

TEXTE

134/2020

Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung

Abschlussbericht

TEXTE 134/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3713 53 100
FB000232

Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung

Abschlussbericht

von

Christian Eulitz, Paul Zobel, Larissa Ost, Ulrich Möhler
Möhler + Partner Ingenieure AG, München


Dr. Martin Schröder
Seufert Rechtsanwälte, München

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Möhler + Partner Ingenieure AG
Landaubogen 10
81373 München

Abschlussdatum:

Dezember 2019

Redaktion:

Fachgebiet I 2.4 Lärminderung bei Anlagen und Produkten, Lärmwirkungen
Christian Fabris

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

In der vorliegenden Studie wurde der Stand des Wissens über tieffrequente Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung aufbereitet, die rechtlichen Rahmenbedingungen dargestellt und die Konfliktpotentiale prognostiziert. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Leitfaden mit Handlungsempfehlungen zum Schutz gegen tieffrequente Geräusche im Wohnumfeld erarbeitet. Die Studie kommt zu folgenden Ergebnissen:

- Insbesondere stationäre Betriebszustände von Anlagen können zu Belästigungen in der Umgebung von Wohnbebauung führen. Die folgenden Anlagenarten wurden als maßgebliche tieffrequente und stationäre Geräuschquellen identifiziert:
 - ▶ Raumluftechnische Anlagen, Kühlaggregate (Lüftungsanlagen, Klima- und Kühlgeräte)
 - ▶ Heizungsanlagen (insbesondere Luftwärmepumpen)
 - ▶ (Mini-) Blockheizkraftwerke
 - ▶ (Klein-) Windenergieanlagen
 - ▶ Haushaltsgeräte

Für diese Geräuschquellen wurden die akustischen Eigenschaften sowie Minderungsmaßnahmen tieffrequenter Geräusche untersucht.

- Es wurde ein umfangreiches Rechtsgutachten erstellt, das die aktuelle Rechtslage darstellt und Defizite sowie legislative Handlungsoptionen aufzeigt. Darin zeigen sich Schwachpunkte aufgrund des Fehlens von Genehmigungsverfahren für stationäre Kleinanlagen wie Wärmepumpen oder Kühlgeräte, der Kennzeichnungspflicht und der Prognose von tieffrequenten Geräuschen. Zudem verfehlen die europäisch harmonisierten Produkthanforderungen den Stand der Lärminderungstechnik und lassen keinen Raum für nationale Alleingänge.
- Ein Vergleich der Ausbreitungsberechnungen DIN ISO 9613-2, Nord2000 und BEM zeigt, dass die geometrisch-empirischen Modelle zwar im großskaligen Maßstab für eine zuverlässige Prognose geeignet sind. Bei sehr tiefen Frequenzen und zur Betrachtung von Wellenfeldeffekten an einzelnen Wohngebäuden sind sie jedoch zu ungenau. Das Verfahren Nord2000 ist für die Ausbreitungsberechnung tieffrequenter Geräusche besser geeignet als DIN ISO 9613-2.
- Im Ergebnis der Berechnungen ist zu erwarten, dass Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen in der Umgebung von Wohnbebauung in Zukunft deutlich zunehmen werden. Konfliktpotential wurde für Frequenzen größer 50 Hz prognostiziert. Während in der Bestandssituation eher kleinräumige Konfliktbereiche auftreten, lässt die Prognose größere Konfliktbereiche erwarten. Der Quellortung kommt daher in Zukunft eine zentrale Bedeutung zu, um feststellen zu können, welche Quelle brummt. Das Konfliktpotential durch tieffrequente Geräusche nimmt mit dem allgemeinen Schutzniveau gegen Lärm entsprechend der Gebietskategorie zu.
- Eine Prognoseschätzung kommt zu der Erkenntnis, dass sich die derzeit vorhandenen Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen bis zum Jahr 2030 verdoppeln könnten, sofern den dargestellten Ursachen und Defiziten nicht entgegen gewirkt wird.
- Der Leitfaden „Tieffrequente Geräusche im Wohnumfeld – Ein Leitfaden für die Praxis“ wurde erstellt und im März 2017 vom Umweltbundesamt veröffentlicht.

Abstract

The present study summarizes the state of knowledge of low-frequency noise in residential areas, presents the legal framework and predicts the potential of conflicts with low-frequency noise in the vicinity of residential buildings in Germany. Based on these findings, a guideline with recommendations for action to protect against low-frequency noise in the vicinity of residential buildings was developed. The results are:

- In particular stationary operating conditions of sound sources can lead to annoyance in the neighborhood. The following stationary types of sources were identified as significantly potent of low-frequent noise in the vicinity of residential buildings
 - ▶ Air-conditioning and cooling equipment
 - ▶ Heating systems (air heat pumps, in particular)
 - ▶ (Small) cogeneration units
 - ▶ (Small) wind turbines
 - ▶ Household appliances

The acoustic properties of these sound sources as well as measures for the reduction of low-frequency noise were examined.

- A comprehensive legal opinion shows both the current legal situation and legislative deficits as well as legislative action options. One deficit is the lack of a legal approval procedure for the installation and operation of small stationary systems such as heat pumps or air conditioners. Both the obligation to label and the prognosis of low-frequency noises are insufficient. In addition, the harmonized product regulations of the European Union miss the state of the art in noise reduction technology, but prohibit further national regulation.
- A comparison of the sound propagation models in DIN ISO 9613-2, Nord2000 and BEM shows that the geometric-empirical models are suitable in a large scale but are not precise enough both with very low frequencies and for the interpretation of wave-field effects in individual residential buildings. The Nord2000 method produced better results for low-frequency noise than DIN ISO 9613-2.
- As a result of the calculations, it can be expected that conflicts with low-frequency noise in the vicinity of dwellings will increase significantly in the future. Significant conflict potential was predicted at frequencies higher than 50 Hz. In the existing situation the areas where conflicts occur are rather small-scale. In the forecast the size of these areas increases significantly. In the future, the localization of sources will play a major role in determining which source is humming. The potential of annoyances by low-frequency noise also depends on the general level of protection against noise according to the building zone.
- The forecast comes to the conclusion of a doubling of the currently existing low-frequency noise conflicts until 2030, if the said causes and deficits are not counteracted on.
- The Guideline “Tieffrequente Geräusche im Wohnumfeld – Ein Leitfaden für die Praxis“ was compiled and published by the Umweltbundesamt in March 2017.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung	15
Summary	25
1 Einleitung	35
2 Akustische Grundlagen	36
2.1 Messung tieffrequenter Geräusche	36
2.1.1 Definition	36
2.1.2 Schallmessgeräte und Konventionen	37
2.1.3 Schalldruck und Schalldruckpegel	37
2.1.4 Frequenzbewertung	38
2.1.5 Zeitbewertung	40
2.1.6 Psychoakustische Kenngrößen	41
2.2 Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche	42
2.2.1 Wahrnehmungsschwelle	42
2.2.2 Lautstärkeänderungen	43
2.2.3 Zusammenwirken mit anderen Immissionen	43
2.3 Ausbreitungsberechnung tieffrequenter Geräusche	44
2.3.1 Geometrische Ausbreitungsmodelle	45
2.3.2 Numerische Ausbreitungsmodelle	49
2.4 Einfluss von Gebäuden auf tieffrequente Geräusche	51
2.4.1 Schalldämmung von tieffrequenten Geräuschen	51
2.4.2 Übertragungsmaß tieffrequenter Geräusche	52
2.4.3 Spektrum-Anpassung Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden	53
2.4.4 Einfluss der Raumgeometrie	57
3 Tieffrequente Geräuschquellen	60
3.1 Aufgabenstellung	60
3.2 Quelltypen	60
3.2.1 Raumluftechnische Anlagen und Kühlaggregate	61
3.2.2 Heizungsanlagen	63
3.2.3 Blockheizkraftwerke	67
3.2.4 Windenergieanlagen	70
3.2.5 Haushaltsgeräte	71

3.3	Schutzmaßnahmen gegen tieffrequente Geräusche.....	72
3.3.1	Aufstellungsort.....	72
3.3.2	Primäre Maßnahmen zur Minderung tieffrequenter Geräusche an der Quelle.....	73
3.3.3	Sekundäre Maßnahmen zur Minderung tieffrequenter Geräusche an der Quelle	75
3.3.4	Organisatorische Lärminderungsmaßnahmen	79
3.4	Kosten und Nutzen von Schutzmaßnahmen gegen tieffrequente Geräusche	80
3.4.1	Schutzmaßnahmen vor der Errichtung und Inbetriebnahme	80
3.4.2	Schutzmaßnahmen nach der Errichtung und Inbetriebnahme.....	80
4	Rechtsgutachten	85
4.1	Aufgabenstellung	85
4.2	Produktbezogene Anforderungen	85
4.2.1	Aktuelle Rechtslage	85
4.2.2	Probleme und legislative Handlungsoptionen	89
4.3	Immissionsschutzrecht	91
4.3.1	Aktuelle Rechtslage	91
4.3.2	Probleme und legislative Handlungsoptionen	99
4.4	Baurecht.....	103
4.4.1	Aktuelle Rechtslage	103
4.4.2	Probleme und legislative Handlungsmöglichkeiten.....	108
4.5	Zusammenfassung legislativer Handlungsoptionen zur Minderung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung	110
4.5.1	Produktbezogene Anforderungen.....	110
4.5.2	Immissionsschutzrecht.....	110
4.5.3	Baurecht	111
5	Modellbetrachtung.....	112
5.1	Aufgabenstellung.....	112
5.2	Methodik.....	112
5.3	Erstellung der Musterwohnbaugebiete.....	113
5.3.1	Gebietserstellung für geometrische Ausbreitungsmodelle	113
5.3.2	Gebietserstellung für numerische Ausbreitungsmodelle	114
5.4	Implementierung tieffrequenter Geräuschquellen	115
5.5	Modellbeurteilung der Belastung durch tieffrequente Geräusche	117
5.6	Ergebnisse und Diskussion.....	118
5.6.1	Geometrische Ausbreitungsmodelle.....	118
5.6.2	Numerische Ausbreitungsmodelle	120

6	Einschätzung der Situation in Deutschland	121
6.1	Methodik.....	121
6.1.1	Bevölkerungszahl und Wohngebäude	121
6.1.2	Häufigkeit stationärer Anlagen im Wohnumfeld	122
6.1.3	Umgebungsärm	122
6.1.4	Lärmbelästigung.....	124
6.2	Konfliktprognose in den Musterwohnbaugebieten	124
6.3	Hochrechnung.....	126
7	Fazit.....	127
8	Quellenverzeichnis.....	129
Anhang 1	Lagepläne der Musterwohnbaugebiete	135
Anhang 2	Modellrechnung der Schallausbreitung nach DIN ISO 9613-2	138
Anhang 3	Potentielle tieffrequente Konfliktbereiche (Nord2000)	139
Anhang 4	Schallfeldsimulation mit Boundary Element Method (BEM).....	145
Anhang 5	Vergleichsberechnungen in einem Teilbaugbiet (90 x 90 m ² , f _{Terz} = 50 Hz, 4 Luftwärmepumpen).....	146
Anhang 6	Umgebungsärmssituation in Deutschland	149
Anhang 7	Bekannte Frequenzspektren der Geräuschemissionen relevanter Geräuschquellen	152

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Typische stationäre haustechnische Anlagen in der Umgebung von Wohnbebauung	16
Abbildung 2:	Exemplarischer Vergleich der Ausbreitung der 25 Hz- und 63 Hz-Brummtöne von fünf verschiedenen stationären Anlagen zwischen Wohngebäuden	20
Abbildung 3:	Ausschnitte aus den Mustergebieten (WR, WA und MD)	21
Abbildung 4:	Potentielle Konfliktbereiche für tieffrequente Geräusche im Mustergebiet MD für die 80 Hz-Terz (links: Bestand 2014; rechts: Prognose 2030)	22
Abbildung 5:	Akteure und deren Ziele bei der Neuerrichtung einer nicht genehmigungsbedürftigen stationären Anlage mit tieffrequentem Geräuschpotential in der Umgebung von Wohnbebauung	24
Abbildung 6:	Frequenzbereiche und Wellenlängen des tieffrequenten Schalls.....	36
Abbildung 7:	Schalldruck und Schalldruckpegel eines Verbrennungsmotors (exemplarisch)	37
Abbildung 8:	Typische Frequenzbewertungskurven (Z-, A-, C- und G-Bewertung) ..	38
Abbildung 9:	Frequenzbewertungen des Schalldruckpegels am Beispiel des Verbrennungsmotors am Emissionsort (an der Anlage)	39
Abbildung 10:	Frequenzbewertungen des Schalldruckpegels am Beispiel des Verbrennungsmotors am Immissionsort (im Wohnzimmer eines Nachbarn)	40
Abbildung 11:	Zeitverlauf des zeitbewerteten Schalldruckpegels (exemplarisch)	41
Abbildung 12:	Das Schallfeld als Differentialgleichung (DGL) mit Randbedingungen (RB)	44
Abbildung 13:	Prinzipielle Übersicht möglicher Berechnungsverfahren für die Schallausbreitung im Freien bzgl. Berechnungsgenauigkeit, Modellierungs-und Rechenaufwand in Abhängigkeit des Frequenzbereichs	45
Abbildung 14:	Berechnete Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts nach DIN ISO 9613-2 für verschiedene Bodenfaktoren G (exemplarisch für Emissionsorthöhe = 0,5 m, Immissionsorthöhe = 1,5 m, Quellenabstand = 100,0 m)	46
Abbildung 15:	Exemplarische Darstellung der fehlenden Berücksichtigung von Senken/Tälern im Geländeverlauf nach DIN ISO 9613-2, $G = 0,8$	47
Abbildung 16:	Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts nach Nord2000 für verschiedene Strömungswiderstände (exemplarisch für Emissionsorthöhe = 0,5 m, Immissionsorthöhe = 1,5 m, Quellenabstand = 100,0 m)	48
Abbildung 17:	Spektrale Schalldruckpegelunterschiede (ΔL) berechneter Schalldruckpegel nach Nord2000 ($L_{Nord2000}$) und DIN ISO 9613-2 (L_{9613-2}). $\Delta L = L_{Nord2000} - L_{9613-2}$; exemplarisch für Emissionsorthöhe = 1,0 m,	

	Immissionsorthöhe = 5,0 m, Quellenabstand = 100,0 m, keine Hindernisabschirmungen und schallharter Boden	49
Abbildung 18:	Schallpegeldifferenzen von außen nach innen (Übertragungsmaß d_L) im Bereich tieffrequenter Luftschallexposition	52
Abbildung 19:	Schalldämm-Maß eines Fensters mit Spektrum-Anpassungswerten (exemplarisch)	54
Abbildung 20:	Schalldämm-Maße von Fenstern bei einzelnen Terzfrequenzen in Abhängigkeit von ihren bewerteten Schalldämm-Maßen	55
Abbildung 21:	Schalldämm-Maße von Fenstern bei tieffrequenten Terzfrequenzen in Abhängigkeit von ihren c_{tr} -korrigierten bewerteten Schalldämm-Maßen ($c_{tr}+R_w$)	55
Abbildung 22:	Filter der Spektrum-Anpassungswerte nach DIN EN ISO 717-1 und Vorschlag c_{LFN}	56
Abbildung 23:	Schalldämm-Maße von Fenstern bei tieffrequenten Terzfrequenzen in Abhängigkeit von ihren c_{LFN} -korrigierten bewerteten Schalldämm-Maßen ($c_{LFN} + R_w$)	57
Abbildung 24:	Raumresonanzfrequenzen, exemplarisch für rechteckigen Grundriss ohne Einrichtung, Raumhöhe $h=2,5m$	58
Abbildung 25:	Exemplarische Betrachtung der niedrigen Raummoden eines typischen Wohnraums	59
Abbildung 26:	Schematische Darstellung eines zentralen Klimagerätes mit Befeuchtungseinrichtung und Lüftungseinrichtung	62
Abbildung 27:	Schematische Funktionsweise einer konventionellen Heizungsanlage mit den maßgeblichen tieffrequenten Geräuschquellen (fettgedruckt)	64
Abbildung 28:	Entwicklung der Absatzzahlen für Luftwärmepumpen in Monoblock- und Splitbauweise	65
Abbildung 29:	Luftwärmepumpe in Außenaufstellung	65
Abbildung 30:	Schematische Funktionsweise einer Luftwärmepumpe mit den maßgeblichen tieffrequenten Geräuschquellen (fettgedruckt)	66
Abbildung 31:	Blockheizkraftwerk (BHKW) in einem Heizungsraum	67
Abbildung 32:	Biogasanlage in der Umgebung von Wohnbebauung	68
Abbildung 33:	Aktueller Stand der Absatzzahlen von nach KWKG geförderten BHKW	68
Abbildung 34:	Schematische Funktionsweise eines Blockheizkraftwerks mit den maßgeblichen tieffrequenten Geräuschquellen (fettgedruckt)	69
Abbildung 35:	Windenergieanlage und Klein-Windenergieanlage	70
Abbildung 36:	Tieffrequente Geräuschquellen bei Windenergieanlagen	71
Abbildung 37:	Pegelerhöhungen infolge von Fassadenreflexionen	73
Abbildung 38:	Vereinfachter Aufbau eines Kammer-Schalldämpfers	76

Abbildung 39:	Vergleich der Geräuschemissionen eines BHKW (exemplarisch für 50 Hz) an der Abgasmündung ohne (links) und mit (rechts) $\lambda/4$ -Resonatordämpfung	77
Abbildung 40:	Schalldämpferkonstruktionen (links: $\lambda/4$ -Resonator; rechts: Helmholtz-Resonator) an einem Luftkanal (vereinfachter Aufbau) ...	77
Abbildung 41:	Prinzip der Amplitudeninterferenz mittels Active Noise Control	78
Abbildung 42:	Orientierungswerte für Kosten beim Erwerb verschiedener Anlagentypen.....	82
Abbildung 43:	Prozentuale Kosten für nachträgliche Geräuschminderungsmaßnahmen	83
Abbildung 44:	Ausschnitte der Musterwohnbaugebiete für ein reines Wohngebiet (WR), ein allgemeines Wohngebiet (WA) und ein Dorfgebiet (MD) (v.l.n.r.).....	113
Abbildung 45:	Ansichten des BEM-Modells eines Teilwohngebiets	115
Abbildung 46:	Auf mittlere Abstände normierte Geräuschimmissionsspektren an Wohngebäuden	116
Abbildung 47:	Überschreitungsbereich im Modell. Freiflächen, in denen die Hörschwelle nach DIN 45680 mit Zuschlag der Anhaltswerte des Beiblatts 1 zur DIN 45680 (rote Kreuze) überschritten werden, werden in den Konfliktkarten (siehe Anhang 3) rot gekennzeichnet.....	118
Abbildung 48:	Anzahl der Wohngebäude in Deutschland	121
Abbildung 49:	Geschätzte Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm gemäß EU-Umgebungsärmrichtlinie, 2016.....	123
Abbildung 50:	Lärmbelästigung in Deutschland in % im Jahr 2014	124
Abbildung 51:	Skizze zur Methodik der Auswertung der Betroffenenheiten.....	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eignung konventioneller psychoakustischer Kenngrößen für die Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen.....	42
Tabelle 2:	Maßnahmen vor der Errichtung und Inbetriebnahme.....	80
Tabelle 3:	Nachträgliche Maßnahmen zur Minderung tieffrequenter Geräusche	81
Tabelle 4:	Anforderungen an den Schallleistungspegel von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten mit Wärmepumpe gem. Anhang II Nr. 3 der VO 813/2013.....	88
Tabelle 5:	Anforderungen an den maximalen Schallleistungspegel von Raumklimageräten gem. Anhang I Nr. 2 Tabelle 5 der VO 206/2012	89
Tabelle 6:	Daten zu den Musterwohnbaugebieten im Modell	114
Tabelle 7:	Gewählte Umgebungsparameter für die Ausbreitungsberechnung in den Modellgebieten nach DIN ISO 9613-2 und Nord2000.....	114
Tabelle 8:	Daten zu den Geräuschquellen im Modell	115
Tabelle 9:	Schallleistungspegel der Geräuschquellen	116
Tabelle 10:	Anzahl der Geräuschquellen in den Musterwohnbaugebieten.....	117
Tabelle 11:	Zusammenstellung wesentlicher Kenngrößen für die Bewertung der Gesamtbelastung.....	123
Tabelle 12:	Maximalabschätzung der prozentualen Wahrscheinlichkeiten für das Konfliktpotential in den Mustergebieten bezogen auf die Anzahl der Wohngebäude	125

Abkürzungsverzeichnis

ANC	Active Noise Control (engl.) - Antischall
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BEM	Boundary Element Method (engl.) - Randelementmethode
BHKW	Block-Heizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
CHP	Combined Heat and Power (engl.) – Kraft-Wärme-Kopplung
dB	Dezibel; Hilfsmaßeinheit zur Kennzeichnung von Pegeln
DGL	Differentialgleichung
DIN	Deutsches Institut für Normung
<i>f</i>	Frequenz
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finite Elemente Methode
FFP	Fast Field Program
G	Bodenfaktor zur Berücksichtigung akustischer Bodeneigenschaften gemäß DIN ISO 9613-2
Hz	Hertz; SI-Einheit für die Frequenz
ISO/TS	International Organization for Standardization/ Technical Specification
kW	Kilowatt; SI-Einheit für die Leistung
KWEA	Klein-Windenergieanlage
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
L_{AF}	Schalldruckpegel mit Frequenzbewertung A und Zeitbewertung fast
L_{CF}	Schalldruckpegel mit Frequenzbewertung C und Zeitbewertung fast
LFN	Low-frequency noise (engl.) – tieffrequente Geräusche
L_{Night}	nach EU-Umgebungslärmrichtlinie berechneter Nacht-Beurteilungspegel
L_{pA}	Schalldruckpegel: zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Quadrates des gleitenden Effektivwertes des Schalldrucks und des Quadrates des Bezugsschalldrucks $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$, mit der Frequenzbewertung A entsprechend DIN EN 61672-1 [32]
L_{WA}	Schallleistungspegel: zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des gleitenden Effektivwertes der Schallleistung und der Bezugsschallleistung $P_0 = 1 \text{ pW}$, mit der Frequenzbewertung A entsprechend DIN EN 61672-1 [32]
MD	Dorfgebiet i.S. der BauNVO
Nord2000	Geometrisch-empirisches Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Schallausbreitung im Freien
Pa	Pascal; Einheit für Druck ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)
PE	Parabolic Equation

phon	Maßeinheit der psychoakustischen Größe des Lautstärkepegels L [phon]
R'_w	Bewertetes Schalldämm-Maß in dB mit Schallübertragung über flankierende Bauteile
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
WA	Allgemeines Wohngebiet i.S. der BauNVO
WEA	Windenergieanlage
WR	Reines Wohngebiet i.S. der BauNVO
λ	Wellenlänge einer Schallwelle

Zusammenfassung

Einleitung

Seit einigen Jahren klagen Bürgerinnen und Bürger vermehrt über Beeinträchtigungen durch tieffrequente Geräusche oder sogenannte „Brummtöne“-Phänomene in der Umgebung von Wohnbebauung. Im Fokus der Betroffenen stehen häufig die Auswirkungen der Energiewende auf die akustische Situation im Wohnungsumfeld. Einerseits erzeugen dezentrale Kleinanlagen neben Energie und Wärme auch Geräusche. Andererseits unterscheidet sich das Geräuschempfinden in modernen Gebäuden wesentlich vom Gewohnten.

Tatsächlich kann es für diese Entwicklung eine Vielzahl möglicher Ursachen geben. Die Energiewende führt zu neuen akustischen Situationen. Der in den letzten Jahren stark voranschreitende technische Wandel (moderne Baukonstruktionen, technische Gebäudeausrüstung, Haushalts- und Gartengeräte usw.) stellt zunehmend höhere Anforderungen an die Wohn- und Aufenthaltsqualität. Der Ausbau der Infrastruktur bei gleichzeitig zunehmender Siedlungsdichte erfordert erhöhte Lärminderung im Städtebau. Alles zusammen verschiebt das Belastungsempfinden der Bevölkerung in Richtung tieffrequenter Geräuschimmissionen.

Das Schutzniveau der Betroffenen gegenüber tieffrequenten Geräuschen wird deshalb als ungenügend empfunden. Derzeit entstehen häufig langjährige Konfliktsituationen mit der Nachbarschaft, die aufwändig für alle Beteiligten und am Ende nicht selten zivilgerichtlich entschieden werden müssen.

Die vorliegende Studie soll einen Überblick über die Eigenschaften tieffrequenter Geräusche, ihre Entstehung und Ausbreitung in der Umgebung von Wohnbebauung, deren rechtliche Beurteilung, Entwicklungsszenarien und Handlungsempfehlungen geben. Aussagen zur Lärmwirkung von tieffrequenten Geräuschen, die über die bekannte Literatur hinausgehen, sind nicht Inhalt dieser Studie.

Tieffrequente Geräusche

Grundsätzlich sind tieffrequente Geräusche und Infraschall mechanische Schwingungen und Wellen in einem elastischen Medium. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass sich die Wahrnehmung und Wirkung von tieffrequenten Geräuschen deutlich von der Wahrnehmung und Wirkung des mittel- und hochfrequenten Hörschalls unterscheidet.

Aufgrund teilweise sehr großer Wellenlängen (für eine Frequenz $f = 10$ Hz ergibt sich beispielsweise eine Wellenlänge von $\lambda = 34$ m) breiten sich tieffrequente Geräusche über große Distanzen mit geringerer Dämpfung und Dämmung aus als Geräuschanteile im mittleren und hohen Frequenzbereich.

Die Wahrnehmung von tieffrequenten Geräuschen variiert dabei je nach Frequenzbereich, Lautstärke (Schalldruckpegel) und der spezifischen Wahrnehmungsschwelle von Betroffenen. Allgemein nehmen das Wahrnehmungs- und das Tonhöheempfinden des Menschen ab, je tiefer die Frequenzen werden. Dies führt dazu, dass tieffrequente Geräusche erst bei höheren Schalldruckpegeln wahrgenommen werden können als üblicher Hörschall. Zudem können die Töne nicht mehr differenziert und deshalb üblicherweise nur noch als Brummen wahrgenommen werden.

Auch die Änderung der Lautstärke tieffrequenter Geräusche wird stärker wahrgenommen als im gewöhnlichen Hörbereich. Deshalb können tieffrequente Geräusche bereits bei geringfügigen Pegelerhöhungen (1 bis 2 dB) lästig werden, die bei höheren Frequenzen kaum wahrnehmbar sind. Neben hörbaren Brummtönen können tieffrequente Geräusche auch Druckgefühle und Unwohlsein verursachen.

Tieffrequente Geräusche weisen somit spezifische physikalische Eigenschaften auf. Deshalb geht von diesen Immissionen ein erhöhtes Belästigungspotential aus. Zur Vermeidung von Konflikten erscheint eine besondere immissionsschutzrechtliche Betrachtung tieffrequenter Geräusche erforderlich.

Tieffrequente Geräuschquellen

Tieffrequente Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung werden u.a. von stationären haustechnischen Anlagen und Geräten, z.B. Klima-, Lüftungsanlagen und Luftwärmepumpen verursacht. Geräte dieser Art werden zunehmend häufiger in Wohnsiedlungen errichtet. Dabei sind sie meist über das Gebiet verteilt und emittieren teilweise dauerhaft Geräusche. Dies kann Nachbarschaftskonflikte hervorrufen. Abbildung 1 zeigt zwei typische Situationen von stationären Anlagen in Außenaufstellung im ansonsten ruhigen Wohnumfeld. Daneben sind in der Vergangenheit insbesondere Windenergieanlagen und Blockheizkraftwerke als tieffrequente Geräuschquellen hervorgetreten, die in der Regel von außen auf Wohnsiedlungen einwirken.

Abbildung 1: Typische stationäre haustechnische Anlagen in der Umgebung von Wohnbebauung



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Viele der von außen auf ein Wohnumfeld einwirkenden Geräuschquellen (insbesondere Verkehr und gewerbliche Anlagen) müssen vor ihrer Inbetriebnahme ein Plan- oder Genehmigungsverfahren durchlaufen. In diesen Verfahren wird der Schutz gegen schädliche und erheblich belästigende Geräuschimmissionen behördlich geprüft. Eine abschließende Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen kann allerdings derzeit erst nach Errichtung solcher Anlagen erfolgen.

Vor der Errichtung von den im Privatgebrauch befindlichen stationären haustechnischen Anlagen findet häufig keine behördliche Überprüfung statt. Die Standorte der Geräte sind innerhalb von Wohngebieten dabei meist vielfach punktuell verteilt. Bei schlechter Standortwahl und mehreren Anlagen summieren sich die Geräuschimmissionen für Betroffene. Mit dem „Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten“ [10] hat die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) im August 2013 diesem Konfliktpotential gezielt entgegen gewirkt. Darin sind praxistaugliche Empfehlungen mit einer vereinfachten Immissionsprognose für stationäre Geräuschquellen in Wohngebieten veröffentlicht. Die darin gewählten akustischen Modellannahmen berücksichtigen jedoch nicht die Besonderheiten tieffrequenter Geräusche. Die Problematik tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung ist daher noch ungelöst.

Beurteilung tieffrequenter Geräusche

In Deutschland dient das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [12] dem Schutz und der Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Immissionen. Dabei kommt der Lärmbekämpfung eine wesentliche Rolle des Immissionsschutzes zu.

Die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) [1] ist eine Verwaltungsvorschrift zum BImSchG. Für technische Anlagen konkretisiert sie den unbestimmten Rechtsbegriff der „schädlichen Umwelteinwirkungen“ im Hinblick auf Lärm. Der TA Lärm hat damit in gerichtlichen Verfahren eine beachtliche Bindungswirkung. Dies betrifft nicht ausschließlich die Genehmigungsverfahren von gewerblich-industriellen Anlagen. Entsprechend der ständigen Rechtsprechung ist die TA Lärm auch bindend im Bauplanungsrecht (DIN 18005 [26]) oder im Zivilrecht bei Belästigungen oder Nachteilen durch Nachbarschaftslärm nach §§ 906, 1004 BGB [15].

Das Verfahren der TA Lärm beurteilt Schalldruckpegel am maßgeblichen Immissionsort mit der Frequenzbewertung A. Diese sogenannte A-Bewertung ist ein frequenzabhängiges Filter, das sich näherungsweise an der menschlichen Hörempfindung orientiert. Für tieffrequente Geräusche stellt das Verfahren der TA Lärm keine ausreichende Konkretisierung der Schädlichkeitsschwelle dar. Die TA Lärm enthält deshalb spezifische Regelungen für tieffrequente Geräusche im Frequenzbereich unter 90 Hz und erfasst auch Körperschallübertragungen. Sie verweist für die Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche auf die DIN 45680 [27] mit ihrem zugehörigen Beiblatt 1 [28]. Mit diesem können Auftreten und die Erheblichkeit tieffrequenter Geräusche erst nach Inbetriebnahme einer Anlage festgestellt und beurteilt werden. Ein standardisiertes Prognoseverfahren existiert nicht.

Der Beurteilungsmaßstab der DIN 45680 kann für einzelne Immissionssituationen ungenügend sein. Deshalb steht die Norm in der wissenschaftlichen Diskussion und wird derzeit überarbeitet. Ein dritter Entwurf wird zurzeit unter Beteiligung aller relevanten und interessierten Stellen fachlich und wissenschaftlich geprüft. Erst nach Veröffentlichung einer Neufassung der DIN 45680 kann diese als gesicherter Stand der Erkenntnis gelten. Bis dahin gilt die DIN 45680 mit ihrem zugehörigen Beiblatt 1 in der Ausgabe vom März 1997.

Genehmigungsverfahren

Das BImSchG teilt die in seinen Anwendungsbereich fallenden Anlagen (§§ 3 Abs. 5, 2 Abs. 2 BImSchG) in genehmigungsbedürftige und nicht genehmigungsbedürftige Anlagen. Das Gesetz stellt an die Betreiber von genehmigungsbedürftigen Anlagen höhere und andere Anforderungen und enthält bei Zuwiderhandlungen härtere Sanktionen als bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen. Anlagen, die in der 4. BImSchV [112] genannt sind, sind genehmigungsbedürftig. Genehmigungsbedürftige Anlagen unterliegen einer immissionsschutzrechtlichen Präventivkontrolle durch die Behörde. Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (i.S. der §§ 22 ff. BImSchG i.S. von § 3 Abs. 5 BImSchG) sind somit alle dem BImSchG unterliegenden Anlagen, die keiner Genehmigung nach § 4 BImSchG bedürfen.

Stationäre Geräte in Wohngebieten, insbesondere Luftwärmepumpen, Lüftungs- und Klimaanlageanlagen sind nicht genehmigungsbedürftig im Sinne des BImSchG. Eine allgemeine Vorsorgepflicht besteht für die Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen nicht. Sind nicht genehmigungsbedürftige Anlagen Teil eines größeren Vorhabens, das zum Beispiel der Baugenehmigungspflicht unterliegt, erfolgt – wie bei genehmigungsbedürftigen Anlagen – eine behördliche Präventivkontrolle. Werden stationäre haustechnische Anlagen wie Luftwärmepumpen, Lüftungs- und Klimaanlageanlagen oder ähnliche Einrichtungen als Einzelvorhaben ausgeführt, unterliegen sie regelmäßig keiner präventiven behördlichen Kontrolle. Sie bedürfen keiner Genehmigung nach BImSchG und sind in den Bauordnungen der Länder verfahrens- und genehmigungsfrei. Grundstückseigentümer können daher stationäre haustechnische Geräte errichten und betreiben, ohne ein behördliches Verfahren zu durchlaufen, das die Einhaltung der Anforderungen des Nachbarschutzes und die Rücksichtnahme überprüft.

Dies heißt jedoch nicht, dass für diese Anlagen keine Betreiberpflichten bestehen. Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen sind nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1, 2 BImSchG grundsätzlich dazu verpflichtet, auch schädliche Umwelteinwirkungen durch tieffrequente Geräusche zu verhindern und zu

beschränken. Dies gilt für wirtschaftliche Unternehmungen ebenso wie zu privaten Wohnzwecken. Wenn tieffrequente Geräusche nach dem Stand der Technik vermeidbar sind, eine nicht genehmigungsbedürftige Anlage trotzdem relevant zur Entstehung dieser schädlichen Umweltwirkung beiträgt, ist die Betreiberpflicht verletzt.

Produktbezogene Anforderungen

Bereits beim Inverkehrbringen durch Hersteller können gesetzliche Anforderungen an Produkte zur Verbesserung des Schutzes von Mensch und Umwelt gestellt werden. Solche Anforderungen würden gleichzeitig den Marktzutritt der Produkte hemmen. Der freie Verkehr von Waren ist jedoch ein zentrales Element des Binnenmarktes der Europäischen Union (Art. 26 Abs. 2 AEUV [43], ex-Art. 14 Abs. 2 EGV [39]). Produktbezogene Anforderungen sind daher i.d.R. Gegenstand von Harmonisierungsmaßnahmen gemäß Art. 114 AEUV (ex-Art. 95 EGV). Das bedeutet, dass solche Regelungen grundsätzlich nur für die gesamte Europäische Union festgelegt werden dürfen. Sonderregeln in den Mitgliedsstaaten sind nach Inkrafttreten einer europäischen Harmonisierungsmaßnahme grundsätzlich nicht möglich.

Produktanforderungen an die Geräuschemissionen von Raum- und Kombiheizgeräten mit Luftwärmepumpe oder Raumklimageräten und Komfortventilatoren sind mit der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG [42] und deren Durchführungsverordnungen unionsrechtlich vorgeschrieben und gelten somit auch für Deutschland verbindlich.

Die unionsrechtlichen Verordnungen beschränken den A-bewerteten Schallleistungspegel der genannten Produkte in Abhängigkeit von der Nennleistung. Die Grenzwerte sind im Vergleich zum Stand der Technik der in der EU allgemein verkehrsfähigen Luftwärmepumpen und Klimageräte sehr hoch. Sie beinhalten keine Lästigkeitszuschläge und liegen weit über der besten verfügbaren Technik. Produktbezogene Vorgaben für die tieffrequenten Geräuschanteile existieren nicht.

Tieffrequente Lärmwirkung

Das menschliche Hör- und Wahrnehmungsempfinden hängt von verschiedensten Faktoren ab. Vogelzwitschern oder die Geräusche spielender Kinder (am besten die eigenen) werden bei gleichem Geräuschpegel völlig anders empfunden als die tieffrequenten Geräusche der Luftwärmepumpe des Nachbarn. Die Ursachen für das erhöhte Belästigungsempfinden von Geräuschen sind vielschichtig. Tieffrequente Geräusche werden häufig als bedrohlich empfunden. Neben der Geräuschcharakteristik kann die Bedrohlichkeit der Geräusche auch aus der Tatsache resultieren, dass man in seinem schützenden Wohnbereich unausweichlich mit wahrnehmbaren Immissionen konfrontiert wird, die man einer anderen Person (einem Anlagenbetreiber) zuschreiben kann.

Eine finanzielle Beteiligung am Ertrag einer Anlage kann deren Akzeptanz erhöhen und Belästigungen vermindern. Andererseits nimmt die Belästigung zu, wenn die Schallimmissionen noch mit anderen Reizungen einhergehen, zum Beispiel gemeinsam mit Schwingungen oder optischen Reizungen.

Das periodische Auf- und Abschwellen des Schallpegels, die sogenannte Modulation des Geräusches gilt ebenfalls als eine Ursache einer erhöhten Störwirkung. Neben dem spezifischen Zeitverlauf kann auch das Klangbild den besonderen technischen Charakter eines Geräusches ausmachen. In der natürlichen Landschaft werden Verkehrsgeräusche, menschliche Kommunikation, Kirchengeläut usw. akzeptiert. Eine neue Geräuschquelle wird dahingegen häufig als ortsunübliche Störung empfunden. Für das individuelle Hörempfinden sind folglich neben den objektiv-physikalischen Faktoren verschiedene subjektiv-individuelle Faktoren wie die Reizdauer, die Hör- oder Wahrnehmungsempfindlichkeit, die Einstellung zum Reiz und zur Situation usw. maßgebend.

Emissionen

Mit zunehmender Anzahl an Geräuschquellen in der Umgebung von Wohnbebauung nimmt auch das Konfliktpotential zu. Beschränkungen der Emissionen stellen bislang ausschließlich auf A-bewertete Schallleistungspegel ab.

Die Hersteller garantieren in der Regel nur den A-bewerteten Schallleistungspegel. Die spektrale Geräuschzusammensetzung wird vom Hersteller im überwiegenden Fall nicht oder lediglich informativ für Frequenzen ab dem 63-Hz-Oktavband angegeben. In einigen, für die Messung von Schallleistungspegeln anzuwendenden Normen (ISO 3744 [33], DIN EN 12102 [30]), ist in der Regel sogar erst ab 100 Hz (125 Hz-Oktavband) zu messen. Eine Ausnahme sind dabei die Hersteller von Windenergieanlagen. Das genormte Verfahren zur Ermittlung der immissionswirksamen Schallleistung von Windenergieanlagen (DIN EN 61400-11 [31]) beschreibt die Messung und Dokumentation ab dem 32-Hz-Oktavband.

Für stationäre Anlagen in der Umgebung von Wohnbebauung müssen Hersteller in der Regel keine Aussage über den tieffrequenten Bereich der Schallleistung treffen. Somit ist die A-bewertete Schallleistung (L_{WA}) derzeit praktisch das alleinige Kriterium für die Geräuscherzeugung eines Produktes. Kunden können deshalb bei ihrer Kaufentscheidung das Konfliktpotential durch tieffrequente Geräuschemissionen nicht einschätzen.

Hersteller haben durchaus das Interesse, die A-bewertete Schallleistung (L_{WA}) ihrer Anlagen zu senken. Die technischen Verbesserungen der Produkte und Anlagen wirken sich jedoch häufig nicht positiv für Betroffene aus. Am Beispiel von Ventilatoren (z. B. in Rückkühlwerken) oder Umwälzpumpen für die Heizungsanlage kann dies dazu führen, dass

- a) diese Produkte durch langsam laufende größere Rotoren einen höheren Anteil tieffrequenter Geräusche erzeugen,
- b) die Überdeckung der tieffrequenten Geräusche durch die Reduktion der mittel- und hochfrequenten Geräuschanteile abnimmt, so dass die tieffrequenten Geräusche deutlicher aus dem Gesamtgeräusch hervortreten, bzw.
- c) die vermeintlich leiseren Geräte in einer größeren Anzahl und/oder näher in Richtung Nachbarschaft errichtet werden.

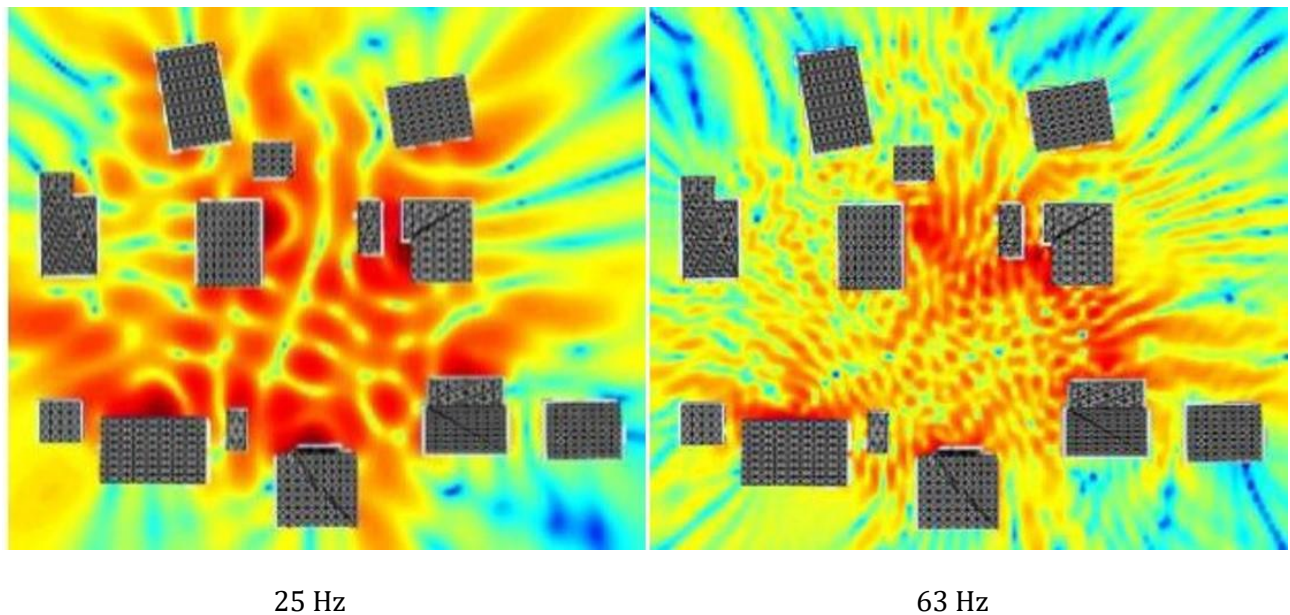
Ausbreitung

Tieffrequente Geräusche werden bei der Ausbreitung mit steigender Entfernung zur Quelle weniger abgeschwächt als mittel- und hochfrequente Geräusche. Aufgrund der großen Wellenlängen breiten sich tieffrequente Geräusche weit in die Nachbarschaft aus. Der Einwirkungsbereich ist daher relativ groß.

In der Praxis treten häufig gekoppelte Luft- und Körperschallübertragungen auf. Die Körperschallübertragung findet zwar deutlich unterhalb der menschlichen Fühlbarkeitsschwelle von Vibrationen statt. Körperschall kann jedoch an Bauteilen im Übertragungsweg oder am Immissionsort sogenannten Sekundärluftschall hervorrufen. Dieser überlagert sich dann mit dem Primärluftschall.

Tieffrequente Schallwellen können auch durch Reflexionen und Interferenzen ungünstige lokale Erhöhungen ausbilden. Abbildung 2 zeigt die Überlagerung von Brummtönen gleicher Frequenzen von fünf verschiedenen stationären Anlagen in einem Wohngebiet. Gebiete mit hohem Schalldruckpegel sind rot, Gebiete mit niedrigem Schalldruckpegel sind darin blau dargestellt. In diesem Beispiel wird gezeigt, dass sich tieffrequente Geräusche zwischen Gebäuden aufsummieren und zudem lokal stark schwanken können. Ebenso ist die Schwierigkeit erkennbar, die einzelnen Pegelbeiträge der Geräusche den jeweiligen Quellen zuzuordnen. Um jedoch an den relevanten Geräuschquellen Minderungsmaßnahmen durchzuführen, ist zunächst die Quellortung in tieffrequenten Schallfeldern von zentraler Bedeutung.

Abbildung 2: Exemplarischer Vergleich der Ausbreitung der 25 Hz- und 63 Hz-Brummtöne von fünf verschiedenen stationären Anlagen zwischen Wohngebäuden



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Bau- und Raumakustik

Die üblichen Außenbauteile von Wohngebäuden (Fenster, Wände, Decken, Dach) weisen im Gegensatz zum mittel- und hochfrequenten Bereich eine verminderte Schalldämmung im tieffrequenten Bereich auf. Die Gebäudehülle könnte aufwendig gegen tieffrequente Geräusche baulich geschützt werden. Dies würde anderen Anforderungen an gesunde Wohnverhältnisse entgegenstehen, insbesondere der notwendigen Belüftung, Belichtung und der Freiraumversorgung des Wohnens.

Kommt es innerhalb von Wohngebäuden zu tieffrequenten Geräuschimmissionen, sind weitere Besonderheiten zu beobachten. Innerhalb von geschlossenen Räumen können sich stehende Schallwellen ausbilden sowie schwingende Bauteile Sekundärluftschall abstrahlen. Dies kann zu einer ortsabhängigen frequenzsingulären Verstärkung der Geräuschimmissionen führen. Die niedrigsten hierfür maßgebenden Raumresonanzfrequenzen in Räumen mit rechteckigem Grundriss betragen in sehr großen Wohnräumen etwa 15 Hz und in kleinen Wohnräumen etwa 55 Hz. Der Einfluss in den Resonanzfrequenzen kann zwischen dem Minimum und dem Maximum des Schalldrucks in einem leeren Raum durchaus bis zu 25 dB betragen.

Bei Wohngebäuden liegen die üblichen Deckenresonanzfrequenzen von konventionellen Stahlbetondecken im Bereich von 20 bis 40 Hz bzw. 50 bis 80 Hz mit schwimmendem Estrich. Holzbalkendecken oder leichte Betondecken/ Kompositdecken haben häufig Deckeneigenfrequenzen von 10 bis 20 Hz. Werden die Geschosdecken durch Erschütterungen oder Vibrationen erregt, schwingen diese Bauteile vorwiegend in den Resonanzfrequenzen und strahlen mit Erreger- und Eigenfrequenz Sekundärluftschall in den Raum ab. Dieser Sekundärluftschall kann sich ungünstig mit Primärluftschall überlagern und dabei zudem in den Raumresonanzfrequenzen zu lokalen Pegelerhöhungen führen.

Ungewohnte Klänge – spezielle akustische Eigenschaften

Aufgrund der spezifischen Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche können sich die Geräusche unterschiedlicher stationärer Geräuschquellen subjektiv ähnlich anhören. So klingen zum Beispiel eine Kälteanlage eines Lebensmittelgeschäfts oder ein mit Luftwärmepumpe unterstütztes Heiz- und Kühlsystem eines Wohngebäudes ähnlich. In den abendlichen Ruhe- und Nachtstunden erreichen sonstige Umgebungsgeräusche ihren Tiefpunkt. Die genannten Anlagen sind jedoch dauerhaft in Betrieb. Deren Geräuschpegel nimmt weder zu noch ab, wird aber in Abwesenheit der tagsüber vorhandenen Umgebungsgeräusche nachts lauter empfunden.

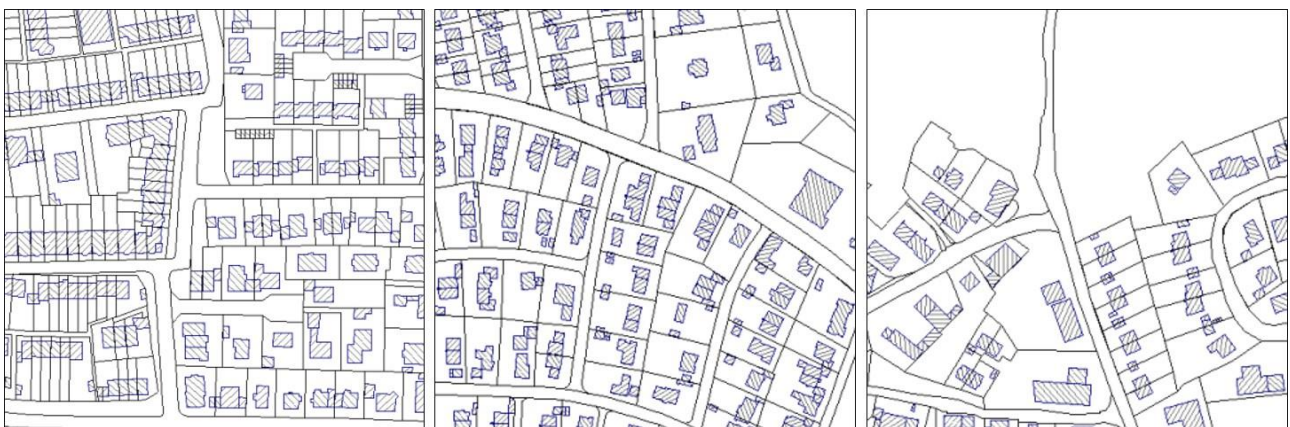
Die einzelnen Anlagenteile (Kompressoren, Lüfter, Motoren, Pumpen usw.) der hier zur Diskussion stehenden Anlagen stellen keine neuartigen Geräuschquellen dar. Die bewährten Methoden aus der Industrieakustik können zur Geräuschminderung der Anlagenteile herangezogen werden. Neu sind allerdings die kompakte Bauart, die zunehmende Anzahl und Variabilität der Anlagen sowie deren Lage in der Umgebung von Wohnbebauung, das heißt auf, in und an Wohnhäusern. Ruhige Gebiete werden dauerhaft mit bisher nicht vorhandenen Geräuschimmissionen beaufschlagt. Deren Störwirkung im tieffrequenten Bereich kann nach den derzeitigen Regularien erst nach Errichtung der Anlagen ermittelt werden.

Mit dieser Entwicklung geht eine Veränderung der Geräuschsituation einher. Ein Konflikt wird häufig erst nach einer längeren Expositionsdauer der Nachbarschaft bemerkt. Teilweise hat sich dann bereits eine Sensibilisierung der Betroffenen eingestellt. Dies kann neben dem erhöhten Aufwand nachträglicher Minderungsmaßnahmen tieffrequenter Geräusche an den Anlagen auch zu einem nachhaltig erhöhten Belästigungsempfinden der Nachbarschaft führen. Geräuschimmissionen werden dann bereits auf einem Niveau als Lärm empfunden, auf dem mit gültigen Regeln üblicherweise keine erhebliche Belästigung festgestellt werden kann.

Entwicklungsszenarien tieffrequenter Geräusche

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgten Ausbreitungsberechnungen tieffrequenter Geräusche für drei verschiedene Mustergebiete (siehe Abbildung 3) mittels Entwicklungsszenarien von verschiedenen Geräuschquellen. Dabei wurden als charakteristische Baugebiete „Reine Wohngebiete“ (WR), „Allgemeine Wohngebiete“ (WA) und „Dorfgebiete“ (MD) gewählt.

Abbildung 3: Ausschnitte aus den Mustergebieten (WR, WA und MD)



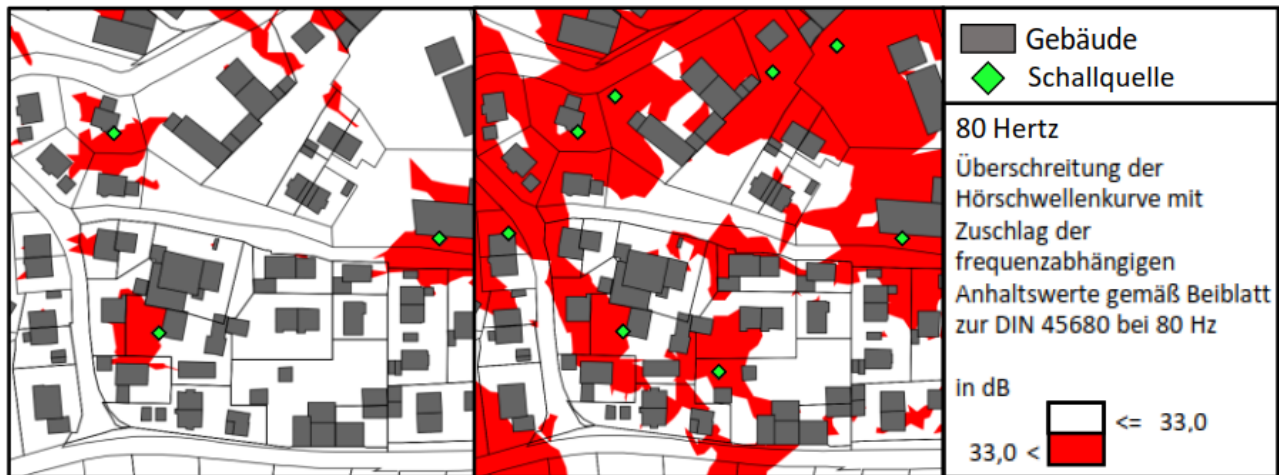
Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Als Geräuschquellen wurden Luftwärmepumpen und Klimaanlage jeweils unter der Vorbelastung von BHKW und Windenergieanlagen abgebildet. Die Anzahl der Klimaanlage je Wohngebiet und Szenario wurde entsprechend der Prognosezahlen zu Klimageräten in Deutschland für das Jahr 2014 bzw.

2030 [87] in Bezug auf ca. 20 Millionen Wohngebäude in Deutschland angesetzt. Die Anzahl der Luftwärmepumpen je Wohngebiet und Szenario wurde für den Anteil von Wärmepumpen an Wärmeerzeugern in Deutschland im Jahr 2014 (2,8 %) und im Jahr 2030 (8,1 %) laut der BWP-Branchenstudie 2015 [14] berücksichtigt.

Die Berechnungen zeigen (vgl. Abbildung 4), dass im Hinblick auf die stetig wachsende Siedlungsdichte und die Energiewende mit einer Zunahme von Konfliktfällen mit tieffrequenten Geräuschen in der Umgebung von Wohnbebauung gerechnet werden muss.

Abbildung 4: Potentielle Konfliktbereiche für tieffrequente Geräusche im Mustergebiet MD für die 80 Hz-Terz (links: Bestand 2014; rechts: Prognose 2030)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Geräusche mit Frequenzen unterhalb von 50 Hz weisen bei den untersuchten Quellen unabhängig von Baugebiet/ Szenario keine bzw. geringe Konfliktpotentiale auf. Der Infraschallbereich unter 20 Hz wurde nicht untersucht. Für die Terzbänder von 50 Hz bis 100 Hz wurden in den Mustergebieten teilweise großflächige Immissionsbelastungen ermittelt. In der Bestandssituation bestehen in der Regel Konflikte zwischen zwei Parteien (dem Betreiber einer nicht genehmigungsbedürftigen Anlage und dem Betroffenen). Die Prognosen in den Mustergebieten weisen darauf hin, dass es zunehmend Konflikte mit vielen Betroffenen in einem Gebiet geben wird. In der Umgebung von Wohnbebauung wird es entsprechend dieser Erkenntnisse zunehmend „brummen“.

Ferner konnte gezeigt werden, dass hinsichtlich des Ausmaßes der tieffrequenten Geräusche die Gebietskategorie bzw. das Schutzniveau und damit verbunden die Immissionsrichtwerte der TA Lärm eine erste Barriere darstellen. Technische Anlagen emittieren nicht nur im tieffrequenten sondern in einem weiten Frequenzbereich. Deshalb bieten die Immissionsrichtwerte für den A-bewerteten Beurteilungspegel der TA Lärm einen gewissen Schutz gegen einen vollkommen unkontrollierten Ausbau von Geräusche emittierenden Anlagen. In Gebieten, in denen die Immissionsrichtwerte bereits ausgeschöpft werden, sind die Möglichkeiten für den Betrieb zusätzlicher Anlagen grundsätzlich eingeschränkt. In Baugebieten mit höheren Immissionsrichtwerten ist daher ein größeres Potential für Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen zu erwarten als in Baugebieten mit höherem Schutzniveau.

Des Weiteren wird die Frage aufgeworfen, inwiefern das Prognoseverfahren der TA Lärm zur Berechnung der Schallausbreitung (DIN ISO 9613-2 [35]) für tieffrequente Geräusche geeignet ist. Eine mögliche Alternative zur Norm ist die Berechnung nach Nord2000, da diese bereits für Frequenzen ab 25 Hz definiert ist. Allerdings kann auch dieses geometrisch-empirische Berechnungsverfahren die spezifischen Eigenschaften tieffrequenter Wellenfelder nicht vollständig berücksichtigen. Mit numerischen Methoden hingegen konnten in Beispielrechnungen Wellenfelder speziell im tieffrequenten Bereich besser aufgelöst werden.

Defizite

Im Ergebnis dieser Untersuchung führen insbesondere die folgenden vier Defizite zu dem Konfliktpotential:

A) Grenzwertsetzung

Produktanforderungen an die Geräuschemissionen von stationären Geräten bestehen. Diese bieten jedoch keine Anreize für Hersteller, in die Minderung tieffrequenter Geräusche der Anlagen zu investieren. Die Änderung der Anforderungen ist nur über die Anpassung der Europäischen Harmonisierungsverordnungen möglich. Eine Einzelregelung für Deutschland könnte als Eingriff in den freien Warenverkehr aufgefasst werden und ist daher grundsätzlich nicht möglich. Es fehlt an wissenschaftlich gesicherten Grundlagen über die Lärmwirkung tieffrequenter Geräusche, speziell durch stationäre Geräte. Das angemessene Schutzniveau für tieffrequente Geräusche steht in der wissenschaftlichen Diskussion. Der Beurteilungsmaßstab der gültigen DIN 45680 kann für einzelne Immissionssituationen ungenügend sein. Die Schallmessung nach DIN 45680 ist teilweise aufwändig und bedarf einer besonderen Sachkunde.

B) Emissionen unbekannt

Beschränkungen der Emissionen stellen bislang ausschließlich auf A-bewertete Schalleistungspegel ab, die jedoch für den tieffrequenten Bereich nicht aussagekräftig sind. Hersteller müssen für die stationären Anlagen in der Umgebung von Wohnbebauung in der Regel keine Aussage über die Schallleistung im tieffrequenten Bereich treffen. Deshalb können Betreiber dieses Kriterium bei ihrer Kaufentscheidung nicht berücksichtigen.

C) Fehlende Prognose

Eine allgemeingültige Prognose der Schallausbreitung tieffrequenter Geräusche ist ohne Standardisierungen oder Festlegungen nur schwer bzw. mit hohem Aufwand möglich. Ein normatives Verfahren für die Prognose tieffrequenter Geräusche existiert in Deutschland nicht. Dazu fehlen eine verlässliche Quellenmodellierung, Emissionsdaten seitens der Hersteller und genormte Rechenverfahren für die besonderen physikalischen Bedingungen der Schallausbreitung einschließlich des Übergangs vom Freifeld in die Gebäude. Aus diesem Grund müssen die auf der Grundlage der TA Lärm gefertigten Schallimmissionsprognosen in der Regel keine Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden tieffrequenten Geräusche enthalten. Ebenso wenig kann deshalb eine behördliche Präventivkontrolle im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens die tieffrequenten Geräusche erfassen.

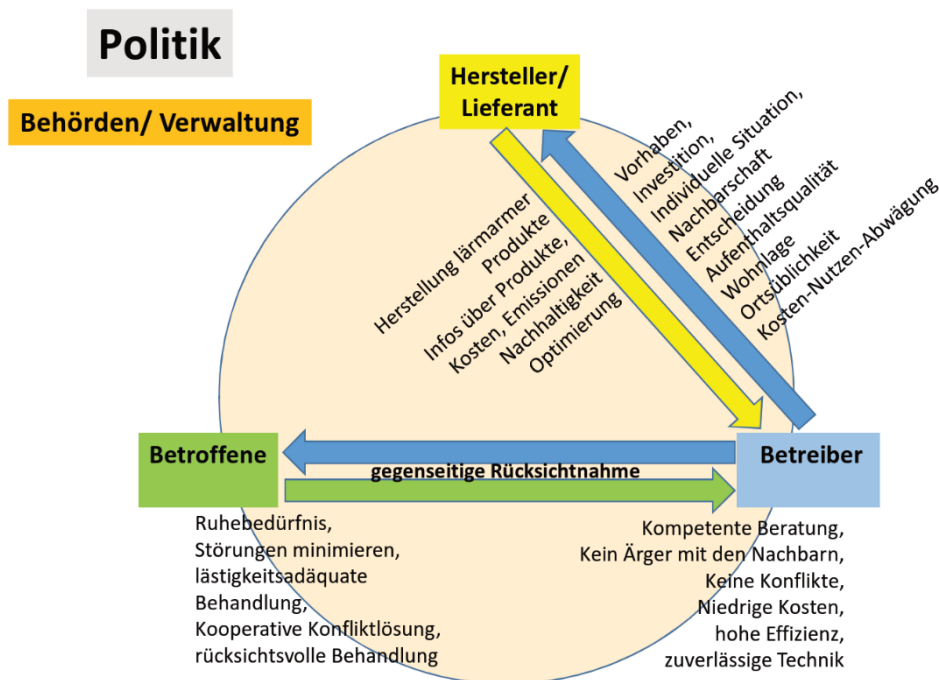
D) Genehmigungssituation

Bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen erfolgt keine behördliche Überprüfung der Immissionssituation. Sind nicht genehmigungsbedürftige Anlagen kein Teil einer Baugenehmigung, erfolgt auch keine Erfassung über das Bauordnungsrecht. Nachbarn haben zwar grundsätzlich die Möglichkeit, sich bei der Immissionsschutzbehörde über die Schallimmissionen des Nachbarn zu beschweren. Die Behörde verweist jedoch bei Streitigkeiten zwischen Nachbarn wegen Belästigung oder Nachteilen in der Regel auf den Zivilrechtsweg. Dies bedeutet, dass Betroffene von tieffrequenten Geräuschen von nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen in der Regel ihr Recht ohne Unterstützung durch die Immissionsschutzbehörden selbst durchsetzen müssen. Vertragliche Ansprüche (z. B. des Mieters gegen den Vermieter bei Störungen durch andere Mieter) sind grundsätzlich vor einem behördlichen Einschreiten geltend zu machen. Ein Rechtsanspruch auf eine Feststellung oder Beurteilung der Immissionssituation durch die Immissionsschutzbehörde besteht nicht.

Handlungsoptionen

Die vorliegende Studie kann diese Defizite nicht lösen. Sie bietet aber Lösungsvorschläge an, durch die das Konfliktpotential verringert werden kann. Dazu sind Politik, Verwaltung, die Hersteller und Lieferanten, die Betreiber sowie die Betroffenen zum Handeln aufgefordert. Es wurden Handlungsempfehlungen ausgearbeitet, die an die verschiedenen Akteure adressiert wurden. Diese Handlungsempfehlungen wurden in einem Leitfaden zusammengestellt, der im März 2017 vom Umweltbundesamt veröffentlicht wurde. Das Zusammenspiel der Akteure und Handlungsempfehlungen ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 5: Akteure und deren Ziele bei der Neuerrichtung einer nicht genehmigungsbedürftigen stationären Anlage mit tieffrequentem Geräuschpotential in der Umgebung von Wohnbebauung



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Summary

Introduction

For some years now, citizens have been increasingly complaining about impairments caused by low-frequency noise or so-called "buzzing" phenomena in the residential environment. Decentralized power generation plants with low-frequency noise components (e.g. heat pumps and CHP units), which are increasingly used in residential areas, are just one of the causes. Moreover, dense building envelopes as part of energy-saving measures can amplify low-frequency noise conflicts.

In fact, there are many possible causes for this development. In addition to new facility technologies in residential areas, the traffic infrastructure expansions, increasing density of settlements or modern building constructions can enhance the shift in the population's sense of burden towards low-frequency noise immissions.

However, people affected by low-frequency noise often perceive the level of protection against it as insufficient. Long-running neighborhood conflicts concerning low-frequency noise immissions therefore often end up in court.

This study aims to provide an overview of the characteristics of low frequency noise, the sources and propagation in residential areas, the current legal assessment situation as well as development scenarios and mitigation strategies. Statements on possible physical or psychological consequences of regular exposure of low-frequency noise are not content of this study.

Low-frequency sound

Low-frequency sounds are wavelike mechanical vibrations in an elastic medium (such as air, water etc.). The perception of low-frequency sound, however, is very different to medium and high frequency sound.

Due to large wavelengths (for example, considering a frequency $f = 10$ Hz, the wavelength in air is approx. $\lambda = 34$ m) low-frequency sound can propagate over long distances with lower attenuation and insulation than sound in the medium and high frequency range.

The perception of low-frequency sound varies depending on the frequency range, sound volume (sound pressure level) and the specific threshold of perception of those affected. With decreasing frequency ($f < 1000$ Hz) also the human (pitch) perception of sound decreases. Therefore, low-frequency noise can only be perceived/heard at higher sound pressure levels than regular sound. These hearing thresholds show small, subjective differences. A differentiation of individual tones from the low-frequency range is often not possible; they are therefore generally perceived as buzzing.

Volume changes of low-frequency sounds can be noticed faster than in the ordinary sensitive hearing range. Therefore, low-frequency noise can be annoying even for slight level increases (1 - 2 dB), which are barely perceptible at higher frequencies. In addition to audible buzzing sounds, low-frequency noise emissions can also cause feelings of pressure, discomfort, etc. Having such a high conflict potential, a special consideration and assessment of low-frequency noise immissions appear to be necessary.

Low-frequency sound sources

Low-frequency noise in the vicinity of residential buildings can be caused by i.a. stationary technical building services and equipment, e.g. air conditioning units, ventilation systems or air-heat pumps. In the course of decentralization of energy systems, these devices are increasingly applied in residential areas, where they constantly (stationary) emit noise. Figure 1 shows exemplary service facilities in external arrangement of quiet residential areas.

Devices of this type are increasingly being installed in housing properties, where they are being installed in increasing numbers and emit constant noise and thus leading to neighborhood conflicts. In addition to the former use of biogas, wind turbines and combined heat and power plants emerged as low-frequency sound sources, which usually affect residential areas from the distance.

Figure 1 Typical stationary domestic service facilities in the residential environment (left: air heat pumps; right: air conditioning units)



Source: Own compilation, Möhler + Partner Ingenieure AG

Many of the external sound sources (in particular, traffic noise) acting on a living environment must undergo a planning or approval procedure before being put into service. However, according to currently available German regulations, a final assessment of low-frequency immissions can only be made after the installation of the technical plant by sound measurements.

In contrast to facilities subject to approval, no official inspections are carried out prior to the construction of domestic technical equipment in private use.

Being distributed selectively all over the residential areas, these sound sources affect from multiple locations and can be even more annoying due to summation effects of low-frequency noise immissions. The stationary plants therefore have an increased conflict potential in the neighborhood.

In August 2013, the German Working Group on Immission Control of the Federal States and the Federal Government (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz – LAI) published a guideline on improved protection against noise from stationary equipment (Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten [10]) to counteract this neighbourly conflict potential. It includes practicable recommendations and a simplified immissions forecast method for stationary noise sources. However, the chosen acoustic model assumptions do not consider any peculiarities of the propagation and assessment of low-frequency noise. The problem of forecasting and assessing low-frequency noise in residential areas therefore persists.

Assessment of low-frequency noise

In Germany, immissions are regulated by the Federal Immission Control Act (Bundesimmissionsschutzgesetz, BImSchG). The BImSchG serves to protect of and prevent harmful environmental effects caused by immissions, including noise control as an important role in immission control.

The Technical Instruction on Noise Protection (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm [1]) specifies the vague legal concept of harmful environmental effects with regard to noise from technical facilities. The norm-concretizing administrative regulation TA Lärm, thus, has a considerable binding effect in court proceedings. This does not apply exclusively to the approval procedures of commercial-industrial plants, but according to the settled case law also the building planning law (cp. DIN 18005) or neighborhood noise due to annoyances or disadvantages according to §§ 906, 1004 BGB.

The general assessment method of the TA Lärm administrative regulation is based on the sound pressure level with A-frequency weighting. The A-weighting is a frequency-dependent filter that approximates human hearing sensation for sounds of different frequencies. As far as low-frequency noise is concerned, the general method of determination and assessment of the TA Lärm administrative regulation does not adequately specify a harmfulness threshold. The TA Lärm therefore contains specific regulations for low-frequency noise in the frequency range below 90 Hz and also includes structure-borne sound transmissions. In terms of determination and assessment of low-frequency noise the TA Lärm refers to the DIN 45680 (issue March 1997) with its supplement 1. However, the assessment standard of the valid DIN 45680 may be insufficient for individual immission situations. Therefore, DIN 45680 is in the scientific discussion and currently on revision, but has no new scientifically proven state of knowledge yet. The expected next draft of the revised version of DIN 45680 can only be considered as a new, secure state of knowledge if it has passed the phase of technical and scientific examinations and the involvement of all relevant bodies. Until then, DIN 45680 (March 1997 edition) and its accompanying supplement 1 still apply. The regulation of TA Lärm and the currently operative DIN 45680 is based on the assumption that the occurrence and significance of low-frequency noise can only be determined after commissioning the device eventually; a standardized prediction model does not exist.

Regulatory approval procedures

The BImSchG divides installations covered by its scope of application (§§ 3 Abs. 5, 2 Abs. 2 BImSchG) into plants subject to approval and plants, which are not in the need of an approval. The law places higher and different requirements on the owners of plants subject of approval and contains stricter penalties in the case of infringements than for plants, which are not in the need of approval. Plants named in the 4th BImSchV require approval. Those plants being subject to approval have to be controlled pre-emptively by authorities. Facilities, which are not in the need of approval (in the meaning of §§ 22 et seq. BImSchG i.S. of §3 Abs. 5 BImSchG) are therefore all installations subject to the BImSchG which do not require approval according to § 4 BImSchG. Stationary devices in residential areas, in particular air-heat pumps, ventilation and air conditioning systems, are not plants covered by the § 4 BImSchG. However, this does not mean that there are no obligations on operators for these plants. The basic obligations for plant operators of facilities in the meaning of §22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1,2 BImSchG also apply to prevention and restriction of low-frequency noise, either to economic activities or to private residential purposes. The operating obligation for facilities subject of approval, is only violated if the system relevantly contributes to the development of a harmful environmental impact that can be avoided using the state of technology.

A general precautionary obligation does not exist for the operators of such plants. If these plants are part of a larger project (e.g. a project that is subject to planning permission) a regulatory preventive check is carried out.

However, if stationary technical building equipment such as air heat pumps, ventilation and air conditioning systems or similar facilities are designed as individual projects, they are not subject to any preventive regulatory control. They require no approval according to BImSchG and are free of procedural

and licensing in the building codes of the federal states. Property owners can therefore set up and operate stationary technical building equipment without going through an official procedure that verifies compliance with neighborhood protection requirements and consideration.

Product-related requirements

Legal product requirements to improve the protection of people and environment can already be adopted before launching it.

Even if such requirements serve environmental protection, they also have the effect of market access conditions, since only those products that meet the requirements may be sold. Different launch conditions in the European Union could impede free movement of goods, which is a central element of the internal market (Art. 26 Abs. 2 AEUV, ex-Art. 14 Abs. 2 EGV). Product-related specifications are therefore usually subject of harmonization measures pursuant to Art. 114 AEUV (ex-Art. 95 EGV), which lead to an improvement of the internal market, in particular by ordering the free movement of products compatible with the harmonization measure.

Acoustic product requirements for low-frequency noise devices, which are not in the need of approval, such as space heaters, combi heaters with heat pump or air conditioners are compulsory and defined by the Ecodesign-Directive 2009/125/EG and the implementing regulations and are therefore also legally binding for Germany. However, the EU regulations only specify an A-weighted sound power level as a function of the product's rating power, which must be complied with. In addition, the permitted sound power levels in the EU of conventional heat pumps and air conditioning units are very high.

These also contain no annoyance addition and are well above the currently known level of noise reduction technology. Product-related specifications for the low-frequency noise components of a device do not exist. In order to ensure the free movement of goods in the internal market of the European Union, it is not possible under national law to lay down rules concerning specific product requirements which go beyond the harmonization measures already in place for the product under EU law.

Low-frequency noise effects

The human sensation of hearing and perception depends on various factors. Birdsongs or the sound of children playing are perceived completely different from the noise of the neighbor's air-heat pump even if the volume is the same. The causes for increased annoyance sensation of noise are complex. Low-frequency sound is often perceived as threatening. Moreover, the fact that affected people can directly attribute the noise to another person (plant operator) in their neighborhood can have negative impacts on the general noise effect. A financial contribution to the yield of a plant (e.g. electricity remuneration) can in turn increase their acceptance in terms of annoying noise. On the other hand, the annoyance increases when the sound immissions are accompanied by other irritations, for example correlating with vibrations or visual stimulations.

The periodic increase and decrease of the sound level, the so-called modulation of the noise, is considered to be a cause of increased interference. In addition to the specific time response, the sound impression can also attribute to the special technical character of the sound.

In the natural environment traffic noise, human communication, church bells, etc. are accepted, whereas new noise sources are often perceived as a local disorder. Therefore, apart from the objective-physical factors, various subjective-individual factors such as the duration of stimulation, the sensation of hearing and perception, the attitude towards the stimulus and the situation, etc. are decisive for the individual sensation of hearing.

Emissions

As the number of noise sources increases, the potential for conflict also increases. However, so far only A-weighted sound emissions have been restricted legally, forcing the facility's manufacturers to guarantee an A-weighted sound power level. An indication of frequency spectra is not obligatory and only specified in some cases informative for the octave bands from the 63-Hz-octave. In some standards applicable to the measurement of sound power levels (e.g. ISO 3740 series, DIN EN ISO 12102) frequencies above 100 Hz (125-Hz-Octave) are relevant only. Wind turbines are an exception. In this case, the manufacturers document the frequencies from the 32-Hz-Octave via the standardized method for determining the immission-effective sound power of the wind energy systems (DIN EN 61400-11).

For stationary systems in residential areas, the manufacturers generally do not provide any information about the frequency distribution of the sound power in the low-frequency range. Since the A-weighted sound power level (L_{WA}) is currently the only criterion for the noise generation of a product, customers can not assess the potential for conflict of low-frequency noise when making their purchase decision.

The example of fans (for example in recooling plants) or circulation pumps for the heating system shows that the manufacturers' interest in reducing the noise of their products (lowering the A-weighted sound power (L_{WA}) of their systems) can lead to

- a) the fact, that these products produce higher low-frequency noise emission (by slower-moving, larger rotors moving big amounts of air).
- b) the coverage of low-frequency noise due to the decrease of the medium and high-frequency noise components, resulting in low-frequency noise to become even more audible.
- c) an increased set up of allegedly quiet devices in a large number and / or locations closer to the neighborhood. The technical improvements of products and systems often do not have a positive effect on those affected.

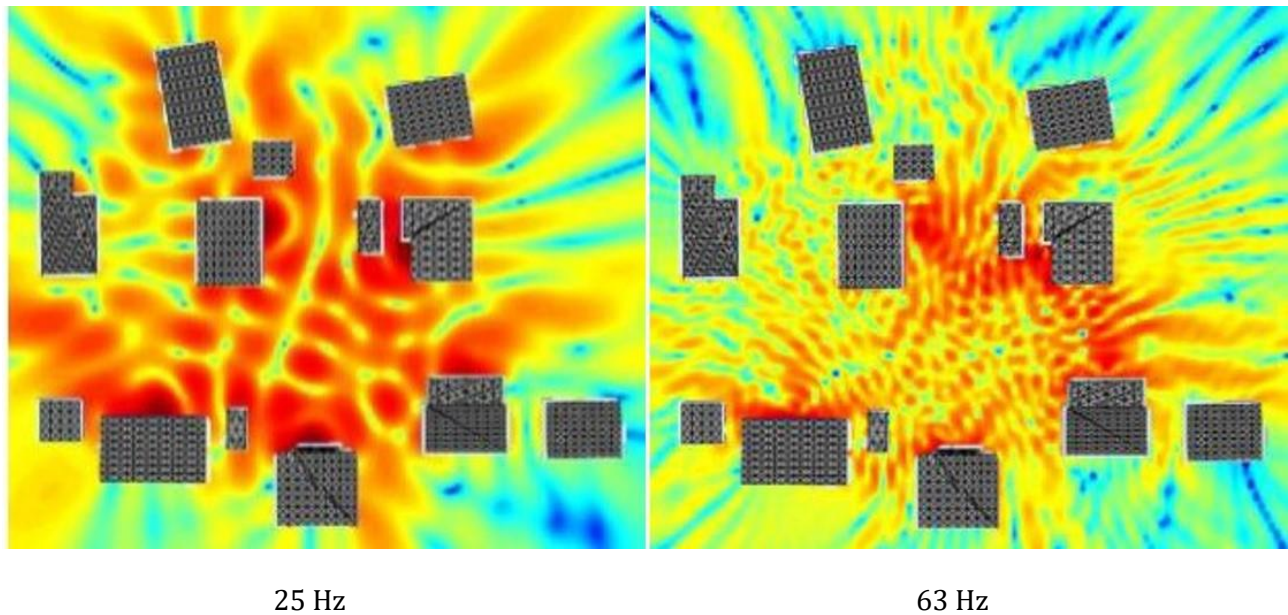
Propagation

Low frequency sound is less attenuated with increasing distance than medium and high frequency sound. Due to the large wavelengths, low-frequency sound can spread far in the neighborhood. Therefore, the impact area is relatively large.

Moreover, airborne and structure-borne sound propagation can occur strongly coupled. In particular, the structure-borne sound propagation can lead to airborne sound emissions from construction components in the transmission path or at the receiver, well below the human barrier of tactility of vibration (so-called secondary airborne sound, which then overlaps with the primary airborne sound).

The low-frequency sound waves can interfere unfavorably with reflections from sources and buildings and see-saw to local maxima and minima between the buildings. The following Figure 2 shows the propagation and superposition of a humming noise at 50 Hz from five stationary devices in a residential area; reddish areas mark high sound pressures, while blueish ones show lower pressure levels.

Figure 2: Exemplary comparison of the propagation of a 25 Hz and 63 Hz tone from five stationary units between residential buildings



Source: Own compilation, Möhler + Partner Ingenieure AG

Building and room acoustics

Exterior components of residential buildings (windows, walls, ceilings, roof) have reduced sound insulation for low frequency noise in contrast to medium and high-frequency. Structural protections (e.g. very thick concrete walls etc.) against low-frequency noise would be contrary to other requirements for healthy living conditions, in particular the necessary ventilation, lighting and provided free space of living.

Within (closed) rooms, standing sound waves can occur as well as oscillating components emitting secondary airborne sound, which could lead to a location-dependently, frequency-singular amplification of the sound immissions. The relevant room resonance frequencies for typical room geometries with a rectangular cross-section go from frequencies $f = 15$ Hz (very large rooms) to $f = 55$ Hz (small rooms). Differences in maxima and minima of sound pressure levels due to resonance effects can go up to 25 dB. For apartments, the usual ceiling resonance frequencies of conventional reinforced concrete ceilings are about 20 to 40 Hz or 50 to 80 Hz with floating screed. For wooden beam ceilings or light-weight concrete ceilings / composite ceilings, ceiling even lower eigenfrequencies of 10 to 20 Hz can be found. If storey ceilings are exposed to vibrations, the construction components oscillate predominantly in the resonance frequencies and emit secondary airborne sound into the room. The secondary airborne sound resulting from structure-borne noise can interfere unfavorably with primary airborne sound and also lead to local sound level increases in the room resonance frequencies.

Unusual sounds – special acoustic properties

Due to the specific perception of low-frequency sound and a reduced tone pitch perception, the sound of different stationary noise sources may sound subjectively similar. The noise of stationary equipment, such as a refrigeration system for the air conditioning of a computer server or the year-round operation of a combined heating and cooling system, does not decrease even in the evening and night hours, in which the ambient noise reaches its lowest point. The individual plant components (compressors, fans, motors, pumps, etc.) do not represent any novel sources of noise. The proven field methods of industrial acoustics can be used to reduce noise in the system components. The compact

design, the increasing system number and variability and their locations inside residential areas are, however, new.

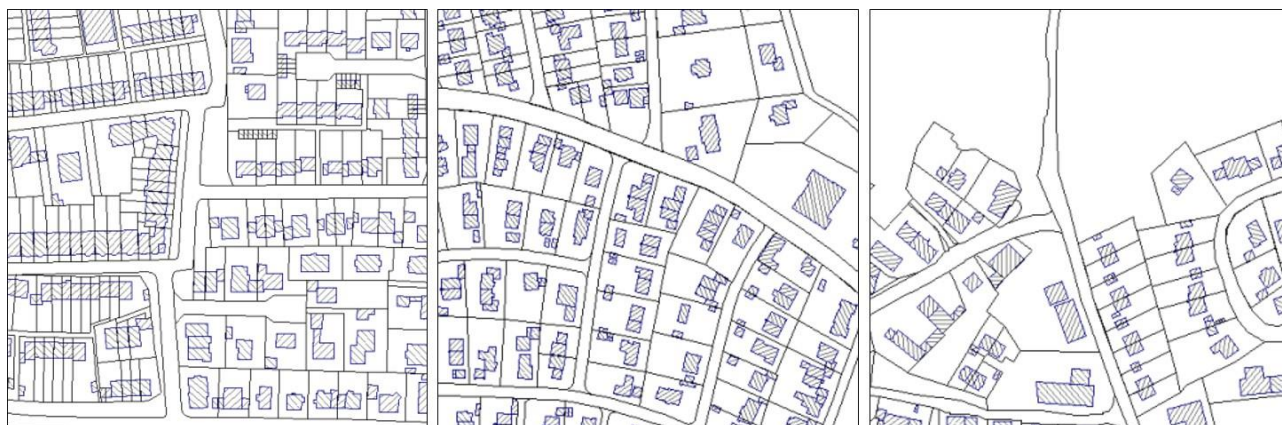
Quiet areas are permanently exposed to hitherto unknown noise emissions. And currently the disturbances of low-frequency noise can only be determined after product installation.

This development changed the overall sound situation in residential areas. Conflicts are often noticed only after a longer period of exposure and sensitization in the neighborhood has already appeared. This can lead to increased expenses of subsequent noise reduction measures as well as an increased nuisance perception in the neighborhood. In this case, the subjective perception of noise immissions can be disturbing even if the sound levels are actually acceptable.

Low-frequency noise development scenarios

As a part of this research project, low-frequency sound propagation was calculated for three different model housing areas (see the following Figure 3) using development scenarios from various noise sources.

Figure 3 Excerpts from the sample residential areas (WR, WA and MD)



Source: Own compilation, Möhler + Partner Ingenieure AG

The following low-frequency noise sources were considered in the development models: air heat pumps, air conditioning systems, CHP units and wind turbines. The number of air conditioners per residential area and time scenario was chosen in accordance with the (forecast) figures for air conditioners in Germany for the year 2015 and 2030 in relation to the total number of residential buildings in Germany. The number of air heat pumps per residential area and time scenario was chosen according to sales figures and forecasts from the industry (share in total heat generators in Germany 2014: 2,8 % and 2030: 8,1 %)

The calculations show that due to a growing settlement density plus the transformation of the energy system, an increase in low-frequency noise conflicts in the residential environment can be expected.

The model calculations show increasing conflict potentials of low-frequency noise in the future scenarios. Figure 4 plots the exemplary development of low frequency sound in the model area (MD – village area). Exceedings of the frequency-dependent hearing threshold are shown in reddish.

Figure 4 Potential low-frequency conflict areas in the model MD for the 80 Hz-third-octave (left: today, right: forecast)



Source: Own compilation, Möhler + Partner Ingenieure AG

Low-frequency noise with frequencies below the 50-Hz-Third-Octave (the infrasound range below 20 Hz has not been investigated) from the considered noise sources show no or only few low-frequency noise conflict potentials. For the third-octave bands from 50 Hz to 100 Hz, large-scale pollution loads were determined. While the stock situation usually involves conflicts over non-approved inpatient facilities between two parties (the operator and the concerned individual), the forecasts indicate that there will be an increasing conflict with many stakeholders.

The land-use-dependent immission guideline values as defined by the TA Lärm can impede the extent of low-frequency sound in a limited context. Since technical systems not only radiate low-frequency noise but sound over a wide frequency range, the immission standards for the A-weighted assessment level of TA Lärm provide some protection against uncontrolled expansion of emitting facilities. In areas where the immission benchmarks have already been exhausted, the possibilities for operating additional facilities are limited. In village areas with higher immission standards, which are particularly prevalent in rural areas, a greater increase in low-frequency sound conflicts is to be expected than in general residential areas or residential-only areas.

In addition, it is questionable whether and to what extent the determination of the sound propagation of low-frequency noise using the DIN ISO 9613-2 propagation approach – which represents the usual forecasting method of the TA Lärm – is suitable. A possible alternative is the calculation basis of the so-called Nord2000 method. However, even this geometric-empirical calculation method can not adequately take into account the specific properties of low-frequency wave fields.

Deficits

Especially the following four deficits can lead to low-frequency noise conflict potentials:

A) Setting limit values

With regard to low-frequency sound, there is a lack of scientifically proven principles about the human noise effects. The adequate level of protection for low-frequency sound is currently under scientific review. The assessment standard of the valid DIN 45680 may be insufficient for individual immission situations. Sound measurements according to DIN 45680 are sometimes complex and require special expertise.

B) Emissions unknown

Restrictions on emissions have hitherto exclusively focused on A-weighted sound power levels, which not necessarily define low-frequency noise emissions. For stationary systems in residential areas, the manufacturers generally do not provide any information about the frequency distribution of the sound power in the low-frequency range. Manufacturers should identify and document the low-frequency sound emissions of their installations helping facility operators on purchase decisions.

C) Missing forecast

A generalized forecast of low-frequency noise immissions is usually difficult without standardization and definitions due to the special physical conditions of sound propagation and the specific influences of buildings and building ensembles

A normative or binding procedure for the prognosis of low-frequency noise does currently not exist in Germany. For this reason, the sound immission forecasts based on TA Lärm generally do not contain any statements on expected low-frequency noise. Even an official preventive control can not usually detect the low-frequency noise during an approval procedure, because no standardized forecasting procedure exists.

D) Approval situation

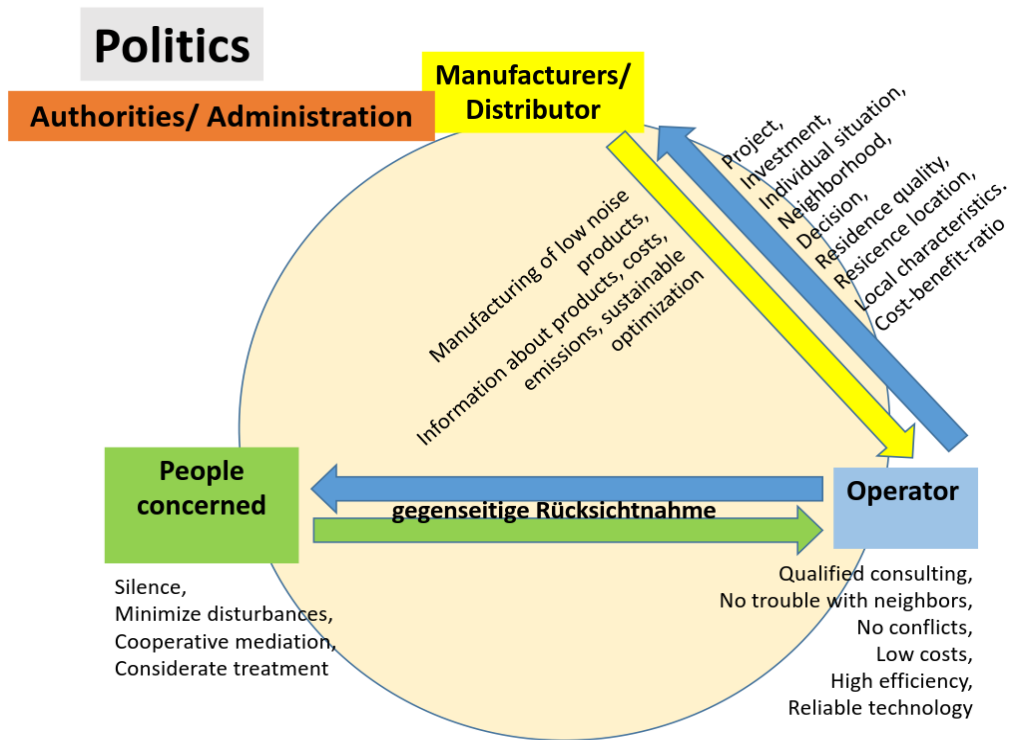
Immission situations of facilities not subject of approval are not officially reviewed. If these facilities are no part of a building permission, there will be no registration on building regulations, either.

Although neighbors generally have the opportunity to complain about the sound immissions of neighbors to immission control authorities, authorities usually act discretionary error freely, referring to civil law. This applies in case of easy assessment and similar parties (for example to neighbors).

Courses of action

The identified shortcomings provide a framework in which, in particular, the manufacturers / suppliers, their customers (= facility operators) and the neighbors (= affected parties) are able to counteract low-frequency noise immission (see following Figure 5). Different recommendations for action were addressed to the various stakeholders. The recommendations were compiled in a guideline published by the Federal Environment Agency in March 2017.

Figure 5 Actors and their aims during the construction of a new license-free stationary system with low-frequency sound potential in the home environment



Source: Own compilation, Möhler + Partner Ingenieure AG

1 Einleitung

Seit einigen Jahren klagen Bürgerinnen und Bürger vermehrt über Beeinträchtigungen durch tieffrequente Geräusche oder sogenannte Brummtophonphänomene im Wohnungsumfeld. Häufig sind es Anlagen, Geräte und Maschinen zur dezentralen Energieerzeugung (Wärme, Kälte, elektrische Energie usw.), die so errichtet und betrieben werden, dass ihre tieffrequenten Geräuschanteile auf benachbarte Wohnnutzungen einwirken. Betroffene akzeptieren tieffrequente Geräusche innerhalb von Wohnräumen oberhalb der Schwelle ihrer Wahrnehmbarkeit selten. Nach Aussage zahlreicher Betroffener werden tieffrequente Geräusche technischer Anlagen in Wohnungen als ortsunüblich, bedrohlich und fremd empfunden.

Für diese Entwicklung gibt es eine Vielzahl an Ursachen. In den letzten Jahren haben sich Technologien stark gewandelt, insbesondere die Nutzung regenerativer Energien bei gleichzeitiger Dezentralisierung von Anlagen zur Energieerzeugung und -nutzung. Aufgrund aktueller Entwicklungen in Deutschland werden derartige Geräuschquellen insbesondere in der Umgebung von Wohnbebauung in Zukunft häufiger auftreten. Der Ausbau der Infrastruktur bei zunehmender städtebaulicher Verdichtung in Ballungsgebieten erfordert erhöhte Lärminderung im Städtebau. Moderne Baukonstruktionen mit dichten Gebäudehüllen im konventionellen Wohnungsbau schützen zwar vor höherfrequenten Geräuschen, lassen jedoch tieffrequente Geräusche nahezu ungehindert passieren. All dies verschiebt das Belastungsempfinden der Bevölkerung in Richtung tieffrequenter Geräuschimmissionen. Es wird daher vielerorts gefordert, die gesetzlichen Regelungen zum Schutz gegen Lärm durch eine umfassende Beurteilung bzw. Begrenzung tieffrequenter Geräusche zu ergänzen.

Wenn nachweislich die Anhaltswerte der derzeit gültigen Normen für tieffrequente Geräusche eingehalten werden, beanstanden Betroffene häufig, dass dieses Schutzniveau nicht ausreiche. Gutachter können diese Einschätzung in vielen Fällen bestätigen. Mit der Überarbeitung der Normen soll diesem Umstand Rechnung getragen werden. Dennoch ist nicht zu erwarten, dass ein strengeres Regelwerk allein alle Nutzungskonflikte mit tieffrequenten Geräuschen in der Umgebung von Wohnbebauung lösen kann.

Forschungsbedarf besteht bezüglich der Quellen, Entstehung, Minderung, Ausbreitung und Wirkung tieffrequenter Geräusche. Im Rahmen des Vorhabens werden die maßgebenden Quellentypen, die Möglichkeiten zur quellenspezifischen Geräuschminderung und deren störende Einwirkungen auf typische Wohnnutzungen untersucht. Die Wirkung tieffrequenter Geräusche auf den Menschen ist nicht Gegenstand der Studie.

Technischen Minderungsmaßnahmen werden Maßnahmen auf dem Ausbreitungsweg und beim Empfänger sowie organisatorische Maßnahmen gegenüber gestellt. Die Wirksamkeit, Praxistauglichkeit, Kosten und der Aufwand zur Umsetzung der Maßnahmen werden eingehend beurteilt. Da diese Maßnahmen unterschiedliche rechtliche Aspekte berühren, ist ein Schwerpunkt des Vorhabens eine juristische Prüfung der gefundenen Ansätze durch ein umfassendes Rechtsgutachten.

Die Ergebnisse werden in einem praxisgerechten Leitfaden dargelegt, der eine effektive Minderung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung ermöglichen soll. Der Leitfaden enthält in kompakter Form Empfehlungen für die verschiedenen Interessensvertreter (Betreiber, Planer, Betroffene, Industrie, Politik, Verwaltungsbehörden).

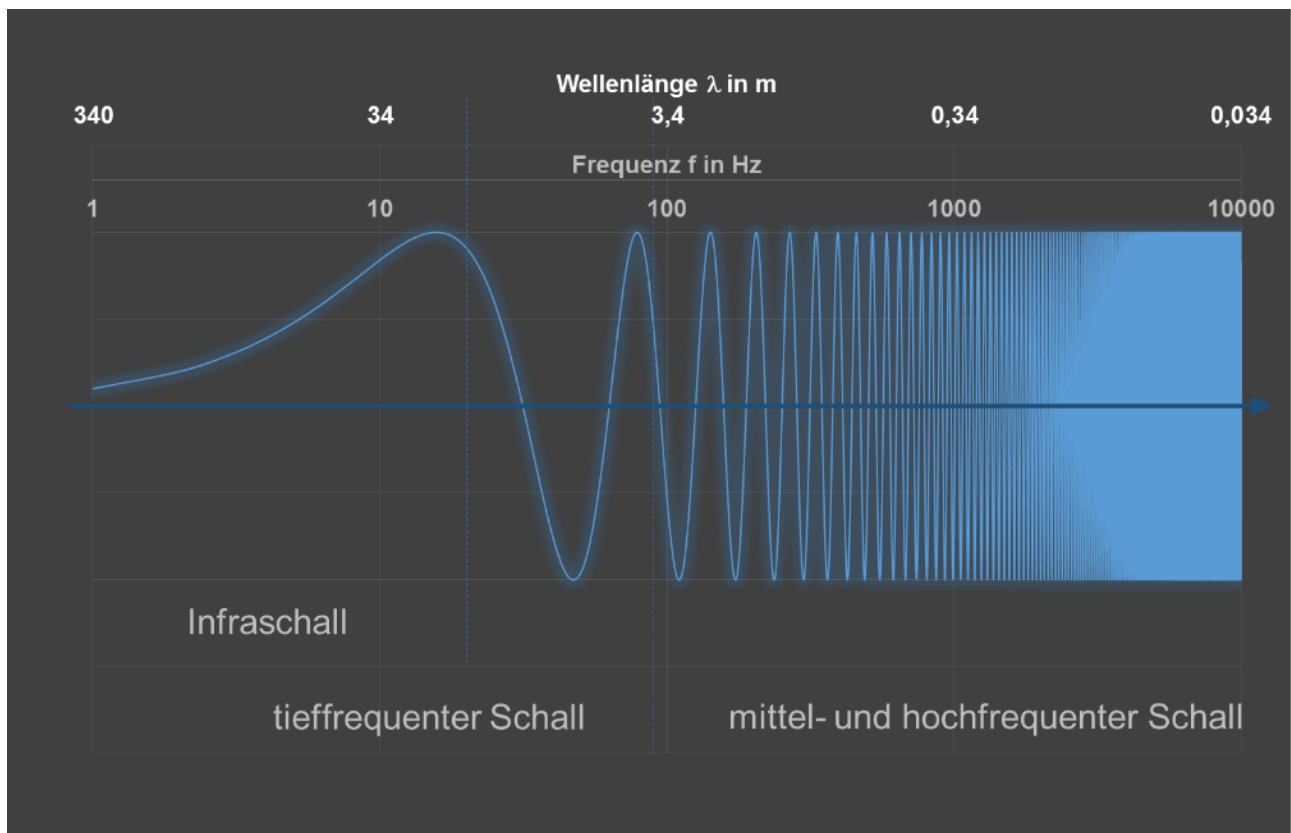
2 Akustische Grundlagen

2.1 Messung tieffrequenter Geräusche

2.1.1 Definition

Tieffrequenter Schall und Infraschall sind mechanische Schwingungen und Wellen in einem elastischen Medium. Abbildung 6 zeigt die Frequenzbereiche des Schalls zwischen 1 Hz und 10 kHz. Aufgrund der Besonderheiten in der Bauakustik und der Wirkung auf den Menschen definiert das Robert-Koch-Institut [88] Schall mit Frequenzen unter 200 Hz als tieffrequent. Der Bereich des Infraschalls¹ befindet sich unterhalb von 20 Hz. Der tieffrequente Schall ist langwelliger und dadurch energiereicher als der „normale“ Hörschall. Tieffrequenter Schall ist somit ein Anteil des Schalls mit spezifischen physikalischen Eigenschaften, der grundsätzlich in vielen Geräuschen enthalten ist. Bestehen die Hauptenergieanteile von Geräuschen aus tieffrequentem Schall, spricht man von tieffrequenten Geräuschen. Nach der Definition der TA Lärm [1] sind Geräuschimmissionen tieffrequent, wenn sie Hauptenergieanteile bei Frequenzen von weniger als 90 Hz aufweisen. Sie umfassen deshalb per Festlegung sowohl den Infraschallbereich als auch den tieffrequenten Hörschall. Typische elektrische Anlagen in der Umgebung von Wohnbebauung enthalten Hauptenergieanteile bei 100 Hz (doppelte Netzfrequenz). Deshalb schließt dieses Vorhaben den Bereich bis 100 Hz als tieffrequente Geräusche ein.

Abbildung 6: Frequenzbereiche und Wellenlängen des tieffrequenten Schalls



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

¹ Infraschall, (von „infra“, lat. für „darunter“) Schall mit Frequenzen unterhalb des üblicherweise vom Menschen hörbaren Frequenzbereichs.

Aufgrund teilweise sehr großer Wellenlängen breiten sich tieffrequente Geräusche über große Distanzen mit geringerer Dämpfung und Dämmung aus als Geräuschanteile im mittleren und hohen Frequenzbereich. Ein Ton mit einer Frequenz von $f = 10$ Hz hat beispielsweise eine Wellenlänge von $\lambda = 34$ m. Auch die Abschirmwirkung von Hindernissen ist bei tiefen Frequenzen geringer als bei hohen Frequenzen.

2.1.2 Schallmessgeräte und Konventionen

Geräusche werden üblicherweise mit sogenannten Schallpegelmessern gemessen. Die meisten Schallpegelmesser messen zwar physikalisch einen wechselnden Luftdruck. Als Messergebnis wird jedoch ein Schalldruckpegel angezeigt oder ausgegeben. Die angezeigten Messwerte können wie die gemessenen Geräusche in Amplitude (Lautstärke oder Pegel), Spektrum (Klang oder Frequenz) und Kontinuität (Häufigkeit, Dauer oder Zeit) variieren. Alle drei Dimensionen werden im Schallpegelmesser technisch konfektioniert oder bewertet, um sie wirkungsentsprechend darstellen oder weiterverwenden zu können. Die angegebenen Messwerte werden daraufhin entsprechend ihrer Bewertungen bezeichnet. Zum Beispiel stellt der im Immissionsschutz häufig verwendete L_{pAF} einen Schalldruckpegel (L für Pegel und p für Druck) mit der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung F dar. In den folgenden Abschnitten werden diese Konventionen und Filter näher erklärt.

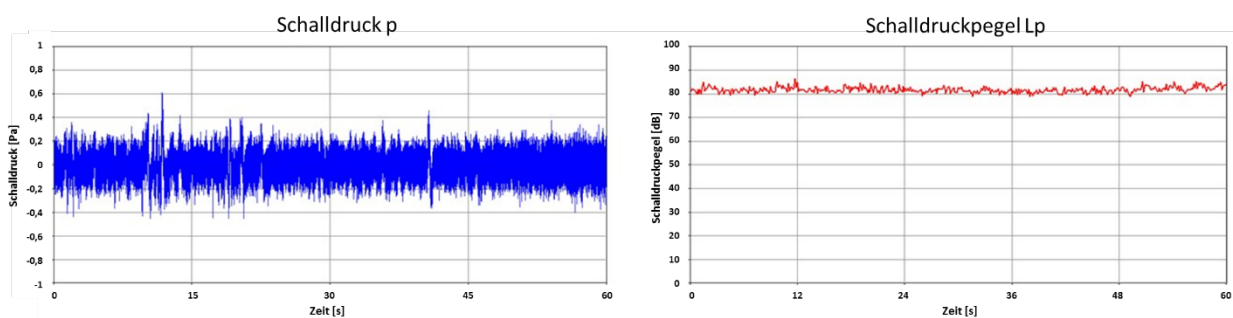
Im Verwaltungshandeln werden ausschließlich eichfähige Schallpegelmesser der Klasse 1 [32] akzeptiert. Diese weisen eine untere Grenzfrequenz von 3,5 Hz auf. Mit entsprechenden Tieffrequenz-Messmikrofonen sind Luftschallmessungen bereits ab 1 Hz möglich. Deshalb sind diese Messgeräte auch zur Ermittlung von tieffrequenten Geräuschen geeignet.

2.1.3 Schalldruck und Schalldruckpegel

Schall wird physikalisch betrachtet durch mechanische Schwingungen elastischer Medien (fest, flüssig oder gasförmig) verursacht. Für tieffrequenten Schall sind insbesondere Schallübertragungen durch die Luft (Luftschall) oder vom Erreger durch den Untergrund bis zum Wohngebäude (Körperschall) relevant. Die Änderung des um den statischen Luftdruck schwankenden Schalldrucks kann mit der Amplitude und der Phase beschrieben werden. Für den Immissionsschutz ist der wirkende Anteil des Geräusches, der Effektivwert des Schalldrucks, maßgebend.

Der Schall ist somit eine Wechselgröße mit Minima und Maxima. Im Fall des Luftschalls ist der statische Luftdruck der Gleichanteil. Das menschliche Gehör kann Schalldrücke (p) in Pascal in 10^6 Größenordnungen von ca. $0,00002 \text{ Pa} = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ (Hörschwelle) bis ca. 20 Pa (Schmerzschwelle) unterscheiden. Um die mathematische Beschreibung des Schalldrucks zu vereinfachen, wurde deshalb der Schalldruckpegel (L_p) in Dezibel (dB) als logarithmische Verhältnissgröße $L_p = 20 \cdot \log_{10}(p/p_0)$ mit $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ eingeführt. Abbildung 7 zeigt beispielhaft den Zeitverlauf eines gemessenen Geräusches eines Verbrennungsmotors als Schalldruck (links) und als unbewerteten Schalldruckpegel (rechts). Bei einem Effektivwert von ca. $0,2 \text{ Pa}$ Schalldruck ergibt sich hierbei ein Schalldruckpegel von 80 dB .

Abbildung 7: Schalldruck und Schalldruckpegel eines Verbrennungsmotors (exemplarisch)

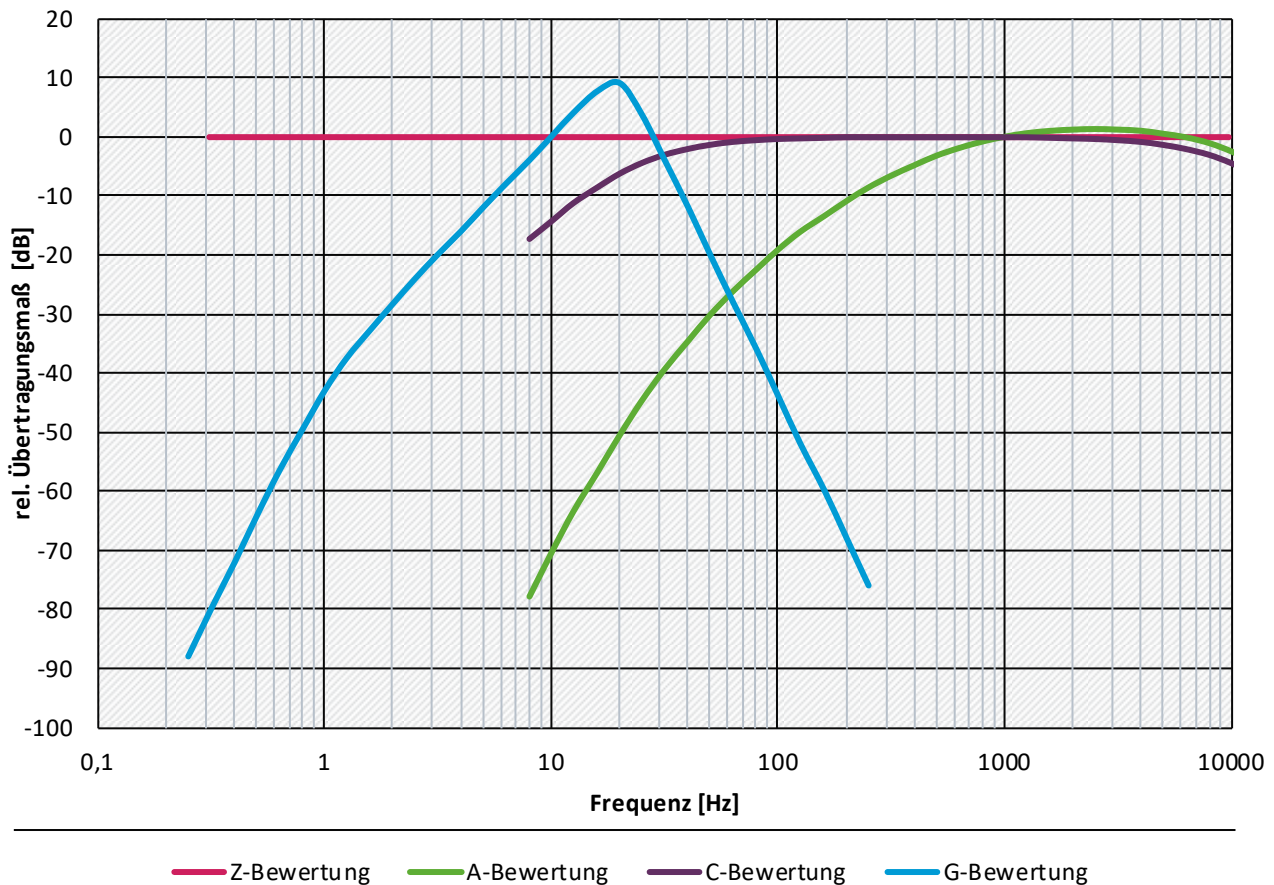


Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

2.1.4 Frequenzbewertung

Das menschliche Gehör und die menschliche Hörwahrnehmung sind frequenzabhängig. Im Bereich des Schallimmissionsschutzes werden Schalldruckpegel als kennzeichnende Parameter ermittelt und beurteilt. Um mit Einzahlwerten von Schalldruckpegeln die Hörwahrnehmung zu beschreiben oder bestimmte Signalanteile in einem Schallsignal hervorzuheben, werden verschiedene Frequenzfilter verwendet. Diese Filter werden durch international genormte Frequenzbewertungskurven beschrieben. Abbildung 8 zeigt typische Frequenzbewertungskurven.

Abbildung 8: Typische Frequenzbewertungskurven (Z-, A-, C- und G-Bewertung)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler+Partner Ingenieure AG

Bei der Z-Bewertung handelt es sich um eine unbewertete Darstellung des physikalisch gemessenen Schalldrucks. Dementsprechend ist sie in Abbildung 8 als horizontale Gerade dargestellt. Die Z-Bewertung wird auch als lineare Bewertung bezeichnet.

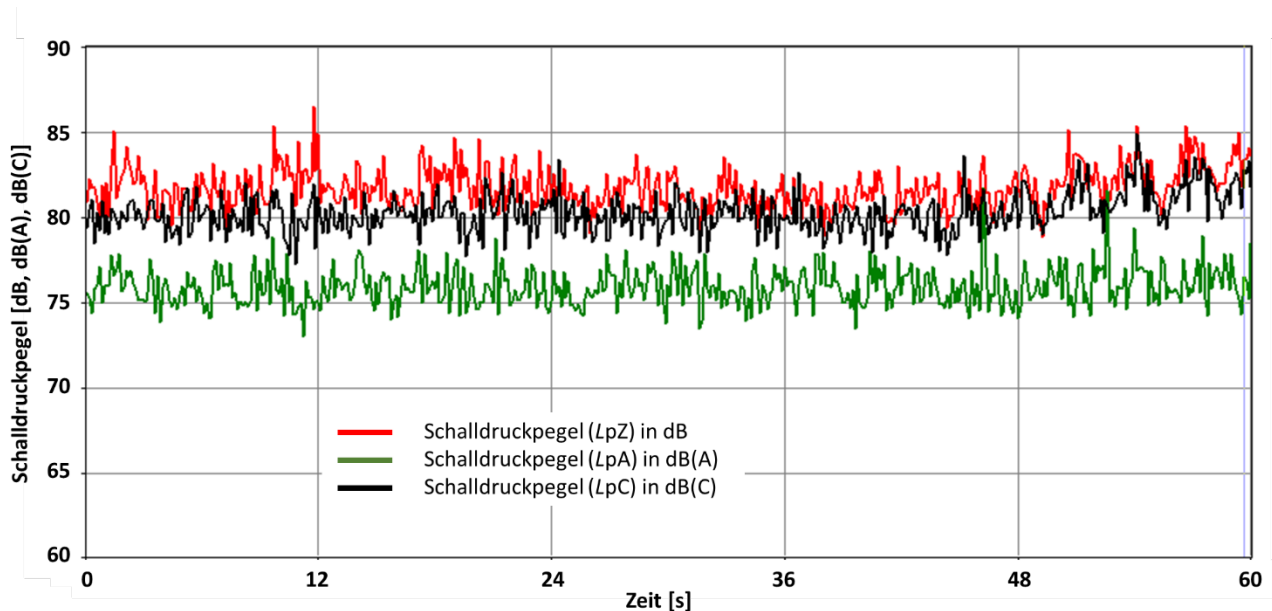
Die A-Bewertung ist ein frequenzabhängiges Filter, das sich näherungsweise an der menschlichen Hörempfindung für Geräusche unterschiedlicher Frequenz orientiert. Sie entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 20 - 40 phon und ist damit primär für die Beurteilung niedriger Schalldruckpegel geeignet (z. B. im Umweltschutz).

Die C-Bewertung entspricht den Kurven gleicher Lautstärkepegel bei ca. 80–90 phon und ist damit primär für die Beurteilung höherer Schalldruckpegel geeignet (z. B. im Arbeitsschutz, Schießlärm). In der TA Lärm [1] und der DIN 45680 [27] wird die Differenz von C-bewertetem Schalldruckpegel und A-bewertetem Schalldruckpegel ($L_C - L_A$) als Indikator für das Vorliegen von ausgeprägt tieffrequenten Geräuschen verwendet. Dies ist möglich, weil sich die beiden Bewertungskurven insbesondere im Frequenzbereich unter 200 Hz deutlich unterscheiden (siehe Abbildung 8).

Die G-Bewertungskurve kann zur Bewertung von Infraschall verwendet werden. Sie erreicht ihr Maximum bei 20 Hz und fällt im Frequenzspektrum nach beiden Seiten hin steil ab. Eine praktische Anwendung der G-Bewertung liegt beispielsweise bei der Definition von Störfestigkeiten von schwingungs-sensiblen technischen Geräten. Hörschallkomponenten haben praktisch keinen Einfluss auf den G-bewerteten Pegel. Ein G-bewerteter Pegel kann deshalb nur in Verbindung mit anderen Schallpegeln zur Beschreibung von Geräuschen genutzt werden. Im Immissionsschutz liegen bisher keinerlei Hinweise darauf vor, dass Umgebungsgeräusche im Infraschallbereich zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können. Es bestand deshalb bisher keine Notwendigkeit, ein wirkungsgerechtes Beurteilungsverfahren für den Infraschall zu entwickeln. Aus diesem Grund findet die G-Bewertung keine Anwendung im Immissionsschutz.

Wendet man die verschiedenen Frequenzbewertungen auf das vorgenannte Beispielgeräusch (Abbildung 7) an, so ergeben sich Zeitverläufe des Schalldruckpegels mit unterschiedlichen Amplituden. Abbildung 9 zeigt die frequenzbewerteten Verläufe des Spitzenschalldruckpegels (L_{peak}) ohne Zeitbewertung.

Abbildung 9: Frequenzbewertungen des Schalldruckpegels am Beispiel des Verbrennungsmotors am Emissionsort (an der Anlage)



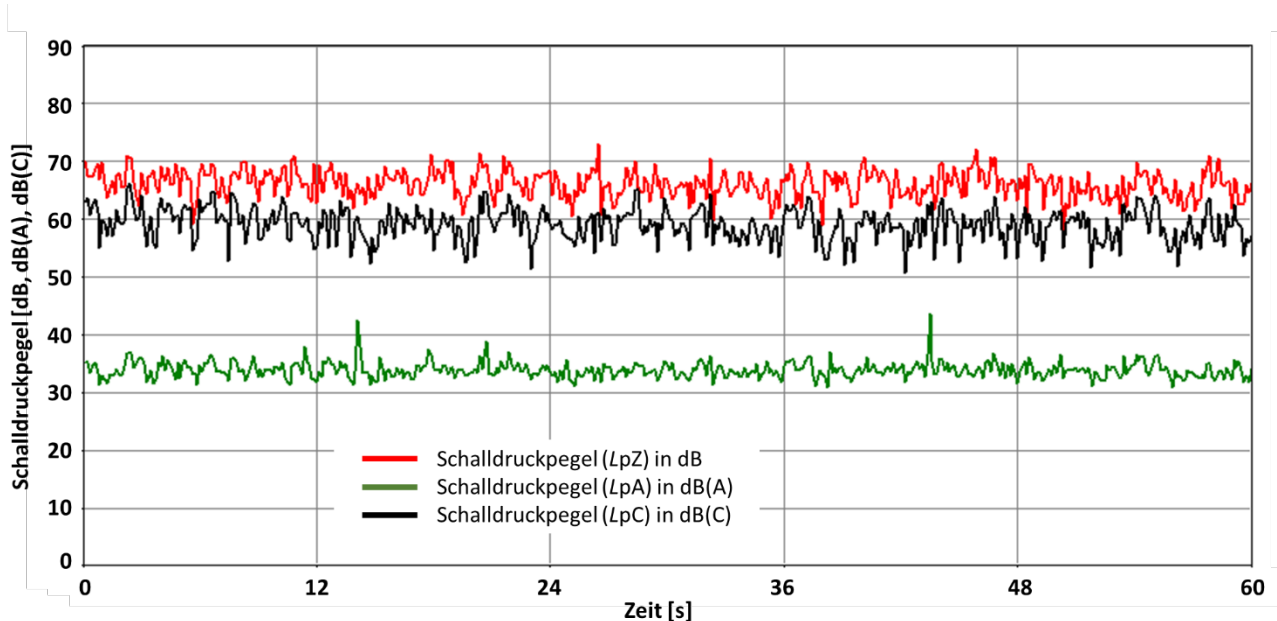
Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Der unbewertete Schalldruckpegel (Z-Bewertung) ist bei tieffrequenten Geräuschen stets am größten. Den Infraschallanteil eines Geräusches kann man in etwa aus der Differenz von unbewertetem und C-bewertetem Schalldruckpegel schätzen. Im Beispiel ist der Infraschallanteil gering. Aus der Differenz von C- und A-bewertetem Schalldruckpegel können die tieffrequenten Anteile eines Geräusches eingeschätzt werden. Im Beispiel wäre die Differenz von $L_C - L_A$ etwa 5 dB und damit kein tieffrequentes Geräusch. Abbildung 9 zeigt Schalldruckpegel von ca. 76 dB(A), 81 dB(C) und 82 dB(Z) am Emissionsort, d. h. in der Nähe des Verbrennungsmotors. An einem Immissionsort, zum Beispiel im Wohnzimmer eines Nachbarn, können sich die Verhältnisse allerdings völlig anders darstellen.

Abbildung 10 zeigt die in einem Innenraum gemessenen Schalldruckpegel desselben Verbrennungsmotors. Durch Körperschallübertragungen und eine gute Schalldämmung der Außenbauteile der Gebäude im Frequenzbereich über 200 Hz ist der A-bewertete Schalldruckpegel ca. 40 dB(A) niedriger als am Emissionsort. Die tieffrequenten Geräuschanteile sind demgegenüber effektiv lediglich ca.

20 dB(C) niedriger bzw. wurden durch Raumreaktionen insoweit verstärkt. Dadurch wäre das Geräusch am Immissionsort mit einer $L_C - L_A$ - Differenz von ca. 25 dB als ausgeprägt tieffrequent einzustufen.

Abbildung 10: Frequenzbewertungen des Schalldruckpegels am Beispiel des Verbrennungsmotors am Immissionsort (im Wohnzimmer eines Nachbarn)



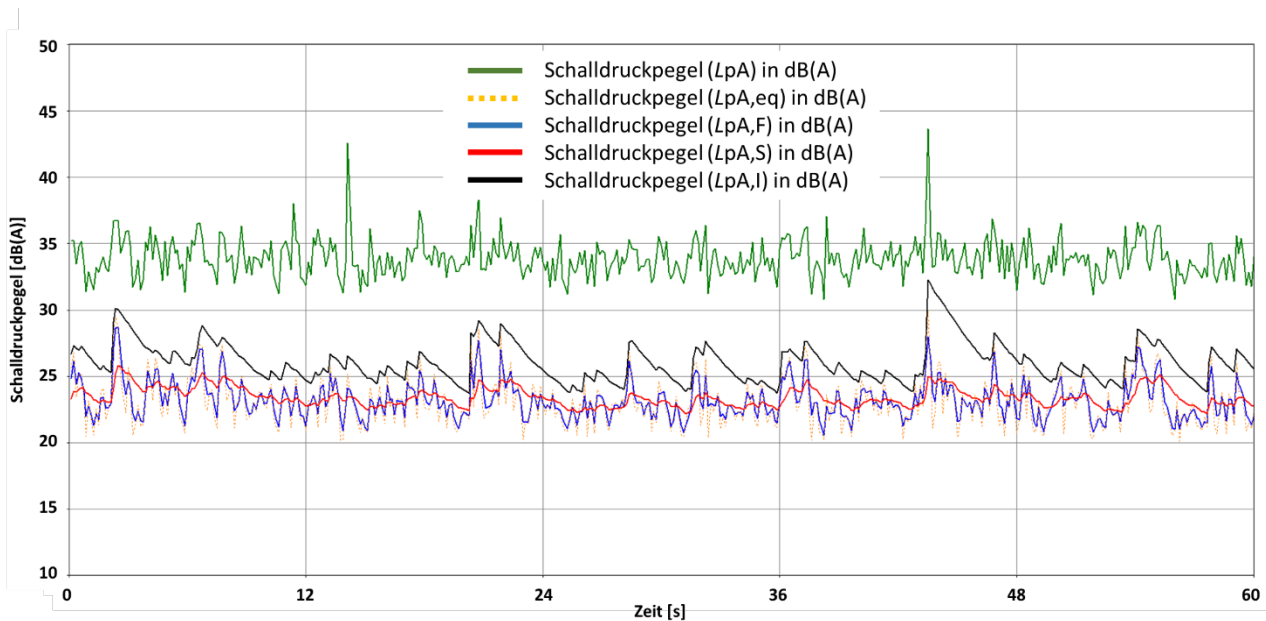
Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

2.1.5 Zeitbewertung

Die Zeitbewertungen bei der Messung des Schalldruckpegels legen technisch fest, mit welcher Trägheit der Messwert dem wechselnden Schalldruck folgen soll. Die im Immissionsschutz übliche Fast-Zeitbewertung (Index F) bildet näherungsweise die Trägheit des menschlichen Gehörs mit einer Zeitkonstante von 125 ms nach. Wird mit der Fast-Bewertung gemessen, so müssen sehr niedrige Frequenzen (unter 8 Hz) über entsprechend lange Zeiträume (mindestens 10 s) energieäquivalent gemittelt werden. Für sehr kurzzeitige Schallereignisse (< 200 ms) existiert die Impuls-Zeitbewertung (Index I). Diese verwendet beim Pegelanstieg eine Zeitkonstante von 35 ms und beim Pegelabfall eine Zeitkonstante von 1,5 s. Durch die unterschiedlichen Anstiegs- und Abfallträgheiten ist diese Zeitbewertung denkbar ungeeignet für die Messung tieffrequenter Geräusche. Für langsam veränderliche Pegel kann die Slow-Zeitbewertung (Index S) verwendet werden. Die Slow-Zeitbewertung verwendet eine Zeitkonstante von 1 s. Die Zeitbewertungen Impuls und Slow werden für die Ermittlung tieffrequenter Geräusche praktisch nicht verwendet.

Ausgehend von dem L_{pA} des Beispiels aus Abbildung 10 sollen die Auswirkungen der Zeitbewertungen auf den Schalldruckpegelverlauf gezeigt werden. In Abbildung 11 ist der Zusammenhang des A-bewerteten Schalldruckpegels L_{pA} jeweils mit der Fast-, Slow- und Impuls-Zeitbewertung erkennbar. Zum Vergleich ist auch der nicht zeitbewertete Schalldruckpegel als Spitzenschalldruckpegel $L_{pA,peak}$ dargestellt.

Abbildung 11: Zeitverlauf des zeitbewerteten Schalldruckpegels (exemplarisch)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Maßgebend für den relativ großen Einfluss der Zeitbewertungen ist die gleitende Effektivwertbildung. Diese ist ohne Zeitbewertung punktiert als $L_{pA,eq}(t)$ dargestellt. Ein Ton bei 1000 Hz mit gleichbleibender Lautstärke ergibt beispielsweise einen konstanten Zeitverlauf des Schalldruckpegels ($L_{pAF}(t) = \text{konstant}$). Einige stationäre Anlagen erzeugen jedoch regelmäßig Geräusche mit wechselndem Zeitverlauf. Zum Beispiel ändern sich die Drehzahlen von Ventilatoren bei Klimageräten und Luftwärmepumpen entsprechend der erforderlichen Kühl- oder Heizleistung. Dies findet meist genauso unvorhersehbar statt wie plötzliche An- und Abschaltvorgänge zum Abtauen dieser Anlagen in der kalten Jahreszeit.

Um eine Schallquelle akustisch beschreiben zu können, sind daher neben der Schallenergie einer Anlage (z.B. dem Schallleistungs- oder Schallintensitätspegel) auch die Zeit- und Frequenzzusammensetzung relevante Größen.

2.1.6 Psychoakustische Kenngrößen

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebene Systematik geht von einem energieäquivalenten Ansatz zur Ermittlung und Beurteilung der Geräusche technischer Schallquellen aus. Durch entsprechende Filter (Zeitbewertung, Frequenzbewertung) und Zuschläge können aus Prognose- oder Messwerten belästigungsäquivalente Beurteilungspegel gebildet werden. Es stellt sich die Frage, ob für tieffrequente Geräusche andere Parameter besser geeignet sind, um eine solche Beurteilung vorzunehmen.

In Tabelle 1 sind bekannte psychoakustische Kenngrößen und deren Eignung für die Beurteilung tieffrequenter Geräusche dargestellt. Nach dieser Einschätzung könnten die Kenngrößen Lautheit und Schwankungsstärke im Ansatz für eine Beurteilung tieffrequenter Geräusche geeignet sein. Allerdings sind beide Parameter nicht systematisch an den tieffrequenten Bereich angepasst. Ebenso wenig sind beschreibende Empfindungsgrößen wie „Brummen“ oder „Wummern“ einheitlich in das Verfahren einbezogen.

Zur Beurteilung der Lästigkeit tieffrequenter Geräusche sind die Wahrnehmbarkeit, die empfundene Lautstärke, der zeitliche Verlauf und das Auftreten von Tönen ausschlaggebend. Psychoakustische

Kenngrößen bieten zwar Möglichkeiten, die Lästigkeit tieffrequenter Geräusche zu beschreiben. Jedoch ist der Mehrwert gegenüber dem energieäquivalenten Ansatz nicht gegeben. Deshalb werden die weiteren Untersuchungen in dieser Studie ohne psychoakustische Kenngrößen durchgeführt.

Tabelle 1: Eignung konventioneller psychoakustischer Kenngrößen für die Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen

Kenngröße	Beschreibung	Einschätzung für Eignung	Referenz	Verhältnis	Literaturquellen
Lautheit	Wahrnehmungsgröße, die am stärksten der Schallintensität eines Signals entspricht. Zusätzliche Einflüsse von spektraler Verteilung, Maskierung und zeitlichen Effekten	gut geeignet, da tiefe Frequenzen in der spezifischen Lautheit durch die Auffächerung der oberen Flanke deutlich repräsentiert werden	1 sone = 1 kHz Sinuston mit L = 40 dB	alle psychoakustischen Größen sind Verhältnissgrößen, d.h. 2 sone (acum, vacil, asper): doppelt so laut wie 1 sone (acum, vacil, asper), 4 sone (acum, vacil, asper): doppelt so laut wie 2 sone (acum, vacil, asper), etc.	[7], [8], [54], [80], [89]
Schärfe	Bildung einer spektralen Einhüllenden mit Gewichtungsfaktor für hohe Frequenzen	weniger gut geeignet, da die Schärfe eine Empfindungsgröße ist, die v.a. mit höheren Frequenzen korreliert	1 acum = SBR mit fm = 1 kHz, Df = 1 Bark und L = 60 dB		[29], [65]
Schwankungsstärke	Moduliertes Signal (AM oder FM) mit niedriger Modulationsfrequenz	gut geeignet, da die Schwankungsstärke auch bei tiefen Mittenfrequenzen deutlich wahrnehmbar und v.a. sehr störend ist	1 vacil = 1 kHz AM-Ton mit fmod = 4 Hz und L = 60 dB		[62], [97] Untersuchungsbedarf bzgl. Wahrnehmung von Schwankungen bei modulierten Signalen mit Mittenfrequenzen zwischen 20 und 100 Hz
Rauigkeit	Übergang in Hörempfindung Rauigkeit bei Erhöhung der Modulationsfrequenz	eingeschränkt geeignet, da die Empfindung der Rauigkeit mit sinkender Mittenfrequenz (Untersuchungen bis 125 Hz) abnimmt (maximale R mit fc = 125 Hz bei ca. fmod = 30 Hz)	1 asper = 1 kHz AM-Ton mit fmod = 70 Hz und L = 60 dB		[65], [72]

2.2 Wahrnehmung tieffrequenter Geräusche

2.2.1 Wahrnehmungsschwelle

Allgemein nehmen das Wahrnehmungs- und das Tonhöheempfinden des Menschen ab, je tiefer die Frequenzen werden. Dies führt dazu, dass tieffrequente Geräusche erst bei höheren Schalldruckpegeln wahrgenommen werden können als üblicher Hörschall. Zudem können die Töne nicht mehr differenziert und deshalb üblicherweise nur noch als Brummen wahrgenommen werden. Der Übergang vom „Hören“ zum „Fühlen“ ist fließend [88]. Die Wahrnehmung von tieffrequenten Geräuschen ist trotzdem abhängig von Lautstärke, Klang und Zeitverlauf. Dabei spielt zwar die spezifische Wahrnehmungsschwelle von Betroffenen eine entscheidende Rolle. Aber auch die Vorprägung von Betroffenen kann die Wahrnehmung beeinflussen.

In der Praxis kann beobachtet werden, dass es in Einzelfällen durch langwierige Befassung mit tieffrequenten Geräuschen und deren Verursachern zu einer Vorprägung bzw. Sensibilisierung der betroffenen Personen kommen kann. Dauerhaft durch tieffrequente Geräusche Betroffene können teilweise ihre Wahrnehmung nicht mehr „abschalten“ und können in nahezu jeder Situation tieffrequente Geräusche wahrnehmen. In diesen Fällen kann selbst eine teure und messtechnisch nachweisbar verbesserte akustische Situation nicht mehr wesentlich zur Konfliktlösung beitragen, so lange die tieffrequente Geräuschquelle überhaupt noch wahrnehmbar ist.

2.2.2 Lautstärkeänderungen

Die Änderung der Lautstärke tieffrequenter Geräusche wird stärker wahrgenommen als im gewöhnlichen Hörbereich. Eine häufig in diesem Zusammenhang zitierte Untersuchung [113] beschreibt bei Frequenzen unterhalb von 25 Hz einen rapiden Anstieg der empfundenen Lautstärke, sobald die Hörschwelle erreicht oder überschritten wurde. In den überwiegenden Fällen schien bereits eine Pegeländerung von 1 dB auszureichen, um das gesamte tieffrequente Geräuschspektrum von unhörbar bis definitiv wahrnehmbar zu ändern. In dem Frequenzbereich unter 20 Hz berichteten die 10 Probandinnen und Probanden, dass sie den akustischen Stimulus eher „fühlen“ könnten, vergleichbar mit dem Empfinden „der Bewegung des Trommelfells selbst“. Das menschliche Gehör reagiert demnach im tieffrequenten Bereich sensibler auf eine Änderung des Schalldruckpegels als im mittel- und höherfrequenten Bereich. Das periodische Auf- und Abschwellen der Lautstärke oder das regelmäßige Ein- und Ausschalten von Geräuschquellen gelten als eine weitere Störwirkung. Neben dem spezifischen Zeitverlauf und der Lautstärke kann auch das Klangbild den besonderen technischen Charakter des Geräusches ausmachen und damit dessen spezifische Wirkung beeinflussen.

2.2.3 Zusammenwirken mit anderen Immissionen

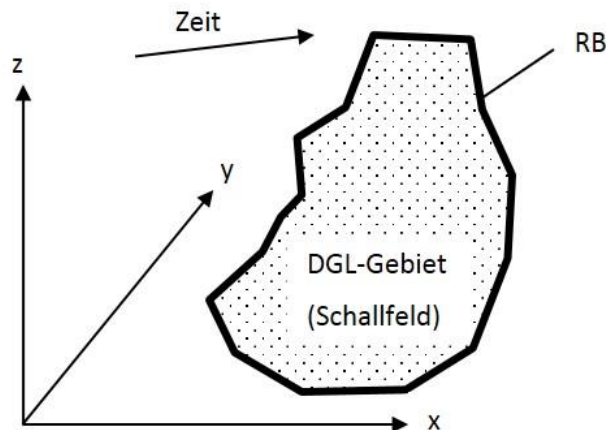
Eine weitere Besonderheit der Wahrnehmung tieffrequenter Schallpegeländerungen wird häufig im Zusammenhang mit anderen Immissionen, insbesondere Vibrationen oder optischen Reizungen beschrieben. Die Wirkungen modal verschiedener Reize können sich gegenseitig verstärken. Vibrationen in Kombination mit tieffrequenten Geräuschen können besonders beim Führen eines Verkehrsmittels (z. B. LKW oder Bus) störend oder beeinträchtigend wirken. In der Literatur wird diese Problematik nur vereinzelt behandelt [70], [76]. Darüber hinaus können tieffrequente Geräusche häufig zu Sekundäreffekten führen. Dies sind beispielsweise der Sekundärluftschall von klappernden Fenstern und Türen, Gläserklirren im Schrank oder die sichtbare Bewegung von leichten Gegenständen (z. B. das Blatt einer Zimmerpflanze oder ein Vorhang). Im niedrigpegeligen Bereich des Immissionsschutzes im Wohnungsumfeld liegen zu diesem Effekt bisher keine wissenschaftlich gesicherten Erkenntnisse vor.

In den meisten Wohnumgebungen werden vorhandene Verkehrsgeräusche, menschliche Kommunikation oder das Läuten von Glocken akzeptiert. Eine neu hinzukommende Geräuschquelle wird dahingegen häufig als ortsunübliche Störung empfunden. Für das individuelle Empfinden sind folglich neben den objektiv-physikalischen Faktoren auch verschiedene subjektiv-individuelle Faktoren maßgebend. Die individuelle Hörempfindlichkeit, die Einstellung zur Geräuschquelle und zur Situation können daher dazu führen, dass von tieffrequenten Geräuschen ein erhöhtes Belästigungspotential ausgeht und sie als Lärm wahrgenommen werden. Zur Vermeidung von Konflikten ist daher eine besondere Betrachtung tieffrequenter Geräuschimmissionen erforderlich.

2.3 Ausbreitungsberechnung tieffrequenter Geräusche

Ein Schallfeld wird in der Regel durch eine Differentialgleichung (DGL) – die akustische Wellengleichung – und durch Randbedingungen (RB) definiert (siehe Abbildung 12). Funktionen, die als Lösung der DGL genügen und gleichzeitig die Randbedingungen (Randwertproblem) erfüllen, dienen zur Berechnung bzw. Prognose der räumlichen und/oder zeitlichen Schallausbreitung [83]. Prinzipiell kann die Schallausbreitung auf drei Arten berechnet werden: geometrisch, numerisch und analytisch.

Abbildung 12: Das Schallfeld als Differentialgleichung (DGL) mit Randbedingungen (RB)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

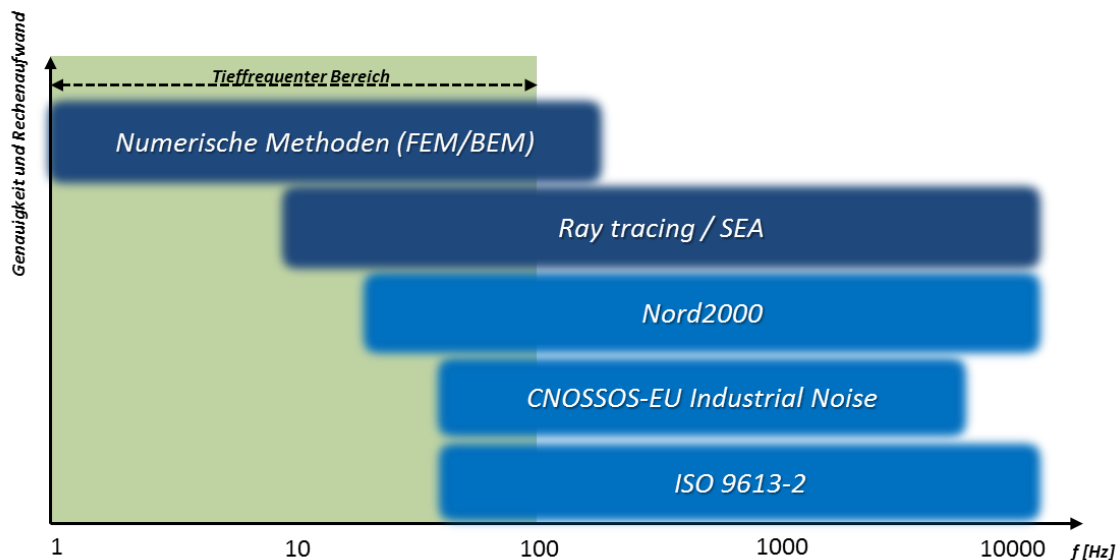
Geometrische Berechnungsverfahren sind z.B. Raytracing oder vereinfachte Schätzmodelle (empirisch-geometrische Verfahren). Dazu zählen die Verfahren der DIN ISO 9613-2, Nord2000 und auch CNOSSOS-EU Industrial Noise. Die empirisch-geometrischen Modelle sind genormt und stellen derzeit die allgemein anerkannte Technik in der Ausbreitungsberechnung von Geräuschen im Immissionschutz dar. Auf die Anwendung von Raytracing sowie CNOSSOS-EU Industrial Noise wurde aufgrund der Vorteile der anderen Berechnungsmethoden in diesem Projekt verzichtet.

Numerische Verfahren ermöglichen Näherungslösungen der Wellengleichung und der Randwertprobleme. Dabei werden analytische Zusammenhänge (z. B. Ableitungen, Integrale, DGL) in algebraische Zusammenhänge (z. B. Addition, Multiplikation, Matrizen) überführt. Zudem werden Funktionswerte diskretisiert, was die Anzahl der zu berechnenden Elemente reduziert [90]. Die Finite Elemente Methode (FEM) und die Boundary Element Method (BEM) sind zwei numerische Methoden, die für akustische Fragestellungen geeignet sind. Weitere bekannte Verfahren sind u. a. Fast Field Program (FFP), Parabolic Equation (PE) und Finite Difference Time Domain (FDTD).

Analytische Verfahren sind exakte Lösungen der Wellengleichung (z.B. Linearkombination ebener Wellen). Analytische Lösungen der Randwertprobleme sind hierbei physikalisch exakt, allerdings bei komplexen Problemen kaum beherrschbar. Deshalb werden sie in diesem Vorhaben nicht weiter betrachtet.

Abbildung 13 zeigt die in vorliegender Arbeit grundsätzlich betrachteten Ausbreitungsmethoden, deren Genauigkeit, den zu erwartenden Rechenaufwand sowie den jeweils zu betrachteten Frequenzbereich.

Abbildung 13: Prinzipielle Übersicht möglicher Berechnungsverfahren für die Schallausbreitung im Freien bzgl. Berechnungsgenauigkeit, Modellierungs- und Rechenaufwand in Abhängigkeit des Frequenzbereichs



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

2.3.1 Geometrische Ausbreitungsmodelle

Die Rechengebiete für geometrische Ausbreitungsmodelle sind digitale Geländekarten realer Wohnbaugebiete. Darin werden üblicherweise alle für die Schallausbreitung relevanten Gebäude dreidimensional modelliert. Geräuschquellen können entsprechend Annahmen oder Messungen aus der Realität ebenfalls in das Geländemodell platziert werden. Zudem können weitere Randbedingungen in den Modellkarten festgelegt werden.

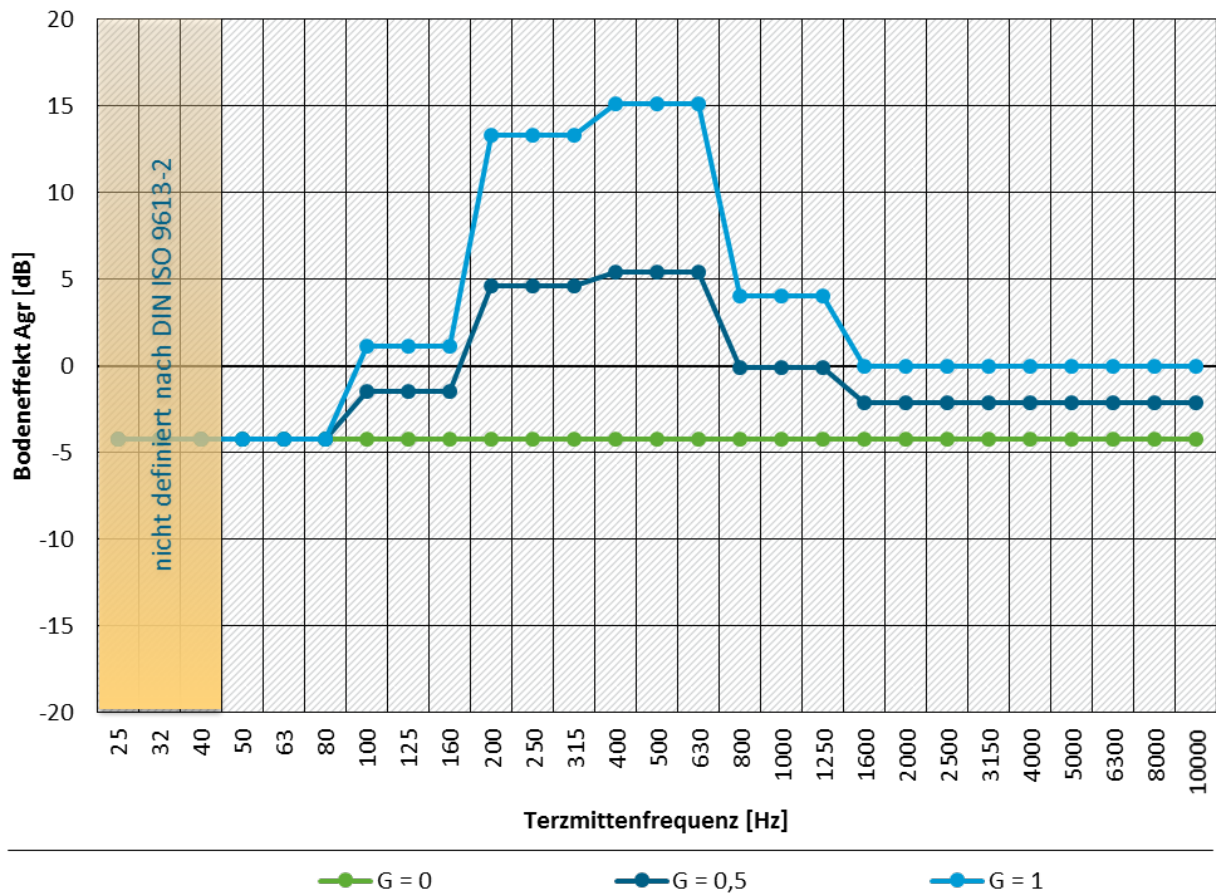
2.3.1.1 DIN ISO 9613-2

In Deutschland ist die DIN ISO 9613-2 [35] für Schallausbreitungsprognosen gewerblich-technischer Anlagen maßgebend. Die Norm beschreibt die Berechnung der Schalldruckpegelabnahme auf dem Ausbreitungsweg im Freien von einer Schallquelle (Emission, beschrieben durch die Schallleistung) zum Empfänger (Immission, beschrieben durch den Schalldruckpegel) für die Oktavbandmittenfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz. Das Verfahren kann bis zu einer unteren Grenzfrequenz von ca. 22 Hz (25 Hz-Terzband) genutzt werden. Die Norm definiert jedoch keine Dämpfungsterme für Frequenzen unterhalb der 63 Hz-Oktave. In kommerzieller Schallausbreitungssoftware (z. B. Soundplan [101]) entsprechen deshalb alle Dämpfungsterme unterhalb der 63 Hz-Oktave denen der 63 Hz-Oktave. Von der Schallemission einer Schallquelle (Schallleistungspegel L_W und Richtwirkungskorrektur D_C) werden die wesentlichen Dämpfungsterme auf dem Ausbreitungsweg (Abstand A_{div} , Luftabsorption A_{atm} , Bodeneffekt A_{gr} , Abschirmungen A_{bar} und sonstige A_{misc}) abgezogen, um die Schallimmission zu berechnen. Da sämtliche Terme in Dezibel definiert sind, führen einfache arithmetische Berechnungen zum Ergebnis. Durch logarithmische Addition der Immissionspegel verschiedener Geräuschquellen kann der äquivalente Dauerschalldruckpegel bei Mitwind auch für komplexere Situationen an Immissionspunkten bestimmt werden.

Der Bodeneffekt kann wahlweise frequenzabhängig oder A-bewertet berechnet werden. Das frequenzabhängige Verfahren berücksichtigt den Bodenfaktor G , der von schallhart (schallreflektierend, $G = 0$) bis porös (schallabsorbierend, $G = 1$) gewählt werden kann. Je poröser der Boden gewählt wird, desto höher ist die Dämpfung vor allem im mittelfrequenten Bereich (200 Hz bis 630 Hz). Unterhalb der

63 Hz-Terz ist der berechnete Bodeneffekt unabhängig von der Bodenbeschaffenheit, sondern ausschließlich von der Emissions- und Immissionsorthöhe sowie von dem Quellenabstand. Abbildung 14 zeigt berechnete Bodeneffekte verschiedener Bodenfaktoren eines frei gewählten Szenarios. Der Bodeneffekt führt bis zu einer Terzmittenfrequenz von 80 Hz rechnerisch zu einer Schalldruckpegelerhöhung um 3 dB. Bei Ausbreitung über schallharte Böden ist der Schalldruckpegel konstant um 3 dB erhöht.

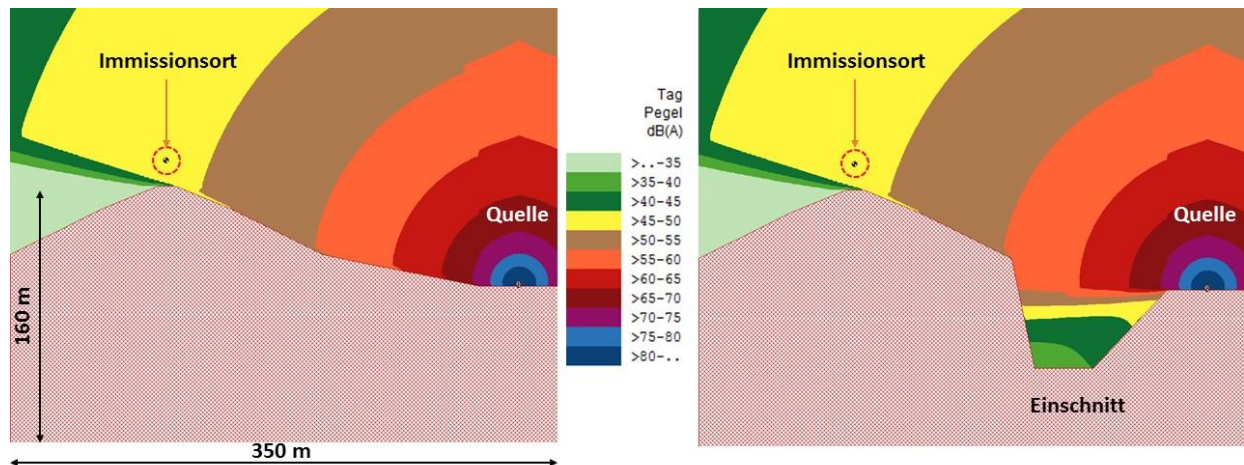
Abbildung 14: Berechnete Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts nach DIN ISO 9613-2 für verschiedene Bodenfaktoren G (exemplarisch für Emissionsorthöhe = 0,5 m, Immissionsorthöhe = 1,5 m, Quellenabstand = 100,0 m)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Die Dämpfung aufgrund von Abschirmung für Beugungen über bzw. um Hindernisse (A_{bar}) ergibt sich gemäß Norm aus einer Differenz zwischen einem wellenlängenabhängigen Abschirmmaß und dem Bodeneffekt. Für Beugungen um senkrechte Kanten wird zur Ermittlung ausschließlich das Abschirmmaß betrachtet. Ist der Bodenfaktor $G = 0$, wird A_{bar} nur durch die Geometrie des Hindernisses und die Wellenlänge bestimmt. Gelände in Form von Hindernissen im Ausbreitungsweg können rechnerisch als Abschirmung berücksichtigt werden. Der Geländeeffekt von Senken oder Tälern im Ausbreitungsweg kann laut DIN ISO 9613-2 nur nach dem nicht frequenzabhängigen alternativen Verfahren berücksichtigt werden.

Abbildung 15: Exemplarische Darstellung der fehlenden Berücksichtigung von Senken/Tälern im Geländeverlauf nach DIN ISO 9613-2, $G = 0,8$



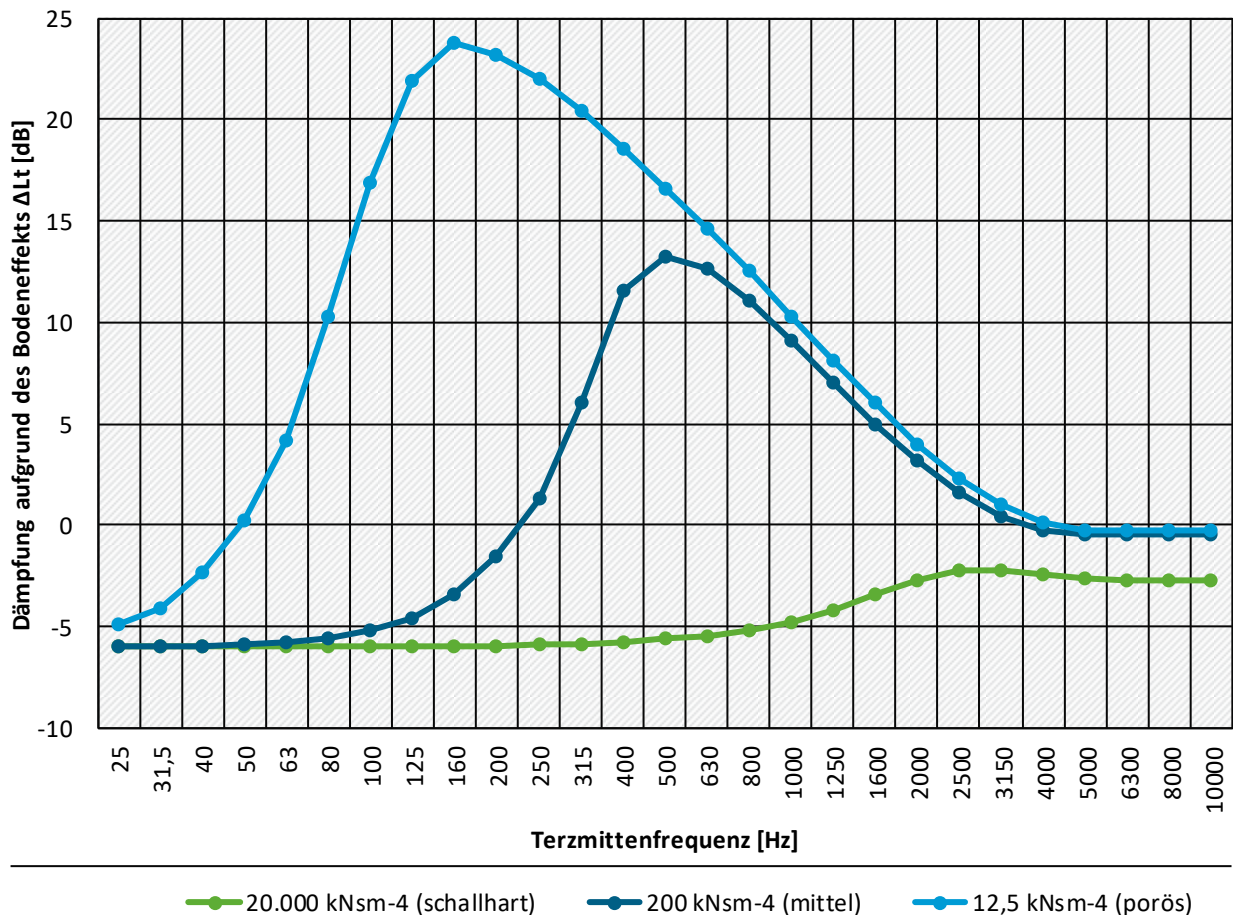
Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Folglich hat der Geländeverlauf bei der frequenzabhängigen Berechnung tieffrequenter Geräusche nach DIN ISO 9613-2 methodisch keinen Einfluss auf die berechneten Geräuschpegel am Immissionsort (siehe Abbildung 15). In der Umgebung von Wohnbebauung ist der Geländeverlauf in der Regel von untergeordneter Bedeutung. Deshalb wären Fehler bei der Ausbreitungsberechnung durch Senken und Täler in solchen Umgebungen selten zu erwarten. Bei entfernt liegenden Quellen, wie beispielsweise Windenergieanlagen, muss ohnehin das alternative Verfahren nach DIN ISO 9613-2 angewandt werden, womit der Geländeverlauf berücksichtigt wird.

2.3.1.2 Nord2000

Eine Alternative zur DIN ISO 9613-2 [35] stellt die Ausbreitungsberechnung nach Nord2000 dar [21], [22]. Das Verfahren wurde anhand von Messungen in der Umgebung von Windenergieanlagen validiert [23]. Nord2000 ist in den Terzmittenfrequenzen von 25 Hz bis 10 kHz beschrieben. Vom Terzband-Schallleistungspegel der Geräuschquelle ohne Richtwirkung L_W werden Dämpfungsterme (kugelförmige Ausbreitung ΔL_d , Luftabsorption ΔL_a , Boden und Hindernisse ΔL_t , Streuung ΔL_s und Reflexion ΔL_r) abgezogen, um den Schalldruckpegel am Immissionsort zu berechnen. Für die Ermittlung der Ausbreitungseffekte aufgrund des Geländes, der Streuung und der Reflexion werden unter anderem die geometrische Strahltheorie, Strömungswiderstände, das Impedanzmodell nach Delany und Bazley [20] und analytische Lösungen der Wellengleichung berücksichtigt. Ein vielverwendetes Konzept in der Nord2000 sind die in der Funkübertragungsberechnung üblichen sogenannten Fresnelzonen. Dieses Rechenmodell bildet mehr Variablen der Realität ab als DIN ISO 9613-2. Es werden Wellenlänge, Lage von Emissions- und Immissionsort, Abstand zur Geräuschquelle, Oberflächenverhältnisse von Hindernissen bzw. Schallreflexionen, verschiedenartige Bodenbeschaffenheiten, Unebenheit des Geländes sowie die Phasendifferenz zwischen direkter und reflektierter Schallwelle berücksichtigt. Dies führt u. a. dazu, dass für tieffrequente Geräusche ein stärkerer Bodeneffekt errechnet wird. Teilweise ist dadurch der Schalldruckpegel im Rechenmodell um bis zu 6 dB erhöht. Abbildung 16 zeigt die frequenzabhängige Bodendämpfung exemplarisch für eine Ausbreitungssituation über verschiedene Bodenoberflächen.

Abbildung 16: Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts nach Nord2000 für verschiedene Strömungswiderstände (exemplarisch für Emissionsorthöhe = 0,5 m, Immissionsorthöhe = 1,5 m, Quellenabstand = 100,0 m)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

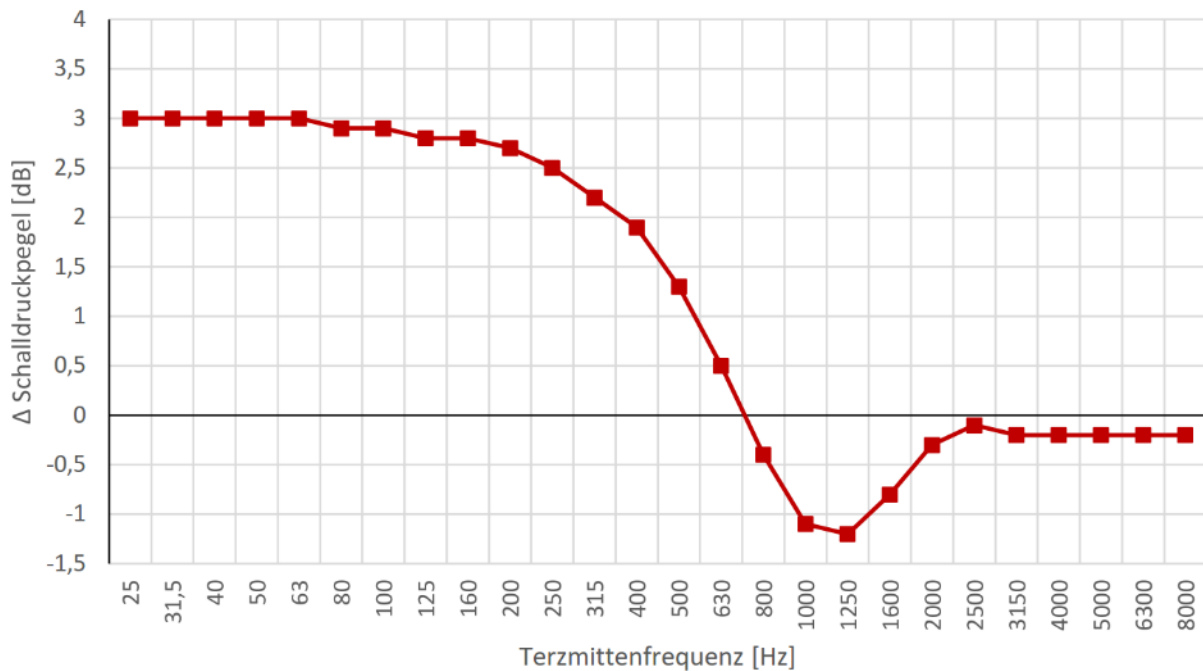
2.3.1.3 DIN ISO 9613-2 und Nord2000 im Vergleich

Das grundlegende geometrische und analytische Berechnungskonzept zur Bestimmung der Schallübertragung im Freifeld zwischen Geräuschquelle (Sender) und Immissionsort (Empfänger) ist ähnlich: Beide Verfahren berücksichtigen Schallleistungspegel und Richtcharakteristik des Senders sowie Dämpfungsterme auf dem Schallausbreitungsweg zum Empfänger. Die Berechnung der Dämpfungsterme durch kugelförmige Schallausbreitung von Punktschallquellen im Freifeld und durch Luftabsorption ist in beiden Verfahren annähernd gleich.

Ein wesentlicher Unterschied sind die Frequenzbandbreite und -auflösung bei der Berechnung: DIN ISO 9613-2 [35] beschreibt die Berechnung von Oktavbändern mit Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 8000 Hz. Nord2000 [21] beschreibt die Berechnung in Terzbändern mit Mittenfrequenzen von 25 Hz bis 10.000 Hz. Nord2000 betrachtet somit detaillierter und einen größeren tieffrequenten Bereich. Signifikante Unterschiede gibt es auch bei der Berechnung der Schalldämpfung durch Boden, Hindernisse, Geländeverlauf und -einfluss sowie weiterer Parameter wie Reflexionen und Streuungen.

Abbildung 17 zeigt die Unterschiede unbewerteter Terz-Schalldruckpegel am Immissionsort bei einem einfachen exemplarischen Vergleich beider Rechenmodelle. In weiteren Rechnungen mit unterschiedlichen akustischen Parametern konnten Differenzen von bis zu 12 dB im tiefen Frequenzbereich in den beiden Verfahren festgestellt werden.

Abbildung 17: Spektrale Schalldruckpegelunterschiede (ΔL) berechneter Schalldruckpegel nach Nord2000 (L_{Nord2000}) und DIN ISO 9613-2 (L_{9613-2}). $\Delta L = L_{\text{Nord2000}} - L_{9613-2}$; exemplarisch für Emissionsorthöhe = 1,0 m, Immissionsorthöhe = 5,0 m, Quellenabstand = 100,0 m, keine Hindernisabschirmungen und schallharter Boden



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

2.3.2 Numerische Ausbreitungsmodelle

Die Grundlage für die numerische Schallfeldsimulation ist ein maßstabsgetreues geometrisches Abbild einer Wohnbausituation. Dieses Modell besteht im Grunde aus Koordinaten, Punkten, Linien und Flächen. Die Berechnungsknoten des Modells werden „vernetzt“. Je größer das Rechengebiet und je höher die zu berechnende Frequenz, desto mehr Berechnungsknoten sind erforderlich. Die Simulation tieffrequenter Geräusche benötigt folglich deutlich weniger Berechnungsknoten als die Simulation von Geräuschen mit höheren Frequenzen. Randbedingungen an den Knotenpunkten sind i.d.R. der Schalldruck, die Schallschnelle und die Impedanz. Diese können entweder als Konstanten festgelegt werden oder so, dass sie sich im Verlauf der Berechnung bis zur stationären Lösung ändern können. Zur Beschreibung einer Schallquelle im Rechenmodell wird im Innenraum die Schallschnelle und im Freifeld der Schalldruck vorgegeben. Eine schallharte oder absorbierende Fläche wird durch die Bestimmung der Impedanz als Randbedingung beschrieben. Softwareimplementationen bieten unterschiedliche Berechnungsmethoden an. Die Methode hat hauptsächlich Einfluss auf die Berechnungsgeschwindigkeit. Rechenparameter wie Mediumvariablen (z. B. Schallgeschwindigkeit, Luftdichte, Wellenzahl) und die softwareabhängigen Einstellungsparameter (z. B. zu berechnende diskrete Frequenz) sind lösungsproblemabhängig zu bestimmen. Jede Software handhabt die Definition der Geräuschquellen mitunter anders. Eine Geräuschquelle kann als eigene Domäne mit entsprechenden Randbedingungen definiert werden. Alternativ kann auch die komplexe Amplitude bzw. der detaillierte Schallleistungspegel einer Quelle vorgegeben werden.

Die numerische Berechnung liefert alle Schallfeldgrößen in jedem Berechnungsknoten. Im Ergebnis kann der Schalldruckverlauf auf einem interessierenden Feldbereich des Gebietes dargestellt werden, zum Beispiel einer horizontalen Schnittebene. Der zeitliche Aufwand der numerischen Berechnung ist vor allem abhängig von der Rechenleistung (v.a. Größe des Arbeitsspeichers), der Größe des Gebietes, bzw. der Knotenanzahl, der numerischen Berechnungsmethode und der zu berechnenden Frequenz.

2.3.2.1 Finite Elemente Methode (FEM)

Die FEM ist in der Akustik vor allem zur Berechnung von Körperschallphänomenen und Schallfeldern im Innenraum geeignet. Die Schalldruckverteilung im Rechengbiet wird mit einem komplizierten Integralgleichungssystem gelöst [90]. Das Ergebnis ist eine numerisch genäherte Lösung. Soll das zu berechnende Gebiet bei der FEM von außen akustisch angeregt werden, wird eine sogenannte Modalanalyse durchgeführt. Findet keine äußere Anregung statt, heißt es harmonische Analyse. Das Gebiet bzw. das Berechnungsgitter wird in eine endliche Anzahl an Teilgebieten („finite Elemente“) unterteilt. Dabei wird der gesamte Ausbreitungsweg als Berechnungsgebiet definiert und mit Volumenelementen diskretisiert. Die Anzahl und Verteilung der Elemente muss so gewählt werden, dass die kleinste zu berechnende Wellenlänge aufgelöst werden kann. Als Faustformel sind mindestens 6 lineare finite Elemente pro Wellenlänge erforderlich (vgl. [59]), um die Unsicherheit unter 10 % zu halten. Ab einer Anzahl von ca. 10^7 unbekannten Knoten wird das Modell zu groß, um es mit aktuellen Rechnersystemen in adäquater Zeit zu berechnen. Die Berechnung großer Schallfelder mit Dimensionen von mehreren hundert Metern und hochfrequenten Geräuschen ist aufgrund der großen Anzahl der Elemente und der resultierenden Rechenzeit derzeit nicht möglich. Tiefe Frequenzen bzw. große Wellenlängen benötigen jedoch eine relativ überschaubare Anzahl an finiten Elementen zur Auflösung des Rechengbietes. Deshalb scheint der Einsatz der FEM für tieffrequente Geräusche in kleineren Gebieten gut anwendbar.

2.3.2.2 Boundary Element Method (BEM)

Die BEM ist in der Akustik vor allem für die Berechnung der Ausbreitung im Freien und die Schallabstrahlung von Oberflächen geeignet. Zur mathematischen Lösung wird die Kirchhoff-Helmholtz-Integralgleichung verwendet, durch welche der Schalldruck an einem Punkt innerhalb, auf dem Rand und außerhalb des Gebietes bestimmt werden kann [90]. Durch Lösung des Randwertproblems auf der Grenze des zu untersuchenden Gebiets (siehe Abbildung 12) kann auf Funktionswerte in dessen Umgebung geschlossen werden [114]. Besonders die Möglichkeit, Schallfelder außerhalb einer Randfläche zu berechnen, macht dieses Verfahren besonders für die Schallausbreitungsberechnung im Freifeld interessant. Bei der Erstellung des Berechnungsgitters sind wie bei der FEM pro Wellenlänge ebenfalls mind. 6 lineare Elemente erforderlich, um eine zuverlässige Lösung des Gleichungssystems zu erhalten. Im Vergleich zur FEM müssen weniger Unbekannte bestimmt werden. Es lassen sich wie bei geometrischen Rechenmodellen Dämpfungsterme für Luftabsorption und Bodendämpfung als entsprechende Randbedingungen festlegen. Der Rechenaufwand zur Lösung der Gleichungssysteme ist allerdings größer. So sind nur ca. 10^5 Unbekannte mit aktuellen Rechnersystemen lösbar [90]. Die BEM ist für große Ausbreitungswege geeignet. Mit zunehmender Gebietsgröße nimmt jedoch die größte berechenbare Frequenz ab. Für die Ausbreitungsberechnung tieffrequenter Geräusche ist dies kein Nachteil, weshalb auch die BEM dafür geeignet erscheint.

2.3.2.3 Fast Field Program (FFP) / Parabolic Equation (PE) / Finite Difference Time Domain (FDTD)

Weitere bereits gut untersuchte numerische Methoden zur Berechnung der Schallausbreitung im Freifeld bzw. bei großen Ausbreitungswegen sind „Fast Field Program“ (FFP), „Parabolic Equation“ (PE) und „Finite Difference Time Domain“ (FDTD) [36], [53]. Das FFP ist auf einen homogenen bzw. flachen Untergrund beschränkt, somit können unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten nicht berücksichtigt werden. Die PE kann zwar variierende Bodeneffekte in Betracht ziehen, kann allerdings keine Reflexionen berechnen. Beide Verfahren sind deshalb für die vorliegende Fragestellung nicht geeignet. Die FDTD hingegen kann Reflexionen, Beugungen und Streuungen sowie komplexe Bodeneffekte berücksichtigen [109]. Sie ist im Vergleich zur BEM eine vielversprechende numerische Alternative [36]. Jedoch sind bisher keine validierten Schallfeldsimulationen mit FDTD unter Freifeldbedingungen bekannt. Aufgrund dieser Unsicherheit wird FDTD im Rahmen dieses Projekts nicht angewandt.

2.3.2.4 Chancen und Grenzen numerischer Verfahren zur Schallfeldsimulation

Geometrische Verfahren führen im tiefen Frequenzbereich ab etwa 63 Hz (DIN ISO 9613-2 [35]) bzw. 25 Hz (Nord2000 [21], [22]) mit verifizierbarer Rechengenauigkeit zu korrekten Ergebnissen für den energieäquivalenten Mittelungspegel. Der Einsatz von numerischen Verfahren im Frequenzbereich unter 100 Hz kann dennoch im Einzelfall ratsam sein, da numerische Verfahren im tieffrequenten Bereich von ca. 20 Hz bis 100 Hz genauer als geometrische Verfahren sind. Die höhere Genauigkeit der numerischen Verfahren erfordert jedoch einen vielfach höheren Zeitaufwand in der Modellerstellung, der Parametereingabe und der Simulation im Vergleich zu den geometrischen Verfahren. Kommerzielle numerische Berechnungsprogramme zur Schallausbreitung und Freifeldakustik sind primär für die Entwicklung und Forschung ausgelegt. Sie variieren stark in ihrer Funktionalität und sind i.d.R. nicht geeignet, größere Schallausbreitungsgebiete und Frequenzbereiche, die für den Immissionschutz erforderlich wären, zu berechnen.

Ein international genormtes numerisches Berechnungsverfahren existiert derzeit nicht. Es ist vorstellbar, dass in einer Norm ein konkretes Verfahren (z.B. BEM, FDTD oder PE) definiert und der Detaillierungsgrad bzw. die zu bestimmenden Randbedingungen definiert werden können. Weiterhin wäre die Softwareimplementation des genormten Verfahrens erforderlich, um in einer überschaubaren Zeit numerische Berechnungen durchführen zu können. Idealerweise wäre ein zusätzliches Berechnungsmodul innerhalb bereits etablierter Software für den Schallimmissionsschutz denkbar. Somit könnte nach Modellerstellung die Schallausbreitung je nach erforderlicher Rechengenauigkeit bzw. erforderlichem Detaillierungsgrad und interessierendem Frequenzbereich entweder nach geometrischen oder numerischen Methoden berechnet werden.

2.4 Einfluss von Gebäuden auf tieffrequente Geräusche

2.4.1 Schalldämmung von tieffrequenten Geräuschen

Die Schalldämmung von Bauteilen gegen Außengeräusche im tieffrequenten Bereich ist gegenüber dem Hörschall vermindert. Mittel- und hochfrequente Anteile kommen durch die in diesen Frequenzbereichen höhere Schalldämmung der Außenbauteile als auch die höhere Innenraumabsorption weniger zum Tragen als die tieffrequenten Geräusche. Der Klang von Außengeräuschen verändert sich dadurch im Innenraum, der Höreindruck wird dumpfer.

Die bauordnungsrechtliche Bewertung der Schalldämmung von verschiedenen Außenbauteilen ist auf die Terzmittenfrequenzen im Bereich zwischen 100 Hz und 3,15 kHz beschränkt. Mittlerweile ist aus bauakustischen Prüfungen bekannt, wie die Schalldämmung im erweiterten Frequenzbereich von 50 Hz bis 5 kHz bewertet werden kann. Im Frequenzbereich unterhalb von 50 Hz liegen keine standardisierten Prüfverfahren zur Ermittlung der Schalldämmung von Bauteilen vor. Ein theoretischer Rechenansatz für Frequenzen unter 100 Hz von Scholl [93] lässt die grundsätzliche Aussage zu, dass Außenbauteile den Schallpegel unterhalb von 100 Hz umso geringer abschwächen, je niedriger die Frequenz wird.

Die Schalldämmung im tieffrequenten Bereich kann nicht bauteilspezifisch angegeben werden. Es muss stattdessen eine Funktion gefunden werden, die die Pegeldifferenzen tieffrequenter Schallpegel von außen in Innenräume frequenzabhängig beschreiben kann. Dieses sogenannte Übertragungsmaß dL beschreibt somit den frequenzabhängigen Unterschied zwischen dem Außen- und dem Innenpegel eines Raums oder Gebäudes bei einer tieffrequenten Schallexposition. Die Literaturrecherche zeigt, dass bereits einige Übertragungsmaße in Dänemark [57], [63], den Niederlanden [110] und Großbritannien [77], [100] messtechnisch bestimmt wurden. In Abbildung 18 sind diese gemessenen Übertra-

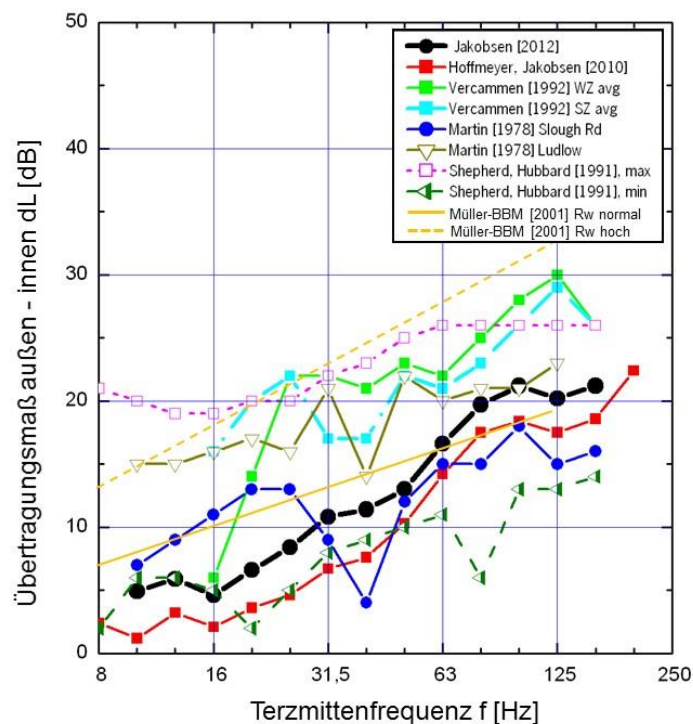
gungsmaße dL im tieffrequenten Bereich dargestellt. Der im Jahr 2001 im Auftrag des Staatlichen Umweltamtes Kiel von Müller-BBM [82] erarbeitete Vorschlag für die Prognose tieffrequenter Geräusche ist ebenfalls dargestellt.

Shepherd, Hubbard [100] und Martin [77] haben nur in relativ wenigen Gebäuden und ausschließlich mit Verkehrsgeräuschen gemessen. Das von Jakobsen [63] vorgeschlagene Übertragungsmaß aus dem Jahr 2012 stellt die aktuellsten Erkenntnisse dar. Jakobsen hat dafür die Übertragungsmaße für tieffrequente Geräusche in 14 für Dänemark repräsentativen Gebäuden gemessen. Das von Jakobsen vorgeschlagene Übertragungsmaß weist für geschlossene Fassaden moderner Wohngebäude in Deutschland in Massivbauweise tendenziell zu geringe Dämmwerte auf. Es liegt damit für die Prognose auf der sicheren Seite, d. h. die Innenraumpegel würden prognostisch eher über- als unterschätzt werden. Dies haben eigene Messungen [37] mit unterschiedlichen Messkonzepten im Innenraum von deutschen Wohngebäuden ergeben.

2.4.2 Übertragungsmaß tieffrequenter Geräusche

Tieffrequente Geräuschimmissionen innerhalb eines Gebäudes könnten vereinfacht prognostiziert werden. In die Ausbreitungsberechnung der DIN ISO 9613-2 [35] müsste dazu lediglich ein Übertragungsmaß zwischen Außen- und Innenpegel der tieffrequenten Geräusche integriert werden [81]. Die in der DIN ISO 9613-2 genannten Ausbreitungsparameter zur Richtwirkungskorrektur, zur Luftabsorption, zur meteorologischen Korrektur sowie zusätzliche Dämpfungselemente würden bei diesem vereinfachten Prognoseansatz unberücksichtigt bleiben, da ihr Einfluss im tieffrequenten Bereich vernachlässigbar gering ist.

Abbildung 18: Schallpegeldifferenzen von außen nach innen (Übertragungsmaß dL) im Bereich tieffrequenter Luftschallexposition



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Ein pauschales Übertragungsmaß lässt sich nur ansatzweise festlegen. Problematisch sind dabei vor allem die singulären Frequenzen und Raummoden, die für jede Raumgeometrie verschieden sind. Daneben beeinflussen auch Leichtbauweisen und großflächige Verglasungen oder Öffnungen in der Gebäudehülle den Übergang tieffrequenter Geräusche. So können tieffrequente Geräusche durch teilgeöffnete Fenster, Lüftungsöffnungen, Nebenräume usw. in Aufenthaltsräume eindringen. Dort können sie wiederum durch Raumeffekte (z. B. stehende Wellen) verstärkt werden. Folglich wird die gesamte Schalldämmung von Wohnräumen gegenüber Außengeräuschen maßgeblich von Elementen beeinflusst, deren Schalldämmung gegenüber den Wandflächen wesentlich verringert ist. Dazu zählen vor allem Fenster und Türen aber auch Nachströmöffnungen und Lüftungselemente. Da keine genaueren Daten vorliegen, kann und soll deshalb das raumspezifische Übertragungsmaß für tieffrequente Geräusche aus dem Schalldämm-Maß der verwendeten Fenster abgeleitet werden.

Grundlage für die Näherung des raumspezifischen Übertragungsmaßes ist das *Bergersche Massengesetz*. Es besagt, dass eine Verdopplung der Flächenmasse oder der Frequenz das Schalldämm-Maß um 6 dB vergrößert. So soll das Schalldämm-Maß des Fensters unterhalb von 100 Hz im Grunde mit einer Abnahme zu tiefen Frequenzen hin von 6 dB pro Oktave beschrieben werden. Üblicherweise ist bei Messungen zwar zu beobachten, dass die Schalldämmung unterhalb der spezifischen Raumresonanzfrequenz ansteigt. Für eine Prognose des Übergangs tieffrequenter Geräusche von außen nach innen liegt dies jedoch auf der sicheren Seite. Das Übertragungsmaß unterhalb von 100 Hz kann nach [81] aus dem Schalldämm-Maß des Fensters in der 100 Hz-Terzmittenfrequenz wie folgt angenähert werden:

$$dL_{\text{Terz}} = [20 * \lg(f_{m,\text{Terz}}/\text{Hz}) + R'(100 \text{ Hz})/\text{dB} - 40] \text{ dB}$$

Dabei sind

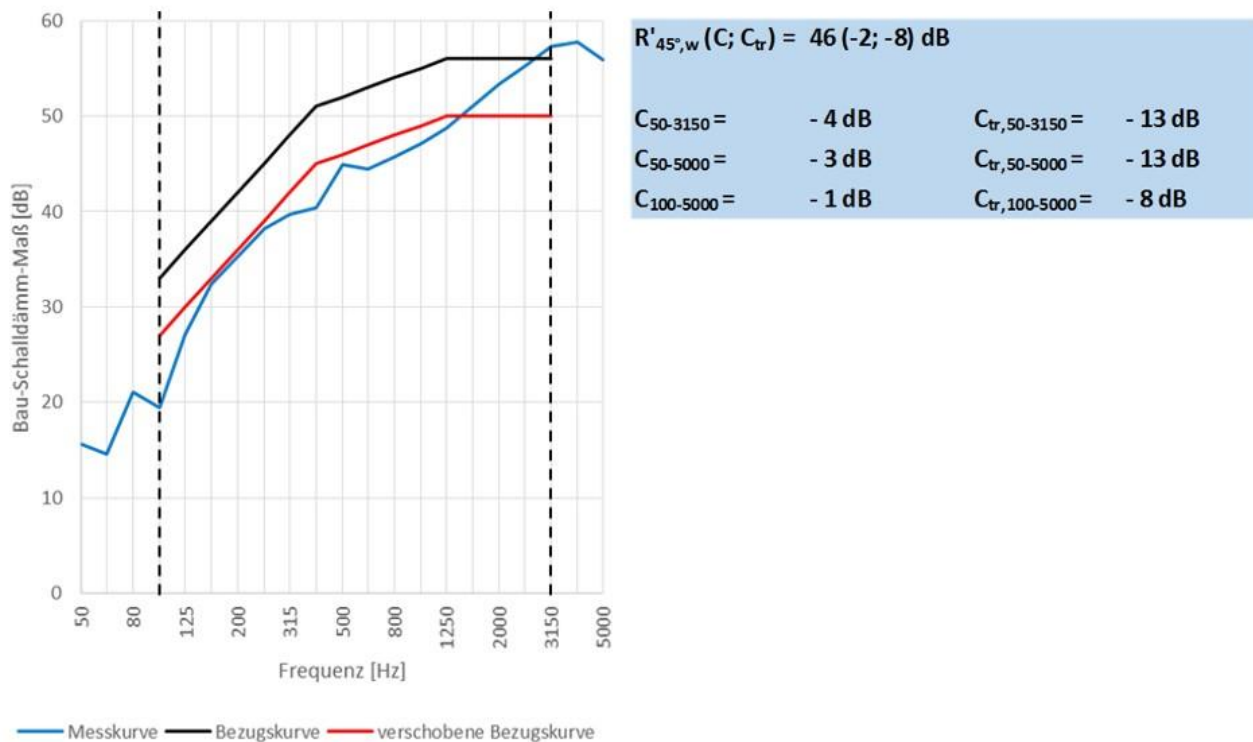
dL_{Terz}	Übertragungsmaß vom Außen- zum Innenpegel je Terzband mit den Terzmittenfrequenzen unterhalb von 100 Hz (z. B. ab 8 Hz) in dB
$f_{m,\text{Terz}}$	Terzmittenfrequenz in Hz unterhalb von 100 Hz
$R'(100 \text{ Hz})$	Schalldämm-Maß des Fensters in der 100 Hz-Terzmittenfrequenz in dB

2.4.3 Spektrum-Anpassung Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden

Das raumspezifische Übertragungsmaß im tieffrequenten Bereich kann mit Hilfe des Schalldämm-Maßes der Fenster angenähert werden. Diese weisen mit Abstand die geringste Schalldämmung aller Außenbauteile auf und sind daher auch maßgebend für die Übertragung tieffrequenter Geräusche. Die Schalldämmung eines Fensters wird in Deutschland üblicherweise nach dem sogenannten Bezugskurvenverfahren mit einem Einzahlwert, dem Schalldämm-Maß R'_w beschrieben. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 19 dargestellt. Schalldruckmessungen zur Ermittlung des Schalldämm-Maßes von Fassaden erfolgen üblicherweise nach DIN EN ISO 16283-3 [34].

Die Bezugskurven der Spektrum-Anpassungswerte, c_{tr} , gewichten höherfrequente Anteile (ab ca. 1 kHz) stärker als mittel- und tieffrequente Schallpegel. Im Ergebnis führt selbst eine ausgeprägt tieffrequente Geräuschcharakteristik nur zu geringen Veränderungen der c_{tr} -Werte, die für die Zusammensetzung von Verkehrslärm eingeführt wurden. Weder der Einzahlwert des bewerteten Schalldämm-Maßes des Bauteils noch die Spektrum-Anpassungswerte sind geeignet, um eine belastbare Einschätzung über die Schalldämmung des Bauteils im tieffrequenten Bereich unter 100 Hz vornehmen zu können. Für den Planer eines Wohngebäudes ist es mit diesen Parametern folglich nicht möglich, auf eine tieffrequente Geräuschimmission effektiv zu reagieren.

Abbildung 19: Schalldämm-Maß eines Fensters mit Spektrum-Anpassungswerten (exemplarisch)

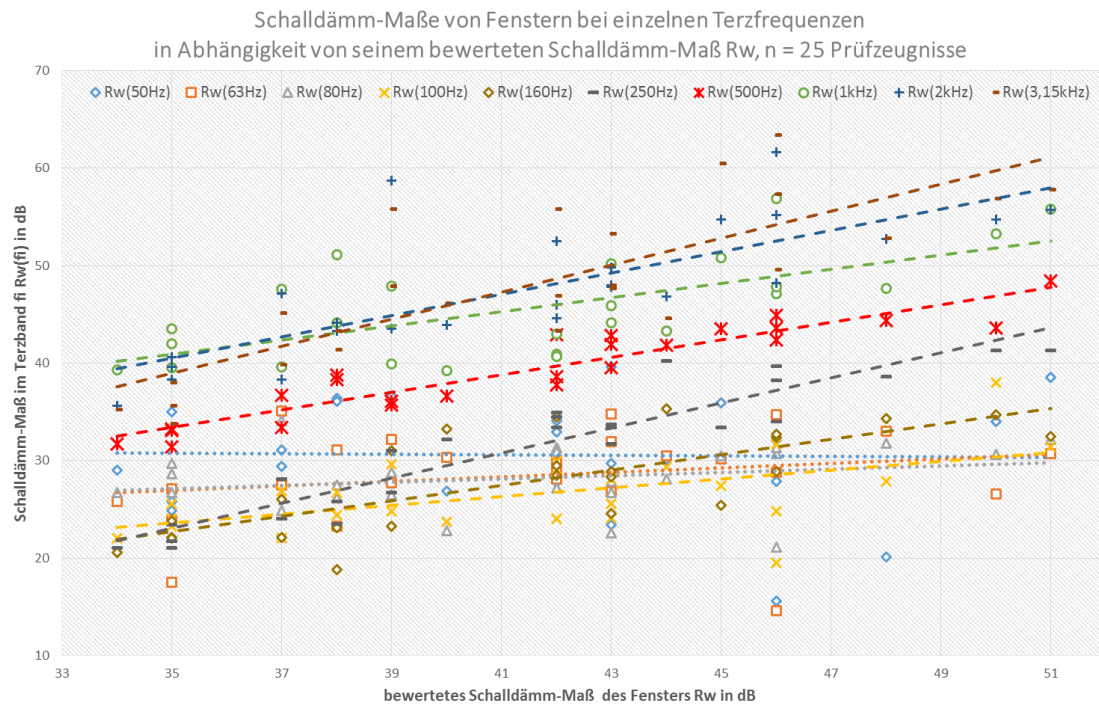


Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Die Auswertung von 25 zufällig ausgewählten Prüfzeugnissen von gemessenen Schalldämm-Maßen von Fenstern belegt diese Tatsache: In Abbildung 20 wurden Schalldämm-Maße in einzelnen Terzbändern ($R_w(f)$) über dem bewerteten Schalldämm-Maß (R_w) des zugehörigen Fensters aufgetragen.

Trendlinien für verschiedene Frequenzen zeigen, dass die Schalldämmung im tieffrequenten Bereich (50 Hz – 100 Hz Terzbänder) nicht oder nur in sehr geringem Maße vom bewerteten Schalldämm-Maß des Bauteils abhängt. Erst bei Frequenzen von mehr als ca. 160 Hz steigt die Schalldämmung mit zunehmendem R_w entsprechend an und folgt im Verlauf den R_w -Werten. Daraus ist ersichtlich, dass man am bewerteten Schalldämm-Maß R_w eines Bauteils nicht erkennen kann, welche Schalldämmung es im tieffrequenten Bereich (50 Hz – 100 Hz Terzbänder) aufweist.

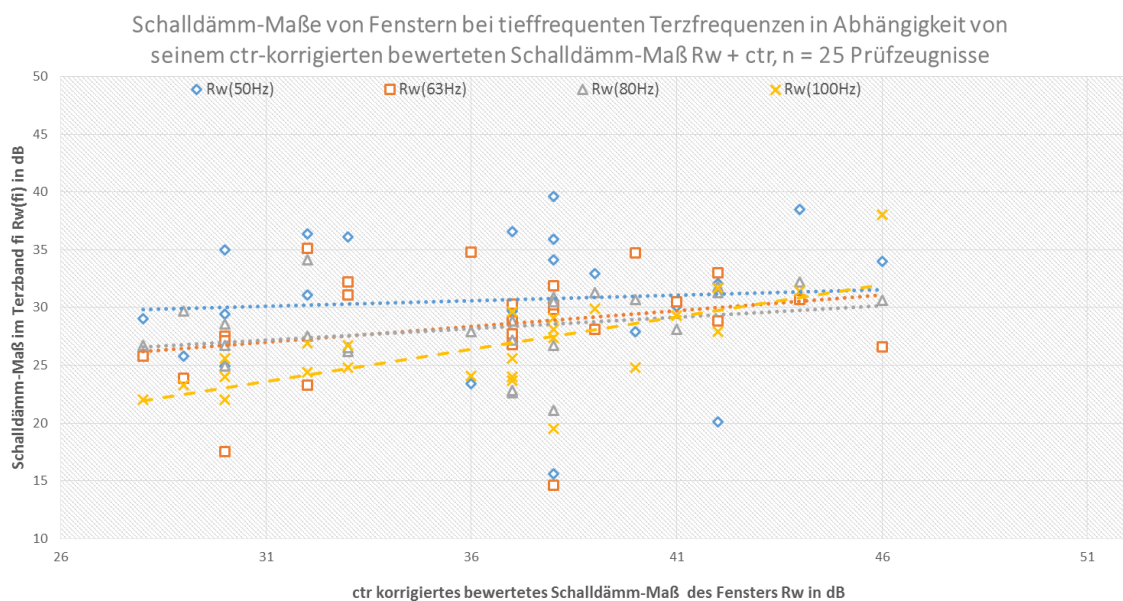
Abbildung 20: Schalldämm-Maße von Fenstern bei einzelnen Terzfrequenzen in Abhängigkeit von ihren bewerteten Schalldämm-Maßen



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Auch die genormten Spektrum-Anpassungswerte c und c_{tr} einschließlich ihrer verschiedenen Frequenzdefinitionen sind ungeeignet zur Feststellung des Schalldämm-Maßes im tieffrequenten Bereich. Für den Datensatz aus 25 Prüfzeugnissen sind in Abbildung 21 die Schalldämm-Maße im Frequenzbereich 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz und 100 Hz über den c_{tr} -korrigierten bewerteten Schalldämm-Maßen ($c_{tr} + R_w$) aufgetragen.

Abbildung 21: Schalldämm-Maße von Fenstern bei tieffrequenten Terzfrequenzen in Abhängigkeit von ihren c_{tr} -korrigierten bewerteten Schalldämm-Maßen ($c_{tr} + R_w$)

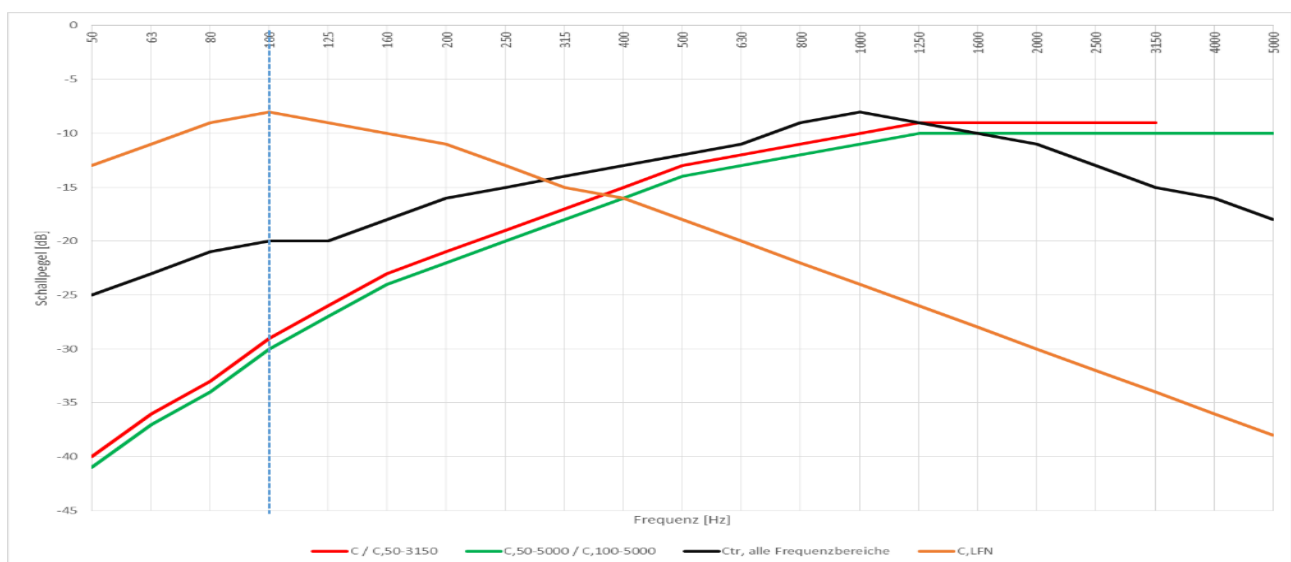


Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Unter Berücksichtigung des Spektrum-Anpassungswertes c_{tr} zeigt sich zwar für die 100 Hz-Terz eine gewisse Verbesserung der Abhängigkeit vom korrigierten R_w -Wert. Allerdings ist die Auswahl eines geeigneten Schallschutzfensters zum Schutz vor relevanten stationären tieffrequenten Geräuschmissionen auf Basis der kennzeichnenden Bauteilwerte R_w , c und c_{tr} nicht möglich.

Die Schalldämmung der Bauteile wird dahingegen im erweiterten Bereich bereits ab 50 Hz im Prüfstand und auch am Bau gemessen. Deshalb erscheint es zweckmäßig, einen ergänzenden Spektrum-Anpassungswert für tieffrequente Geräusche einzuführen. Anhand der bereits vorhandenen Daten kann eine Spektralanpassung der Schalldämmung im tieffrequenten Bereich als Einzahlwert einfach beschrieben werden. Wir nennen diesen Spektrum-Anpassungswert c_{LFN} (LFN, „low frequency noise“, engl. für tieffrequente Geräusche). Die Filterfunktionen der c -Werte und ein Vorschlag für den c_{LFN} ist aus Abbildung 22 ersichtlich.

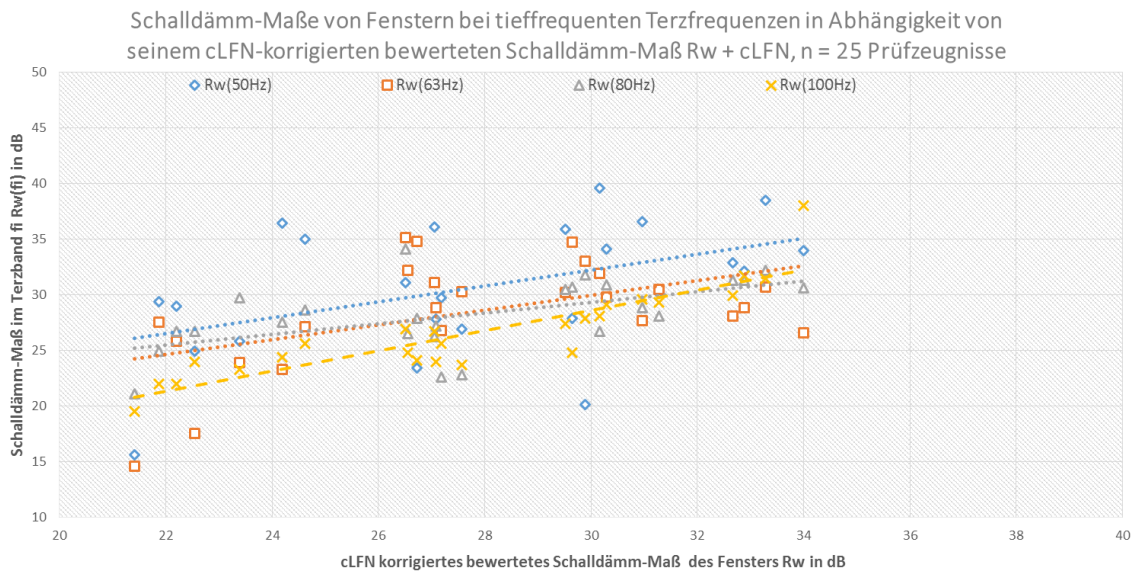
Abbildung 22: Filter der Spektrum-Anpassungswerte nach DIN EN ISO 717-1 und Vorschlag c_{LFN}



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Bei dem Vorschlag für einen Spektrum-Anpassungswert c_{LFN} handelt es sich um eine Parallelverschiebung des c_{tr} mit einer Verschiebung des Scheitelpunktes von 1 kHz auf 100 Hz. Wendet man den c_{LFN} auf den Testdatensatz (25 Prüfzeugnisse von gemessenen Schalldämm-Maßen für Fenster) an, so stellt sich das korrigierte Schalldämm-Maß gemäß Abbildung 23 dar.

Abbildung 23: Schalldämm-Maße von Fenstern bei tieffrequenten Terzfrequenzen in Abhängigkeit von ihren c_{LFN} -korrigierten bewerteten Schalldämm-Maßen ($c_{LFN} + R_w$)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

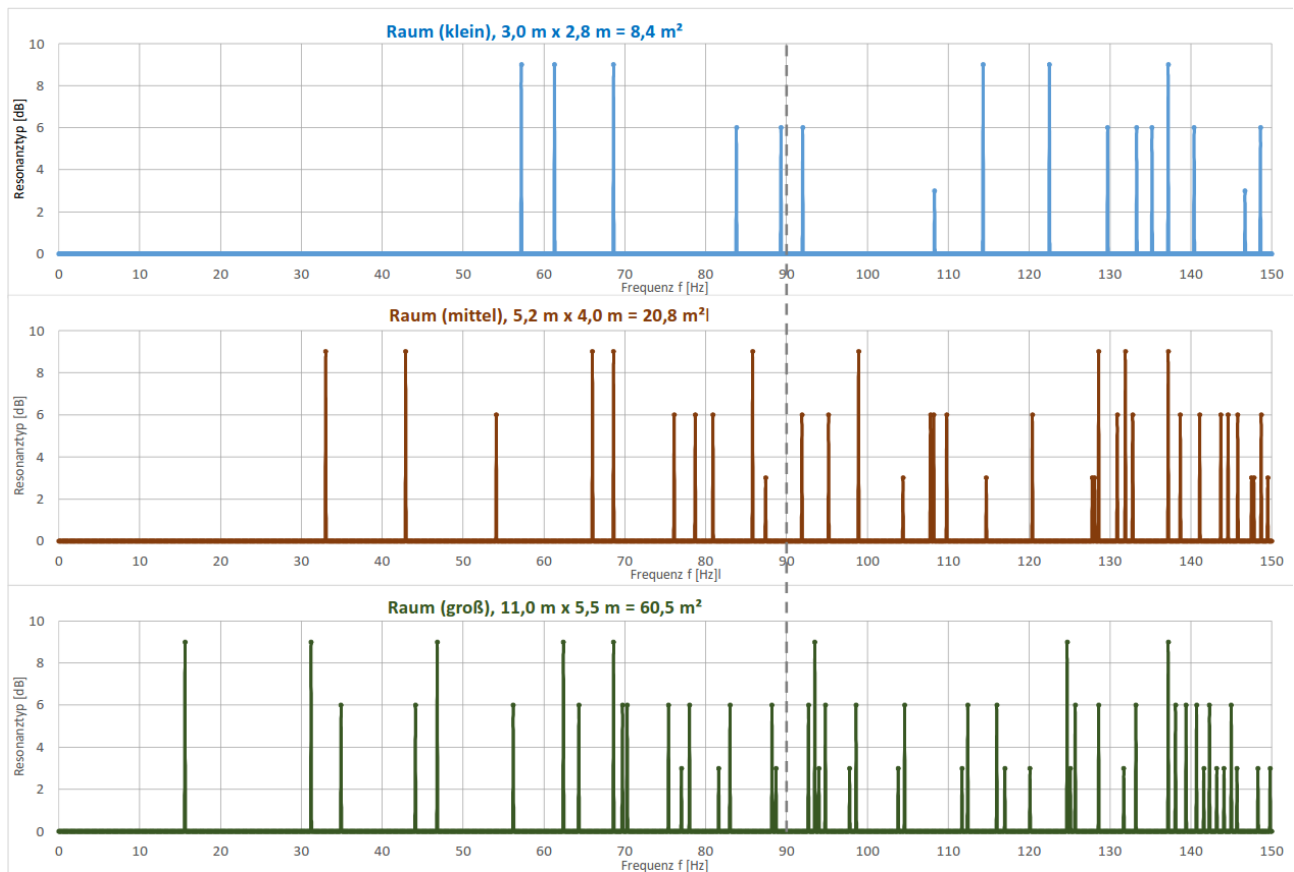
Die Schalldämm-Maße im tieffrequenten Bereich (50 Hz, 63 Hz, 80 Hz und 100 Hz) zeigen nun eine Abhängigkeit vom c_{LFN} -korrigierten bewerteten Schalldämm-Maß ($c_{LFN} + R_w$). Der positive Trend der Schalldämm-Maße in Abbildung 23 belegt, dass auf Grundlage des Spektrum-Anpassungswertes c_{LFN} eine Bewertung der Schalldämmung von Bauteilen im tieffrequenten Bereich 50 Hz bis 100 Hz möglich ist. Auf Grundlage der vorhandenen Messdaten von Schalldämm-Maßen im erweiterten Frequenzbereich könnten tieffrequente Schalldämmeigenschaften von Schallschutzfenstern durch Hinzufügen eines Einzahlwerts c_{LFN} gekennzeichnet, verglichen und ausgewählt werden.

2.4.4 Einfluss der Raumgeometrie

Innerhalb von geschlossenen Räumen können sich stehende Schallwellen ausbilden sowie schwingende Bauteile Sekundärluftschall abstrahlen. Dies führt zu ortsabhängigen Verstärkungen von Geräuschmissionen in einzelnen Frequenzbereichen. Die maßgebenden Raumresonanzfrequenzen für typische Größen von Aufenthaltsräumen mit rechteckigem Querschnitt sind aus Abbildung 24 ersichtlich. In sehr großen Aufenthaltsräumen (ca. 60 m^2 Grundfläche) ist die niedrigste Resonanzfrequenz etwa 15 Hz. Sehr kleine Räume (ab ca. 8 m^2 Grundfläche) verstärken in Resonanzfrequenzen bis etwa 55 Hz.

Der Einfluss in den Resonanzfrequenzen kann zwischen dem Minimum und dem Maximum des Schalldrucks in einem leeren Raum durchaus bis zu 25 dB betragen. In Abbildung 24 werden axiale, tangential und diagonale Raummoden unterschieden. Axiale Raummoden haben die meiste Energie; diese wurden in der Abbildung auf 9 dB normiert. Tangentialmoden haben demgegenüber eine um 3 dB reduzierte, Diagonalmode eine um 6 dB reduzierte Ausprägung.

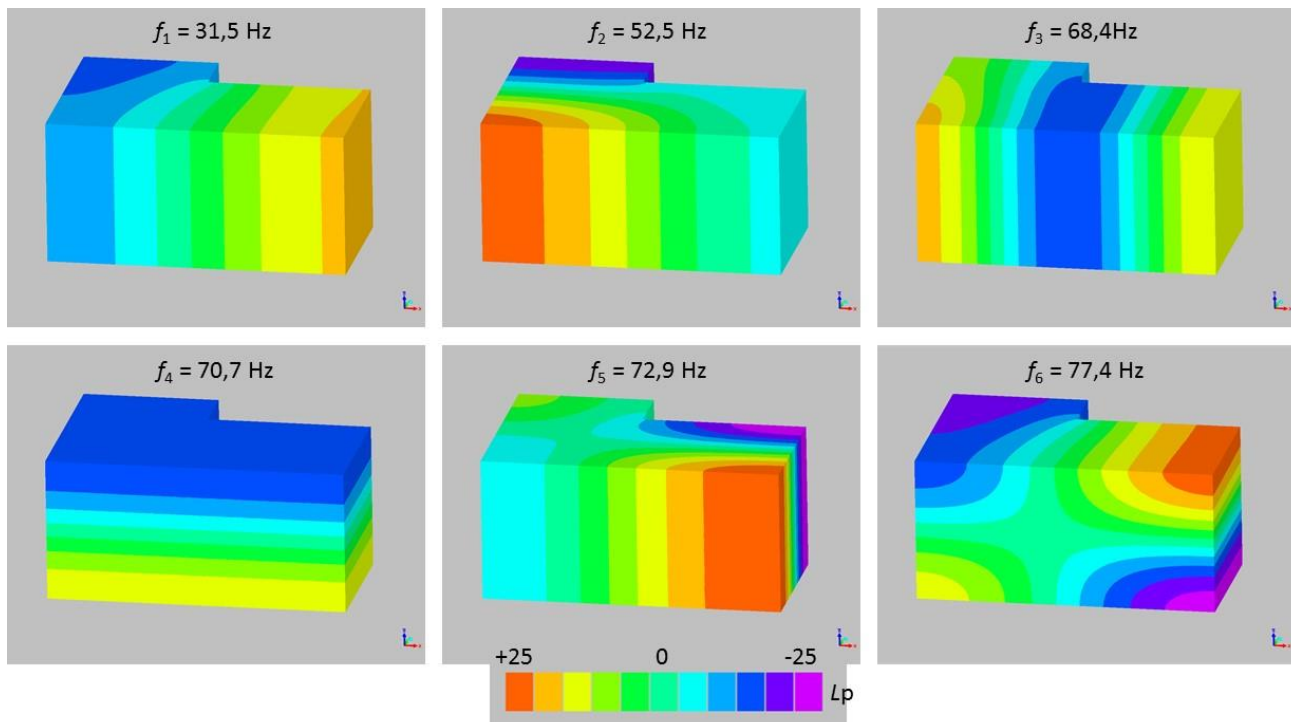
Abbildung 24: Raumresonanzfrequenzen, exemplarisch für rechteckigen Grundriss ohne Einrichtung, Raumhöhe $h=2,5\text{m}$



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Die niedrigsten Axialmoden stellen aufgrund des Frequenzabstands zu weiteren Moden und der breiten Wellenfronten die stärksten Schallfeldausprägungen dar. Die Ausprägung von Raummoden kann durch eine Wellenfelddarstellung verdeutlicht werden. Abbildung 25 zeigt die mögliche Ausprägung der ersten sechs Raummoden eines typischen Wohnraums mit L-förmigem Grundriss, ermittelt nach der Finite Elemente Methode (s. Abschnitt 2.3.2.1). Die Grundfläche des Raumes beträgt ca. 15 m^2 , die Raumhöhe $2,43\text{ m}$. Die Schalldruckmaxima (orange) und -minima (violett) verteilen sich gemäß der Raumgeometrie und der Wellenlänge als stehende Wellen im Raum. Solche Modelle können mit absorbierenden Eigenschaften der Oberflächen, Öffnungen und der Auswirkung von Einrichtungen (Möbiliar) im Raum beliebig verfeinert werden und können dann zur Schallfeldanalyse in Gebäuden dienen.

Abbildung 25: Exemplarische Betrachtung der niedrigen Raummoden eines typischen Wohnraums



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Neben den durch Primärluftschall erzeugten Raummoden oder -resonanzen können Schwingungen von Bauteilen ebenfalls zu tieffrequenten Luftschallabstrahlungen führen. Dieser sogenannte Sekundärluftschall wird von Körperschall verursacht. Körperschall breitet sich über weite Distanzen aus und tritt häufig zusammen mit Luftschall auf. Maßgebend für die Sekundärluftschallerzeugung sind häufig die großen schwingungsfähigen Bauteile wie die Geschossdecken, also der Boden und die Decke eines Raumes. Wohnungen mit typischen Spannweiten haben Deckenresonanzfrequenzen im Bereich von

- 10 bis 20 Hz bei Holzbalkendecken oder leichten Betondecken/ Kompositdecken,
- 20 bis 40 Hz bei konventionellen Stahlbetondecken,
- 50 bis 80 Hz bei Betondecken mit schwimmendem Estrich.

Werden die Geschossdecken durch Erschütterungen oder Vibrationen erregt, schwingen diese Bauteile vorwiegend in den Resonanzfrequenzen und strahlen mit Erreger- und Eigenfrequenz Sekundärluftschall in den Raum ab. Der aus Körperschall resultierende Sekundärluftschall kann sich mit Primärluftschall überlagern und führt dann in den Raumresonanzfrequenzen zu lokalen Pegelerhöhungen. Hierdurch kann eine zusätzliche tieffrequente Geräuschbelastung auftreten.

3 Tieffrequente Geräuschquellen

3.1 Aufgabenstellung

Es soll gezeigt werden, welche Quellen seit längerem bekannt sind und welche Geräuschquellen erst in den letzten Jahren zu Beschwerden über tieffrequenten Lärm geführt haben. Gemeinsame Technologien dieser Quellen sollen beschrieben und deren Relevanz bezüglich ihrer Störwirkung, Häufigkeit von Beschwerdefällen sowie der Anzahl der Betroffenen je Beschwerdefall herausgearbeitet werden.

3.2 Quelltypen

Seit vielen Jahren sind Quellen tieffrequenter Geräusche im Bereich des Arbeitsschutzes und der Lärm-bekämpfung bei Industrieanlagen bekannt. Die TA Lärm [1] aus dem Jahr 1998 sowie das Beiblatt 1 der DIN 45680 [28] aus dem Jahr 1997 nennen beispielhaft folgende bekannte Quellen für tieffre-
quente Geräusche (allgemein):

- ▶ Langsam laufende Ventilatoren (z.B. bei Kühltürmen)
- ▶ Auspuffanlagen langsam laufender Verbrennungsmotoren
- ▶ Brenner in Verbindung mit Heizungs-/Feuerungsanlagen
- ▶ Langsam laufende Siebe, Mühlen, Rinnen und Schwingförderanlagen
- ▶ Drehkolben-/Rootsgebläse
- ▶ (Kolben-)Kompressoren
- ▶ Vakuumpumpen
- ▶ Auspacktrommeln
- ▶ Motorenprüfstände
- ▶ Ventilatoren mit tieffrequenten Einzeltönen oder Drehklang
- ▶ Kupolöfen
- ▶ Fackeln
- ▶ Musikanlagen

In der einschlägigen Literatur aus dieser Zeit (1997) finden sich weitere typische Quellen für tieffre-
quente Geräuschimmissionen:

- ▶ Kieswerke
- ▶ Kraftstromgeneratoren
- ▶ Schiffsmotoren
- ▶ Kraftwerks- und Heizkessel
- ▶ Kies- und Sandsiebe
- ▶ Rütteltische bei Betonfertigteilwerken
- ▶ Elektroöfen zur Stahlerzeugung
- ▶ Gasturbinen ohne Abhitzeessel
- ▶ Waschkeller, Waschsalo

Diese Geräuschquellen bzw. Anlagen werden jedoch selten in der Umgebung von Wohnbebauung be-
trieben. Sie sind deshalb nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Die oben genannten Geräte und Anlagen haben allerdings folgende gemeinsame Technologien:

- mechanisch bewegte Komponenten oder Aggregate,
- größere schwingfähige oder rotierende Massen,
- Motoren (Hubkolbenmotoren),
- Statische Verbrennungsprozesse,
- von der Stromnetzfrequenz abhängige Geräte sowie
- die Bewegung und mechanische Veränderung von Fluiden, insbesondere von größeren Luftmassen (wie Ventilatoren, Gebläse, Rotoren, Kompressoren, Pumpen, Kondensatoren, Verdampfer).

Werden diese Technologien in einem Fahrzeug, einer Baumaschine oder anderen mobilen Anlagen eingebaut oder betrieben, so treten in der Nachbarschaft zwar kurzzeitig tieffrequente Geräusche auf. Das Belästigungspotential ist dabei jedoch eher gering. Die genannten Technologien sind in unseren Wohnumgebungen trotzdem in vielfältigen Ausführungen vorhanden. Wohngebäude werden mittlerweile mit den neuesten Technologien ausgestattet. Ältere Gebäude werden technisch nachgerüstet und mit moderner Haustechnik versehen, moderne elektrische Haus- und Gartengeräte erleichtern den Alltag. Die Anforderungen des Einzelnen an die Aufenthaltsqualität steigen stetig. Im modernen Wohnungsbau werden diese Anforderungen häufig durch den Einsatz stationärer (ortsfester) Anlagen erfüllt, die regelmäßig im Betrieb sind.

Folgende stationären Anlagentypen sind häufig Teil moderner Wohnbebauung und werden in oder an Wohngebäuden betrieben:

- ▶ Raumluftechnische Anlagen und Kühlaggregate (Lüftungsanlagen, Klima- und Kühlgeräte)
- ▶ Heizungsanlagen (Luftwärmepumpen, Öl-/Gasbrenner)
- ▶ Mini-Blockheizkraftwerke (BHKW)
- ▶ Klein-Windenergieanlagen
- ▶ Haushaltsgeräte

Folgende stationäre Anlagentypen werden meist außerhalb von Wohngebieten betrieben. Von ihnen können trotzdem tieffrequente Geräusche auf die Umgebungen von Wohnbebauung einwirken:

- ▶ BHKW bzw. Biogasanlagen mit angeschlossenem BHKW
- ▶ Windenergieanlagen

In der Umgebung dieser Anlagen kann eine längerfristige Belastung durch tieffrequente Geräusche entstehen. Deshalb sind die tieffrequenten Geräusche aus stationären Anlagen oder quasi-stationären Anlagen (z.B. Abstellanlagen von Schienenfahrzeugen, Lkw-Parkplätze und Lieferzonen) für die vorliegende Untersuchung maßgebend.

3.2.1 Raumluftechnische Anlagen und Kühlaggregate

3.2.1.1 Stationäre Geräuschquellen (Lüftungsanlagen, Klima- und Kühlgeräte)

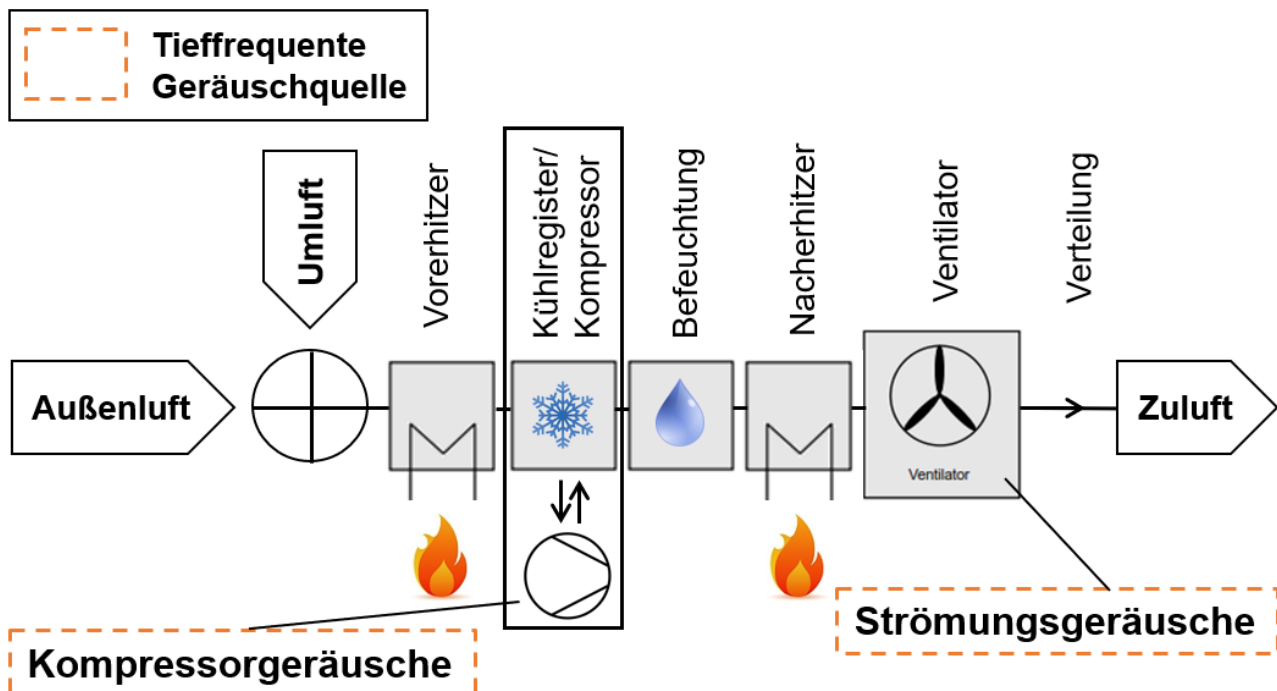
Im Wohnbereich steigt der Komfortanspruch. Hohe Außentemperaturen und -luftfeuchten oder -verschmutzungen sollen für Innenräume gekühlt, entfeuchtet bzw. gereinigt werden. Trotzdem sind meist großflächig verglaste Räume ohne Wärmeeinträge von außen erwünscht. Dabei sollen die Gebäude energieeffizient sein. Deshalb werden zunehmend Klimageräte, Lüftungsanlagen und Befeuchtungsanlagen in moderne Wohngebäude eingebaut.

Klimageräte und Lüftungsanlagen mit und ohne Wärmerückgewinnung gibt es als Splitgeräte oder als Kompaktanlagen. Splitgeräte bestehen aus einer außen betriebenen Kompressor-/Ventilatoreinheit und einem oder mehreren Innenaggregaten, die über eine Kühlmittelleitung verbunden sind. Die Außeneinheiten werden meist ohne besondere Schallabschirmung oder ein Fundament an das Gebäude

montiert. Zentrale Kompaktanlagen vereinen den Kältemittelkreislauf in einem Gerät und werden üblicherweise im Innenraum im Keller- oder Dachgeschoss aufgestellt. Dezentrale Kompaktanlagen (z.B. Einzelraumlüftungsanlagen) werden unmittelbar an den zu klimatisierenden Räumen angebracht, um Energieverluste über Transportwege und Kältemittelleitungen zu minimieren. Auch Kompaktanlagen haben teilweise außenliegende Ventilatoren, die Frischluft ansaugen und Abluft nach außen leiten sollen. Bei reinen Abluftanlagen befinden sich die Lüftungsventilatoren im Innenraum. Die Abluft wird meist direkt an der Fassade durch ein Lüftungsgitter nach außen geleitet.

In modernen Wohnumgebungen sind oft mehrere Wohngebäude mit stationären raumluftechnischen Anlagen ausgestattet. Somit können störende tieffrequente Geräusche von mehreren Orten innerhalb der Wohnumgebung ausgehen. Laut dem „Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten“ von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) werden „solche Geräuschbelastungen aus dem unmittelbaren Nahbereich subjektiv als besonders störend empfunden“ [10]. In Klimageräten sind die Ventilatoren und die Kompressoren die bestimmenden Quellen für tieffrequente Geräusche (vgl. Abbildung 26).

Abbildung 26: Schematische Darstellung eines zentralen Klimagerätes mit Befeuchtungseinrichtung und Lüftungseinrichtung



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

3.2.1.2 Quasi-stationäre Geräuschquellen (Kühlaggregate)

Als eine Folge der sich verdichtenden Siedlungen werden der öffentliche Personennahverkehr, die Logistik und der Transport wichtiger. In Ballungszentren ist die unmittelbare Nähe von Verkehrsinfrastruktur zu Wohnumgebungen unvermeidbar. Besonders ruhender Verkehr, zum Beispiel abgestellte Schienenfahrzeuge, Kühlfahrzeuge auf Parkplätzen oder bei der Belieferung von Einzelhandelsbetrieben im Wohnumfeld führen insbesondere abends, nachts oder in den frühen Morgenstunden wiederholt zu Beschwerden über tieffrequente Geräusche. Hauptquellen für diese Geräusche sind Kühl- und Klimaaggregate, die an den Fahrzeugen auch ohne Fahrmotor betrieben werden. Das Funktionsprinzip sowie die Geräuscherzeugung ist vergleichbar mit stationären Geräten (s. oben). Die Geräusche wer-

den zwar mobil an den Fahrzeugen erzeugt, wirken jedoch beim wiederholten Betrieb als quasi-stationäre Schallquellen. Deshalb zählen Abstellanlagen von Schienenfahrzeugen, Lkw-Parkplätze und Lieferzonen zu den potentiellen Quellen für tieffrequente Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung.

Grundsätzlich gelten für derartige technische Aggregatgeräusche außerhalb von öffentlichen Verkehrswegen die ähnlichen Regularien wie für stationäre Schallquellen der Haustechnik. Allerdings ist hier eine Ermittlung des Verursachers beispielsweise bei einem Lkw-Parkplatz vielfach schwieriger.

3.2.2 Heizungsanlagen

Heizungsanlagen sind die mit Abstand häufigste Quelle tieffrequenter Geräusche im unmittelbaren Wohnbereich. Im Jahr 2014 waren in Deutschland 20,7 Mio. Heizungsanlagen (inkl. Wärmepumpen und Biomassekessel) in Betrieb. Üblicherweise wirken die Geräusche nur innerhalb der eigenen Wohnnutzung, da die meisten konventionellen Heizungsanlagen in Innenaufstellung betrieben werden. Befinden sich jedoch Teile der Heizungsanlage außerhalb von Gebäuden oder werden Geräusche nach außen getragen, kann auch die Nachbarschaft in der Umgebung des eigenen Wohngebäudes von tieffrequenten Geräuschen betroffen sein. Dies ist besonders bei Luftwärmepumpen häufig der Fall.

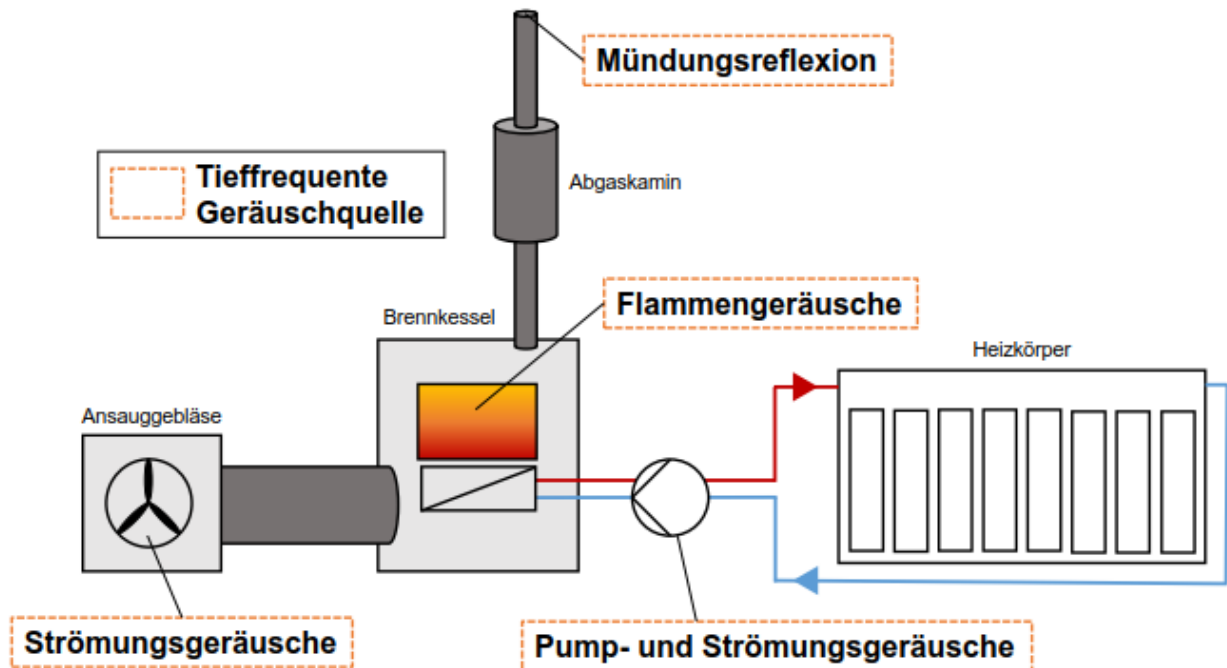
3.2.2.1 Öl- und Gasbrenner

Konventionelle Heizungsanlagen werden meist mit Gas oder Öl betrieben, vereinzelt auch mit Holz oder Pellets. Am weitesten verbreitet sind Warmwasserheizungen, bei denen Wasser in einem Heizkessel erwärmt und mit einer Umwälzpumpe zu den Heizkörpern gepumpt wird. Dort gibt es Wärme an die Raumluft ab bevor es wieder zurück zum Heizkessel fließt.

Abbildung 27 zeigt die Funktionsweise einer konventionellen Heizungsanlage mit den maßgeblichen tieffrequenten Geräuschquellen. Während beim Brennkessel und bei der Abgasführung unmittelbar tieffrequente Geräusche als Luftschall entstehen, sind bei den Pump- und Strömungsgeräuschen häufig Körperschallübertragungen für die tieffrequenten Geräusche maßgebend.

Als Luftschall erzeugte tieffrequente Geräusche der Heizungsanlage können sowohl im Aufstellraum als auch in der Abgasanlage (von wo sie über den Schornstein in die unmittelbare Umgebung gelangen) auftreten. Gebläsebrenner saugen Luft durch ein Gebläse an und fördern sie unter Beimischung des Brennstoffes in den Brennraum. Dabei entstehen Luftströmungsgeräusche. Gleichzeitig treten bei der Verbrennungsreaktion im Heizkessel Flammengeräusche auf. An der Mündung der Abgasanlage kommt es durch den plötzlichen Übergang von der Kanal- zur Freifeldausbreitung zu einer starken Mündungsreflexion. Dabei werden Geräusche mit starker Richtcharakteristik nach oben abgestrahlt. Zusätzliche Geräusche können durch Drosseleinrichtungen und durch Unwucht sowie beim Anfahren der Heizungsanlage auftreten. Durch die Strömung des Trägermediums können tieffrequente Geräusche im gesamten Heizkreislauf (insbesondere dem Leitungssystem) als Körperschall übertragen werden. Die Heizkörper oder Radiatoren dienen in diesem Fall als sekundäre Quellen tieffrequenter Geräusche in den Aufenthaltsräumen von Wohnungen.

Abbildung 27: Schematische Funktionsweise einer konventionellen Heizungsanlage mit den maßgeblichen tieffrequenten Geräuschquellen (fettgedruckt)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

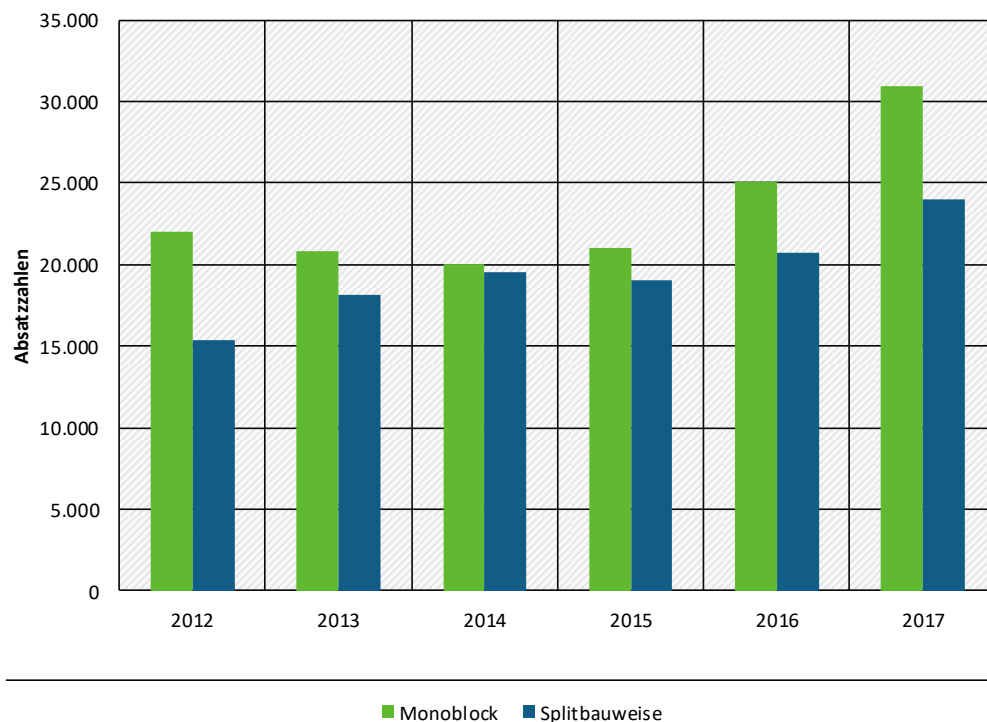
3.2.2.2 Luftwärmepumpen

Zur Heizung von Gebäuden und Brauchwasser werden zunehmend effiziente Wärmepumpen eingesetzt. Wärmepumpen nutzen Wärmeenergie aus der Umwelt und verbrauchen dabei vergleichsweise wenig elektrische Energie. Als energieeffiziente Technologie werden sie staatlich gefördert.

Um Umweltwärme zur Gebäudeheizung nutzbar zu machen, wird in einem Umweltwärmetauscher das gasförmige Kühlmittel erwärmt. Dieses wird in einem elektrisch betriebenen Verdichter auf ein höheres Energieniveau gebracht und im Heizungswärmetauscher dem Heizkreislauf oder der Raumluft direkt übergeben. Anschließend wird die Temperatur des verflüssigten Kühlmittels durch ein Expansionsventil abgesenkt und zurückgeführt. Als Umweltwärmequelle für Wohngebäude kann die Umgebungsluft, das Erdreich (Geothermie) oder Wasser (beispielsweise Abwasser oder Eisspeicher) verwendet werden. In jedem Fall muss der Umweltwärmetauscher in direktem Kontakt zur Umweltwärmequelle sein. So wird bei einer Luftwärmepumpe der Wärmetauscher von Umgebungsluft umströmt, wohingegen bei einer Erdwärmepumpe ein Kühlmittel durch Leitungen im Boden gepumpt wird. Während die Aggregate von Erd- oder Wasserwärmepumpen stets im Innenraum von Wohngebäuden aufgestellt sind, sind Luftwärmepumpen in den meisten Fällen im Außenbereich aufgestellt.

Laut einer Studie des Bundesverbands für Wärmepumpen von 2015 [14] wächst der Wärmepumpenbestand in zwei Szenarien von 1995 bis 2030 um 38,7 % bzw. 28,7 % auf 2,37 Mio. bzw. 1,61 Mio. Anlagen. Das wären 11,9 % bzw. 8,1 % aller Heizungsanlagen. Es wird erwartet, dass weiterhin der Anteil des Absatzes von Luftwärmepumpen steigt. Im Jahr 2015 waren rund 63 % aller abgesetzten Wärmepumpen der Verbandsmitglieder Luftwärmepumpen.

Abbildung 28: Entwicklung der Absatzzahlen für Luftwärmepumpen in Monoblock- und Splitbauweise



Daten: Jahresbericht des Bundesverbandes Wärmepumpe BWP e.V.

Luftwärmepumpen gibt es als Splitanlagen oder als Kompaktgeräte. Bei Splitanlagen wird der Verdampfer und der Ventilator im Außenbereich aufgestellt und der Kompressor im Gebäude. Bei Kompaktgeräten werden die Einheiten nicht getrennt, so dass eine Innenaufstellung oder eine Außenaufstellung der Wärmepumpe möglich ist. Ein Vergleich der Entwicklung der Absatzzahlen dieser beiden Bauarten von Wärmepumpen ist aus Abbildung 28 ersichtlich. In den letzten Jahren ist demnach ein Trend zum Monoblock ersichtlich.

Abbildung 29: Luftwärmepumpe in Außenaufstellung

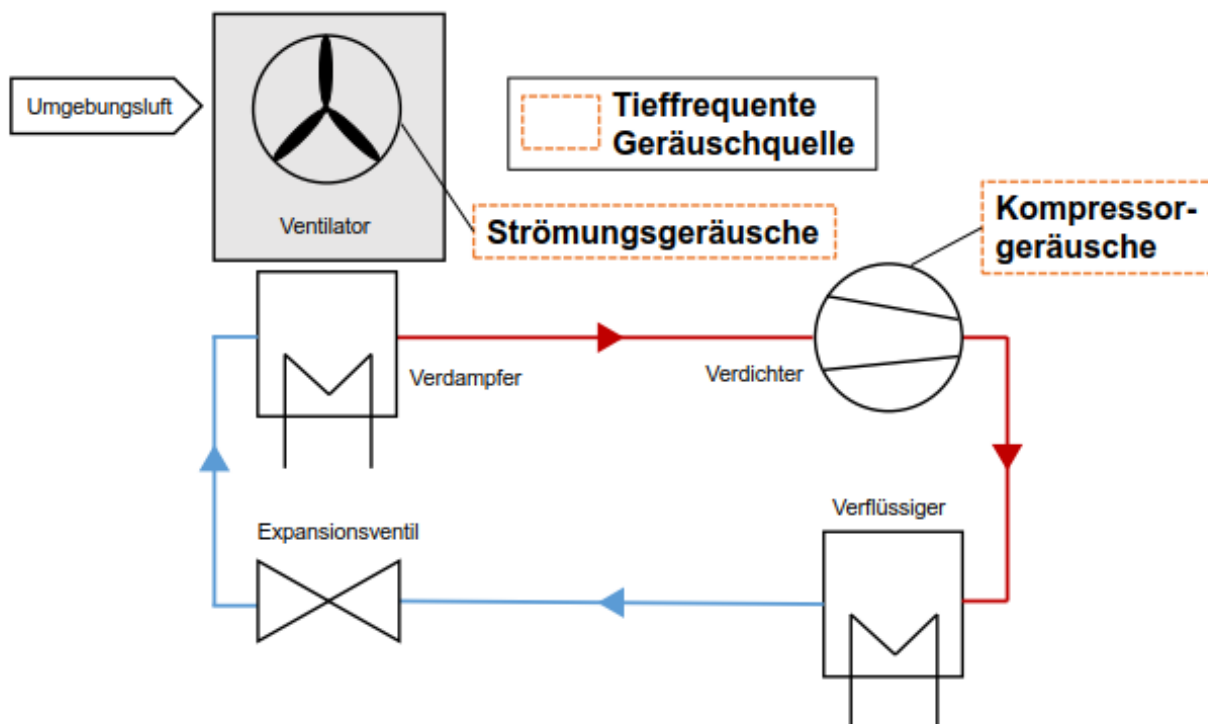


Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Planern und Installateuren ist bewusst, dass Luftwärmepumpen auch störende Geräusche verursachen. Zum Schutz vor den Geräuschimmissionen der eigenen Anlage erfolgt die Aufstellung häufig am Rand des eigenen Grundstücks mit Orientierung zum Nachbarn. Abbildung 29 zeigt eine solche typische Situation für die Außenaufstellung einer Monoblock-Luftwärmepumpe vor einem Wohngebäude.

Durch den zunehmenden Einsatz von Luftwärmepumpen in der Umgebung von Wohnbebauung und zum Teil deutlich sichtbaren Geräteaufstellungen wächst das Lärmempfinden der Bevölkerung in Bezug auf die Wärmeerzeuger. Ähnlich wie Klimaanlage wirken Wärmepumpen vielfach punktuell und zunehmend verteilt in den Wohnsiedlungen. Maßgebende Geräuschkomponenten sind der Ventilator und der Kompressor. Tieffrequente Geräusche des Ventilators sowie des Kompressors stehen im Zusammenhang mit deren Grundfrequenzen, Drehzahlen und geometrischen Verhältnissen sowie etwaigen bauartbedingten Körperschallerregungen. Diese wiederum sind abhängig von der Leistungsstufe der Wärmepumpe. Abbildung 30 zeigt die Funktionsweise einer Luftwärmepumpe und die Quellen tieffrequenter Geräusche.

Abbildung 30: Schematische Funktionsweise einer Luftwärmepumpe mit den maßgeblichen tieffrequenten Geräuschquellen (fettgedruckt)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Trotz der vielen verschiedenen Wärmepumpen im Handel konnten nur für relativ wenige Geräte Informationen über die spektrale Zusammensetzung der Geräuschemissionen in Erfahrung gebracht werden. Hersteller geben in der Regel ausschließlich die A-bewerteten Summenschallleistungspegel an. Für 15 verschiedene Wärmepumpen konnten spektrale Schallemissionsdaten aus Mess- oder Prognosegutachten gefunden werden. Die Geräuschzusammensetzung ist aus Anhang 7 ersichtlich.

3.2.3 Blockheizkraftwerke

Blockheizkraftwerke (BHKW) sind stationäre Verbrennungsmotoren mit einem angeschlossenen Generator zur Stromerzeugung. Neben der Stromgewinnung kann die Abwärme des Motors und der Abgasanlage in der sogenannten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als Heizwärme und zur Warmwasseraufbereitung genutzt werden. Blockheizkraftwerke gibt es in unterschiedlichen Größen und Bauformen. In Einfamilienhäusern, Zweifamilienhäusern und Niedrigenergiehäusern werden sogenannte Nano-BHKW mit bis etwa 2,5 kW elektrischer Leistung verbaut. Mikro-BHKW bis 20 kW elektrischer Leistung werden vornehmlich in Mehrfamilienhäusern und kleinen Gewerbebetrieben installiert. Mit der Abwärme von Mini-BHKW (bis 50 kW elektrischer Leistung) können kleine Nahwärmenetze versorgt werden. Abbildung 31 zeigt beispielhaft ein Mini-BHKW. Groß-BHKW ab 50 kW elektrischer Leistung werden in Industrieanlagen verbaut und speisen ihre Abwärme in größere Nahwärmenetze ein.

Abbildung 31: Blockheizkraftwerk (BHKW) in einem Heizungsraum



Quelle: Fotolia

Immer häufiger werden BHKW als Verbraucher in Biogasanlagen zur Strom- und Wärmegewinnung in meist landwirtschaftlich geprägten Umgebungen von Wohnbebauung errichtet und betrieben. In Biogasanlagen wird Biomasse (nachwachsende Rohstoffe, Tierexkremente und biogene Abfälle) vergoren und in feuchter Umgebung unter Luftabschluss fermentiert. Das Biogas kann weiterverkauft werden, zum Beispiel zur externen Nutzung von Fahrzeug- oder anderen Motoren. In diesem Fall müssen Fremdstoffe wie Kohlendioxid, Wasserdampf und Schwefelwasserstoff entfernt werden. Häufiger wird das Biogas jedoch direkt in einem BHKW am Anlagenstandort zur Wärme- und Stromerzeugung genutzt. Eine Biogasanlage besteht aus einem Substratlager, beheizten Fermentern, Rührvorrichtungen zur Homogenisierung, einem Gasspeicher sowie einer Anlage zur Reinigung des Biogases.

Tieffrequente Geräusche entstehen bei einer Biogasanlage vorrangig während des Betriebs des BHKW sowie temporär auch beim Betrieb von langsam laufenden Pumpen oder Rührwerken vor allem bei der Förderung der pumpfähigen Biomasse zu oder von den Fermentern. Abbildung 32 zeigt eine Biogasanlage in der Umgebung von Wohnbebauung.

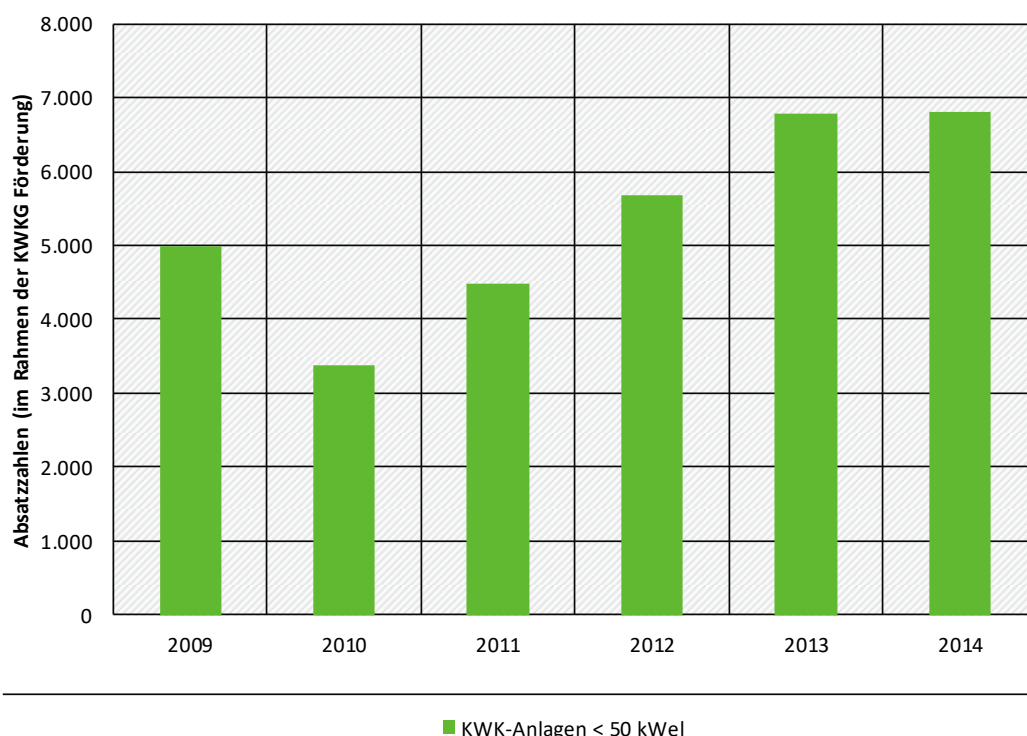
Abbildung 32: Biogasanlage in der Umgebung von Wohnbebauung



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Planung und Betrieb von BHKW sind aus öffentlichen Mitteln förderfähig. Grundlage dafür ist das Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG) [52]. Ein Bericht über die Anzahl der verkauften Anlagen mit KWKG-Förderung wurde vom Öko-Institut e.V. [84] veröffentlicht und ist aus Abbildung 33 ersichtlich. Es ist erkennbar, dass nach einem deutlichen Anstieg der Absatzzahlen seit dem Jahr 2010 die Anzahl auf einem Niveau von ca. 6.500 Anlagen pro Jahr seit 2013 relativ unverändert geblieben ist. Gleichzeitig ist zu sehen, dass die Absatzzahlen von (nach KWKG geförderten) BHKW weit unter den Zahlen für Luftwärmepumpen (siehe Abbildung 28) liegen.

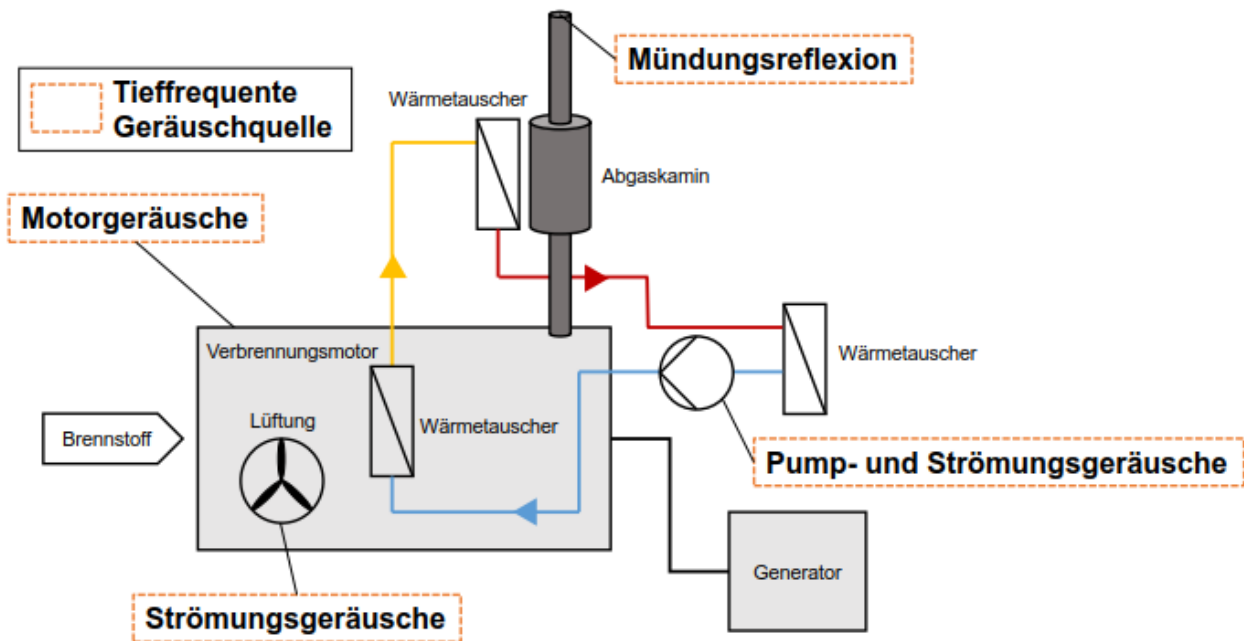
Abbildung 33: Aktueller Stand der Absatzzahlen von nach KWKG geförderten BHKW



Daten: Öko-Institut e.V.

Betrieben werden BHKW mit Erd-, Biogas oder Biodiesel bzw. mit festen Brennstoffen wie Holz, Pellets, etc. Durch einen Motor entsteht bei der Verbrennung mechanische Energie, die im angeschlossenen Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Diese kann durch den Betreiber selbst verbraucht oder in ein öffentliches Stromnetz eingespeist werden. Die anfallende thermische Energie wird über einen Kühlkreislauf (z. B. Wasser) im Wärmetauscher (z. B. Wasser-Wasser-Wärmetauscher) dem öffentlichen Wärmenetz oder dem eigenen Heizkreislauf übergeben. Abgase werden in der Regel durch einen zusätzlichen Wärmetauscher (z.B. Gas-Wasser-Wärmetauscher) geleitet und über einen Kamin abgeleitet. Zur zusätzlichen Motorkühlung dienen Ventilatoren. Abbildung 34 zeigt Funktionsweise und mögliche Quellen tieffrequenter Geräusche von BHKW. Hauptquelle von tieffrequenten Geräuschen des BHKW ist der Gasmotor. Die Schallübertragung erfolgt über Lüftungsöffnungen und den Abgaskamin, undichte Stellen, Wand- oder Dachflächen des BHKW-Gebäudes oder -Containers. Pegelmaxima sind die Folge der Zündfrequenz der Gasmotoren und liegen bei 25 bis 100 Hz. Zusätzlich zu der Hauptgeräuschquelle, dem Gasmotor, haben Blockheizkraftwerke mehrere kleine Nebengeräuschquellen, wie etwa den Luftkühler, die im Freien aufgestellt werden.

Abbildung 34: Schematische Funktionsweise eines Blockheizkraftwerks mit den maßgeblichen tieffrequenten Geräuschquellen (fettgedruckt)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Neben der tieffrequenten Luftschallabstrahlung des Brenners kann der Motor zu Schwingungen am Aufstellort führen, die wiederum sekundären tieffrequenten Luftschall abstrahlen. Kurzzeitige tieffrequente Geräusche durch Resonanzen von Bauteilen können beim Hochfahren des Motors auftreten. Darüber hinaus sind auch Ventilatoren, Pumpen und Fluidströmungen zur Kühlung des Motors Geräuschquellen mit tieffrequenten Komponenten [58]. Die verschiedenen Komponenten eines BHKW führen deshalb häufig zu einer Überlagerung von Geräuschen verschiedener Erregerfrequenzen, die als tonale Komponenten im Emissionsspektrum erkennbar sind.

3.2.4 Windenergieanlagen

Windenergieanlagen (WEA) wandeln Windenergie in elektrische Energie um. WEA mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 Metern sind genehmigungsbedürftige Anlagen i. S. des BImSchG [12]. Sie bedürfen damit einem besonderen Genehmigungs- und Überwachungsverfahren. Im Allgemeinen lässt dieses Verfahren es wegen des allgemein geregelten Schutzes vor Lärm nicht zu, dass genehmigungsbedürftige WEA in der direkten Umgebung von Wohnbebauung errichtet und betrieben werden dürfen. Für Klein-Windenergieanlagen (KWEA) bestehen unterschiedliche Definitionen, die sich nach der Rotorfläche, der Nennleistung und der Anlagenhöhe unterscheiden [13]. Die Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb von KWEA mit einer Gesamthöhe bis 50 m über Gelände ist in den Bundesländern unterschiedlich geregelt. Im Rahmen der Planung müssen deshalb unbedingt die zuständige Bauordnungs- und Umweltbehörde beteiligt werden. KWEA bis zu einer Höhe von 10 m über Gelände sind nach den Landesbauordnungen häufig als Einzelvorhaben sogar genehmigungsfrei. Im Grunde ist es deshalb üblich, dass KWEA in der direkten Umgebung von Wohnbebauung errichtet und betrieben werden. Abbildung 35 zeigt zwei exemplarische Anlagen (WEA und KWEA).

Abbildung 35: Windenergieanlage und Klein-Windenergieanlage



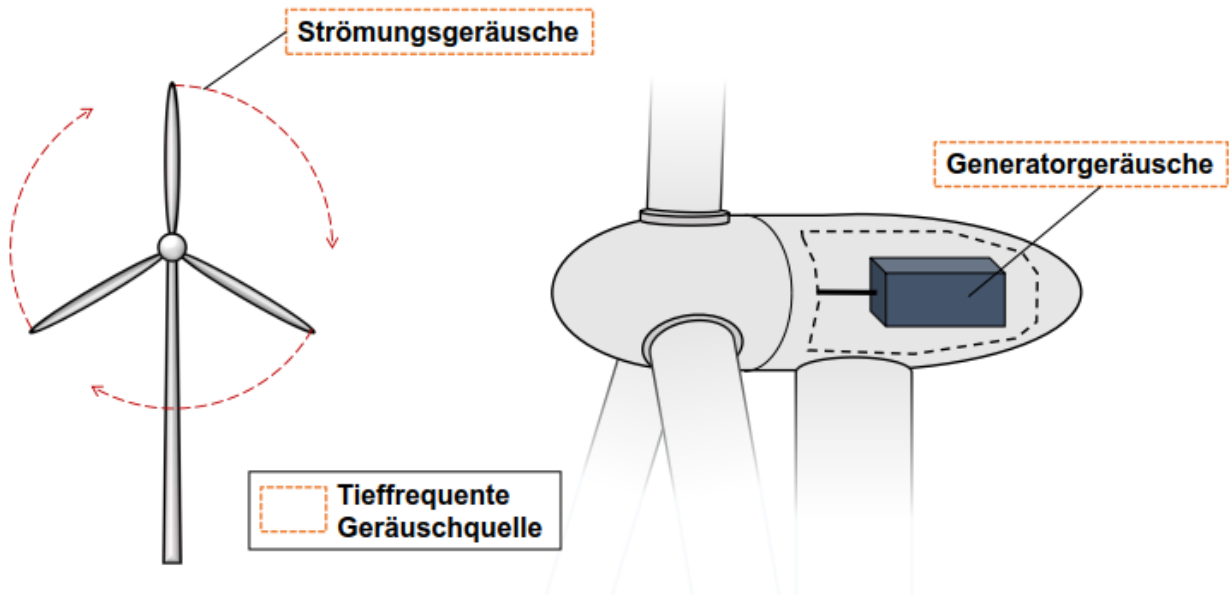
Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Der durch genehmigungsbedürftige WEA erzeugte Strom wird üblicherweise ins öffentliche Netz eingespeist, während der durch KWEA erzeugte Strom zur Eigenversorgung genutzt wird. In Deutschland sind ungefähr 25.000 WEA und zusätzlich 16.000 KWEA installiert (Stand: 2014) [25], [86].

Windenergieanlagen emittieren neben dem gewöhnlichen Hörschall auch tieffrequente Geräusche. Die Belästigungen durch tieffrequenten Schall von WEA sind aufgrund der steigenden Anlagenzahl zunehmend im Gespräch [75]. Die Geräusche von genehmigungsbedürftigen WEA können grundsätzlich nur von außen auf die Umgebung von Wohnbebauung einwirken. Die Geräusche von nicht genehmigungsbedürftigen KWEA können dahingegen auch innerhalb des Wohnumfelds erzeugt werden und dann

auf die umgebende Wohnbebauung einwirken. Im Gegensatz zu den langsam laufenden WEA weisen KWEA in der Regel hohe Drehzahlen auf. Daher sind deren Geräusche weniger tieffrequent. Jedoch kann eine nicht sachgerechte Montage der KWEA am Mast auch zu tieffrequenten Störgeräuschen führen. Die maßgebenden Quellen tieffrequenter Geräusche einer WEA sind die Umströmung der Rotorblätter mit Wind sowie der Stromgenerator (s. Abbildung 36). Mit zunehmenden Nabenhöhen und Flügelängen (häufig bei sog. Schwachwind-Windenergieanlagen) steigt die Neigung zur Erzeugung tieffrequenter Geräusche.

Abbildung 36: Tieffrequente Geräuschquellen bei Windenergieanlagen



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

3.2.5 Haushaltsgeräte

Typische Quellen tieffrequenter Geräusche im Haushalt sind Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschinen sowie Kühl- und Gefriergeräte, aber auch Netzteile oder andere Umspanneinrichtungen (z. B. Transformatoren für moderne Leuchtmittel). Typischerweise befinden sich diese in unmittelbarer Nähe des lärmsensiblen Wohnbereichs, so dass sie besonders störend wirken können. Die Wirkung ist jedoch meist auf dieselbe Wohneinheit beschränkt, in der die Haushaltsgeräte betrieben werden. Die typischen Quellen tieffrequenter Geräusche bei Haushaltsgeräten sind Pumpen, Flüssigkeitsströmungen und Stromtransformation.

Tonabspielanlagen dahingegen bergen eher ein Belästigungspotential durch tieffrequente Geräusche in den an den Abspielraum angrenzenden Wohneinheiten. Dabei ist vor allem die verhaltensbezogene Komponente maßgebend, d. h. wie laut und basslastig (= tieffrequent) ist das dargebotene Geräusch und zu welchen Zeiten, wie lange und wie häufig wird es dargeboten. Tieffrequente Geräusche sind in diesem Fall vom aktiven Zuhörenden erwünscht und werden üblicherweise elektromagnetisch in einem Lautsprecher erzeugt.

3.3 Schutzmaßnahmen gegen tieffrequente Geräusche

Ob durch Maßnahmen an der Geräuschquelle selbst, im Ausbreitungsweg oder am Immissionsort – die Minderung tieffrequenter Geräusche ist deutlich schwieriger als bei mittel- und hochfrequenten Geräuschen. Die Gründe hierfür sind:

- Luft- und Körperschallausbreitung
- Geringe Schallabsorption in der Luft und an Oberflächen (z. B. Bodendämpfung)
- Beugung über bzw. um Abschirmungskanten
- verringerte Bauteildämmung
- Eigenfrequenzen von Gebäude- sowie Anlagenteilen häufig im tiefen Frequenzbereich
- Raumakustische Effekte (z.B. lokale Überhöhungen durch Raumresonanzen)

Dennoch kann die Entstehung und Ausbreitung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung präventiv oder auch nachträglich reduziert werden. Im Folgenden werden Schutzmaßnahmen gegen tieffrequente Geräusche nach dem Stand der Technik beschrieben. Dazu zählen planerische Maßnahmen zur Standortwahl, primäre technische und organisatorische Maßnahmen zur Reduktion der Geräuschemissionen in bzw. an der spezifischen Quelle und sekundäre Maßnahmen zur Verringerung der Schallausbreitung in bzw. an der Quelle.

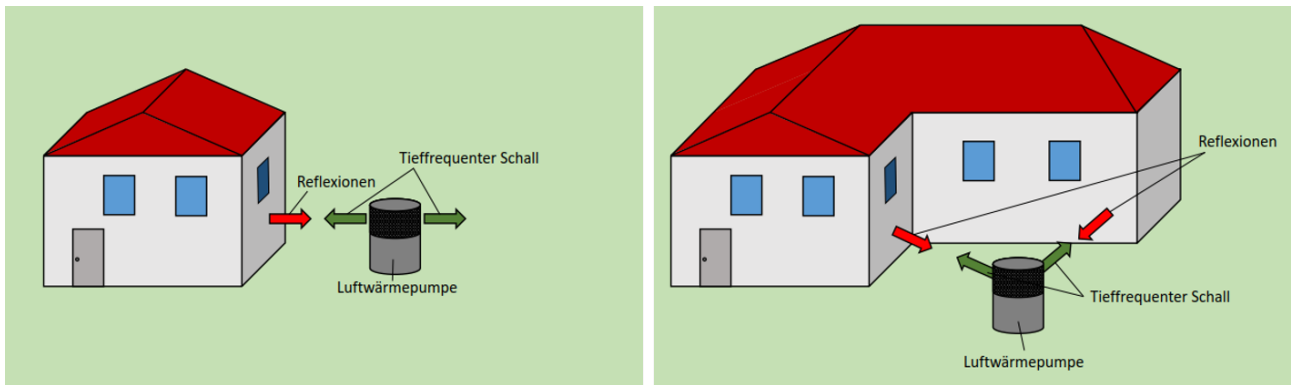
3.3.1 Aufstellungsort

Quellen tieffrequenter Geräusche innerhalb von Gebäuden können überwiegend zu Störungen der unmittelbaren Nachbarschaft in angrenzenden Wohneinheiten führen. Im Freien haben diese Geräuschquellen in der Regel einen größeren Einwirkungsbereich. Ein ungünstiger Aufstellungsort im Freien birgt deshalb ein großes Konfliktpotential. Eine sorgfältige Standortprüfung vor der Errichtung kann präventiv vor einer Beeinträchtigung durch tieffrequente Geräusche schützen.

Abgesehen von Windenergieanlagen können alle in Kapitel 3.2 genannten Geräuschquellen sowohl im Freien als auch innen aufgestellt werden. Die Innenaufstellung minimiert das Risiko einer Lärmbelästigung der Umgebung bzw. der Nachbarschaft. In jedem Fall sollte weder der Nachbar noch das eigene Anwesen erheblich von Geräuschemissionen betroffen sein. So muss der Standort einen für die spezifische Anlage ausreichenden Abstand zu schutzbedürftigen Flächen aufweisen. Speziell Luftwärmepumpen, Klimageräte und Mini-BHKW können meist in Kompaktbauweise innerhalb des Gebäudes oder auch in Splitbauweise (Kombination aus Außen- und Innenaufstellung) errichtet werden. Falls eine Innenaufstellung nicht möglich ist, ist eine Standortprüfung für die Aufstellung im Freien durch einen Fachkundigen für Schallimmissionsschutz empfehlenswert. Mittel- bis hochfrequente Geräuschemissionen können im Regelfall durch einen ausreichenden Abstand der Geräuschquelle zu den Nachbarwohnhäusern verringert werden. Dabei ist die Richtung zu berücksichtigen, in die die Anlage hauptsächlich Schall abstrahlt. Tieffrequente Geräuschkomponenten breiten sich dahingegen weiter, diffus und mit kreisförmiger Abstrahlcharakteristik aus.

Reflexionen an schallharten Oberflächen (Fassaden, Wände usw.) führen zu Pegelerhöhungen an den Immissionsorten. Abbildung 37 zeigt hierzu zwei exemplarische Wohnsituationen mit jeweils einer Luftwärmepumpe in Außenaufstellung nahe dem Gebäude. Die Schallreflexionen mittel- bis hochfrequenter Geräuschanteile an den naheliegenden Außenwänden (rote Pfeile) können im einfachsten Fall zu einer Überlagerung des Direktschalls (grüne Pfeile) führen und bewirken eine Zunahme des Geräuschpegels an einem in Pfeilrichtung gelegenen Immissionsort um etwa 3 dB bzw. 6 dB bei zwei reflektierenden Flächen. In bestimmten baulichen Situationen können die Geräuschemissionspegel tieffrequenter Geräuschanteile noch stärker erhöht sein.

Abbildung 37: Pegelerhöhungen infolge von Fassadenreflexionen



Pegelerhöhung um 3 dB

Pegelerhöhung um 6 dB

Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Höhere Frequenzanteile breiten sich weniger weit aus, bilden keine stehenden Wellen aus und werden häufig von Umgebungslärm überlagert. Dahingegen bilden sich bei tieffrequenten Geräuschen zwischen reflektierenden Flächen (z. B. zwischen zwei Hauswänden) verstärkend wirkende Schallwellenfelder aus. Diese verstärken Einzeltöne und führen daher zu einem monotonen Brummen. Deshalb sollte ein Aufstellort gewählt werden, in dessen Nähe keine oder nur sehr wenige reflektierende Flächen sind. Ein als „Wummern“ bezeichneter Effekt tritt dahingegen durch den technischen Prozess der Anlage auf. Dieser kann häufig durch nur geringe Änderungen in den Richtwirkungs-, Ausbreitungs- und Reflexionsbedingungen vermindert werden.

3.3.2 Primäre Maßnahmen zur Minderung tieffrequenter Geräusche an der Quelle

Als primäre Geräuschminderung werden technische Maßnahmen an der Quelle bezeichnet. Deshalb richten sich die Hinweise in diesem Abschnitt an die Hersteller der Geräuschquellen. Einige Hersteller bieten zwar sogenannte Schallschutzkits an. Diese können nachträglich primär die hoch- und mittelfrequenten Schallanteile der Quelle senken. Nur in einigen Fällen führen diese jedoch auch zu einer Minderung tieffrequenter Geräuschanteile. Gezielt lassen sich diese Anteile daher effektiv nur im technischen Entwicklungsprozess der Geräuschquelle mindern. Ein nachträglicher Eingriff in die Anlagentechnik ist höchstens spezialisierten Fachleuten zu empfehlen, wenn man die Garantie- oder Gewährleistungsansprüche gegenüber dem Hersteller nicht verlieren möchte.

3.3.2.1 Luftwärmepumpen und Klimageräte

Die maßgebliche Geräuschquelle von Luftwärmepumpen und Klimageräten ist der Ventilator [11]. Hier entstehen insbesondere breitbandige Strömungsgeräusche durch Turbulenzen (Verwirbelungen) im Einlauftrichter und an den Schaufelblättern. Mit zunehmender Drehzahl erhöht sich die Anzahl der Umströmungsquellen (Schaufelblätter) und die Schallleistung steigt. Demnach reduzieren geringere Drehzahlen zwar die Strömungsgeräusche, resultieren jedoch gleichzeitig in einer Verringerung der erforderlichen Fördergrößen (Volumenstrom und Druckdifferenz) und in einer Verstärkung der tieffrequenten Geräuschanteile. Die tieffrequenten Geräuschkomponenten werden zudem durch den Schaufeldrehklang des Ventilators (Druckimpulse infolge der Ventilatorumdrehungen) verstärkt. Die Grundfrequenz des Schaufeldrehgeräusches ist stark tonal und hängt direkt von der Drehzahl und der Zahl der Rotorblätter ab. Daher muss die aus akustischer Sicht optimale Drehzahl für das spezifische Gerät individuell bestimmt werden.

Bei der Bauart bzw. dem Einbau des Ventilators sowie den Anströmvorrichtungen ist generell auf eine gute Aerodynamik und wenig Strömungshindernisse zu achten. Detaillierte Angaben zu geeigneten

Bauformen und Strömungsverhältnissen von Luftwärmepumpen zeigen [11] sowie [96]. Die folgenden primären Geräuschminderungsmaßnahmen an Ventilatoren bei Luftwärmepumpen nach [96] gelten auch für die Reduktion von tieffrequenten Geräuschen:

- Erhöhung der Flügelzahl (führt zur Anhebung der Drehklangfrequenz und somit zur Verringerung der Schallabstrahlung im tieffrequenten Bereich)
- Vergrößerung des Abstandes zwischen Lauf- und Leitschaufeln
- Große Anstellwinkel
- Unregelmäßige Anordnung der Leitschaufeln und der Laufradschaufeln
- In Umfangsrichtung geschwungene Laufradschaufeln
- Verringerung des Spaltabstandes zwischen Laufrad und Gehäuse

Neben den Ventilatoren erzeugen auch die Kompressoren tieffrequente Geräusche. Kompressoren unterscheiden sich im Verdichtungsprinzip (z. B. Scroll-Kompressor, Hubkolben-Kompressor) und sind in verschiedenen Leistungsklassen erhältlich [96]. Eine Information (z. B. Kennzeichnung) über die tieffrequenten Geräuschanteile geben die Hersteller jedoch meist nicht. Besonders kritisch ist dies bei Bauarten, die zwar einen geringen A-bewerteten Schallleistungspegel angeben, jedoch merklich mehr tieffrequente Geräuschanteile enthalten. Geräuschminderungsmaßnahmen an Kompressoren nach [96] sind:

- Einsatz von Schraubenspindel- oder Kreiselpumpen an Stelle von Zahnradpumpen
- Einsatz von Pulsationsdämpfern am Ein- und Austritt des Kompressors
- Entdröhnung des Riemenschutzkastens
- Akustisches Verschließen der Triebwerksbelüftung
- Verwendung eines geräuscharmen Getriebes bzw. Motors
- Einsatz einer geräuscharmen Schmierölpumpe
- Reduktion der Drehzahl des Kompressors
- Verwendung eines Direktantriebs
- Einbau eines formstabilen Kurbelgehäuses
- Vermeidung von Resonanzeffekten in angeschlossenen Rohrleitungen

Auch eine Erhöhung der Leistung kann tieffrequente Geräusche mindern. Diese Maßnahme kann jedoch der Energieeffizienz der Anlage entgegen wirken. Eine Leistungserhöhung steigert auch die Geräuschemission im mittel- und hochfrequenten Bereich, diese ist jedoch einfacher zu mindern.

Maßnahmen zur Minderung der Körperschallübertragung können ebenfalls tieffrequente Geräusche mindern. Diese Maßnahmen lassen sich im Gegensatz zu den oben genannten meist erst bei der Errichtung der Anlage umsetzen. Ziel dabei ist die Entkopplung von schwingungsübertragenden Bauteilen und eine günstige Wahl des Aufstellortes von Kompressor und Ventilator. Dabei können Flächenlager (z. B. Sylomerlager oder technisch gleichwertige) eingesetzt werden. Aber auch kraftschlüssige Verbindungen können mit entsprechenden Befestigungsmaterialien entkoppelt werden.

3.3.2.2 Blockheizkraftwerke

Tieffrequente Geräuschemissionen werden in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) insbesondere durch drehzahlabhängige Motorengeräusche und den daraus resultierenden Abgasgeräuschen verursacht [58]. Die größten Pegel und Tonalitäten sind im Bereich der Zündfrequenz der Motoren zu erwarten. Beeinflusst wird die Zündfrequenz durch Drehzahl, Anzahl der Zylinder und der Taktzahl. Wirksame primäre Schutzmaßnahmen (schalltechnische Optimierung an Motor, Getriebe oder Pumpe) gegen tieffrequente Geräusche von BHKW sind bisher nicht bekannt. Dies kann eher durch Sekundärmaßnahmen (Aufstellort, Dämmung der Zu- und Abluftkanäle und des Abgaskamins) kompensiert werden.

Nach [3] sind folgende Maßnahmen zu empfehlen:

- Vermeidung, Isolierung und Dämmung von Körperschall
- geeignete Lagerung des Motors über Körperschallisolatoren, in der Regel passiv über Federn oder Dämpfer
- Absorptions-, Reflexions- und aktive Resonanz-Schalldämpfer in der Abgasleitung zwischen Motor und Kamin sowie den Zuluftöffnungen
- Schornsteine mit eckigem Innenzug

Ist das BHKW Teil einer Biogasanlage, sind folgende Maßnahmen in Betracht zu ziehen:

- Abschirmung und Kapselung von Rührwerk und Substratdosierer
- Wahl von geräuscharmen Luftkühlern
- ein dem Immissionsort abgewandter Standort
- bauliche Anordnung der emissionsintensiven Bauteile

3.3.2.3 Windenergieanlagen (WEA)

Windenergieanlagen haben eine Vielzahl an mechanisch- und strömungsbedingten Geräuschquellen. Die Grundfrequenzen der Rotorbewegungen sind aufgrund der sehr geringen Drehzahlen (häufig bei ca. 15-40 U/min) im Bereich von ca. 1 Hz bis 2 Hz mit entsprechenden Harmonischen, die den gesamten tieffrequenten Bereich durchlaufen. Die Schalldruckpegel der Rotorbewegungen im Bereich der Grundfrequenz sind jedoch auch im Nahbereich der Anlage gering und somit in den meisten Fällen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle (vgl. [75]).

Die aeroakustischen Geräusche entstehen hauptsächlich durch Verwirbelungen an den Hinterkanten der Rotorblätter sowie an den Blattspitzen und sind die Hauptgeräuschquelle einer Windenergieanlage. Eine Reduktion der strömungsinduzierten Geräusche durch eine Anpassung der Geometrie der Rotorblätter ist äußerst komplex und derzeit Thema verschiedener Forschungsvorhaben (vgl. z.B. TremAc [106]). Sägezahnförmige Hinterkanten und sog. Kämme an den Flügelspitzen können beispielsweise zu einer optimierten Umströmung der Flächen und somit zu einer Minderung der tieffrequenten Geräuschkomponenten führen. Die breitbandigen mechanischen Geräusche durch den Generator usw. können meist durch verschiedene Schallschutzmaßnahmen wie beispielsweise Kapselung, Dämmung oder Dämpfung ausreichend gemindert werden.

3.3.2.4 Haushaltsgeräte

Bei Haushaltsgeräten können tieffrequente Geräusche primär durch die Optimierung von Drehzahlen, den Einsatz moderner Aggregate (z. B. leicht laufende Verdichter und Pumpen) und die Minderung von Strömungsgeräuschen verringert werden. Ebenso ist die Anpassung der Betriebszyklen eine Möglichkeit, sowohl die Geräuschemission als auch den Energieverbrauch zu senken. Großvolumige Luftschallabsorber könnten ebenfalls eine Minderung bedeuten, werden in den Geräten jedoch meist aus Platz- und Kostengründen nicht verbaut. Beim Betrieb von Haushaltsgeräten entstehen oftmals auch Körperschallemissionen, die sekundär zu tieffrequenten Geräuschen führen können. Eine schwingungsmindernde Unterlage schützt bei vielen Haushaltsgeräten vor der Entstehung und Übertragung von Körperschall, ob bei der elektrischen Kaffeemühle, beim Kühlschrank oder bei der Waschmaschine.

3.3.3 Sekundäre Maßnahmen zur Minderung tieffrequenter Geräusche an der Quelle

Als sekundär werden Geräuschminderungsmaßnahmen bezeichnet, die im Grunde unabhängig vom Maschinen- oder Gerätebetrieb sind. Sie können meist auch noch durchgeführt werden, wenn die Geräuschquelle bereits installiert und in Betrieb ist. Üblich sind Abschirmungen der Geräuschausbreitung durch bauliche Hindernisse. Dieser schallabschirmende Effekt ist im tiefen Frequenzbereich jedoch nur begrenzt wirksam. Dies ist physikalisch darin begründet, dass Schallwellen mit großen Wellenlängen um oder über den Schallschirm gebeugt werden. Ebenso sind Sträucher, Hecken und Bäume

als Schutz vor tieffrequenten Geräuschen vollkommen ungeeignet. Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen lassen sich technisch nicht bei jeder Anlage umsetzen. Vor allem bei Windenergieanlagen sind diese sekundären Maßnahmen nicht anwendbar.

3.3.3.1 Schalldämpfer

Schalldämpfer sind insbesondere bei Geräten zur Wärme- und Kälteerzeugung (z. B. Luftwärmepumpen) wirksam. Je nach erforderlichem Dämpfungsspektrum können verschiedene Schalldämpfer-Typen in den Zu- und Abluftschächten der Anlage verwendet werden. Für eine Reduktion von tonalen tieffrequenten Geräuschen eignen sich vor allem Reflexions- oder Resonator Konstruktionen innerhalb der Luftkanäle.

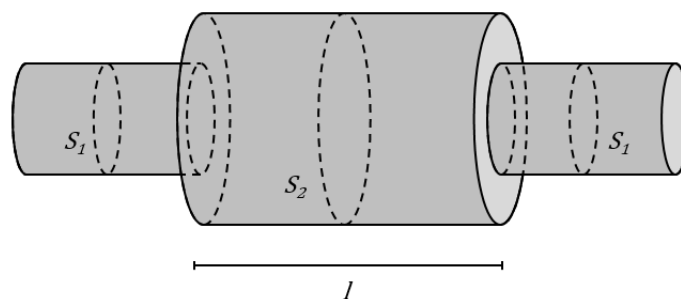
Absorptionsschalldämpfer

Absorptionsschalldämpfer wandeln die kinetische Schallenergie durch Reibung der Luftteilchen an einem porösen Material in Wärmeenergie um. Dabei ist die Dämpfung besonders effektiv, wenn die absorbierenden Materialien (Akustikschaumstoffe o. ä.) im Bereich der Amplitudenmaxima der Schallschnelle lokalisiert sind. Für die Minderung von tieffrequenten Geräuschen bedeutet dies, dass das Absorptionsmaterial entweder eine große Dicke aufweisen muss oder in einem gewissen Abstand zur schallharten Oberfläche befestigt sein muss. Die Hersteller geben üblicherweise die frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade des Dämpfungsmaterials an.

Reflexionsschalldämpfer

Tieffrequente Geräusche können in Reflexionsschalldämpfern durch ausbreitungsbedingte Energieverluste in komplexen Strukturen (Kammern, Kanäle usw.) reduziert werden. Die maximale Dämpfung tritt im Bereich der Resonanzfrequenz und ihren Obertönen auf, wobei die Kammerlängen entscheidend für die Tonhöhen der Resonanzfrequenzen sind. Je niedriger die Frequenz des zu mindernden Tons ist, desto länger muss die Kammer sein. Die Dämpfung hängt dabei stark vom Verhältnis der verschiedenen Querschnittsflächen der Kammern und Luftschächte ab. Abbildung 38 zeigt den schematischen Aufbau eines 1-Kammer-Reflexionsschalldämpfers mit den Querschnittsflächen S und der Länge der Kammer l .

Abbildung 38: Vereinfachter Aufbau eines Kammer-Schalldämpfers



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

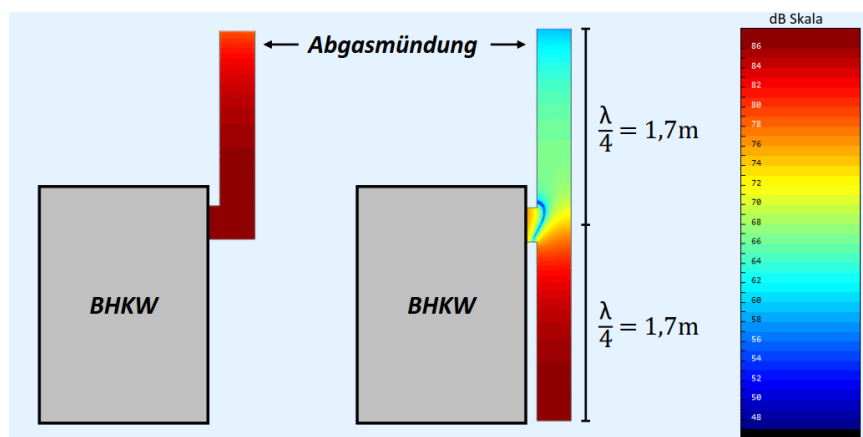
Resonanzschalldämpfer

Resonatoren sind am Ausbreitungskanal des Geräusches angebrachte Luftkammern, die einzelne Töne infolge einer Schallfelddiskontinuität (stehende Welle bzw. Masse-Feder-System) dämpfen können. Insbesondere tonale Geräuschkomponenten im tief- bis mittelfrequenten Bereich lassen sich sinnvoll durch diese Art von Schalldämpfern mindern. Der Einsatz von Resonanzschalldämpfern ist besonders

bei Systemen mit langen Schächten, in denen sich Luftschall ausbreiten kann, sinnvoll (z. B. Luftwärmepumpen und Mini-BHKW). Der Druckverlust sowie der Platzbedarf müssen dabei jedoch berücksichtigt werden.

Bei sogenannten $\lambda/4$ -Resonatoren muss die Länge des Resonatorhohlraums ein Viertel mal so lang sein wie die Wellenlänge der maßgeblichen Resonanzfrequenz. Für einen 50-Hz-Ton wäre deshalb beispielsweise eine Kammerlänge von ca. 1,7 m notwendig. Abbildung 39 zeigt beispielhaft den Vergleich der Geräuschemissionspegel eines BHKW an der Abgasmündung mit und ohne $\lambda/4$ -Resonatordämpfung bei 50 Hz. Durch Schalldämpfer-Ausführungen mit mehreren $\lambda/4$ -Resonatoren unterschiedlicher Längen können auch breitbandige Dämpfungen erzielt werden. Mehrere hintereinander gelegene $\lambda/4$ -Resonatoren gleicher Länge verstärken die Wirksamkeit für die maßgebliche Resonanzfrequenz.

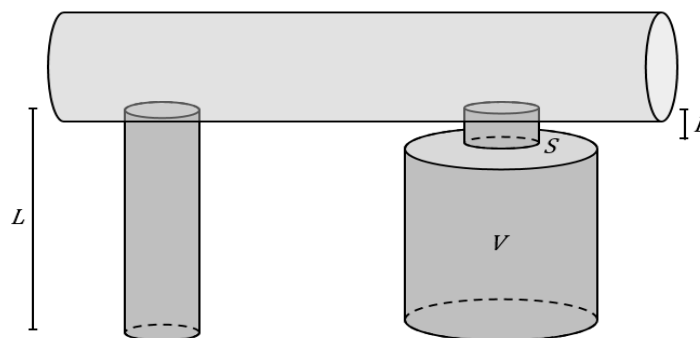
Abbildung 39: Vergleich der Geräuschemissionen eines BHKW (exemplarisch für 50 Hz) an der Abgasmündung ohne (links) und mit (rechts) $\lambda/4$ -Resonatordämpfung



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Ähnlich wie $\lambda/4$ -Resonatoren wirken auch sogenannte Helmholtz-Resonatoren im schmalbandigen tief- bis mittelfrequenten Bereich. Die Dämpfung ist wirksamer und gezielter, erfolgt hier allerdings nicht mittels einer stehenden Welle sondern durch ein mechanisches Masse-Feder-System. Die Resonanzfrequenz eines Helmholtz-Resonators bestimmt sich durch Länge und Querschnitt des „Flaschenhalses“ und dem Luftvolumen des Resonators. In Abbildung 40 sind ein $\lambda/4$ -Resonator und Helmholtz-Resonator vereinfacht dargestellt. Für Helmholtz-Resonatoren gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausführungsvarianten (z. B. Lochplatten- oder Schlitzplatten-Resonatoren). Ihre Geometrie ist häufig komplex und in der Abbildung 40 nur sehr vereinfacht dargestellt.

Abbildung 40: Schalldämpferkonstruktionen (links: $\lambda/4$ -Resonator; rechts: Helmholtz-Resonator) an einem Luftkanal (vereinfachter Aufbau)

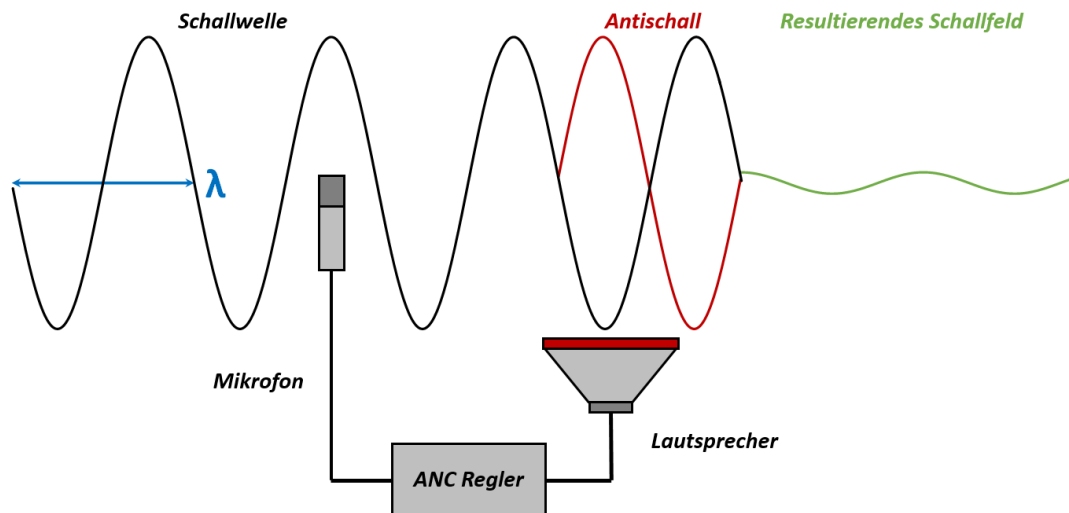


Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

3.3.3.2 Active Noise Control

In einem aktiven Schalldämpfungssystem, bzw. englisch Active Noise Control (ANC), wird nach Erfassung und Analyse des Störgeräusches als Führungsgröße mittels Messmikrofon über einen Lautsprecher ein kohärentes aber um 180° phasenverschobenes Signal (Antischall) erzeugt. Die Interferenz von Störgeräusch und Antischall ermöglicht dann eine Minimierung der Schalldruckamplitude bis hin zur kompletten Auslöschung. Abbildung 41 zeigt das Funktionsprinzip. Aus praktischen Anwendungen von ANC im tieffrequenten Bereich ist bekannt, dass ein definierter Hohlraum mit einer gewissen Mindestgröße vorhanden sein sollte, in dem der Gegenschall bei möglichst konstanten Bedingungen auf das Störgeräusch treffen kann.

Abbildung 41: Prinzip der Amplitudeninterferenz mittels Active Noise Control



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

ANC-Systeme werden bisher hauptsächlich in der Automobil- und Flugzeugindustrie eingesetzt. ANC ist aufgrund des geringen Platzbedarfs, einer bereits vorhandenen Stromversorgung und der Wirksamkeit durch individuell anpassbare Breitbanddämpfung im tiefen Frequenzbereich besonders auch zur Minderung tieffrequenter Geräusche von Luftwärmepumpen, Klimageräten und BHKW geeignet. ANC-Systeme eignen sich im Grunde sowohl zum Einsatz am Immissionsort (im Aufenthaltsraum) sowie an der Geräuschquelle [70]. Allerdings sind möglichst gleichbleibende Zeit- und Frequenzstrukturen der Geräusche Voraussetzung für die Wirksamkeit von ANC-Systemen.

3.3.3.3 Kapselung

Kompakte Geräuschquellen wie Wärmepumpen und BHKW können teilweise oder vollständig eingekapselt werden, um die Ausbreitung des Luftschalls zu reduzieren. Dies ist bei Windenergieanlagen nicht möglich. Offene Schallschutzhauben oder Teilkapseln müssen innenseitig mit einem absorbierenden Material bedeckt sein, um Reflexionen zu vermeiden und Schall zu absorbieren. Eine vollständige Einhausung mit Betonwänden (ein sogenannter „Schallschutzbunker“) verspricht die besten Geräuschminderungseffekte. Kapselungen mit leichteren Materialien als Beton bewirken eher eine Verringerung der mittel- und hochfrequenten Geräusche. Allerdings muss bei einer Vollkapselung der Transport von Zu-, Abluft, Abgas und Wärme gewährleistet sein, ohne die wirksamen Geräuschminderungseffekte zu verringern. Ein Beispiel dafür sind die Betongebäude von Trafo- und Ortsnetzstationen. Durch die für die Belüftung der Transformatoren und Umspanneinrichtungen notwendigen Öffnungen werden Geräusche nicht oder nur geringfügig gedämpft. Zur Kapselung können auch vorhan-

dene Bauelemente genutzt werden. Zum Beispiel kann eine Wand eines Lichtschachts oder die Rückwand einer Garage Teil einer Schallschutzkapsel werden. Somit müssen zusätzliche Wände nicht gegründet und der Schallschutz kann in die vorhandenen baulichen Strukturen integriert werden.

3.3.3.4 Körperschallisolation

Die Fälle, in denen ausschließlich Luftschallimmissionen auftreten, stellen eher eine Ausnahme dar. So heißt es beispielsweise in [19]: „Eine sehr große Zahl der Schallereignisse, die unser Ohr erreichen, werden durch schwingende Festkörper erzeugt oder fortgeleitet.“ Deshalb kommt dem Schutz vor der Entstehung und der Übertragung von Körperschall eine wesentliche Rolle zu.

Körperschall breitet sich in Form von Erschütterungswellen über das Erdreich oder baulich verbundene Bauteile (z.B. eine Tiefgarage oder ein angrenzendes Gebäude) aus. In benachbarten Gebäuden beginnen dann Bauteile zu schwingen und sekundärer Luftschall wird erzeugt. Ein typisches Beispiel ist die Schallabstrahlung eines Leichtbau-Vordachs, welches sich an der gleichen Hauswand mit einer nicht gegen Körperschall gedämmten Kälteanlage befindet. Körperschall kann in den Eigenfrequenzen der Bauteile besonders gut weitergeleitet werden. Da diese Eigenfrequenzen in der Regel im tieffrequenten Bereich liegen, ist der Körperschall meistens auch vor allem dort ausgeprägt. Bei Windenergieanlagen und BHKW wird häufig ein maßgebender Wirkanteil von Körperschall auf die Entstehung von Luftschallimmissionen vermutet. Das Landesamt für Umwelt in Baden-Württemberg hat Erschütterungen an Windenergieanlagen gemessen [75]. Die Erkenntnis ist, dass Erschütterungen durch Windenergieanlagen in technisch und verwaltungsrechtlich in Deutschland vorkommenden Abständen als nicht wirkungsrelevant eingestuft wurden. Auch bei Blockheizkraftwerken konnten bisher lediglich im näheren Umfeld der Anlagen (Abstände von deutlich weniger als 50 m) relevante Körperschallimmissionen festgestellt werden.

Auf die Körperschallübertragung im Erdreich hat die Bodenbeschaffenheit einen wesentlichen Einfluss. In städtischen, stark versiegelten Gebieten, werden Schwingungen weiter getragen als im gewachsenen Boden im ländlichen Umfeld. Anhand von gemessenen Schwingschnellepegeln im Erdreich sind über Schätzmethoden (vgl. DIN 4150-1) Rückschlüsse auf die mögliche Schwingstärke der Quelle bzw. den nötigen Abstand zu Wohnbebauung möglich. Im Bereich starker Erschütterungsquellen wie beispielsweise an Schienenverkehrswegen oder bei größeren Industrieanlagen haben sich seit Jahren elastische bzw. teilelastische Gebäudelagerungen bewährt. Die in diesem Bericht zur Diskussion stehenden Anlagen sollten elastisch gelagert werden, um Körperschall zu mindern. Zudem sind Körperschallbrücken zum Gebäude (z. B. über Verschraubungen, Rohre usw.) zu vermeiden.

3.3.4 Organisatorische Lärminderungsmaßnahmen

Ein Grund für die besondere Störwirkung von tieffrequenten Geräuschen in der Umgebung von Wohnbebauung ist häufig die dauerhafte Exposition der Betroffenen vor allem in den Ruhe- und Nachtzeiten, wenn andere Umgebungsgeräusche besonders gering sind. Dies hat nach Persson, Waye und Rylander [85] nicht selten eine Sensibilisierung des subjektiven Hörempfindens hin zu tieferen Frequenzen zur Folge.

Die Ursache für dieses Problem ist meistens der durchgehende Betrieb stationärer Anlagen zur Energieerzeugung. Die Beschränkung der Betriebszeiten sowie eine Abschaltung der Anlagen in den Ruhezeiten kann hierfür Abhilfe schaffen. Im Zuge der zunehmenden Gebäudeautomatisierung können moderne Wärmeerzeugungsanlagen so betrieben werden, dass ein Betrieb während der Ruhezeiten nicht notwendig ist. Zum Beispiel puffern moderne Wärmespeicher genügend Wärme für Heizung und Brauchwasser, so dass in Ruhezeiten nicht nachgeheizt werden muss. Die Anlagen können dann in den Zeiten betrieben werden, in denen die Anlagengeräusche gegenüber anderen Umgebungsgeräuschen, z. B. Verkehrslärm, weniger oder gar nicht auffallen.

3.4 Kosten und Nutzen von Schutzmaßnahmen gegen tieffrequente Geräusche

3.4.1 Schutzmaßnahmen vor der Errichtung und Inbetriebnahme

Werden Standort und Anlagentyp optimal gewählt, ist der Nutzen für die Geräuschminderung am höchsten. Bei Errichtung und Betrieb der Anlagen im Innenraum kann die Geräuschsituation im Freien stark verbessert werden, es sind allerdings Mehrkosten für den Raumbedarf und für die Be- und Entlüftung der Anlagen einzukalkulieren. Bei einer Aufstellung im Freien sollten ein ausreichender Abstand zu schutzbedürftigen Flächen und ggf. Kosten für akustische Sachverständige berücksichtigt werden. Bei der Auswahl des Anlagenmodells ist darauf zu achten, dass dieses nicht nur einen möglichst geringen Schallleistungspegel (L_{WA}) aufweist, sondern auch der Geräuschcharakter im tieffrequenten Bereich bekannt ist. Die Kostenunterschiede zwischen Anlagen mit unterschiedlichen Schallleistungspegeln sowie mit oder ohne Angabe tieffrequenter Geräuschcharakteristika sind hingegen vernachlässigbar. Im Grunde fallen nur geringe Mehrkosten an, wenn man sich bereits im Vorfeld mit der Thematik auseinandersetzt. Durch geeignete Planung von Maßnahmen können nachträgliche Kosten für schalltechnische Schutzmaßnahmen weitgehend vermieden werden. Allerdings können Kosten für eine schalltechnische Prognoseschätzung und für die Klärung der rechtlichen Situation entstehen. In Summe mit der Eigenleistung des Bauherrn liegen die Aufwendungen vor Errichtung und Betriebnahme zwischen 2.000 und 5.000 EUR. Diese Kosten fallen jedoch auch ohne den Fokus auf Geräuschminderung an.

Tabelle 2 zeigt Kosten und Nutzen von Maßnahmen vor Errichtung und Inbetriebnahme.

Tabelle 2: Maßnahmen vor der Errichtung und Inbetriebnahme

Maßnahme	Kosten ca. [EUR]	Nutzen/ Wirksamkeit ca. [dB]
Festlegung der Anforderungen (Leistung, Spezifikation usw.)	Eigenleistung	-
Standort- und Geräteauswahl	Eigenleistung	5-10
Schalltechnische Prognoseschätzung und Klärung der rechtlichen Situation	ab 2.000	3-5
Abstimmungen/ Information Behörden und Nachbarschaft	Eigenleistung	-
Planung technischer Maßnahmen für die Errichtung	Eigenleistung	2-3

Bei der Wirksamkeit der Maßnahmen aus Tabelle 2 wurden Effekte wie ein abgeschirmter Standort, die Berücksichtigung von sensibler Nachbarschaft (z.B. Aufstellung Richtung WA statt WR) und übliche Maßnahmen an der Anlage selbst angesetzt. Die Wirksamkeit bezieht sich immer auf einen nicht geplanten, ungünstigen Fall und ist nicht generell gegeben.

3.4.2 Schutzmaßnahmen nach der Errichtung und Inbetriebnahme

Insbesondere dauerhaft vorgeprägte Betroffene (siehe Abschnitt 2.2.1) erwarten von nachträglichen Geräuschminderungsmaßnahmen meist, die Geräuschquelle „nicht mehr hören bzw. wahrnehmen zu wollen“. Diese Erwartung ist bereits vor Errichtung und Inbetriebnahme praktisch kaum bzw. nur in Sonderfällen technisch erfüllbar. Nachträgliche Geräuschminderungsmaßnahmen kommen letztlich nur dort zum Einsatz, wo die Geräusche dieser Anlagen hör- oder wahrnehmbar zu Belästigungen bzw. Störungen geführt haben. Dann wird die Diskrepanz zwischen der Erwartungshaltung der vom tieffrequenten Geräusch Betroffenen und der empfundenen Wirksamkeit nachträglicher Geräuschminderungsmaßnahmen offensichtlich.

Nachträgliche Maßnahmen zur Reduktion tieffrequenter Geräusche sind häufig aufwendig, mit hohen Kosten verbunden und erzielen dabei nicht immer den erwünschten Minderungseffekt. Orientierungswerte für Kosten und Nutzen möglicher nachträglicher Maßnahmen sind in Tabelle 3 zu finden. Dabei sind Maßnahmen für die typischen Anlagentypen (Mini-BHKW, Wärmepumpen und sonstige technische Gebäudeausrüstungen wie Heizungs-, Lüftungsanlagen, Klima- und Kühlgeräte sowie Haushaltsgeräte) aufgeführt. Nachträgliche Maßnahmen für die Anwendung an Windenergieanlagen sind weder oben noch im Folgenden aufgeführt. Diese Auflistung ist nicht abschließend. Sie stellt eine Art Checkliste dar, die im Konfliktfall für die spezifische Anlage abgearbeitet und um weitere Maßnahmen ergänzt werden kann.

Die in Tabelle 3 genannten Angaben für Kosten und Nutzen sind mittlere Erfahrungswerte aus verschiedenen Untersuchungen. Diese können im Einzelfall zwar abweichen, sind jedoch für verschiedene Anlagentypen ähnlich. Es ist erkennbar, dass nachträgliche Geräuschminderungsmaßnahmen

1. mit zusätzlichen Kosten für Rechtsberatung, Sachverständige und Planer von erfahrungsgemäß ca. 10.000 EUR verbunden sind, ohne dass damit eine tatsächliche Geräuschminderung erreicht wird,
2. Maßnahmen bis ca. 5 dB Kosten bis ca. 2.000 EUR verursachen und
3. darüber hinausgehende Pegelminderungen bis ca. 20 dB mit sehr hohen Kosten von mindestens 5.000 EUR erzielt werden können.

Eine nachträgliche Geräuschminderung kostet somit zwischen 12.000 und 15.000 EUR. Dabei sind die Eigenleistung, die Belastung des Anlagenbetreibers und des betroffenen Nachbarn nicht eingerechnet. Vorsichtig geschätzt kosten diese Eigenleistungen (Arbeitsausfall, Teilnahme an Terminen, Behandlung von Stellungnahmen und Diskussionen usw.) etwa 5.000 EUR.

Somit kostet eine nachträgliche Geräuschminderung etwa viermal so viel wie gut umgesetzte Maßnahmen vor Errichtung und Inbetriebnahme (vgl. Abschnitt 3.4.1). Gleichzeitig sind die Aussichten für eine nachhaltige Konfliktlösung aufgrund der Sensibilisierung der Betroffenen und der dauerhaften Fokussierung auf den Lärmkonflikt deutlich geringer.

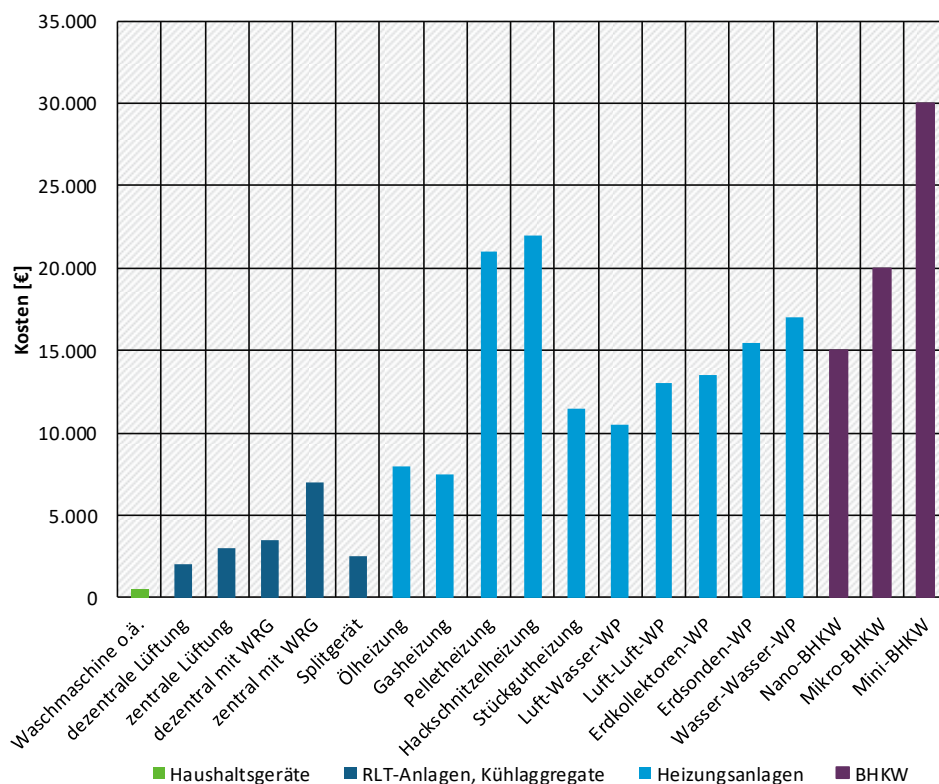
Tabelle 3: Nachträgliche Maßnahmen zur Minderung tieffrequenter Geräusche

Maßnahme	Kosten ca. [EUR]	Nutzen/ Wirk-samkeit ca. [dB]
Rechtsanwaltskosten (je Partei)	2.000 - 5.000	-
Kosten für schalltechnisches Gutachten (Feststellungen)	3.000	-
Planungskosten (Architekt, Fachplaner usw.)	2.000 – 4.000	-
Austausch/Modifikation von Anlagenkomponenten	ab 500	3
Errichtung einer Haube/Hutze (Paar)	2.000	2-8
Errichtung einer Schallschutzwand	200/m ²	8-10
Einhausung	5.000	20
Absenkung/Verlegung in Lichtschacht	2.000	5
Einbau von Dämmungs- oder Dämpfungselementen	1.500	3-5
Einbau Schalldämpfer mittels Helmholzresonator an Abluftka-min für 50 Hz	3.000	15-20
Elastische Lagerung, Körperschallentkopplung	500-1.000	10 (in Einzelterzen)
Nachbesserung des Maschinenfundaments oder -rahmen	1.500	3-5

Maßnahme	Kosten ca. [EUR]	Nutzen/ Wirk- samkeit ca. [dB]
Eingriffe in die Steuerung, Leistungsbegrenzung	500	2-6
Aktive Bekämpfung (ANC) in/an Gehäuse	4.000	10-20 (in Einzelterzen)
Beschränkung der Anlagenbetriebszeit (auf 1/4)	0	6
Austausch gegen ein leiseres Gerät	Kosten Erwerb	10
Anlage mit mehr Leistung, Effizienz oder Pufferspeicher	Kosten Erwerb	3
Auswahl einer alternativen Technologie an dem Standort	Kosten Erwerb	10-15
Verstimmung der Anlage, z. B. andere Drehzahl	500	2-6
Standortverlegung	Installations- kosten + Rückbau	25
Umlegung zur Innenaufstellung	Kosten Erwerb + Rückbau	30

Es soll im Folgenden die Kosteneffizienz von nachträglichen Geräuschkinderungsmaßnahmen bewertet werden. Dazu werden deren Kosten ins Verhältnis zu den Kosten beim Erwerb einer entsprechenden Anlage gesetzt. Ein Gesamtkostenvergleich über die Lebensdauer einer Anlage ist dies jedoch nicht. Sollte eine ohnehin defekte Anlage ersetzt werden müssen, ist das Kostenverhältnis eher wie im Abschnitt 3.4.1 zu beurteilen. Die Anschaffungs-, Erschließungs- und Installationskosten unterscheiden sich bei den Geräten und Anlagen im Fokus dieser Untersuchung teilweise stark. Abbildung 42 stellt diese Kosten verschiedener Anlagentypen ohne Geräuschkinderungsmaßnahmen beim Erwerb dar.

Abbildung 42: Orientierungswerte für Kosten beim Erwerb verschiedener Anlagentypen



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Windenergieanlagen wurden nicht betrachtet, weil es sich in der Regel um genehmigungsbedürftige Anlagen (ausgenommen die relativ seltenen KWEA) handelt, deren Kosten in erheblichem Maße vom Standort abhängen und zu den Kosten der Maßnahmen auch unwägbare Folgekosten hinzukommen. Deshalb ist die Kosteneffizienz der Maßnahmen nicht zu beurteilen. Haushaltsgeräte wurden wegen geringen Konfliktpotentials mit der Nachbarschaft ebenfalls nicht betrachtet. Es wurde das prozentuale Verhältnis der Kosten für nachträgliche Geräuschminderungsmaßnahmen zu den Erwerbskosten der Anlagen gebildet. Abbildung 43 zeigt diese Verhältnisse. So ist erkennbar, dass bei teureren Anlagen teilweise mehrere Maßnahmen kosteneffizient sein können. Andererseits können nachträgliche Maßnahmen bei kostengünstigeren Anlagen unverhältnismäßig teuer sein. Nachträgliche Maßnahmen, die mehr als die Hälfte, zum Teil sogar das Doppelte der Erwerbskosten erfordern, sind faktisch mit einer Stilllegung bzw. Neuerrichtung gleichzusetzen. Solche Maßnahmen sind in der Regel nur auf gerichtliche Anordnung am Ende eines Rechtsstreits zu ergreifen.

Exemplarisch soll ein Fall gezeigt werden, bei dem die Autoren als Gutachter beteiligt gewesen sind: Nachbarn stritten vor Gericht wegen Geräuschimmissionen aus einer Luftwärmepumpe. Dabei entstanden Kosten für das gerichtliche Verfahren, Rechtsanwälte und schalltechnische Gutachten. Als Lösung für den Streitfall genügte der Einbau eines schallgedämmten Lüftungsgitters für einen Bruchteil der gesamten Gerichtsprozesskosten.

Tendenziell sind nachträgliche Maßnahmen zur Geräuschminderung immer mit relativ hohen Kosten verbunden. Und je höher die Kosten der Maßnahmen sind, desto höher sind auch die erreichbaren Pegelminderungen. Im Konfliktfall muss teilweise der Rückbau, eine Alternativplanung oder die Neuplanung einer anderen Anlage in Betracht gezogen werden. Nur so kann in Einzelfällen eine zuverlässige und nachhaltige Verbesserung der Geräuschsituation herbeigeführt werden. Umso sinnvoller ist eine sorgfältige Planung im Vorfeld der Errichtung.

Abbildung 43: Prozentuale Kosten für nachträgliche Geräuschminderungsmaßnahmen

		Maßnahmenkosten/Anlagenkosten																
		Austausch Komponenten	Haube/Hutze	Schallschutzwand	Einhausung	Absenkung	Dämmung/Dämpfung	Körperschallentkopplung	Nachbesserung Fundament	Leistungsbegrenzung	ANC	Betriebszeitenbeschränkung	leiseres Gerät	leistungstärkere Anlage	alternative Technologie	Verstimmung	Standortverlegung	Innenaufstellung
Wärme-pumpen	Luft-Wasser-WP	5%	19%	19%	48%	19%	14%	7%	14%	5%	38%	0%	100%	80%	100%	5%	40%	120%
	Luft-Luft-WP	4%	15%	15%	38%	15%	12%	6%	12%	4%	31%	0%	100%	80%	100%	4%	40%	120%
	Erdkollektoren-WP	4%	15%	15%	37%	15%	11%	6%	11%	4%	30%	0%	100%	80%	100%	4%	40%	120%
	Erdsonden-WP	3%	13%	13%	32%	13%	10%	5%	10%	3%	26%	0%	100%	80%	100%	3%	40%	120%
	Wasser-Wasser-WP	3%	12%	12%	29%	12%	9%	4%	9%	3%	24%	0%	100%	80%	100%	3%	40%	120%
BHKW	Nano-BHKW	3%	13%	13%	33%	13%	10%	5%	10%	3%	27%	0%	100%	80%	100%	3%	40%	120%
	Mikro-BHKW	3%	10%	10%	25%	10%	8%	4%	8%	3%	20%	0%	100%	80%	100%	3%	40%	120%
	Mini-BHKW	2%	7%	7%	17%	7%	5%	3%	5%	2%	13%	0%	100%	80%	100%	2%	40%	120%
Heizung	Ölheizung	6%	25%	25%	63%	25%	19%	9%	19%	6%	50%	0%	100%	80%	100%	6%	40%	120%
	Gasheizung	7%	27%	27%	67%	27%	20%	10%	20%	7%	53%	0%	100%	80%	100%	7%	40%	120%
	Pelletheizung	2%	10%	10%	24%	10%	7%	4%	7%	2%	19%	0%	100%	80%	100%	2%	40%	120%
	Hackschnitzelheizung	2%	9%	9%	23%	9%	7%	3%	7%	2%	18%	0%	100%	80%	100%	2%	40%	120%
	Stückgutheizung	4%	17%	17%	43%	17%	13%	7%	13%	4%	35%	0%	100%	80%	100%	4%	40%	120%
Lüftungs-anlagen	dezentral	25%	100%	100%	250%	100%	75%	38%	75%	25%	200%	0%	100%	80%	100%	25%	40%	120%
	zentral	17%	67%	67%	167%	67%	50%	25%	50%	17%	133%	0%	100%	80%	100%	17%	40%	120%
	dezentral mit WRG	14%	57%	57%	143%	57%	43%	21%	43%	14%	114%	0%	100%	80%	100%	14%	40%	120%
	zentral mit WRG	7%	29%	29%	71%	29%	21%	11%	21%	7%	57%	0%	100%	80%	100%	7%	40%	120%
Klimageräte		20%	80%	80%	200%	80%	60%	30%	60%	20%	160%	0%	100%	80%	100%	20%	40%	120%

Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Nachträgliche Geräuschminderungsmaßnahmen sollten im Konfliktfall hinsichtlich der Eignung für den spezifischen Fall bewertet werden. Die im Einzelfall möglichen Maßnahmen können dann wie Bausteine kombiniert werden. Für die Auswahl von kombinierten Maßnahmen wird folgende Prüffolgenfolge empfohlen:

1. Organisatorische Maßnahmen, zum Beispiel durch einen Eingriff in die Anlagensteuerung oder Erweiterungskapazitäten (Pufferspeicher, Zusatzanlagen etc.). Das Ziel ist, dass Anlagen in sensiblen Zeiten (Abend-, Nachtstunden, Sonn- und Feiertage) möglichst geräuscharm betrieben werden können. Solche Maßnahmen dienen dazu, dass sich Personen in der Nachbarschaft nicht zu allen Tageszeiten und Lebenssituationen gleichermaßen gestört fühlen.
2. Technische Maßnahmen an der Anlage, zum Beispiel der Austausch von Komponenten, Hauben/ Hutzen, Schalldämpfer, Schalldämmelemente, Verstimmungen, Aussteifungen und Körperschallentkopplungen. Damit kann vor allem die Stärke der Geräuschenstehung verringert werden.
3. Baulich-planerische Maßnahmen, wie beispielsweise Schallschutzwände, das Verlegen von Anlagen/-komponenten oder Einhausungen. Damit können die Geräusche gedämpft, entzerrt oder verlagert werden.

Wichtig ist dabei stets die Kooperation mit dem Anlagenhersteller (z.B. um nicht die Gewährleistung zu verlieren), dem Installateur (z.B. zur technischen Realisierbarkeit und Funktionalität der Anlage) und dem Fachplaner/Berater (z.B. Fragen der Baugenehmigung für eine Lärmschutzwand, der optischen Beeinträchtigung oder einer Bewertung von kombinierten Maßnahmen durch den schalltechnischen Berater). Die pegelmindernde Wirkung kombinierter Maßnahmen entspricht üblicherweise einfach der arithmetischen Summe der einzelnen Minderungspegel (vgl. Tabelle 3), zum Beispiel:

Maßnahme 1: Beschränkung der Anlagenbetriebszeit	- 6 dB
Maßnahme 2: Einbau von Dämpfungselementen	- 3 dB
Maßnahme 3: Errichtung einer Schallschutzwand	- 10 dB

Wirksamkeit der kombinierten Lärminderung	- 19 dB

Die tatsächliche Wirksamkeit der Maßnahmen ist erfahrungsgemäß immer vom Einzelfall abhängig. Es ist daher empfehlenswert, nach Umsetzung jeder einzelnen Maßnahme zunächst deren Wirksamkeit zu überprüfen, bevor eine weitere Maßnahme ergriffen wird.

4 Rechtsgutachten

In Deutschland werden Immissionen durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG [12]) geregelt. Das BImSchG dient dem Schutz und der Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Immissionen, wobei der Lärmbekämpfung eine wesentliche Rolle des Immissionsschutzes zukommt. Die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) [1] konkretisiert als Verwaltungsvorschrift zum BImSchG im Rahmen ihres Anwendungsbereichs für technische Anlagen. Nr. 7.3 Abs. 1 Satz 1 der geltenden TA Lärm [1] und Ziff. 3.2 Satz 1 der bis heute gültigen DIN 45680, Ausgabe März 1997 [27] definieren die tieffrequenten Geräusche als Geräusche, deren vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich unter 90 Hz liegen². Diese Bedingung ist nach Nr. 7.3 Abs. 1 Satz 2 TA Lärm, Nr. 3.2 Satz 2 der DIN 45680 in der Regel erfüllt, wenn die Differenz zwischen dem C-bewerteten und dem A-bewerteten Pegel größer als 20 dB ist ($L_{CF} - L_{AF} > 20 \text{ dB}$, -„20 dB-Kriterium“)³.

4.1 Aufgabenstellung

Das vorliegende Rechtsgutachten soll auf Basis einer zusammenfassenden Darstellung der aktuellen Rechtslage zeigen, welche Minderungsmaßnahmen mit der aktuellen Rechtslage umsetzbar sind. Darüber hinaus sollen legislative Handlungsoptionen geprüft werden, die notwendig sind, um das Belästigungsniveau im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes auf ein vermeidbares Maß nach dem Stand der Technik zu begrenzen.

4.2 Produktbezogene Anforderungen

4.2.1 Aktuelle Rechtslage

Unionsrechtliche Harmonisierungsmaßnahmen nach Art. 114 AEUV (ex-Art. 95 EGV)

Schon auf der Stufe des Inverkehrbringens können Anforderungen an Produkte zur Verbesserung des Schutzes von Mensch und Umwelt gestellt werden. Die Entstehung schädlicher Umwelteinwirkungen wird damit gemäß dem umweltrechtlichen Vorsorgeprinzip bereits frühzeitig und an der Quelle verhindert. Auch wenn solche Anforderungen – etwa an die Beschaffenheit oder das Emissionsverhalten von Produkten – dem Umweltschutz dienen, haben sie zugleich die Wirkung von Marktzutrittsbedingungen, denn nach diesem Regelungsmuster dürfen nur solche Produkte in den Verkehr gebracht werden, die den Anforderungen entsprechen.

Unterschiedliche Voraussetzungen für das Inverkehrbringen von Produkten in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union sind geeignet, den freien Verkehr von Waren, der ein zentrales Element des Binnenmarktes ist (Art. 26 Abs. 2 AEUV, ex-Art. 14 Abs. 2 EGV, vgl. [55] § 15 Rn. 3 m.w.N.), zu hemmen.

² Die Definition der tieffrequenten Geräusche und damit die Frage, ab welcher Frequenz der vorherrschenden Energieanteile eine besondere Erfassung und Bewertung von Geräuschen erforderlich ist, werden kontrovers diskutiert. In dem Entwurf der Neufassung der DIN 45680 vom September 2013 (E DIN 45680: 2013-09) - der inzwischen ebenso zurückgezogen worden ist wie der Entwurf von August 2011 - wurde in Nr. 3.1 der tieffrequente Schall als Schall definiert, dessen vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich unter 140 Hz liegen.

³ Die Differenz zwischen dem C- und dem A-bewerteten Schalldruckpegel war nach dem – zurückgezogenen - Entwurf der Neufassung der DIN 45680 vom September 2013 (E DIN 45680: 2013-09) das Instrument der *Vorerhebung*. War die Differenz größer als 20 dB, war danach eine Terzanalyse – in Nr. 4.6.2 des E DIN 45680: 2013-09 „Hauptuntersuchung“ genannt – durchzuführen (vgl. Nr. 5.1 der DIN 45680). Nr. 4.6.1 Satz 3 des E DIN 45680: 2013-09 sah vor, dass die Terzanalyse (Hauptuntersuchung) bereits bei einer Differenz zwischen dem C- und dem A-bewerteten Schalldruckpegel von 15 dB vorzunehmen ist. Die Pegeldifferenz C - A wird auch im Arbeitsschutz verwendet für die Auswahl von Gehörschutz. Für diese Zwecke gilt ein Geräusch als tieffrequent, wenn $L_C - L_A > 5 \text{ dB}$ ist (Anhang 2, Nr. 4.2.1. der BGR/GUV-R 194 „Benutzung von Gehörschutz“, Mai 2011, vgl. dazu Paulsen, ZfL 2011, Seite 30/31).

Produktbezogene Vorgaben sind daher i.d.R. Gegenstand von Harmonisierungsmaßnahmen gemäß Art. 114 AEUV (ex-Art. 95 EGV), die eine Verbesserung des Binnenmarktes insbesondere dadurch herbeiführen, dass sie den freien Verkehr von mit der Harmonisierungsmaßnahme vereinbaren Produkten anordnen (sog. Freiverkehrsklauseln, *Kahl*, in: [18] Art. 114, Rn. 24 m.w.N.). Auf Art. 114 AEUV (ex-Art. 95 EGV) kann auch dann zurückgegriffen werden, wenn der Verwirklichung anderer Ziele, etwa solchen des Umweltschutzes, maßgebende oder entscheidende Bedeutung zukommt, solange die Maßnahme tatsächlich das Ziel hat, das Funktionieren des Binnenmarktes zu verbessern (Herrnfeld, in: [98] Art. 114 Rn. 13 m.w.N.).

Von den Vorgaben, die in Harmonisierungsmaßnahmen enthalten sind, kann nur unter den strengen Voraussetzungen in Art. 114 Abs. 3 bis 6 AEUV (ex-Art. 95 Abs. 2 bis 4 EGV - „Schutzklauseln“) abgewichen werden. Besonders hoch sind die Hürden, wenn ein Mitgliedstaat *nach* Erlass einer Harmonisierungsmaßnahme strengere Bestimmungen einführen will. Nach Art. 114 Abs. 5 AEUV (ex-Art. 95 Abs. 5 EGV) ist dies nur zum Schutz der Umwelt oder der Arbeitsumwelt zulässig. Nachträgliche Schutzverstärkungen müssen zudem gestützt sein „*auf neue wissenschaftliche Erkenntnisse*“, also auf Erkenntnisse, die erst nach dem Erlass der Harmonisierungsmaßnahme bekannt geworden sind (*Kahl*, in: [18] Art. 114, Rn. 63 m.w.N.). Zulässigkeitsvoraussetzung für eine nachträgliche Abweichung von einer Harmonisierungsmaßnahme ist nach Art. 114 Abs. 5 AEUV (ex-Art. 95 Abs. 5 EGV) schließlich, dass sie „*aufgrund eines spezifischen Problems*“ für den abweichenden Mitgliedstaat erforderlich ist. Dabei sind die Anforderungen an den Nachweis eines spezifischen Problems sehr hoch. An der notwendigen Spezifität eines Problems fehlt es, wenn es EU-weiter Natur ist. Die Spezifität des Problems kann sich allerdings aus jedem Umstand ergeben, der sich auf den Schutz der Umwelt oder der Arbeitsumwelt bezieht (*Kahl*, in: [18] Art. 114, Rn. 64 m.w.N.). Auch eine im Vergleich zu anderen EU-Mitgliedsstaaten besonders hohe Vorbelastung kann die Spezifität eines Problems begründen⁴.

Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG und Durchführungsmaßnahmen

Die im Zusammenhang von Geräten mit tieffrequenten Geräuschen relevante Richtlinie 2009/125/EG („*Ökodesign-Richtlinie*“) [42] wurde auf Art. 95 EGV (heute: Art. 114 AEUV – Harmonisierungsmaßnahme) gestützt. Nach ihrem Art. 1 Abs. 1 schafft diese Richtlinie einen Rahmen für die Festlegung gemeinschaftlicher Ökodesign-Anforderungen für energieverbrauchsrelevante Produkte mit dem Ziel, den freien Verkehr solcher Produkte im Binnenmarkt zu gewährleisten. Zugleich will die Ökodesign-Richtlinie durch eine Minderung der potentiellen Umweltauswirkungen energieverbrauchsrelevanter Produkte ein hohes Umweltschutzniveau erreichen (10. Erwägungsgrund, Seite 1 der Richtlinie 2009/125/EG, Art. 114 Abs. 3 AEUV, ex-Art. 95 Abs. 3 EGV).

Gemäß Art. 15 Abs. 1, 2 der Richtlinie 2009/125/EG werden für Produktgruppen mit hohem Handelsvolumen, erheblichen Umweltauswirkungen und erheblichem Potenzial für eine Verbesserung ihrer Umweltverträglichkeit produktspezifische Durchführungsmaßnahmen erlassen. In diesen Durchführungsmaßnahmen werden – u.a. – für ausgewählte Produkteigenschaften mit erheblichen Umweltauswirkungen spezifische Ökodesign-Anforderungen festgelegt (Art. 15 Abs. 6 Unterabsatz 2 der Richtlinie 2009/125/EG).

Die in Wohngebieten zunehmend verwendeten stationären Geräte zur Heizung, Lüftung und Kühlung, die hier im Vordergrund stehen, werden von dem Anwendungsbereich der Richtlinie 2009/125/EG erfasst. Sie erfüllen die Merkmale des „*energieverbrauchsrelevanten Produkts*“ in der Legaldefinition des Art. 2 Nr. 1 der Richtlinie.

⁴ Entscheidung der Kommission 94/783/EG vom 14.09.1994, ABl. EU 1994 Nr. L 316, Seite 43; Entscheidung der Kommission 96/221/EG vom 26.02.1996, ABl. EU 1996 Nr. L 68, Seite 32.

Art. 3 der RL 2009/125/EG regelt dem Grunde nach die produktbezogenen Anforderungen. Er verpflichtet die Mitgliedstaaten, die erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen, um sicherzustellen, dass Produkte nur in Verkehr gebracht und/oder in Betrieb genommen werden, wenn sie den für sie geltenden Durchführungsmaßnahmen entsprechen und die CE-Kennzeichnung gemäß Art. 5 der Richtlinie tragen.

Nach Art. 6 der Richtlinie 2009/125/EG dürfen die Mitgliedstaaten das Inverkehrbringen und/oder die Inbetriebnahme eines Produkts in ihrem Hoheitsgebiet nicht unter Berufung auf Ökodesign-Anforderungen betreffend die in Anhang I Teil 1 der Richtlinie genannten Ökodesign-Parameter, die von der jeweils geltenden Durchführungsmaßnahme erfasst werden, untersagen, beschränken oder behindern, wenn das Produkt allen einschlägigen Bestimmungen der jeweils geltenden Durchführungsmaßnahme entspricht und mit der in Art. 5 genannten CE-Kennzeichnung versehen ist (Freiverkehrsklausel). Zu den Ökodesign-Parametern, die in den produktspezifischen Durchführungsmaßnahmen jeweils konkret zu benennen sind, zählt der in Art. 6 der Richtlinie 2009/125/EG in Bezug genommene Anhang I Teil 1 der Richtlinie unter Nr. 1. lit. c) u.a. „*physikalische Einwirkungen wie Lärm, ...*“.

Was unter der „*physikalischen Einwirkung Lärm*“ zu verstehen ist, wird in der Rahmenrichtlinie 2009/125/EG nicht definiert. Die Definition findet sich jeweils in den Durchführungsmaßnahmen für diejenigen Produktgruppen, für die der Lärm zu den erheblichen Umweltauswirkungen gehört.

Anforderungen an den Schallleistungspegel von Wärmepumpen in der VO (EU) 813/2013

Zur Durchführung der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG für die Produktgruppe der Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte erließ die EU-Kommission die Verordnung Nr. 813/2013 [45]. Sie ist am 29.09.2013 in Kraft getreten [Art. 10 VO (EU) 813/2013]. Nach Art. 288 Abs. 2 AEUV (ex-Art. 249 Abs. 2 EGV) gilt die Verordnung unmittelbar in allen Mitgliedstaaten. Ein Umsetzungsakt ist nicht erforderlich (Ruffert, in: [18], Art. 288, Rn. 20 m.w.N.).

Die Verordnung gilt für Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte mit einer Wärmenennleistung ≤ 400 kW (Art. 1 VO 813/2013). Unter einem „*Raumheizgerät*“ versteht die VO (EU) 813/2013 eine Vorrichtung, die ein wasserbetriebenes Zentralheizungssystem mit Wärme versorgt, um die Innentemperatur eines geschlossenen Raumes, etwa eines Gebäudes, einer Wohnung oder eines Zimmers, auf die gewünschte Höhe zu bringen und dort zu halten und mit einem oder mehreren Wärmeerzeugern ausgestattet ist [Art. 2 Nr. 2 VO (EU) 813/2013]. Der Begriff „*Kombiheizgerät*“ bezeichnet nach Art. 2 Nr. 3 VO (EG) 813/2013 ein Raumheizgerät, dass dazu entworfen ist, ebenfalls Wärme zur Bereitung von warmem Trink- oder Sanitärwasser mit einem bestimmten Temperaturniveau bereitzustellen und das an eine externe Trink-oder Sanitärwasserzufuhr angeschlossen ist. In Art. 2 Nr. 16 und 17 definiert die VO (EG) 813/2013 die Raumheizgeräte bzw. Kombiheizgeräte *mit Wärmepumpe*, die sich dadurch auszeichnen, dass sie zur Wärmeerzeugung die Umgebungswärme aus Luft, Wasser oder Boden und/oder Abwärme nutzen.

Als bedeutsam für die Zwecke der VO (EG) 813/2013 wurde für die Heizgeräte mit Wärmepumpe der Schallleistungspegel festgelegt [5. Erwägungsgrund Satz 1 der VO (EU) Nr. 813/2013]. Nach Art. 2 Nr. 22 VO (EG) 813/2013 bezeichnet der Begriff „*Schallleistungspegel*“ (L_{WA}) den A-bewerteten Schallleistungspegel in Innenräumen und/oder im Freien in dB. Gemäß Anhang II Nr. 3 der VO 813/2013 darf der Schallleistungspegel von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten mit Wärmepumpe **vom 26.09.2015 an** die folgenden Werte nicht überschreiten:

Tabelle 4: Anforderungen an den Schallleistungspegel von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten mit Wärmepumpe gem. Anhang II Nr. 3 der VO 813/2013

Wärmenennleistung	≤ 6 kW	> 6 kW und ≤ 12 kW	> 12 kW und ≤ 30 kW	> 30 kW und ≤ 70 kW
Schallleistungspegel innen	60 dB	65 dB	70 dB	80 dB
Schallleistungspegel außen	65 dB	70 dB	78 dB	88 dB

Vorgaben für die von den erfassten Wärmepumpen tieffrequent emittierten Schalldruckpegel enthält die Verordnung nicht, auch nicht für den Fall, dass in dem emittierten Geräusch tieffrequente oder andere Einzeltöne hervortreten.

Seit dem 26.09.2015 dürfen Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte mit Wärmepumpe, die die angegebenen Schallleistungspegel überschreiten, in den Mitgliedstaaten der EU nach Art. 3 Abs. 1 Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Da der Schallleistungspegel als Ökodesign-Parameter für Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte mit Wärmepumpe von der VO (EU) 813/2013 erfasst wird, darf die Bundesrepublik Deutschland nach der Freiverkehrsklausel in Art. 6 der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG das Inverkehrbringen und die Inbetriebnahme von Luftwärmepumpen *wegen ihrer Schallleistungspegel* nicht untersagen, beschränken oder behindern, wenn die Geräte die oben berichteten Werte der VO (EG) 813/2013 einhalten.

Anforderungen an den Schallleistungspegel von Klimageräten in der VO (EU) 206/2012

Mit der Verordnung (EU) Nr. 206/2012 [44] erließ die Kommission eine weitere Ökodesign-Durchführungsmaßnahme für die Produktgruppe der Raumklimageräte und Komfortventilatoren. Auch diese Durchführungsmaßnahme ist in der Bundesrepublik Deutschland unmittelbar geltendes Recht (Art. 288 Abs. 2 AEUV, ex-Art 249 Abs. 2 EGV).

Die VO (EG) Nr. 206/2012 erfasst netzbetriebene Raumklimageräte mit einer Nennleistung ≤ 12 kW für das Kühlen oder, falls das Produkt keine Kühlfunktion aufweist, für das Heizen [Art. 1 Abs. 1 VO (EG) Nr. 206/2012]. Die von der Verordnung ebenfalls erfassten Komfortventilatoren sind nach Art. 2 Nr. 5 VO (EG) 206/2012 Geräte, die hauptsächlich zur Erzeugung eines Luftstroms um oder auf Körperteile für den persönlichen Komfort ausgelegt sind. Sie sind als Quelle tieffrequenten Lärms bisher nicht hervorgetreten und werden im Folgenden nicht behandelt.

Als „Raumklimagerät“ bezeichnet die VO (EU) Nr. 206/2012 ein Gerät für das Kühlen und/oder Heizen von Innenraumluft mit einem von einem elektrischen Verdichter betriebenen Kaldampf-Kompressionskälteprozess, einschließlich Raumklimageräten, die zusätzliche Funktionen wie Entfeuchtung, Reinigung, Umwälzung oder zusätzliche Heizung der Luft mittels elektrischer Widerstandsheizung aufweisen, sowie Geräte, die Wasser zur Verdampfung am Verflüssiger verwenden können, sofern das Gerät auch ohne zusätzliches Wasser und nur mit Luft verwendet werden kann [Art. 2 Nr. 1 VO (EU) Nr. 206/2012]. Dabei werden die Einkanal- und Zweikanal-Raumklimageräte, die sich innerhalb des zu behandelnden Raumes befinden [vgl. die Definitionen in Art. 2 Nrn. 2, 3 VO (EU) 206/2012], unterschieden von den übrigen Raumklimageräten, die über Komponenten im Freien verfügen.

Als wesentlichen Umweltaspekt der Raumklimageräte identifiziert die VO (EU) Nr. 206/2012 neben dem Energieverbrauch den Schalleistungspegel [4. Erwägungsgrund Satz 1 VO (EU) Nr. 206/2012]. In Anhang I Nr. 1.12. definiert die VO (EU) 206/2012 den in der Verordnung verwendeten Begriff des Schalleistungspegels als „A-bewerteten Schallleistungspegel (dB(A)) in Innenräumen und/oder im Freien“.

Nach Anhang I Nr. 2 Tab. 3 der VO (EU) Nr. 206/2012 darf der Innenraum-Schallleistungspegel von Einkanal- und Zweikanal-Raumklimageräten ab dem 01.01.2013 den Wert von 65 dB(A) nicht überschreiten.

Für die Raumklimageräten mit Außenkomponente stellt die VO (EU) 206/2012 die folgenden Anforderungen an den maximalen Schallleistungspegel [Anhang I Nr. 2 Tabelle 5 VO (EU) 206/2012]:

Tabelle 5: Anforderungen an den maximalen Schallleistungspegel von Raumklimageräten gem. Anhang I Nr. 2 Tabelle 5 der VO 206/2012

Nennleistung	≤ 6 kW	> 6 kW und ≤ 12 kW
Innenraum-Schallleistungspegel	60 dB(A)	65 dB(A)
Außen-Schallleistungspegel	65 dB(A)	70 dB(A)

Anforderungen hinsichtlich des von Raumklimageräten emittierten tieffrequenten Schalls enthält die VO (EU) Nr. 206/2012 nicht. Hervortretende Einzeltöne im Bereich der tiefen Frequenzen oder in anderen Frequenzbereichen werden bei der Ermittlung der Schallleistungspegel nach der Verordnung nicht berücksichtigt.

Nach Art. 3 der Richtlinie 2009/125/EG dürfen Raumklimageräte, die diesen Anforderungen nicht entsprechen, seit dem 01.01.2013 in den EU-Staaten nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Umgekehrt darf die Bundesrepublik Deutschland nach Art. 6 der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG das Inverkehrbringen und die Inbetriebnahme von Raumklimageräten, die die aufgeführten Schallleistungswerte einhalten, nicht wegen ihrer Schalleistungspegel untersagen, beschränken oder behindern.

4.2.2 Probleme und legislative Handlungsoptionen

Die Schallleistungspegel, die die nach den Verordnungen (EU) 813/2013 und 206/2012 in der EU allgemein verkehrsfähigen Wärmepumpen und Klimageräte erzeugen dürfen, sind sehr hoch. In der Leistungsklasse zwischen 6 und 12 kW dürfen ihr Inverkehrbringen und ihr Betrieb von den Mitgliedstaaten nicht untersagt, beschränkt oder behindert werden, wenn ihre Außen-Schallleistungspegel **ohne Zuschläge** für zu erwartende Tonhaltigkeit 70 dB(A) nicht überschreiten. In ihrem „Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten“ hat die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) eine Methode zur Ermittlung des erforderlichen Abstandes zwischen einem stationären Gerät und dem nächsten Immissionsort entwickelt [10]. Setzt man gemäß dem LAI -Leitfaden einen Tonhaltigkeitszuschlag von 3 dB an, müssen Wärmepumpen und Klimageräte in der Leistungsklasse zwischen 6 und 12 kW mit einem Schalleistungspegel von 70 dB(A), die nach den dargestellten Vorschriften in der EU noch allgemein verkehrsfähig sind, in Mischgebieten (MI) einen Abstand von mindestens ca. 24 m von dem nächsten maßgeblichen Immissionsort einhalten. In Allgemeinen Wohngebieten (WA) beträgt dieser Abstand bereits ca. 34 m und in Reinen Wohngebieten (WR) ca. 54 m.

Selbst ohne Rücksicht auf die tieffrequenten Geräusche, die sich besser ausbreiten und leichter in Innenräume eindringen als höherfrequente Geräusche, zeigt die überschlägige Abstandsermittlung nach der LAI-Methode, dass die unionsrechtlichen Vorschriften auch solche Wärmepumpen und Klimageräte mit allen Garantien der Warenverkehrsfreiheit versehen, die für die Verwendung in bebauten Gebieten mit Wohnungen nicht geeignet sind⁵.

⁵ Im Ergebnis ebenso für die Wärmepumpen, vgl. [51] Seite 54.

Nach Auffassung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt lag der Stand der Schallschutztechnik bei Luftwärmepumpen bereits 2011 bei einem Schallleistungspegel von etwa 50 dB(A) [51]. Die in der VO (EU) Nr. 813/2013 genannten Schallleistungspegel, die von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten mit Wärmepumpe ab dem 26.09.2015 nicht überschritten werden dürfen, liegen weit darüber. Sie verfehlen den Stand der Schallschutztechnik.

Obwohl angesichts der regelmäßig geringen Bauabstände in der dicht besiedelten Bundesrepublik Deutschland zu erwarten ist, dass der Betrieb der nach der Ökodesign-Richtlinie zugelassenen Wärmepumpen und Klimageräte in hohem Maß zu schädlichen Umwelteinwirkungen für die Wohnbevölkerung führt, und obwohl die unionsrechtlich vorgeschriebenen Schallleistungspegel für diese Geräte jedenfalls zum Teil den Stand der Technik verfehlen, sind die oben berichteten Schallleistungsanforderungen verbindlicher Teil der unmittelbar geltenden EU-Verordnungen Nr. 813/2013 und Nr. 206/2012. Gegenüber dem nationalen Recht der Bundesrepublik Deutschland genießen sie grundsätzlich **Anwendungsvorrang** (Ruffert, in: [18] Art. 288, Rn. 20 m.w.N.; Bievert, in: [98] Art. 288 Rn. 21 m.w.N.).

Anwendungsvorrang dürfte den Schallschutzanforderungen der VO (EU) Nr. 813/2013 und 206/2012 dabei nicht nur im Hinblick auf die Höhe der angegebenen Schalleistungspegel zukommen, sondern auch im Hinblick auf den zur Beschreibung des Schallleistungspegels benutzten Parameter. Insoweit schreiben beide Verordnungen eine Gesamtgeräuschermittlung ohne spektrale Aufgliederung und die A-Bewertung vor [Art. 2 Nr. 22 VO (EU) 813/2013, Anhang I, Nr. 1.12 VO (EU) 206/2012].

Der Vorrang der unionsrechtlichen Anforderungen an die zulässigen Schallleistungspegel von Wärmepumpen und Klimageräten bedeutet eine weitgehende Einschränkung des legislativen Handlungsspielraums der Bundesrepublik Deutschland auf der Ebene der produktbezogenen Anforderungen. Die einschlägigen Harmonisierungsmaßnahmen [VO (EU) 813/2013 und VO (EU) 206/2012] sind sehr streng. Insbesondere enthalten sie keine Vorschrift, die den Mitgliedstaaten den Erlass von Verwendungsvorschriften erlaubt. Eine solche Vorschrift findet sich z.B. in Art. 17 der Richtlinie 2000/14/EG (Outdoor-Richtlinie)[40], der den folgenden Wortlaut hat:

„Artikel 17

Verwendungsvorschriften

Diese Richtlinie steht nicht dem Recht der Mitgliedstaaten entgegen, unter Einhaltung des Vertrags

- Maßnahmen zu treffen, um die Verwendung von Geräten und Maschinen im Sinn des Art. 2 Absatz 1 in den von ihnen als sensibel eingestuften Bereichen zu regeln, wobei dies die Möglichkeit einschließt, die Betriebsstunden für Geräte und Maschinen zu beschränken;

(...)“

Im Anwendungsbereich der Verordnungen (EU) 813/2013 und 206/2012 dürfte die Bundesrepublik Deutschland das Inverkehrbringen von Wärmepumpen und Klimageräten daher nur dann von strengeren Schallleistungsvorgaben, etwa von der Einhaltung anspruchsvoller Emissionspegel im Bereich tiefer Frequenzen, nur unter den Voraussetzungen des Art. 114 Abs. 5 AEUV (ex-Art 95 Abs. 5 EGV) abhängig machen.

Die Bundesregierung sollte sich im Rechtsetzungsverfahren der EU darum bemühen, dass die Harmonisierungsmaßnahmen für Wärmepumpen und Klimageräte [VO (EU) 813/2013 und VO (EU) 206/2012] um eine „Öffnungsklausel“ nach dem Muster des zitierten Artikels 17 der Outdoor-Richtlinie 200/14/EG ergänzt werden.

Zu beachten ist im Übrigen, dass die Verordnungen (EU) 813/2013 und 206/2012 Anwendungsvorrang nur insoweit beanspruchen können, als sie sich selbst Geltung beimessen und Regelungen enthalten. Relevant sind in diesem Zusammenhang für die Wärmepumpen insbesondere zwei Feststellungen:

- Zwar gilt die VO (EG) 813/2013 ausweislich ihres Art. 1 Abs. 1 für Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte mit einer Wärmenennleistung ≤ 400 kW, doch enthält der Anhang II der Verordnung unter Nr. 3. lediglich Schallleistungsvorgaben für Geräte bis zu einer Wärmenennleistung von einschließlich 70 kW. Für Geräte mit einer Wärmenennleistung, die 70 kW übersteigt, enthält die Verordnung keine Anforderungen an die einzuhaltenden Schallleistungspegel. Die Verordnung dürfte daher für Geräte mit einer Wärmenennleistung von mehr als 70 kW keine Sperrwirkung gegenüber nationalen Regelungen entfalten.
- Die VO (EG) 813/2013 erfasst lediglich Heizgeräte oder Kombigeräte mit Wärmepumpe, die – unter anderem – durch den Zweck definiert sind, die Innentemperatur eines geschlossenen Raumes auf die gewünschte Höhe zu bringen und dort zu halten [Art. 2 Nr. 2, 3 VO (EG) 813/2013]. Keine Regelung enthält die Verordnung für Wärmepumpen, die anderen Zwecken, etwa der Beheizung eines Schwimmbeckens, dienen. Dem nationalen Gesetzgeber dürfte es daher freistehen, produktbezogene Anforderungen an die Schallleistungspegel von Wärmepumpen zu stellen, die anderen Zwecken als der Heizung geschlossener Räume dienen.

4.3 Immissionsschutzrecht

Das öffentlich-rechtliche Immissionsschutzrecht dient neben der Luftreinhaltung insbesondere der Lärmbekämpfung [4], [92]. Tieffrequente Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung werden u.a. von stationären haustechnischen Anlagen und Geräten, z.B. Klimaanlage und Luftwärmepumpen verursacht. Geräte dieser Art werden immer häufiger in Wohnsiedlungen eingebaut, wo sie - über das Gebiet dezentral verteilt - Nachbarschaftskonflikte hervorrufen. Daneben sind in der Vergangenheit insbesondere Biogas- und Windkraftanlagen als tieffrequente Emissionsquellen hervorgetreten, die i.d.R. von außen auf Wohnsiedlungen einwirken.

Einschlägig für die genannten Quellgruppen ist in erster Linie das **anlagenbezogene Immissionsschutzrecht** des Bundes, das im Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) und in dem zu seiner Konkretisierung ergangenen untergesetzlichen Regelwerk niedergelegt ist⁶.

4.3.1 Aktuelle Rechtslage

Schutz vor tieffrequenten Geräuschen nach BImSchG, TA Lärm und DIN 45680 (Ausgabe März 1997)

Schädliche Umwelteinwirkungen (§ 3 Abs. 1 BImSchG)

Der Rechtsbegriff der **schädlichen Umwelteinwirkungen** ist zentral für das Regelungsgefüge des BImSchG. Insbesondere werden die wesentlichen Grundpflichten der Betreiber von Anlagen, die dem BImSchG unterfallen, über diesen Rechtsbegriff definiert. Nach § 5 Abs. 1 Nr. 1, 2 BImSchG sind genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen nicht hervorgerufen werden können und Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen getroffen wird. Die Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen haben nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1, 2 BImSchG diese so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen verhindert

⁶ Die Immissionsschutzgesetze der Länder dienen dem Schutz vor *verhaltensbezogenem* Lärm, der der Bundesgesetzgebung nach Art. 74 Abs. 1 Nr. 24 GG ausdrücklich entzogen ist (vgl. [64] Einleitung Rn. 40)

werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind, und dass nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden.

Nach der Legaldefinition des § 3 Abs. 1 BImSchG sind schädliche Umwelteinwirkungen solche Immissionen, die nach Art, Ausmaß und Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Nachbarschaft herbeizuführen. Diese Definition enthält eine Vielzahl unbestimmter Rechtsbegriffe. Zwar steht danach fest, dass nur solche Immissionen schädliche Umwelteinwirkungen sind, die die Schädlichkeitsschwelle überschreiten⁷. Das Gesetz bestimmt jedoch nicht selbst, wo die Schädlichkeitsschwelle für die verschiedenen Immissionen liegt (Hofmann/ Koch, in: [50], § 3 Rn. 52).

Schädliche Umwelteinwirkungen durch tieffrequente Geräusche: Normkonkretisierung durch TA Lärm und DIN 45680

Die Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26.08.1998 (GMBL. Nr. 26/1998, Seite 503) konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs den unbestimmten Rechtsbegriff der schädlichen Umwelteinwirkungen im Hinblick auf den Lärm. Als normkonkretisierender Verwaltungsvorschrift kommt ihr eine im gerichtlichen Verfahren zu beachtende Bindungswirkung zu⁸.

Dem allgemeinen Beurteilungsverfahren der TA Lärm liegt der Schalldruckpegel mit der Frequenzbewertung A zugrunde (Nr. 2.6 TA Lärm). Die A-Bewertung orientiert sich näherungsweise an der Hörempfindung des Menschen für Geräusche unterschiedlicher Frequenz [78]. Die Frequenzbewertung A berücksichtigt also bereits die Wirkung der Schalldruckpegel auf den Menschen. Soweit es um tieffrequente Geräusche geht, stellt das allgemeine Mess- und Beurteilungsverfahren der TA Lärm keine ausreichende Konkretisierung der Schädlichkeitsschwelle im Sinn von § 3 Abs. 1 BImSchG dar (Landmann, in: [74] Nr. 7 TA Lärm Rn. 29; [73])⁹.

Die TA Lärm enthält auch Regelungen für tieffrequente Geräusche im Frequenzbereich unter 90 Hz und erfasst auch das Phänomen der Körperschallübertragung¹⁰. Unter Nr. 7.3 enthält die TA Lärm unter der Überschrift „Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche“ die folgende Regelung:

„Für Geräusche, die vorherrschende Energieanteile im Frequenzbereich unter 90 Hz besitzen (tieffrequente Geräusche), ist die Frage, ob von ihnen schädliche Umwelteinwirkungen ausgehen, im Einzelfall nach den örtlichen Verhältnissen zu beurteilen. ²Schädliche Umwelteinwirkungen können insbesondere auftreten, wenn bei deutlich wahrnehmbaren tieffrequenten Geräuschen in schutzbedürftigen Räumen bei geschlossenen Fenstern die nach Nr. A.1.5 des Anhangs ermittelte Differenz $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ den Wert 20 dB

⁷ Nach § 3 Abs. 1 BImSchG verlangt der Begriff der schädlichen Umwelteinwirkung Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen. Dieser Wortlaut zeigt, dass nur eine erhebliche Beeinträchtigung eine schädliche Umwelteinwirkung sein kann. Erheblich wiederum sind Beeinträchtigungen, die den Betroffenen *nicht zumutbar* sind, vgl. Jarass, BImSchG, 11. Auflage 2015, § 3 Rn. 21, 46, 47. Im Zusammenhang mit dem BImSchG werden daher die Schädlichkeit, Erheblichkeit und Unzumutbarkeit von Beeinträchtigungen häufig synonym gebraucht, ebenso der Begriff der Wesentlichkeit einer Beeinträchtigung i.S.v. § 906 BGB, vgl. etwa BVerwG, Urteil vom 29.04.1988, 7 C 33/87, juris, Rn. 14: „Der Kläger irrt allerdings in der Meinung, § 906 Abs. 1 BGB setze die Schwelle der Unzumutbarkeit von Lärmbeeinträchtigungen mit dem Maßstab der Wesentlichkeit für den Betroffenen günstiger, nämlich niedriger an als § 22 i.V.m. § 3 Abs. BImSchG mit den Maßstäben der Schädlichkeit und der Erheblichkeit.“ Der 4. Senat des BVerwG versteht auch den Begriff der fachplanungsrechtlichen Unzumutbarkeit in dem gleichen Sinn. Er formuliert verallgemeinernd (BVerwG, Urteil vom 24.06.2004, 4 C 11/03, juris, Rn. 29): „Als unzumutbar stuft der Gesetzgeber nur Lärmwirkungen ein, die durch das Qualifikationsmerkmal der Erheblichkeit die Schädlichkeitsgrenze überschreiten (vgl. BVerwG).“

⁸ BVerwG, Urteil vom 29.08.2007, 4 C 2/07, juris, Rn. 12; Urteil vom 29.11.2012, 4 C 8/11, juris, Rn. 18; Beschluss vom 26.03.2014, 4 B 3/14, juris, Rn. 6; OVG Bremen, Beschluss vom 15.12.2015, 2 B 104/15, juris, Rn. 45; BayVG, Beschluss vom 10.08.2015, 22 ZB 15.1113, juris, Rn. 13.

⁹ VGH Mannheim, Urteil vom 28.07.1998, 10 S 3242/96, juris, Rn. 20.,

¹⁰ OVG Lüneburg, Beschluss vom 23.08.2006, 7 ME 116/05, juris, Rn. 22; Beschluss vom 05.01.2011, 12 LA 60/09, juris, Rn. 7. Zur Körperschallübertragung vgl. Nr. A.1.1.4 und Nr. A.1.3 Abs. 1 lit. c) TA Lärm.

überschreitet. ³Hinweise zur Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche enthält Nr. A.1.5 des Anhangs.

Wenn unter Berücksichtigung von Nr. A.1.5 des Anhangs schädliche Umwelteinwirkungen durch tieffrequente Geräusche zu erwarten sind, so sind geeignete Minderungsmaßnahmen zu prüfen. ²Ihre Durchführung soll ausgesetzt werden, wenn nach Inbetriebnahme der Anlage auch ohne die Realisierung der Minderungsmaßnahmen keine tieffrequenten Geräusche auftreten.“

Die Nr. A.1.5 im Anhang der TA-Lärm enthält „Hinweise zur Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche“. Nach einer beispielhaften Aufzählung von Schallquellen, die tieffrequente Geräusche verursachen können (Nr. A.1.5, Abs. 1 TA Lärm), folgt der Hinweis auf die Fähigkeit bestimmter Anlagen tieffrequente Wechselkräfte in den Baugrund einzuleiten und über die Körperschallübertragung tieffrequente Geräusche in schutzbedürftigen Räumen zu verursachen (Nr. A.1.5 Abs. 2 TA Lärm). Wesentliche rechtliche Bedeutung haben die Regelungen der Nr. A.1.5 Abs. 3 TA Lärm. Sie haben den folgenden Wortlaut:

„Hinweise zur Ermittlung und Bewertung tieffrequenter Geräusche enthält DIN 45680, Ausgabe März 1997, und das zugehörige Beiblatt 1. ²Danach sind schädliche Umwelteinwirkungen nicht zu erwarten, wenn die in Beiblatt 1 genannten Anhaltswerte nicht überschritten werden.“

Den Regelungen der TA Lärm zur Problematik des tieffrequenten Lärms liegt die Auffassung zugrunde, dass sich das Auftreten tieffrequenter Geräusche regelmäßig erst nach Inbetriebnahme der Anlage feststellen lässt. Das Auftreten solcher Immissionen lässt sich danach kaum konkret und zuverlässig prognostizieren, weil sie unter anderem von der Beschaffenheit des Ausbreitungsmediums und auch des Immissionsortes abhängen. Insbesondere lasse sich bei Geräuschen dieser Art im Allgemeinen nicht zuverlässig aus dem Außenpegel schließen, ob innerhalb von Gebäuden erhebliche Belästigungen vermieden werden [73]¹¹.

Weder die TA Lärm 1998 noch die DIN 45680, Ausgabe März 1997, enthalten deshalb ein Verfahren für die Prognose tieffrequenter Geräusche. Ein normativ niedergelegtes Verfahren für die Prognose tieffrequenter Geräusche existiert in der Bundesrepublik Deutschland bis heute nicht¹² [71]. Aus diesem Grund müssen die auf der Grundlage der TA Lärm gefertigten Schallimmissionsprognosen nach herrschender Meinung in der Rechtsprechung in der Regel keine Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden tieffrequenten Geräusche enthalten¹³.

Das geltende Immissionsschutzrecht sieht für das Problem des tieffrequenten Lärms lediglich eine Einzelfallprüfung „nach den örtlichen Verhältnissen“ im Wege der Messung vor. Unabhängig von der Art der Schallübertragung (Luft- oder Körperschall) wird das tieffrequente Geräusch innerhalb des Gebäudes in dem am stärksten betroffenen Aufenthaltsraum gemessen. Die Messung erfolgt bei geschlossenen Fenstern und Türen und üblicher Raumausstattung. Der maßgebliche Immissionsort ist die Stelle höchster Belastung, an der sich Personen regelmäßig aufhalten. Bei Messorten in Wandnähe (Sitzgelegenheiten, Betten) ist etwa 0,5m vor der Wand zu messen¹⁴. Hinter dieser Messvorschrift steht nach Auffassung des VGH Mannheim¹⁵ die Erkenntnis, dass gerade tieffrequente Geräusche sich außer durch Luftschall auch durch Körperschall von der Quelle in die Nachbarschaft ausbreiten. Am Einwirkungsort strahlen Gebäudedecken oder -wände die Körperschallschwingungen als sekundären Luftschall in den Raum hinein ab. In den betreffenden Räumen können Resonanzeffekte auftreten. Die

¹¹ ebenso bereits vor Inkrafttreten der geltenden TA Lärm am 01.11.1998 VGH Mannheim, Urteil vom 28.07.1998, 10 S 3242/96, Rn. 20 f.

¹² HessVGH, Beschluss vom 10.04.2014, 9 B 2156/13, juris, Rn. 43.

¹³ OVG Magdeburg, Beschluss vom 22.10.2015, 2 M 13/15, juris, Rn. 30; OVG Lüneburg, Beschluss vom 05.01.2011, 12 LA 60/09, juris, Rn. 7; HessVGH, Urteil vom 10.04.2014, 9 B 2156/13, juris, Rn. 43.

¹⁴ So Nr. 4.3 „Messorte“ der DIN 45680, Ausgabe März 1997.

¹⁵ VGH Mannheim, Urteil vom 28.07.1998, 10 S 3242/96, juris, Rn. 24.

Messung dieser Phänomene führt nur dann zu aussagekräftigen und reproduzierbaren Ergebnissen, wenn in dem am stärksten betroffenen Raum an der lautesten Stelle und bei geschlossenen Fenstern und Außentüren gemessen wird.

Das Schutzkonzept von BImSchG, TA Lärm und DIN 45680 (Ausgabe März 1997) gegen tieffrequenten Lärm, das keine Prognose dieser Immissionen ex ante, sondern anlassbezogene Messungen innerhalb geschlossener Räume ex post vorsieht, wird in der Rechtsprechung noch immer weiterhin gebilligt (zu den aufkommenden Zweifeln in der Rechtsprechung vgl. unten). Das geltende immissionsschutzrechtliche Schutzkonzept fasst das OVG Magdeburg in seinem Beschluss vom 22.10.2015¹⁶ in klaren Worten zusammen:

„Da das Auftreten tieffrequenter Geräusche von den jeweiligen örtlichen Verhältnissen und Besonderheiten abhängt und sich daher regelmäßig erst nach Inbetriebnahme der Anlage feststellen lässt (...) und die einschlägigen Regelungen der Nr. 7.3 und A.1.5 TA Lärm i.V.m. der DIN 45680 nur Regelungen zur Messung und Bewertung tieffrequenter Geräusche enthalten, geht der Senat davon aus, dass tieffrequente Geräusche in erster Linie nach Maßgabe der DIN 45680, auf die in Nr. A.1.5 TA Lärm verwiesen wird, durch Messung zu ermitteln sind und auch ermittelt werden können.“

Zur Beurteilung der in der Einzelfallprüfung nach Nr. 7.3 TA Lärm gemessenen Werte werden die Anhaltswerte des Beiblatts 1 der DIN 45680, Ausgabe März 1997 herangezogen. Nach Nr. A.1.5 Abs. 3 Satz 2 TA Lärm sind schädliche Umwelteinwirkungen nicht zu erwarten, wenn die in dem zitierten Beiblatt 1 genannten Anhaltswerte nicht überschritten werden. Nach *Feldhaus/Tegeder* ([47]; [1] Anhang Nr. A.1, Rn. 13) erhalten die Anhaltswerte damit „den Charakter von speziellen Immissionsrichtwerten für tieffrequente Geräusche“. Diese Auffassung wird von der Rechtsprechung der Oberverwaltungsgerichte geteilt¹⁷.

Fortgeltung der DIN 45680, Ausgabe März 1997: (Noch) Kein neuer gesicherter Stand der Erkenntnis

Die Anhaltswerte des Beiblatts 1 der DIN 45680, Ausgabe März 1997, sind zwar in der wissenschaftlichen Diskussion, wie nicht zuletzt das Ringen des DIN um eine Novellierung der DIN 45680 zeigt. Dennoch nehmen sie weiterhin an der normkonkretisierenden Wirkung der TA Lärm teil und sind für die Bewertung tieffrequenter Geräusche heranzuziehen.

Zwar entfällt die der TA Lärm als normkonkretisierender Verwaltungsvorschrift zukommende Bindungswirkung, wenn ihre Regelungen aufgrund gesicherter wissenschaftlicher Erkenntnisse überholt sind¹⁸.

Hinsichtlich der Diskussion, welcher Frequenzbereich als tieffrequent gelten soll und ab welcher Stärke tieffrequente Lärmimmissionen schädlich sind, ist allerdings noch kein neuer wissenschaftlich gesicherter Erkenntnisstand festzustellen. Die Entwürfe zur Novellierung der DIN 45680 von August 2011 und September 2013 sind zurückgezogen worden. Die fachliche Diskussion um die Novellierung dieser DIN-Norm geht weiter und sie ist als offen einzustufen. Der zu erwartende nächste Entwurf der Neufassung der DIN 45680 kann erst dann als ein neuer, gesicherter Stand der Erkenntnis gelten,

¹⁶ OVG Magdeburg, Beschluss vom 22.10.2015, 2 M 13/15, juris, Rn. 30.

¹⁷ OVG Bremen, Beschluss vom 15.12.2015, 2 B 104/15; OVG Magdeburg, Beschluss vom 22.10.2015, 2 M 13/15, juris, Rn. 30; BayVG, Beschluss vom 08.06.2015, 22 CS 15.686, juris, Rn. 24; OVG Münster, Urteil vom 22.05.2014, 8 A 1220/12, juris, Rn. 140; OVG Lüneburg, Beschluss vom 05.01.2011, 12 LA 60/09, juris, Rn. 7; BayVG, Beschluss vom 26.06.2009, 15 CS 09.860, juris, Rn. 18, 19.

¹⁸ BVerwG, Beschluss vom 21.03.1996, 7 B 164/95, juris, Rn. 14; BayVG, Beschluss vom 10.08.2015, 22 ZB 15.1113, juris, Rn. 13; OVG Berlin-Brandenburg, Urteil vom 11.12.2014, OVG 11 A 23.13, juris, Rn. 84 jeweils m.w.N.

wenn er die Phase fachlicher und wissenschaftlicher Prüfungen und die Beteiligung aller relevanten Stellen hinter sich gebracht hat¹⁹.

Genehmigungsbedürftige und nicht genehmigungsbedürftige Anlagen nach BImSchG

Das BImSchG teilt die seinem Anwendungsbereich unterfallenden Anlagen (§§ 3 Abs. 5, 2 Abs. 2 BImSchG) in genehmigungsbedürftige und nicht genehmigungsbedürftige Anlagen.

Genehmigungsbedürftige Anlagen nach BImSchG

Nach § 4 Abs. 1 Satz 1 BImSchG bedürfen die Errichtung und der Betrieb von Anlagen, die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder ihres Betriebes in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen oder in anderer Weise die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft zu gefährden, erheblich zu benachteiligen oder erheblich zu belästigen, sowie von ortsfesten Abfallentsorgungsanlagen zur Lagerung oder Behandlung von Abfällen einer Genehmigung. Sind die Anlagen in besonderem Maße geeignet, schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen oder Geräusche hervorzurufen, gilt die Genehmigungspflicht auch dann, wenn sie nicht gewerblichen Zwecken dienen und nicht im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden (§ 4 Abs. 1 Satz 2 BImSchG).

Das Gesetz unterwirft damit potentiell schädliche Anlagen einem präventivem Verbot mit Erlaubnisvorbehalt. Ihre Errichtung und ihr Betrieb sind verboten, wenn sie nicht in einem behördlichen Verfahren geprüft und zugelassen worden sind (Dietlein, in: [74] § 4 BImSchG, Rn. 1; Böhm, in: [50] § 4 Rn. 20; [64] § 4 Rn. 42).

Die Unterscheidung der nach dem BImSchG genehmigungsbedürftigen Anlagen von den nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen ist für die Betreiber von fundamentaler Bedeutung, denn das Gesetz stellt an die genehmigungsbedürftigen Anlagen höhere und andere Anforderungen und es hält bei Zuwiderhandeln härtere Sanktionen bereit. So soll die zuständige Behörde die Stilllegung oder Beseitigung einer Anlage anordnen, wenn sie ohne die erforderliche Genehmigung errichtet, betrieben oder wesentlich geändert wird (§ 20 Abs. 2 Satz 1 BImSchG). Wer eine genehmigungsbedürftige Anlage ohne die Genehmigung nach § 4 Abs. 1 BImSchG errichtet, handelt ordnungswidrig (§ 62 Abs. 1 Nr. 1 BImSchG) und wer eine genehmigungsbedürftige Anlage, deren Betrieb zum Schutz von Gefahren untersagt worden ist, ohne die erforderliche Genehmigung betreibt, kann nach § 327 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 StGB bestraft werden. Es besteht also ein hohes Bedürfnis nach einer klaren Abgrenzung des Kreises der genehmigungsbedürftigen Anlagen. Diesem Bedürfnis ist der Gesetzgeber dadurch nachgekommen, dass er in § 4 Abs. 1 Satz 3 BImSchG die Bundesregierung ermächtigt hat, mit Zustimmung des Bundesrates die genehmigungsbedürftigen Anlagen zu bestimmen. Von dieser Ermächtigung hat die Bundesregierung Gebrauch gemacht. In der 4. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV²⁰) hat sie die genehmigungsbedürftigen Anlagen **konstitutiv und abschließend** bestimmt (Dietlein, in: [74] § 4 BImSchG, Rn. 13, 19; Böhm, in: [50] § 4 Rn. 8; [64] § 4 Rn. 17). Wird eine Anlage in der 4. BImSchV nicht aufgeführt, ist sie nicht genehmigungsbedürftig.

Biogas- und Windkraftanlagen, die als Emittenten tieffrequenter Geräusche in Frage kommen, zählen nach der 4. BImSchV zu den genehmigungsbedürftigen Anlagen, wenn sie bestimmte Leistungs- bzw. Größenschwellen überschreiten. So sind Biogasanlagen mit Verbrennungsmotoren zur Stromerzeugung

¹⁹ OVG Berlin-Brandenburg, Urteil vom 11.12.2014, OVG 11 A 23.13, juris, Rn. 85.

²⁰ 4. BImSchV vom 02.05.2013, BGBl. I Seite 973, berichtigt Seite 3756.

gung nach Nr. 1.2.2.2 des Anhangs der 4. BImSchV genehmigungsbedürftig, wenn ihre Feuerungswärmeleistung 1MW übersteigt. Gleiches gilt nach Nr. 1.4.1.2 des Anhangs der 4. BImSchV, wenn eine Gasturbine mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 1MW zum Einsatz kommt²¹. Windenergieanlagen sind gemäß Nr. 1.6 des Anhangs der 4. BImSchV der Genehmigungspflicht unterworfen, wenn sie eine Gesamthöhe von mehr als 50m aufweisen²².

Vor Erteilung der Genehmigung ist die genehmigungsbedürftige Anlage in aller Regel noch nicht errichtet. Die von ihr ausgehenden Immissionen können noch nicht gemessen werden. Im Genehmigungsverfahren muss die zu erwartende Immissionsbelastung deshalb prognostisch ermittelt werden. Nach Nr. 3.2.1 Abs. 6 Satz 1 TA Lärm setzt die Prüfung der Genehmigungsvoraussetzungen in der Regel eine Prognose der Geräuschimmissionen der zu beurteilenden Anlage und – sofern im Einwirkungsbereich der Anlage andere Anlagengeräusche auftreten – die Bestimmung der Vorbelastung sowie der Gesamtbelastung voraus. Diese Prognose soll sicherstellen, dass der Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche (§ 5 Abs. 1 Nr. 1 BImSchG) gewährleistet ist, was nach Nr. 3.2.1 Abs. 1 TA Lärm dann der Fall ist, wenn die Gesamtbelastung am maßgeblichen Immissionsort die Immissionsrichtwerte nach Nr. 6 TA Lärm nicht überschreitet. Einzelheiten zur Geräuschimmissionsprognose finden sich im Anhang der TA Lärm unter A.2.

Die im Rahmen der Regelfallprüfung nach Nr. 3.2.1 Abs. 1, 6, Nr. A.2 TA Lärm vorgesehene Geräuschimmissionsprognose ist damit allein auf den A-bewerteten Beurteilungspegel gerichtet, der an den Immissionsrichtwerten nach Nr. 6 TA Lärm zu messen ist.

Eine Prognose hinsichtlich der von der zu beurteilenden Anlage ausgehenden tieffrequenten Geräuschimmissionen ist in der TA Lärm nicht vorgesehen. Dieser Befund harmoniert mit der Feststellung, dass es für die Prognose des tieffrequenten Lärms bisher in Deutschland auch kein normiertes Verfahren gibt. Daraus wird gefolgert, dass eine auf die tieffrequenten Geräusche gerichtete Immissionsprognose im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren grundsätzlich nicht vorgelegt werden muss²³.

Diese Feststellung hat rechtlich bemerkenswerte Folgen. Maßgeblich für die Frage, ob eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung rechtmäßig ist, ist ausschließlich die Sach- und Rechtslage zur Zeit ihres Erlasses oder – wenn ein Widerspruchsverfahren zulässig ist – zur Zeit der letzten Behördenentscheidung²⁴. Da nach dem Regelungskonzept des BImSchG, der TA Lärm und der DIN 45680 die tieffrequente Geräuschimmission nicht prognostiziert werden muss, ist sie auch nicht Gegenstand der präventiven Rechtmäßigkeitskontrolle, die der Genehmigungserteilung vorausgeht. Nach der aktuellen Rechtslage kann eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung nicht deshalb rechtswidrig sein, weil die zugelassene Anlage tieffrequente Geräusche emittiert. Nach der geltenden gesetzlichen Konstruktion wird das Problem des tieffrequenten Lärms vollständig den Mechanismen der Nachsteuerung durch nachträgliche Auflagen gemäß § 17 BImSchG überlassen.

²¹ Für Biogasanlagen kommt zudem auch eine Genehmigungspflicht nach Nr. 8.6 des Anhangs zur 4. BImSchV (Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfall) in Betracht, die im vorliegenden Zusammenhang jedoch nicht von Bedeutung ist. Die wesentlichen tieffrequenten Geräuschimmissionen gehen bei den Biogasanlagen in der Regel von den eingesetzten Motoren aus.

²² Zu den verfahrens- und materiell-rechtlichen Anforderungen an Kleinwindanlagen vgl. [5]; [68]

²³ OVG Lüneburg, Beschluss vom 05.01.2011, 12 LA 60/09, juris, Rn. 7; HessVG, Beschluss vom 10.04.2014, 9 B 2156/13, juris, Rn. 43.

²⁴ Vgl. nur BayVG, Urteil vom 10.08.2015, 22 ZB 15.1113, juris, Rn. 31 m.w.N.

Nichtgenehmigungsbedürftige Anlagen nach BImSchG

Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen i.S.v. §§ 22 ff. BImSchG sind alle dem BImSchG unterliegenden Anlagen (§ 2 Abs. 2 BImSchG) i.S.v. § 3 Abs. 5 BImSchG, soweit sie keiner Genehmigung nach § 4 BImSchG bedürfen (Roßnagel/ Hentschel, in: [50] § 22 Rn. 13).

Die stationären Geräte zur Heizung, Lüftung und Kühlung, die zunehmend in Gebiete mit Wohnbebauung eindringen und dort tieffrequente Geräuschimmissionen verursachen, sind von Menschen geschaffen, zur Benutzung bestimmt, an ihren Standort gebunden und sie werden im Normalfall nicht bewegt. Als sonstige ortsfeste Einrichtungen im Sinn von § 3 Abs. 5 Nr. 1 2. Alt. BImSchG erfüllen sie damit die Voraussetzungen des Anlagenbegriffs des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Hofmann/ Koch, in: [50] § 3 Rn. 174, 180 o.A.; Hofmann/ Koch, a.a.O., Rn. 175)²⁵.

Die hier in Rede stehenden stationären Geräte, insbesondere Luftwärmepumpen und Klimaanlage, unterfallen nicht der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV), die gemäß § 4 Abs. 1 Satz 3 BImSchG diejenigen Anlagen abschließend definiert, die der Genehmigung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz bedürfen²⁶. Wärmepumpen (Roßnagel/ Hentschel, in: [50] § 22 Rn. 17; [64] § 22 Rn. 9a m.w.N.)²⁷ und Klima- und Belüftungsanlagen (Roßnagel/ Hentschel, in: [67] § 22 Rn. 29; [64] § 22 Rn. 9a²⁸) sind – soweit ersichtlich – unstreitig i.d.R. nicht genehmigungsbedürftige Anlagen, auf die die §§ 22 bis 25 BImSchG zur Anwendung kommen.

Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen im Sinn des BImSchG können zwar *immissionsschutzrechtlich* ohne präventive behördliche Kontrolle errichtet und betrieben werden. Die von solchen Anlagen ausgehenden Umwelteinwirkungen hielt der Gesetzgeber des BImSchG aber nicht für unbeachtlich, weshalb er materiell-rechtliche Pflichten statuierte, die die Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen zu erfüllen haben. Nach § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG sind nicht genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass

1. schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind,
2. nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden²⁹.

Für Anlagen, die nicht gewerblichen Zwecken dienen und nicht im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden, enthält § 22 Abs. 1 Satz 3 BImSchG eine Einschränkung der Grundpflichten auf die Verhinderung oder Beschränkung von schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche oder von Funkanlagen ausgehende nicht ionisierende Strahlen.

Daraus ergibt sich, dass die Grundpflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1, 2 BImSchG im Hinblick auf die Verhinderung oder Beschränkung von schädlichen Umwelteinwirkungen durch tieffrequente Geräusche unabhängig davon gelten, ob sie im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden oder zu privaten Zwecken betrieben werden. Hinsichtlich der (tieffrequenten) Geräusche sind die Grundpflichten des § 22 Abs. 1 Satz 1

²⁵ Das zusätzlich geforderte Tatbestandsmerkmal der immissionsschutzrechtlichen Relevanz ist bei den stationären Geräten zur Heizung, Lüftung und Kühlung erfüllt. vgl. [64] § 3 Rn. 69 m.w.N.

²⁶ Die Liste der genehmigungsbedürftigen Anlagen im Anhang zur 4. BImSchV ist konstitutiv. Dort nicht aufgeführte Anlagen bedürfen keiner Genehmigung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz, vgl. [64], § 4 Rn. 17.

²⁷ VG des Saarlandes, Urteil vom 01.02.2012, 5 K 1528/11, juris, Rn. 23;

²⁸ jeweils m.w.N. aus der Rechtsprechung.

²⁹ § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 BImSchG enthält die weitere Grundpflicht, dass die bei Betrieb der nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können. Diese Grundpflicht ist im Zusammenhang mit tieffrequenten Geräuschimmissionen, die von Anlagen ausgehen, nicht einschlägig.

Nr. 1, 2 BImSchG auch dann zu erfüllen, wenn etwa Wärmepumpen oder Klimaanlage zu privaten Wohnzwecken errichtet und betrieben werden.

Die Vermeidungspflicht nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 BImSchG wird durch die Minderungspflicht nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 BImSchG ergänzt. Nach herrschender Meinung verpflichten die Grundpflichten des § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1, 2 BImSchG die Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen ausschließlich zur *Abwehr* schädlicher Umwelteinwirkungen, nicht aber zur *Vorsorge*. Das BImSchG privilegiert die nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen dadurch, dass es für ihre Betreiber – im Gegensatz zu den Betreibern genehmigungsbedürftiger Anlagen, § 5 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG – keine allgemeine Vorsorgepflicht begründet³⁰.

Die herrschende Meinung verdient schon deshalb Zustimmung, weil die Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 BImSchG nicht generell auf die Einhaltung des Standes der Technik verpflichtet werden. Nach dieser Vorschrift ist der Stand der Technik nur einzuhalten, soweit das zur Vermeidung schädlicher Umwelteinwirkungen notwendig ist. Wichtig ist dabei die Feststellung, dass eine Beeinträchtigung nicht deshalb, weil sie nach dem Stand der Technik vermeidbar ist, als schädlich eingestuft werden kann³¹.

Daraus folgt, dass nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 BImSchG durchaus Luftwärmepumpen und Klimaanlage installiert und betrieben werden dürfen, die dem Stand der Lärminderungstechnik nicht genügen. Die Vermeidungspflicht nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 BImSchG wird erst verletzt, wenn eine solche Anlage relevant zur Entstehung einer schädlichen Umwelteinwirkung beiträgt, die nach dem Stand der Technik vermeidbar ist.

Die Grundpflichten des § 22 Abs. 1 BImSchG gelten unmittelbar. Sie sind von den Betreibern nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen ohne weiteres zu erfüllen. Sie sind für die Betreiber verbindlich, auch wenn sie nicht durch Verwaltungsakt oder Rechtsverordnung konkretisiert werden (Roßnagel/ Hentschel, in: [50] § 22 Rn. 4; [64] § 22 Rn. 12).

Von wesentlicher Bedeutung ist ferner, dass die Betreiberpflichten **dynamischen Charakter** besitzen. Ihr Inhalt kann sich mit einer Änderung der Sach- oder Rechtslage ändern. Auch eine Verschärfung der Anforderungen ist bei entsprechender Änderung der tatsächlichen Umstände möglich, ohne dass Bestandsschutzgesichtspunkte dagegen geltend gemacht werden könnten (Roßnagel/ Hentschel, in: [50] § 22 Rn. 5; [64] § 22 Rn. 12³²). In seinem Urteil vom 18.05.1995 (4 C 20/94, juris, Rn. 26), in dem es um eine nicht genehmigungsbedürftige Autolackiererei ging, fasste das Bundesverwaltungsgericht die Bedeutung der Grundpflichten des § 22 Abs. 1 BImSchG mit folgenden Worten zusammen.

„Der dem Betreiber der Autolackiererei aufgrund der Baugenehmigung zukommende Bestandsschutz kann sich nur in den Grenzen entfalten, die ihm das Immissionsschutzrecht lässt. Dieses Recht ist dynamisch angelegt. Die Grundpflichten gemäß § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG sind nicht nur im Zeitpunkt der Errichtung der Anlage, sondern in der gesamten Betriebsphase zu erfüllen. Sie wirken unmittelbar. Der Betreiber kann sich nicht darauf berufen, dass der Genehmigungsbescheid – wie hier die bestandskräftige Baugenehmigung – keine konkreten Anforderungen an den Schutz der Nachbarschaft stellt (...).“

Nach ihrer Nr. 1 Abs. 2 gilt die TA Lärm auch für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen. Auch die hier im Vordergrund stehenden stationären Geräte wie Luftwärmepumpen und Klimaanlage fallen in den

³⁰ Streitig. Die herrschende Meinung wird vertreten von Jarass, [64], § 22 Rn. 22; Roßnagel/Hentschel, in: [50], § 22 Rn. 114, 38; Czajka, in: [46], § 22 BImSchG, Rn. 23, jeweils m.w.N.; a.A. Klöpfer, [66], Rn. 60; Hansmann, in: [74], § 22 Rn. 14, 15 m.w.N. auch zu der von Hansmann anerkannten herrschenden Meinung.

³¹ BVerwG, Beschluss vom 25.08.1999, 4 B 55/99, juris, Rn. 6; OVG Münster, Beschluss vom 29.08.2012, 2 B 940/12, juris, Rn. 11; [64], § 22 Rn. 35.

³² BVerwG, Urteil vom 29.11.2012, 4 C 8/11, juris, Rn. 27.

Anwendungsbereich der TA Lärm. Für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen sind damit die Vorschriften der TA Lärm bei der Prüfung, ob die Anforderungen des § 22 BImSchG eingehalten sind, zu beachten³³.

Zwar enthält das BImSchG damit auch für die nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen dynamische Grundpflichten, die durch die TA Lärm und die DIN 45680 konkretisiert werden. Sind Anlagen wie etwa Klimageräte oder Luftwärmepumpen Teil eines größeren Vorhabens, das seinerseits z.B. der Baugenehmigungspflicht unterliegt, wird die Einhaltung der immissionsschutzrechtlichen Anforderungen als Ausprägung des baurechtlichen Rücksichtnahmegebotes geprüft. In diesem Fall ist zwar eine präventive behördliche Kontrolle gegeben, doch gilt auch hier – wie bei den immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Anlagen –, dass die präventive Kontrolle die tieffrequente Immission nicht erfasst.

Werden Klimaanlage oder Luftwärmepumpen oder ähnliche haustechnische Einrichtungen jedoch als Einzelvorhaben ausgeführt, unterliegen sie regelmäßig keiner präventiven behördlichen Kontrolle. Sie bedürfen keiner Genehmigung nach dem BImSchG und in den Bauordnungen der Länder sind diese Vorhaben verfahrens- oder genehmigungsfrei gestellt³⁴. Grundstückseigentümer oder sonstige Berechtigte können daher stationäre, haustechnische Geräte erwerben und installieren (lassen), ohne ein behördliches Verfahren, das die Anforderungen des Nachbarschutzes und der Rücksichtnahme überprüft, zu durchlaufen.

Verursachen dergestalt als Einzelvorhaben installierte Wärmepumpen, Klimageräte oder vergleichbare Anlagen durch die von ihnen ausgehenden tieffrequenten Geräuschimmissionen einen Nachbarschaftskonflikt, so liegt es an dem betroffenen Nachbarn, durch eine Beschwerde die zuständige Immissionsschutzbehörde auf den Plan zu rufen. Sie kann, gestützt auf § 24 BImSchG, im Einzelfall die erforderlichen Anordnungen treffen, um die Einhaltung der Grundpflichten des § 22 BImSchG durchzusetzen.

4.3.2 Probleme und legislative Handlungsoptionen

Normierung eines Prognoseverfahrens für tieffrequente Geräusche

Die heute geltende TA Lärm wurde in den 90er Jahren des vorigen Jahrhunderts vorbereitet und erlassen. Man war damals der Meinung, tieffrequente Geräusche könnten nicht im Voraus mit vertretbarer Zuverlässigkeit berechnet werden, weil zu viele Einzelumstände das Ergebnis beeinflussen. Insbesondere sei das Ausmaß der Dämmung, das tieffrequente Geräuschanteile bei der Passage von außen in das Innere von Gebäuden erführen, nicht bekannt. Außerdem gebe es Resonanzphänomene, die sowohl das tieffrequente Schallfeld außerhalb und zwischen Gebäuden als auch jenes innerhalb geschlossener Räume wesentlich beeinflussten.

³³ BVerwG, Urteil vom 29.08.2007, 4 C 2/07, juris, Rn. 14.

³⁴ Vgl. Art. 57 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 lit. b) BayBO, § 55 der Hessischen BauO i.V.m. Anlage 2 Nr. 3.6 (verbrennungsmotorisch betriebene Wärmepumpen oder Kältegeräte bis 350 kW), Nr. 3.8 (elektrisch betriebene Wärmepumpen oder Kälteaggregate bis 1000 kW) der Hessischen BauO; § 60 Abs. 1 Nr. 2 BauO Sachsen-Anhalt; § 60 Abs. 1 BauO Niedersachsen i.V.m. Nr. 2.2, 3.1 BauO Niedersachsen; § 61 Abs. 1 Nr. 2 lit. d) Bremische LandesbauO; § 62 Abs. 1 Nr. 2 lit. b) BauO Berlin; § 61 Abs. 1 Nr. 2 lit. b) BauO Sachsen; § 50 LBO Baden-Württemberg i.V.m. Nr. 12 des Anhangs zu § 50 Abs. 1 LBO Baden-Württemberg; § 60 Abs. 1 Nr. 2 BauO Thüringen; § 61 Abs. 1 Nr. 2 BauO Saarland; § 60 Abs. 2 BauO Hamburg i.V.m. Nr. 2.3 Anlage 2 BauO Hamburg; § 63 Abs. 1 Nr. 2 lit. d) BauO Schleswig-Holstein; § 65 Abs. 1 BauO Mecklenburg-Vorpommern i.V.m. Nr. 11, 13 der Anlage zur BauO Mecklenburg-Vorpommern; § 55 Abs. 3 Nr. 2, 8 BauO Brandenburg; § 65 Abs. 1 Nr. 9 BauO NRW; § 62 Abs. 1 Nr. 2 lit. d), Nr. 3 BauO Rheinland-Pfalz.

Das Fehlen eines bundeseinheitlich normierten Verfahrens zur Prognose tieffrequenter Geräusche ist eine der Ursachen dafür, dass die Geräuschimmissionen im Bereich der tiefen Frequenzen im Genehmigungsverfahren nach dem BImSchG grundsätzlich auch dann nicht berücksichtigt werden müssen, wenn es sich um Anlagen handelt, die bauartbedingt geeignet sind, tieffrequente Geräusche zu emittieren.

Zwischenzeitlich scheint sich der Stand der Erkenntnis, die für eine Prognose tieffrequenter Geräusche erforderlich ist, fortentwickelt zu haben. Auch in der Rechtsprechung sind Tendenzen erkennbar, Prognosen des tieffrequenten Lärms für möglich zu halten und sie zu fordern. So ist das OVG Münster³⁵ zwar der Auffassung, dass vor der Erteilung einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung im Regelfall keine konkrete Prognose zum tieffrequenten Schall zu fordern ist. Doch formuliert das Gericht eine bemerkenswerte Ausnahme³⁶:

„Rechtfertigen indes Erkenntnisse die Annahme, dass von der zur Genehmigung gestellten Anlage tieffrequente Lärmimmissionen hervorgerufen werden, ist im Genehmigungsverfahren die Einhaltung der Zumutbarkeitskriterien nach der DIN 45680 und dem zugehörigen Beiblatt 1 zu prüfen und gegebenenfalls durch die Aufnahme von Nebenbestimmungen sicherzustellen.“

Auch der Bayerische Verwaltungsgerichtshof hat in seinem Beschluss vom 10.04.2013³⁷ zu erkennen gegeben, dass er die Prognose tieffrequenter Geräusche durchaus für möglich und für geboten hält:

„Den angegriffenen Urteilen liegt vielmehr die entscheidungstragende Feststellung zugrunde, dass in vorliegenden Genehmigungsverfahren eine prognostische Einschätzung dahingehend erfolgt ist, dass bei Betrieb von Windkraftanlagen in der Regel kein schädlicher, erheblich nachteiliger oder erheblich belästigender Lärm ... entsteht, und zwar auch nicht durch tieffrequente Geräusche mit Frequenzen oberhalb von 20 Hz und unterhalb von 90 Hz. Diese prognostische Einschätzung beruht auf den fachlichen Einschätzungen des Vertreters des Landesamts für Umwelt in der mündlichen Verhandlung vom 8. November 2012 (...). Ein unzulässiger Verzicht auf die nach § 5 Abs. 1 Nr. 1, § 6 Abs. 1 BImSchG gebotene Immissionsprognose in Bezug auf tieffrequenten Schall liegt in diesen Erwägungen nicht.“

Die Normierung eines Prognoseverfahrens für tieffrequente Geräusche ist vor diesem Hintergrund notwendig, um den Vollzug zu vereinheitlichen und für Antragsteller, Behörden und Gerichte reproduzierbare und voraussehbare Resultate zu erhalten. Dabei ist dem Normgeber gestattet, zur Reduzierung der Komplexität bestimmte Parameter zu typisieren und zu definieren.

Im Abschnitt 2.5 der vorliegenden Untersuchung wurden u.a. Studien zur Schallpegeldifferenz von außen nach innen im Bereich tieffrequenter Luftschallexposition ausgewertet, die auch durch eigene Messungen und Feststellungen reproduzierbar sind. Auf dieser naturwissenschaftlichen Grundlage scheint es vertretbar, eine **Standarddämmung tieffrequenten Luftschalls** beim Übergang von außen nach innen für die in der Bundesrepublik Deutschland weit überwiegend vorhandenen Häuser in Massivbauweise zu definieren.

Als Beispiel einer **normativ definierten Standarddämmung** kann die Anlage zu § 3 des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm (FluLärmG) gelten [49]. Nach § 2 Abs. 2 Satz 2 Nr. 1 lit. a), Nr. 2, Nr. 3 lit. a) und b), Nr. 4 Fluglärmgesetz ist für die Charakterisierung des nächtlichen Fluglärms ein Häufigkeits-Maximalpegelkriterium vorgeschrieben. Für die rechnerische Bestimmung der fluglärmbedingten Maximalpegel im Inneren von Gebäuden wird in der Anlage zu § 3 FluLärmG ein Pegelunterschied zwischen

³⁵ OVG Münster, Urteil vom 22.05.2014, 8 A 1220/12, juris, Rn. 144.

³⁶ OVG Münster, Urteil vom 22.05.2014, 8 A 1220/12, juris, Rn. 146 unter Berufung auf VG Köln, Beschluss vom 13.08.2008, 2 L 903/08, juris, Rn. 29 ff.; VG Minden, Urteil vom 17.03.2005, 9 K 1894/04, juris, Rn. 28; VG Augsburg, Beschluss vom 01.09.2009, Au 5 S 09.182, juris, Rn. 29 ff.

³⁷ BayVGH, Beschluss vom 10.04.2013, 22 ZB 12.2714 u.a., juris, Rn. 5.

Außen und Innen von 15 dB(A) festgesetzt. In der Amtlichen Begründung des Gesetzentwurfs heißt es dazu [24]:

„Für die Bestimmung der Maximalpegel in Innenräumen wird ein Pegelunterschied zwischen außen und innen von 15 dB(A) zugrunde gelegt. Dies entspricht nach den vorliegenden Erkenntnissen dem typischen Dämmwert eines zu Lüftungszwecken gekippten Fensters.“

Definiert wird damit im Ergebnis ein Gesamtdämmmaß einer Außenwand mit gekipptem Fenster (Reidt/ Fellenberg, in: [74] § 3 FluLärmG Rn. 20 f. m.w.N.), das von der Rechtsprechung als realistische Annäherung an die Wirklichkeit anerkannt wird³⁸.

Auch für die Prognose tieffrequenter Geräusche in Innenräumen kann der Normgeber von seiner Typisierungsbefugnis Gebrauch machen und nach Auswertung und Würdigung der vorliegenden Erkenntnisse einen Pegelunterschied innen/außen definieren, der der Prognoserechnung zugrunde zu legen ist.

Die prognostische Ermittlung von Stärke und Struktur des tieffrequenten Schallfeldes außerhalb von Gebäuden einschließlich der Berechnung von Resonanzphänomenen scheint ebenfalls möglich, wie die Ergebnisse der Simulationsrechnungen in Abschnitt 5.3 und Abschnitt 5.4 des vorliegenden Berichts zeigen werden.

Definition von Immissionsorten und Immissionsrichtwerten für tieffrequente Geräusche außerhalb von Gebäuden zum Schutz des Außenwohnbereichs

Bisher werden tieffrequente Geräusche nicht nur nicht prognostiziert. Sie werden, wenn sie nach Inbetriebnahme einer Anlage zum Problem werden, auch ausschließlich in schutzbedürftigen Räumen bei geschlossenen Türen und Fenstern gemessen (vgl. [27], Nr. 4.3). Der Außenwohnbereich (Gärten, Terrassen, Balkone) wird nach dem geltenden Recht vor diesen Emissionen nicht geschützt.

Die Beschränkung des Schutzes vor tieffrequenten Geräuschen auf schutzbedürftige Räume innerhalb von Gebäuden ist nicht angesichts der Bedeutung, die die Nutzung des Außenwohnbereichs jedenfalls zur Tagzeit (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr) hat, nicht gerechtfertigt.

Zum Schutz des Außenwohnbereichs vor tieffrequenten Geräuschen sind daher geeignete Immissionsorte außerhalb von Gebäuden und die zugehörigen Immissionsrichtwerte für den Tag zu bestimmen.

Prognose der tieffrequenten Geräusche als Teil der Regelfallprüfung im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren (Ergänzung von Nr. 3.2.1, Änderung von Nr. A.1.5 TA Lärm)

Ist das Prognoseverfahren fachlich definiert – etwa mit der anstehenden Novelle der DIN 45680 –, kann es in das verbindliche Immissionsschutzrecht aufgenommen werden. Auf dieser Basis kann schließlich die Pflicht zur Prognose tieffrequenter Geräusche für den Fall fixiert werden, dass solche Emissionen zu erwarten sind.

Die Nr. 3.2.1 TA Lärm könnte dafür um die folgenden Regelungen ergänzt werden:

- In Nr. 3.2.1 Abs. 1 TA Lärm werden nach den Worten „...“, wenn die Gesamtbelastung am maßgeblichen Immissionsort die Immissionsrichtwerte nach Nr. 6“ die Worte „und die Anhaltswerte der DIN 45680, Ausgabe ..., Beiblatt 1“ eingefügt.

³⁸ BVerwG, Urteil vom 16.03.2006, 4 A 1075/04, juris, Rn. 337 ff.; BVerwG, Urteil vom 09.11.2006, 4 A 2001/06, juris, Rn. 108 f.; BayVG, Urteil vom 19.02.2014, 8 A 11.40040 u.a., juris, Rn. 473.

- ▶ Nr. 3.2.1 Abs. 6 TA Lärm wird um den folgenden Satz 3 ergänzt: „Sind tieffrequente Geräusche zu erwarten³⁹, sind sie nach Nummer A.1.5 zu prognostizieren.“
- ▶ Die Überschrift von Nr. A.1.5 wird geändert in „Prognose tieffrequenter Geräusche“. In der geänderten Nr. A.1.5 sollten Anlagen oder Anlagenteile aufgeführt werden, die in der Regel tieffrequente Geräusche erwarten lassen (Abs. 1 neu). Im Anschluss daran könnte statisch auf eine Norm (z.B. die entsprechend geänderte DIN 45680) verwiesen werden, die das Prognoseverfahren für tieffrequente Geräusche enthält.

Einführung einer Anzeigepflicht oder eines Anmeldevorbehalts für Errichtung und Betrieb von nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen als Einzelvorhaben, wenn tieffrequente Geräusche zu erwarten sind

Wärmepumpen, Klimaanlage oder andere tieffrequent abstrahlende stationäre Geräte sind immissionsschutzrechtlich in der Regel nicht genehmigungsbedürftige Anlagen. Werden sie als Einzelvorhaben errichtet und betrieben, unterliegen sie keiner präventiven behördlichen Kontrolle. Das geltende Immissionsschutzrecht stellt zur Bewältigung von Nachbarkonflikten, die von den tieffrequenten Geräuschemissionen dieser Geräte ausgelöst werden, nur die Instrumente der nachträglichen Durchsetzung der immissionsschutzrechtlichen Pflichten zur Verfügung. Damit wird jedoch das Risiko einer rechtswidrigen Verursachung schädlicher Umwelteinwirkungen durch die Frequenzgeräusche auf dem betroffenen Nachbarn verlagert. Denn es liegt an ihm, die Unzumutbarkeit der tiefen Frequenzen der Geräuschemissionen vor der zuständigen Immissionsschutzbehörde, den Verwaltungsgerichten oder gegebenenfalls den Zivilgerichten geltend zu machen.

Wenn es sich bei den in Rede stehenden stationären Geräten um Anlagen handelt, die bauartbedingt geeignet sind, tieffrequente Geräusche zu erzeugen, ist es nicht angemessen, dem betroffenen Nachbarn die Last aufzubürden, hinsichtlich der erwartbaren tieffrequenten Geräusche rechtmäßige Zustände herzustellen.

Es erscheint sinnvoll, für diese Fälle eine präventive Administrativkontrolle einzuführen. Dafür stehen verschiedene Regelungstypen von unterschiedlicher Dichte und Eingriffsintensität zur Verfügung⁴⁰. Gemeinsam ist diesen Normierungstechniken, dass sie die tatbestandlichen Handlungen zunächst generell verbieten, so dass sie nicht ohne behördliches Kontrollverfahren begonnen werden dürfen.

Die Einführung einer Genehmigungspflicht und damit die Gleichstellung der Wärmepumpen, Klimaanlage und weiterer tieffrequent strahlender stationärer Geräte mit den im Anhang der 4. BImSchV aufgeführten genehmigungsbedürftigen Anlagen wäre jedoch nach hier vertretener Auffassung unverhältnismäßig.

In Frage kommt jedoch die Einführung einer **Anzeigepflicht** mit der Möglichkeit der Untersagung im Einzelfall. Die Anzeigepflicht dient insbesondere dazu, der Behörde die wesentlichen Informationen über das zu installierende Gerät und über den vorgesehenen Aufstellungsort zu verschaffen. Typisch für diese Rechtstechnik ist, dass der Anzeigende unmittelbar nach der Anzeige mit der Errichtung und dem Betrieb des betreffenden Geräts beginnen kann. Eine behördliche Erklärung über die Zulässigkeit des Geräts erhält der Anzeigende in der Regel nicht.

³⁹ Eine ähnliche Formulierung auf der Tatbestandsseite existiert bereits in der geltenden TA Lärm. In Nr. 7.3 Satz 1 TA Lärm heißt es: „Wenn unter Berücksichtigung von Nummer A.1.5 des Anhangs schädliche Umwelteinwirkungen durch tieffrequente Geräusche zu erwarten sind, so sind geeignete Minderungsmaßnahmen zu prüfen.“ Der hier gemachte Vorschlag knüpft an den Tatbestand (Erwartbarkeit tieffrequenter Geräusche) lediglich eine andere Rechtsfolge, nämlich die Pflicht zur prognostischen Untersuchung der zu erwartenden tieffrequenten Geräusche. Eine solche Untersuchung ist strenggenommen auch die Voraussetzung für die in Nr. 7.3 Abs. 2 Satz 1 TA Lärm heute angeordnete Prüfung geeigneter Minderungsmaßnahmen.

⁴⁰ Vgl. dazu sowie nachfolgend zu den Regelungstypen der Anzeige- und Anmeldepflicht [94]

Denkbar wäre auch die Einführung eines **Anmeldevorbehalts**, der die Errichtung und den Betrieb der hier erörterten stationären Geräte verbietet, solange sie nicht angemeldet sind. Um das Verbot zu beseitigen, müssten die Betreiber der zuständigen Behörde auch hier Informationen über ihr Vorhaben mitteilen, die der Behörde eine Prüfung der Rechtmäßigkeit erlauben. Charakteristisch für den Anmeldevorbehalt ist die Tatsache, dass mit der Aufstellung und dem Betrieb der betreffenden Geräte erst nach Ablauf einer Wartefrist begonnen werden dürfte.

4.4 Baurecht

Sowohl das **Bauplanungsrecht** des Bundes als auch das **Bauordnungsrecht** der Länder verfolgen – neben vielen weiteren Zielen – auch den Schutz vor Gefahren und Belästigungen durch Lärm.

So haben die planenden Städte und Gemeinden nach dem BauGB die Aufgabe, durch ihre Bauleitpläne eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung zu gewährleisten (§ 1 Abs. 5 Satz 1 BauGB). Die Bauleitpläne sollen dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern und die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen (§ 1 Abs. 5 Satz 2 BauGB). Bei der Aufstellung der Bauleitpläne haben sie – u.a. – die umweltbezogenen Auswirkungen auf den Menschen und seine Gesundheit zu berücksichtigen (§ 1 Abs. 6 Nr. 7 lit. c) BauGB]. Die kommunale Bauleitplanung dient daher auch dem vorbeugenden Umweltschutz. Insbesondere für den vorsorgenden Immissionsschutz kommt ihr erhebliche Bedeutung zu. Die Gemeinden sind dabei grundsätzlich befugt, durch Festsetzungen in Bebauungsplänen immissionsschutzbezogene Forderungen rechtsverbindlich zu machen, die inhaltlich von den Anforderungen abweichen, die sich aus dem allgemeinen Immissionsschutzrecht ergeben (Söfker, in: [38] § 1 Rn. 105, 224 ff.; [105] S. 908/909 ff., jeweils m.w.N.).

Die Sorge um den Immissionsschutz ist aber auch Teil des objektbezogenen Bauordnungsrechts. So schreiben die Bauordnungen der Länder vor, dass Geräusche, die von ortsfesten Einrichtungen in baulichen Anlagen oder auf Baugrundstücken ausgehen, so zu dämmen sind, dass Gefahren oder unzumutbare Beeinträchtigungen nicht entstehen (z.B. Art. 13 Abs. 2 Satz 2 BayBO, § 14 Abs. 2 Satz 2 Hess-BauO).

4.4.1 Aktuelle Rechtslage

Für planerische Regelungen zur Vermeidung und Minderung tieffrequenter Geräuschimmissionen durch stationäre, in Wohngebiete eindringende Anlagen kommen v.a. Festsetzungen im Bebauungsplan in Betracht, die die Bodennutzung verbindlich regeln. Dem deutschen Bauplanungsrecht ist ein „*Festsetzungserfindungsrecht*“ fremd (Schrödter, in: [95] § 9 Rn. 12-15). Zulässig sind Festsetzungen im Bebauungsplan nur im Rahmen und auf der Grundlage des § 9 BauGB und der Baunutzungsverordnung. Zwar sind Festsetzungsmöglichkeiten für tieffrequenten Lärm nicht ausdrücklich normiert, es finden sich allerdings Rechtsgrundlagen, die für entsprechende Festsetzungen herangezogen werden können.

Festsetzungen gemäß § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB

Die Ermächtigung des § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB erlaubt drei spezifische Arten von Festsetzungen zum Immissionsschutz im Bebauungsplan, die auf ihre Verwendbarkeit zur Minderung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung in Betracht kommen.

Festsetzungsalternative 1 des § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB: von Bebauung freizuhaltende Schutzflächen

Die Festsetzung von Schutzflächen in der Festsetzungsalternative 1 des § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB ermöglicht die Festsetzung eines räumlichen Abstands zwischen Flächen unterschiedlicher, in unmittelbarer Nachbarschaft miteinander und insbesondere aus Gründen des Immissionsschutzes nicht zu

vereinbarender Nutzungen (Söfker, in: [38] § 9 Rn. 12-15). Zielsetzung der Schutzflächen ist die Begrenzung von Nutzungskonflikten aufgrund von schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren im Sinne des BImSchG (Mitschang/ Reidt, in: [2] § 9 Rn. 140), zu welchen ohne weiteres auch tieffrequenter Lärm gerechnet werden kann. Schutzflächen können festgesetzt werden, wenn zwischen gefährlichen oder erheblich belästigenden Nutzungen und schützenswerten Nutzungen – wie etwa Wohnen – ein Schutzabstand rechtlich gesichert werden soll, um dem Gebot der Konfliktbewältigung Rechnung zu tragen ([99], Kap. 50, 72). Mit dieser Festsetzungsmöglichkeit kann damit insbesondere dem sog. Trennungsgrundsatz gem. § 50 Satz 1 BImSchG Rechnung getragen werden, der für die Bauleitplanung eine Abwägungsdirektive darstellt⁴¹.

Wird eine Schutzfläche nach § 9 Abs. 1 Nr. 24 1. Alt. BauGB festgesetzt, können parallel dazu für diese Fläche keine Nutzungen festgesetzt werden, nach denen eine Bebauung zulässig ist ([99], Kap. 50, 75). Der Begriff „*Bebauung*“ in diesem Sinn bezieht sich im Wesentlichen auf Gebäude und sonstige bauliche Nutzungen, die regelmäßig und dauerhaft von Menschen genutzt werden (Gierke, in: [9] § 9 Rn. 449). Für die Schutzflächen können lediglich nicht bauliche Nutzungen festgesetzt werden, wie etwa Wald, Landwirtschaft, Wasserfläche, Grünfläche etc. (Gaentzsch, in: [91] § 9 Rn. 62; Mitschang/ Reidt, in: [91] § 9 Rn. 140⁴²).

Festsetzungsalternative 2 des § 9 Abs. 1 Nr. 24: Flächen für besondere Anlagen und Vorkehrungen zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen

Nach der Festsetzungsalternative 2 können Flächen für besondere Anlagen und Vorkehrungen zum Schutz gegen schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren im Sinne des BImSchG festgesetzt werden (Mitschang/ Reidt, in: [2] § 9 Rn. 143). Zweck der Festsetzungen ist der Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Söfker, in: [38] § 9 Rn. 205). Während Festsetzungsalternative 3 des § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB der Festsetzung von konkreten baulichen oder sonstigen technischen Anlagen dient (vgl. dazu sogleich unten), dient die Festsetzungsalternative 2 der Festsetzung der hierfür erforderlichen Flächen. Die Festsetzungsalternativen 2 und 3 des § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB werden daher regelmäßig verbunden (Mitschang/ Reidt, in: [2] § 9 Rn. 143).

Eine *Anlage* im Sinne dieser Vorschrift ist eine selbständige Einrichtung, die dem Schutz gegen schädliche Umwelteinwirkungen dient. Es handelt sich regelmäßig um bauliche oder sonstige Anlagen im Sinne von § 29 BauGB, die selbständig einen Schutz etwa gegen Lärm bewirken ([99], Kap. 50, 83). Festgesetzt werden können danach z.B. Flächen für Lärmschutzanlagen (z.B. Lärmschutzwälle oder -wände)⁴³. Unter *Vorkehrungen* zum Schutze vor Immissionen versteht § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB demgegenüber unselbständige Einrichtungen, die an einer baulichen oder sonstigen Anlage angebracht werden ([99], Kap. 50, 83), um diese vor schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren zu schützen oder um an der Anlage die Entstehung von schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren zu verhindern bzw. zu mindern (Söfker, in: [38] § 9 Rn. 205).

Festsetzungsalternative 3 des § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB: bauliche und sonstige technische Vorkehrungen

In der Festsetzungsalternative 3 ermöglicht § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB die Festsetzung von baulichen und sonstigen technischen Vorkehrungen zum Schutz gegen schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren selbst, das heißt ohne Flächenfestsetzung wie in Festsetzungsalternative 2 (Söfker, in: [38] § 9 Rn. 208). Die in dieser Festsetzungsalternative verwendeten Begriffe sind inhaltsgleich mit jenen der Festsetzungsalternative 2 ([99], Kap. 50, 91). Vorkehrungen zum Schutze vor Immissionen i.S. dieser

⁴¹ BVerwG, Urteil vom 19.04.2012, 4 CN 3/11, DVBl 2012, 912.

⁴² für eine Pflicht zur Festsetzung einer Nutzung

⁴³ BVerwG, Beschluss vom 29.07.2004, 4 BN 26/04, BauR 2005, 830.

Regelung sind unselbständige Einrichtungen, die an einer baulichen oder sonstigen Anlage angebracht werden ([99], Kap. 50, 83), um diese vor schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren zu schützen oder **um an der Anlage** die Entstehung von schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstigen Gefahren zu verhindern bzw. zu mindern (Söfker, in: [38] § 9 Rn. 205). Vom Begriff der Vorkehrungen erfasst sind also bauliche und technische Vorkehrungen an den emittierenden Anlagen selbst (sog. aktiver Schutz) oder bauliche und sonstige Vorkehrungen an den von Immissionen betroffenen Anlagen oder sonstigen Nutzungen, wie etwa Wohngebäuden (sog. passiver Schutz; Mitschang/ Reidt, in: [2] Rn. 144).

Festgesetzt werden können danach emissionsmindernde Maßnahmen auch an den störenden Anlagen, z.B. die Verwendung schalldämmender Baustoffe für Außenwände oder Bindungen für die Grundrissgestaltung. Außerdem können auf der Grundlage des § 9 Abs. 1 Nr. 24 Alt. 3 BauGB Maßnahmen des passiven Schallschutzes an den von den Immissionen betroffenen schutzbedürftigen Anlagen festgesetzt werden, z.B. bestimmte Gebäudestellungen, bestimmte Haustypen, Schalldämmung an Außenbauteilen, die Anordnung von Aufenthaltsräumen oder der Ausschluss von Fensteröffnungen (Gierke, in: [9] § 9, Rn. 460).

Als Vorkehrungen zur Vermeidung oder Minderung schädlicher Umwelteinwirkungen i.S. von § 9 Abs. 1 Nr. 24 3. Alt. BauGB können nur bauliche und sonstige technische Maßnahmen festgesetzt werden (Gaentzsch, in: [91] Rn. 64), die auch spezifisch zur Vermeidung und Minderung tieffrequenter Geräuschimmissionen an Wohnbebauung eingesetzt werden können. Zulässig ist es danach zur Bestimmung des Wirkungsgrades von baulichen und technischen Vorkehrungen festzusetzen, dass die festgesetzten baulichen oder sonstigen technischen Vorkehrungen zu einer bestimmten (Lärm-) Immissionsreduzierung in dB führen müssen (z.B. bei Schallschutzfenstern; Gaentzsch, in: [91] § 9 Rn. 64). Immissions- und Emissionsgrenzwerte können nach § 9 Abs. 1 Nr. 24 3. Alt. BauGB damit zwar nicht als „Zaunwerte“, aber zur Bestimmung von Eigenschaften der baulichen und sonstigen technischen Vorkehrungen verwandt werden (sog. konkretisierende Grenzwerte; Söfker, in: [38] § 9 Rn. 206)⁴⁴. Die Festsetzung von baulichen und sonstigen technischen Vorkehrungen i.S. von § 9 Abs. 1 Nr. 24 3. Alt. BauGB ermöglicht damit im Bebauungsplangebiet die Festsetzung konkreter Vorkehrungen zum Schutz vor (Lärm-) Emissionen.

Im Hinblick auf tieffrequenten Schall können danach für bestimmte Bereiche des Bebauungsplans – unter Wahrung des Typisierungsgebotes, also regelmäßig ohne Festsetzungen für ein konkretes Vorhaben (Gierke, in: [9] § 9 Rn. 53.) – für eine bestimmte Art von Anlagen – wie etwa Luftwärmepumpen außerhalb von Gebäuden – konkrete bauliche oder technische Vorkehrungen festgesetzt werden, um tieffrequenten Schall z.B. durch Entkoppelung zu vermeiden. Zur Konkretisierung einer solchen Festsetzung kann dabei auch eine bestimmte Reduzierung des tieffrequenten Schalls durch die Vorkehrung bestimmt werden.

Festsetzungen nach § 9 Abs. 1 Nr. 23 b BauGB

Die Festsetzung nach § 9 Abs. 1 Nr. 23 b BauGB erlaubt die Festsetzung von Gebieten, in denen bei der Errichtung von Gebäuden und bestimmten sonstigen baulichen Anlagen bestimmte bauliche und sonstige technische Maßnahmen für die Erzeugung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien und aus Kraft-Wärme-Kopplung getroffen werden müssen. Damit sind Festsetzungen möglich, die zu Maßnahmen verpflichten, die dem Einsatz erneuerbarer Energien oder der Kraft-Wärme-Kopplung dienen. Diese Festsetzungsmöglichkeit ist damit den Festsetzungsmöglichkeiten zuzuordnen, die nicht lediglich die planungsrechtliche Absicherung von baulichen und

⁴⁴ Vgl. auch Begründung zur Regierungsvorlage, Bt.Drs. 10/4630)

sonstigen Anlagen im engeren Sinne zum Gegenstand haben, sondern bei der Errichtung von nach anderen Festsetzungen vorgesehenen Anlagen zu bestimmten Maßnahmen verpflichten - wie etwa auch die vorgenannte Festsetzung nach § 9 Abs. 1 Nr. 24 3. Alt. BauGB – (Söfker, in: [38], § 9, Rn. 197 a), d.h. die festgesetzten baulichen oder technischen Maßnahmen müssen getroffen werden (Gaentzsch, in: [91] § 9, Rn. 60).

Unter die nach § 9 Abs. 1 Nr. 23b BauGB festsetzbaren sonstigen technischen, d.h. bautechnischen Maßnahmen fällt vor allem die Installation von Anlagen für die Erzeugung, Speicherung oder Nutzung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung (Mitschang/Reidt, in: [2] § 9 Rn. 137). Vorgeschrieben werden können die baulichen und technischen Maßnahmen nur bei der Errichtung von Gebäuden und bestimmten baulichen Anlagen (Gaentzsch, in: [91] § 9 Rn. 60), nicht jedoch bei Bestandsanlagen.

Als Rechtsgrundlage für einschränkende Festsetzungen dahingehend, dass derartige Anlagen aus Immissionsschutzgründen, z.B. zum Schutz vor tieffrequentem Schall, mit bestimmten Vorkehrungen ausgestattet sein müssen oder ausgeschlossen werden könnten, dürfte § 9 Abs. 1 Nr. 2b BauGB nach seinem Wortlaut und auch nach Sinn und Zweck der Festsetzungsgrundlage nicht in Betracht kommen. Es spricht insoweit allerdings nichts dagegen, Festsetzungen nach § 9 Abs. 1 Nr. 23b BauGB mit Festsetzungen nach § 9 Abs. 1 Nr. 24 3. Alt. BauGB zu kombinieren (Söfker, in: [38] § 9 Rn. 197 e). Wird also gemäß § 9 Abs. 1 Nr. 23b BauGB die Einrichtung von Wärmepumpen festgesetzt, so kann diese Festsetzung mit einer auf § 9 Abs. 1 Nr. 24 3. Alt. BauGB gestützten Festsetzung, dass diese Anlage mit entsprechenden Vorkehrungen zum Schutz vor tieffrequentem Schall zu versehen ist, verbunden werden.

Festsetzung nach § 9 Abs. 1 Nr. 2 BauGB, § 23 BauNVO

Gem. § 9 Abs. 1 Nr. 2 BauGB i.V.m. § 23 BauNVO können zur Bestimmung der überbaubaren Grundstücksfläche Baulinien, Baugrenzen oder Bebauungstiefen festgesetzt werden (Mitschang/Reidt, in: [2] § 9 Rn. 27). Durch die Festsetzung der überbaubaren Grundstücksfläche kann ebenfalls ein (Schutz-)Abstand zwischen störender und schutzbedürftiger Bebauung hergestellt werden, der grundsätzlich auch für den Schutz vor tieffrequenten Geräuschen eingesetzt werden kann.

Zu beachten ist allerdings, dass, wenn im Bebauungsplan nichts anderes festgesetzt ist, auf den nicht überbaubaren Grundstücksflächen jedenfalls Nebenanlagen im Sinne des § 14 BauNVO zugelassen werden können, § 23 Abs. 5 Satz 1 BauNVO. Das gleiche gilt für bauliche Anlagen, soweit sie nach Landesrecht in den Abstandsflächen zulässig sind oder zugelassen werden können (§ 23 Abs. 5 Satz 2 BauNVO). Sollte es sich also bei der tieffrequent störenden Anlage um eine Nebenanlage i.S. von § 14 BauNVO, was etwa bei einer Luftwärmepumpe zur Beheizung eines Außenschwimmbeckens der Fall sein dürfte, so hilft eine Festsetzung betreffend die überbaubare Grundstücksfläche im Sinne von § 9 Abs. 1 Nr. 2 BauGB, 23 BauNVO nicht weiter. Hauptanlagen hingegen können außerhalb der überbaubaren Grundstücksfläche nur im Wege der Befreiung gem. § 31 Abs. 2 BauGB zugelassen werden. Einer Befreiung könnten dann – im Falle der Störung durch tieffrequenten Lärm – die Würdigung der nachbarlichen Interessen als öffentlicher Belang entgegenstehen.

Ausschluss von Nebenanlagen durch § 14 Abs. 1 Satz 3 BauNVO

Gem. § 14 Abs. 1 Satz 1 BauNVO sind neben den in §§ 2 bis 13 BauNVO genannten Anlagen auch untergeordnete Nebenanlagen und Einrichtungen in den Baugebieten zulässig. Gem. § 14 Abs. 1 Satz 3 BauNVO kann die Zulässigkeit dieser untergeordneten Nebenanlagen und Einrichtungen beschränkt oder ausgeschlossen werden. Der Ausschluss kann sich auf Teile des Baugebiets und auf bestimmte

Arten von Nebenanlagen beschränken (Stock, in: [69] § 14 Rn. 35). Entsprechende Festsetzungen können insbesondere dazu dienen, die Bewohner verdichteter Wohngebiete generell vor bestimmten Störungen und Belästigungen zu schützen (Stock, in: [69] § 14 Rn. 36).

Zu den Wesensmerkmalen einer untergeordneten Nebenanlage gehört, dass die Anlage sowohl in ihrer Funktion als auch räumlich-gegenständlich dem primären Nutzungszweck der in dem Baugebiet gelegenen Grundstücke sowie der diesem Nutzungszweck entsprechenden Bebauung dienend zu- und untergeordnet ist⁴⁵. Eine dem Nutzungszweck des Grundstücks dienende Nebenanlage hat im Hinblick auf die Hauptnutzung ähnlich wie Zubehör eine Hilfsfunktion⁴⁶. Abzugrenzen ist die Nebenanlage von der Hauptanlage⁴⁷. Dabei gehören zur Hauptanlage funktionell alle Teile der Anlage, die den Kern der Hauptnutzung bilden. Zur Hauptanlage gehören danach als notwendige Bestandteile der jeweiligen Nutzung der Hauptanlage insbesondere die überwiegend der Versorgung eines Hauptgebäudes dienenden Heizungsanlagen (Wärmeerzeuger; Stock, in: [69] § 14 Rn. 16) – wie etwa Luftwärmepumpen [108].

Da die haustechnischen Anlagen – wie insbesondere auch die tieffrequenten Lärm verursachenden Luftwärmepumpen und Klimaanlage – für Wohngebäude regelmäßig zur Hauptanlage zu rechnen sind, scheidet insoweit ein Ausschluss als Nebenanlage auf der Grundlage des § 14 Abs. 1 Satz 3 BauNVO regelmäßig aus. Anders ist dies ggfls. im Zusammenhang mit der Beheizung eines Außenschwimmbeckens durch eine Luftwärmepumpe zu beurteilen. Im Hinblick auf die vorgenannten Maßstäbe erscheint es denkbar, die Nebenanlage „*Luftwärmepumpe zur Beheizung von Außenschwimmbecken*“ auf der Grundlage von § 14 Abs. 1 Satz 3 BauGB auszuschließen.

Gebietsgliederung nach § 1 Abs. 4 Satz 1 Nr. 2, 11 Abs. 2 BauNVO

Nach § 1 Abs. 4 BauNVO können die in den §§ 4 bis 9 BauNVO bezeichneten Baugebiete oder nach Abs. 8 Teile von ihnen nach der Art der zulässigen Nutzung, nach der Art der Betriebe und Anlagen und deren besonderen Bedürfnissen und Eigenschaften gegliedert werden ([48] § 1 Rn. 82.). Diese Gliederungsmöglichkeit besteht demnach nicht für Kleinsiedlungsgebiete, reine Wohngebiete und Sondergebiete, wobei in Sondergebieten die Gemeinde ohnehin die Art der baulichen Nutzung und somit auch eine Gliederung selbst bestimmen kann (§ 11 Abs. 2 BauNVO) und insoweit ein Rückgriff auf § 1 Abs. 4 Nr. 2 BauNVO nicht erforderlich ist ([48] § 1 Rn. 82).

Nach der Rechtsprechung des BVerwG ist das Emissionsverhalten eine „*besondere Eigenschaft*“ eines Betriebes und damit Gliederungskriterium im Sinne von § 1 Abs. 4 Nr. 2 BauNVO [16]. Auf der Grundlage von § 1 Abs. 4 Nr. 2 BauNVO können Gemeinden folglich einerseits bestimmte Formen von Emissionen in einem bestimmten Baugebietsteil generell ausschließen oder einschränken und andererseits Grenzwerte für verschiedene Emissionen festlegen (Roeser, in: [69] § 1 Rn. 59). So hat etwa der Hess-VGH eine Festsetzung in einem Gewerbegebiet für zulässig erachtet, wonach im gesamten Bebauungsplanbereich nur Betriebe zulässig sind, von deren Anlagen keine Erschütterungen ausgehen, die sich schädlich auf Menschen und Gebäude auswirken können, wobei die Anhaltswerte der DIN 4150 einzuhalten sind, wenn damit mehrere Gewerbegebiete einer Gemeinde gegliedert werden sollen⁴⁸.

Das BVerwG hat die Festsetzung von flächenbezogenen Schalleistungspegeln (FSP) auf der Grundlage von § 1 Abs. 4 Nr. 2 BauNVO für zulässig erachtet [16]. Später hat das BVerwG auch die Festsetzung von immissionswirksamen flächenbezogenen Schalleistungspegeln (IFSP) auf der Grundlage von § 1

⁴⁵ BVerwG, U.v. 17.12.1976, IV C 6.75, BauR 1977, 109.

⁴⁶ BVerwG, U.v. 7.5.1976, IV C 43.74.

⁴⁷ BVerwG, ZfBR 2005, 698.

⁴⁸ HessVGH, 17.3.2003, 9 N 3232/99, UPR 2003 458 [LS].

Abs. 4 Nr. 2 BauNVO gebilligt [17]. Beim FSP und IFSP handelt es sich darum, dass für eine Flächeneinheit, z.B. für den m² Grundstücksfläche, die zulässigen Geräuschemissionen zum Schutz empfindlicher Flächen begrenzt werden. Unterschiedlich ist dabei die Ermittlung der Grenzwerte (Ziegler, in: [9] § 1 BauNVO, Rn. 313 a).

Auf der Grundlage von § 1 Abs. 4 Nr. 2 BauNVO können bestimmte Formen von Emissionen in einem bestimmten Baugebietsteil generell ausgeschlossen oder eingeschränkt werden. § 1 Abs. 4 Nr. 2 BauNVO bietet innerhalb von Baugebieten bzw. Baugebietsteilen damit die Möglichkeit, Anlagen mit der besonderen Eigenschaft, tieffrequenten Schall hervorzurufen, auszuschließen. Möglich erscheint insoweit auch, FSP bzw. IFSP für die Emission tieffrequenter Geräusche festzusetzen.

Festsetzung gem. § 1 Abs. 5, Abs. 6 BauNVO

§ 1 Abs. 5, Abs. 6 BauNVO gibt die Möglichkeit, im Bebauungsplan bestimmte Arten von Nutzungen, die nach den §§ 2 bis 9 und 13 BauNVO allgemein zulässig sind, als nicht zulässig festzusetzen (Abs. 5) bzw. ausnahmsweise zulässige Nutzungen auszuschließen (Abs. 6). Die Festsetzung nach § 1 Abs. 5 BauNVO findet ihre Grenze darin, dass die allgemeine Zweckbestimmung des Baugebiets gewahrt bleiben muss (Roeser, in: [69] § 1 Rn. 70). „*Arten von Nutzungen*“ meint dabei jede einzelne in einer Nummer der jeweiligen Baugebietsvorschrift aufgeführte Nutzung (Roeser, in: [69] § 1 Rn. 69).

§ 1 Abs. 5, Abs. 6 BauNVO vermag insoweit auch eine Grundlage darzustellen, um einzelne – tieffrequent störende – Nutzungen aus dem Nutzungskatalog innerhalb der einzelnen Baugebiete herauszunehmen. Da anders als in § 1 Abs. 4 BauNVO ein konkretes Anknüpfen an bestimmte Eigenschaften der Betriebe wie etwa das tieffrequente Emissionsverhalten in § 1 Abs. 5, Abs. 6 BauNVO nicht möglich ist, dürfte § 1 Abs. 5, Abs. 6 BauNVO neben § 1 Abs. 4 BauNVO zum Schutz vor tieffrequentem Schall allerdings keine über § 1 Abs. 4 BauNVO hinausreichende Bedeutung zukommen.

Regelung durch bauordnungsrechtliche Landesrechtsverordnung (z.B. nach Art. 80 BayBO)

Art. 80 Abs. 1 Nr. 1 BayBO ermächtigt das Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr zur Verwirklichung der in Art. 3 Abs. 1 BayBO bezeichneten Anforderungen, durch Rechtsverordnung Vorschriften zu erlassen über die nähere Bestimmung allgemeiner Anforderungen der Art. 4 bis 46 BayBO. Eine nähere Bestimmung käme insoweit u.a. auch im Hinblick auf Art. 13 Abs. 2 S. 2 BayBO in Betracht, wonach Geräusche, die von ortsfesten Einrichtungen in baulichen Anlagen oder auf Baugrundstücken ausgehen, so zu dämmen sind, dass Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen. Auf dieser Grundlage könnte das bayerische Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr aus bauordnungsrechtlichen Erwägungen die Dämmung tieffrequenten Schall erzeugender Anlagen im Wege der Rechtsverordnung konkretisieren. Von dieser Möglichkeit ist bisher in Bayern und soweit ersichtlich auch in anderen Ländern auf der Grundlage vergleichbarer Ermächtigungsgrundlagen kein Gebrauch gemacht worden.

4.4.2 Probleme und legislative Handlungsmöglichkeiten

Schutzflächen

Kernaufgabe des Bauplanungsrechts ist es, die baulichen Nutzungen von Grundstücken *räumlich* einander so zuzuordnen, dass Gefahren und Belästigungen vermieden und vermindert werden.

Deshalb tritt hier zunächst die durch § 9 Abs. 1 Nr. 24 1. Alt. BauGB und § 9 Abs. 1 Nr. 2 BauGB i.V.m. § 23 BauNVO begründete Befugnis der Städte und Gemeinden, in den Bebauungsplänen Schutzflächen und damit Abstände festzusetzen, in das Blickfeld.

Die Festsetzung eines Schutzabstands kann rechtlich auch zum Schutz vor tieffrequentem Lärm erfolgen. Doch müssen diese Abstände wegen der erheblichen Distanzen, die tieffrequenter Schall zurücklegen kann, verhältnismäßig groß sein, was der praktischen Anwendung dieser Festsetzungsmöglichkeit zum Schutz vor tieffrequenten Geräuschen praktische Grenzen setzt.

Eine solche Festsetzung kommt etwa in Betracht für einen Bebauungsplan für Windkraftanlagen. Dabei könnte eine Gemeinde sich zum Beispiel orientieren an dem Bayerischen Windkrafteerlass [56], der unter Ziff. 8.2.8 erläutert, dass bereits ab einem Abstand von 250 m von einer Windkraftanlage im Allgemeinen keine erheblichen Belästigungen durch Infraschall mehr zu erwarten sind⁴⁹.

Angesichts der in der Regel geringen Bauabstände in den Baugebieten der Bundesrepublik Deutschland dürfte die Festsetzung von Schutzflächen für den Schutz vor tieffrequentem Lärm in der Umgebung von Wohnbebauung kaum einen nennenswerten Beitrag leisten können. Hier setzt auch die Bodenschutzklausel des § 1a Abs. 2 BauGB planungsrechtliche Grenzen.

Emissions- und Immissionsgrenzwerte

„Zaunwerte“, also Emissions- oder Immissionswerte, die an der Grundstücksgrenze (am Zaun) einzuhalten sind, können nach dem geltenden Baurecht nicht festgesetzt werden. Weder § 9 Abs. 1 Nr. 24 2. Alt. BauGB⁵⁰ noch § 9 Abs. 1 Nr. 24 3. Alt. BauGB⁵¹ oder die Gebietsgliederung nach § 1 Abs. 4 Satz 1 Nr. 2 BauNVO (Roeser, in: [69] § 1 Rn. 59) geben den Städten und Gemeinden diese Befugnis. Sie ist auch zur Abwehr tieffrequenter Geräusche nicht gegeben.

Die Festsetzung von Grenzwerten für Lärm und damit auch für tieffrequente Geräusche ist ein klares und unmittelbares Mittel des Immissionsschutzes, der unbestritten auch zu den Aufgaben des Baurechts gehört. Beizutreten ist daher der Empfehlung des Arbeitskreises VIII des 5. Deutschen Baugerichtstages (2014), wonach die Festsetzungsmöglichkeiten im BauGB im Hinblick auf den Immissionsschutz erweitert werden sollten. In das BauGB sollte eine Regelung aufgenommen werden, wonach in räumlich bestimmten Gebieten das Schutzniveau des Lärmschutzes zur Konfliktbewältigung festgesetzt werden kann (vgl. [105]). Diese Regelung sollte auch die Möglichkeit eröffnen, Vorsorge gegen tieffrequente Schallimmissionen an Wohnbebauung zu treffen.

Flächenbezogene Schallleistungspegel

Flächenbezogene Schalleistungspegel sind ein anerkanntes Mittel der Geräuschkontingentierung und damit geeignet, unter Einhaltung der Grundsätze der Verhältnismäßigkeit und der Gleichbehandlung die Summierung von Lärm, der von der Nutzung mehrerer Grundstücke ausgeht, zu steuern.

Ihre Grundlage findet die Festsetzung von Schalleistungspegeln in § 1 Abs. 4 Satz 1 Nr. 2 BauNVO, der aber weder für Kleinsiedlungsgebiete (WS, § 2 BauNVO) noch für Reine Wohngebiete (WR, § 3 BauNVO) gilt.

Für Reine Wohngebiete, die – von den Bewohnern auch erwartet und gefordert – die ruhigste Wohnumgebung bieten, steht das Mittel der Festsetzung flächenbezogener Schallleistungspegel bisher nicht zur Verfügung. Das ist nachvollziehbar, weil der Gesetzgeber bisher davon ausgegangen ist, dass

⁴⁹ Der Bayerische Verwaltungsgerichtshof (Beschluss vom 10.08.2015, 22 ZB 15.1113, juris, Rn. 21, 23) stuft den Bayerischen Windkrafteerlass als „antizipiertes Sachverständigengutachten von hoher Qualität“ ein. Ihm kommt für die tatrichterliche Sachverhaltsbeurteilung damit eine sehr hohe Bedeutung zu.

⁵⁰ BVerwG, Beschluss vom 10.08.1993, 4 NB 3.94, NVwZ-RR 1994, 138; Jäde, in: [61] § 9 BauGB, Rn. 77; Mitschang/Reidt, in: [2] § 9 Rn. 144, Söfker, in: [38] § 9, Rn. 206.

⁵¹ BVerwG, Beschluss vom 10.08.1993, 4 NB 3.94, NVwZ-RR 1994, 138; Jäde, in: [61] § 9 BauGB, Rn. 77; Mitschang/Reidt, in: [2] § 9 Rn. 144, Söfker, in: [38] § 9, Rn. 206.

die restriktiven Nutzungsregeln des § 3 BauNVO die Installation erheblich lärmemittierender Anlagen in Reinen Wohngebieten ausschließen. Die Wohnnutzung, so die Grundannahme der BauNVO, ist grundsätzlich leise. Die BauNVO reflektiert insoweit bisher nicht, dass der Siegeszug der regenerativen Energien auch zu einer Dezentralisierung der Energieerzeugungsanlagen führt, die – etwa in Gestalt von Luftwärmepumpen – auch Bestandteil der Hauptnutzung „*Wohnen*“ werden.

Die BauNVO sollte deshalb dahingehend geändert werden, dass flächenbezogene Schallleistungspegel auch für Reine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete festgesetzt werden können. Auch diese Regelung sollte die Möglichkeit eröffnen, Vorsorge gegen tieffrequente Schallimmissionen an Wohnbebauung zu treffen.

Betriebszeiten

Bisher ist es nicht möglich, in Bebauungsplänen Betriebszeiten für bestimmte Anlagen festzusetzen. Insbesondere § 9 Abs. 1 Nr. 24 BauGB gewährt eine solche Befugnis nicht (Mitschang/ Reidt, in: [2] § 9 Rn. 145).

Das BauGB sollte den Gemeinden die Möglichkeit gewähren, auch Betriebszeiten zum Zweck des Lärmschutzes jedenfalls dann festzulegen, wenn sie der Auffassung ist, dass andere Festsetzungen – etwa die Festsetzung zugunsten der Nutzung von Wärmepumpen – nur bei Einhaltung bestimmter Betriebszeiten abwägungsgerecht ist. Dies könnte etwa geschehen zur Abwehr tieffrequenter Geräuschimmissionen zur Nachtzeit.

4.5 Zusammenfassung legislativer Handlungsoptionen zur Minderung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung

4.5.1 Produktbezogene Anforderungen

Die Harmonisierungsmaßnahmen der EU für Wärmepumpen [VO (EU) 813/2013] und Klimageräte [VO (EU) zu 206/2012] lassen dem nationalen Gesetzgeber in ihrem Geltungsbereich keine Möglichkeit, von den Harmonisierungsmaßnahmen abweichende und strengere Anforderungen an die geregelten Produkte zum Schutz vor tieffrequenterem Lärm zu stellen. Soweit jedoch Spielräume bestehen – etwa bei Heizgeräten mit Wärmepumpen von mehr als 70 kW oder für Wärmepumpen, die nicht der Beheizung geschlossener Räume dienen – kann der Gesetzgeber produktbezogene Anforderungen stellen. Die Bundesregierung sollte sich im Rechtsetzungsverfahren der EU darum bemühen, dass die Harmonisierungsmaßnahmen für Wärmepumpen und Klimageräte [VO (EU) 813/2013 und VO (EU) 206/2012] um eine „Öffnungsklausel“ nach dem Muster des Artikels 17 der Outdoor-Richtlinie 200/14/EG ergänzt werden. Eine solche Vorschrift würde es der Bundesrepublik erlauben, die Verwendung der betreffenden Produkte in sensiblen Gebieten zu beschränken.

4.5.2 Immissionsschutzrecht

Grundlegend ist die Normierung eines Prognoseverfahrens für tieffrequente Geräusche. Zum Schutz des Außenwohnbereichs sollten Immissionsorte und Immissionsrichtwerte für tieffrequente Geräusche außerhalb von Gebäuden definiert werden. Die Prognose der tieffrequenten Geräusche sollte Teil der Regelfallprüfung in immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren sein. Dies könnte durch eine Ergänzung von Nr. 3.2.1 und Nr. A.1.5 TA Lärm bewerkstelligt werden. Für Errichtung und Betrieb von nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen, die tieffrequente Geräusche erwarten lassen, sollte, wenn sie als genehmigungs- oder verfahrensfreie Einzelvorhaben verwirklicht werden, eine Anzeigepflicht oder ein Anmeldevorbehalt eingeführt werden.

4.5.3 Baurecht

Die Festsetzungsmöglichkeiten, die das BauGB den Gemeinden für den Bebauungsplan gewährt, sollten im Hinblick auf den Immissionsschutz erweitert werden. In das BauGB sollte eine Regelung aufgenommen werden, wonach in räumlich bestimmten Gebieten das Schutzniveau des Lärmschutzes zur Konfliktbewältigung festgesetzt werden kann. Diese Regelung sollte auch die Möglichkeit eröffnen, Vorsorge gegen tieffrequente Schallimmissionen an Wohnbebauung zutreffen. Die BauNVO sollte dahin geändert werden, dass flächenbezogene Schalleistungspegel auch für Reine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete festgesetzt werden können. Auch diese Regelung sollte die Möglichkeit eröffnen, Vorsorge gegen tieffrequente Schallimmissionen an Wohnbebauung zu treffen. Das BauGB sollte den Gemeinden die Möglichkeit gewähren, in den Bebauungsplänen auch Betriebszeiten zum Zweck des Lärmschutzes festzulegen.

5 Modellbetrachtung

5.1 Aufgabenstellung

Es werden drei verschiedene Musterwohnbaugebiete erstellt. Relevante tieffrequente Geräuschquellen werden entsprechend der realen Verbreitung in Deutschland in den Musterwohnbaugebieten verteilt. Ausgehend von dieser Bestandssituation wird jeweils eine zukünftige Verteilung der Quellen in den Musterwohnbaugebieten festgelegt. Diese Annahme trägt der zunehmenden Verbreitung tieffrequenter Geräuschquellen Sorge. Die Belastung der Musterwohnbaugebiete durch tieffrequente Geräusche im Bestand und in Zukunft wird mithilfe von Programmen zur Schallausbreitung [60], [101] berechnet und nach der gesetzlichen Grundlage beurteilt.

5.2 Methodik

In der Modellbetrachtung wird von realitätsnahen Modellen auf die Allgemeinheit geschlossen. Beurteilungsgrundlage sind anerkannte und erprobte Berechnungs- und Beurteilungsverfahren.

Die Erstellung dreier in ihrer Art der baulichen Nutzung unterschiedlichen Wohngebiete bildet die Ausgangslage. Die Musterwohnbaugebiete orientieren sich an den folgenden Baugebietstypen gemäß Baunutzungsverordnung (BauNVO) [111]: reines Wohngebiet (WR), allgemeines Wohngebiet (WA) und Dorfgebiet (MD). In diese Musterwohnbaugebiete werden tieffrequente Geräuschquellen innerhalb bzw. in der Nähe der Baugebiete platziert. Als Randbedingung werden hierbei sowohl kleinräumige Konfliktpotentiale in der unmittelbaren Nachbarschaft als auch die zunehmende Verlärmung ganzer Baugebiete im künftigen Entwicklungsszenario berücksichtigt. Ausgehend von einer Bestandssituation im Bezugsjahr 2014 mit relativ geringer Quellenanzahl wird für jedes Modellgebiet auch ein Entwicklungsszenario für das Jahr 2030 mit erhöhter Quellenzahl erstellt. Grundannahmen sind dabei folgende:

- ▶ Der Einsatz tieffrequenter Geräuschquellen nimmt in der Umgebung von Wohnbebauung zu.
- ▶ Die Geräuschemissionen der Geräuschquellen ist statistisch gemittelt bekannt (vgl. Anhang 7).
- ▶ Die Geräuschezusammensetzung der Geräuschquellen ändert sich gegenüber dem heutigen Stand nicht wesentlich. Vor allem gibt es keine frequenzselektive Lärminderung.
- ▶ Der Stand der Technik und der rechtliche Rahmen bestehen in Zukunft unverändert fort.
- ▶ Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sind nicht bekannt und tragen nicht zu einer Sensibilisierung bzw. Verbesserung bei.

Die Geräuschquellen werden mit den für ihre Technologiegruppe repräsentativen Emissionsspektren in Terzbandbreite von 25 Hz bis 8 kHz modelliert. Dies ist notwendig, da die Geräuschemissionen der gewählten Anlagen immer auch mittel- und hochfrequente Geräuschanteile enthalten. Neben den Frequenzspektren werden als Indikatoren auch die A-bewerteten Beurteilungspegel betrachtet. Diese sind erforderlich für die Beurteilung nach TA Lärm [1] (vergleiche Abschnitt 4). Die Methodik geht von der Einhaltung der derzeitigen Rechtslage aus. Deshalb werden in den Musterwohnbaugebieten die rechtlich zulässigen Außenlärmpegel der TA Lärm nicht überschritten. Außer Acht gelassen werden im Modell alle Formen des passiven Lärmschutzes, zum Beispiel nicht offenbare Fenster oder Vorhangfassaden, sogenannte „zweite Gebäudehüllen“. Diese Konzepte würden das Konfliktpotential für Belästigungen durch tieffrequente Geräusche erhöhen (geringe Dämmung der Außenbauteile bei gleichzeitig starker Erhöhung durch Raumresonanzen, Verlärmung über Fenster von Nicht-Aufenthaltsräumen), können jedoch nicht verallgemeinert werden.

Die Ausbreitung von tieffrequenten Geräuschen wird in allen Szenarien entsprechend zweier geometrischer Modelle berechnet und verglichen. Aus dem Vergleich der flächenhaften Berechnungen (Rastertlärnkarten) werden die Ergebnisse gesichtet und allgemeingültige Zusammenhänge identifiziert.

Es wird zum einen die generelle Geräuscentwicklung und zum anderen die Zunahme von tieffrequenten Geräuschen von 25 Hz bis 100 Hz abgebildet. Da numerische Ausbreitungsmodelle besonders im tieffrequenten Bereich vorteilhaft erscheinen, werden auch solche Verfahren an den Musterwohnbaugebieten erprobt. Die Bewertung der Belästigungswirkung der tieffrequenten Geräusche erfolgt anhand der Vorgaben nach DIN 45680 [27] in Verbindung mit dem Beiblatt 1 zur DIN 45680 [28].

Im Ergebnis wird eingeschätzt, inwiefern sich die verschiedenen Berechnungsmodelle eignen und welche Aussagen die Modellbetrachtung zur Belastung durch tieffrequente Geräusche zulässt.

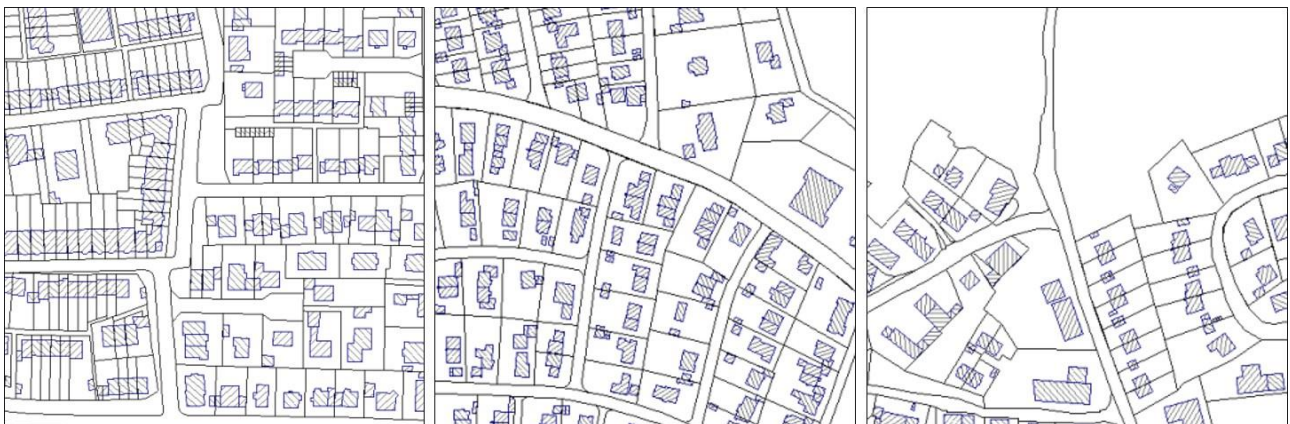
5.3 Erstellung der Musterwohnbaugebiete

5.3.1 Gebietserstellung für geometrische Ausbreitungsmodelle

Musterwohnbaugebiete können methodisch nur eine Annäherung und Verallgemeinerung von Wohngebietssituationen und -entwicklungen darstellen. In der Realität kann eine Vielzahl von Gegebenheiten des Einzelfalls auftreten, die mit diesem allgemeinen Ansatz nicht erfasst werden können.

Die drei Musterwohngebiete wurden unter Berücksichtigung typischer Gebäude- und Siedlungsstrukturen für reine Wohngebiete, allgemeine Wohngebiete und Dorfgebiete gemäß BauNVO [111] als digitale Kartenmodelle erstellt. In einem ersten Schritt wurden zu diesem Zweck Teilstücke der jeweiligen Baugebiete aus real existierenden digitalen Flur- bzw. Gebäudekarten in und um München ausgewählt. Mittels Drehung, Spiegelung und Verschiebung von einzelnen Gebäuden und zusammenhängenden Gebäudeensembles sowie dem Entwurf von Flurgrundstücken wurden neue Musterwohngebiete auf ebenem Gelände erarbeitet. Dies soll die gewachsenen Siedlungsstrukturen repräsentieren, aber dabei eventuelle Ähnlichkeiten zu realen Wohnbaugebieten verhindern. In Abbildung 44 sind Ausschnitte der erstellten Musterwohnbaugebiete dargestellt. Die Siedlungsstrukturen und Gebäudetypen sind für das jeweilige Baugebiet charakteristisch. Die kompletten Lagepläne der drei Musterwohngebiete sind in Anhang 1 dargestellt. Daten zur Gebäudeanzahl und Fläche der modellierten Baugebiete sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Abbildung 44: Ausschnitte der Musterwohnbaugebiete für ein reines Wohngebiet (WR), ein allgemeines Wohngebiet (WA) und ein Dorfgebiet (MD) (v.l.n.r.)



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Tabelle 6: Daten zu den Musterwohnbaugebieten im Modell

Modellparameter	WR	WA	MD
Anzahl Hauptgebäude [Stk.]	379	450	222
Anzahl Nebengebäude [Stk.]	224	553	177
Aufsummierte Fläche der Flurstücke [km ²]	ca. 0,23	ca. 0,4	ca. 0,23

Die exklusive Anwendung der DIN ISO 9613-2 [35] in den Musterwohnbaugebieten wäre zu wenig aufschlussreich. Im Zuge der Grundlagenrecherche zur Schallausbreitung ergaben sich folgende Mängel:

- ▶ Keine Berücksichtigung von tieffrequenten Geräuschen unterhalb von 63 Hz in den Oktavband-Algorithmen zur Dämpfungsermittlung
- ▶ Schallausbreitungsberechnung nur für bodennahe Schallquellen geeignet
- ▶ Keine explizite Berücksichtigung des Geländeverlaufs bei frequenzabhängiger Berechnung
- ▶ Ausbreitungsberechnung nur bis zu einem Abstand von 1 km definiert

Deshalb wurde die Schallausbreitung in den Musterwohnbaugebieten auch mit dem Verfahren Nord2000 [21], [22] berechnet. Um die Unterschiede der Verfahren zu verdeutlichen, werden in Beispielberechnungen die unbewerteten Schalldruckpegel beider Varianten an einem Immissionsort verglichen. Tabelle 7 zeigt die hierfür in den Voreinstellungen gewählten Umgebungsparameter.

Tabelle 7: Gewählte Umgebungsparameter für die Ausbreitungsberechnung in den Modellgebieten nach DIN ISO 9613-2 und Nord2000

Modellparameter	DIN ISO 9613-2	Nord2000
Temperatur [°C]	10	10
Relative Luftfeuchte [%]	70	70
Luftdruck [mbar]	1013,3	1013,3
Windgeschwindigkeit [m/s]	-	5
Bodenfaktor G	0	-
Strömungswiderstand [kNsm ⁻⁴]	-	20000
Rauigkeit [m]	-	+/- 1
Meteorologische Korrektur C_{met} [dB]	0	-

5.3.2 Gebietserstellung für numerische Ausbreitungsmodelle

5.3.2.1 Modellerstellung mit Finite Element Method FEM

Die Berechnung mit der Finite Elemente Methode FEM hängt von der Größe des Gebietes und der zu betrachtenden Frequenz ab. Im ersten Ansatz wurde ein einfaches Modell erstellt, um die Grenzen der Berechnungsmöglichkeiten im Freifeld einschätzen zu können. Der Ansatz beinhaltet eine Schallquelle, die sich auf 1 m Höhe in einem Abstand von 50 m zu einem Quader ($h=10\text{m}/b=20\text{m}/t=20\text{m}$) befindet. Die Randbedingungen des Bodens und der Wände des Quaders sind schallhart. Als Medium wurde Luft unter Normbedingungen angenommen. Das gesamte Gebiet für die Berechnung umfasst ein Volumen von $1125 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ ($h=50\text{m}/b=150\text{m}/t=150\text{m}$). Bis zu einer Frequenz von 25 Hz kann hierbei das Schallfeld mit den Möglichkeiten eines Desktoprechners (CPU mit 3,6 GHz und 8 GB RAM) berechnet werden. Die Elementanzahl des Gebietes beträgt bei 25 Hz ca. 10^6 . Eine Berechnung des Schallfeldes bis 100 Hz erfordert eine Elementanzahl von ca. 10^7 bis 10^8 , wodurch bereits in diesem einfachen Beispiel ein Rechencluster notwendig ist. Aufgrund der steigenden Elementzahl und Rechenzeit bei Freifeldmodellen mit größer werdender Fläche ist die FEM für Schallausbreitungsberechnungen bei Fre-

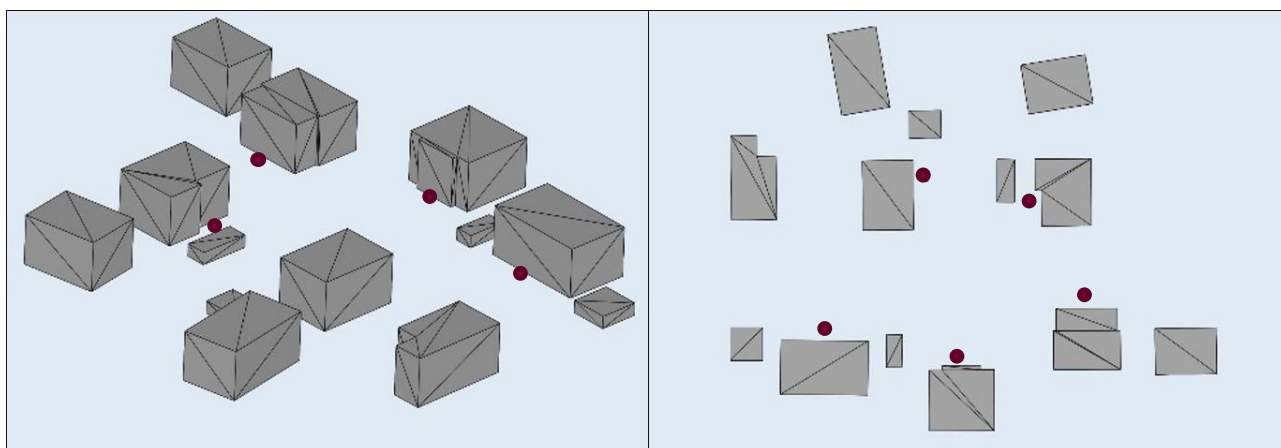
quenzen von mehr als 40 Hz derzeit nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand möglich. Finite-Elemente-Modelle sind zwar zur Berechnung von Schallfeldern innerhalb von Räumen geeignet. Für die gewünschte Betrachtung der Schallausbreitung im Freien ist die FEM jedoch ungeeignet.

5.3.2.2 Modellerstellung mit Boundary Element Method BEM

Für Außenbereiche sind Modelle mit detaillierteren Elementen in größerer Skala erforderlich. Dafür bietet sich die Randelementmethode BEM mit geringeren Element- bzw. Knotenzahlen an. Es muss hier nicht das gesamte Gebiet vernetzt, sondern nur die Randelemente der Domäne bestimmt werden.

Im Gegensatz zur Finite Elemente Methode werden in der BEM keine Volumenkörper, sondern lediglich Randfeldoberflächen diskretisiert und gelöst. So können mit diesem Verfahren bereits kleinere Wohnsituationen betrachtet werden. Der Rechenaufwand hängt dabei hauptsächlich vom Grad der Netzgenerierung für das Modell ab. Die Untersuchungen ergaben, dass eine Modellgröße von ca. 100 x 100 m² und eine Netzkantenlänge von ca. 1,5 m für Frequenzen bis ca. 100 Hz auf gewöhnlichen Desktoprechnern realisierbar ist. Abbildung 45 zeigt ein solches Modellgebiet. In dem Gebiet befinden sich fünf Luftwärmepumpen in Außenaufstellung, die als Punktschallquellen modelliert wurden.

Abbildung 45: Ansichten des BEM-Modells eines Teilwohngebiets



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

5.4 Implementierung tieffrequenter Geräuschquellen

Vier der im Kapitel 3.2 als relevant eingeschätzten Geräuschquellenarten werden im Modell platziert. Für jede dieser Geräuschquellenarten existieren in der Realität unterschiedliche Anlagentypen. Ausgehend von statistisch gemittelten Schallspektren (vergleiche Anhang 7) wurden einheitliche Modellparameter der jeweiligen Geräuschquellenart gewählt (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Daten zu den Geräuschquellen im Modell

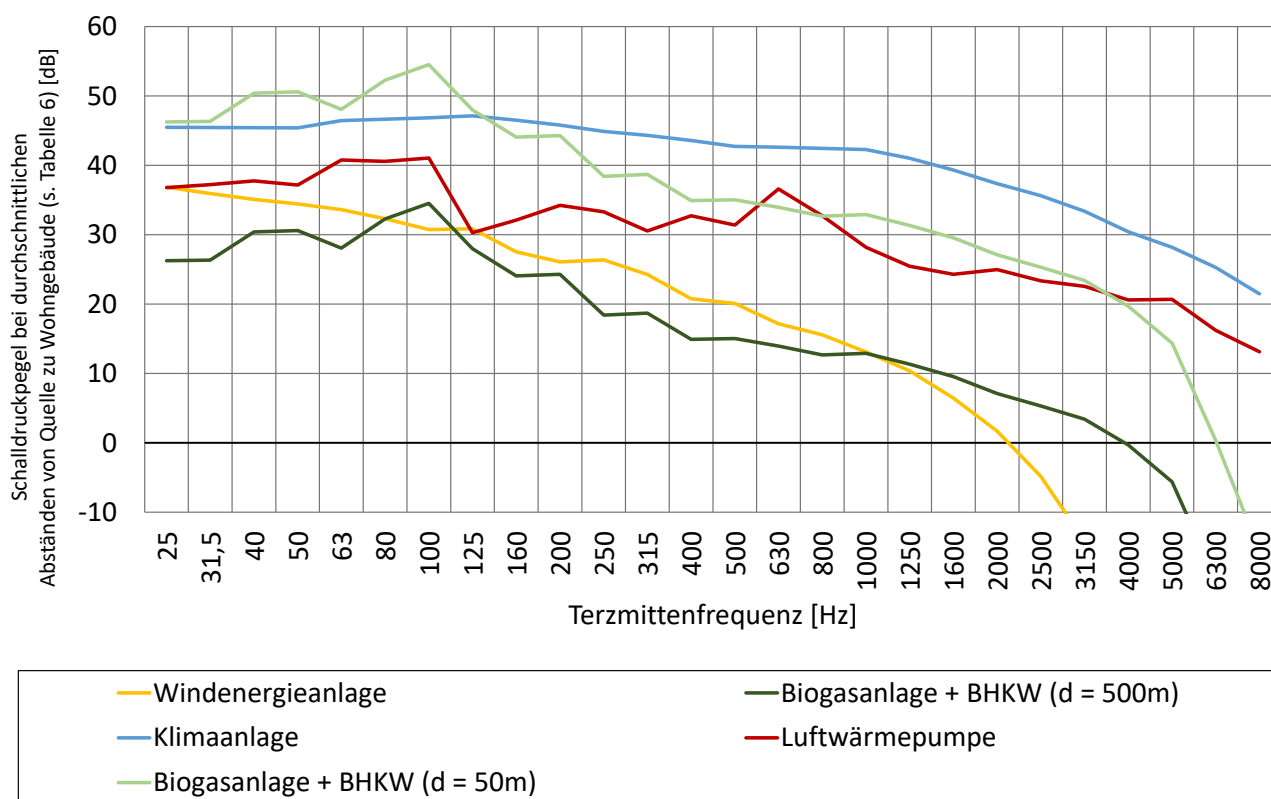
Geräuschquelle	Schallquellenart	Rel. Höhe	Mittlere Abstände zum Wohngebiet
BHKW	Punktschallquelle	1,0 m	50 m (MD); 550 m (WR + WA)
Klimaanlage	Punktschallquelle	1,0 m	2 m
Luftwärmepumpe	Punktschallquelle	0,5 m	4 m
Windenergieanlage	Punktschallquelle	137,0 m	1000 m

Im Modell wird angenommen, dass die Geräuschquellen unabhängig vom Baugebiet entsprechend dem Stand der Technik verteilt sind. Deshalb wird in allen Musterbaugebieten mit den gleichen Anlagen und Geräuschemissionen gerechnet. Im Modell werden die Anforderungen an Geräuschimmissionen entsprechend TA Lärm [1] nicht überschritten. Da diese Anforderungen in den Baugebieten mit der Häufigkeit erlaubter Wohnbebauung steigen, ergeben sich im Modell Spielräume für die Häufigkeit und die konkrete Anordnung der Geräuschquellen. Die Schallleistungspegel der Geräuschquellen variieren genauso wie die Frequenzbereiche, in denen die Schalldruckpegel der tieffrequenten Geräusche am ausgeprägtesten sind. Tabelle 9 zeigt diese Unterschiede. Abbildung 46 zeigt die Unterschiede im Frequenzbereich detaillierter. In der Abbildung sind die normierten linearen Terz-Schalldruckpegelspektren der Geräuschimmissionen zu erkennen. Die Dämpfungsparameter für Ausbreitung, Atmosphäre und Boden nach DIN ISO 9613-2 [35] mit den gewählten Modellparametern (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9) wurden berücksichtigt. Die Darstellung verdeutlicht die spektralen Unterschiede tieffrequenter Geräuschquellen, wie sie in der Umgebung von Wohnbebauung im Modell auftreten.

Tabelle 9: Schallleistungspegel der Geräuschquellen

Geräuschquelle	Schallleistungspegel in dB	Maßgebliche tieffrequente Geräuschanteile
BHKW	88	80 Hz – 100 Hz
Klimageräte	65	63 Hz – 100 Hz
Luftwärmepumpe	65	63 Hz – 100 Hz
Windenergieanlage	100	25 Hz – 80 Hz

Abbildung 46: Auf mittlere Abstände normierte Geräuschimmissionsspektren an Wohngebäuden



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Tabelle 10 zeigt die Zahl tieffrequenter Geräuschquellen in den jeweiligen Musterwohnbaugebieten. Die Anzahl der Klimageräte wurde aus den Prognosezahlen zu Klimageräten in Deutschland abgeleitet [87]. Die Anzahl der Luftwärmepumpen wurde anhand der „BWP-Branchenstudie 2015“ [14] berechnet. Die Hintergründe für die jeweiligen Annahmen finden sich im Abschnitt 6.1.2 dieses Berichts. Die Anzahl der übrigen Schallquellen wurde so gewählt, dass sich in den Musterwohnbaugebieten keine unzulässigen Geräuschimmissionen aufgrund des Beurteilungspegels der TA Lärm [1] ergeben.

Tabelle 10: Anzahl der Geräuschquellen in den Musterwohnbaugebieten

Geräuschquelle	Reines Wohngebiet		Allgemeines Wohngebiet		Dorfgebiet	
	2014	2030	2014	2030	2014	2030
BHKW	0	1	0	1	1	2
Klimagerät	16	18	19	21	10	11
Luftwärmepumpe	11	31	13	36	6	18
Windenergieanlage	0	0	0	1	1	2

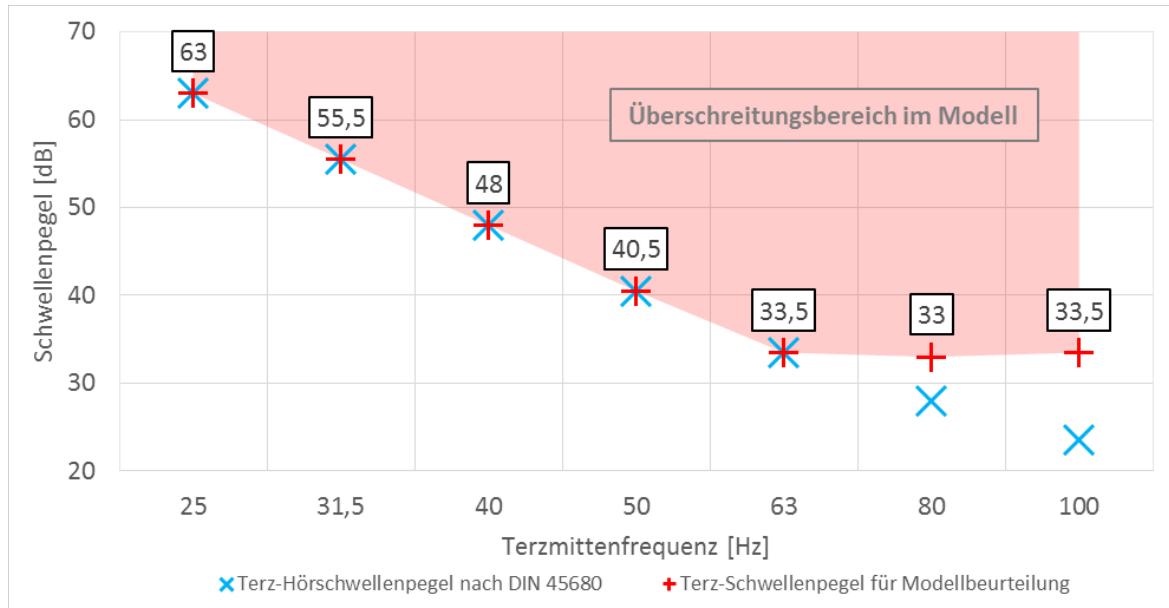
5.5 Modellbeurteilung der Belastung durch tieffrequente Geräusche

In den berechneten Modellen soll erkennbar sein, falls ein tieffrequenter Schwellenwert überschritten wird. Damit soll das Potential für Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen verdeutlicht werden. Der hierfür verwendete Schwellenwert wurde nach DIN 45680 [27] und dem Beiblatt 1 zu DIN 45680 [28] festgelegt. Dafür wurde der jeweils in der Norm definierte Terz-Hörschwellenpegel mit dem zugehörigen im Beiblatt definierten Anhaltswert für deutlich hervortretende Einzeltöne in Nachtstunden beaufschlagt. Das bedeutet, dass im Modell die Hörschwellenwerte der DIN 45680 im Freien überschritten werden müssen, um als „Konfliktbereich“ gekennzeichnet zu werden. In den Terzen mit den Mittelfrequenzen 80 Hz und 100 Hz sind deshalb im Modell um 5 dB bzw. 10 dB höhere Werte als die Hörschwelle selbst als Konfliktbereichsschwelle festgelegt.

Die Anhaltswerte des Beiblatts 1 zur DIN 45680 gelten ausschließlich zur Bewertung von tieffrequenten Geräuschen innerhalb von geschlossenen Aufenthaltsräumen. Es existiert derzeit in Deutschland kein Beurteilungsverfahren für tieffrequente Geräusche im Freien. Auftragsgemäß wurden im Rahmen dieser Arbeit keine neuen Erkenntnisse über tieffrequente Lärmwirkungen erforscht. Deshalb wurde auf die vorhandenen Beurteilungsgrundlagen zurückgegriffen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Wohngebäude bisher in der Regel ohne Anforderungen an die Schalldämmung von Außenbauteilen gegen tieffrequente Geräusche errichtet wurden. Wie Abschnitt 2.4 zeigt, kann deshalb nicht mit einer Dämmung der Geräusche im tiefen Frequenzbereich gerechnet werden. Aus diesem Grund ist die Modellannahme vertretbar, dass potentielle Konflikte durch tieffrequente Geräusche im Innenraum auch bei Überschreitung der vorgenannten Schwellenwerte im Freien zumindest nicht mehr ausgeschlossen werden können.

Abbildung 47 zeigt die Werte für die Terz-Hörschwellenpegel gemäß DIN 45680 sowie den Überschreitungsbereich dieser Modellrechnung. In den Konfliktdarstellungen in den Musterwohnbaugebieten werden Überschreitungen farblich gekennzeichnet.

Abbildung 47: Überschreibungsbereich im Modell. Freiflächen, in denen die Hörschwelle nach DIN 45680 mit Zuschlag der Anhaltswerte des Beiblatts 1 zur DIN 45680 (rote Kreuze) überschritten werden, werden in den Konfliktkarten (siehe Anhang 3) rot gekennzeichnet.



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

5.6 Ergebnisse und Diskussion

5.6.1 Geometrische Ausbreitungsmodelle

Die geometrische Schallausbreitung im Freien in den Musterwohnbaugebieten wurde mit SOUNDPLAN [101] berechnet. Dabei wurde von einem Dauerbetrieb der in den Modellen eingesetzten Geräuschquellen ausgegangen. Die Schallausbreitung wurde jeweils für die Bestandssituation in 2014 und als Prognose für 2030 berechnet. Lärmkarten mit A-bewerteten Beurteilungspegeln nach dem Verfahren mit DIN ISO 9613-2 [35] liefern einen ersten Überblick der Geräuscentwicklung in den Musterwohnbaugebieten (siehe Anhang 2). Zur detaillierten Beurteilung des Belastungspotentials durch tieffrequente Geräusche wurden mit dem Verfahren nach Nord2000 [21] spezielle Konfliktkarten mit linearen (nicht A-bewerteten) Terz-Beurteilungspegeln für die Terzmittenfrequenzen von 25 Hz bis 100 Hz erstellt. Anhang 3 zeigt potentielle Konfliktbereiche in den Musterwohnbaugebieten als rote Flächen.

Es wurde davon ausgegangen, dass in der Umgebung von Wohnbebauungen auch zukünftig die Maßstäbe der TA Lärm [1] für A-bewertete Beurteilungspegel eingehalten werden. Für die Modellrechnungen wurden deshalb tieffrequente Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung nur dann betrachtet, wenn durch deren A-bewertete Summenschallpegel (Beurteilungspegel) die Immissionsrichtwerte der jeweiligen baulichen Nutzungsart gemäß TA Lärm nicht überschritten wurden. Entsprechend der Gebietsnutzung durften deshalb in den Musterwohnbaugebieten im Nachtzeitraum Beurteilungspegel im reinen Wohngebiet von bis zu 35 dB(A), im allgemeinen Wohngebiet von bis zu 40 dB(A) und im Dorfgebiet von bis zu 45 dB(A) auftreten. Anhang 2 zeigt, dass dieses Kriterium sowohl in den Bestandsszenarien, als auch in den Entwicklungsszenarien eingehalten wird. Durch die A-bewerteten Geräuschimmissionspegel ist darin nicht zu erkennen, an welcher Stelle in der Umgebung der Wohnbebauungen kritische tieffrequente Geräusche auftreten würden.

Durch die Modellbeurteilung (siehe Anhang 3) ist zu erkennen, dass trotz Einhaltung der grundlegenden Lärmschutzvorschriften bereits im Bestand (2014) ein nicht zu vernachlässigendes Konfliktpoten-

tial durch tieffrequente Geräusche bestehen bzw. in Zukunft (2030) verstärkt auftreten kann. Die Zunahme von Konfliktpotentialen durch tieffrequente Geräusche der gewählten Geräuschquellen ist in den Prognosefällen vor allem in den Terzmittenfrequenzen von 50 Hz bis 100 Hz zu erwarten. Geräusche in den Frequenzen unter 40 Hz weisen in den Modellrechnungen praktisch kein Konfliktpotential mehr auf. Der Infraschallbereich kleiner 20 Hz wurde im Rechenmodell nicht berücksichtigt. Aussagen zum Konfliktpotential von Infraschall sind deshalb im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich.

Stationäre Geräte wie Klimageräte und Luftwärmepumpen verteilen tieffrequente Geräusche innerhalb der Musterwohnbaugebiete. Sie können somit eher örtlich begrenzte Konflikte zwischen Nachbarn (je nach Anordnung auf einem bis acht Grundstücken) verursachen. Große technische Anlagen wie Blockheizkraftwerke und Windenergieanlagen können laut der Berechnungen dahingegen von außen bei einer Vielzahl von Wohngebäuden bzw. Betroffenen (je nach Musterwohnbaugebiet auf 50 bis 200 Grundstücken) potentiell Konflikte durch tieffrequente Geräusche verursachen.

Das Ausmaß der potentiellen Konflikte durch tieffrequente Geräusche ist auch abhängig von der baulichen Nutzung eines Gebiets. So sind in Dorfgebieten höhere Immissionsrichtwerte als in Wohngebieten zulässig. Zudem werden größere Anlagen zur Energieerzeugung vermehrt im ländlichen Raum errichtet und betrieben. Deshalb ist hier ein Anstieg an tieffrequenten Geräuschimmissionen durch größere Anlagen zu erwarten. (siehe Anhang 3).

Methodisch ist zu erwähnen, dass mit dem Nord2000-Verfahren [21], [22] geringere Dämpfungen des Schalls im tieffrequenten Bereich berechnet werden als mit dem Verfahren der DIN ISO 9613-2 [35]. Dies zeigen die Vergleichsrechnungen im Anhang 5. Es ist deshalb fraglich, ob und inwiefern die DIN ISO 9613-2 zur Ermittlung der Schallausbreitung für tieffrequente Geräusche geeignet ist. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren Nord2000 für tiefere Frequenzen anwendbar ist. In der TA Lärm [1] wird zur Berechnung der Schallausbreitung jedoch auf die DIN ISO 9613-2 verwiesen. Diese Norm ist deshalb im Grunde das einzige Berechnungsverfahren, welches auch offiziell in Prognose- bzw. Streitfällen anerkannt wird. Die Anpassung des Berechnungsverfahrens in der Norm im tieffrequenten Bereich ist daher empfehlenswert.

Grundsätzlich besteht demnach erweiterter Forschungsbedarf zu den Rechenmodellen für die Ausbreitung von tieffrequenten Geräuschen. Im Detail sollten dabei die Terzmittenfrequenzen unterhalb von 63 Hz berücksichtigt werden. Zudem sollten Geländeverläufe in die frequenzabhängigen Berechnungsalgorithmen integriert werden. Schließlich ist allgemein zu prüfen, ob die Rechenmodelle für hochliegende Schallquellen adäquat sind.

Im Modell wurden tieffrequente Geräusche im Freien in der Umgebung von Wohnbebauung berechnet. Dort können sie vermutlich zu Belästigungen führen. Dafür existiert derzeit jedoch kein Beurteilungsverfahren. Deshalb wurde hilfsweise das Innenraum-Beurteilungsverfahren der DIN 45680 [27] angewandt. Eine Erweiterung der DIN 45680 um ein Beurteilungsverfahren für tieffrequente Geräusche im Freien ist folglich wünschenswert.

Es ist derzeit normativ nicht möglich, tieffrequente Geräusche im Innenraum zu prognostizieren. Im Modell wurde die Annahme getroffen, dass tieffrequente Geräusche durch Gebäudeteile oder Raumeinflüsse nicht verändert werden. Dies mag für bestimmte Frequenzgruppen der Fall sein. Im Gesamten ist jedoch davon auszugehen, dass Gebäudebauteile und Raumgeometrien das Verhalten tieffrequenter Geräusche durchaus beeinflussen. Es ist deshalb empfohlen, ein Prognoseverfahren für die Übertragung tieffrequenter Geräusche vom Freien in Innenräume zu entwickeln.

Es war nicht Teil dieser Untersuchung die Wirkungsgrundlagen der DIN 45680 [27] zu bewerten oder in Frage zu stellen. Bei der Beurteilung tieffrequenter Geräusche im Freien ist jedoch zu vermuten, dass das Beurteilungsverfahren in einigen Fällen zu Fehleinschätzungen der Belästigungswirkung kommen kann. Die Überprüfung des Verfahrens ist deshalb ratsam.

5.6.2 Numerische Ausbreitungsmodelle

Die Boundary Element Method (BEM) und Finite Elemente Methode (FEM) sind grundsätzlich geeignet, um genaue akustische Analysen auch im tieffrequenten Bereich durchzuführen [90]. Sie wurden daher in der vorliegenden Studie in Beispielen angewandt. Bisher nicht validierte numerische Verfahren wie Parabolic Equation (PE) [53], Fast Field Program (FFP) [36] und Finite Difference Time Domain (FDTD) [109] wurden nicht benutzt.

Mithilfe der FEM können Raummoden, Raumresonanzen usw. für kleinere bis mittelgroße Räume adäquat ermittelt werden. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 25 im Grundlagenteil dieses Berichts. Probemodellierungen zeigen jedoch, dass die FEM für die Berechnung der Schallausbreitung im Freien nicht geeignet ist. Deshalb wurde darauf im Weiteren verzichtet.

Durch die Berechnung mit der BEM konnte ein (räumlich relativ begrenztes) Schallfeld im tieffrequenten Bereich visualisiert werden. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der geometrischen Schallfeldberechnung werden die verschiedenen Frequenzen als unterschiedliche Wellenfelder für den stationären Zustand sichtbar. Anhang 4 zeigt das Ergebnis der numerischen Schallfeldsimulation mit der BEM für einen Frequenzbereich von 10 Hz bis 63 Hz. Die physikalischen Welleneigenschaften werden in diesem Berechnungsverfahren detailliert berücksichtigt. Deshalb können beispielsweise Summationswirkungen oder Abschirmungseffekte besser aufgelöst und dargestellt werden als bei geometrischen Verfahren. In den Diagrammen sind deshalb stehende Wellen, Beugungs-, Abschirm- und Reflexionseffekte erkennbar. Daraus ist zu vermuten, dass Belastungen durch tieffrequente Geräusche auch an Orten entstehen können, an denen sie durch geometrische Modelle nicht berechnet werden können.

Die numerischen Schallausbreitungsrechnungen sind im tiefen Frequenzbereich exakter als geometrische Verfahren. Die hohe Genauigkeit kann dahingegen nur mit einem hohen Rechenaufwand erreicht werden. So steigt die Rechendauer für numerische Schallfeldsimulationen mit zunehmender Größe des Untersuchungsgebietes stark an. Deshalb sind diese Verfahren häufig keine geeignete Alternative zur Bestimmung großräumiger Geräuschimmissionsprognosen. Um alltagstaugliche Simulationen mit numerischen Methoden im tieffrequenten Bereich durchführen zu können, wären genormte Randbedingungen und Simulationsparameter erforderlich. Da diese Ausgangsdaten derzeit fehlen, können lediglich begrenzte Wohnumgebungen abgebildet und der Realität angenähert werden.

Die Unterschiede zwischen geometrischen und numerischen Modellen wurden verdeutlicht. Dazu wurde die Schallausbreitung in jeweils derselben Wohnumgebung nach den drei Verfahren DIN ISO 9613-2 [35], Nord2000 [21] und BEM berechnet. Die modellierte Wohnumgebung soll ein Teilwohnbaugebiet mit einer Flächengröße von $90 \times 90 \text{ m}^2$ bei der Einwirkung von vier Luftwärmepumpen bei einer Terzmittenfrequenz von 50 Hz repräsentieren. Anhang 5 zeigt die entstandenen Lärmkarten für jeweils dieselbe Wohnumgebung. Der Vergleich der Rechenmodelle zeigt, dass das numerische Verfahren eine höhere Genauigkeit des Schallfeldes erreicht und dass die numerischen Ergebnisse mit dem modifizierten Verfahren der Nord2000 besser angenähert werden können als mit der Berechnungsmethode der DIN ISO 9613-2. Ein Prognoseverfahren für tieffrequente Geräusche sollte deshalb gegebenenfalls durch eine Modifizierung von Nord2000 und nicht auf Grundlage der DIN ISO 9613-2 konzipiert werden. Durch die vorliegenden Erkenntnisse scheint es möglich und sinnvoll, geometrische Rechenmodelle in standardisierten Situationen durch FEM-/BEM-berechnete Reflexions- und Ausbreitungsparameter zu ergänzen.

6 Einschätzung der Situation in Deutschland

6.1 Methodik

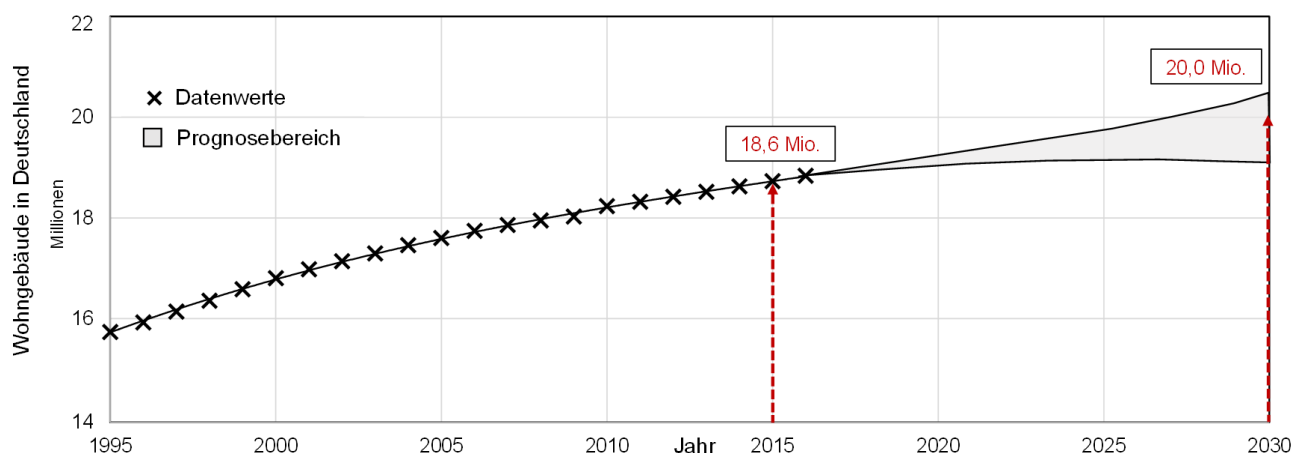
Es soll im Folgenden eingeschätzt werden, wie hoch das Potential für Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen in der Umgebung von Wohngebäuden tatsächlich ist. Es besteht eine überschlägige Kenntnis über die Bestandszahl sowie Verkaufsprognosen von stationären Geräten wie Luftwärmepumpen und Klimageräten in Deutschland. Es ist allgemein nicht bekannt, wo genau die stationären Geräte betrieben werden. Die Belastung durch tieffrequente Geräusche in ruhigen Gebieten bei geringem Umgebungslärm ist ebenfalls unbekannt. Die Modellbetrachtung (siehe Abschnitt 5) zeigt zunächst, dass vom zunehmenden Einsatz von stationären Geräten in den Musterwohnbaugebieten ein erhöhtes Konfliktpotenzial durch tieffrequente Geräusche ausgehen kann. Methodisch werden also die Erkenntnisse aus der Modellbetrachtung auf die reale Gesamtsituation in Deutschland hochgerechnet. Für das Jahr 2014 lagen Angaben zu allen Untersuchungspunkten vor, deshalb wird dies als Vergleichsjahr herangezogen. Als Prognosehorizont wird das Jahr 2030 festgelegt. Es liegen folgende Annahmen zugrunde:

- 1) Grundsätzlich kann jede Bürgerin und jeder Bürger von tieffrequenten Geräuschen im Wohnumfeld betroffen sein. Ausgangsgröße ist deshalb die Bevölkerungszahl in Deutschland.
- 2) Jedes Wohngebäude in Deutschland ist grundsätzlich ein möglicher Emittent tieffrequenter Geräusche durch die Errichtung und den Betrieb von stationären Anlagen.
- 3) Geräuschemissionen von Windenergieanlagen und Blockheizkraftwerken werden immissionsschutzrechtlich als Anlagenlärm beurteilt und durchlaufen grundsätzlich ein entsprechendes Genehmigungsverfahren. Daher wird für diese Anlagen kein offener Konflikt angenommen.
- 4) Maßgebender Emittent tieffrequenter Geräusche im Wohnumfeld sind stationäre Anlagen wie Luftwärmepumpen, Klima- und Kühlgeräte (vgl. Kapitel 3.2).
- 5) Das ermittelte Konfliktpotenzial wird dort wirksam, wo der Umgebungslärm besonders gering ist. Dadurch wird keine relevante Überdeckung durch Hörschall erwartet.

6.1.1 Bevölkerungszahl und Wohngebäude

Zum Jahresende 2014 betrug die Bevölkerungszahl in Deutschland etwa 81,2 Mio. Menschen [102]. Ebenfalls zu diesem Zeitpunkt gab es in Deutschland etwa 18,6 Mio. Wohngebäude mit 39,8 Mio. Wohnungen [104]. Im Jahr 2030 werden ca. 20 Mio. Wohngebäude in Deutschland errichtet sein (siehe Abbildung 48) und die Bevölkerungszahl wird entsprechend der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung für Deutschland des Statistischen Bundesamtes auf ca. 79,2 Mio. abnehmen [103].

Abbildung 48: Anzahl der Wohngebäude in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

6.1.2 Häufigkeit stationärer Anlagen im Wohnumfeld

Zumindest seit dem Jahr 2005 werden Wärmepumpen mit einem Anteil von 97 % überwiegend in Wohngebäuden installiert. Der Anteil von Wärmepumpen an Wärmeerzeugern betrug in Deutschland laut der „BWP-Branchenstudie 2015“ [14] 2,8 % im Jahr 2014 und wird auf 8,1 % im Jahr 2030 geschätzt. Die Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes für das Bezugsjahr 2014 [6] ergab eine Gesamtzahl von ca. 0,56 Mio. Wärmepumpen im Bestand für Deutschland, wovon etwa 0,26 Mio. Wärmepumpen der Kategorie Luftwärmepumpen zuzurechnen sind. Dies entspricht einem prognostizierten Bestand von etwa 1,62 Mio. Wärmepumpen. Die Anzahl an Wärmepumpen wird sich in Deutschland somit in etwa verdreifachen. Geht man aufgrund der in den letzten Jahren gestiegenen Absatzzahlen für Luftwärmepumpen von einem Anteil an Luftwärmepumpen von 50 % im Prognosejahr aus, muss in Deutschland mit einem Bestand von 0,81 Mio. Luftwärmepumpen im Jahr 2030 gerechnet werden. Der Anteil an Klimageräten an Wohngebäuden wurde in einer europäischen Studie [87] im Jahr 2014 mit 4,0 % mit einer Zunahme bis zum Jahr 2030 auf 4,7 % geschätzt. Bezogen auf die Anzahl der Wohngebäude in Deutschland gemäß Abbildung 48 ist somit eine Zunahme von 0,75 Mio. im Jahr 2014 auf 0,94 Mio. Klimageräte im Jahr 2030 zu erwarten. Beide Prognosezahlen sind aufgrund der zunehmenden Qualitätsansprüche im modernen Wohnungsbau konservativ, können also tendenziell auch höher sein.

Die beiden stationären Anlagentypen Luftwärmepumpen und Klimageräte werden in dieser Untersuchung als bedeutendste Verursacher tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung betrachtet. Insgesamt werden im Folgenden deshalb für 2014 etwa 1,0 Mio. und für 2030 etwa 1,75 Mio. relevante Quellen tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung in der Bundesrepublik Deutschland angenommen. In dieser Größenordnung sind andere Geräuschquellen wie Windenergieanlagen oder BHKW untergeordnet (siehe Abschnitte 0 und 3.2.3).

6.1.3 Umgebungslärm

Tieffrequente Geräusche können am Tag durch die Umgebungsgeräusche durch Verkehr und Gewerbebetriebe überdeckt werden. Somit werden tieffrequente Geräusche stationärer Anlagen am Tag weniger störend wahrgenommen. Im ruhigen Gebieten und vor allem bei Nacht sind Umgebungsgeräusche durch Verkehr und Gewerbe jedoch verringert. Genau dann sind tieffrequente Geräusche besonders auffallend. Deshalb ist ein „Brummen“ von stationären Anlagen in der Umgebung von Wohnbebauung bei Nacht besonders deutlich wahrnehmbar.

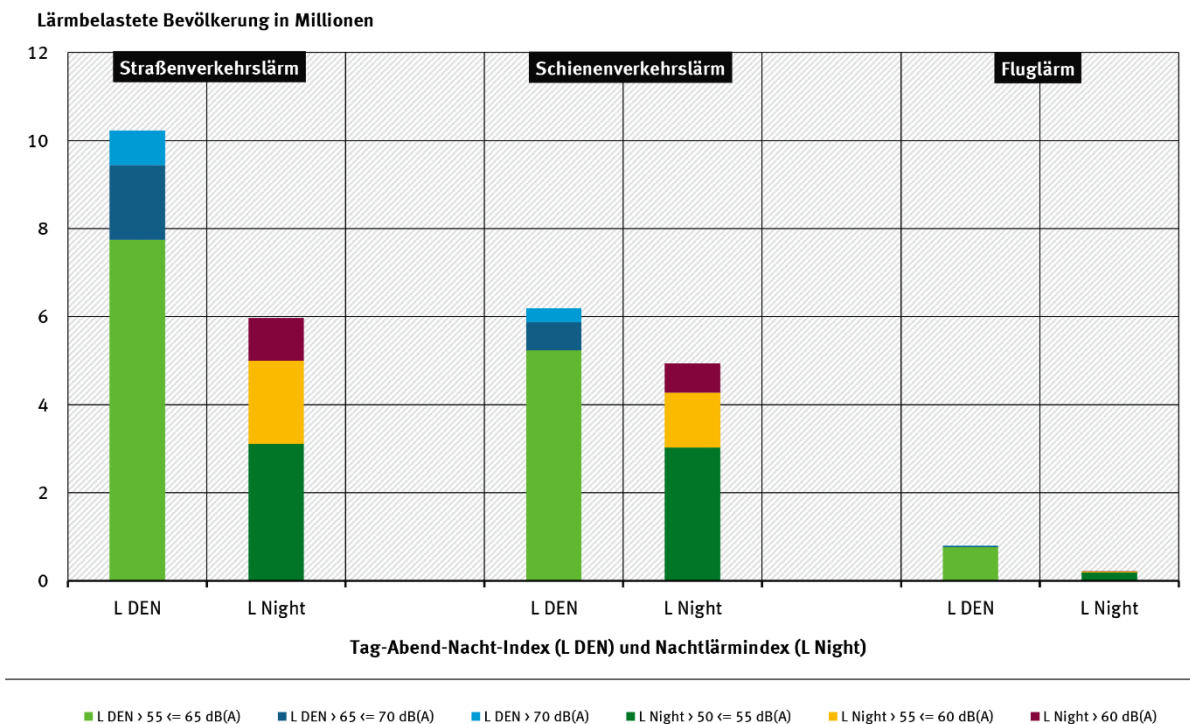
Um die Belastung durch Umgebungsgeräusche für Deutschland allgemein zu beschreiben, wurden Daten der II. Kartierungsstufe der EU-Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG [41] herangezogen (siehe Anhang 6). Abbildung 49 fasst die berechneten Belastetenzahlen durch Verkehrslärm aus Straßen-, Schienen- und Flugverkehr in den kartierten Gebieten zusammen. Eine umfassendere Zusammenstellung der allgemeinen Geräuschbelastung für das gesamte Bundesgebiet gibt es darüber hinaus nicht.

Nach EU-Umgebungslärmrichtlinie müssen nur die Geräuschimmissionen in Ballungsgebieten und an Hauptverkehrswegen kartiert werden. Somit sind nach dieser Methode zwar ein Großteil, jedoch nicht alle durch Lärm Belastete in Deutschland bekannt. In den bekannten Zahlen sind auch Teile der Bevölkerung enthalten, die von mehreren Lärmquellen gleichzeitig betroffen sind. Deshalb sind Abweichungen von den Belastetenzahlen nach oben und unten möglich. Für eine orientierende Einschätzung hinsichtlich des vorliegenden Untersuchungszwecks sind die Ungenauigkeiten jedoch akzeptabel.

Abbildung 49: Geschätzte Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm gemäß EU-Umgebungslärmrichtlinie, 2016

Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie

in der Umgebung von Hauptverkehrsstraßen, Haupteisenbahnstrecken, Großflughäfen und in Ballungsräumen



Stand: 29.02.2016

Quelle: Umweltbundesamt 2016, Zusammenstellung der Mitteilungen der Bundesländer und des Eisenbahn-Bundesamtes entsprechend § 47c BImSchG

Wie eingangs erwähnt, sind tieffrequente Geräusche bei hoher Umgebungslärmbelastung eher untergeordnet. Deshalb werden Personen, die durch Umgebungslärm mit einem nach EU-Umgebungslärmrichtlinie berechneten Nacht-Beurteilungspegel L_{Night} von mehr als 50 dB(A) belastet sind, von der weiteren Untersuchung nicht betrachtet. Entsprechend der vorliegenden Zahlen sind ca. 11 Mio. der deutschen Bevölkerung derart vom Verkehrslärm betroffen. Derzeit ist nicht zu erwarten, dass sich diese Zahl in Zukunft wesentlich ändert. Deshalb wird dieselbe Zahl auch für das Entwicklungsszenario 2030 angenommen. In der Regel sind für diese Bürgerinnen und Bürger keine Konflikte mit den im Fokus stehenden Anlagen zu befürchten. Diese Zahl kann somit von der Gesamtbevölkerungszahl abgezogen werden. Tabelle 11 fasst diese Erkenntnisse tabellarisch zusammen.

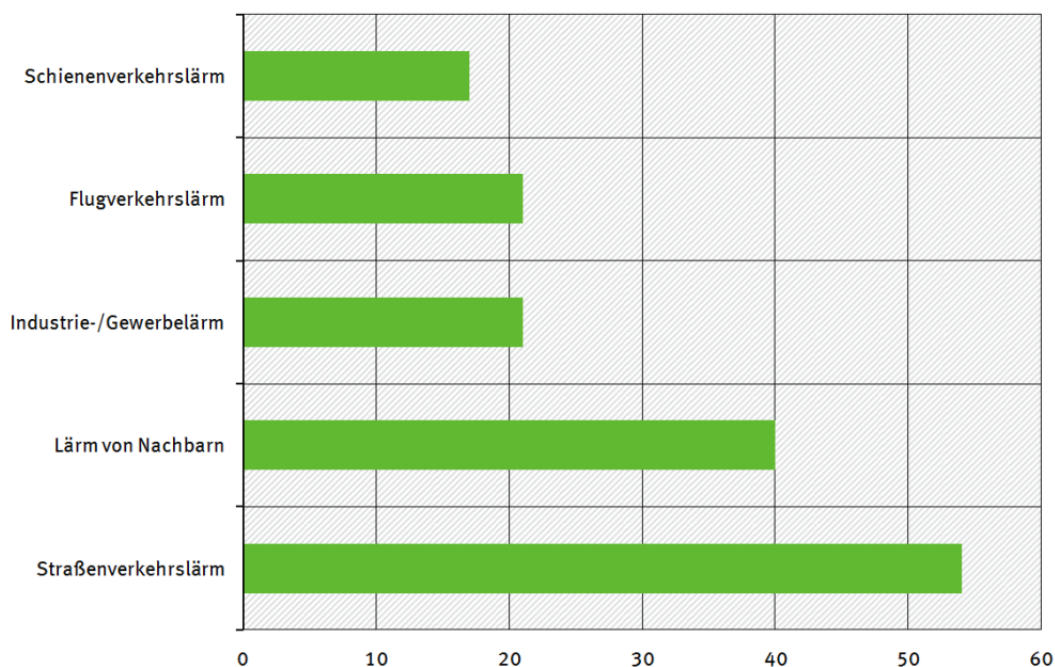
Tabelle 11: Zusammenstellung wesentlicher Kenngrößen für die Bewertung der Gesamtbelastung

Annahmegröße	Bestand 2014	Prognose 2030
Anzahl Wohngebäude	18,6 Mio.	20,0 Mio.
Bevölkerungszahl	81,2 Mio.	79,2 Mio.
Anzahl relevanter Anlagen in der Umgebung von Wohnbebauung, mind.	1,0 Mio.	1,75 Mio.
geschätzte Bevölkerungszahl mit Verkehrslärm $L_{\text{Night}} > 50$ dB(A)	11 Mio. entspricht 13 %	11 Mio. entspricht 14 %

6.1.4 Lärmbelästigung

Zur Häufigkeit der Lärmbelästigung durch tieffrequente Geräusche stationärer Anlagen in Wohngebieten liegen auch nach umfangreichen Recherchen keine Veröffentlichungen oder sonstigen Erkenntnisse vor. Tieffrequente Geräusche sind ein Sonderfall der Lärmbelästigung. Es ist denkbar, dass sie einen Anteil der berichteten Lärmbelästigungen im Bereich des Nachbarschaftslärms darstellen. Ob und wie häufig die Beschwerden über Nachbarschaftslärm mit tieffrequenten Geräuschen zusammenhängen, ist nicht bekannt. Der Nachbarschaftslärm ist entsprechend der Umweltbewusstseinsstudie des Umweltbundesamtes [107] wiederholt nach dem Straßenverkehrslärm die zweitgrößte Quelle der Lärmbelästigung in Deutschland (siehe Abbildung 50).

Abbildung 50: Lärmbelästigung in Deutschland in % im Jahr 2014



Quelle: Umweltbundesamt

40 % der Gesamtbevölkerung war im Jahr 2014 insgesamt von Nachbarschaftslärm belästigt. Das können unter anderem Gartengeräte, Musikanlagen, Kindergeräusche, Haustiere, Trittschall aber eben auch stationäre haustechnische Anlagen sein. Nachbarschaftslärm wurde bisher nicht näher beschrieben oder detaillierter erfasst. Es ist deshalb davon auszugehen, dass viele unterschiedliche Lärmquellen und -arten in dem Sammelbegriff „Nachbarschaftslärm“ enthalten sind. Die bekannte Zahl der Lärmbelästigung kann also ohne konkrete Aufschlüsselung im Weiteren nicht verwendet werden.

6.2 Konfliktprognose in den Musterwohnbaugebieten

Aus der Modellbetrachtung (siehe Abschnitt 5) lassen sich in jedem Musterwohnbaugebiet (WR, WA, MD) relative Häufigkeiten für Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen ermitteln. Die Häufigkeiten sind abhängig von Anzahl und Verteilung der Geräuschquellen und beziehen sich auf die Anzahl der Wohngebäude. Sie können für die Bestandssituation (2014) sowie das Entwicklungsszenario (2030) genannt werden.

Kennzeichnend für potentielle Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen sind entsprechend der Modellbeurteilung die Überschreitungen der Anhaltswerte zwischen 50 Hz und 100 Hz (s. Abschnitt 5.5). Zur

Vereinfachung wurde als Leitparameter für diese Aufgabenstellung die Überschreitung der Anhaltswerte in der Terz mit der Mittenfrequenz von 80 Hz betrachtet. Die vom Leitparameter betroffenen Wohngebäude wurden gezählt. Nicht gezählt wurden Wohngebäude entlang der Verkehrswege, die durch Verkehrslärm hoch belastet sind. Der Anteil wurde in den Musterwohnbaugebieten mit ca. 15 % angesetzt. Dies entspricht in etwa dem Anteil der Bevölkerung, der entsprechend der Lärmkartierung nachts von Umgebungslärm mit einem L_{Night} von mehr als 50 dB(A) belastet ist. Hierfür wurden die den Straßen exponierten Ränder der Mustergebiete von der Zählung ausgeschlossen. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 51 beispielhaft für das Musterwohnbaugebiet „Allgemeines Wohngebiet“ dargestellt. Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen werden nach dieser Methode lediglich in den rot gekennzeichneten Bereichen angenommen. Außerhalb dieser Bereiche werden potentielle tieffrequente Geräusche vom Umgebungslärm aus dem Straßenverkehr überdeckt.

Abbildung 51: Skizze zur Methodik der Auswertung der Betroffenenheiten



Quelle: Eigene Darstellung, Möhler + Partner Ingenieure AG

Ebenfalls nicht gezählt wurden Wohngebäude, auf deren Grundstück sich eine relevante Geräuschquelle befindet. Die Zählung ergab die in Tabelle 12 dargestellten prozentualen Wahrscheinlichkeiten für das Konfliktpotential durch tieffrequente Geräusche in den Musterwohnbaugebieten.

Tabelle 12: Maximalabschätzung der prozentualen Wahrscheinlichkeiten für das Konfliktpotential in den Mustergebieten bezogen auf die Anzahl der Wohngebäude

Gebietskategorie	Bestand 2014	Prognose 2030
Reines Wohngebiet (WR)	3,7 %	7,4 %
Allgemeines Wohngebiet (WA)	5,2 %	10,1 %
Dorf-/Mischgebiete (MD/ MI)	6,8 %	14,0 %
Mittelwert über die Baugebiete	5,2 %	10,5 %

6.3 Hochrechnung

Die Häufigkeit von Baugebieten in Deutschland, die dem Gebietscharakter der Musterwohnbauggebiete (siehe Abschnitt 5.3) entsprechen, ist nicht ermittelbar. Statistische Erhebungen über Gebietskategorien der Baunutzungsverordnung wären nicht aussagekräftig. Die Grundannahme dabei wäre, dass Baugebiete nach dem immissionsschutzrechtlichen Schutzniveau i. S. der TA Lärm [1] differenziert werden können. Es sind jedoch nicht alle Gebiete in einem Bebauungsplan rechtsverbindlich festgesetzt. Die Bauleitplanung der Kommunen schreitet städteplanerisch voran und wandelt sich stets. Deshalb kann ein Gebietscharakter auch von seiner rechtsverbindlichen Festsetzung abweichen. Schließlich entscheidet im Einzelfall das angerufene Gericht über Gebietscharakter und den immissionsschutzrechtlichen Schutzanspruch eines Baugebiets. Vor diesem Hintergrund muss eine Annahme zur Verteilung von Baugebieten in Deutschland getroffen werden. Hier wird die Annahme getroffen, dass die Baugebiete im Mittel gleich verteilt sind. Deshalb wird das Konfliktpotential in realen Baugebieten vergleichbar mit dem Potential in den Musterwohnbauggebieten eingeschätzt.

In den Musterwohnbauggebieten ist im Bestand (2014) an maximal 5 % der bestehenden Wohngebäude ein Konfliktpotential für eine Immissionsbelastung durch tieffrequente Geräusche vorhanden. Im Entwicklungsszenario (2030) kann sich dieses Konfliktpotential verdoppeln. Dies ist eine Maximalschätzung. Bestimmte Einflussfaktoren konnten methodisch nicht berücksichtigt werden. Zu folgenden Sachverhalten wird deshalb an dieser Stelle keine abschließende Aussage getroffen:

- Nicht jedes tieffrequente Geräusch führt zu einer Belästigung oder zu einem Konflikt. Die konkreten Wirkungen tieffrequenter Geräusche wurden jedoch in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet. Diese Wirkungen könnten beispielsweise durch systematische Befragungen nach tieffrequenten Geräuschen in der Umgebung von Wohnbebauung quantifiziert werden.
- In der Realität können zahlreiche weitere Geräuschquellen (Gewerbe- und Industriebetriebe, Baustellen, Sportanlagen, sonstige Geräusche aus der Nachbarschaft usw.) auf Wohngebäude einwirken. Diese können tieffrequente Geräusche teilweise oder sogar vollständig überdecken.
- Die Belastetenzahlen der EU-Umgebungslärmrichtlinie berücksichtigen nur die wesentlichen Verkehrslärmquellen durch Hauptverkehrsstraßen, Haupteisenbahnstrecken, Großflughäfen und in Ballungsräumen. Wirken auf ein reales Baugebiet weitere Immissionen durch Verkehrslärm von Nebenverkehrswegen ein, kann auch hier eine Überdeckung der tieffrequenten Geräusche zur Minderung des Konfliktpotentials führen.

Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Anzahl von Konfliktfällen mit tieffrequenten Geräuschen tendenziell niedriger ist als in der Maximalschätzung des Entwicklungsszenarios (2030) angenommen.

7 Fazit

In der vorliegenden Untersuchung wurde zunächst der Kenntnisstand über die Messung, Wahrnehmung und Ausbreitung tieffrequenter Geräusche grundlegend dargelegt. Es wurden Rechenmodelle zur Ausbreitung tieffrequenter Geräusche vorgestellt und angewandt. Dabei wurde die Ausbreitung im Freifeld, die Übertragung von außen in Wohngebäude und die Verteilung in Innenräumen betrachtet. Ein Vergleich von geometrischen und numerischen Verfahren im Freifeld zeigt deutlich, dass numerische Verfahren ein Schallfeld zwar genauer beschreiben können, aber hohen Rechenaufwand verursachen. Die anerkannten geometrischen Verfahren sollten deshalb um Spezifika im tieffrequenten Bereich erweitert werden. Es konnte gezeigt werden, dass dies mit alternativen geometrischen und numerischen Rechenmodellen möglich ist. Die Ansätze des Verfahrens Nord2000 [23] erscheinen als Grundlage für ein künftiges Prognoseverfahren für tieffrequente Geräusche vielversprechend.

Der Untersuchungsbericht geht im Folgenden auf den Einfluss von Gebäudeeigenschaften auf tieffrequente Geräusche ein. Es ist dabei grundsätzlich bekannt, dass die Schalldämmung von Außenbauteilen im tieffrequenten Bereich geringer ist als in höheren Frequenzen. In den derzeit geltenden bautechnischen Spezifikationen zur Schalldämmung ist dieser Bereich nicht bzw. nicht ausreichend beschrieben. Im vorliegenden Bericht wird deshalb ein Ansatz zur rechnerischen Herleitung von Spektrum-Anpassungswerten im tieffrequenten Bereich beschrieben. Es wird hier auch darauf hingewiesen, dass die Raumgeometrie sowie Schwingungen von Bauteilen das Auftreten tieffrequenter Geräusche innerhalb von Gebäuden ebenfalls beeinflussen können.

Es wird im Hauptteil zunächst gezeigt, von welchen Geräuschquellen derzeit und zukünftig das größte Störpotential ausgeht. Die relevanten Geräuschquellen werden im Detail beschrieben, vor allem die Ursachen für die Entstehung der tieffrequenten Geräusche. In der Umgebung von Wohnbebauung werden nach den vorliegenden Erkenntnissen überwiegend folgende relevante Geräte und Anlagen betrieben, die zu Beschwerden über tieffrequente Geräusche führen können:

- ▶ Raumluftechnische Anlagen und Kühlaggregate (Lüftungsanlagen, Klima- und Kühlgeräte)
- ▶ Heizungsanlagen (insbesondere Luftwärmepumpen)
- ▶ (Mini-) Blockheizkraftwerke
- ▶ (Klein-) Windenergieanlagen
- ▶ Haushaltsgeräte

Es werden daraufhin allgemeine und spezifische Maßnahmen zur Minderung tieffrequenter Geräusche dargelegt. Dabei wurde zwischen vorherigen und nachträglichen Maßnahmen unterschieden. Die Maßnahmen wurden nach Wirksamkeit, Praxistauglichkeit und Kosten beurteilt. Wichtige Erkenntnisse sind, dass relevante tieffrequente Geräuschanteile dieser Geräuschquellen meist im Vorfeld nicht bekannt sind. Deshalb bleibt die mögliche Störwirkung solcher Anlagen in der Planung häufig unbeachtet. Werden keine Maßnahmen zur Minderung ergriffen, folgen meist langjährige nachbarschaftliche Auseinandersetzungen. Nachträgliche Maßnahmen kosten dann etwa viermal so viel wie Maßnahmen vor Errichtung und Inbetriebnahme solcher Anlagen und können selten alle Beteiligten zufrieden stellen. Deshalb ist dringend empfohlen, tieffrequente Geräusche im Zusammenhang mit den genannten Geräuschquellen stets im Vorfeld zu betrachten und mit sachgerechten Maßnahmen zu mindern.

Als Ergebnis eines Rechtsgutachtens wurden legislative Handlungsoptionen zur Minderung tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung herausgearbeitet, die nach produktbezogenen Anforderungen, Immissionsschutzrecht und Baurecht unterteilt werden. So wurde herausgestellt, dass es dem nationalen Gesetzgeber relativ schwer möglich ist, Anforderungen an die Emissionen der Anlagen zu stellen, die über die Europäischen Harmonisierungsmaßnahmen hinausgehen. Hier wird

explizit die Einführung einer „Öffnungsklausel“ vorgeschlagen. Immissionsschutzrechtlich wird bemängelt, dass es kein genormtes Prognoseverfahren für tieffrequente Geräusche gibt. Zudem wird vorgeschlagen, für die Errichtung nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen grundsätzlich eine Anzeigepflicht einzuführen. Schließlich wird die Erweiterung des Baurechts um Maßnahmen zur Vorsorge gegen tieffrequente Geräusche bei der Festsetzung von Bebauungsplänen empfohlen.

Darüber hinaus wurde das Konfliktpotential tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung ermittelt und beurteilt. Dazu wurde eine Modellbetrachtung durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass moderner Wohnungsbau in Verbindung mit einer zunehmend dichten Besiedlung das Konfliktpotential tieffrequenter Geräusche in der Umgebung von Wohnbebauung verstärken kann. Sowohl im Bestandsszenario 2014 als auch im Entwicklungsszenario 2030 kann ein nicht unerhebliches Konfliktpotential errechnet werden. Vor allem im hörbaren Bereich der tiefen Frequenzen zwischen etwa 50 Hz und 100 Hz ist das Konfliktpotential am höchsten. Verantwortlich dafür sind in den Modellrechnungen ausschließlich die im Vorfeld identifizierten relevanten Geräuschquellen. Diese wurden anhand von realistischen Bestands- und Prognosezahlen der Herstellerverbände in den Musterwohnbaugebieten verteilt. Die Berechnungen zeigen zudem, dass die Belastung durch tieffrequente Geräusche mit sinkender Schutzbedürftigkeit des Baugebiets steigt. In Dorfgebieten sind deshalb Effekte tieffrequenter Geräusche deutlich ausgeprägter zu erwarten als in reinen bzw. allgemeinen Wohngebieten.

Die Modellrechnung konnte abschließend ansatzweise auf die Allgemeinheit übertragen werden. In den Musterwohnbaugebieten im Bestand (2014) ist bei maximal 5 % der bestehenden Wohngebäude ein Konfliktpotential für eine Immissionsbelastung durch tieffrequente Geräusche vorhanden. Im Entwicklungsszenario (2030) kann sich dieses Konfliktpotential verdoppeln. Die Musterwohnbaugebiete stellen methodisch nur eine Verallgemeinerung dar. Die absolute Häufigkeit der einzelnen Mustergebiete in der Bundesrepublik Deutschland ist allerdings nicht ermittelbar. In der Realität kann eine Vielzahl von beeinflussenden Faktoren auftreten, die mit diesem allgemeinen Ansatz nicht erfasst werden können. Sicher ist folglich nur, dass sich die derzeit vorhandenen Konflikte mit tieffrequenten Geräuschen bis zum Jahr 2030 verdoppeln können, sofern den dargestellten Ursachen und Defiziten nicht entgegen gewirkt wird.

Die wesentlichen Erkenntnisse dieses Berichtes wurden in einem Leitfaden zusammengestellt [79]. Dieser wurde auf einer öffentlichen Veranstaltung des Umweltbundesamts im März 2017 vorgestellt und veröffentlicht.

8 Quellenverzeichnis

- [1] 6. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26.08.1998 (GMBI. Nr. 26/1998)
- [2] Battis, U.; Krautzberger, M.; Löhr, R. (2014): Baugesetzbuch (BauGB), 12. Auflage, Beck (München) 2014
- [3] Bayerisches Landesamt für Umwelt (2011): Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen. Ein Leitfaden.
- [4] Bender/Sparwasser/Engel, Umweltrecht, 4. Auflage 2000, Seite 352.
- [5] Bovet (2010): Ausgewählte Probleme bei der baulichen Errichtung von Kleinwindanlagen, in: Zeitschrift für Umweltrecht 2010, Seite 9 ff.
- [6] Bracke, R. et al. (2014): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends, Internationales Geothermiezentrum GZB, Bochum 2014
- [7] Broner, N. (1978): The effects of low frequency noise on people. Journal of Sound and Vibration, (58), 483-500
- [8] 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
- [9] Brügelmann (2017): Baugesetzbuch / Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung – BauNVO)
- [10] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) (2013): Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten. Klimageräte, Kühlgeräte, Lüftungsgeräte, Luft-Wärme-Pumpen und Mini-Blockheizkraftwerke.
- [11] Bundesamt für Energie Schweiz, Lärmreduktion bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen – Grundlagen und Massnahmen, 2002
- [12] Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 55 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist
- [13] Bundesverband Kleinwindanlagen e.V. (o.J.): Definition Kleinwindanlagen. <http://bundesverband-kleinwindanlagen.de/definition-kleinwindanlagen/>, aufgerufen am 15.02.2017
- [14] Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2015): BWP-Branchenstudie 2015. Szenarien und politische Handlungsempfehlungen.
- [15] Bürgerliches Gesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Januar 2002 (BGBl. I S. 42, 2909; 2003 I S. 738), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 12. Juli 2018 (BGBl. I S. 1151) geändert worden ist
- [16] BVerwG (1991): Zumutbare Lärmbelastung eines Wohngebiets, in: Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht – 18.12.1990, 4 N 6/88, NVwZ (1991), S. 881
- [17] BVerwG (1998): Immissionswirksamer flächenbezogener Schalleistungspegel, in: Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht, 27.01.1998 - 4 NB 3/97, NVwZ (1998), S. 1067
- [18] Calliess, Ruffert (2011): EUV/AEUV Das Verfassungsrecht der Europäischen Union mit Europäischer Grundrechtecharta Kommentar, 4. Auflage, Beck (München) 2011
- [19] Cremer, Heckel (2009): Körperschall – Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen, neu bearbeitet von M. Möser und W. Kropp, 3., aktualisierte Auflage, ISBN 978-3-540-40336-4, Springer Verlag
- [20] Delany M. E., Bazley E. N. (1970): Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Applied Acoustics 3, 1970, pp. 105-116

- [21] DELTA (2000): Report. Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction.
- [22] DELTA (2002): Report. Nordic Environmental Noise Prediction Methods, Nord2000. Summary Report. General Nordic Sound Propagation Model and Applications in Source-Related Prediction Methods.
- [23] DELTA (2009): Report. Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise, PSO-07 F&U project no 7389, AV 1236/09, October 2009
- [24] Deutscher Bundestag (2006): Entwurf eines Gesetzes zur Verbesserung des Schutzes vor Fluglärm in der Umgebung von Flugplätzen, Gesetzesentwurf der Bundesregierung, Drucksache 16/508, 02.02.2006, Seite 23, 24
- [25] Deutsche Windguard GmbH (2015): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland, Jahr 2014, 2015
- [26] DIN 18005-1, Schallschutz im Städtebau - Teil 1: Grundlagen und Hinweise für die Planung, Juli 2002
- [27] DIN 45680, Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, März 1997.
- [28] DIN 45680, Beiblatt 1, Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft - Hinweise zur Beurteilung bei gewerblichen Anlagen. März 1997
- [29] DIN 45692, Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe, August 2009
- [30] DIN EN 12102-1, Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze, Wärmepumpen, Prozesskühler und Entfeuchter mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Bestimmung des Schallleistungspegels - Teil 1: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze, Wärmepumpen zur Raumbeheizung und -kühlung, Entfeuchter und Prozesskühler; Deutsche Fassung EN 12102-1:2017
- [31] DIN EN 61400-11, Windenergieanlagen - Teil 11: Schallmessverfahren (IEC 61400-11:2012); Deutsche Fassung EN 61400-11:2013
- [32] DIN EN 61672-1, Elektroakustik – Schallpegelmesser, Teil 1 Anforderungen, Oktober 2003
- [33] DIN EN ISO 3744, Akustik - Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO 3744:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3744:2010
- [34] DIN EN ISO 16283-3, Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 3: Fassadenschalldämmung (ISO 16283-3:2016)
- [35] DIN ISO 9613-2, Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren, Oktober 1999
- [36] Department of Trade Industry (DTI), National Physical Laboratory (2007): Guide to Predictive Modelling for Environmental Noise Assessment.
- [37] Ebner, F., Eulitz, C., Möhler, U. (2014): Schallpegelexposition bei ausgeprägt tieffrequenten Geräuschen und Infraschall innerhalb von Wohnungen, DAGA 2014 Oldenburg, S.736-737
- [38] Ernst, W.; Zinkahn, W.; Bielenberg, W.; Krautzberger, M. (2015): Baugesetzbuch (BauGB) - Loseblatt-Kommentar, Beck (München) Stand August 2015
- [39] Europäische Union (1997): EG-Vertrag (Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft) in der Fassung vom 02.10.1997, zuletzt geändert durch den Vertrag über den Beitritt der Republik Bulgarien und Rumäniens zur Europäischen Union vom 25.4.2005 (ABl. EG Nr. L 157/11) m.W.v. 1.1.2007
- [40] Europäische Union (2000): Richtlinie 2000/14/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2000 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über umweltbelastende Geräuschemissionen von zur Verwendung im Freien vorgesehenen Geräten und Maschinen, ABl. L 162 vom 03.07.2000 (Seite 1; zuletzt geändert durch VO (EG) 219/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11.03.2009, ABl. L 87 vom 31.03.2009, Seite 109.)

- [41] Europäische Union (2002): Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm, L 189/12
- [42] Europäische Union (2009): Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21.10.2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte, ABl. Vom 31.10.2009, L 285, 10 – 35
- [43] Europäische Union (2009): Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union. Fassung aufgrund des am 1.12.2009 in Kraft getretenen Vertrages von Lissabon (Konsolidierte Fassung bekanntgemacht im ABl. EG Nr. C 115 vom 9.5.2008, S. 47)
- [44] Europäische Union (2012): Verordnung (EU) Nr. 206/2012 der Kommission vom 06.03.2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumklimageräten und Komfortventilatoren, ABl. EU vom 10.03.2012, L 72, Seite 7.
- [45] Europäische Union (2013): Verordnung (EU) Nr. 813/2013 der Kommission vom 02.08.2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten, ABl. EU vom 06.09.2013, L 239, Seite 136.
- [46] Feldhaus (2015): Bundesimmissionsschutzrecht - Kommentar, Loseblatt, Stand März 2015
- [47] Feldhaus/Tegeder, in: Feldhaus/Bundesimmissionsschutzrecht, Band 4, Stand Februar 2014
- [48] Fickert/Fieseler (2008): Baunutzungsverordnung (Kommentar unter besonderer Berücksichtigung des deutschen und gemeinschaftlichen Umweltschutzes)
- [49] FluLärmG (1971): Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30.03.1971, neugefasst durch Bekanntmachung vom 31.10.2007 (BGBl. I, Seite 2550).
- [50] Führ, M. (2016): Gemeinschaftskommentar zum Bundesimmissionsschutzgesetz - GK-BImSchG, 1. Auflage, Beck (München), 2016
- [51] Fürst (2011): Tieffrequente Geräusche bei „Luftwärmepumpen“, in: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen, 2011, Seite 37f.
- [52] Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 19. März 2002 (BGBl. I S. 1092), das zuletzt durch Artikel 331 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist
- [53] Gilbert, K.; White, M. (1988): Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere. Journal of Acoustic Society, Vol. 85, No. 2, 630-636
- [54] Guski, R. (2002): Status, Tendenzen und Desiderate der Lärmwirkungsforschung zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 49, 219-232
- [55] Herdegen, M. (2015): Europarecht, 17. Auflage, München 2015
- [56] Hinweise zur Planung und Genehmigung von Windkraftanlagen (WKA; 2011): Gemeinsame Bekanntmachung der Bayerischen Staatsministerien des Inneren, für Wissenschaft, Forschung und Kunst, der Finanzen, für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, für Umwelt und Gesundheit sowie für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten vom 20.12.2011
- [57] Hoffmeyer D, Jakobsen J.: "Sound insulation of dwellings at low frequencies". Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 29, (1) 2010, 15 – 23
- [58] Hübelt, J.; Schulze, C. (2014): Lärminderung bei Miro-BHKW (SILENA-Studie). Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaates Sachsen, Schriftreihe, Heft 8/2014
- [59] Ihlenburg, F. (1998) Finite Element Analysis of Acoustic Scattering, Applied Mathematical Sciences Volume 132, Springer Verlag, ISBN 0-387-98319-8
- [60] IMMI, Version 2015 [405], Wölfel Messsysteme Software, Oktober 2015
- [61] Jäde/Dirnberger/Weiss (2013): Baugesetzbuch - BauNVO, 7. Auflage 2013

- [62] Jakobsen, J (2005): Infrasound emission from wind turbines. Journal of low frequency noise, vibration and active control, (24), 145-155
- [63] Jakobsen, J. (2012) "Danish Regulation of Low Frequency Noise from Wind Turbines." Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 31.4: 239-246
- [64] Jarass, H., D. (2015): Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG, 11. Auflage, Beck (München), 2015
- [65] Kalivoda, M.T., Steiner, J.W. (Hrsg.) (1998): Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik. SpringerTechnik, Wien: Springer-Verlag Wien
- [66] Klöpfer (2011): Umweltschutzrecht, 2. Auflage, Beck (München) 2011
- [67] Koch, H.; Pache, E.; Scheuing, D. (2014): Gemeinschaftskommentar zum Bundesimmissionsschutzgesetz - GK-BImSchG, Loseblatt, Stand Juli 2014
- [68] Köck, W.; Bovet, J. (2012): Zulässigkeit von Kleinwindanlagen in reinen Wohngebieten, in: NVwZ 2012, S. 153 – 157
- [69] König, H.; Röser, T.; Stock, J. (2017): Baunutzungsverordnung (BauNVO) - Kommentar
- [70] Krahé, D.; Schreckenberger, D.; Ebner, F.; Eulitz, C.; Möhler, U. (2014): Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall. Entwicklung von Untersuchungsdesigns für die Ermittlung der Auswirkungen von Infraschall auf den Menschen durch unterschiedliche Quellen. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- [71] Krahé, Schreckenberger, Ebner, Eulitz, Möhler, in: Umweltbundesamt (Hrsg.), Machbarkeitsstudie zu Wirkungen von Infraschall, Juni 2014, Seite 46 m.w.N.
- [72] Kubicek, R. (2003): Schutz vor tieffrequenten Geräuschen – Anforderungen an Messung und Beurteilung Seminar: Geräuschemissionen und -immissionen bei tiefen Frequenzen, Reinhardtsgrimma, 03.12.2003
- [73] Kutscheidt (1999): Die Neufassung der TA Lärm, in: NVwZ 1999, Seite 577-580
- [74] Landmann/Rohmer, Umweltrecht, Loseblatt, Stand November 2014
- [75] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016): Tieffrequente Geräusche inkl. Infraschall von Windkraftanlagen und anderen Quellen, Bericht über Ergebnisse des Messprojektes 2013-2015, Februar 2016
- [76] Ljungberg, J.K., Paramentier, F.B.R.: Psychological effects of combined noise and whole-body vibration: a review and avenues for future research, Proc. IMechE Vol. 224 Part D: J. Automobile Engineering (2010), 1289-1302
- [77] Martin, D. J. Et al.: Measurement and Analysis of Traffic-induced Vibration in Buildings. TRRL Supplementary Report 402, TRRL Berkshire 1978
- [78] Maue, 0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel, 9. Auflage 2009, Seite 43.
- [79] Möhler, U., Eulitz, C. (2017): Tieffrequente Geräusche im Wohnumfeld – Ein Leitfaden für die Praxis, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [80] 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.
- [81] Mühlbacher, M., Eulitz, C., Möhler, U.: Konzepte für die Prognose tieffrequenter Schalle, DAGA 2016 Aachen, S. 1264 – 1266
- [82] Müller-BBM, Bericht Nr. 44932/7, Berücksichtigung tieffrequenter Geräusche gemäß TA Lärm in Genehmigungs-, Planfeststellungs- und Baugenehmigungsverfahren, Mustergutachten und Handlungsanleitung im Auftrag des Staatlichen Umweltamtes Kiel, 13.02.2001
- [83] Müller, G., Möser, M. (2003) Taschenbuch der Technischen Akustik, 3., erweiterte und überarbeitete Auflage, Springer Verlag, ISBN 3-540-41242-5

- [84] Öko-Institut e.V., aktueller Stand der KWK-Erzeugung, <https://www.oeko.de/oekodoc/2450/2015-607-de.pdf>, aufgerufen im März 2016
- [85] 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
- [86] Pitteloud, J., Gsänger, S.: Small Wind World Report – Summary 2016, World Wind Energy Association, März 2016
- [87] Riviere, P.; Adnot, J.; Grignon-Masse, L.; Legendre, S.; Marchio, D.; Nermond, G.; Rahim, S.; Andre, P.; Detroux, L.; Lebrun, J.; L'Hoest, J.; Teodorose, V.; Alexandre, J.; Sa, E.; Benke, G.; Bogner, T.; Conroy, A.; Hitchin, R.; Pout, C.; Thorpe, W.; Karatasou, S. (2008): Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation). Air Conditioners Final report of Task 2, December 2008 Economic Market Analysis.
- [88] Robert Koch-Institut, Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 2007, Infraschall und tieffrequenter Schall – ein Thema für den umweltbezogenen Gesundheitsschutz in Deutschland? 50:1582–1589 DOI 10.1007/s00103-007-0407-3 Online publiziert seit: 30. November 2007
- [89] Salt, A.N.; Kaltenbach, J.A. (2011): Infrasound from Wind Turbines Could Affect Humans. *Bulletin of Science, Technology and Society*, 31(4), 296-302
- [90] Sarradj, E., (2009) Numerische Akustik. Beitrag aus der Vortragsreihe „Medizinische Akustik und Audiologie“. Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH
- [91] Schlichter, O.; Stich, R.; Driehaus, H.; Paetow, S. (2015): Berliner Kommentar zum Baugesetzbuch (BauGB), Loseblatt, Stand: Oktober 2015,
- [92] Schmidt/Kahl, Umweltrecht, 8. Auflage 2010, Seite 145
- [93] Scholl, W. (2014): Sound Insulation at Low Frequencies, Forum ACUSTICUM, 7.-12. September 2014, Krakau (Polen)
- [94] Schröder, M. (2001): Gentechnik in der Praxis – Eine empirische Studie zu den Grenzen der Normierbarkeit, Nomos Verlag Baden-Baden 2001
- [95] Schrödter, W. (2015): Baugesetzbuch - Kommentar, 8. Auflage, Nomos (Baden-Baden) 2015
- [96] Schulze, C.; Hübelt, J.; Ruhnau, M.; Krause, R.; Peusch, A. (2014): Ermittlung der Geräuschemissionen und Möglichkeiten zur Lärminderung bei Luft-Wasser-Wärmepumpen. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- [97] Schust, M. (1997): Biologische Wirkung von vorwiegend luftgeleitetem Infraschall. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin
- [98] Schwarze (2012), EU-Kommentar, 3. Auflage, Beck (München) 2012
- [99] Schwier, Handbuch der Bebauungsplanfestsetzungen, 2. Auflage 2002, Kapitel 50, 70, 72.
- [100] Sheperd, K. P. and Hubbard, H. H.: "Physical Characteristics and Perception of Low Frequency Noise from Wind Turbines". *Journal of Noise Control Engineering*, Vol. 36 (1) 1991, 5 – 15
- [101] SoundPLAN GmbH: SoundPLAN Version 7.3. Software für Schall- und Luftausbreitungsberechnungen. 1986-2015
- [102] Statistisches Bundesamt (2015, a): Bevölkerung und Erwerbstätigkeit, vorläufige Ergebnisse der Bevölkerungsfortschreibung auf Grundlage des Zensus 2011, 2014 erschienen am 24.9.2015, www.destatis.de
- [103] Statistisches Bundesamt (2015, b): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, 2015
- [104] Statistisches Bundesamt (2017): Gebäude und Wohnungen, Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, 2016, erschienen am 27.07.2017, www.destatis.de
- [105] Stürer (2014): Städtebaurecht und Immissionsschutzrecht, zugleich Bericht über den Arbeitskreis VIII des 5. Deutschen Bau-gerichtstags in Hamm, *Deutsches Verwaltungsblatt* 2014, 908-913

- [106] TremAc, Forschungsvorhaben „Objektive Kriterien zu Erschütterungs- und Schallemissionen durch Windenergieanlagen im Binnenland“, Verbundforschungsprojekt Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Universität Stuttgart, Technische Universität München, Universität Bielefeld, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU), MesH Engineering GmbH, Projektlaufzeit 01.02.2016 bis 31.01.2019
- [107] Umweltbundesamt (2015): Umweltbewusstsein in Deutschland 2014 – Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, Hrsg.), Berlin, März 2015
- [108] Uschkereit (2015): Zulässigkeit von Wärmepumpen auf Wohngrundstücken, in: NJW Spezial 2015, Heft 6, S. 172
- [109] Van Renterghem, T. (2014): Efficient outdoor sound propagation modeling with the finite-difference time-domain (FDTD) method: a review, *aeroacoustics*, vol. 13, 2014, 385-404
- [110] Vercammen M.L.S.: “Low-Frequency Noise Limits”. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 11, (1) 1992, 7 – 13
- [111] Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung – BauNVO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786)
- [112] Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Mai 2017 (BGBl. I S. 1440)
- [113] Yeowart, N.S., Bryan, M.E. und Tempest, W.: The monaural M.A.P. Threshold of hearing at frequencies from 1.5 to 100 c/s, *Journal Sound Vibration* (1967), 6(3), 335-342
- [114] Zeller, P. (2009): *Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden

Anhang 1 Lagepläne der Musterwohnbaugebiete

Reines Wohngebiet (WR)



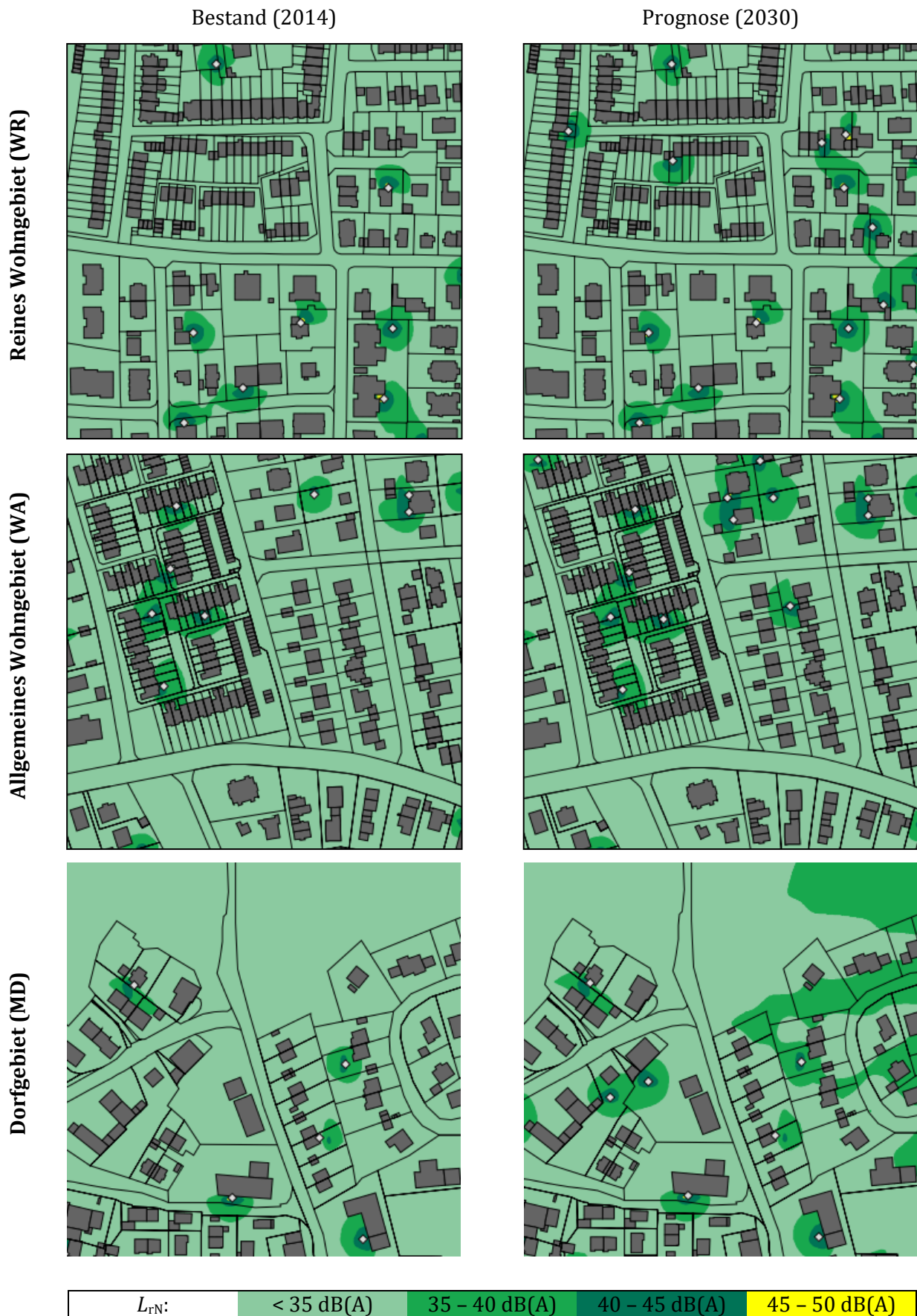
Allgemeines Wohngebiet (WA)



Dorfgebiet (MD)

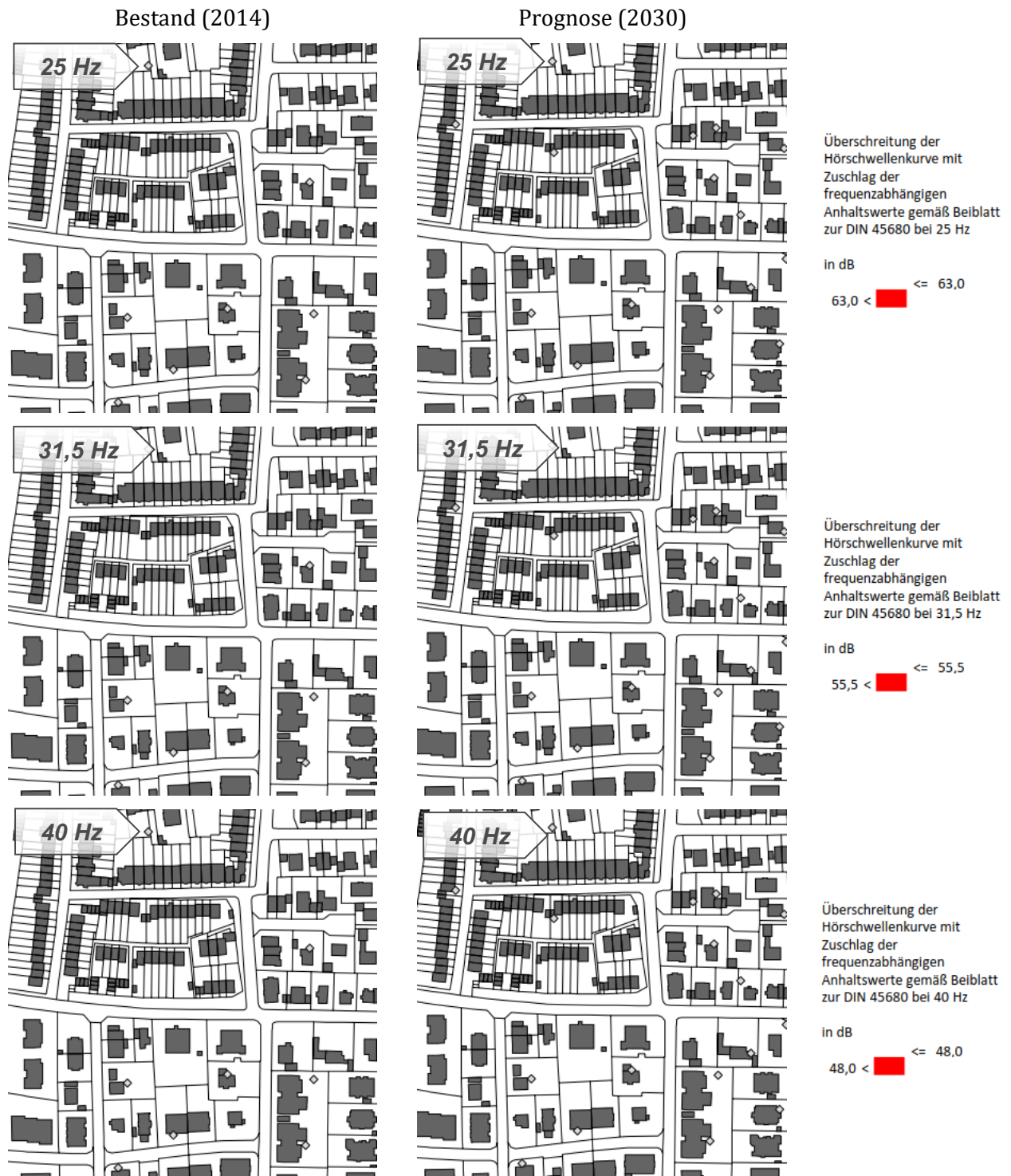


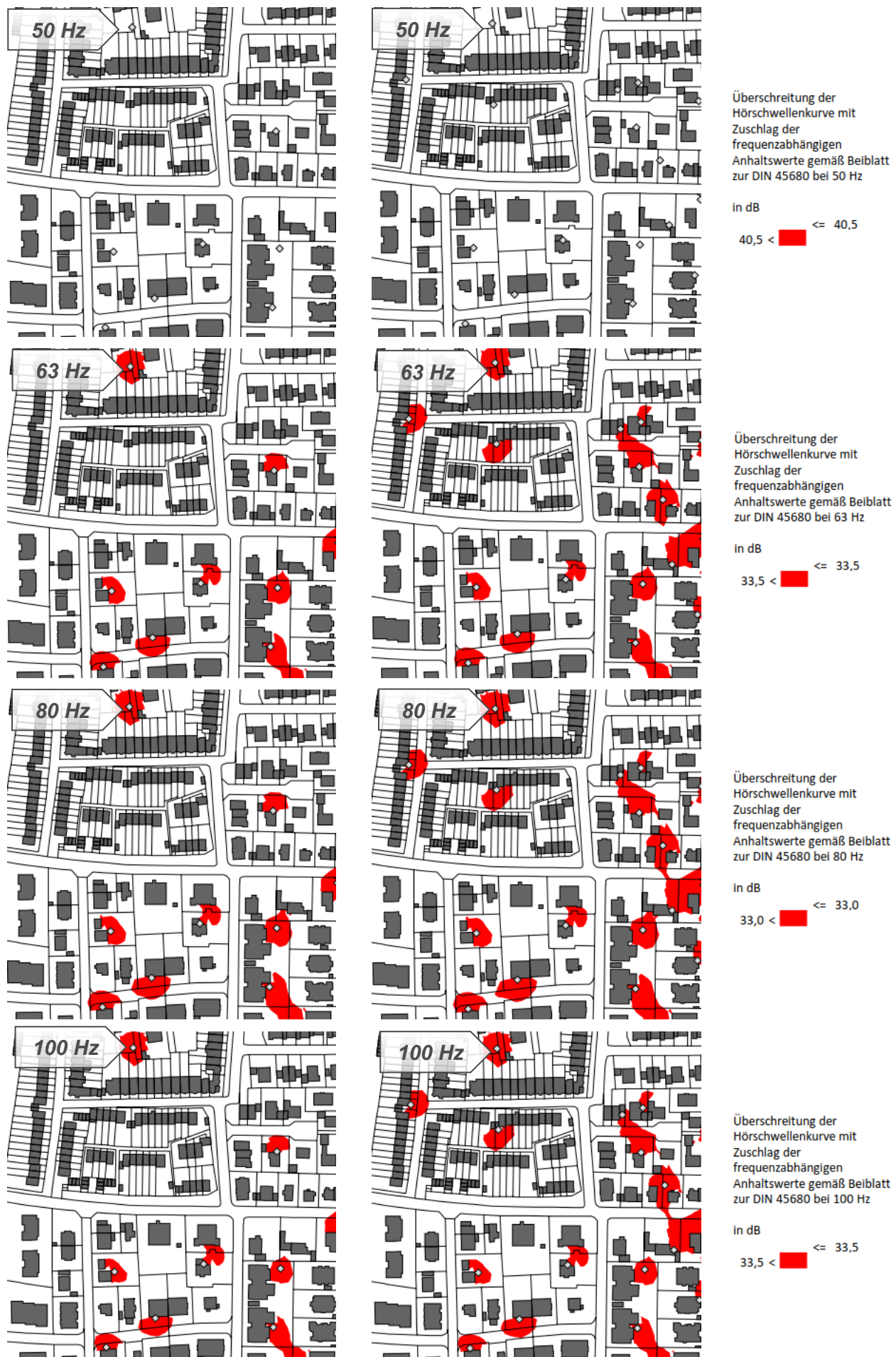
Anhang 2 Modellrechnung der Schallausbreitung nach DIN ISO 9613-2



Anhang 3 Potentielle tieffrequente Konfliktbereiche (Nord2000)

Reines Wohngebiet (WR)





Allgemeines Wohngebiet (WA)





Dorfgebiet (MD)

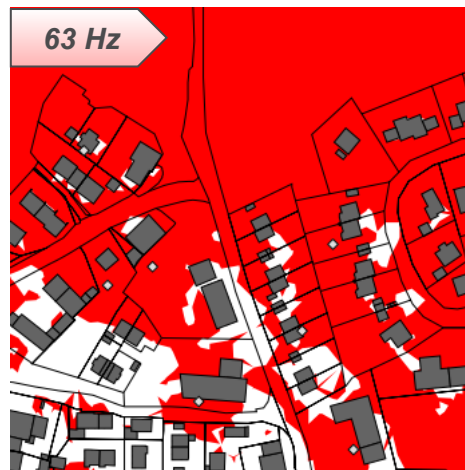
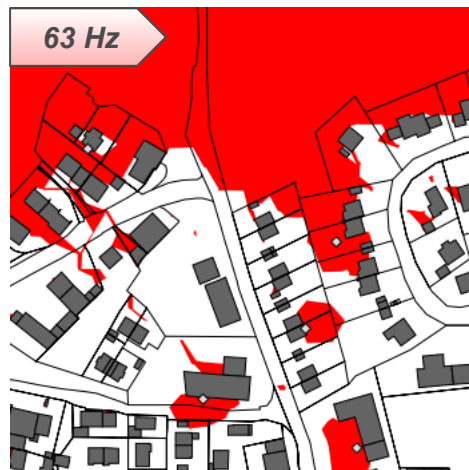




Überschreitung der Hörschwellenkurve mit Zuschlag der frequenzabhängigen Anhaltswerte gemäß Beiblatt zur DIN 45680 bei 50 Hz

in dB

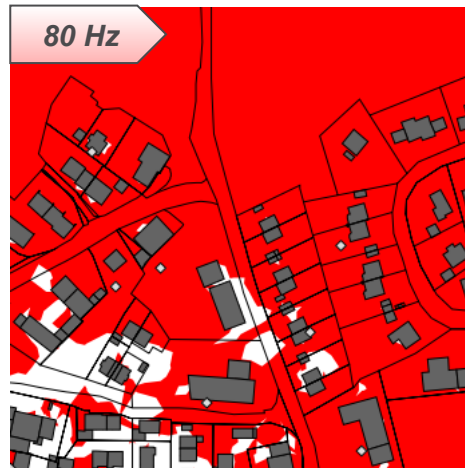
$\leq 40,5$
 $40,5 <$ ■



Überschreitung der Hörschwellenkurve mit Zuschlag der frequenzabhängigen Anhaltswerte gemäß Beiblatt zur DIN 45680 bei 63 Hz

in dB

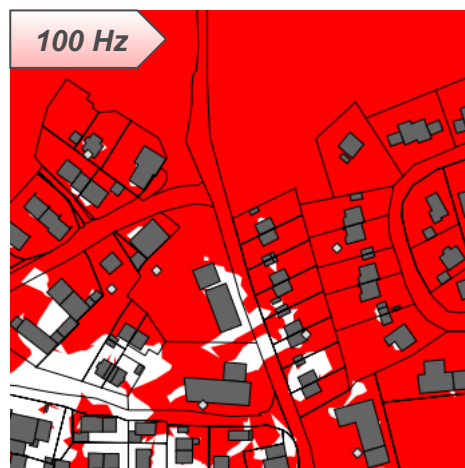
$\leq 33,5$
 $33,5 <$ ■



Überschreitung der Hörschwellenkurve mit Zuschlag der frequenzabhängigen Anhaltswerte gemäß Beiblatt zur DIN 45680 bei 80 Hz

in dB

$\leq 33,0$
 $33,0 <$ ■

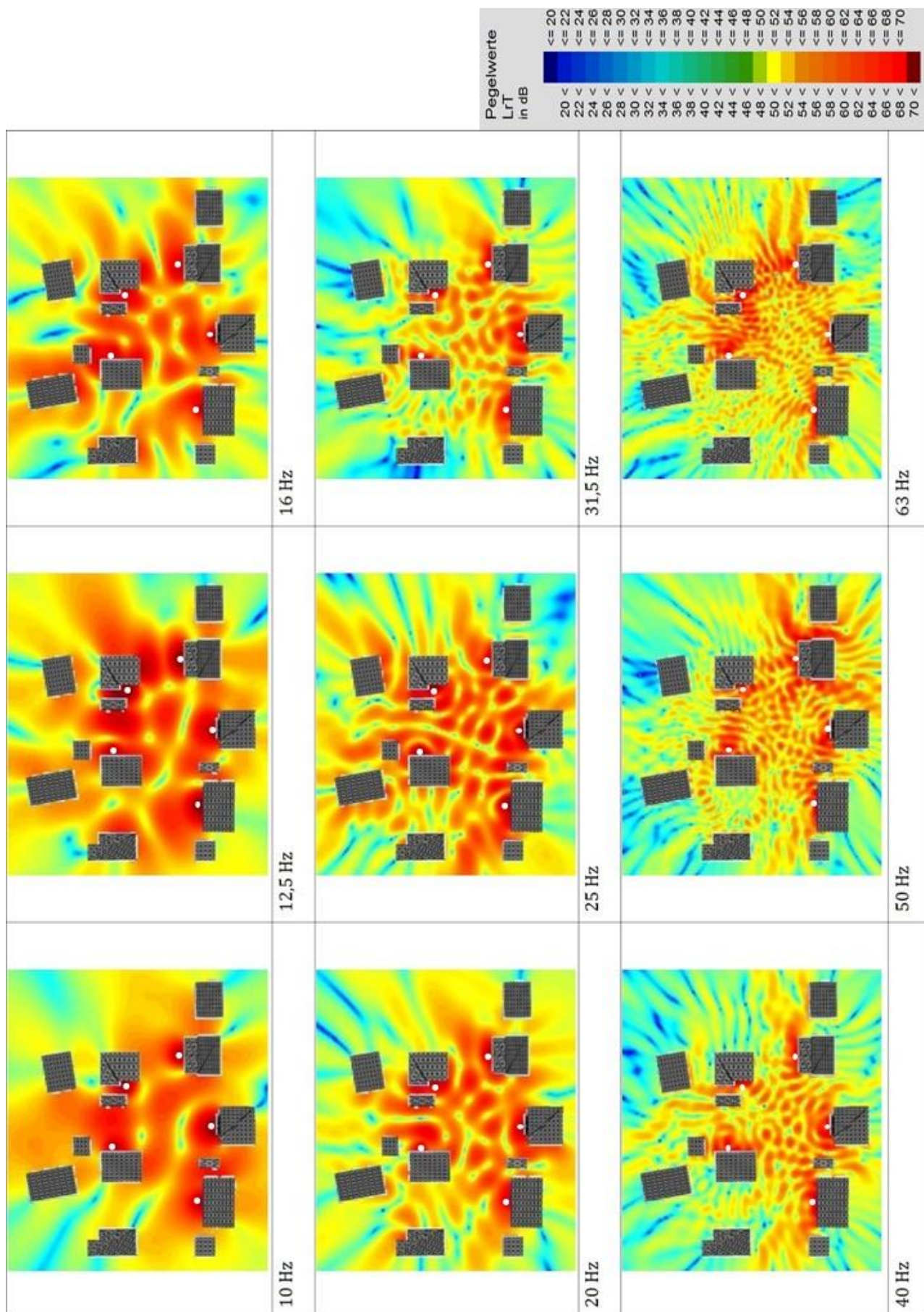


Überschreitung der Hörschwellenkurve mit Zuschlag der frequenzabhängigen Anhaltswerte gemäß Beiblatt zur DIN 45680 bei 100 Hz

in dB

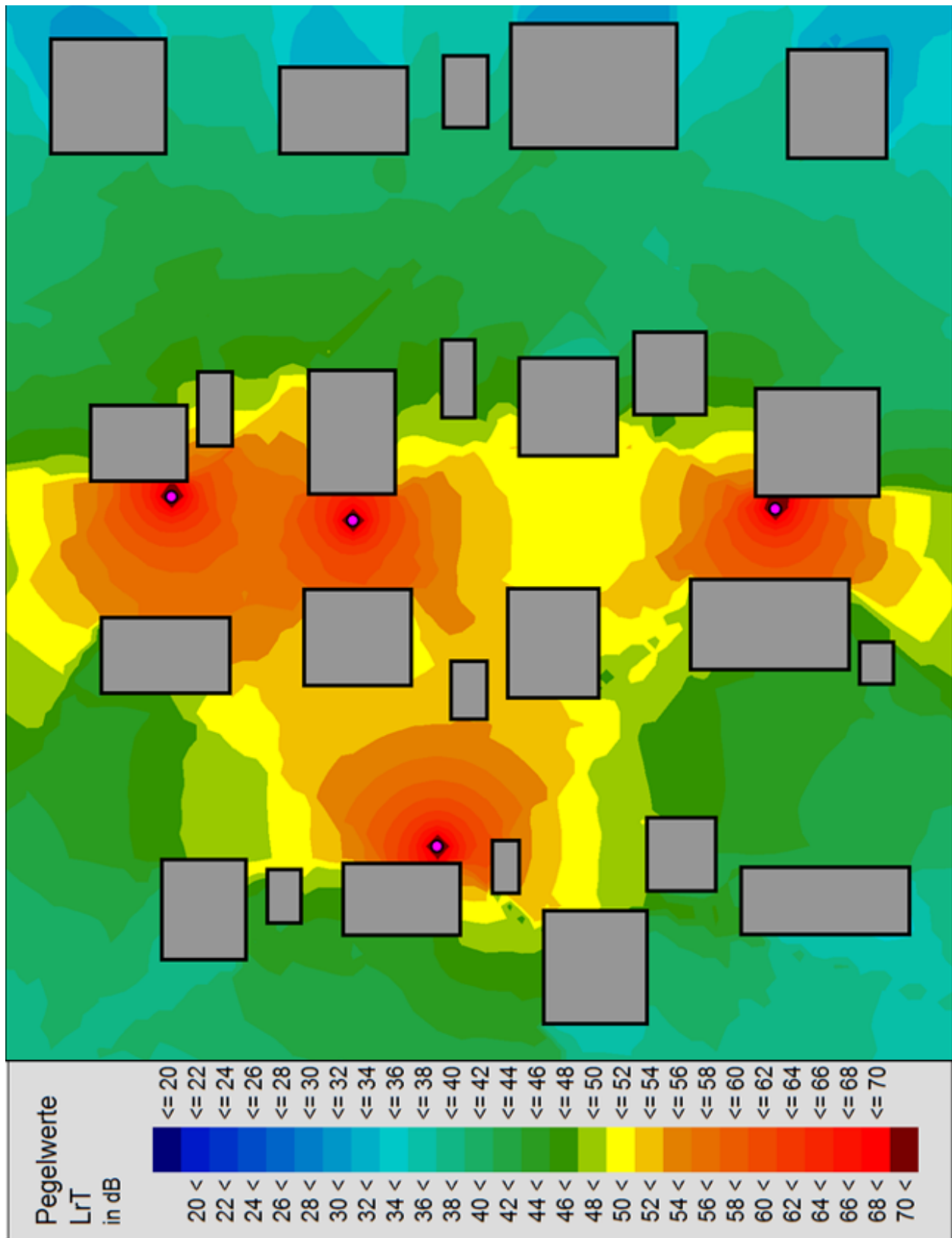
$\leq 33,5$
 $33,5 <$ ■

Anhang 4 Schallfeldsimulation mit Boundary Element Method (BEM)

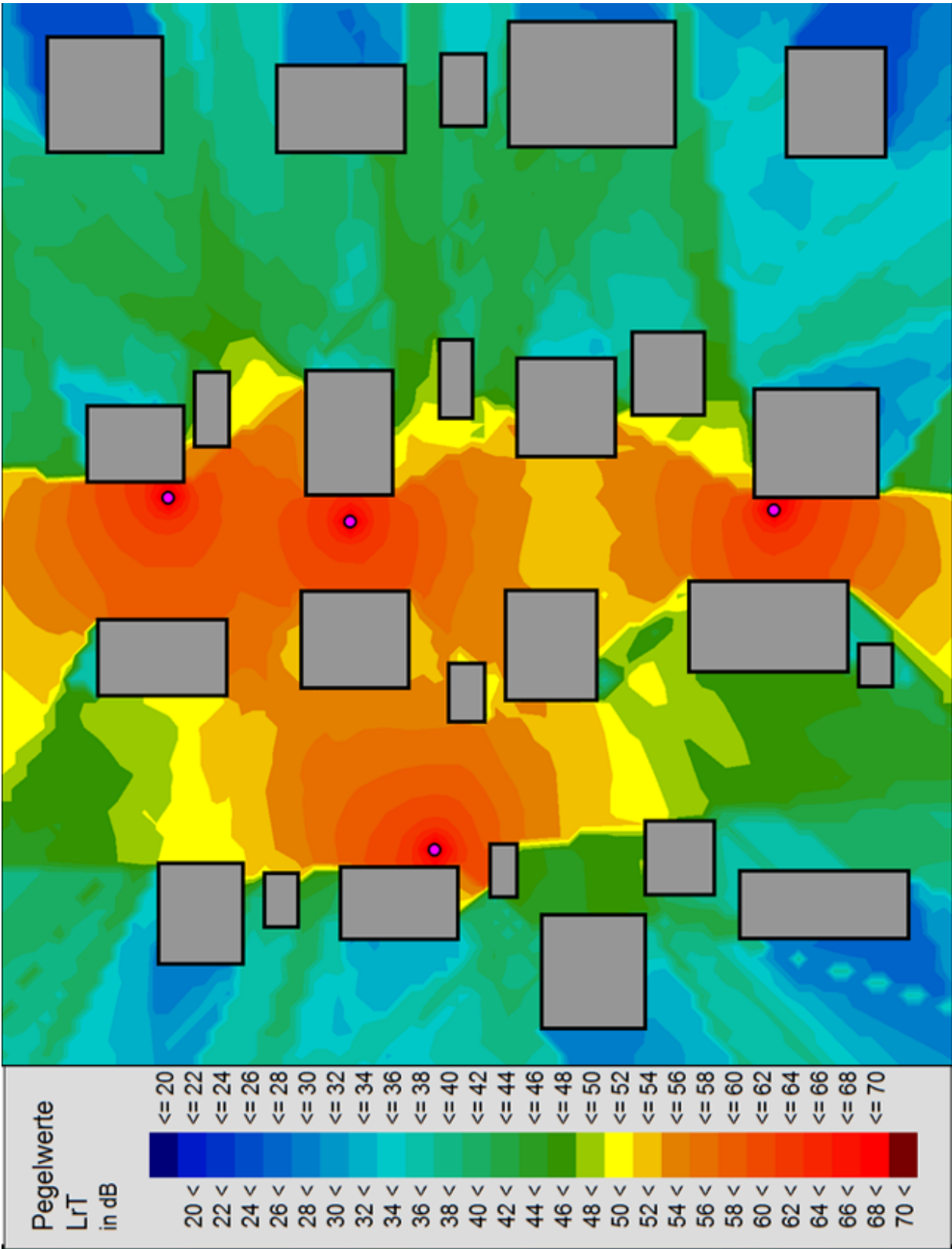


Anhang 5 Vergleichsberechnungen in einem Teilbaugelände (90 x 90 m², $f_{\text{Terz}} = 50$ Hz, 4 Luftwärmepumpen)

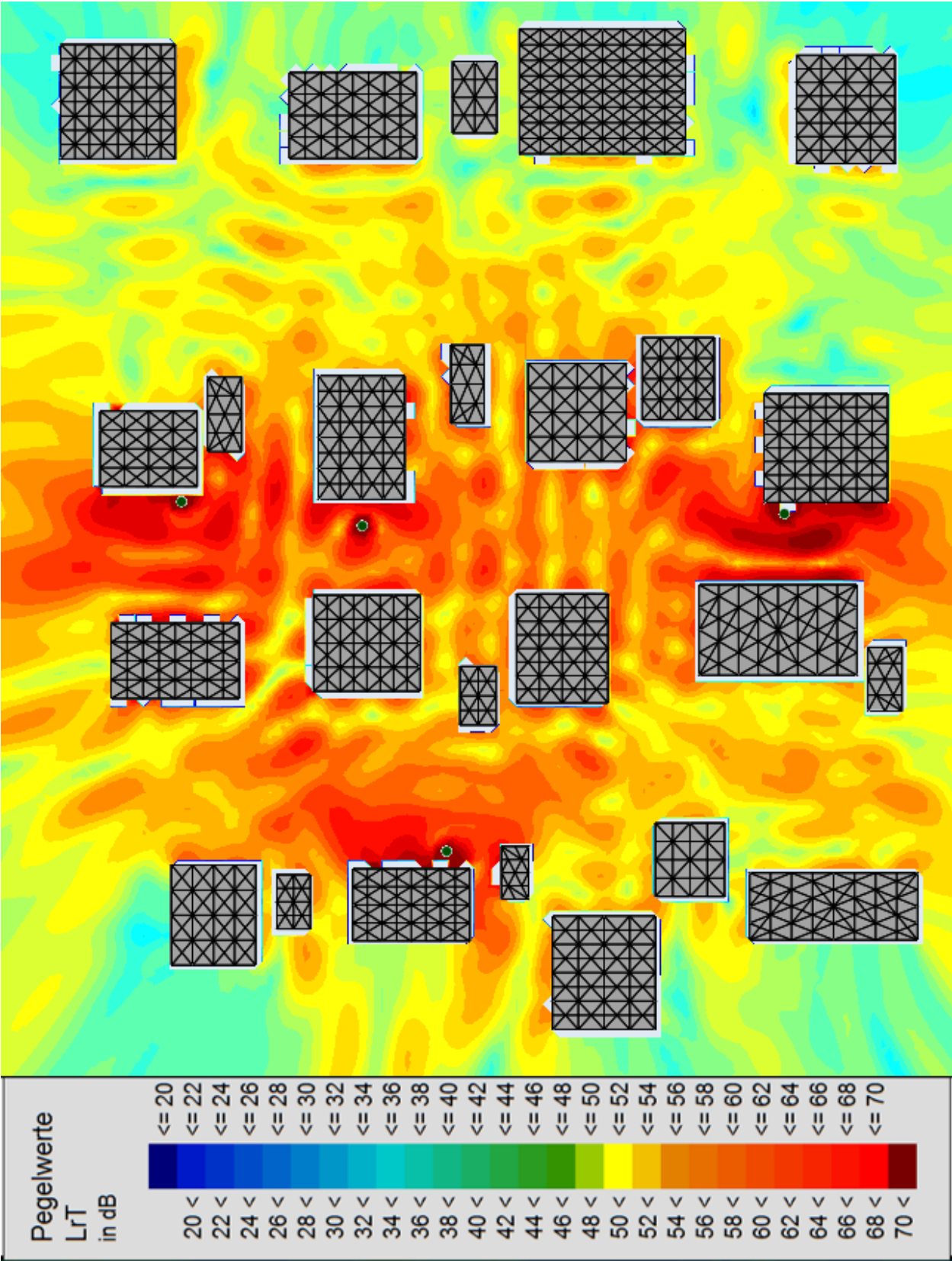
DIN ISO 9613-2



Nord 2000



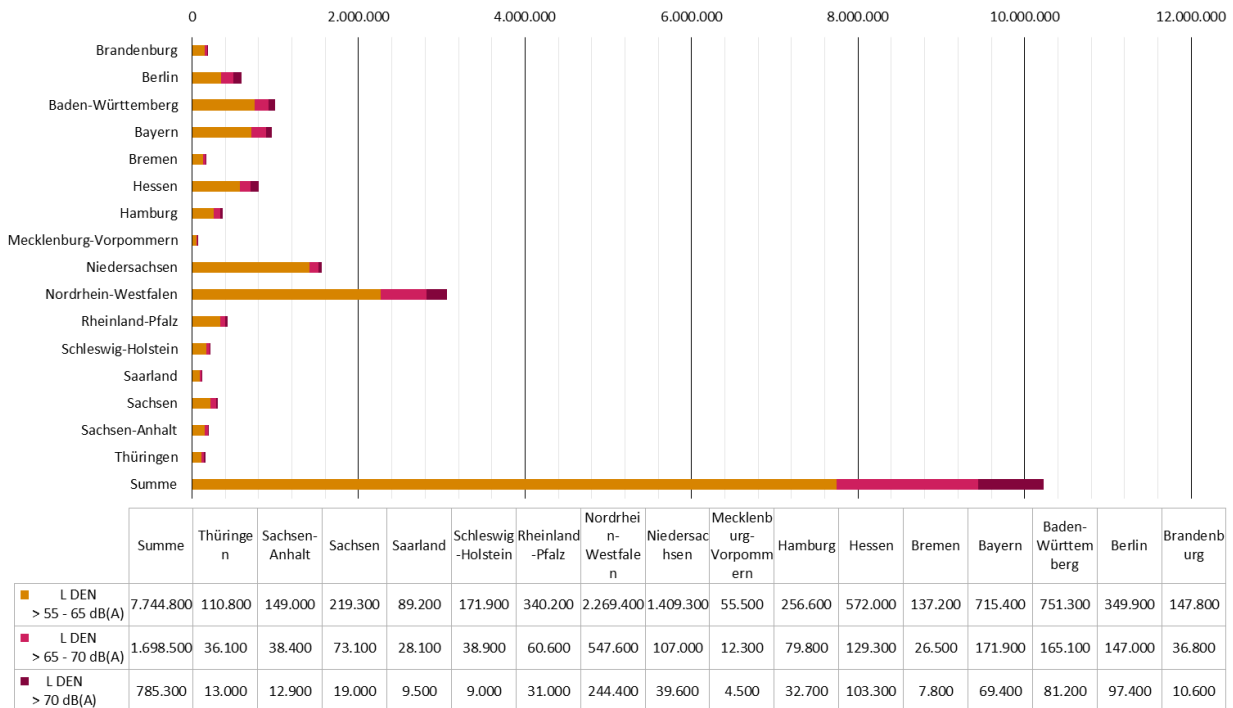
BEM



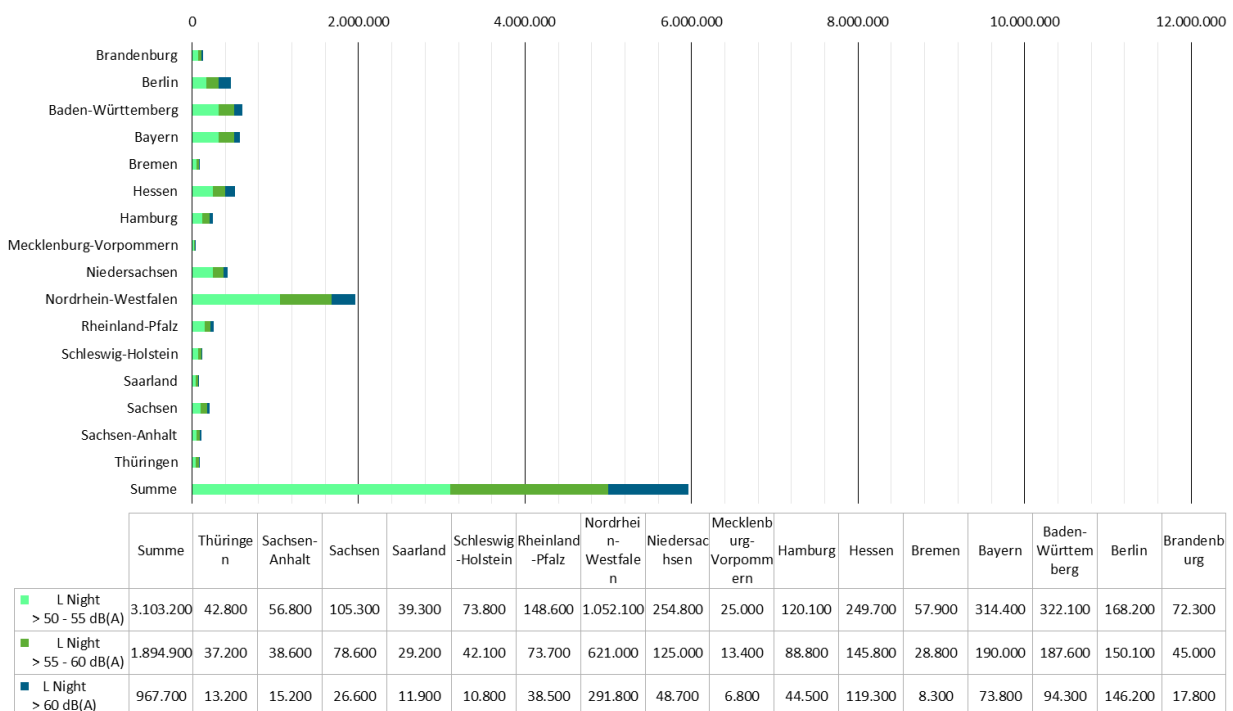
Anhang 6 Umgebungslärmsituation in Deutschland

Die Daten basieren auf der II. Kartierungsstufe nach EU-Umgebungslärmrichtlinie, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/laermkartierung-laermaktionsplanung>, (2016).

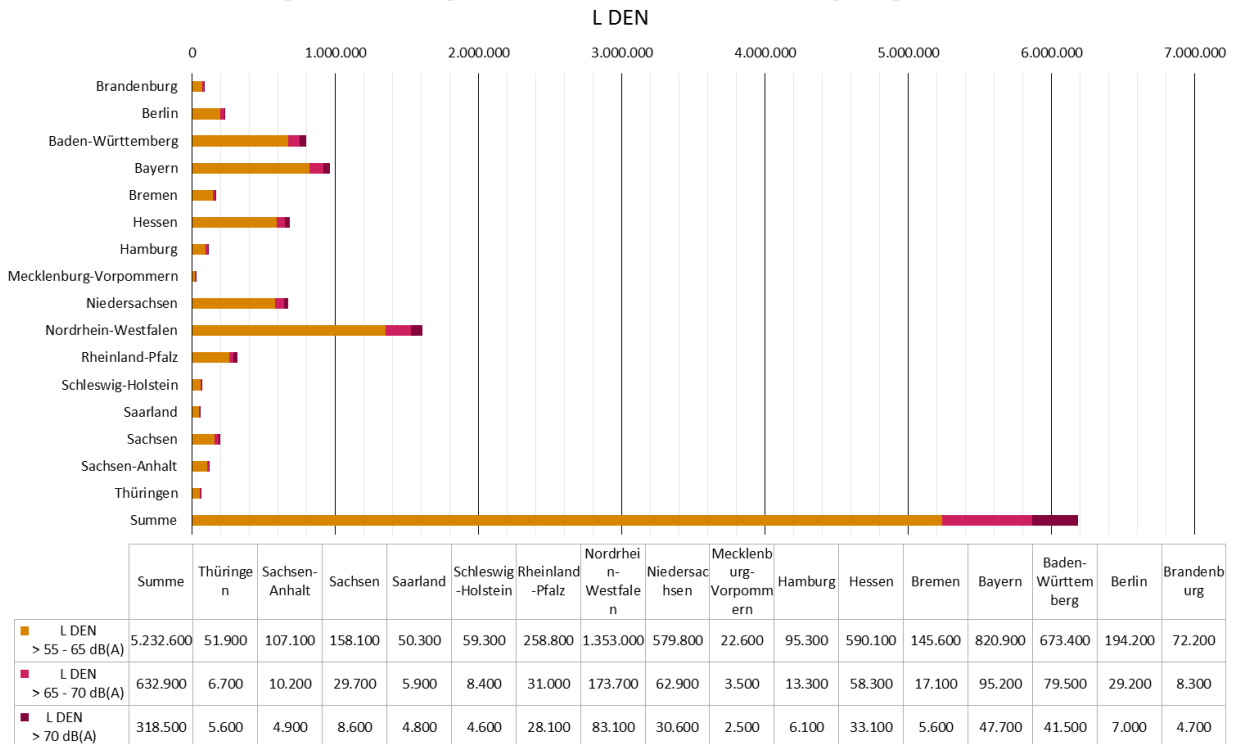
Belastung der Bevölkerung durch Straßenverkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie
L DEN



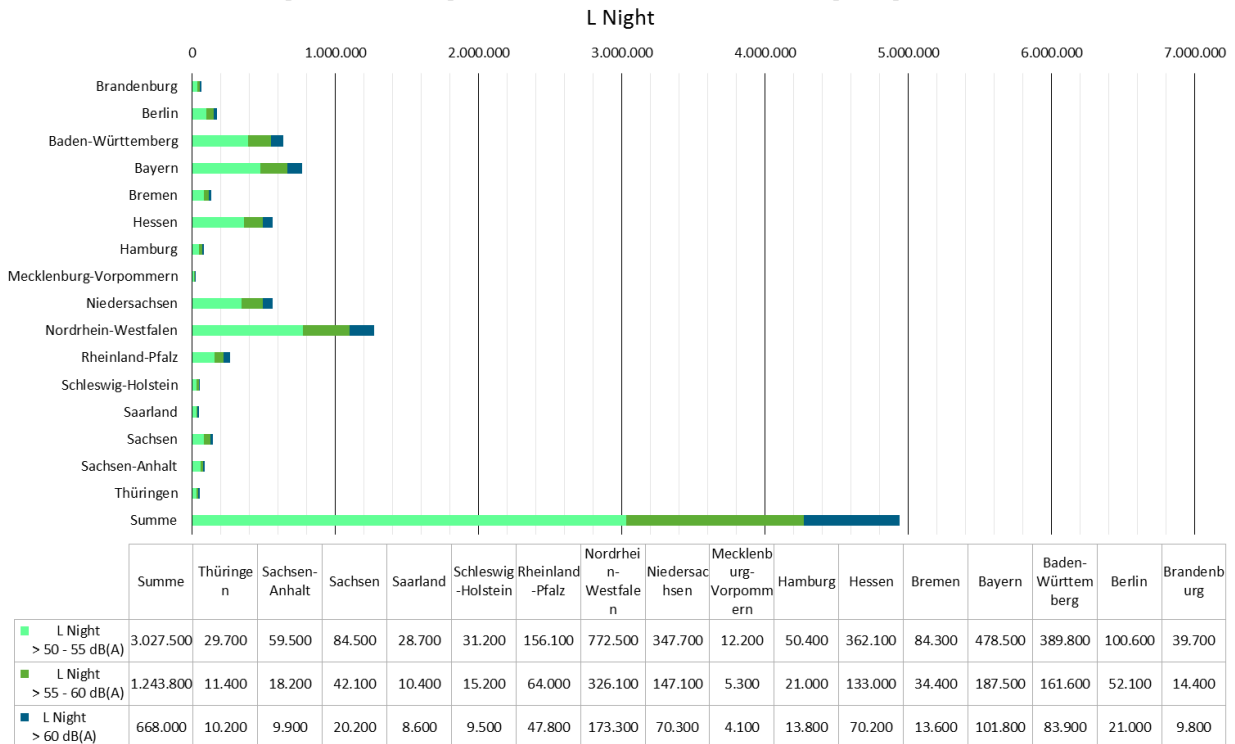
Belastung der Bevölkerung durch Straßenverkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie
L Night

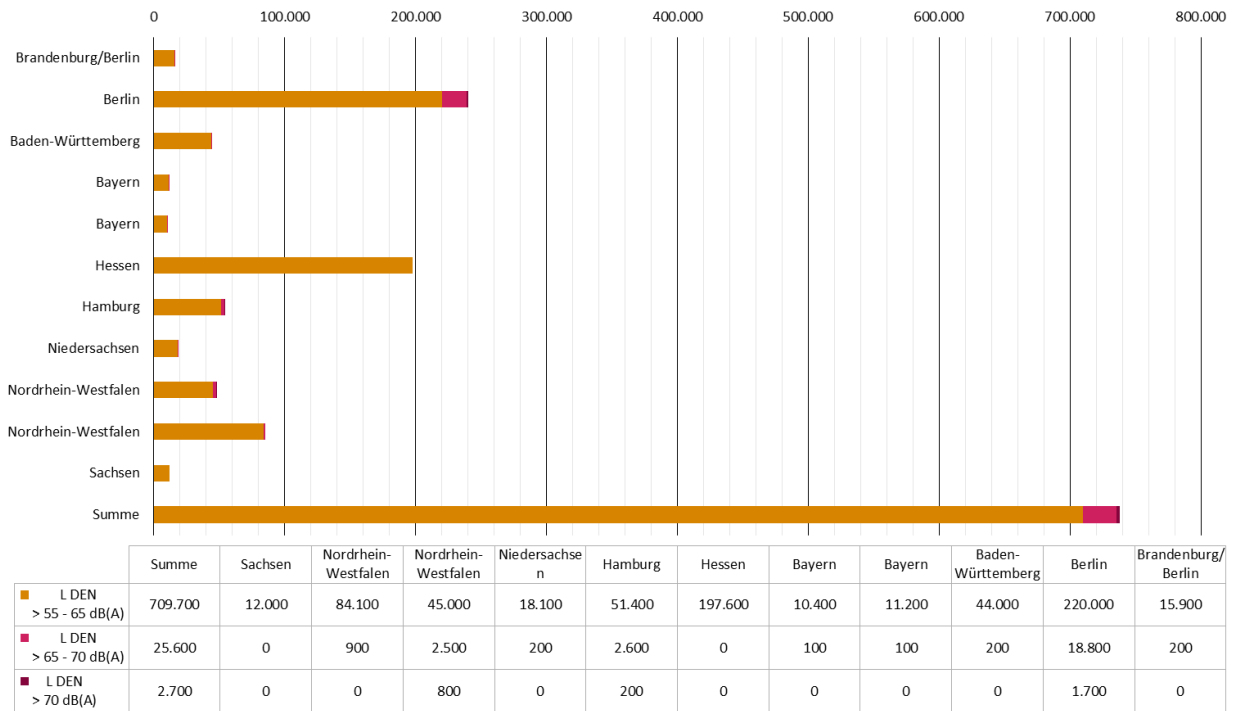
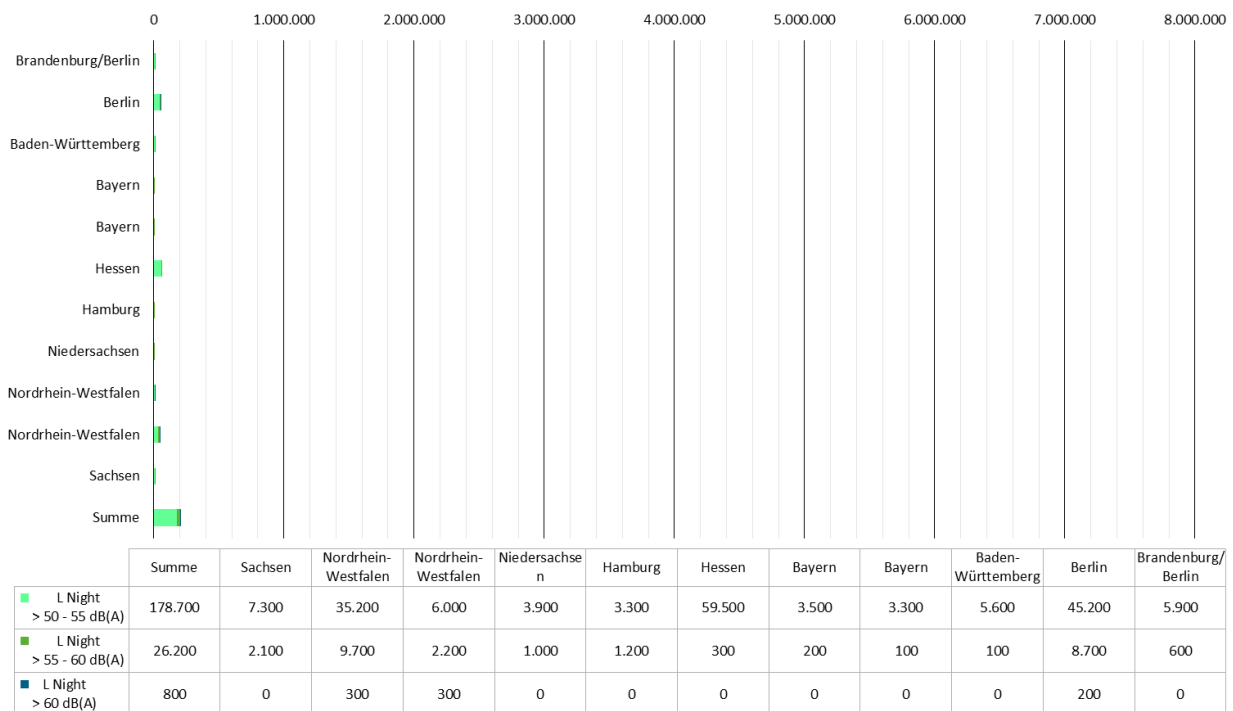


Belastung der Bevölkerung durch Schienenverkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie



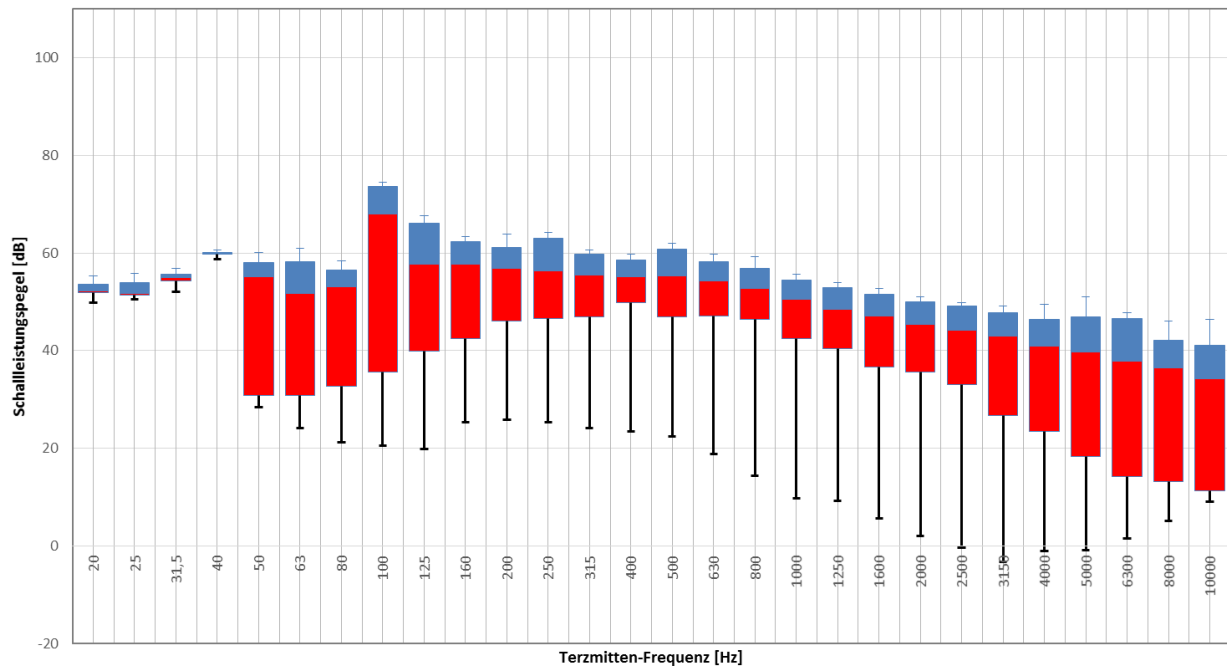
Belastung der Bevölkerung durch Schienenverkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie



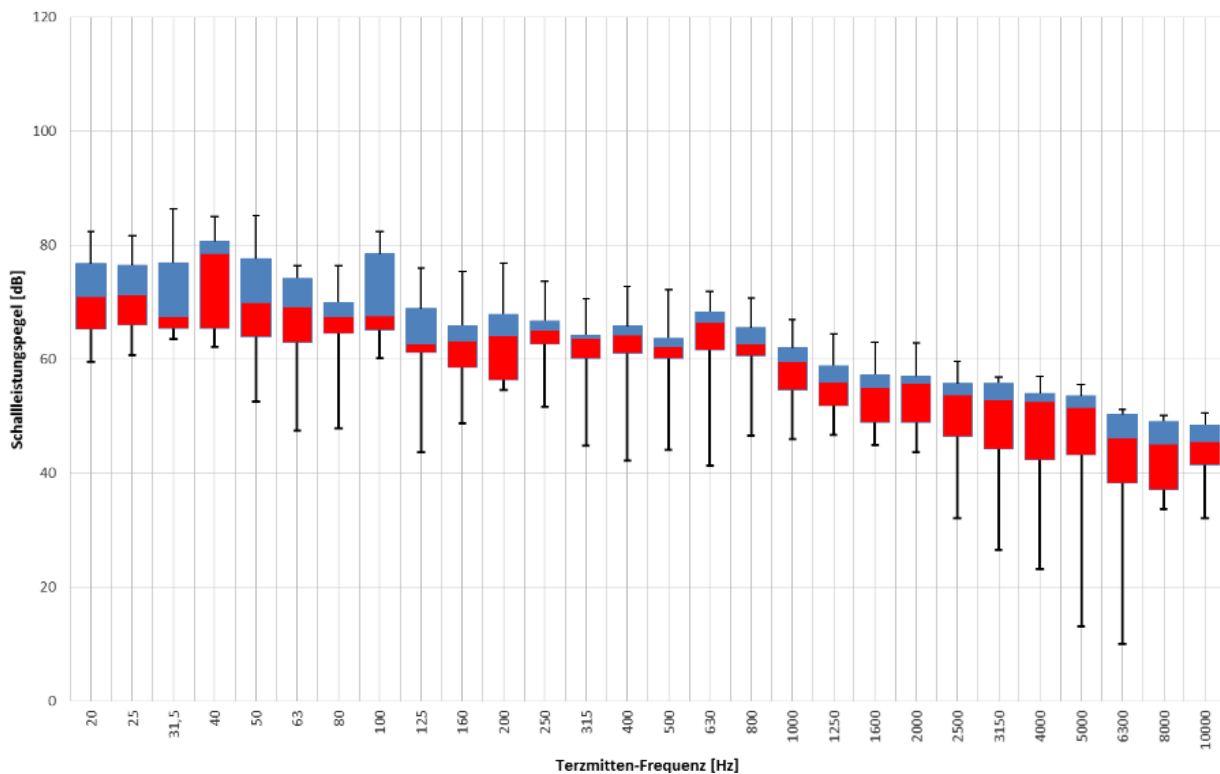
Belastung der Bevölkerung durch Flugverkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie
L DENBelastung der Bevölkerung durch Flugverkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie
L Night

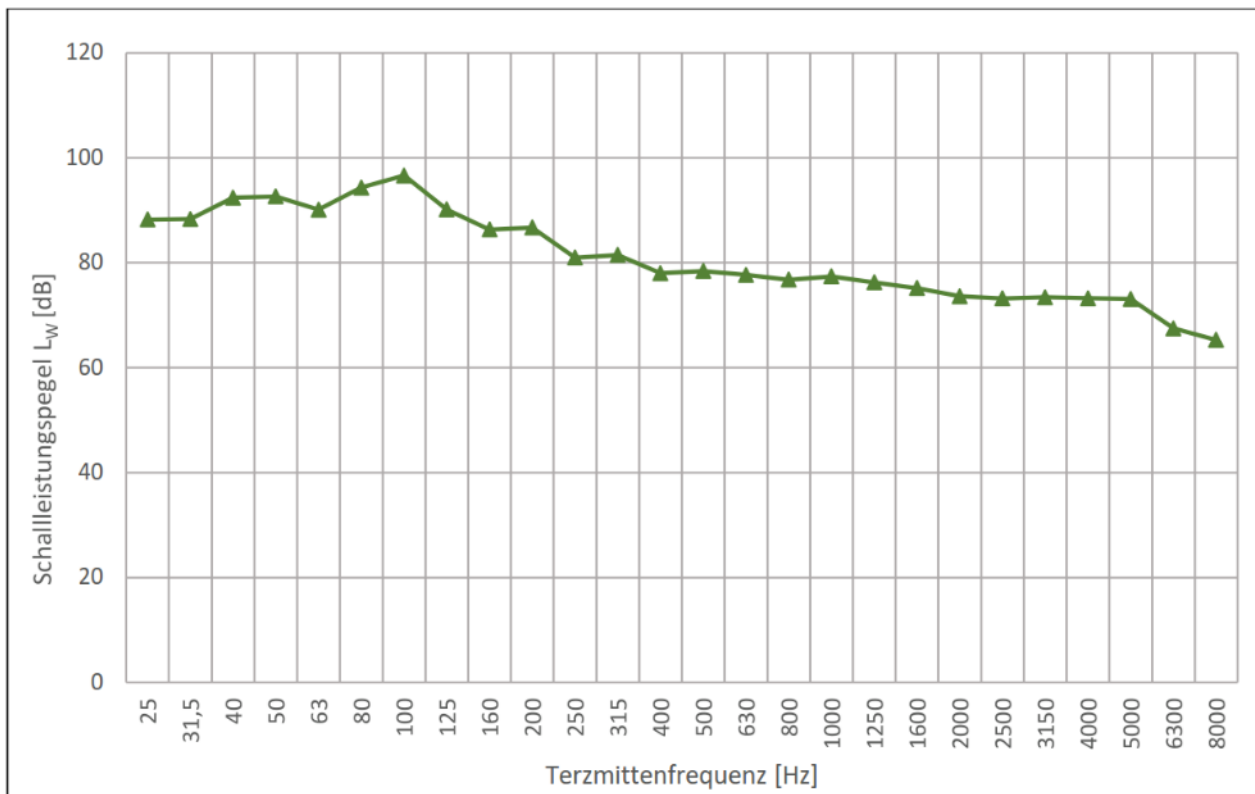
Anhang 7 Bekannte Frequenzspektren der Geräuschemissionen relevanter Geräuschquellen

Klimageräte (n = 13 Anlagen)



Luftwärmepumpen (n = 15 Anlagen)



BHKW

Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt [3], aus repräsentativen Messungen

Windenergieanlagen (n=40 Anlagen)