. *Journal of Sound and Vibration*, (330), 5707-5715
- [27] DIN 45680 und Beiblatt 1. Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschemissionen in der Nachbarschaft - Hinweise zur Beurteilung von gewerblichen Anlagen. März 1997
- [28] DIN 45680_2011-05-09-Mauskript für Norm-Entwurf, NA001 Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, NA 001-01-02-11 AK, Arbeitskreis Überarbeitung von DIN 45680, 05.09.2011
- [29] DIN EN 61672-1. Elektroakustik - Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen. Oktober 2003
- [30] Doroshenko, P. N., Stepchuk, I. D. (1983). Health related assessment of combined effect of infrasound and low-frequency noise on the acoustic and vestibular analyser of compressor operators. *Noise Vibration Bull.* (1983), 192-194, Transl.: Gig. Tr. Prof. Zabolev (1983), 35-38

- [31] Ears Project, European Metrology Research Programm, <http://www.ptb.de/emrp/ears-home.html>
- [32] Ebner, F., Eulitz, C., Möhler, U. (2013). Approaches for a comprehensive determination and assessment of infrasound effects in Germany, AIA-DAGA 2013, Meran
- [33] Eggermont, J.J., Zeng, F.-G., Popper, A.N., Fay, R.R. (2012). Tinnitus, Springer Verlag , (engl.)
- [34] Ellert, U., Lampert, T., Ravens-Sieberer, U. (2005). Messung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität mit dem SF-8. Eine Normstichprobe für Deutschland. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz, H. 12, 1330–1337.
- [35] Entwurf der Verordnung zur Änderung der Geräte- und Maschinenlärmschutzverordnung (32. BImSchV), Referat IG I 7, Bonn, 31.05.2013
- [36] Evans, M.J., Tempest, W. (1972). Some effects of infrasonic noise in transportation. Journal of Sound and Vibration, 22 (1972), 19-24
- [37] Faustov, A., Fraiman, B., Bosova, L. „The phase features of man and animal reaction to infrasound effect“ In: Noise as a public health problem: Proceedings of the 6th international Congress “Noise and Man ‘93”, Nice, 5-9 Juillet 1993.-Arcueil: INRETS Vol. 2 -1993, 265-268
- [38] Fidell, S., Horonjeff, R.D., Schmitz, F.H. (2010). Research plans for improving understanding of effects of very low-frequency noise of heavy lift rotorcraft. NASA report NASA/CR-2010-216203. Hanover, MD/USA: NASA Center for AeroSpace Information.
- [39] Fields, J.M. & Powell, C. A. (1985). A community survey of helicopter noise annoyance conducted under controlled noise exposure conditions (NASA Technical Memorandum 86400). USA, Virginia, Hampton: National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center
- [40] Fields, J.M. (1993). Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. Journal of the Acoustical Society of America 93(5), 2753-2763.
- [41] Fields, J.M., DeJong, R.G., Gjestland, T., Flindell, I.H., Job, R.F.S., Kurra, S., Lercher, P., Vallet, M. Guski, R., Felscher-Suhr, U. & Schuemer, R. (2001): Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. Journal of Sound and Vibration, 242(4), 641-679.
- [42] Finke, H.O., Guski, R., Rohrmann, B. (1980). Betroffenheit einer Stadt durch Lärm. Bericht über eine interdisziplinäre Untersuchung. Projekt BSL, Band 1: Gesamtkonzept und Hauptuntersuchung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungsbericht 80-10501301. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
- [43] Follmer, R., Gruschwitz, D., Jesske, B., Quandt, S., Lenz, B., Nobis, C., Köhler, K., Mehlin, M. (2010). Mobilität in Deutschland 2008. Abschlussbericht. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, FE-Nr. 70.801/2006. Bonn, Berlin: infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Verkehrsforschung.

- [44] Gabler, S., Häder, S. (1997). Überlegungen zu einem Stichprobendesign für Deutschland. ZUMA-Nachrichten 41, 7-18.
- [45] Genell, A., Västfjäll, D., Kleiner, M., Anders Hedlund, A. (2006). Components in evaluation of complex interior truck sounds. Journal of low frequency noise, vibration and active control, (25), 227-237
- [46] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnlichen Vorgängen (Bundes-Immissionsschutzgesetz) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 2. Juli 2013 (BGBl. I S. 1943) geändert worden ist.
- [47] Gonzalez, A., Ferrer, M., Diego, M., Piñero, G., Garcia-Bonito, J.J. (2003). Sound quality of low frequency and car engine noises after active noise control, Journal of Sound and Vibration, (265), 663-679
- [48] Guski, R. (1999). Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. Noise & Health 3, 45-56.
- [49] Guski, R. (2002). Status, Tendenzen und Desiderate der Lärmwirkungsforschung zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 49, 219-232
- [50] H. Findeis, Peters E. (2004). Disturbing Effects of low frequency sound immissions and vibrations in residential buildings. Noise and Health, (6), 29-36
- [51] Hassan, R., McManus, K. (2002). Perception of low frequency vibrations by heavy vehicle drivers. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, (21), 65-75
- [52] Hensel, J., Scholz, G., Hurttig, U., Mrowinski, D., Janssen, T. (2007). Impact of infrasound on the human cochlea. Hearing Research, (223), 67-76
- [53] Hoffmeyer, D., Jakobsen, J. (2010). Sound insulation of dwellings at low frequencies. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, (29), 15-23
- [54] Hubbard, H.H., Shepherd, K.P. (1991). Aeroacoustics of large windturbines. Journal of the Acoustical Society of America (JASA), 89(9), 2495-2508
- [55] Immissionsschutz in der Bauleitplanung „Abstände zwischen Industrie- bzw. Gewerbegebieten und Wohngebieten im Rahmen der Bauleitplanung und sonstige für den Immissionsschutz bedeutsame Abstände (Abstandserlass)“ Hrsg. MUNLV Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf Oktober 2007
- [56] International Organization for Standardization (2003). ISO/TS 15666 - Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. Genf.
- [57] Ising H., Markert, B., Shenoda, F. (Mitarb.) „Infraschallwirkungen auf den Menschen“ Institut für Wasser-, Boden-, und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes Berlin. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1982. – „Schriftenreihe Humanisierung des Arbeitslebens; 27
- [58] Ising, H., Wittke, C. „Auswirkungen mehrstündiger Infraschallexposition auf Versuchspersonen“ Forum Städtehygiene 30 (1979) 49-52

- [59] ISO 7196:1995 Acoustics – Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements
- [60] Jakobsen, J. (2005). Infrasound emission from wind turbines. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, (24), 145-155
- [61] Jerger, J., Alford, B., Coats, A., French, B. (1966). Effects of very low frequency tones on auditory thresholds. *J. Speech Hear. Res.* 9 (1966), 150-160
- [62] Jessica Ljungberg, Neely, G., Lundstroem, R. (2004). Effects on spatial skills after exposure to low frequency noise. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*. 23 (2004) 1-6
- [63] Johnson, D. L. „The effects of high level infrasound“ In: *Proceedings of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing* / ed. by Møller, H.; Rubak, P. – Aalborg: Aalborg University Center, 1989, 47-60
- [64] Kaczmarska A., Luczak A. (2007). A Study of Annoyance Caused by Low-Frequency Noise During Mental Work. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)* 2007, Vol. 13, No. 2, 117-125
- [65] Kameier, F., Pohlmann, T., Köhl, M. (2013). Wind turbines – could they be too noisy? AIA-DAGA, Meran 2013
- [66] Karpova, N. I., Alekseev, S. V., Erokhin, V. N., Kadyskina, E. N., Reutov, O. V. “Early response of the organism to low-frequency acoustical oscillations” *Noise Vibration Bull.* 11 (1970), 100-103; rez. nach S.Laurie P266J “Infrasound Toxicological Summary November 2001”
- [67] Keith, S.E., Michaud, D.S., Bly, S.H.P (2008). A proposal for evaluating the potential health effects of wind turbine noise for projects under the Canadian Environmental Assessment Act. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, (27), 253-265
- [68] Krahé, D. (2012). DIN 45680 Fassung 1997 vs. 2011: Fallstudien. DAGA 2012
- [69] Krahé, D. (2008). Warum kann tieffrequenter Lärm außergewöhnlich unangenehm sein?. *Lärmbekämpfung*, (2), 71-77
- [70] Krahé, D. (2013). Low-frequency sound - A special sound. DAGA 2013
- [71] Krahé, D., Borgmann, R. (2012). Entwurf zur Überarbeitung der DIN 45680. DAGA 2012
- [72] Kubicek, R.: Vorkommen, Messung, Wirkung und Bewertung von extrem tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall in der kommunalen Umwelt, Dissertation Zwickau 1989
- [73] Kurakata K., Mizunami, T. (2008). The Statistical Distribution of Normal Hearing Thresholds for Low-Frequency Tones. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, (27), 97-104
- [74] Kurakata, K., Mizunami, T., Sato, H. (2008). Perceptual effects of low frequency beating tones. *Inter-Noise 2008*

- [75] Kyriakides, K., Leventhall H.G. (1977). Some Effects of infrasound on task performance, *Journal of Sound and Vibration*, (50), 369-388
- [76] Landstroem, U., Lundstroem, R., Bystroem, M. (1983). Exposure to infrasound – perception and changes in wakefulness” *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*. 2 (1983), 1-11; rez. nach S.Laurie P266J “Infrasound Toxicological Summary November 2001”
- [77] Landstroem, U., Löfstedt, P., Åkerl E., Kjellbergb, A., Wide, P. (1990). Noise and annoyance in working environments. *Environment International*, (16), 555-559
- [78] Lazarus, R.S., Launier, R. (1978). Stress-related transactions between person and environment. In: L.A. Pervin, M. Lewis (Eds.). *Perspectives in international psychology* (pp. 287-327). New York: Plenum Press.
- [79] Lenzuni, P. (2003). On the low frequency noise assessment method. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, (22), 53-61
- [80] Lercher, P., de Grewe, B., Botteldooren, D., Rüdiss, J. (2008). A comparison of regional noise-annoyance-curves in alpine areas with the European standard curves. *Proceedings of 9th Congress of the International Commission on the Biological Effects of Noise (ICBEN) 2008*, Mashantucket, Connecticut, USA (pp. 562-570). Dortmund: Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund
- [81] Leventhall, H.G. (2004). Low frequency noise and annoyance. *Noise and Health*, (6), 59-72
- [82] Leventhall, H.G. (2003). A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects. Department for Environment, Food and Rural Affairs, Great Britain
- [83] Li, D., Hodgson, M. (2005). Optimal active noise control in large rooms using a “locally global” control strategy. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(6), 3653-3661
- [84] M. Schust. Biologische Wirkung von vorwiegend luftgeleitetem Infraschall. *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*, Dortmund/Berlin 1997
- [85] Maa, D.Y. (1994). Sound field in a room and its active noise control. *Applied Acoustics*, 41(2), 113-126
- [86] Madsen, H. A. (2008). Low frequency noise from MW wind turbines-mechanisms of generation and its modelling. Technical University of Denmark, Report Risø-R-1637(EN)
- [87] Magnusson, L. , Malmquist, N.: *Infraschall am Arbeitsplatz, Vorkommen und Wirkung*, Schweden 1973/74; rez. nach FS-05-136-AKNIR, Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung - Infraschall“
- [88] Miedema, H.M.E., Vos, H. (1999). Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105, 3336-3344.

- [89] Möhler, U., Liepert, M., Schuemer, R., Schuemer-Kohrs, A., Schreckenberger, D., Mehnert, P., Griefahn, B. (2000). Vergleichende Untersuchung über die Lärmwirkung bei Straßen- und Schienenverkehr. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (47). 144-151.
- [90] Mohr, G. C., Cole, J. N., Guild, E., von Gierke, H. E. (1985). Effects of low frequency and infrasonic noises on man. *Aerosp. Med.* 36 (1965), 817-827
- [91] Møller, H. (1987). Annoyance of audible infrasound. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, (6), 1-17
- [92] Møller, H., Lydolf, M. (2002). A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, (21), 53-64
- [93] Møller, H., Pedersen, C.S (2004). Hearing at low and infrasonic frequency
- [94] Møller, H., Pedersen, C.S. (2011). Low-frequency noise from large wind turbines. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), 3727
- [95] Møller, H., Pedersen, S., Persson Waye, K., Pedersen, C.S. (2011). Comments to the article "Sound insulation of dwellings at lowfrequencies". *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*
- [96] Møller, H., Pedersen, S., Staunstrup, J.K., Pedersen, C.S. (2011). Assessment of low-frequency noise from wind turbines in Maastricht. City Council of Maastricht, ISBN 978-87-92328-82-3
- [97] Moorhouse, A.T., Waddington, D., Adams, M. (2009). A procedure for the assessment of low frequency noise complaints. *Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*, 126(3), 1131-1141
- [98] Moorhouse, A.T., Waddington, D., Adams, M. (2005). Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance. *Acoustics Research Centre, Salford University NANR45*
- [99] Moorhouse, A.T., Hayes, M., von Hünerbein, S., Piper, B., Adams, M. (2007). Research into aerodynamic modulation of wind turbine noise- final report. Report by University of Salford, URN 07/1235
- [100] Moorhouse, A.T., Ramadorai, R. (2006). Measurement of the average sound pressure level in a room at low frequency. *Thirteenth International Congress on Sound and Vibration (ISCV13)*
- [101] Moorhouse, A.T., Waddington D., Adams, M. (2007). The effect of fluctuations on the perception of low frequency sound. *Noise and Health*, (6), 37-57
- [102] Mortensen, F.R., Poulsen, T. (2001). Annoyance of low frequency noise and traffic noise. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, (2), 193-196
- [103] Nakashima, A., Abel, S.M., Duncan, M., Smith, D. (2007). Hearing, communication and cognition in low-frequency noise from armoured vehicles. *Noise and Health*, (9), 35-41

- [104] NIEHS (2001). Infrasound - Brief review of toxicological literature. National Institute of Environmental Health Sciences, USA
- [105] Oliva, D. (2012). Questionnaire about Low Frequency Noisemeasurements in rooms. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 31(1), 13-20
- [106] Oliva, D., Hongisto, V., Keränen, J., Koskinen, V. (2011). Measurement of low frequency sound in rooms. *Finnish Institute of Occupational Health*
- [107] Ostendorf, C. (2009). How to find the source of low frequency noise- three case studies. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, (28) 19-35
- [108] Parliament of Australia.(2011). The Social and Economic Impact of Rural Wind Farms. Senate Standing Committees on Community Affairs
- [109] Pawlaczyk-Luszczńska, M., Dudarewicz, A., Waszkowska, M., Szymczak, W., Kamedula, M. Sliwinska-Kowalska, M. (2005). Does Low Frequency Noise at Moderate Levels Influence Human Mental Performance?. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, (24), 25-42
- [110] Pedersen, E., Van den Berg, F., Bakker, R., Bouma, J. (2009). Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(2), 634-643.
- [111] Pedersen, S., Møller, H., Persson Waye, K. (2007). Indoor Measurements of Noise at Low Frequencies - Problems and Solutions. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 26(4), 249-270
- [112] Pedersen, S., Møller, H., Persson Waye, K. (2008). On measuring low-frequency noise indoors, *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2008*, 17-19 August 2008, Reykjavik, Iceland, BNAM 2008
- [113] Pedersen, C.S. (2008). Human hearing at low frequencies with focus on noise complaints. *Dissertation, University of Aalborg, Denmark*
- [114] Persson Waye, K., Rylander, R. (1988). Disturbance from low frequency noise in the environment: A survey among the local environmental health authorities in Sweden. *Journal of Sound and Vibration*. (12), 339-345
- [115] Persson Waye, K. (2011). Effects of Low Frequency Noise and Vibrations - Environmental and Occupational Perspectives. *Encyclopedia of Environmental Health, Elsevier*, 240-253
- [116] Persson Waye, K., Bengtsson J., Agge A., Bjorkman, M. (2003). A descriptive cross - sectional study of annoyance from low frequency noise installations in an urban environment. *Noise and Health*, (5), 35-43
- [117] Persson Waye, K., Björkman M. (1988). Annoyance due to low frequency noise and the use of the dba scale. *Journal of Sound and Vibration*, (127), 461-497
- [118] Persson Waye, K., Björkman, M., Rylander, R. (1990). Loudness, annoyance and the dBA in evaluating low frequency sounds. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*. (9), 32-45

- [119] Persson Waye, K., Rylander, R. (2001). The prevalence of annoyance and effects after long term exposure to low frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, (240), 483-497
- [120] Persson Waye, K., Bengtsson, J., Kjellberg, A., Benton, S. (2001). Some Effects of infrasound on task performance. *Noise and Health*, (4), 33-49
- [121] Porst, R. (1996). Ausschöpfungen bei sozialwissenschaftlichen Umfragen. Die Sicht der Institute. Mannheim: ZUMA-Arbeitsbericht 96/07.
- [122] Poulsen, T. (2003). Annoyance of low frequency noise in the laboratory assessed by LFN-sufferers and non-sufferers. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, (22), 191-201
- [123] Poulsen, T. (2005). Comparison of objective methods for assessment of annoyance of low frequency noise with the results of a laboratory listening test. *Noise Notes*, 3(4), 12-28
- [124] Raymond Heinen. Untersuchungen zur Messung und Analyse von Infraschall und Entwicklung eines Meßsystems. Dissertation an der RWTH Aachen, 13.07.1977
- [125] Roberts, C. (2010). Low Frequency Noise from Transportation Sources. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*
- [126] Rohrmann, B., Finke, H-O., Guski, R., Schümer, R., Schümer-Kohrs, A. (1978). *Fluglärm und seine Wirkung auf den Menschen*. Bern, Stuttgart, Wien: Verlag Hans Huber.
- [127] Rüdiger Borgmann, „Infraschall“, Hrsg. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz Referat 2/6 „Akustische Messtechnik“ 1997
- [128] Salt A.N., Hullar, T.E. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing Research*, (268), 12-21
- [129] Salt, A.N., Kaltenbach, J.A. (2011). Infrasound from Wind Turbines Could Affect Humans. *Bulletin of Science, Technology and Society*, 31(4), 296-302
- [130] Salt, A.N., Lichtenhan, J. T. (2011). Response of the Inner Ear to Infrasound. *Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise*, 2011
- [131] Schreckenberg, D., Meis, M. (2007). Lärmbelästigung und Lebensqualität in der Bevölkerung am Frankfurter Flughafen. *Lärmbekämpfung* (6), 225-235.
- [132] Schreckenberg, D., Meis, M., Kahl, C., Peschel, C., Eikmann, T. (2010). Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7, 3382-3405.
- [133] Schriftenreihe Heft Nr. 154 des Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, „Gewerbelärm – Kenndaten und Kosten für Schallschutzmaßnahmen“ (2000)
- [134] Schust, M. (1997). Biologische Wirkung von vorwiegend luftgeleitetem Infraschall. *Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*
- [135] Schust, M. (2004). Effects of low frequency noise up to 100Hz. *Noise and Health*, (6), 73-85

- [136] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) vom 26. August 1998 (GMBI. Nr. 26/1998 S. 503)
- [137] Simmons, C. (1999). Measurement of Sound Pressure Levels at Low Frequencies in Rooms. Comparison of Available Methods and Standards with Respect to Microphone Positions. *Acta Acustica united with Acustica*, 85(1), 88-100
- [138] Slarve R. N., Johnson D. L. (1975). Human whole-body exposure to infrasound. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 46 (1975), 428-431
- [139] St.Pierre, R.L. (2004). The Impact of A-Weighting Sound Pressure Level Measurements during the Evaluation of Noise Exposure. *NoiseCon 2004*
- [140] Stallen, P.J.M. (1999). A theoretical framework for environmental noise annoyance. *Noise & Health*, 3, 69-79.
- [141] Steve Wise, S., Leventhall, H.G. (2010). Active noise control as a solution to low frequency noise problems. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, (29), 129-138
- [142] 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
- [143] Takigawa, H.; Hayashi, F. (1988). Effects of infrasound on human body sway. *Journal of low frequency noise, vibration and active control* (1988), 66-73; rez. nach S.Laurie P266J "Infrasound Toxicological Summary November 2001"
- [144] Technischer Bericht zur Untersuchung der Geräuschemissionen von Anlagen zur Abfallbehandlung und -verwertung sowie Kläranlagen; TÜV-Bericht-Nr. 933/423901 bzw. 933/132001; Hrsg. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Wiesbaden 2002
- [145] Technischer Bericht zur Untersuchung der Geräuschemissionen von Baumaschinen; Hrsg. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Wiesbaden 2004
- [146] Technischer Bericht zur Untersuchung der Geräuschemissionen von Baumaschinen; Hrsg. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Wiesbaden 1998
- [147] Tesarz, M., Kjellberg, A., Landstrom, U., Holmberg, K. (1997). Subjective Response Patterns Related to Low Frequency Noise. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, (6), 145-150
- [148] The American Association for Public Opinion Research (AAPOR) (2011). Standard Definitions: Final dispositions of codes and outcome rates for surveys. 7th edition. AAPOR. <http://www.aapor.org> (Abruf: 25.01.2013)
- [149] Tsunekawa S., Kajikawa Y. (1985). Study on the perceptible level for infrasound. *Journal of Sound and Vibration* (1987) 112(1), 15-22

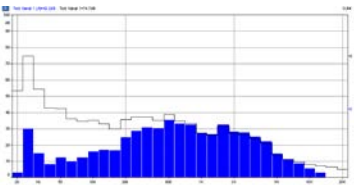
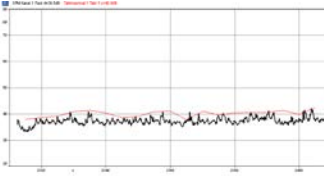
- [150] Turnbull, C., Turner, J., Walsh, D. (2012). Measurement and level of infrasound from wind farm and other sources. *Acoustics Au*, 40(1), 45-50
- [151] Ulf Landström, U., Åkerl, E., Kjellberg, A., Tesarz, M. (1995). Exposure levels tonal components and noise annoyance in working environments. *Environment International*, 21(3), 265-275
- [152] Untersuchung des Brummtton-Phänomens, Ergebnisse der durchgeführten Messungen, Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Sachgebiet 33.2 Lärm, des Referates Luftqualität, Lärm, Verkehr, 2002
- [153] Van den Berg, F., Pedersen, E., Bouma, J., Bakker, R. (2009). Project WINDFARMperception. Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents. Final report. European Research Program FP6-2005-Science-and-Society-20 Specific Support Action, Project no. 044628. University Groningen, University Gothenburg.
- [154] Van den Berg, G.P (2005). The beat is getting stronger. The effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, (24), 1-24
- [155] Van den Berg, G.P. (2000). Low frequency sounds in dwellings- a case control study. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, (19), 59-71
- [156] Van den Berg, G.P. (2006). The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Dissertation, University of Groningen, Niederlande
- [157] Van den Berg, G.P. (2012). Case control study in low frequency sound measurements.
- [158] Van Kamp, I. (1990). Coping with Noise and its Health Consequences. Dissertation. Groningen: Styx & PP Publications.
- [159] Vasudevan, R. N., Gordon, C.G. (1977). Experimental study of annoyance due to low frequency environmental noise. *Applied Acoustics*, (10), 57-69
- [160] Verzini, A.M., Ortiz Skarp, A.H., Nitardi, H., Fuchs, G.L. (1999). A laboratory experiment on very low frequency sounds effects. *Applied Acoustics*, (57), 69-77
- [161] Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973)
- [162] Walker B., Hessler D. M., Rand R., Schomer P. (2012). A Cooperative Measurement Survey and Analysis of Low Frequency and Infrasound at the Shirley Wind Farm in Brown County, Wisconsin. Public Service Commission of Wisconsin, Docket No. 2535-CE-100
- [163] Westin, J.B (1975). Infrasound - A short review of effects on man. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, (46), 1135-1140
- [164] Wietlake, K. H.: Beurteilung und Minderung tieffrequenter Geräusche, LIS-Berichte der Landesanstalt für Immissionsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Heft 38, Essen 1983

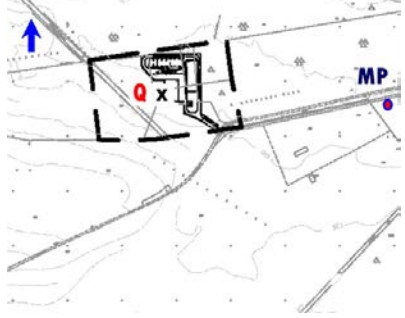
- [165] Wirth K. (2004). Lärmstudie 2000. Die Belästigungssituation im Umfeld des Flughafens Zürich. Aachen: Shaker.
- [166] Wysocki, K., Schultz, K., Wieg, P. (1980). Experimentelle Untersuchungen zum Einfluß von Infraschalldruck auf den Menschen“ Z. gesamte Hyg. 26 (1980), 436-440
- [167] Yifan, H., Guoqing, D., Yiting, Z., Youpeng, H., Bangjun, Z. (2008). Pair-wise comparison experiment on subjective annoyance rating of noise samples with different frequency spectrums but same A-weighted level. Applied Acoustics, (69), 1205-1211
- [168] Yukio Inukai, Y., Taya, H., Yamada, S. (2005). Thresholds and acceptability of low frequency pure tones by sufferers. Journal of low frequency noise, vibration and active control, (24), 163-169
- [169] “Low frequency noise, infrasound and vibration in the environment” (In Danish). Information from the Danish Environmental Protection Agency no. 9/1997

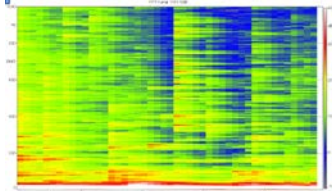
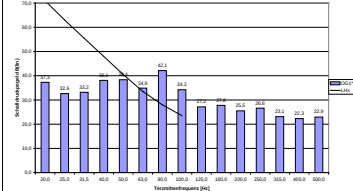
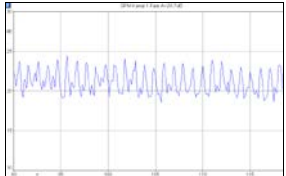
Übersicht ermittelter Infraschallquellen	
Abwasserpumpenanlage	Power-Screen Siebmaschine
Achterbahnen	Prallbrecher
Anker-Bohrgerät	Prallmühle
Antennenanlage	Presslufthammer
Auspacktrommeln	Pumpe
Auspuffanlagen langsamlaufender Verbrennungsmotoren	Radbagger mit Tieflöffelausrüstung
Autobahnen	Radlader
Backenbrecher	Raffinerie
Bagger	Raketenstart
Bauwerke (Autoahnbrücken)	Raupenmobiler Brecher
Betonpumpe	Relaisstation
Betonzertrümmerer	RLT-/Kältetechnik
BHKW	Röstanlagen-Fabrik/Gebäude/Öfen
Biogasanlagen	Rotationspresse
Bohrungen	Rührwerk
Brenner	Rüttelflaschen
Dampfstrahler	Rüttelplatte
Deponie	Rüttler
Dieselmotoren	Sägewerke (Sägegatter)
Dieselrammen (Pfeiler Isw)	Sandsieb
Discotheken / Beschallungsanlagen	Sattelzugmaschine
Doppeldeckersieb	Saugbagger
Druckmaschinen	Schaufelradlader
Eisenhütten	Schiffshorn / Nebelhorn
Elektro-Hochofen	Schiffsmotoren
E-Motoren für die Hydraulik einer Schrottschere	Schneideanlage
Entstaubungsanlage (industriell)	Schwarzdeckenfertiger
Fackeln	Shredder
Feinkornsiebmaschine	Sprengungen
Flugzeuge	Spundwandrammen
Förderbänder	Stachelwalze
Gabelstapler (Transport Papierballen)	Stahlwerk
Gas(überland)Leitungen/Pipelines	Stampfer
Gasdruckreduzieranlage	Stampffußwalze
Gasmotoren	Stanzanlagen
Gasturbinenhalle	Staubsauger für Kugelstrahlmaschine
Geothermiebohrung	Steinbruch
Geschütze	Straßenfertiger
Gesteinsmühle	Tablettenpresse
Glascontainer abkippen	Tiefenbohrung
Greifbagger	Transformatoren

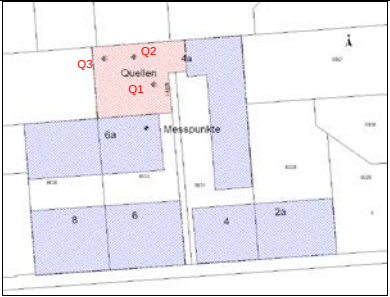
große Be- und Entlüftungsanlagen	Transportmischer
Gummi-Stahlwalze	Trennschleifscheibe
Heizungssysteme	Tunnel, Brücken, Gebäude?
Hubschrauber	Tunnelbohrmaschinen
Hydraulikbagger	Turbinen
Kamine	U-Bahnen /Schienenverkehr
Kettenbagger	Überschallflugzeuge
Kettenbagger mit Spitzmeißel	Umwälzpumpe
Kompakter	Unterirdisches Wasserkraftwerk
Kompressoren	Vakuumpumpen
Kraftwerk	Ventilatoren mit tieffrequenten Einzeltönen oder Drehklang
Kühlventilatoren für Motoren einer Schrottschere	Verdichterstationen
Kupolöfen	Verkehrswege
Lebensmittelproduktion	Vibrationsplatte
LKW	Vibrationsrinne
Lkw Abrollcontainer aufnehmen	Vibrationswalze
Lüftung	Walzendreherei
Motorkompressor	Walzenzug
Motorsport	Wärmepumpen
Mühlen, Schwingförderanlagen	Wärmetauscher
Muldenkipper	Wasserkraftturbinen
Öl- und gasgefeuerte Heizwerke	Windenergieanlagen
Ozeanische Tiefdruckzellen	Wirbelstromanlage mit Vibrationstisch
Papierfabrik	Zangenbagger (pulverisieren von Abrissmaterial)
Planierdraupe	Zellstoffwerk
Planierdraupe mit Walze	Zweiwegebagger mit Klappschaufel
Plansichter	Zwirnerei
Plattenrüttler	

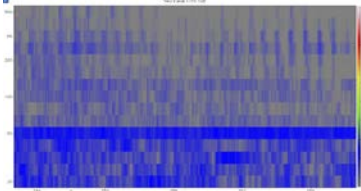
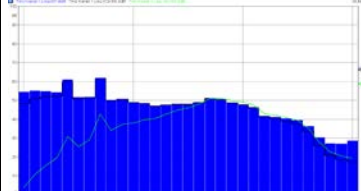
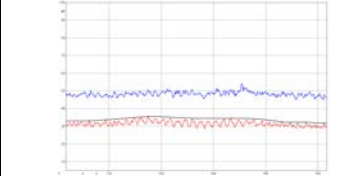
Anlage 1: Beispiele für Erhebungs- und Klassifizierungsbögen

Bezeichnung der Anlage: Separiereinrichtung zu Geothermiebohrung		Immissionsmessung oder Emissionsmessung (Außen / Innen): ImA	
Hersteller: XXXXXXXXX	Zweck d. M.: Separation	Baujahr: 1996	Leistung: -
Gewicht: -	LxBxH:	Durchsatz: 720 to/ h	Drehzahl: -
Schallschutz-/ Kompensationsmaßnahmen: Teileinhausung			
Art der Aufstellung: Freistehend, Interim			
Betriebszustand	Gemessen: Vollastbetrieb		
Vollastbetrieb: 720 to/ h			
Geräuschementstehung: Vibration der Siebanlage sowie der Transporteinrichtung			
Abstrahlung: Ls/ Ks/ sls: Luftschall			
Einleitungsweg: Anlagenfundament			
Wirkungsradius: 1,5 km			
Messzeit: 60 min		Optischer Zustand: Sonderbau, neuwertig	
Witterung: trocken, niederschlagsfrei		Subj. Beschr.: Schwebungen, periodisch tieffreq.	
Messverfahren (Einpunktmessung, Mehr-Quellen-Industrieanlagen, Hüllfläche, Array; Schallintensität, etc.): E			
Abstrahlcharakteristik (Halbkugel, Punkt, Linie, Fläche, Zylinder, etc.): P			
Messort: Ersatzmessort, 3,5 m über GOK		Abstand vom akustischen Zentrum: 550 m	
Messergebnisse	L_{Aeq}	L_{AF95}	L_{AF5}
	42,2	31,5	-
	L_{Ceq}	L_{Geq}	L_{Zeq}
	65,7	-	74,7
	$L_{AF1eq} - L_{AFeq}$	$L_{Ceq} - L_{Aeq}$	
	1,4	23,5	
 Darstellung Pegel-Frequenz-Zeitverlauf (Sonogramm)		 Terzspektrum: L_{eq} [Kontur], L_{Aeq} (Balken)	
(Beschreibung Diagramm)		Terzspektrum: L_{eq} [Kontur], L_{Aeq} (Balken)	
Messgeräte: Soundbook (Sinus Messtechnik)		 Pegelzeitverlauf: rot – $L_{Aeq}(t)$, blau – $L_{Ceq}(t)$, schwarz – $L_{Aeq}(t)$	
MessSensor: Kapsel: MK 221 Vorverst.: MV 210			
Filter: keiner			
Auswertegerät: Samurai 1.7 (Sinus Messtechnik)			
Dauer der Messung: 10 Minuten			
Anzahl Messungen: 1			
Standardabweichung: -			
Genauigkeit der Messeinrichtung und des Messverfahren (Klasse): Klasse 1			
Seite 1	Datum: 16.06.2010	 MÖHLER+PARTNER INGENIEURE AG Beratende Ingenieure für Schallschutz und Bauphysik	

Angaben zum Arbeitszyklus der Anlage: Konstanter Betrieb bei Tiefbauarbeiten					
Beschreibung des Fremdgeräusches (falls feststellbar): Einzelne Kfz-Vorbeifahrten. Konnten zuverlässig ausgeblendet werden.		Störschallpegel (bei abgeschalteter Anlage):			
L_{Aeq} : -		L_{AF95} : -			
					
Beschreibung der Messumgebung (Lage Messraum, Einrichtung): ImA					
Raumakustische Parameter (optional): Nachhallzeit, Raumabmessungen, Oberflächen, Geometrie, u.a.: (Außenmessung)					
(Frei)	(Frei)				
(Frei)	(Frei)	Ordnungssystem (Gesamtanlage/ Subsystem): G			
Raum für andere Pegelgrößen		Identifikationsnummer: -			
Anmerkungen, Notizen:		Klassifizierung			
		Merkmal	Bewertung	Bewertungsklassen: $<4 = IV$ $5 - 9 = III$ $10 - 14 = II$ $15 - 18 = I$	
		Überdeckung Ü	2		
		Erzeugter Pegel P	2		
		Frequenz F	2		
		Pegelzeitverlauf V	3	$\Sigma = 15$ Ermittelte Klasse I	
		Impulshaltigkeit I	3		
Tonhaltigkeit T	3				
Seite 2		Datum: 16.06.2010			
		 MÖHLER+PARTNER INGENIEURE AG Beratende Ingenieure für Schallschutz und Bauphysik			

Bezeichnung der Anlage: Walzen-Druckmaschine		Immissionsmessung oder Emissionsmessung (Außen / Innen): ImI	
Hersteller: XXXXXXXXX	Zweck d. M.: Buchdruck	Baujahr: 1962	Leistung: 2 KW el.
Gewicht: 2 to	LxBxH: 4 x 2 x 1,5 m	Durchsatz:-	Drehzahl: 20 min ⁻¹
Schallschutz-/ Kompensationsmaßnahmen: keine			
Art der Aufstellung: Freistehend auf Gebäudedefundament			
Betriebszustand	Gemessen: Volllast		
	Volllastbetrieb:		
Geräuschentstehung: Maschinenschwingung durch Druckwalze			
Abstrahlung: Ls/ Ks/ sls: sekundärer Luftschall			
Einleitungsweg: über Ankopplung in Gebäudedefundament			
Wirkungsradius:-			
Messzeit: 40 min		Optischer Zustand: gut	
Witterung: -		Subj. Beschr. Zyklisch	
Messverfahren (Einpunktmessung, Mehr-Quellen-Industrieanlagen, Hüllfläche, Array; Schallintensität, etc.): E			
Abstrahlcharakteristik (Halbkugel, Punkt, Linie, Fläche, Zylinder, etc.): P			
Messort: Angrenzendes Wohngebäude		Abstand vom akustischen Zentrum: -	
Messergebnisse	L _{Aeq}	L _{AF5}	L _{AF5}
	22,5	19,4	-
	L _{Ceq}	L _{Geq}	L _{Ze}
	47,3	-	53,3
	L _{AFeq} - L _{AFeq}	L _{Ceq} - L _{Aeq}	
	1,7	24,8	
			
Sonogramm: Terz, 0 Hz – 1000 Hz		Terzspektrum: L _{eq} [Balken], L _{Ceq} [Kontur], L _{Geq} (Linie)	
Messgeräte: Soundbook (Sinus Messtechnik)			
MessSensor: Kapsel: MK 221 Vorverst.: MV 210			
Filter: keiner			
Auswertegerät: Samurai 1.7 (Sinus Messtechnik)			
Dauer der Messung: 10 Minuten			
Anzahl Messungen: 1			
Standardabweichung: -		Pegelzeitverlauf: L _p (t)	
Genauigkeit der Messeinrichtung und des Messverfahren (Klasse): Klasse 1			
Seite 1	Datum 30.08.2010	 MÖHLER+PARTNER INGENIEURE AG Beratende Ingenieure für Schallschutz und Bauphysik	

Angaben zum Arbeitszyklus der Anlage: Kein Tagesgang																							
Beschreibung des Fremdgeräusches (falls feststellbar): kein Fremdgeräusch feststellbar		Störschallpegel (bei abgeschalteter Anlage): L _{Aeq} : - L _{AF5} : -																					
																							
Beschreibung der Messumgebung (Lage Messraum, Einrichtung): ImI Messung in Baulich verbundenem Wohngebäude in Wohnküche. Übliche Kücheneinrichtung																							
Raumakustische Parameter (optional): Nachhallzeit, Raumabmessungen, Oberflächen, Geometrie, u.a.: T ₃₀ = 1,2s, 6x3 m ² Grundfläche, Wandtapeten, Teppichböden, Schränke																							
(Frei)	(Frei)																						
(Frei)	(Frei)	Ordnungssystem (Gesamtanlage/ Subsystem): S Identifikationsnummer: Q1																					
Raum für andere Pegelgrößen																							
Anmerkungen, Notizen:		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Klassifizierung</th> </tr> <tr> <th>Merkmal</th> <th>Bewertung</th> <th>Bewertungs-klassen:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Überdeckung Ü</td> <td>1</td> <td rowspan="3"> $<4 = IV$ $5 - 9 = III$ $10 - 14 = II$ $15 - 18 = I$ </td> </tr> <tr> <td>Erzeugter Pegel P</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Frequenz F</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Pegelzeitverlauf V</td> <td>3</td> <td rowspan="3"> $\Sigma = 11$ Ermittelte Klasse II </td> </tr> <tr> <td>Impulshaltigkeit I</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Tonhaltigkeit T</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>		Klassifizierung			Merkmal	Bewertung	Bewertungs-klassen:	Überdeckung Ü	1	$<4 = IV$ $5 - 9 = III$ $10 - 14 = II$ $15 - 18 = I$	Erzeugter Pegel P	1	Frequenz F	2	Pegelzeitverlauf V	3	$\Sigma = 11$ Ermittelte Klasse II	Impulshaltigkeit I	2	Tonhaltigkeit T	2
Klassifizierung																							
Merkmal	Bewertung	Bewertungs-klassen:																					
Überdeckung Ü	1	$<4 = IV$ $5 - 9 = III$ $10 - 14 = II$ $15 - 18 = I$																					
Erzeugter Pegel P	1																						
Frequenz F	2																						
Pegelzeitverlauf V	3	$\Sigma = 11$ Ermittelte Klasse II																					
Impulshaltigkeit I	2																						
Tonhaltigkeit T	2																						
Seite 2	Datum 30.08.2010	 MÖHLER+PARTNER INGENIEURE AG Beratende Ingenieure für Schallschutz und Bauphysik																					

Bezeichnung der Anlage: Windkraftanlage		Immissionsmessung oder Emissionsmessung (Außen / Innen): ImA	
Hersteller: XXXXXXXXX	Zweck d. M.: Energiegewinnung	Baujahr: 2005	Leistung: 1,2 MW
Gewicht:-	LxBxH: 100m Nabenhöhe	Durchsatz:-	Drehzahl: 6-19 rpm
Schallschutz-/ Kompensationsmaßnahmen: keine			
Art der Aufstellung: Freistehend			
Betriebszustand	Gemessen bei 7 m/s V_{Wind} (1Mw)		
	Vollastbetrieb: Betrieb bis 25 m/s V_{Wind}		
Geräuschenstehung: Maschinenvibration durch Turbine			
Abstrahlung: Ls/ Ks/ sls: Luftschall			
Einleitungsweg: -		Optischer Zustand: neuwertig	
Wirkungsradius:-			
Messzeit: 40 min			
Witterung: Trocken, 7 m/s Windgeschwindigkeit		Subj. Beschr. Geräusch: Pulsieren	
Messverfahren (Einpunktmessung, Mehr-Quellen-Industrieanlagen, Hüllfläche, Array; Schallintensität, etc.): E			
Abstrahlcharakteristik (Halbkugel, Punkt, Linie, Fläche, Zylinder, etc.): Hochgelegene Punktschallquelle			
Messort: Ersatzmessort / Immissionsort		Abstand vom akustischen Zentrum: ca. 630 m	
Messergebnisse	L_{Aeq}	L_{AF5}	L_{AF5}
	67,4	39,6	60,7
	L_C	L_{Geq}	L_{Zeq}
	66,3	-	-
		$L_{AFreq} - L_{AFeq}$	$L_{Ceq} - L_{Aeq}$
		5,9	7,6
			
Sonogramm: Terz, 0 Hz – 500 Hz		Terzspektrum: L_{Aeq} [Balken], L_{Ceq} [Kontur], L_{Aeq} (Linie)	
Messgeräte: Soundbook (Sinus Messtechnik)			
MessSensor: Kapsel: MK 221 Vorverst.: MV 210			
Filter: keiner			
Auswertegerät: Samuray 1.7 (Sinus Messtechnik)			
Dauer der Messung: 13 Minuten			
Anzahl Messungen: 1			
Standardabweichung: -		Pegelzeitverlauf: rot – $L_{Aeq}(t)$, blau – $L_{Ceq}(t)$, schwarz – L_{AFTm}	
Genauigkeit der Messeinrichtung und des Messverfahren (Klasse): Klasse 1			
Seite 1	Datum: 21.05.2006	 MÖHLER+PARTNER INGENIEURE AG Beratende Ingenieure für Schallschutz und Bauphysik	

Angaben zum Arbeitszyklus der Anlage: Abhängig von Windgeschwindigkeit			
Beschreibung des Fremdgeräusches (falls feststellbar): kein Fremdgeräusch feststellbar		Störschallpegel (bei abgeschalteter Anlage):	
		L _{Aeq} : -	L _{AF5} : -
			
Beschreibung der Messumgebung (Lage Messraum, Einrichtung): Messung an Ersatzmessort nach DIN 45645, Mikrofon in 6m Höhe			
Raumakustische Parameter (optional): Nachhallzeit, Raumabmessungen, Oberflächen, Geometrie, u.a.: (Außenmessung)			
(Frei)		(Frei)	
(Frei)		Ordnungssystem (Gesamtanlage/ Subsystem): G	
Raum für andere Pegel- größen		Identifikationsnummer:	
Anmerkungen, Notizen:		Klassifizierung	
		Merkmal	Bewertung
		Überdeckung Ü	1
		Erzeugter Pegel P	1
		Frequenz F	1
		Pegelzeitverlauf V	2
		Impulshaltigkeit I	1
		Tonhaltigkeit T	0
		Bewertungs- klassen: <4 = IV 5 – 9 = III 10 - 14 = II 15 - 18 = I Σ = 6 Ermittelte Klasse III	
Seite 2	Datum: 21.05.2006	 MÖHLER+PARTNER INGENIEURE AG Beratende Ingenieure für Schallschutz und Bauphysik	