

TEXTE

69/2022

Abschlussbericht

Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land

von:

Sebastian Schmitter, Alexander Alaimo Di Loro,
Dominic Hemmer
deBAKOM GmbH, Odenthal

Dr. Dirk Schreckenber, Stephan Großarth
ZEUS GmbH, Hagen

Dr. Christoph Pörschmann
TH Köln, Köln

Dr. Till Kühner

Dr. Kühner GmbH, Langenfeld

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 69/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3717 43 110 0
FB000656

Abschlussbericht

Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land

von

Sebastian Schmitter, Alexander Alaimo Di Loro,
Dominic Hemmer
deBAKOM GmbH, Odenthal

Dr. Dirk Schreckenberger, Stephan Großarth
ZEUS GmbH, Hagen

Dr. Christoph Pörschmann
TH Köln, Köln

Dr. Till Kühner
Dr. Kühner GmbH, Langenfeld

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

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

deBAKOM GmbH
Bergstraße 36
51519 Odenthal

Abschlussdatum:

September 2021

Redaktion:

Fachgebiet I 2.4 Lärminderung bei Anlagen und Produkten, Lärmwirkungen
Steffen Körper

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2022

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

Kurzbeschreibung: Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land

Bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen steht das Thema Lärm häufig im Fokus der Diskussion. Dabei werden vielfältige Fragen aufgeworfen, die sowohl die Lärmstehung und -minderung als auch die Auswirkungen des Lärms auf die Gesundheit und Lebensqualität der Bevölkerung betreffen.

Die vorliegende Veröffentlichung „Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land“ beinhaltet die Ergebnisse eines Forschungsprojektes, welches die Geräuscheinwirkung durch Windenergieanlagen untersuchte. Dabei wurde der Fokus auf eine besondere Geräuschcharakteristik von Windenergieanlagen gelegt, die sogenannten amplitudenmodulierten Geräusche. Eine vielfach diskutierte These lautet, dass diese besondere Geräuschcharakteristik, die sich z. B. als „Wuschen“ beschreiben lässt, zu einer erhöhten Wahrnehmung und Belästigung bei den Anwohnenden führt. Ein wesentliches Ziel war die Erforschung in welcher Häufigkeit, Dauer und Stärke Amplitudenmodulationen von Windenergieanlagen verursacht werden, und ob diese in der umliegenden Nachbarschaft hör- und messbar sind.

Neben Messungen wurden deshalb Personen in der Nähe von Windenergieanlagen befragt. Die Bearbeitung der Fragestellung gliederte sich in fünf wesentliche Schwerpunktaufgaben:

- ▶ Langzeitschallmessungen im Emissions- und Immissionsbereich über einen Zeitraum von mindestens zwei bzw. sechs Wochen, die in fünf deutschlandweit verteilten Untersuchungsgebieten durchgeführt wurden.
- ▶ Infraschallmessungen im Zusammenhang mit der Amplitudenmodulation.
- ▶ Analyse der Messungen mit einem im Rahmen dieses Projektes entwickelten Verfahren zur Erkennung von Amplitudenmodulation.
- ▶ Befragungen bezüglich der Geräuschbelästigung von umliegenden Anwohnenden in allen fünf Untersuchungsgebieten.
- ▶ In drei Untersuchungsgebieten erfolgten zusätzlich Hörversuche.

Dabei wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- ▶ Immissionsseitig liegt der Median der Modulationstiefe zwischen 1,5 bis 2,5 dB.
- ▶ Nur in einem der fünf Untersuchungsgebiete konnte eine Leistungsabhängigkeit zwischen der Windenergieanlage und der Häufigkeit/Modulationstiefe festgestellt werden, verstärkt bei Querwindsituationen.
- ▶ In allen Untersuchungsgebieten wurde durch Windenergieanlagen verursachter Infraschall festgestellt. Die Pegel lagen dabei immer unter der gemäß DIN 45680 (Beuth 1997) definierten Hörschwelle.
- ▶ Die Lästigkeit im Hörversuch stieg mit zunehmender Modulationstiefe. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse, dass bereits die bloße Wahrnehmbarkeit einer Amplitudenmodulation die Lästigkeit erhöht.

Im Durchschnitt über alle Untersuchungsgebiete und Geräuschbelastungen hinweg empfanden die Teilnehmenden der Belästigungsbefragung die Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen als relativ gering. Sobald allerdings der Beurteilungspegel am Wohngebäude den Wert von ca. 35 dB(A) überschreitet, steigt der Anteil der belästigten bzw. hoch belästigten Personen stark an. Geräuschmerkmale wie „Wuschen“, „Rauschen“ und nicht-akustische Faktoren (Einstellung zu Windenergieanlagen und visuelle Beeinträchtigung) sind wesentliche Einflussgrößen der

Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen. Die Lärmbelästigung korrespondiert mit der Auftrittshäufigkeit von erkannten, stabil vorliegenden Amplitudenmodulationen.

Abstract: Noise effects of the use of land-based wind energy

Deliberations concerning the planning and approval of wind turbines often revolve around the issue of noise. A wide range of questions is raised that concern both noise generation and noise reduction as well as the impact of noise on the health and quality of life of the population.

The present publication, *Noise effects of the use of land-based wind energy*, contains the results of a research project that investigated the impact of wind turbine noise. The focus of the research was on a particular noise characteristic of wind turbines known as ‘amplitude-modulated noise’. A frequently discussed thesis is that this particular noise characteristic, describable for example as a ‘whoosh’ sound, leads to increased awareness of noise and annoyance among residents. A key aim of the research was to investigate the frequency, duration and intensity of amplitude modulations caused by wind turbines, and to determine whether these are audible and measurable in the surrounding vicinity.

Hence, in addition to measurements, the people who live in the vicinity of wind turbines were interviewed as well. The work to address this question was divided into five priority tasks:

- ▶ Long-term sonic measurements in the emission and immission area over a period of at least two and up to six weeks, conducted in five study areas distributed throughout Germany.
- ▶ Infrasound measurements in association with amplitude modulation.
- ▶ Analysis of the measurements using a method for the detection of amplitude modulation that was developed within the scope of this project.
- ▶ Surveys of noise annoyance on the part of surrounding area residents in all five study areas.
- ▶ Listening tests were also carried out in three of the study areas.

The findings gleaned were as follows:

- ▶ The median modulation depth in the immission areas falls between 1.5 and 2.5 dB.
- ▶ Only in one of the five study areas, a dependency between the power of wind turbine and the modulation depth could be identified; this dependency was more pronounced in crosswind situations.
- ▶ Infrasound caused by wind turbines was detected in all of the study areas. The levels were always below the auditory threshold given in DIN 45680 (Beuth 1997).
- ▶ In the listening test, the level of annoyance grew as the modulation depth increased. The results also showed that even the mere perceptibility of an amplitude modulation increases the level of annoyance reported by test subjects.

On average, across all study areas and noise levels, participants in the annoyance survey found that the noise annoyance caused by wind turbines was relatively low. Once the noise rating level at a residential building exceeds a value of approx. 35 dB(A), however, there is a sharp rise in the percentage of respondents who report that they feel annoyed or highly annoyed. Noise characteristics such as ‘whooshing’, ‘rushing’ and non-acoustic factors (attitude towards wind turbines and visual impact) are factors that have a considerable influence on the noise annoyance caused by wind turbines. Reports of noise annoyance correspond with the frequency of occurrence of identified, stable amplitude modulations.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis.....	17
Abkürzungsverzeichnis.....	19
Zusammenfassung.....	21
Summary.....	33
1 Einleitung.....	44
2 Konzeption der Studie.....	45
3 Untersuchungsgebiete.....	46
4 Messkampagnen.....	48
4.1 Messdurchführung.....	48
4.2 Erfassung der Messdaten.....	50
4.3 Datenauswertung.....	51
4.3.1 Grundlagen.....	51
4.3.2 Ergebnisse.....	51
4.3.3 Auffälligkeiten bei der Datenauswertung in den UG 1 und UG 5.....	54
4.4 Amplitudenmodulation.....	57
4.4.2 Vergleich mit anderen Algorithmen zur Erfassung von AM.....	60
4.4.3 Auswertung der Amplitudenmodulation.....	61
4.4.3.1 Kenngrößen.....	61
4.4.3.2 Abhängigkeit zwischen AM und den Betriebszuständen der Windenergieanlagen.....	63
4.4.3.3 Meteorologische Einflüsse.....	64
4.4.3.4 Windscherung als Quellmechanismus.....	66
4.4.4 Analyse der AM mit dem Taktmaximalpegelverfahren nach TA Lärm.....	68
4.4.4.1 Grundlagen der Auswertung und Limitationen.....	68
4.4.4.2 Vergleich AM-Verfahren mit Taktmaximalpegelverfahren.....	69
5 Infraschallmessungen.....	71
5.1 Was ist Infraschall?.....	71
5.2 Entstehung von Infraschall.....	71
5.3 Aufgabenstellung.....	71
5.4 Messungen im Untersuchungsgebiet 5.....	72
5.4.1 Messdurchführung.....	72
5.4.2 Linien im Schalldruckspektrum.....	73
5.4.2.1 Frequenzgang und Vertrauensbereiche.....	75

5.4.2.2	Unsicherheiten.....	76
5.4.3	Periodische Druckschwankungen	76
5.4.4	Messergebnisse Langzeitmessung auf Bodenplatte.....	77
5.4.4.1	Häufigkeitsverteilungen tieffrequenter Schall.....	77
5.4.4.2	Bewertung der Häufigkeitsverteilungen.....	81
5.4.4.3	Häufigkeitsverteilungen Hörschall.....	81
5.4.4.4	Zusammenhang zwischen Hör- und Infraschall.....	83
5.5	Erweiterung der Untersuchungen auf UG 1 bis 4.....	85
5.5.1	Messungen mit Klasse-1-Mikrofon	85
5.5.2	Vergleich der Messsysteme	85
5.5.3	Mittelungspegel nach Lastzuständen	87
5.5.3.1	Unsicherheiten und Frequenzgang.....	90
5.5.3.2	Bewertung der lastabhängigen Mittelungspegel	90
5.6	Terzspektren	90
5.6.1	Terzspektren im UG 5	90
5.6.2	Terzspektren in UG 1 bis 4	91
5.6.3	Frequenzgang und Unsicherheiten.....	94
5.6.4	Bewertung der Terzspektren	94
5.7	Einordnung der Ergebnisse	94
5.7.1	Technische Aspekte der Messung.....	94
5.7.2	Hörschwellen und die Einordnung der Ergebnisse	94
5.8	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	95
6	Belästigungsbefragung und –auswertung.....	96
6.1	Befragungskonzept	96
6.2	Befragungsinhalte	96
6.2.1	Fragebogen der Hauptbefragung.....	96
6.2.2	Befragungsinhalte der vertiefenden Befragung	97
6.3	Methodik.....	97
6.3.1	Methodik der Hauptbefragung.....	97
6.3.2	Methodik der Vertiefungsbefragung	98
6.3.3	Methodik der Schallimmissionsprognose.....	99
6.4	Ergebnisse der Hauptbefragung	99
6.4.1	Ergebnisse Block J: Angaben zur Person.....	99
6.4.2	Ergebnisse Block A: Gegenwärtiges Wohnumfeld („Häusliche Wohnsituation“)	99
6.4.3	Ergebnisse Block B: Belästigung durch Umgebungslärm in den letzten 12 Monaten....	100

6.4.4	Ergebnisse Block C: Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsgeräuschen	102
6.4.5	Ergebnisse Block D: Gedanken, Gefühle während der letzten Wochen (<i>Perceived Stress Scale, PSS-10</i>).....	102
6.4.6	Ergebnisse Block E: Folgen des Lärms von Windenergieanlagen (Aktivitätenstörungen).....	104
6.4.7	Ergebnisse Block F: Meinungen zu und Belästigung durch Windenergieanlagen	106
6.4.7.1	Ergebnisse Block F: Einstellung zu Windenergie allgemein und vor Ort	107
6.4.7.2	Ergebnisse Block F: Visuelle Belästigung durch Windenergieanlagen.....	110
6.4.7.3	Ergebnisse Block F: Aktivitäten gegen Windenergieanlagen -Lärm, bzw. Verbindung zu Windenergieanlagen	110
6.4.8	Ergebnisse Block G: Mögliche Entwicklungen/ Veränderungen seit Errichtung der Windenergieanlagen in Ihrer Wohnumgebung	110
6.4.9	Ergebnisse Block H: Beschreibung der Geräusche von Windenergieanlagen	111
6.4.9.1	Kovarianzanalyse zu Gebietsunterschieden in der Lärmbelästigung durch Windenergieanlagengeräusche	112
6.4.9.2	Korrespondenz zwischen Gebietsunterschieden in der Lärmbelästigung, beurteilten Geräuschmerkmalen und Kenngrößen der stabilen, periodischen AM ..	112
6.4.9.3	Korrelation zwischen Lärmbelästigung durch Windenergieanlagengeräusche und wahrgenommenen Geräuschmerkmalen	114
6.4.10	Ergebnisse Block I: Lüftungsgewohnheiten, Fensterart, ruhiger Raum.....	114
6.4.11	Deskriptive Statistik der Geräuschpegeldaten.....	116
6.4.12	Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen pro Beurteilungspegelklasse	117
6.4.13	Korrelationen mit Beurteilungspegel und Lärmbelästigung.....	118
6.4.14	Expositions-Wirkungsbeziehungen zum WEA-Lärm	121
6.4.14.1	Expositions-Wirkungsanalysen zur WEA-Lärmbelästigung	121
6.4.14.2	Regressionsmodelle zum Anteil hoch belästigter Personen.....	121
6.5	Ergebnisse der vertiefenden Interviews	125
6.5.1	Einstellungen zu Windenergieanlagen	126
6.5.2	Auswirkungen von Windenergieanlagen in der Nähe von Wohngebieten	127
6.5.3	Änderungen durch Bau der Windenergieanlagen	127
6.5.4	Begleiterscheinungen	128
6.5.5	Wahrnehmung von und Störung durch WEA-Geräusche	128
6.5.6	Beschreibung der Geräuschcharakteristika	128
6.6	Schlussfolgerung aus den Befragungsergebnissen	129
6.6.1	Schlussfolgerung zu den Ergebnissen der Hauptbefragung	129
6.6.2	Schlussfolgerung zu den Ergebnissen der vertiefenden Befragung	131

6.7	Diskussion und Einordnung der Befragungsergebnisse	132
7	Hörversuche	136
7.1	Stimuli	136
7.2	Aufbau.....	138
7.3	Durchführung.....	138
7.3.1	Hörversuchsorte	139
7.3.2	Versuchsteilnehmende	139
7.4	Ergebnisse	139
7.4.1	Auswertungen zur konstanten Amplitudenmodulation.....	140
7.4.1.1	Varianzanalyse	140
7.4.1.2	Mittelwerte und Konfidenzintervalle	140
7.4.1.3	Regressionsanalyse.....	142
7.4.2	Auswertungen zu zeitveränderlichen Amplitudenmodulationen	143
7.4.2.1	Varianzanalyse	143
7.4.2.2	Mittelwerte und Konfidenzintervalle	143
7.4.2.3	Regressionsanalyse.....	145
7.4.3	Vergleich mit anderen Studien	145
7.5	Zusammenfassung	145
8	Abschlussdiskussion	146
9	Forschungsbedarf.....	149
10	Quellenverzeichnis	150
A	Windenergieanlagen als Geräuschquelle.....	154
A.1	Grundsätzliches.....	154
A.2	Wechselwirkung Rotorblatt und Mast.....	154
A.2.1	Linien im Spektrum	154
A.2.2	Pegel der Linien.....	155
A.2.3	Beiträge zum Hörschall	155
A.2.4	Verbreiterung der Linien.....	155
A.3	Strömungsgeräusche an den Rotorblättern	156
A.3.1	Aerodynamik am Rotorblatt	156
A.3.2	Strömungsgeräusche	156
A.3.3	Amplitudenmodulationen.....	157
A.4	Sonstige Geräusche.....	157
B	Messergebnisse für alle Untersuchungsgebiete	158
B.1	Untersuchungsgebiet 1	159

B.2	Untersuchungsgebiet 2	163
B.3	Untersuchungsgebiet 3	167
B.4	Untersuchungsgebiet 4	171
B.5	Untersuchungsgebiet 5	175
C	Amplitudenmodulation	180
C.1	Algorithmus.....	180
C.1.1	Auswertung von Amplitudenmodulation	181
D	Belästigungsbefragung	196
D.1	Fragebogen Hauptbefragung	196
D.2	Leitfaden für Vertiefungsinterviews	207
D.3	Tabelle mit Mittelwerten und Standardabweichungen für die wichtigsten Fragebogenitems und berechneten Scores	209
D.4	Häufigkeitstabellen sonstige Variablen	210
D.5	Ergebnisse der Regressionsrechnungen zum Anteil der belästigten bzw. hoch belästigten Personen (Expositions-Wirkungsanalysen).....	211
D.6	Vertiefungsinterview: Ergebnisse der Wortpaarvergleiche.....	214
E	Hörversuche - Details zu den dargebotenen Stimuli.....	215
F	Infraschallmessungen.....	217
F.1	Messsysteme.....	217
F.1.1	Prüfung der Schallmesstechnik.....	217
F.1.2	Ergebnisse der Kalibrierung	218
F.2	Auswertung der Messungen aus Bodenplatte.....	229
F.2.1	Messzeiten	229
F.2.2	G-Bewertung und Hörschwelle	229
F.2.3	Frequenzbänder	229
F.2.4	Bestimmung der Drehzahl der WEA in Abschnitt 5.4.2	229
F.3	Vergleich Messungen mit Klasse 1 Mikrophon auf Stativ und Infraschallmikrophon auf Bodenplatte	230
F.3.1	Einfluss von lokalem Wind auf Messergebnisse	231
F.3.2	Differenzspektren zwischen Messungen auf Bodenplatte und Stativ	234
F.3.3	Weitere Differenzspektren bei Anwendung verschiedener Mikrofone	236
F.3.4	Unsicherheiten und Vertrauensbereiche	242

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus	21
Abbildung 2: Lage der Untersuchungsgebiete in Deutschland	22
Abbildung 3: Exemplarischer Pegelschrieb bei vorliegender Amplitudenmodulation	23
Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung Modulationstiefe ΔL_{AM} im UG 2 nach Anlagenleistung klassiert	24
Abbildung 5: Spektrum des Schalldrucks	26
Abbildung 6: Prozentanteil hoch belastigter Personen (% HA) durch Windenergieanlagen insgesamt.....	29
Abbildung 7: Effektstärke (Odds ratio) der Einflussgrößen der Windenergieanlagen-Lärmbelästigung insgesamt	30
Abbildung 8 : Lästigkeit zeitinvariante Amplitudenmodulationen	32
Figure 9: Schematic representation of the measurement set-up	33
Figure 10: Location of the study areas in Germany	34
Figure 11: Sample fluctuation in volume levels due to amplitude modulation	35
Figure 12: Frequency distribution of modulation depth ΔL_{AM} in Study Area 2, classified by turbine output	36
Figure 13: Spectrum of sound pressure	37
Figure 14: Percentage of persons who are highly annoyed (% HA) by wind turbine noise, total.....	40
Figure 15: Strength of effect (odds ratio) of the influencing variables of noise pollution due to wind turbines overall.....	41
Figure 16 : Annoyance of time-invariant amplitude modulations	43
Abbildung 17: Lage der Untersuchungsgebiete in Deutschland	46
Abbildung 18: Schematische Darstellung des Messaufbaus	48
Abbildung 19: Messaufbau im Emissionsbereich der Windenergieanlagen.....	49
Abbildung 20: Messaufbau im Immissionsbereich der Windenergieanlagen.....	49
Abbildung 21: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des Windparks im UG 4	52
Abbildung 22: 10-min-Mittelungspegel über mittlere Windgeschwindigkeit des Windparks im UG 4	52
Abbildung 23: Mitwind, Schmalbandspektren (Auflösung 2,9 Hz, A-bewertet)	53
Abbildung 24: Exemplarischer Pegel-Zeit-Verlauf im UG 1	55
Abbildung 25: A-bewertete gemittelte Mitwind-Schmalbandspektren im UG 5 in 0,5 m/s Klassen	56
Abbildung 26: Exemplarischer Pegelschrieb bei vorliegender Amplitudenmodulation	57
Abbildung 27: Emissionsseitige 2D-Auftrittshäufigkeit (Modulationsfrequenz vs. WEA- Drehzahl)	58
Abbildung 28: Emissionsseitige 2D-Auftrittshäufigkeit (Modulationsfrequenz vs. WEA-Drehzahl) .	59
Abbildung 29: Modulationstiefe vs. Leistung Immission (UG 2 oben, UG 4 unten).....	64
Abbildung 30 Häufigkeitsverteilung ΔL_{AM} klassiert nach Windrichtung und Leistung UG 1 bis UG 4	65
Abbildung 31 Häufigkeitsverteilung ΔL_{AM} klassiert nach Windrichtung und -geschwindigkeit UG 5	66
Abbildung 32: Modulationstiefe gegen Scherparameter im Emissionsbereich im UG 1	67
Abbildung 33: Modulationstiefe gegen Scherparameter im Immissionsbereich im UG 2.....	67
Abbildung 34: Vergleich 10-Hz-Pegelverlauf an einer Autobahn mit Windenergieanlagen.....	68
Abbildung 35: Vergleich AM-Verfahren mit Taktmaximalpegelverfahren (UG 2)	69
Abbildung 36: Vergleich AM-Verfahren mit Taktmaximalpegelverfahren (UG 4)	70

Abbildung 37: Vergleich AM-Verfahren mit Taktmaximalpegelverfahren (UG 5)	70
Abbildung 38: Infraschallmikrofon auf Bodenplatte	72
Abbildung 39: Schalldruckspektrum mit Einzellinien	73
Abbildung 40: Schalldruckspektrum mit Einzellinien, Vergrößerung.....	74
Abbildung 41: Zeitverlauf des Schalldruckpegels.....	77
Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der G-bewerteten Pegel im UG 5	78
Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band bis 3 Hz im UG 5	79
Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band bis 4 bis 7 Hz im UG 5	79
Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band 8 bis 20 Hz im UG 5	80
Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band bis 25 bis 80 Hz im UG 5	80
Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der A-bewerteten Pegel im UG 5.....	82
Abbildung 48: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band 125-Hz-Band im UG 5	83
Abbildung 49: Terzspektrern im Hörschallbereich im UG 5	84
Abbildung 50: Pegel Hörschall gegen Infraschall	85
Abbildung 51: Messung auf Bodenplatte neben der Messung auf einem Stativ.....	86
Abbildung 52: 80%-Perzentil der Differenzspektrern (Stativ-Bodenplatte) für verschiedene Windgeschwindigkeiten	87
Abbildung 53: Gemessenes Terzspektrum für geringe Last, mittlere und große Last, UG 5	91
Abbildung 54: Berechnetes Terzspektrum für Hintergrund und WEA bei Nennleistung, UG 1.....	92
Abbildung 55: Berechnetes Terzspektrum für Hintergrund und WEA bei Nennleistung, UG 2.....	92
Abbildung 56: Berechnetes Terzspektrum für Hintergrund und WEA bei Nennleistung, UG 3.....	93
Abbildung 57: Berechnetes Terzspektrum für Hintergrund und EA bei Nennleistung, UG 4	93
Abbildung 58: Prozentanteil hoch belastigter Personen (% HA) durch Windenergieanlagen insgesamt.....	122
Abbildung 59: Prozentanteil im Außenbereich hoch belastigter Personen (% HA) durch Windenergieanlagen	123
Abbildung 60: Prozentanteil im Innenbereich hoch belastigter Personen (%HA) durch Windenergieanlagen	124
Abbildung 61: Effektstärke (Odds Ratio) der Einflussgrößen der WEA-Lärmbelastigung.....	125
Abbildung 62: Einstellungen zu Windenergieanlagen im Vergleich zwischen den Untersuchungsgebieten (n=25).....	127
Abbildung 63: Lästigkeit zeitinvariante Amplitudenmodulationen	141
Abbildung 64: Lästigkeit zeitveränderliche Amplitudenmodulationen	144
Abbildung 65: Tagesgang der Mittelungspegel UG 1.....	159
Abbildung 66: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 1	159
Abbildung 67: Pegelverteilung über Windrichtung UG 1.....	160
Abbildung 68: Windverteilung im UG 1.....	160
Abbildung 69: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 1	161
Abbildung 70: Gemittelte Perzentilspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 1.....	161
Abbildung 71: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des gesamten Windparks UG 1..	162
Abbildung 72: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 1	163
Abbildung 73: Tagesgang der Mittelungspegel UG 2.....	163
Abbildung 74: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 2	164
Abbildung 75: Pegelverteilung über Windrichtung UG 2.....	164

Abbildung 76: Windverteilung im UG 2.....	165
Abbildung 77: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 2.....	165
Abbildung 78: Gemittelte Perzentilspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 2.....	166
Abbildung 79: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des gesamten Windparks UG 2..	166
Abbildung 80: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 2	167
Abbildung 81: Tagesgang der Mittelungspegel UG 3.....	167
Abbildung 82: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 3	168
Abbildung 83: Pegelverteilung über Windrichtung UG 3.....	168
Abbildung 84: Windverteilung im UG 3.....	169
Abbildung 85: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 3.....	169
Abbildung 86: Gemittelte Perzentilspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 3.....	170
Abbildung 87: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des gesamten Windparks UG 3..	170
Abbildung 88: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 3	171
Abbildung 89: Tagesgang der Mittelungspegel UG 4.....	171
Abbildung 90: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 4	172
Abbildung 91: Pegelverteilung über Windrichtung UG 4.....	172
Abbildung 92: Windverteilung im UG 4.....	173
Abbildung 93: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 4.....	173
Abbildung 94: Gemittelte Perzentilspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 4.....	174
Abbildung 95: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des gesamten Windparks UG 4..	174
Abbildung 96: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 4	175
Abbildung 97: Tagesgang der Mittelungspegel UG 5.....	175
Abbildung 98: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 5	176
Abbildung 99: Pegelverteilung über Windrichtung UG 5.....	176
Abbildung 100: Windverteilung im UG 5	177
Abbildung 101: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 5.....	177
Abbildung 102: Gemittelte Perzentilspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 5.....	178
Abbildung 103: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 5	178
Abbildung 104: UG 1, Emission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert).....	182
Abbildung 105: UG 1, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert).....	183
Abbildung 106: UG 2, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert).....	183
Abbildung 107: UG 3, Emission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert).....	184
Abbildung 108: UG 3, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert).....	184
Abbildung 109: UG 3, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert) – Ansicht vergrößert.....	185
Abbildung 110: UG 4, Emission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert).....	185
Abbildung 111: UG 4, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert).....	186

Abbildung 112: UG 5, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert).....	187
Abbildung 113: UG 5, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert) - Ansicht vergrößert	187
Abbildung 114: UG 1, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter	188
Abbildung 115: UG 1, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter	188
Abbildung 116: UG 2, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter	189
Abbildung 117: UG 3, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter	189
Abbildung 118: UG 3, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter	190
Abbildung 119: UG 3, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter - Ansicht vergrößert	190
Abbildung 120: UG 4, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter	191
Abbildung 121: UG 4, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter	191
Abbildung 122: UG 1, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)	192
Abbildung 123: UG 1, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)	192
Abbildung 124: UG 2, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)	193
Abbildung 125: UG 3, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)	193
Abbildung 126: UG 3, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)	194
Abbildung 127: UG 4, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)	194
Abbildung 128: UG 4, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)	195
Abbildung 129: UG 5, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Windgeschwindigkeit Immission in 7 m	195
Abbildung 130 relativer Tieftonfrequenzgang (Auszug aus Kalibrierprotokoll deBAKOM 2014-Q-m)	219
Abbildung 131 Tieftonfrequenzgang (Auszug aus Kalibrierprotokoll deBAKOM 2014-Q-m)	219
Abbildung 132 Kalibrierprotokoll Messsystem Sinus	221
Abbildung 133 Kalibrierschein Messsystem deBAKOM	226
Abbildung 134: Fouriertransformierte der $L_{Aeq,100ms}$	230
Abbildung 135: $L_{Zeq,1min,<3Hz}$ auf Stativ vs. Windgeschwindigkeit für feste $L_{Zeq,1min,<3Hz}$ auf Bodenplatte	232

Abbildung 136: $L_{Zeq,1min,4-7Hz}$ auf Stativ vs. Windgeschwindigkeit für feste $L_{Zeq,1min,4-7Hz}$ auf Bodenplatte	232
Abbildung 137: $L_{Zeq,1min,8-20Hz}$ auf Stativ vs. Windgeschwindigkeit für feste $L_{Zeq,1min,8-20Hz}$ auf Bodenplatte	233
Abbildung 138: $L_{Zeq,1min,25-80Hz}$ auf Stativ vs. Windgeschwindigkeit für feste $L_{Zeq,1min,25-80Hz}$ auf Bodenplatte	233
Abbildung 139: $L_{Geq,1min}$ gegen die Windgeschwindigkeit auf Höhe des Mikrofons	234
Abbildung 140: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte) vs Windgeschwindigkeit.....	235
Abbildung 141: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte) für kleine und große Pegel bei 0-1m/s Windgeschwindigkeit	236
Abbildung 142: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte) für kleine und große Pegel bei 1-2 m/s Windgeschwindigkeit	237
Abbildung 143: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 0-1 m/s.....	238
Abbildung 144: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 1-2 m/s.....	239
Abbildung 145: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 2-3 m/s.....	240
Abbildung 146: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 3-4 m/s.....	241
Abbildung 147: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 4-5 m/s.....	242
Abbildung 148: Effektiver Frequenzgang Klasse-1-Mikrofon auf Stativ.....	243
Abbildung 149: Vertrauensbereich Klasse-1-Mikrofon auf Stativ.....	244
Abbildung 150: Vertrauensbereich Infraschallmikrofon auf Bodenplatte	244

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennzahlen der Untersuchungsgebiete.....	47
Tabelle 2: Mittelungspegel der einzelnen Windgeschwindigkeits- bzw. Windrichtungsklassen in Nabenhöhe	53
Tabelle 3: Zweiseitiger Vertrauensbereich der Beurteilungspegel je Klasse nach VDI 3723-1	54
Tabelle 4: Kenngrößen der Amplitudenmodulation im Immissionsbereich (22 bis 4 Uhr).....	62
Tabelle 5: Kenngrößen der Amplitudenmodulation im Emissionsbereich (22 bis 4 Uhr).....	62
Tabelle 6: Klassierung der Modulationstiefe nach normierter elektrischer Leistung	63
Tabelle 7: Klassierung der Modulationstiefe nach normierter elektrischer Leistung und Windrichtung im UG 2	66
Tabelle 8: Frequenzen der AM und der Linien im Infraschallbereich	75
Tabelle 9: Vertrauensbereiche Pegel auf Bodenplatte	81
Tabelle 10: L_{Geq} gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB	88
Tabelle 11: $L_{Zeq,<3Hz}$ gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB.....	88
Tabelle 12: $L_{Zeq,4-7Hz}$ gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB.....	88
Tabelle 13: $L_{Zeq,8-20Hz}$ gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB.....	89
Tabelle 14: $L_{Zeq,25-80Hz}$ gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB	89
Tabelle 15: Vertrauensbereiche Pegel auf Stativ	90
Tabelle 16: Belästigung durch Windenergieanlagen.....	101
Tabelle 17: Häufigste Nennungen sonstiger Lärmquellen	102
Tabelle 18: Mittelwerte und Standardabweichungen der Items der Perceived Stress Skala PSS-10 aus Block D	103

Tabelle 19: Mittelwerte und Standardabweichungen der Items zu den Aktivitätenstörungen aus Block E	105
Tabelle 20: Korrelation zwischen Beurteilungspegel, WEA-Lärmbelästigung und Aktivitätenstörungen.....	106
Tabelle 21: Faktorladungen der Items zu Einstellungen zu Windenergieanlagen	108
Tabelle 22: Deskriptive Statistiken zur WEA-Lärmbelästigung, zu den Kenngrößen der AM und den abgefragten Geräuschmerkmalen.....	113
Tabelle 23: Häufigkeitstabelle der belästigsten Geräuschmerkmale von Windenergieanlagen	113
Tabelle 24: Korrelationstabelle der wahrgenommenen Geräuschmerkmale und WEA-Lärmbelästigung	114
Tabelle 25: Absolute und relative Häufigkeiten der Verglasungen und Fensterarten.....	115
Tabelle 26: Absolute und relative Häufigkeiten der Raumausrichtung zur Windenergieanlage	115
Tabelle 27: WEA-Lärmbelästigung in Abhängigkeit von der Schlafräumeausrichtung zur WEA	116
Tabelle 28: Beurteilungspegel L_r in dB in der Gesamtstichprobe der Befragungspersonen und pro Untersuchungsgebiet	117
Tabelle 29: Lärmbelästigung pro Beurteilungspegelklasse	117
Tabelle 30: Korrelationen zwischen Lärmbelästigung, Beurteilungspegel und weiteren potenziellen Einflussgrößen der WEA-Lärmbelästigung	119
Tabelle 31: Wahrgenommene Lautheit der WEA-Geräusche (n=16).....	128
Tabelle 32: Regressionsanalyse Aufnahmeort 1	142
Tabelle 33: Regressionsanalyse Aufnahmeort 2	142
Tabelle 34: Klassierung der Modulationstiefe nach normierter elektrischer Leistung.....	181
Tabelle 35: Werte Amplitudenmodulationen Aufnahmeort 1 – statische Stimuli	215
Tabelle 36: Werte Amplitudenmodulationen Aufnahmeort 2 – statische Stimuli	215
Tabelle 37: Werte Amplitudenmodulationen Aufnahmeort 1 – dynamische Stimuli	215
Tabelle 38: Werte Amplitudenmodulationen Aufnahmeort 2 – dynamische Stimuli	216

Abkürzungsverzeichnis

%A, %HA	Prozentsatz stark Belästigter („Percentage Annoyed“) bzw. Prozentsatz hoch Belästigter („Percentage Highly Annoyed“)
A-Bewertung	Frequenzbewertung mit A-Filter
AM	Amplitudenmodulation
ANOVA	Varianzanalyse (englisch: analysis of variance)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
dB	Dezibel
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E	Emission
FFT	Fast Fourier Transform (schnelle Fourier-Transformation)
G-Bewertung	Frequenzbewertung mit G-Filter für tieffrequente Geräusche (ISO 7196 (Beuth 1995))
GW	Gegenwind
Hz	Hertz
I	Immission
L	Pegel
$L_{01} - L_{99}$	Perzentilpegel, Pegelwert der zu X % der Zeit überschritten wird
$L_{Aeq}, L_{Geq}, L_{Zeq}$	Energetisch gemittelter frequenzbewerteter Schalldruckpegel; A, G oder Z beschreiben die jeweilige Frequenzbewertung
$L_{HP,05} - L_{HP,95}$	Differenzwert zwischen den Perzentilhäufigkeiten 5 und 95 des hochpassgefilterten Signals bei der Betrachtung einer einzelnen AM.
L_{AFT5eq}	Mittelungspegel des A-bewerteten Taktmaximalpegels (Takt 5 Sekunden)
L_{den}	Tag-Abend-Nachtpegel ($L_{den} = day\ evening\ -night\ level$) Beurteilungspegel für einen 24-Stunden Tag, zusammengesetzt aus dem Tagespegel L_{day} , einen Pegelwert für die Abendzeit $L_{evening}$ mit einem Zuschlag von 5 dB und Nachtpegel L_{night} mit einem Zuschlag von 10 dB.
L_r	Beurteilungspegel (Rating level), der üblicherweise für den Tag von 6 bis 22 Uhr als $L_{r,Tag}$ und für die Nachtzeit von 22 bis 6 Uhr als $L_{r,Nacht}$ getrennt ausgewiesen wird. Bezogen auf die Windenergiegeräusche wurde von einem über 24 Stunden gleichlaufenden Betrieb ausgegangen, so dass in dieser Studie, insbesondere im Kapitel zur Anwohnendenbefragung (Kap. 5) die Bezeichnung L_r gewählt wurde und damit ein über 24-Stunden berechneter Gesamtpegel zur Beurteilung der Windenergiegeräusche gemeint ist.
ΔL_{AM}	Modulationstiefe der Amplitudenmodulation
m	Meter
MW	Mitwind; nach einer Ziffer stehend = Einheit Megawatt
NHN	Normalhöhenull
QW	Querwind
s	Sekunde

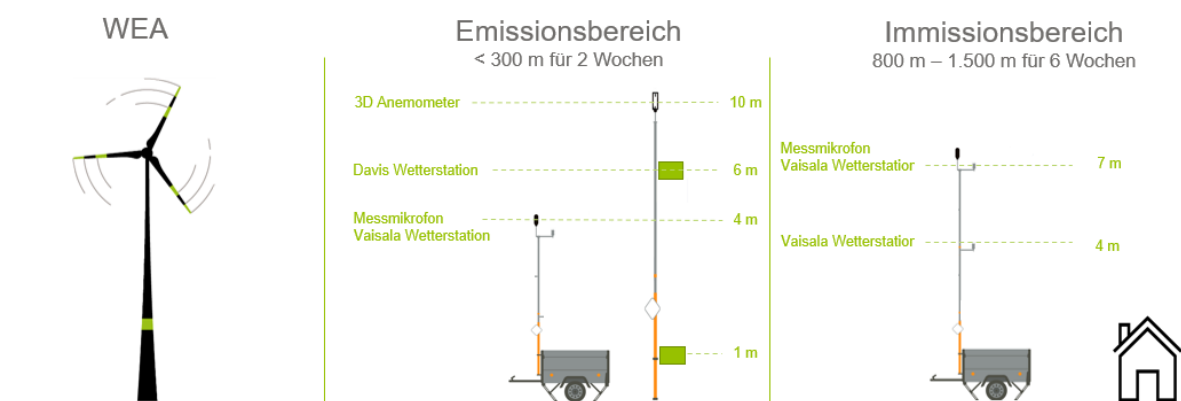
SW	Standardabweichung
UBA	Umweltbundesamt
UG	Untersuchungsgebiet
UK	United Kingdom
Upm	Umdrehung pro Minute
WEA	Windenergieanlage
Wg	Windgeschwindigkeit
Z-Bewertung	Z steht für Zero und bedeutet, dass keine Frequenzbewertung vorgenommen wurde

Zusammenfassung

Bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen steht das Thema Lärm häufig im Fokus der Diskussion. Dabei werden vielfältige Fragen aufgeworfen, die sowohl die Lärmentstehung und -minderung als auch die Auswirkungen des Lärms auf die Gesundheit und Lebensqualität der Bevölkerung betreffen. Geräusche von Windenergieanlagen unterliegen in ihrer Amplitude und Frequenzzusammensetzung starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Die Geräusche variieren aufgrund von standort-, wetter- und windspezifischen Gegebenheiten und sind abhängig vom Typ, der Drehgeschwindigkeit und dem Betriebsmodus der Windenergieanlagen. Insbesondere die durch Windenergieanlagen induzierten Geräusche, welche häufig als „Wuschen“ bezeichnet werden, stehen im Fokus der Untersuchungen. Diese „Wuschgeräusche“ werden im vorliegenden Forschungsvorhaben als durch Windenergieanlagen induzierte amplitudenmodulierte Geräusche bezeichnet. Zum Zeitpunkt des Projektstarts war noch nicht klar, ob und in welcher Häufigkeit Amplitudenmodulationen (AM) in Entfernungen größer 1000 m von der Windenergieanlagen überhaupt detektierbar sind. Ziel war es daher zu untersuchen, in welchem Ausmaß Amplitudenmodulationen von Windenergieanlagen verursacht werden, ob diese im Immissionsbereich hör- und messbar sind und welchen Einfluss sie auf die Geräuschwahrnehmung von Anwohnenden haben.

Hierzu wurden in fünf Untersuchungsgebieten Langzeitschallmessungen im Immissionsbereich (> 800 m) über mindestens sechs Wochen und Emissionsbereich (< 300 m) über zwei Wochen durchgeführt. Auf der Basis der Langzeitschallmessungen wurden die geräuschspezifischen Einflüsse von Windenergieanlagen untersucht. Im Rahmen der Messauswertungen wurde ein Algorithmus entwickelt, um Amplitudenmodulation im Messsignal zu finden und zu quantifizieren. Zur Beurteilung der Wirkung der Geräusche auf den Menschen wurden in den Untersuchungsgebieten sowohl kontrollierte Hörversuche durchgeführt als auch Anwohnende in der Nachbarschaft von Windenergieanlagen bezüglich ihrer Wahrnehmung und Belästigungsempfindung befragt.

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Die Untersuchungsgebiete waren entsprechend Abbildung 2 deutschlandweit verteilt.

Abbildung 2: Lage der Untersuchungsgebiete in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Die Windparks in den Untersuchungsgebieten wiesen unterschiedliche Konstellationen auf. Dabei variierten:

- ▶ Anzahl der Windenergieanlagen (1 bis 21 Windenergieanlagen)
- ▶ Typ der Windenergieanlagen (vier Hersteller mit insgesamt sechs unterschiedlichen Modellen)
- ▶ Höhe der Windenergieanlagen (ca. 100 m bis ca. 140 m Nabenhöhe)
- ▶ Leistung der Windenergieanlagen (2 MW bis 3 MW)
- ▶ Rotordurchmesser (ca. 80 m bis ca. 135 m)
- ▶ Topografische Lage (flaches bis hügeliges Landschaftsbild)
- ▶ Entfernung der Messungen im Immissionsbereich (ca. 800 m bis 1500 m)
- ▶ Zeitraum der Messung (Frühling bis Winter)

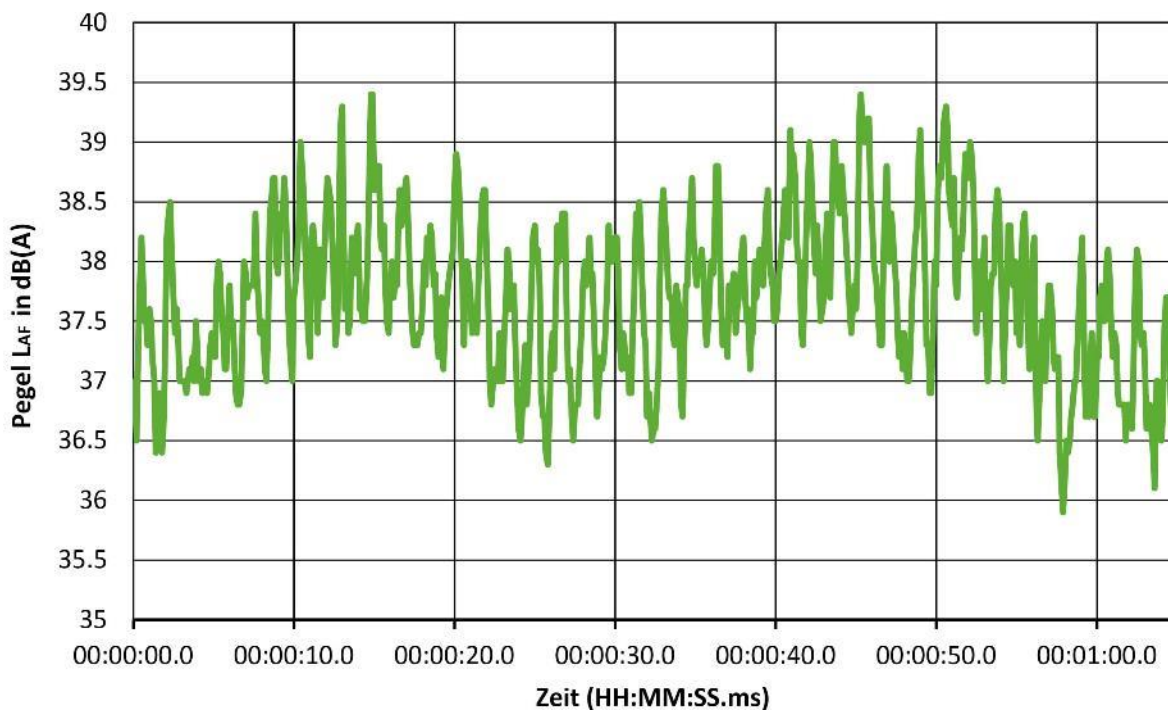
Die Messungen wurden mittels eines im Rahmen dieses Projektes entwickelten Verfahrens zur Erkennung von Amplitudenmodulation ausgewertet. Außerdem wurden Befragungen bezüglich der Belästigung von umliegenden Anwohnenden in allen fünf Untersuchungsgebieten durchgeführt. An drei Untersuchungsstandorten fanden zusätzlich Hörversuche mit zuvor aufgezeichneten Geräuschbeispielen statt.

Messung und Bewertung von Amplitudenmodulation

Als Amplitudenmodulation werden die durch Windenergieanlagen verursachten Geräusche bezeichnet, welche meist als ein „Wuschen“ wahrgenommen werden. Hierbei handelt es sich um ein periodisches Ansteigen und Abfallen des Schalldruckpegels.

Durch Windenergieanlagen verursachte Geräusche unterliegen auch anderen zeitlich unregelmäßigen Schwankungen, die von Menschen wahrgenommen werden können. Diese können z. B. durch Ausbreitungsvorgänge, Wind oder Interferenzen erzeugt werden und werden gelegentlich als amplitudenmodulierte Geräusche bezeichnet. Diese Schwankungen stehen aber meist nicht in direktem Zusammenhang mit der Rotationsfrequenz und werden von Anwohnenden nicht als „Wuschen“ beschrieben. In dieser Studie wird der Begriff Amplitudenmodulation für Pegelschwankungen im Zusammenhang mit der Drehfrequenz verwendet, wie sie in Abbildung 3 als schnelles an- und abschwellen des Pegels im 1,2 s Takt exemplarisch dargestellt sind.

Abbildung 3: Exemplarischer Pegelschrieb bei vorliegender Amplitudenmodulation



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

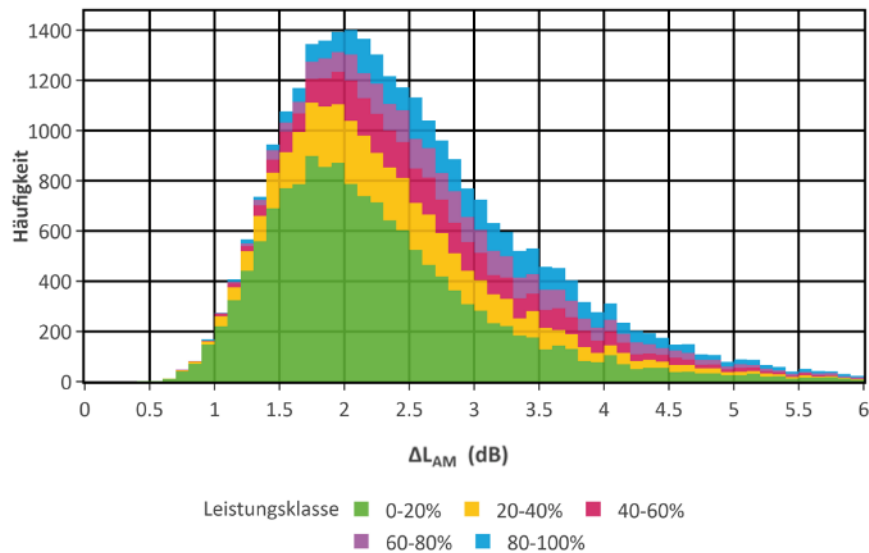
Zur Untersuchung der Messdaten wurde im Rahmen dieser Studie ein Algorithmus entworfen, der anhand der aufgezeichneten Audiodaten für Abschnitte mit einer Länge von 10 Sekunden die Modulationstiefe ΔL_{AM} und die Frequenz der Amplitudenmodulation f_{AM} bestimmt.

Die an den fünf Standorten gewonnenen Messdaten wurden hinsichtlich des Auftretens von Amplitudenmodulation ausgewertet. Die Messorte wurden so gewählt, dass die Messungen möglichst frei von Fremdgeräuschen waren. Dennoch waren amplitudenmodulierte Geräusche insbesondere im Nachtzeitraum detektierbar, da nachts keine sonstigen Geräusche, die Geräusche der Windenergieanlagen überlagerten.

Die Auswertung der Messdaten, in denen keine störenden Fremd- oder Windgeräusche vorhanden waren, zeigte, dass die Modulationstiefen für alle Standorte im Median über alle Leistungsbereiche der Anlagen bei ca. 1,5 dB bis 2,5 dB liegen (siehe exemplarisch für einen

Standort, Abbildung 4). Ein Vergleich der verschiedenen Untersuchungsgebiete zeigt, dass in den Untersuchungsgebieten 1 und 2 höhere Modulationstiefen auftraten. Bei diesen Standorten handelt es sich um Windparks mit wenigen Windenergieanlagen und relativ geringen Abständen zwischen den Windenergieanlagen und der Wohnbebauung bzw. der Messposition.

Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung Modulationstiefe ΔL_{AM} im UG 2 nach Anlagenleistung klassiert



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Zur Untersuchung der meteorologischen Abhängigkeit der Amplitudenmodulation wurden die Datensätze nach elektrischer Leistung der Windenergieanlagen und Windrichtung klassiert. Diese Analyse zeigt, dass bei Querwind die Modulationstiefe im Immissionsbereich UG 2 um 1,2 dB mit steigender Leistung leicht zunimmt. Bei Mitwind nimmt dagegen die Modulationstiefe nur um 0.6 dB zu. Dieser Trend lässt sich nur für den Windpark mit einer Einzelanlage im UG 2 aus den Daten erkennen. Bei den anderen Untersuchungsgebieten (UG 1 und UG 3 bis 5) lassen sich keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen Leistung und Windrichtung sowie Modulationstiefe erkennen.

Ein Vergleich der Ergebnisse mittels des entwickelten AM-Verfahrens mit dem Taktmaximalpegelverfahren nach TA Lärm (1998) zeigt, dass ein relativ lineares Verhältnis zwischen den beiden Verfahren besteht. Das Taktmaximalpegelverfahren unterscheidet jedoch nicht zwischen periodisch modulierten Geräuschen und anderen Geräuschverhalten. Insofern für einen Zeitraum sichergestellt werden kann, dass es sich bei den Geräuschen maßgeblich um ein periodisch amplitudenmoduliertes Geräusch handelt, zeigt sich für die hier untersuchten Gebiete, dass eine Abschätzung der Modulationstiefe anhand des Taktmaximalpegelverfahrens möglich ist.

Messung und Bewertung von Infraschallimmissionen

Luftschallwellen im Frequenzbereich kleiner 20 Hz werden als Infraschall bezeichnet. Obwohl die Tonhöhenwahrnehmung unterhalb 20 Hz physiologisch nicht gegeben ist, kann Infraschall bei hinreichend hoher Intensität z. B. als Pulsation oder Druckgefühl wahrgenommen werden. Dabei variiert die Wahrnehmungsschwelle individuell. So können empfindliche Menschen schon dann deutliche akustische Wahrnehmungen haben, wenn andere noch nichts hören.

Da Windenergieanlagen sehr groß sind und sehr niedrige Drehzahlen haben, können sie Infraschall erzeugen. Ob und in welchem Maß WEA Infraschallimmissionen in durchaus üblichen Entfernungen für Wohnbebauung von ca. 1000 m zu Windenergieanlagen verursachen, sollte anhand der Langzeitmessungen untersucht werden.

Da das Hauptziel der Messungen die Untersuchung der Amplitudenmodulationen war, haben sich Messtechnik und Messkonzept an diesem Ziel orientiert. Um dennoch belastbare Ergebnisse auch für Infraschall zu ermitteln, wurden in einem der Untersuchungsgebiete, im UG 5, parallel zu den Immissionsmessungen zusätzlich Infraschallmessungen durchgeführt. Dabei wurde sowohl ein Klasse-1-Mikrofon auf Stativ als auch ein Infraschallmikrofon auf einer Bodenplatte eingesetzt.

In Abbildung 5 ist exemplarisch ein Spektrum dargestellt, das in der Nähe eines Wohnhauses gemessen wurde. Der dargestellte Zeitausschnitt wurde gewählt, weil in diesem Spektrum besonders deutlich die Einzellinien zu erkennen sind, deren Frequenzen bei ganzzahligen Vielfachen der Frequenz liegen, mit der Rotorblätter sich am Mast der Windenergieanlagen vorbei bewegen. Diese Linien im Spektrum können somit den Windenergieanlagen als Quelle zugeordnet werden.

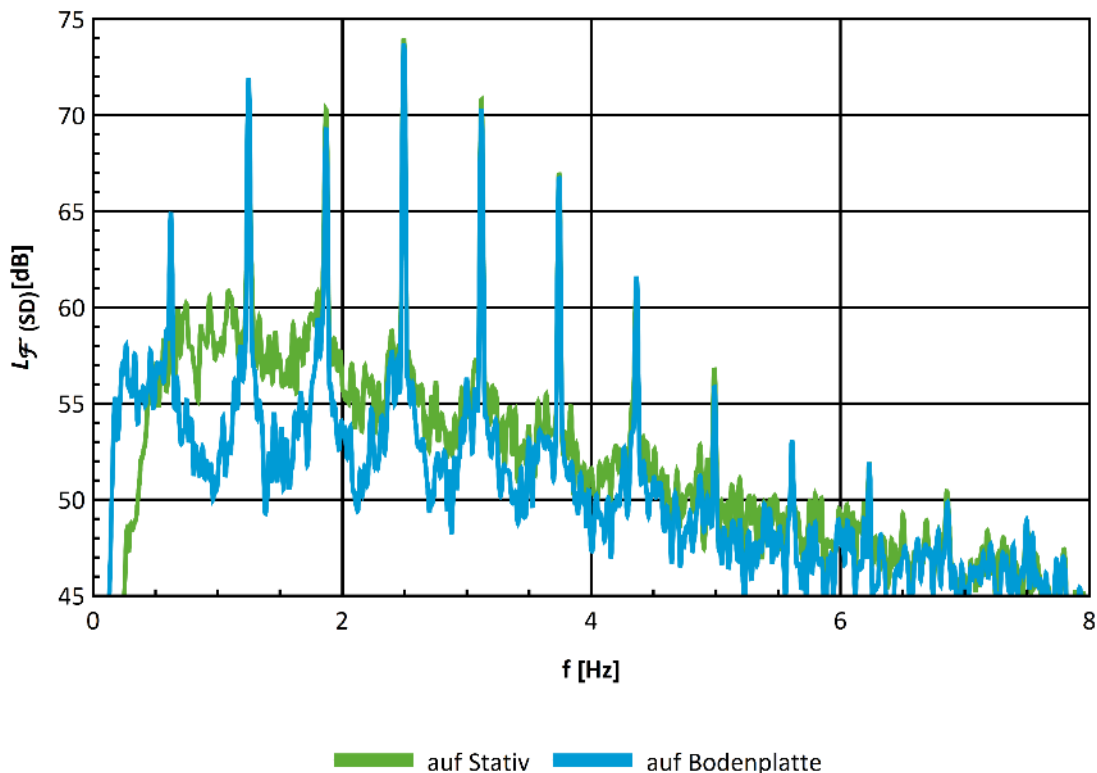
Die Messungen in den Untersuchungsgebieten UG 1 bis 4 wurden mit einem Klasse-1 Mikrofon auf Stativ durchgeführt. Diese Immissionsmessungen unterschieden sich von der Messung mit Infraschallmikrofon auf einer Bodenplatte in zwei wesentlichen Punkten: Das Klasse-1-Mikrofon ist bei kleinen Frequenzen unempfindlicher als das Infraschallmikrofon, und durch die Messung auf einem Stativ statt auf einer Bodenplatte ist der Windeinfluss deutlich größer. Die Unterschiede in den Empfindlichkeiten der Mikrofone wurden durch Tieftonkalibrierungen untersucht, die zeitgleichen Messungen mit Infraschall-Mikrofon auf Bodenplatte und Klasse-1-Mikrofon auf Stativ im UG 5 zur Ermittlung von Vertrauensbereichen für die Messungen genutzt. Auch der Einfluss von Wind wurde durch Vergleich der Messungen im UG 5 analysiert, und für die Bestimmung der Schallpegel in den Untersuchungsgebieten 1 bis 4 so weit möglich berücksichtigt.

Aufgrund dieser Betrachtungen konnten für die UG 1 bis 4 Pegel für verschiedene Infraschallbänder in Abhängigkeit der Leistung der WEA bestimmt werden. In allen Untersuchungsgebieten wurde durch Windenergieanlagen verursachter Infraschall festgestellt, d. h. mit zunehmender Leistung der Windenergieanlagen wurden steigende Pegel gemessen.

Alle für Infraschall bestimmten Pegel, ob mit Infraschallmikrofon auf Bodenplatte oder Klasse-1-Mikrofon auf Stativ, liegen unter der Hörschwelle nach DIN 45680 (1997).

Abbildung 5: Spektrum des Schalldrucks

Beispielspektrum für ein 10-Minuten-Fenster in ca. 1000m Entfernung von den Windenergieanlagen (UG 5), gemessen mit dem Infrarotmikrofon auf Bodenplatte und dem Klasse-1-Mikrofon auf Stativ.



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Durchführung und Ergebnisse der Belästigungsbefragungen

Ziel der Belästigungsbefragungen war es, den Grad der Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen zu erfassen und in Abhängigkeit vom Beurteilungspegel auszuwerten. Dazu wurden Befragungen von Anwohnenden durchgeführt, um eine Ermittlung der Expositions-Wirkungsbeziehung zur Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen abzuleiten. Dabei wurden die wesentlichen erfassten akustischen sowie die nicht akustischen Bestimmungsfaktoren der Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen identifiziert. Hierzu wurde zum einen eine Hauptbefragung (telefonisch oder optional online) und zum anderen vertiefende Interviews mit Anwohnenden durchgeführt. Letzteres diente der detaillierten Erfassung der Geräuschwirkung im Alltag unter dem besonderen Aspekt der Wahrnehmung von Amplitudenmodulation.

Die Befragungen untergliederten sich in akustische und nicht akustische Faktoren, sowie in verschiedene Arten von Belästigung und Störung bei Aktivitäten der Anwohnenden. Konkret wurden folgende Aspekte zur Wohnsituation der Befragten und deren Lärmbelästigung und Störungen abgefragt.

► Nicht akustische Einflussfaktoren

- Einstellung der Befragten zu Windenergie und zu lokalen Windenergieanlagen
- Allgemeines Stressempfinden (standardisierter Fragebogenblock PSS10¹)
- Visuelle Beeinträchtigung
 - Schattenwurf
 - Anblick der Windenergieanlagen
 - Lichtsignale der Windenergieanlagen (Hinderniskennzeichnung)
 - Drehbewegung, Wirkung im Landschaftsbild
- Störung von Aktivitäten
 - Kommunikationsstörung
 - Ruhe-/Konzentrationsstörung
 - Schlafstörung
- Störung beim Aufenthalt außerhalb des Hauses

► Wahrgenommene akustische Einflussfaktoren

- Geräuschmerkmale
 - Poltern
 - Dröhnen
 - Rauschen
 - Brummen
 - Pulsieren
 - Pfeifen
 - Wuschen
 - Schwankungen

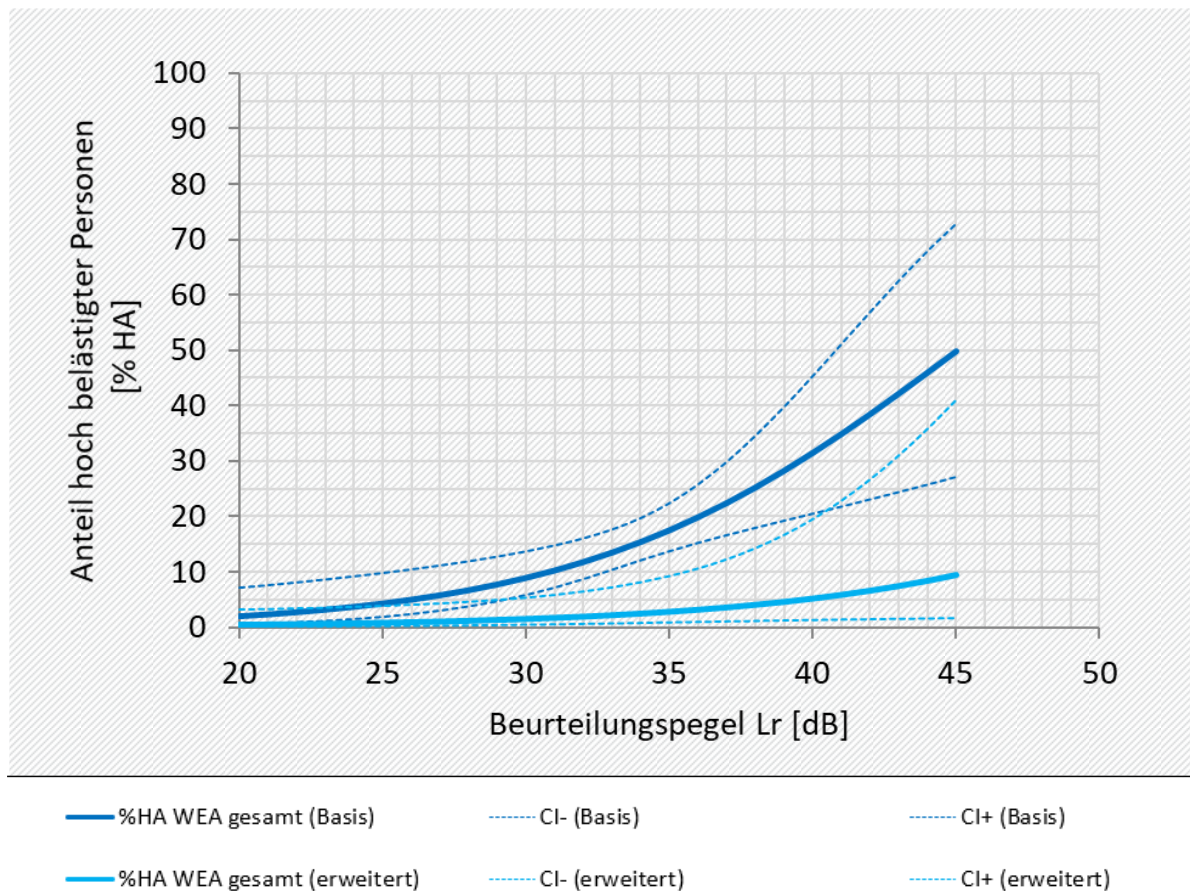
Die Befragungen wurden in allen Untersuchungsgebieten, bei insgesamt 468 Personen in einer Distanz bis zu 3 km von den Windparks durchgeführt. Bei fünf Personen konnten aufgrund fehlender Geokoordinaten keine Beurteilungspegel bestimmt werden, so dass insgesamt von 463 Personen Geräuschpegel- und Befragungsdaten für die Expositions-Wirkungsanalysen vorliegen.

Die Befragten stufte die Lärmbelastigung durch Windenergieanlagen insgesamt durchschnittlich als gering ein (im Durchschnitt zwischen „überhaupt nicht“ und „etwas gestört oder belästigt“). Der statistische Zusammenhang (die Korrelation) zwischen Beurteilungspegel und den Belästigungen ist gering.

¹ *Perceived Stress Scale* (PSS-10; Cohen & Williamson, 1988) in der deutschen Fassung von Klein et al. (2016).

Die insgesamt gering ausgeprägte Lärmbelastigung (im Mittel über die ganze Stichprobe) ist offenbar der mehrheitlich relativ im Vergleich zu anderen Geräuschquellen geringen Geräuschexposition mit einem berechneten Beurteilungspegel von $L_r < 43$ dB geschuldet. Sobald aber ein L_r von ca. 35 dB überschritten wird, steigt der Prozentanteil der hoch belästigten Personen (%HA, % highly annoyed) deutlich an (Abbildung 6). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) nennt in ihren Leitlinien zum Umgebungslärm für die europäische Region (WHO, 2018) einen %HA-Anteil von 10% als eine gesundheitliche Relevanzschwelle. Dieser %HA-Wert wird nach den Angaben der WHO (2018) basierend auf einem systematischen Evidenz-Review von Guski et al. (2017) bei Straßenverkehrsgeräuschen bei einem $L_{den} = 53$ dB, beim Schienenverkehrsgeräuschen bei einem $L_{den} = 54$ dB und bei Luftverkehrsgeräuschen sowie bei Windenergieanlagengeräuschen bei einem $L_{den} = 45$ dB erreicht. Diese Werte basieren auf Meta-Analysen, die sich auf Basismodelle beziehen, d. h. nur der Beurteilungspegel L_{den} wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit als Einflussgröße betrachtet (Guski et al., 2017). Aus Abbildung 6 (dunkelblaue Kurve) geht hervor, dass in dieser Studie ab einem Beurteilungspegel $L_r = 31$ dB im Basismodell, in dem der Prozentanteil hoch belästigter Personen ausschließlich durch den Beurteilungspegel L_r vorgesagt wird, dieser Prozentanteil hoch belästigter Personen größer gleich 10% beträgt. Ein $L_r = 31$ dB entspricht umgerechnet einem Tag-Abend-Nachtpegel von ca. $L_{den} = 37$ dB. Damit bestätigt diese Studie den auch in bisherigen Untersuchungen festgestellten Befund einer – bei gegebenem Beurteilungspegel – höheren Belästigung durch Windenergieanlagen-Geräusche im Vergleich zu anderen Umgebungslärmquellen wie etwa dem Straßenverkehrslärm. Die vorliegende Studie zeigt im Basismodell sogar einen höheren %HA-Anteil als nach Angaben in den WHO-Umgebungslärmleitlinien (WHO, 2018) oder dem zugrundeliegenden Review (Guski et al., 2017).

Abbildung 6: Prozentanteil hoch belästigter Personen (% HA) durch Windenergieanlagen insgesamt



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

% HA = % hoch Belästigte; WEA = Windenergieanlage; CI-/+= untere/obere Grenze des Konfidenzintervalls der Expositions-Wirkungs-Kurve; Basis: Einflussfaktor Beurteilungspegel L_r ohne Adjustierung; Erweitert: Einflussfaktoren Beurteilungspegel L_r , Lärmempfindlichkeit, WEA-Einstellung, wahrgenommenen Stress, visueller WEA-Beeinträchtigung, Geräuschmerkmalen

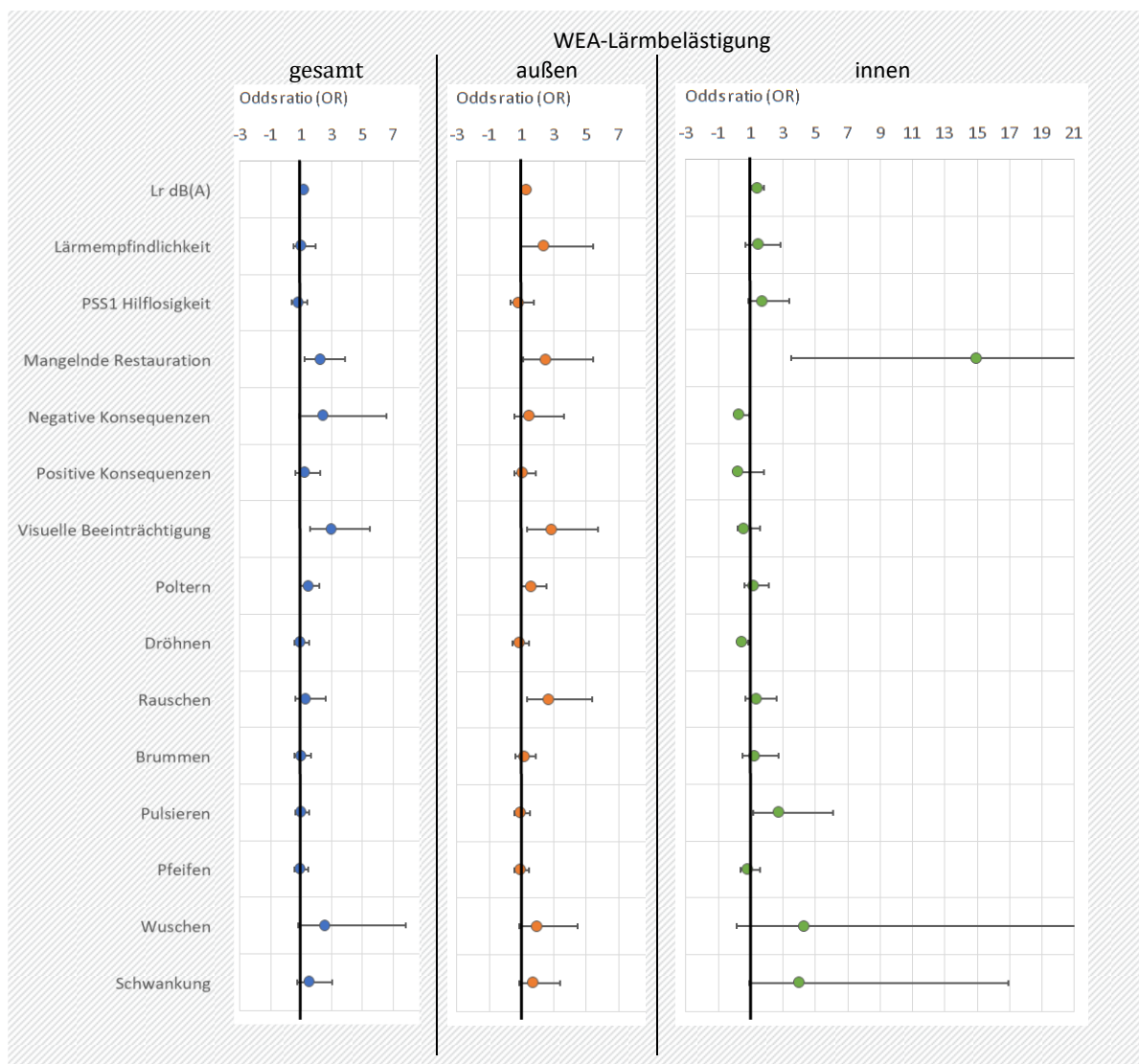
Die Lärmbelästigung fällt pro Beurteilungspegel geringer aus, wenn in dem Vorhersagemodell zum % HA-Anteil weitere Einflussgrößen (nicht-akustische Größen, wahrgenommene Geräuschmerkmale) ebenfalls berücksichtigt werden. Durch die zusätzlich berücksichtigten Einflussfaktoren verliert der Beurteilungspegel an Erklärungseffekt auf die Lärmbelästigung. Das heißt, die anderen Einflussgrößen moderieren die Expositions-Wirkungsbeziehung zur WEA-Lärmbelästigung und üben einen stärkeren Effekt auf die WEA-Lärmbelästigung aus als der Beurteilungspegel selbst. Unter den nicht-akustischen Faktoren sind es vor allem die folgenden, die einen Einfluss auf die WEA-Lärmbelästigung ausüben:

- ▶ Einstellung zur lokalen Windenergieanlage, insbesondere die Wahrnehmung einer eingeschränkten Außennutzung und Erholungsmöglichkeit im Außenbereich der Wohnung/des Hauses;
- ▶ Visuelle Beeinträchtigungen durch den Schattenwurf und Drehbewegungen der Rotoren, der blinkenden Hinderniskennzeichnung, der Ansicht von Windenergieanlagen insgesamt sowie durch die negativ bewertete Wirkung der Windenergieanlagen auf das Landschaftsbild.
- ▶ Wahrgenommene Geräuschmerkmale, wie das „Wuschen“. Die semantische Beschreibung prägt deutlich das Lärmbelästigungsurteil. Das Wuschen wird oftmals als subjektive

Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen verstanden. Zudem konnte gezeigt werden, dass Lärmbelastigungsunterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten mit Unterschieden in der Auftrittshäufigkeit der erkannten, stabil vorliegenden Amplitudenmodulationen korrespondieren.

Abbildung 7 zeigt die Stärke der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Windenergieanlagen-Lärmbelastigung insgesamt, im Außen- sowie im Innenbereich mit dem Odds Ratio (OR) als Maß der Effektstärke. Referenzwert ist der Wert 1. Ist das Odds Ratio (farbiger Punkt) einschließlich seines Konfidenzintervalls (schwarze durch den Punkt verlaufende Linie) vollständig unterhalb oder oberhalb des Referenzwertes 1 (in der Abbildung links oder rechts vom Wert 1), handelt sich um einen statistisch signifikanten Einfluss. Je mehr das Odds Ratio einschließlich seines Konfidenzintervalls vom Wert 1 abweicht, desto größer ist die Effektstärke.

Abbildung 7: Effektstärke (Odds ratio) der Einflussgrößen der Windenergieanlagen-Lärmbelastigung insgesamt



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

Die dargestellten Punkte geben das Odds Ratio (OR) als Maß der Effektstärke des jeweiligen Einflussfaktors auf die Windenergieanlagen-Lärmbelastigung insgesamt (blaue Punkte), im Außenbereich (orange Punkte) und im Wohnungsinnen (grünen Punkte) wieder. Die waagerechten Linien durch die Punkte geben das 95%-Konfidenzintervall des OR wieder. Referenz ist ein OR = 1. Liegt ein OR-Wert einschließlich seines Konfidenzintervalls oberhalb (in der

Abbildung rechts) von 1, dann hat der Einflussfaktor einen belästigungserhöhenden Einfluss. Liegt der OR-Wert unterhalb (in der Abbildung links) von 1, dann hat diese Einflussgröße einen belästigungsmindernden Einfluss.

Aus den Vertiefungsbefragung mit einer insgesamt kleinen Stichprobe von 25 Personen an den fünf Standorten geht hervor, dass die befragten Personen generell eine positive Einstellung gegenüber Windenergie allgemein und den lokalen Windenergieanlagen haben. Auch wenn die meisten Befragten sich nicht direkt durch die Windenergieanlagen gestört fühlen, können sie sich vorstellen, dass sich andere Personen beispielsweise durch Lärm, Schattenwurf sowie den Eingriff in das Landschaftsbild und die Beleuchtung gestört fühlen. Die Geräusche, die von den Windenergieanlagen ausgehen, werden größtenteils als Rauschen beschrieben, das vor allem abends auffällt. Dieses Rauschen wird zum Teil als intervallartig beschrieben, was ein Hinweis auf den pulsierenden Charakter der Windenergieanlagen-Geräusche bzw. die Amplitudenmodulation sein kann. Grundsätzlich gibt es sehr wenige Unterschiede zwischen den fünf Untersuchungsgebieten. Neben Lärm scheinen auch in der Vertiefungsbefragung visuelle Auswirkungen relevant zu sein. Aufgrund der kleinen Stichprobe lassen sich aus den identifizierten Unterschieden zwischen den Standorten jedoch keine konkreten Schlüsse ziehen. Jedoch bestätigen insgesamt die Vertiefungsinterviewdaten die Erkenntnisse aus der Hauptbefragung.

Durchführung und Ergebnisse der Hörversuche

Die Hörversuche wurden an drei Untersuchungsgebieten vor Ort mit Anwohnenden durchgeführt. Ein Kontrollversuch wurde an der TH Köln mit einer etwa gleich großen Anzahl an Probanden wie in einem Untersuchungsgebiet durchgeführt, welcher im Wesentlichen die Ergebnisse in den einzelnen Untersuchungsgebieten bestätigte.

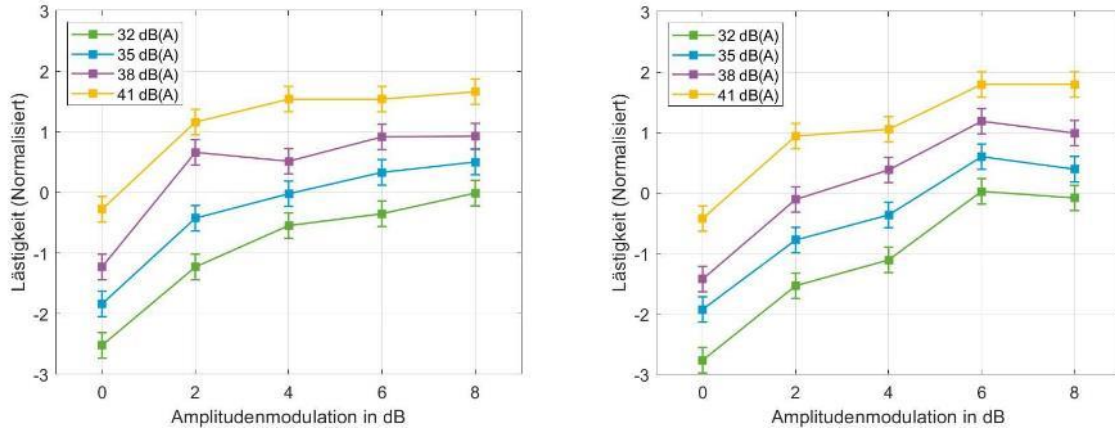
In den Hörversuchen wurden Signale dargeboten, die an zwei Messorten aufgenommen wurden und über unterschiedlich starke Modulationen verfügten. Die für die Hörversuche verwendeten Signale wurden aus diesen Audioaufnahmen extrahiert und in dem Pegel angepasst, so dass die Stimuli bis auf die Modulationstiefe der AM und die Höhe des Pegels vergleichbare Eigenschaften aufwiesen. Zudem wurden im Rahmen der Hörversuche Aufnahmen eingesetzt, die zeitkonstante AM sowie zeitlich variierende AM aufwiesen, um diese hinsichtlich ihrer Lästigkeit miteinander zu vergleichen.

Die Ergebnisse der Hörversuche belegen einen signifikanten Einfluss von Pegel und von AM auf die von den Untersuchungsteilnehmenden bewertete Lästigkeit. Sie bestätigen, dass die subjektiv wahrgenommene Lästigkeit deutlich von der AM abhängt. Die Untersuchung der zeitveränderlichen Stimuli zeigte keine signifikante Abhängigkeit der Lästigkeit von dem Zeitverlauf (ansteigend oder abfallend) der AM.

Die bewertete Lästigkeit nahm mit zunehmender AM zu. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse, dass die bloße Wahrnehmbarkeit einer AM eine Erhöhung der Lästigkeit bewirkt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Bewertung der Lästigkeit aufgrund der Schwankung durch den mittleren Pegel unterschiedlicher Signale ist für die drei Untersuchungsgebiete nahezu identisch.

Abbildung 8 : Lästigkeit zeitinvariante Amplitudenmodulationen

Wahrgenommene (normalisierte) Lästigkeit in Abhängigkeit von der AM (x-Achse), von dem dargebotenen Immissionspegel (Farbe) sowie von dem Messort (links: Messort 1; rechts: Messort 2). Dargestellt sind die über die Probanden gemittelten normalisierten Lästigkeitsbewertungen und 95% Inner-Subjekt-Konfidenzintervalle des Haupteffekts für den Faktor AM.



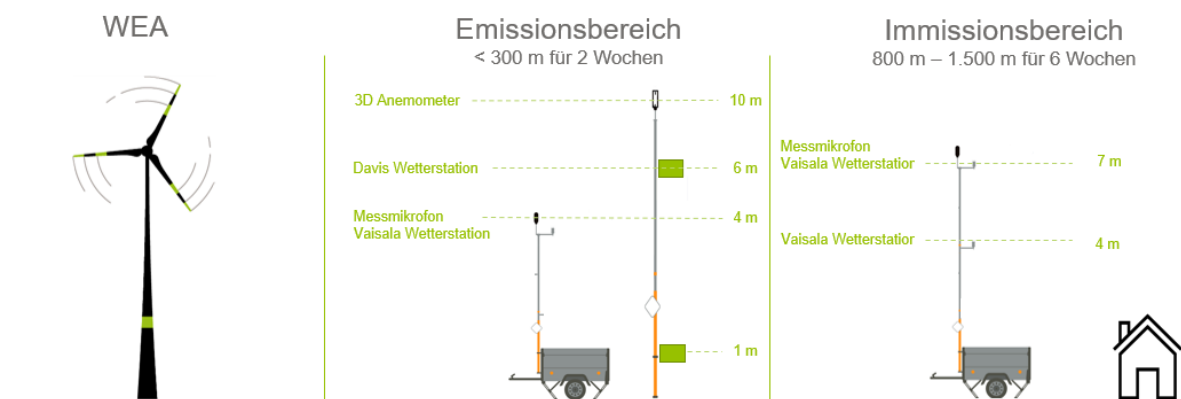
Quelle: eigene Darstellung, TH Köln

Summary

Deliberations concerning the planning and approval of wind turbines often revolve around the issue of noise. A wide range of questions are raised that concern both noise generation and noise reduction as well as the impact of noise on the health and quality of life of the population. The amplitude and frequency composition of the noise generated by wind turbines is subject to considerable spatial and temporal fluctuation. The noise varies due to factors specific to location, weather and wind and is a function of the type, rotational speed and operating mode of the wind turbines themselves. Investigations focus specifically on the noise induced by wind turbines and are often referred to as a ‘whooshing’ sound. The present research project refers to this ‘whooshing noise’ as amplitude-modulated noise induced by wind turbines. When this project began, it was unclear whether and how often amplitude modulations (AM) could be detected at all from distances of greater than 1000 m from the wind turbines. The aim was therefore to investigate the extent to which amplitude modulations are caused in wind turbines, whether these are audible and measurable in the immission area, and what influence they have on nearby residents’ awareness of noise.

For this purpose, long-term sonic measurements were carried out in the immission area (> 800 m) for at least six weeks and in the emission area (< 300 m) for two weeks. The noise-specific influences of wind turbines were investigated on the basis of these long-term sonic measurements. To help evaluate the measurements obtained, an algorithm was developed to locate and quantify amplitude modulation in the measurement signal. To assess the human impact of the noise, controlled listening tests were carried out in the study areas, and people living in the vicinity of wind turbines were surveyed with regard to their noise awareness and any feelings of annoyance.

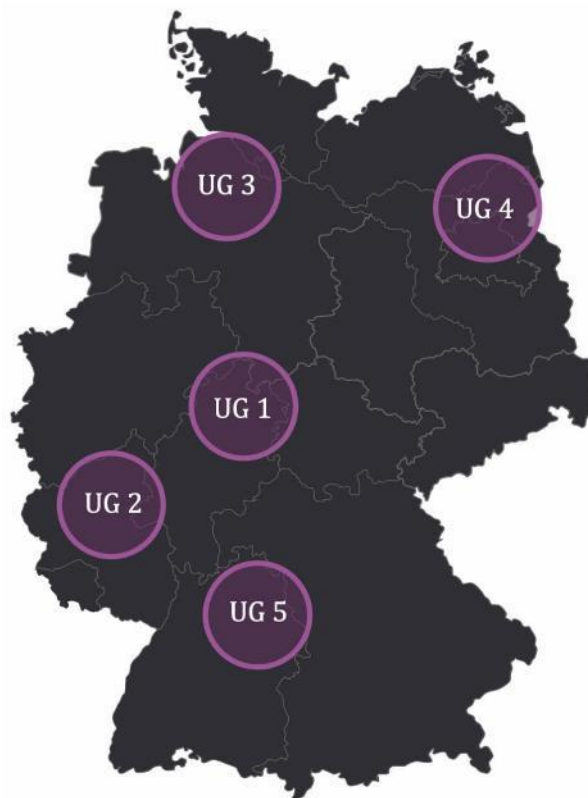
Figure 9: Schematic representation of the measurement set-up



WEA = Wind turbine; Emissionsbereich < 300 m für 2 Wochen = Emission area < 300 m for 2 weeks; 3D Anemometer = 3D anemometer; Davis Wetterstation = Davis weather station; Messmikrofon Vaisala Wetterstation = Measuring microphone Vaisala weather station; Immissionsbereich 800m-1.00m für 6 Wochen = Immission area 800 m - 1500 m for 6 weeks; Messmikrofon Vaisala Wetterstation = Measuring microphone Vaisala weather station, Vaisala Wetterstation = Vaisala weather station

The study areas were distributed throughout Germany as shown in Abbildung 10.

Figure 10: Location of the study areas in Germany



UG 1 – UG 5 = SA 1 - SA 5

The wind farms in the study areas featured different constellations. They varied in terms of:

- ▶ The number of wind turbines (1 to 21 wind turbines)
- ▶ Wind turbine type (four manufacturers with a total of six different models)
- ▶ Wind turbine height (hub heights of approx. 100 m to approx. 140 m)
- ▶ Wind turbine power output (2 MW to 3 MW)
- ▶ Rotor diameter (approx. 80 m to approx. 135 m)
- ▶ Topographical location (flat to hilly landscape)
- ▶ The distance of the measurements taken in the immission area (approx. 800 m to 1500 m)
- ▶ Measurement period (spring to winter)

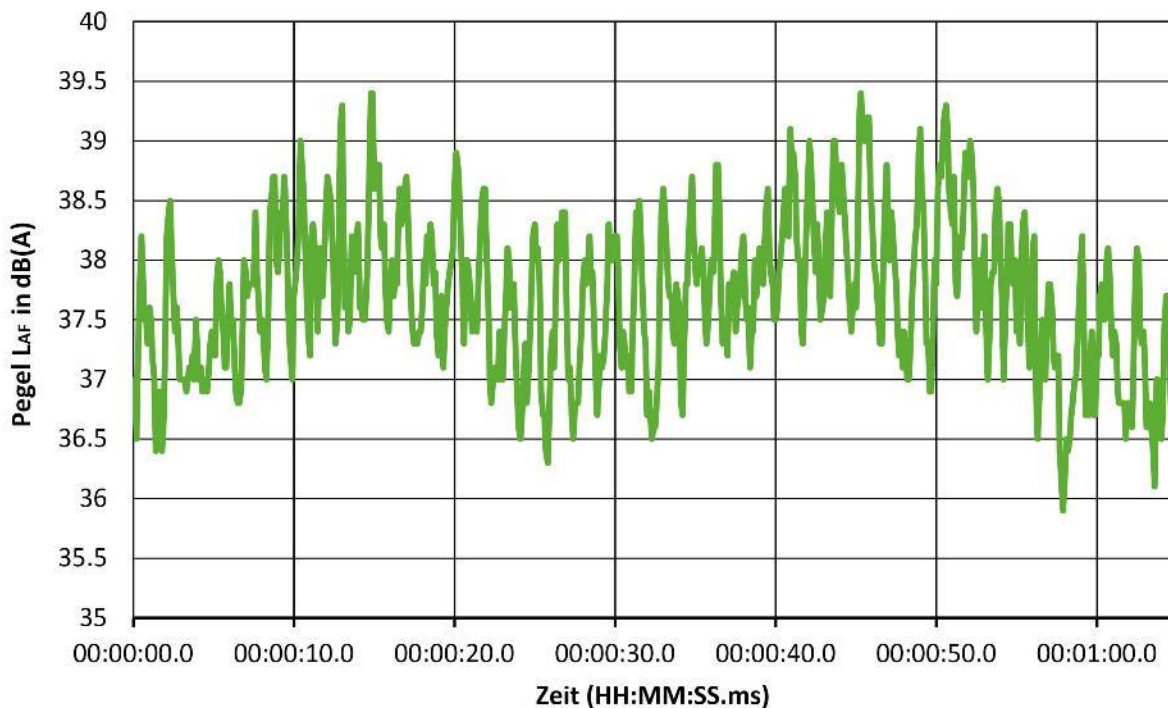
The measurements were evaluated using a method for the detection of amplitude modulation that was developed within the scope of this project. Surveys of surrounding area residents' annoyance levels were also conducted in all five study areas. Listening tests using previously recorded sample noises were also carried out at three study locations.

Amplitude modulation measurement and assessment

The term 'amplitude modulation' refers to the noise generated by wind turbines and usually perceived as a 'whooshing' sound. This sound is produced by a periodic rise and fall in the sound pressure level.

Wind turbine noise is also subject to other temporally irregular fluctuations that are perceptible by humans. These can be generated, for example, by propagation processes, wind or interference; this noise is sometimes referred to as amplitude-modulated noise. These fluctuations are typically not directly related to rotational frequency, and residents do not describe them as ‘whooshing’. In this study, the term ‘amplitude modulation’ is used to describe fluctuations in volume level in connection with the rotational frequency; this is shown by way of example in Abbildung 3 as a rapid swelling and fading in volume level in 1.2-s cycles.

Figure 11: Sample fluctuation in volume levels due to amplitude modulation



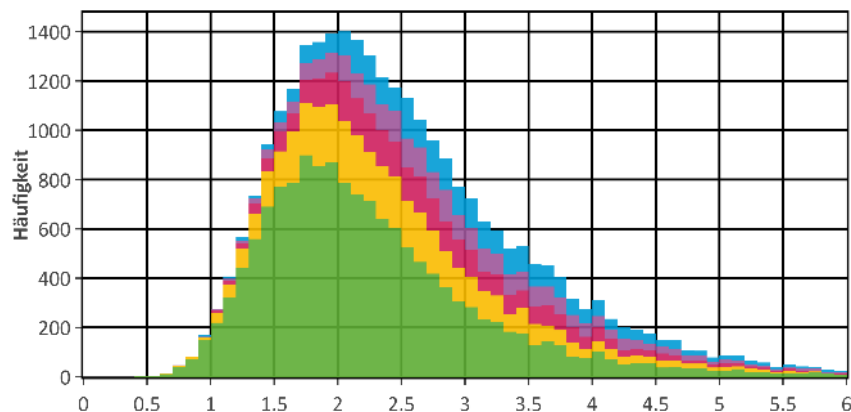
Pegel LAF in dB(A) = Level LAF in dB(A)

In order to investigate the measurement data within the scope of this study, an algorithm was created that determines the modulation depth ΔL_{AM} and the frequency of the amplitude modulation f_{AM} based on the audio data recorded for segments 10 seconds in length.

The measurement data obtained at the five locations were evaluated for the occurrence of amplitude modulation. The measurement locations were selected in such a way as to keep measurements as free as possible from extraneous noise. Nevertheless, amplitude-modulated noise was detectable, particularly during the night, as there was no other noise superimposed on the wind turbine noise at time of day.

An evaluation of measurement data in which there was no interfering extraneous or wind noise present showed that the median modulation depths, across all locations and across all turbine power ranges, were at approx. 1.5 dB to 2.5 dB (by way of example for a single location, see Abbildung 4). A comparison of the various study areas shows that higher modulation depths occurred in Study Areas 1 and 2. These locations are wind farms with few wind turbines and relatively short distances between the wind turbines and the residential construction and/or the measuring position.

Figure 12: Frequency distribution of modulation depth ΔL_{AM} in Study Area 2, classified by turbine output



Häufigkeit = Frequency

To examine the meteorological dependence of amplitude modulation, the data records were classified based on turbine electrical output and wind direction. As this analysis shows, in cross-wind conditions, the modulation depth in immission area SA 2 increases slightly, by 1.2 dB, as the level of output increases. In downwind conditions, on the other hand, the modulation depth increases by just 0.6 dB. Based on the data, this trend is discernible only for the wind farm with a single turbine in SA 2. Where the other study areas are concerned (SA 1 and SG 3 to 5), there is no discernible correlation between output and wind direction or modulation depth.

A comparison of the results generated under the AM method developed here against the maximum cyclical noise level method pursuant to the Technical Instructions on Protection Against Noise [Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm (1998)] shows a relatively linear relationship between the two methods. The maximum cyclical noise level method, however, does not make a distinction between periodically modulated noise and other noise characteristics. If, for a particular period of time, it can be ensured that noise is essentially periodically amplitude-modulated noise, for the areas studied here, it turns out that the modulation depth can be estimated using the maximum cyclical noise level method.

Infrasound immission measurement and assessment

Airborne sound waves in a frequency range of less than 20 Hz are referred to as ‘infrasound’. The physiology of the human ear does not permit perception of pitch of frequencies of less than 20 Hz. At sufficient levels of intensity, however, infrasound is nevertheless perceptible, for example as a pulsation or feeling of pressure. The perception threshold varies from one individual to the next. Hence, sensitive people may experience clear acoustic sensations, while others still cannot hear anything.

Because wind turbines are very large and have very low rotational speeds, they can generate infrasound. Whether and to what extent wind turbines cause infrasound emissions at distances of approx. 1000 m between the wind turbines and residential areas – distances which are quite common – should be investigated on the basis of long-duration measurements.

Since the main aim of the measurements was to study amplitude modulations, the measurement equipment and measurement concept were chosen and devised with this objective in mind. In an effort to generate robust results for infrasound as well, infrasound measurements were additionally carried out parallel to immission measurements in one of the study areas (Study Area 5). There, both a Class-1 microphone mounted on a tripod and an infrasound microphone mounted on a ground plate were used.

Abbildung 5 shows, by way of example, a spectrum measured in the vicinity of a residential building. The time segment shown was chosen because in this spectrum the individual lines at whole-number multiples of the frequency with which the rotor blades move past the wind turbine mast can be seen particularly clearly. These lines in the spectrum can thus be ascribed to the wind turbines as a source.

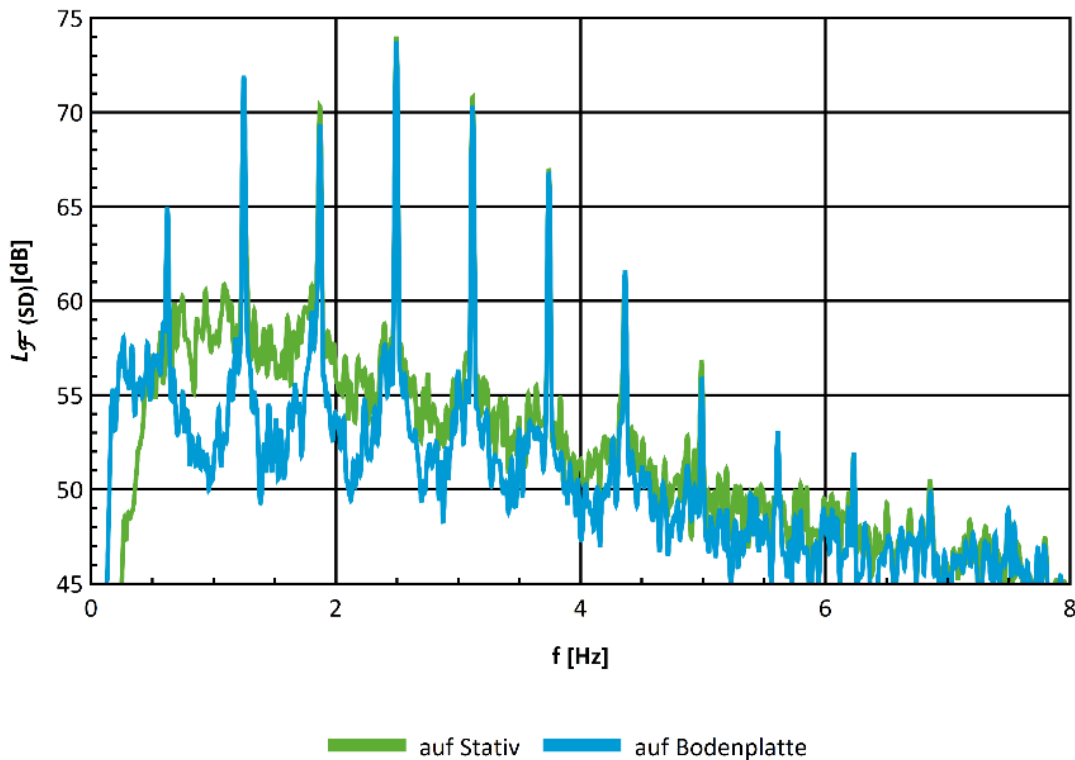
The measurements in study areas SA 1 to 4 were performed using a Class-1 microphone mounted on a tripod. These immission measurements differed from measurements using an infrasound microphone mounted on a ground plate in two key respects: At low frequencies, the Class-1 microphone is less sensitive than the infrasound microphone, and the influence of wind is significantly greater if measurements are performed on a tripod rather than on a ground plate. Differences in microphone sensitivity were investigated by means of low-frequency calibration, using simultaneous measurements taken in Study Area 5 using the infrasound microphone mounted on the ground plate and the Class-1 microphone on the tripod to determine confidence intervals for the measurements. The influence of wind was also analysed by comparing measurements in Study Area 5 and then factoring these into measurements of sound levels in Study Areas 1 to 4 as far as possible.

With these observations, it was possible to express levels for a variety of infrasound ranges as a function of wind turbine output in SA 1 to 4. Infrasound caused by wind turbines was detected in all of the study areas, i.e. with levels rising with increases in the power output of the wind turbines.

All infrasound levels – whether measured with the infrasound microphone mounted to the ground plate or the tripod-mounted Class-1 microphone – are below the auditory threshold as defined pursuant to DIN 45680 (1997).

Figure 13: Spectrum of sound pressure

Sample spectrum for a 10-minute window at a distance of approx. 1000 m from the wind turbines (SA 5), measured with the infrasound microphone on the ground plate and the tripod-mounted Class-1 microphone.



auf Stativ = On tripod; auf Bodenplatte = On ground plate

Performance and results of the annoyance surveys

The aim of the annoyance surveys was to record the degree of annoyance caused by wind turbine noise and to evaluate this as a function of the noise rating level. Residents were surveyed to identify the relationship between exposure to noise caused by wind turbines and the impact of this exposure on respondents. The main acoustic and non-acoustic determinants of wind turbines noise annoyance were identified. The effort consisted of a main survey (by telephone or optionally online) and in-depth interviews with residents. The purpose of the latter was to gain a detailed record of the impact the wind turbine noise had on everyday life, particularly in light of respondents' perception of amplitude modulation.

The surveys were broken down into acoustic and non-acoustic factors and into different types of annoyance and disturbance of residents' activities. Specifically, the following aspects were asked with regard to respondents' living situation and any annoyance or disturbance they experienced due to noise pollution.

► Non-acoustic influencing factors

- Respondents' attitudes towards wind energy and towards local wind turbines
- General perceived stress (standardised questionnaire set PSS10²)
- Visual impact
 - Shadow casting
 - Sight of the wind turbines
 - Beacons on the wind turbines (aviation-obstruction lighting)
 - Rotational motion, effect on the landscape
- Disturbance of activities
 - Disturbance of communication
 - Disturbance of the peace/concentration
 - Sleep disturbance
- Disturbance when outside the house

► Perceived acoustic influencing factors

- Noise characteristics
 - Rumbling
 - Droning
 - Rushing
 - Humming
 - Pulsating
 - Whistling

² *Perceived Stress Scale* (PSS-10; Cohen & Williamson, 1988) in the German version by Klein et al. (2016).

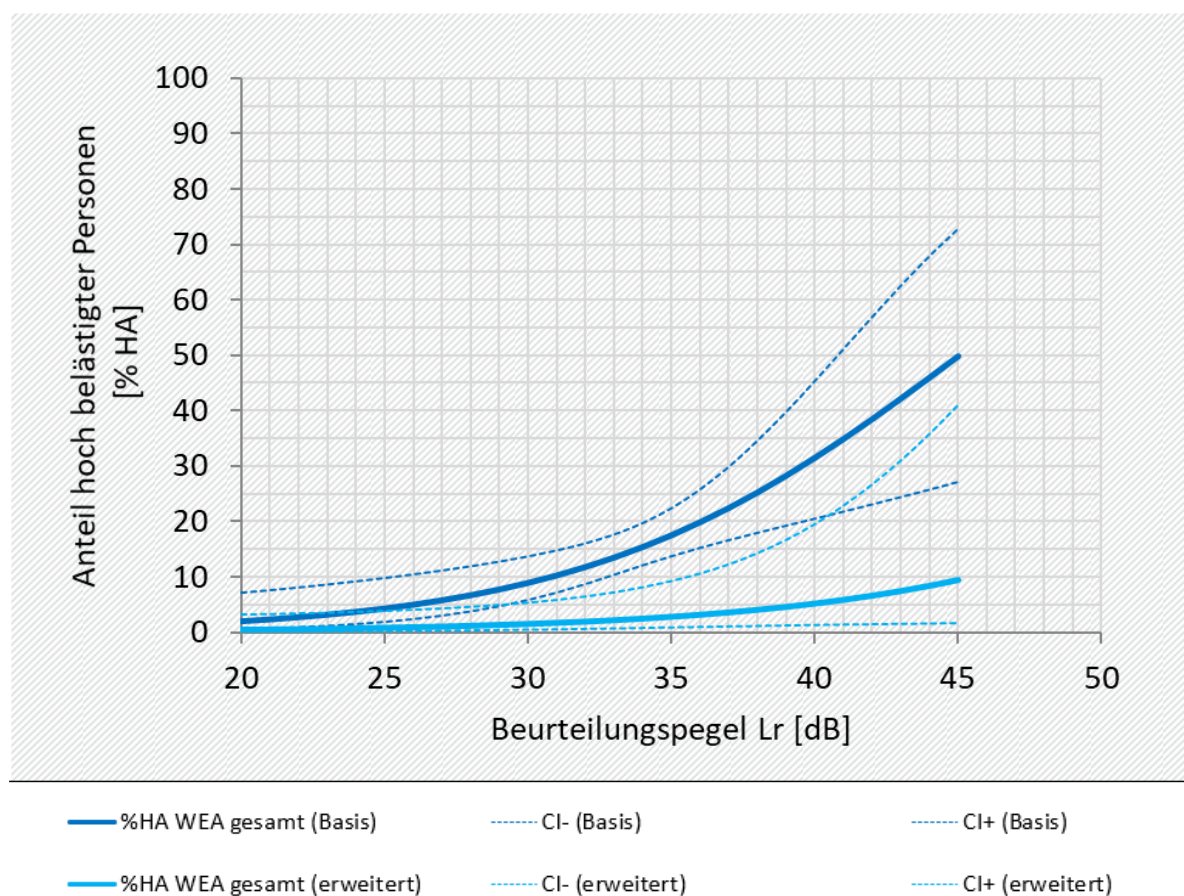
- Whooshing
- Oscillations

The surveys were carried out in all of the study areas, with a total of 468 persons at distances of up to 3 km from the wind farms. A lack of geographic coordinates made it impossible to determine a noise rating level for five respondents. Hence, there are noise-level and survey data in hand for a total of 463 persons for use in the exposure-response analyses.

Overall, respondents rated noise annoyance from wind turbines as low on average (with average responses falling between ‘not at all’ and ‘somewhat disturbed or annoyed’). The statistical relationship (the correlation) between noise rating level and annoyance is low.

The low overall level of noise annoyance (averaged across the entire sample) is apparently due to the relatively low noise exposure relative to other sources of noise, with a calculated noise rating level of $L_r < 43$ dB. As soon as an L_r of approx. 35 dB is exceeded, however, there is a significant increase in the percentage of respondents indicating a high level of annoyance (%HA, % highly annoyed) (Abbildung 6). In its Environmental Noise Guidelines for the European region (WHO, 2018), the World Health Organisation (WHO) identifies a %HA level of 10% as a health-relevant threshold. According to the WHO (2018), based on a systematic review of the evidence by Guski et al. (2017), this %HA value is reached if road traffic noise reaches $L_{den} = 53$ dB, if rail traffic noise reaches $L_{den} = 54$ dB and if aircraft noise or wind turbines noise reaches $L_{den} = 45$ dB. These values are based on meta-analyses referencing base models, i.e. for reasons of comparability only the noise rating level L_{den} was regarded as an influencing variable (Guski et al., 2017). As can be seen in Abbildung 6 (dark blue curve), in this study, from a noise rating level $L_r = 31$ dB in the base model in which the percentage of highly annoyed persons is predicted exclusively by the noise rating level L_r , this percentage of highly annoyed persons is greater than or equal to 10%. Converted, $L_r = 31$ dB corresponds to a day-evening-night noise level of approx. $L_{den} = 37$ dB. Hence, this study confirms the findings of previous studies, which found higher levels of annoyance with noise caused by wind turbines than with noise caused by other environmental sources, such as road traffic. In the base model, the present study reveals an even higher %HA than under the WHO Environmental Noise Guidelines (WHO, 2018) or the underlying review (Guski et al., 2017).

Figure 14: Percentage of persons who are highly annoyed (% HA) by wind turbine noise, total



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

Anteil hoch belästigter Personen [%HA] = Percentage of highly annoyed persons [%HA]; Beurteilungspegel Lr [dB] = Noise rating level Lr [dB]; %HA WEA gesamt(Basis) = %HA WT total (basic); %HA WEA gesamt(erweitert) = %HA WT total (extended); CI- (Basis) = CI- (basic); CI- (erweitert) = CI- (extended); CI+ (Basis) = CI+ (basic); CI+ (erweitert) = CI+ (extended); Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH = Source: own presentation, ZEUS GmbH

% HA = % highly annoyed; WT = wind turbine; CI-/± = lower/upper limit of the confidence interval of the exposure-impact curve; Basis: Influencing factor noise rating level L_r unadjusted; Extended: Influencing factors noise rating level L_r , sensitivity to noise, attitude towards wind turbines, perceived stress, visual impact of wind turbines, noise characteristics

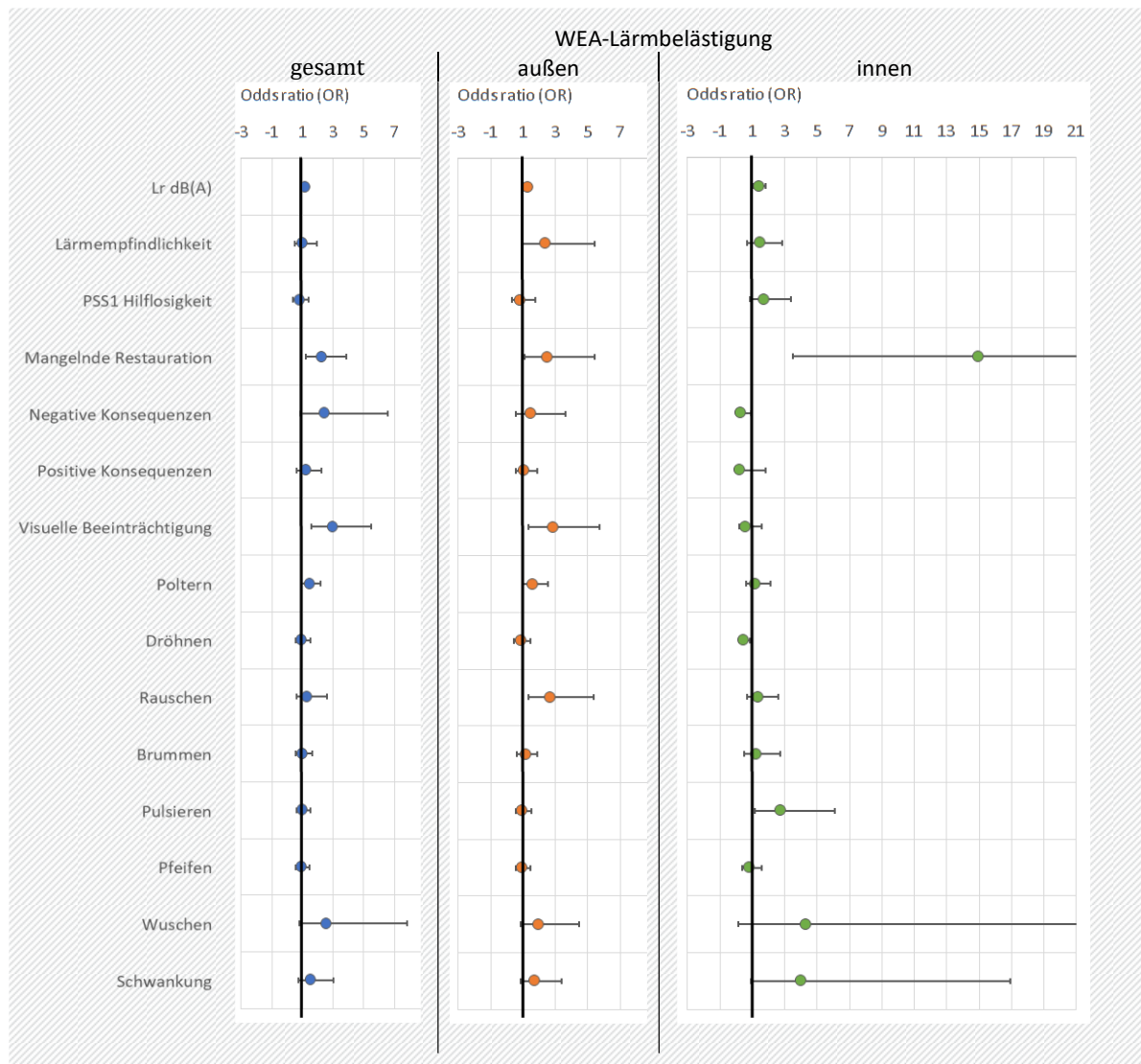
Noise annoyance is lower per noise rating level if additional influencing variables (non-acoustic variables, perceived noise characteristics) are also factored into the prediction model for the %HA component. If additional influencing factors are taken into account, the noise rating level plays less of a role in explaining annoyance over noise. In other words, the other influencing variables moderate the relationship between wind turbine noise exposure and annoyance; these other variables play a stronger role in annoyance due to wind turbine noise than the noise rating level itself. Among the non-acoustic factors, the following have the greatest impact on annoyance due to wind turbine noise:

- ▶ Attitude towards the local wind turbine, particularly the perception of limited use of the outdoors and limited recreation outside the apartment/house;
- ▶ Visual impact due to shadow casting and rotation of the rotors, the blinking aviation-obstruction lighting, the sight of wind turbines in general and the negative view of the impact wind turbines have on the landscape.

- Perceived noise characteristics, such as ‘whooshing’. The semantic description plays a clear role in respondents’ judgements of whether or not the noise is annoying. ‘Whooshing’ is often understood as a subjective perception of amplitude modulations. It was also possible to show that differences in annoyance levels across study areas correspond to differences in the frequency of occurrence of identified, stable amplitude modulations.

Abbildung 7 shows the strength of the various influencing factors on overall annoyance due to wind turbine noise, both outdoors and indoors, with the odds ratio (OR) as a measure of the effect size. The reference value is the value 1. If the odds ratio (coloured dot) including its confidence interval (the black line running through the dot) falls completely below or above the reference value of 1 (to the left or right of the value of 1 shown in the figure), the influence is considered to be statistically significant. The more the odds ratio, including its confidence interval, deviates from the value of 1, the stronger the effect.

Figure 15: Strength of effect (odds ratio) of the influencing variables of noise pollution due to wind turbines overall



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

Lr dB(A) = Lr dB(A); Lärmempfindlichkeit = Sensitivity to noise; PSS1 Hilflosigkeit = PSS1 Helplessness; Mangelnde Restauration = Lack of rest; Negative Konsequenzen = Negative consequences; Positive Konsequenzen = Positive consequences; Visuelle Beeinträchtigung = Visual impact; Poltern = Rumbling; Dröhnen = Droning; Rauschen = Rushing;

Brummen = Humming; Pulsieren = Pulsating; Pfeifen = Whistling; Wuschen = Whooshing; Schwankung = Fluctuating; WEA-Lärmbelästigung = WT noise pollution; Gesamt = Overall; Oddsratio(OR) = Odds ratio (OR); Außen = Outdoors; Oddsratio(OR) = Odds ratio (OR); Innen = Indoors; Oddsratio(OR) = Odds ratio (OR); Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH = Source: own presentation, ZEUS GmbH

The points shown depict the odds ratio (OR) as a measure of the effect strength of the respective influencing factor on wind turbine noise pollution overall (blue dots), both outside (orange dots) and inside the home (green dots). The horizontal lines through the dots represent the 95% confidence interval of the OR. The reference is an OR = 1. If an OR value including its confidence interval is greater than 1 (shown at the right in the figure), then the impact of the influencing factor adds to the annoyance. If an OR value is less than 1 (shown at the left in the figure), then this influencing factor diminishes the annoyance.

As the in-depth survey with a small overall sample of 25 respondents at the five locations shows, those surveyed generally take a positive view of wind energy overall, and of the wind turbines in their local vicinity as well. Even if most respondents do not feel directly bothered by the wind turbines, they can imagine that other people might be bothered – by noise, for example, by shadow casting and by the way the turbines interfere with the landscape and ambient light conditions. For the most part, the noise the wind turbines produce is described as noise that is noticeable particularly in the evenings. This ‘rushing’ noise is sometimes described as intermittent; this might be an indication of the pulsating character of wind turbine noise or of amplitude modulation. There are essentially very few differences across the five study areas. As it turned out through the in-depth survey, visual impacts also seem to play a role in addition to noise. Given the small size of the sample, however, no concrete conclusions can be drawn from the differences identified between the locations. In an overall sense, however, the data gleaned from the in-depth interviews confirm the findings of the main survey.

Performance and results of the listening tests

Listening tests were performed on-site with residents living near three of the study areas. A control experiment was carried out at the Cologne University of Applied Sciences and involving an approximately equal number of test subjects as in a study area; the experiment essentially confirmed the results observed in the individual study areas.

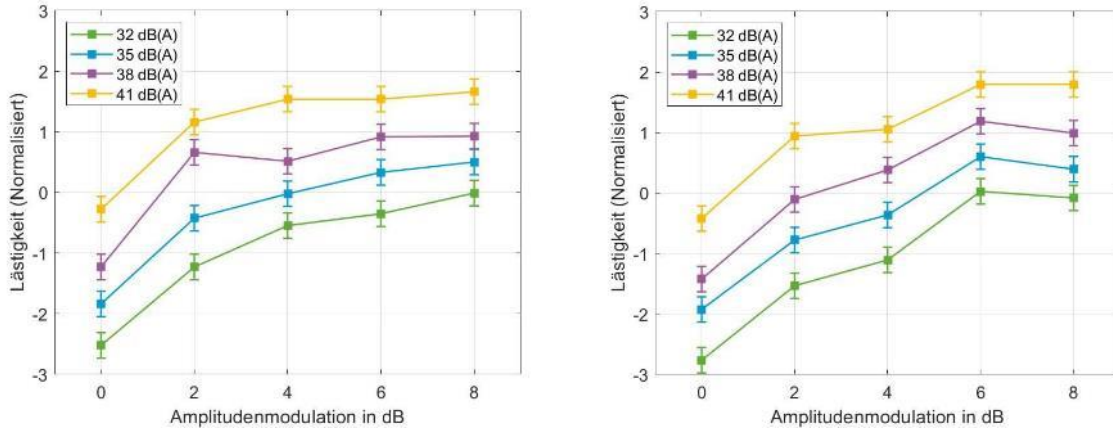
In the listening tests, subjects were presented with signals recorded at two measurement locations and featuring modulations of different magnitudes. The signals used for the listening tests had been extracted from these audio recordings and adjusted in level to give the stimuli comparable properties up to the modulation depth of the AM and the magnitude of the level. The listening tests also used recordings with time-constant AM and time-varying AM in order to compare the two with one another in terms of their annoyance.

The results of the listening tests demonstrate a significant influence of the noise level and AM on the degree of annoyance reported by study participants. These results confirm that the subjectively perceived annoyance clearly depends on the AM involved. The study of stimuli that varied with time showed no significant dependence of annoyance on behaviour of AM over time (increasing or decreasing).

The annoyance reported increased as AM increased. The results also showed that the mere perceptibility of an AM leads to an increase in annoyance level. The results are presented in Abbildung 8. The degree of annoyance reported as a result of fluctuation through the average level of different signals is almost identical across the three study areas.

Figure 16 : Annoyance of time-invariant amplitude modulations

Perceived (normalised) annoyance as a function of AM (x axis), the immission level presented (colour) and the measuring location (left: Measurement Location 1; right: Measurement Location 2). Shown here are the normalized nuisance assessments averaged over the subjects with 95% intra-subjective confidence intervals of the main effect for the factor of AM.



Lästigkeit (Normalisiert) = Annoyance (Normalised); Amplitudenmodulation in dB = Amplitude modulation in dB; Lästigkeit (Normalisiert) = Annoyance (Normalised); Amplitudenmodulation in dB = Amplitude modulation in dB

1 Einleitung

Windenergieanlagen sind für die Energiewende von zentraler Bedeutung. Bei der Planung und Genehmigung dieser Anlagen steht das Thema Lärm häufig im Fokus der Diskussion. Dabei werden vielfältige Fragen aufgeworfen, die sowohl die Lärmentstehung und -minderung als auch die Auswirkungen des Lärms auf die Gesundheit und Lebensqualität der Bevölkerung betreffen. Geräusche von Windenergieanlagen unterliegen in ihrer Amplitude und Frequenzzusammensetzung räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Die Geräusche variieren aufgrund von standort-, wetter- und windspezifischen Gegebenheiten und sind abhängig vom Typ, der Drehgeschwindigkeit und dem Betriebsmodus der Anlage. Die Geräuschenstehung ist maßgeblich beeinflusst vom Strömungsverhalten entlang der Rotorblätter, die bei den heutigen immer größer werdenden Anlagen, unterschiedliche Wind- und Luftschichtprofile durchlaufen. Eine Besonderheit bei den Geräuschenstehungen stellen die sogenannten amplitudenmodulierten Geräusche dar. Diese Geräusche zeichnen sich durch eine in Bezug zur Umdrehungsfrequenz der Windenergieanlagen stehende wiederkehrende Geräuschpegelveränderung aus.

Das Forschungsprojekt wurde in einer interdisziplinären Kooperation von drei Firmen und einer Hochschule durchgeführt. Die Langzeitschallmessungen sowie die messtechnische Erfassung der meteorologischen Parameter wurde von der deBAKOM GmbH durchgeführt. An der Auswertung der amplitudenmodulierten Geräusche und deren Einordnung sowie der Auswertung von Infraschall beteiligte sich die Dr. Kühner GmbH. Die Zeus GmbH lieferte die Durchführung, Auswertung und Bewertung der Befragungen vor Ort. Die Hörversuche wurden von der TH Köln durchgeführt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die nachfolgenden Fragestellungen umfassend bearbeitet:

- ▶ In welcher Häufigkeit werden Amplitudenmodulationen (AM) beobachtet?
- ▶ Stehen AM in Zusammenhang mit Betriebs-, Anlagen-, Standort- oder Wetterdaten?
- ▶ Kann unter Berücksichtigung der Lärmwirkungsforschung eine von AM abhängige Belästigung der Anwohnenden festgestellt werden?
- ▶ Können Rückschlüsse auf die generelle Belästigungssituation der Bevölkerung durch Geräusche bei Windenergieanlagen in Deutschland gezogen werden?
- ▶ Werden durch Windenergieanlagen verursachte periodisch amplitudenmodulierte Geräusche als besonders belästigend wahrgenommen?

Insgesamt wurden in fünf Untersuchungsgebieten Langzeitmessungen im Immissionsbereich (800 m bis 1500 m Abstand zur nächstgelegenen Windenergieanlagen) und bei drei Untersuchungsgebieten zusätzlich im Emissionsbereich (150 m bis 200 m Abstand zur nächstgelegenen Windenergieanlagen) durchgeführt und ausgewertet. In allen Untersuchungsgebieten wurden Befragungen und in drei Untersuchungsgebieten Hörversuche durchgeführt.

2 Konzeption der Studie

Um die Wirkungen der Geräusche von Windenergieanlagen an Land, insbesondere amplitudenmodulierter Geräusche zu untersuchen wurde die Studie bestehend aus drei Bausteinen konzipiert.

Baustein 1: Langzeitmessungen von Windenergieanlagengeräuschen

Baustein 2: Befragung von Anwohnerinnen und Anwohnern im Umfeld von Windenergieanlagen

Baustein 3: Hörversuche zur Wirkung amplitudenmodulierter Geräusche

Im Baustein 1 wurden Messungen der Geräusche von Windenergieanlagen an fünf deutschlandweit verteilten Standorten vorgenommen. Durch Abgleich mit Daten zum Betrieb (Zeiten, Leistung), Art der Anlage, topographischen Situation und den meteorologischen Bedingungen sollten die Einflussfaktoren auf die Amplitudenmodulation eruiert werden. Als Kernergebnisse der Langzeitmessungen auch für die weiteren Bausteine wurden standortspezifisch die Auftrittshäufigkeit und Modulationstiefe stabiler, periodischer Amplitudenmodulationen ermittelt.

Gegenstand von Baustein 2 ist die Befragung von Anwohnenden an den gleichen fünf Standorten, an denen die Langzeitmessungen durchgeführt wurden. Ziel hierbei war es, den Grad der Belästigung der Anwohnenden durch Windenergieanlagengeräusche bezogen auf prognostizierte Beurteilungspegel zu ermitteln. Dabei galt es zu prüfen, inwieweit die standortspezifischen Kenngrößen der Amplitudenmodulation, die subjektive Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen und weitere Kontextfaktoren über den prognostizierten Beurteilungspegel hinaus die Lärmbelästigung beeinflussen. Die Befragungsstudie ist methodisch eine Querschnittsstudie, d.h. es wird zu einem Zeitpunkt befragt, die Befragungsangaben mit den akustischen Daten korreliert und die Assoziationen zwischen der Lärmbelästigung und potenziellen Einflussgrößen in statischen Vorhersagemodellen (Regressionsanalysen) quantifiziert. Mithilfe der statistischen Analysen lassen sich dabei Zusammenhänge zwischen der Lärmbelästigung und den Einflussfaktoren untersuchen, eine eindeutige Ursache-Wirkungszuschreibung ist dabei streng genommen nicht möglich. So kann zwar in der Befragungsstudie der mögliche Zusammenhang zwischen der Amplitudenmodulation bzw. ihrer subjektiven Wahrnehmung und der Belästigung durch Windenergieanlagengeräusche in der anwohnenden Bevölkerung aufgezeigt werden, ob und in welchem Maß der akustische Effekt amplitudenmodulierter Geräusche ursächlich für die Lärmbelästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen ist, lässt sich nur durch eine systematische, experimentell angelegte Studie untersuchen.

Aus diesem Grund wurde als Baustein 3 unter kontrollierten bzw. standardisierten Bedingungen Hörversuche mit Anwohnenden von drei der fünf Standorte sowie einer Kontrollgruppe von nicht im Umfeld von Windenergieanlagen lebenden Personen durchgeführt. Dabei wurden den Untersuchungspersonen verschieden amplitudenmodulierte Geräusche dargeboten und die akuten Belästigungsreaktionen hierauf erfasst. Die kontrollierte Darbietung der Geräuschszenarien erlaubt eine eindeutige Ursachenzuschreibung und -quantifizierung, d.h. Reaktionsunterschiede auf die Geräuschszenarien lassen sich auf Unterschiede in den Geräuschszenarien und auf den quantitativen Grad der in den Szenarien manipulierten Amplitudenmodulationen zurückführen.

3 Untersuchungsgebiete

Die Messkampagnen wurden an insgesamt fünf Standorten in Deutschland durchgeführt. Ziel bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete (UG) war, die unterschiedlichen topografischen Verhältnisse in Deutschland zu berücksichtigen. Dies wurde durch die Verteilung der Untersuchungsgebiete über das gesamte Bundesgebiet erreicht. Die Untersuchungsgebiete lagen in den folgenden Regionen und Bundesländern.

- ▶ UG 1 - Mitteldeutschland, Hessen
- ▶ UG 2 - Westdeutschland, Rheinland-Pfalz
- ▶ UG 3 - Norddeutschland, Niedersachsen
- ▶ UG 4 - Ostdeutschland, Brandenburg
- ▶ UG 5 - Süddeutschland, Baden-Württemberg

In der Abbildung 17 ist die Lage der Untersuchungsgebiete eingetragen.

Abbildung 17: Lage der Untersuchungsgebiete in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Die Leistungsklassen der untersuchten Windenergieanlagen lagen im Bereich 2 MW bis 3 MW mit einer Nabenhöhe von 100 m bis 140 m und einem Rotordurchmesser von 80 m bis 135 m. Generell befanden sich im näheren Umfeld der Messorte keine relevanten Geräuschquellen wie beispielsweise größere Industrieanlagen, größere gewerbliche Anlagen oder Autobahnen.

An vier der fünf Standorte wurden die Messungen in Abstimmung mit den Betreibern der jeweiligen Anlagen durchgeführt, sodass für die Auswertung der Messdaten die Anlagensignale verwendet werden konnten. Ein Standort wurde ohne Kenntnis der Betreiber messtechnisch erfasst. Die Standorte werden im Folgenden näher beschrieben und sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Kennzahlen der Untersuchungsgebiete

	UG 1	UG 2	UG 3	UG 4	UG 5
Lage in Deutschland	Mitte	West	Nord	Ost	Süd
Anzahl der Windenergieanlagen	3	1	6	21	10
Leistungsklasse Windenergieanlagen	2 – 3 MW	3 MW	2 – 2,5 MW	2,5 – 3 MW	2,5 MW
Rotordurchmesser Windenergieanlagen	80 – 100 m	ca. 130 m	90 – 100 m	110 – 120 m	ca. 120 m
Nabenhöhe Windenergieanlagen	ca. 140 m	ca. 135 m	ca. 100 m	ca. 140 m	ca. 140 m
Messentfernung zum Immissionsort	1100 m	800 m	1500 m	1000 m	1000 m
Lage der Windenergieanlagen	Freies Feld	Waldrand	freies Feld	freies Feld	Wald
Topografie	schwach hügelig	stark hügelig	flach	flach	hügelig
Höhe über NHN in der Umgebung	350 – 450 m	200 – 400 m	7 – 14 m	40 – 60 m	280 – 400m
Höhe über NHN am Immissionsort	380 m	345 m	7 m	50 m	340 m
Höhe über NHN Windenergieanlagen	400 – 410 m	320 m	10 – 14 m	35 – 55 m	360 – 380 m

Zwischen dem Windpark des UG 1 und dem Immissionsort verläuft eine relativ regelmäßig befahrene Landesstraße. Zur Nachtzeit nahm die Anzahl der vorbeifahrenden Fahrzeuge aber deutlich ab.

Südwestlich bis südlich der Windenergieanlagen im UG 2 verläuft ein schmales, bewaldetes Tal mit einer Ausdehnung von ca. 500 m bis 700 m und einem Höhenunterschied von bis zu 110 m. Die Anlage steht am Waldrand in unmittelbarer Entfernung zum Rand des Tals.

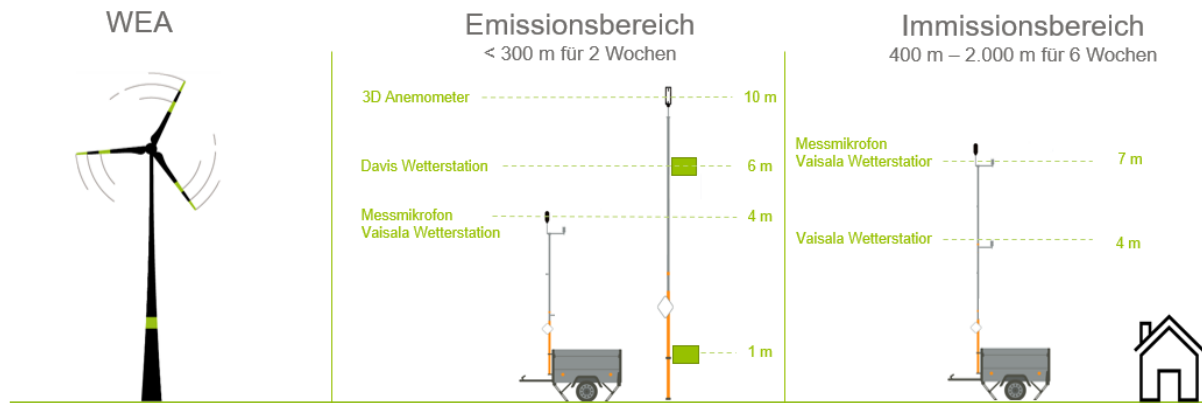
Im weiteren Umfeld (ca. 1 km Entfernung) befanden sich im UG 3 drei ältere Windenergieanlagen der 1-MW-Klasse mit einer Nabenhöhe von ca. 60 m und einem Rotordurchmesser von ca. 50 m.

4 Messkampagnen

4.1 Messdurchführung

Der Messaufbau wurde in zwei Bereichen durchgeführt. Zum einen in einem Bereich in der Nähe eines möglichen Immissionsorts und zum anderen in einem Emissionsbereich in unmittelbarer Umgebung einer Windenergieanlage. Abbildung 18 verdeutlicht die Messanordnung.

Abbildung 18: Schematische Darstellung des Messaufbaus



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

In jedem der fünf Untersuchungsgebiete wurde eine Langzeitmessung über jeweils sechs Wochen im Immissionsbereich durchgeführt. Parallel dazu fand in drei der fünf Untersuchungsgebiete eine Messung im Emissionsbereich der Anlagen über zwei Wochen mit einer automatisch arbeitenden Messstation auf einer Mikrofonhöhe von 4 m statt. Gleichzeitig erfolgte die Erfassung der meteorologischen Daten auf jeweils gleicher Höhe des Mikrofons, sowie zusätzlich in 10 m, 6 m und 1 m Höhe auf einem extra Stativ (Abbildung 19). Im Immissionsbereich wurden die Geräusche in einer Höhe von 7 m ermittelt. Die meteorologischen Daten standen im Immissionsbereich in 7 m und in 4 m Höhe zur Verfügung (Abbildung 20).

Die Ermittlung der Anlagensignale erfolgte über einen Datenlogger im Turmfuß einer Windenergieanlage oder wurde als Datensatz vom Hersteller bereitgestellt.

Abbildung 19: Messaufbau im Emissionsbereich der Windenergieanlagen



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 20: Messaufbau im Immissionsbereich der Windenergieanlagen



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

4.2 Erfassung der Messdaten

Die Erfassung der Messdaten erfolgte mit geeichten Messstationen der Firma deBAKOM mit Klasse-1-Mikrofonen. Zusätzlich wurde zur Reduktion der Windgeräusche am Außenmikrofon ein sekundärer Windschirm benutzt. Die Messstationen zeichneten kontinuierlich auf und speicherten regelmäßig folgende Daten:

- ▶ L_{eq} -Werte mit 10-Hz-Schriebfrequenz
- ▶ kontinuierliche schmalbandige Spektren (Frequenzstruktur des Geräusches / FFT) mit einer Frequenzauflösung von 3 Hz
- ▶ Pegel-Zeitverlauf
- ▶ Roh-Audiodaten in einem Format mit 24 Bit / 48 kHz zur nachträglichen Bearbeitung.

Für die meteorologischen Daten wurden folgende Größen erfasst:

- ▶ Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Regen, relative Luftfeuchte, Luftdruck und Temperatur

Diese liegen für die verwendeten Sensoren von Vaisala und Young (3D-Anemometer) im 1-Sekunden-Takt und für den Sensor von Davis im 10-Sekunden-Takt vor. Zusätzlich erfasste das 3D-Anemometer von Young auch die vertikale Windgeschwindigkeit im 1-Sekunden-Takt.

Die Anlagensignale wurden mit einem Datenlogger aufgezeichnet oder vom Betreiber zur Verfügung gestellt. Mit einer Zeitauflösung von 1 Sekunde wurden die folgenden Signale aufgezeichnet:

- ▶ Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe, Leistung der Anlage, Drehzahl der Anlage, Windrichtung

Alle Daten werden zeitsynchron aufgezeichnet und in einer Datenbank zusammengefasst. Die Messungen erfolgten je Standort innerhalb der folgenden Zeiträume:

- ▶ UG 1 (Mitteldeutschland): 07.05.2018 bis 26.06.2018
- ▶ UG 2 (Westdeutschland): 11.11.2018 bis 18.12.2018
- ▶ UG 3 (Norddeutschland): 15.11.2019 bis 09.02.2019
- ▶ UG 4 (Ostdeutschland): 18.06.2020 bis 29.08.2020
- ▶ UG 5 (Süddeutschland): 12.11.2020 bis 11.01.2021

4.3 Datenauswertung

4.3.1 Grundlagen

Mit dem beschriebenen Messsystem wurden umfangreiche Daten erhoben. Die Grundlagen der Datenauswertung werden exemplarisch an den Messergebnissen des UG 4 vorgestellt. Weitere Details sowie die Ergebnisse aus den anderen Gebieten sind im Anhang B dargestellt.

Entsprechend des Betriebsverhaltens einer Windenergieanlage ist davon auszugehen, dass sich fortlaufend maßgebliche Änderungen der Emission ergeben. Aus diesem Grund wurden 10-Minuten-Mittelungspegel (in Summe 48 Mittelungspegel pro Nacht) für die Bestimmung des maßgeblichen Wertes des Beurteilungspegels herangezogen.

Für die Auswertung der Schallmessdaten wurden nur 10-Minuten-Mittelwerte verwendet, bei denen folgende meteorologische Voraussetzungen gegeben sind:

- ▶ Maximal 20 % Regen³
- ▶ relative Luftfeuchte < 95 %
- ▶ Temperatur > 0 °C

Für die Auswertung werden Zeiträume betrachtet, in denen bodennahe Windgeschwindigkeiten gering sind, und auf Nabenhöhe hohe Windgeschwindigkeiten auftreten. Dies führt zu einer Minimierung der windinduzierten Geräusche am Mikrofon sowie der durch die Vegetation induzierten Geräusche im Umfeld des Immissionsortes. Durch diese Vorgehensweise wurde sichergestellt, dass fremdgeräuscharme Messungen (in Bezug auf windinduzierte Geräusche) für alle Lastzustände der Windenergieanlagen durchgeführt wurden. Zeiträume mit auffälligen Pegelzeitverläufen sowie mit einer spektralen Auffälligkeit wurden überprüft, ggf. abgehört und von der Auswertung ausgeschlossen. Eine darüber hinaus durchzuführende Fremdgeräuschkorrektur war nicht notwendig. Die Auswertung ist daher eine sichere Abschätzung der durch die Windenergieanlagen erzeugten Schalldruckpegel.

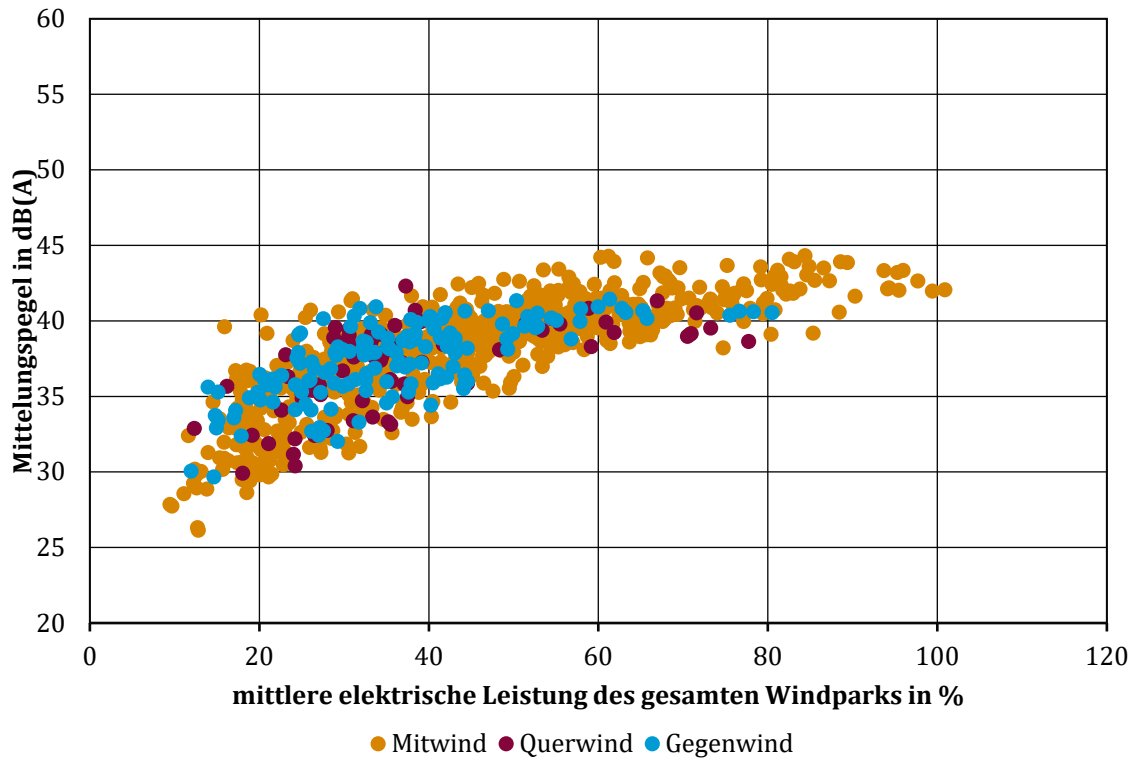
Da die Schallemissionen von Windenergieanlagen direkt von der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe und die Schallausbreitung von der Windrichtung und -geschwindigkeit abhängen, wurden die Ergebnisse in einzelne Klassen unterteilt. Die Aufteilung der Windrichtungen ergibt sich entsprechend der Anmerkungen der VDI 3723 Blatt 2 (Beuth 2006) in zwei Sektoren von +/- 60° für Mit- und Gegenwind sowie zwei Sektoren von +/- 30° für Querwind. Die Aufteilung der Windgeschwindigkeiten erfolgt in 2 m/s Klassen.

4.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Pegelauswertungen werden exemplarisch für das UG 4 dargestellt. Für die in der Messzeit erfassten Schalldruckpegel am Immissionsort im UG 4 ergeben sich die in Abbildung 21 aufgeführten Verteilungen der gemittelten Pegel über die mittlere Leistung der Anlagen und die in Abbildung 22 dargestellten Verteilungen in Bezug auf Windrichtung und -geschwindigkeit in Nabenhöhe.

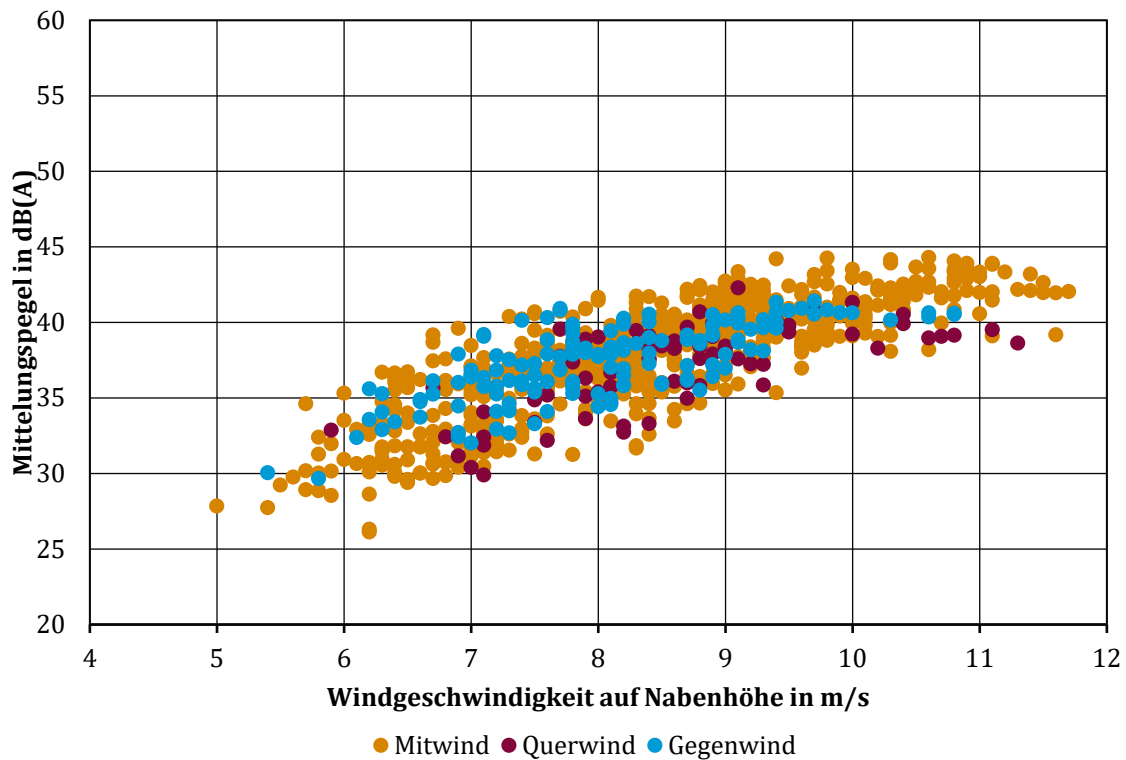
³ Erfahrungsgemäß hat ein Anteil von 20 % Regen keinen relevanten Einfluss auf den 10-Minuten Mittelungspegel.

Abbildung 21: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des Windparks im UG 4



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 22: 10-min-Mittelungspegel über mittlere Windgeschwindigkeit des Windparks im UG 4



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

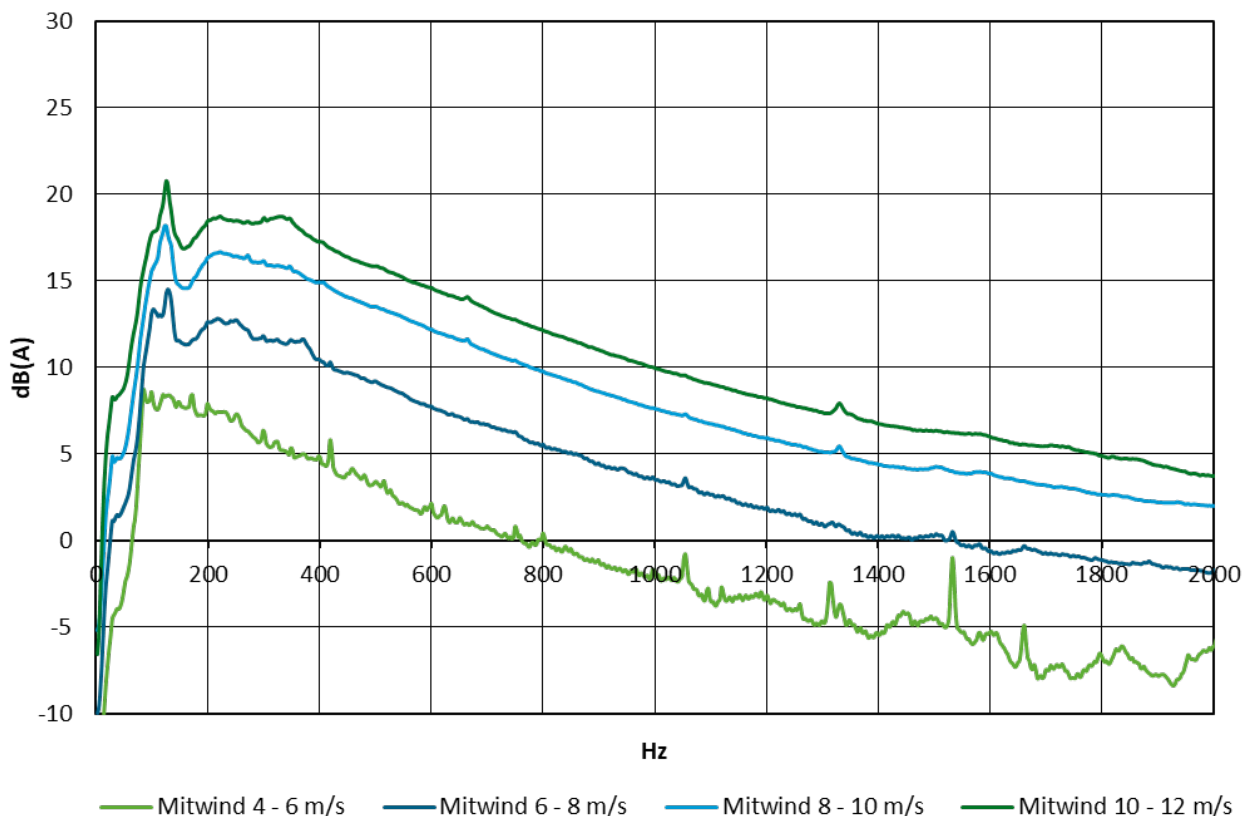
Gemäß der Messwerteverteilung ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten energetischen Mittelungspegel für die einzelnen Windgeschwindigkeits- bzw. Windrichtungsklassen in Nabenhöhe.

Tabelle 2: Mittelungspegel der einzelnen Windgeschwindigkeits- bzw. Windrichtungsklassen in Nabenhöhe

Windrichtung	Mittelungspegel je Klasse $L_{AFeq,m}^{(h)}$ in dB(A)			
	4 - 6 m/s	6 - 8 m/s	8 - 10 m/s	10 - 12 m/s
Mitwind	30,5	35,8	39,6	42,0
Querwind	32,9	35,6	38,3	39,7
Gegenwind	29,8	36,8	38,8	40,5

Für die gesamte Messdauer innerhalb der Zeit von 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr (Nachtzeit) sind die energetisch gemittelten Spektren exemplarisch für die Mitwindsituation der jeweiligen Windgeschwindigkeitsklasse in Abbildung 23 dargestellt.

Abbildung 23: Mitwind, Schmalbandspektren (Auflösung 2,9 Hz, A-bewertet)



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Die A-bewerteten Schmalbandspektren mit einer Linienbreite von 2,9 Hz der einzelnen Klassen zeigen typische Strukturen von Windenergieanlagen bei Langzeitmessungen im Immissionsbereich. Aus der Summe aller Einzellinien des Schmalbandspektrums ergeben sich wiederum die Mittelungspegel, die in Tabelle 2 aufgeführt sind. Eine spektrale Auffälligkeit im Bereich zwischen 100 Hz und 200 Hz ist bei den meisten Windenergieanlagentypen erfahrungsgemäß aufgrund von Zahneingriffsfrequenzen von Getrieben oder eine Nutenfrequenz von getriebelosen Anlagen zu erwarten. Die Analyse der Schmalbandspektren bezüglich der Tonalität gemäß der DIN 45681 (Beuth 2005) zeigt, dass das Geräusch der Windenergieanlagen am Messort keine tonale Komponente aufweist, die messtechnisch zu einem Tonzuschlag führt.

Die Messungen wurden unter Beachtung der Bestimmungen der DIN 45645-1 (Beuth 1996), Abschnitte 6.2 bis 6.5, durchgeführt. Es handelt sich jeweils um repräsentative Messungen, die die Immissionssituation zutreffend kennzeichnen. Zur Angabe der Messunsicherheit bei der Beurteilung der Geräuschimmissionen wird in der DIN 45645-1 (Beuth 1996) auf die VDI-Richtlinie 3723-1 (Beuth 1993) verwiesen, welche 2008 seitens der Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM 2008) zur Anwendung bestätigt wurde. Nach dieser VDI-Richtlinie berechnet sich der zweiseitige Vertrauensbereich der Beurteilungspegel je Klasse für die Nachtzeit (Tabelle 3). Bei der Berechnung der Unsicherheiten wurde die statistische Unabhängigkeit berücksichtigt.

Tabelle 3: Zweiseitiger Vertrauensbereich der Beurteilungspegel je Klasse nach VDI 3723-1

Windrichtung	Zweiseitiger Vertrauensbereich je Klasse $L_{A\text{F}eq,m}^{(h)}$ in dB(A)			
	4 - 6 m/s	6 - 8 m/s	8 - 10 m/s	10 - 12 m/s
Mitwind	- 2,2 / + 1,9	-0,7 / + 0,7	-0,3 / + 0,5	-0,5 / + 0,5
Querwind	- 3,0 / + 3,0	-2,4 / + 1,9	-1,0 / + 1,0	-1,7 / + 1,4
Gegenwind	- 3,0 / + 3,0	-0,7 / + 1,0	-0,5 / + 0,7	-0,3 / + 0,3

Die geringfügig breiteren Vertrauensbereiche für die Querwindsituation bzw. die Windgeschwindigkeitsklasse 4 – 6 m/s ergeben sich aus einer geringeren Anzahl an Messwerten. Zudem haben bei geringen Windgeschwindigkeiten und daraus resultierenden geringeren Pegeln Fremdgeräusche (z. B. Straßenverkehr) zeitweise einen höheren Einfluss. Mit einem zweiseitigen Vertrauensbereich von 0,3 dB bis 1,0 dB liegt die Messung im erwartbaren Bereich für Langzeitmessungen im Immissionsbereich von Windenergieanlagen.

Für die von den Messgeräten der Klasse 1 herrührenden Beiträge zur Messunsicherheit wird nach DIN EN 61672-2 (Beuth 2018) ein Pegel von $< \pm 0,7$ dB(A) angegeben.

4.3.3 Auffälligkeiten bei der Datenauswertung in den UG 1 und UG 5

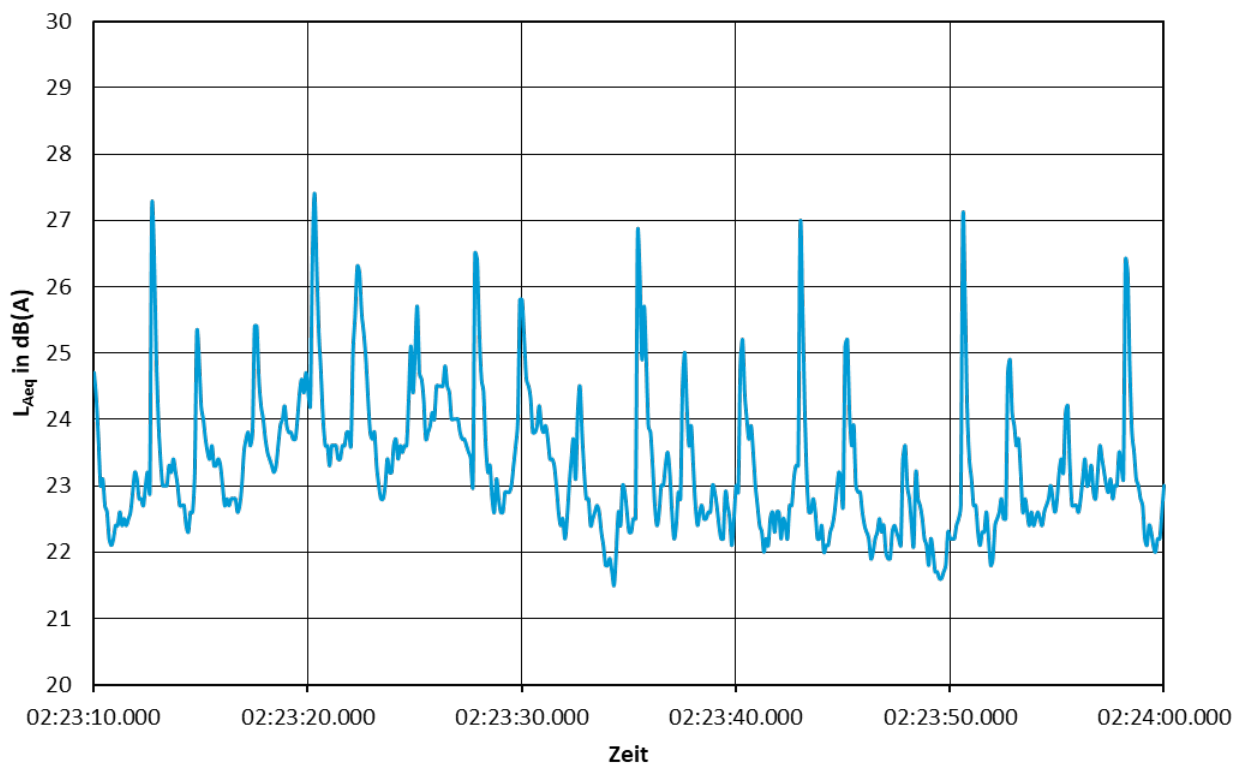
Im Untersuchungsgebiet 1 traten zeitweise bei geringen Windgeschwindigkeiten, im Bereich der Einschaltwindgeschwindigkeit, impulshaltige Geräusche auf. Die Geräusche waren laut Serviceteam des Herstellers auf einen Defekt in der Gondel einer der Windenergieanlagen zurückzuführen. Der Defekt wurde nach der Messkampagne gemäß den Angaben des Serviceteams behoben. Die impulshaltigen Geräusche sind aus dem Pegelzeitverlauf in Abbildung 24 erkennbar. Diese Pegelzeitverläufe ähneln den amplitudenmodulierten Windenergieanlagengeräuschen, weisen aber eine deutlich stärkere Steilheit auf. Da es sich bei den durch den Defekt verursachten Geräuschen nicht um das aerodynamisch erzeugte

amplitudenmodulierte Rauschen an den Rotoren der Windenergieanlagen handelt, wurden diese Geräusche aus der Auswertung ausgeschlossen.

Im UG 5 trat eine tonale Komponente bei 300 Hz auf, die während ca. 4 % der Messzeit mit einem Tonzuschlag von 1 dB bis 2 dB zu bewerten ist. Da die Untersuchung in diesem Gebiet ohne die Unterstützung der Anlagenbetreiber erfolgte, lagen für die Auswertung keine Anlagensignale vor. Anhand der Klassierung nach unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten konnte jedoch gezeigt werden, dass die Tonfrequenz über alle Windgeschwindigkeiten konstant bei 300 Hz lag. Da die Windenergieanlagen im unteren Leistungsbereich drehzahlvariabel betrieben werden, können diese als Verursacher der Tonalität größtenteils ausgeschlossen werden. Des Weiteren trat die tonale Komponente besonders bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten auf, dies auch bei abgeschätzten Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe von unter 1 m/s.

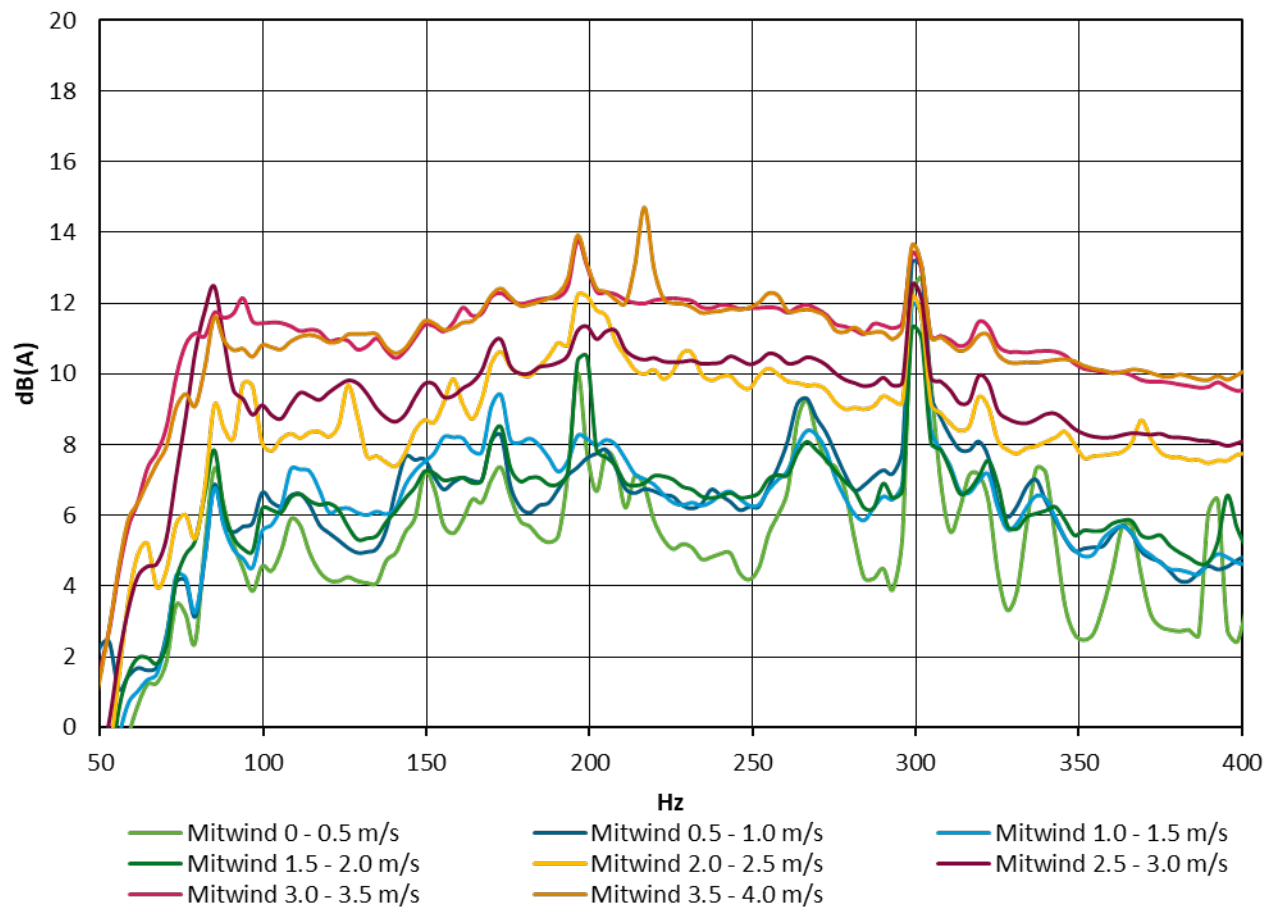
In Abbildung 25 sind gemittelte Spektren der gesamten Messzeit mit einer Klassenbreite von 0,5 m/s im Bereich von 0 m/s bis 4 m/s dargestellt. Aufgrund des Auftretens auch bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten ist davon auszugehen, dass die Anlagen zu diesen Zeitpunkten nicht in Betrieb waren. Als Verursacher der Tonalität könnte eine Abluftanlage eines nahegelegenen Schweinestalls in ca. 220 m Entfernung in Frage kommen. Ein relevanter Einfluss auf den Mittelungspegel wurde nicht festgestellt.

Abbildung 24: Exemplarischer Pegel-Zeit-Verlauf im UG 1



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 25: A-bewertete gemittelte Mitwind-Schmalbandspektren im UG 5 in 0,5 m/s Klassen



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

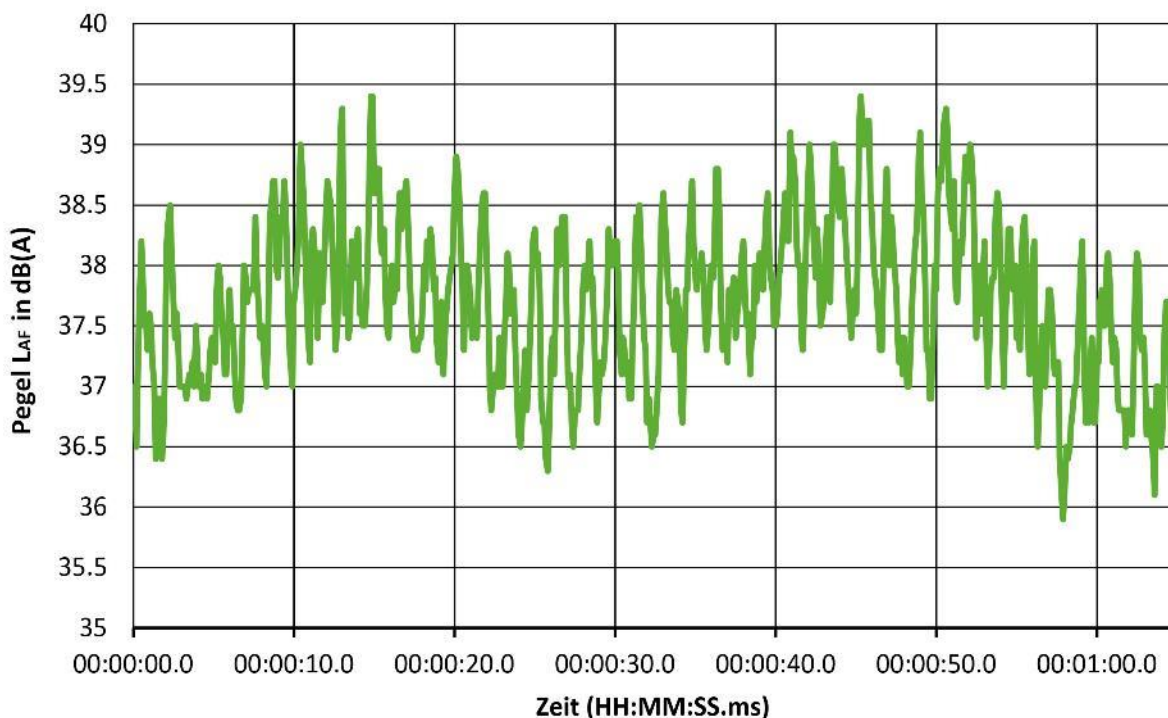
4.4 Amplitudenmodulation

4.4.1 Grundlagen der Auswertung

Als Grundlage für die Auswertung der Messdaten bezüglich des Auftretens von Amplitudenmodulation wird zunächst definiert: Die zu untersuchende Amplitudenmodulation von Windenergieanlagen steht im direkten Zusammenhang mit der Drehfrequenz der Anlage und muss, wie in Abbildung 26 gezeigt, aus dem zugrundeliegenden Pegelschrieb als periodische Schwankung des Pegels erkennbar sein.

Geräusche von Windenergieanlagen unterliegen auch anderen zeitlich unregelmäßigen Schwankungen, die von Menschen wahrgenommen werden können. Diese können z. B. durch Ausbreitungsvorgänge, Wind oder Interferenzen erzeugt werden und werden teilweise in der Fachliteratur ebenfalls als amplitudenmodulierte Geräusche bezeichnet. Diese Schwankungen stehen aber meist nicht in direktem Zusammenhang mit der Rotationsfrequenz und werden von Anwohnenden nicht als „Wuschen“ beschrieben. Im Folgenden wird der Begriff Amplitudenmodulation für Pegelschwankungen im Zusammenhang mit der Drehfrequenz bezeichnet, wie sie in Abbildung 26 als schnelles An- und Abschwellen des Pegels im 1,2 s Takt zu sehen sind.

Abbildung 26: Exemplarischer Pegelschrieb bei vorliegender Amplitudenmodulation



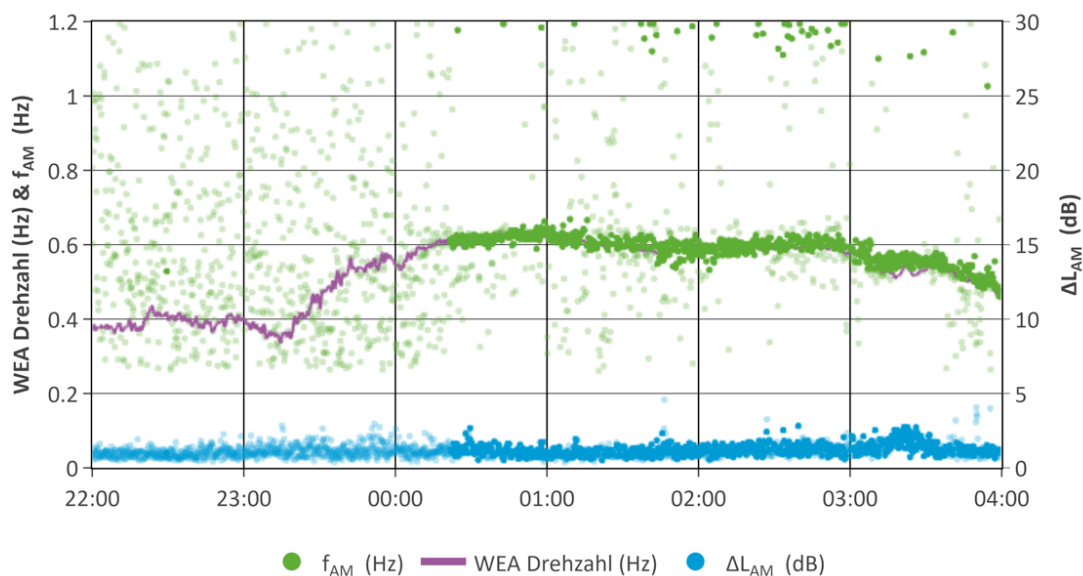
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Für die Untersuchung der Amplitudenmodulation wurde im Rahmen dieser Studie ein Algorithmus entworfen, der anhand der aufgezeichneten Audiodaten für Abschnitte mit einer Länge von 10 Sekunden die Modulationstiefe ΔL_{AM} und die Frequenz der Modulation f_{AM} bestimmt. Der Algorithmus ist im Anhang C detailliert beschrieben. Vereinfacht zusammengefasst wird der Pegelschrieb auf seine Frequenzzusammensetzung im Bereich von 0,3 Hz bis 1,2 Hz untersucht, um die vorherrschende Frequenz f_{AM} der Modulation zu bestimmen. Dabei wird die von Windenergieanlagen aufgrund der Rotationsgeschwindigkeit zu erwartende

Periodizität berücksichtigt, um aus der Differenz der Minima und Maxima des Pegelschriebs das Maß der Modulationstiefe zu bestimmen. Unabhängig von dem tatsächlichen Auftreten von periodisch amplitudenmodulierten Geräuschen werden so zunächst Datenscribe für f_{AM} und ΔL_{AM} erzeugt.

Der Algorithmus ist, wie Abbildung 27 zeigt, im Stande die Drehzahl der Windenergieanlagen aus den Schallmessungen selbst zu ermitteln. Liegen Anlagendaten zur Drehzahl, z. B. bereitgestellt durch den Betreiber oder Hersteller der Anlage, vor, können diese die Auswertesicherheit des Algorithmus erhöhen. Im Rahmen der durchgeführten Messungen lagen die Anlagendaten für die UG 1 bis UG 4 vor und wurden für die Validierung des Algorithmus berücksichtigt.

Abbildung 27: Emissionsseitige 2D-Auftrittshäufigkeit (Modulationsfrequenz vs. WEA- Drehzahl)



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Im nächsten Schritt wird der berechnete Datenscribe automatisiert daraufhin untersucht, ob eine oder mehrere Modulationsfrequenzen zeitlich stabil vorliegen. Abbildung 27 zeigt von 22:00 Uhr bis 00:20 Uhr einen Zeitraum, in dem keine zeitlich stabile Modulation aufgetreten ist. Die Frequenz f_{AM} streut unregelmäßig von 0,3 Hz bis 1,2 Hz. Eine kontinuierliche eindeutige Zuordnung der berechneten AM zu den Geräuschen einer Windenergieanlage ist in diesem Zeitraum nicht automatisiert möglich.

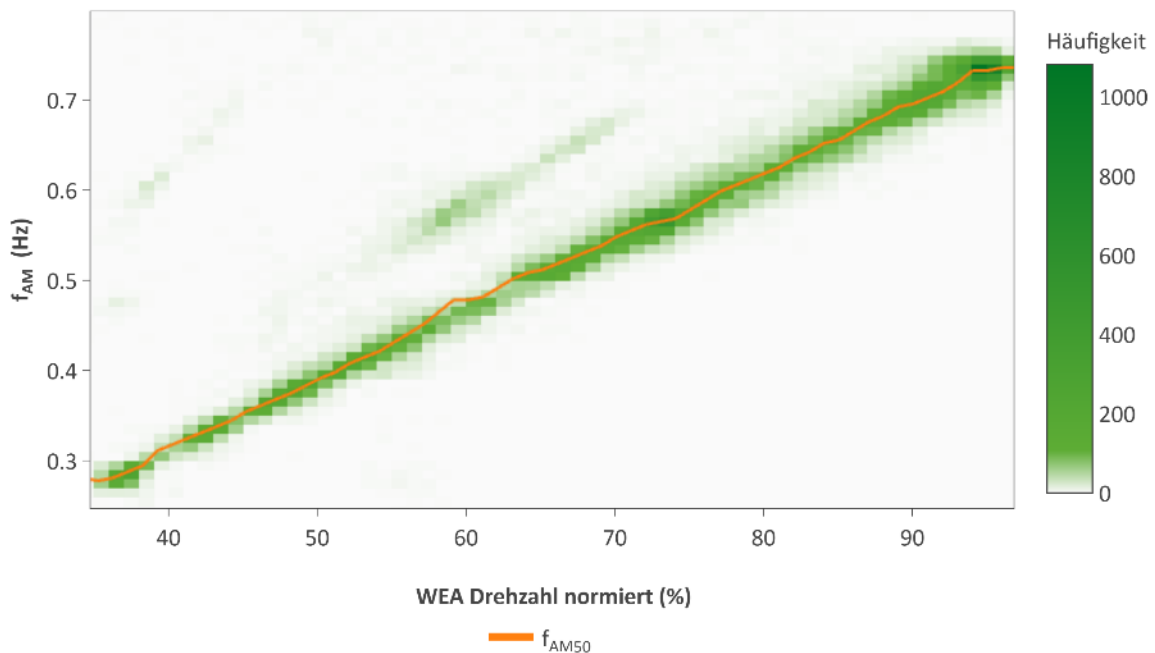
Abbildung 27 zeigt von 00:20 Uhr bis 04:00 Uhr einen Zeitbereich in dem AM durchgehend mit einer Frequenz nahe der geloggtten Drehzahl der Windenergieanlage auftrat. Die zugehörigen Punkte f_{AM} und ΔL_{AM} des Pegelschriebs sind entsprechend ihrer Zuordnung in die Klasse „AM erkannt“ und „AM nicht erkannt“ deutlich (erkannt) oder blass (nicht erkannt) eingezeichnet.

Die Datenpunkte, für die eine hohe Korrelation zwischen WEA-Drehzahl und Modulationsfrequenz vorliegen, werden in einer Datenbank gesammelt. Bei der gezielten statistischen Auswertung dieser Datenpunkte können weitere Merkmale der Schallmessung und der AM ausgewertet werden.

Nach erfolgter Kategorisierung kann für den Zeitraum mit erkannter AM die Auftrittshäufigkeit der erkannten Modulationsfrequenz und der Drehzahl der Windenergieanlage anhand eines 2D-Auftrittsdichteplots dargestellt werden (Abbildung 28). Diese Darstellung verdeutlicht

exemplarisch, anhand der Daten der Messung im Emissionsbereich, die starke Korrelation der akustischen Modulationsfrequenz mit der Drehfrequenz der Windenergieanlage. Die blässere nahezu parallel verlaufende Linie im mittleren Drehfrequenzbereich kann durch die gleichzeitige Messung von AM anderer nicht geloggtter Anlagen mit höherer Drehzahl erklärt werden. Nicht von allen Anlagen eines Windparks wurden zum Zeitpunkt der Messungen die WEA-Drehzahlen erfasst.

Abbildung 28: Emissionsseitige 2D-Auftrittshäufigkeit (Modulationsfrequenz vs. WEA-Drehzahl)



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Die auf dieser Basis durchgeführte Auswertung der Messungen ergab, dass der fremdgeräuscharme Zeitraum von 22:00 Uhr bis 04:00 Uhr ein besonders geeigneter Zeitraum für die Auswertungen der Gesamtdaten ist. Die beschriebene automatisierte Erkennung amplitudenmodulierter Geräusche funktioniert hier zuverlässig. In diesem Zeitraum sind alle Untersuchungsgebiete gut miteinander vergleichbar. Je nach Jahreszeit und Standort traten besonders in den frühen Morgenstunden unterschiedliche Fremdgeräuschsituationen (z. B. Verkehr, Vögel usw.) auf. Zur weiteren Analyse wurden nur Datenpunkte verwendet, die folgende Kriterien erfüllten:

- ▶ kein Regen
- ▶ Luftfeuchte < 95% (Ausschluss von Nebel)
- ▶ Windgeschwindigkeit an Mikrofon < 6 m/s
- ▶ Anlagenleistung der Referenzanlage > 1 % der Nennleistung

Für UG 5 lagen keine Daten vom Betreiber zur Anlagenleistung vor. Entsprechend entfällt für die Auswertung in diesem Untersuchungsgebiet das letzte Kriterium.

4.4.2 Vergleich mit anderen Algorithmen zur Erfassung von AM

Ganz allgemein sind Amplitudenmodulationen mit Pegelschwankungen verbunden. Im speziellen Fall der Windenergieanlagen treten die Pegelschwankungen im Rhythmus der Umdrehungen des Rotors auf. Ziel der Quantifizierung von AM ist die Angabe eines Wertes für die Differenz zwischen Maximum und Minimum dieser Pegel zu finden. Händisch können die Maxima und Minima markiert und z.B. jeweils abgelesen werden, wie weit ein Maximum über den Minima liegt.

Ein erstes Problem ergibt sich daraus, wie die Pegel in dem Pegelschrieb gebildet wurden. Da das modulierte Signal ein breitbandiges Rauschen ist, hängen die Minimal- und Maximalpegel davon ab, mit welcher Integration die Pegel gebildet wurden. Ein Pegelschrieb mit Fast-Bewertung schwankt weniger als einer mit 100ms-Äquivalenzpegeln, der wiederum weniger schwankt als ein Schrieb mit 10ms-Äquivalenzpegeln, und die Differenz zwischen momentanem maximalen Schalldruckpegel und minimalem Schalldruckpegel in einem Zeitausschnitt ist nochmal einige dB größer. Also können so für Maximal- und Minimalwert bereits deutliche Unterschiede entstehen, je nachdem wie die Werte gebildet werden.

Zusätzlich zu den Pegelschwankungen durch AM verändert sich der Basispegel, um den es zu den Schwankungen kommt, mit der Zeit. Diese Pegeltrends sollen nach Möglichkeit von den AM getrennt werden, d.h. der Wert für die AM soll sich nur auf das kurzzeitige Auf und Ab beziehen. Auch die Pegelschwankungen selbst sind nicht streng periodisch. Eine Quantifizierung für die Größe von AM bezieht sich daher immer auf einen Zeitausschnitt. Und innerhalb dieser Zeitausschnitte kann unterschiedlich gewichtet werden. Weiter stellt sich die Frage, wie die Periodizität der Geräusche berücksichtigt werden soll. Es besteht die Vermutung, dass die störende Wirkung der Geräusche mit der Wiederholung im konstanten Rhythmus zusammenhängt.

In dem für diesen Bericht entwickelten Verfahren ist die Priorität auf die Wiederholung der Geräusche in konstanten zeitlichen Abständen gelegt. Für einen Zeitausschnitt wird jeweils die Wiederholungsrate der dominierenden Geräusche bestimmt. Dabei wird die Wiederholungsrate mit so hoher Genauigkeit bestimmt, dass sie direkt der Drehzahl der verursachenden Windenergieanlage zugeordnet werden kann. Der Zeitausschnitt wird in Teile mit der Länge einer Periode zerlegt, und ein mittlerer, trendbereinigter Pegelverlauf über eine Periodenlänge durch energetische Mittelung bestimmt. Die Modulationstiefe wird aus der Differenz zwischen Maximum und Minimum des mittleren Pegelverlaufs über eine Periode bestimmt. Modulationstiefen werden jeweils in 10-Sekunden-Schritten bestimmt.

Andere Verfahren liefern zum Teil für den idealisierten Fall eines sehr deutlichen amplitudenmodulierten Signals sehr ähnliche Ergebnisse. Ein sehr einfaches Verfahren, das Pegelschwankungen quantifiziert, ist das Taktmaximalverfahren nach TA Lärm (1998) (siehe Kapitel 4.4.4). Hier wird geprüft, wie weit in einem 5-Sekunden-Abschnitt der größte Fast-Pegel über den Mittelungspegel steigt. Nachteil ist, dass Trends im Pegel nicht berücksichtigt werden, bzw. zu überhöhten Ergebnissen führen können, und dass die Periodizität der Amplitudenmodulationen nicht berücksichtigt wird. Ähnlich sieht es mit allen Verfahren aus, die für Zeitausschnitte die Differenz zwischen Maximal- und Minimalpegeln oder Perzentilpegeln bilden, z.B. zwischen dem 5% und dem 95% Fast- oder 100ms-Pegel.

Ohne weitere Erkennung, ob es sich bei dem Signal um Amplitudenmodulationen von WEA handelt, sprechen diese Verfahren auf AM von Windenergieanlagen genauso an wie auf ein Vogelgezwitscher, ein vorbeifahrendes Auto oder sonstige Störgeräusche.

Martinez et al. haben eine Wavelet-Analyse zur Bestimmung von AM eingesetzt, Martinez (2017). Hierbei werden gleichzeitig der Trend sowie Signale mit ungewünschten Periodizitäten

entfernt und anschließend ein Trend- und Störsignal bereinigter synthetischer Pegelverlauf erstellt. Die Quantifizierung der AM geschieht über Perzentile des synthetischen Pegelverlaufs. Im Gegensatz zu dem in diesem Bericht genutzten Verfahren sind in dem synthetischen Pegelverlauf mehrere Periodizitäten zugelassen, wie sie z.B. von verschiedenen, unterschiedlich schnell drehenden WEA verursacht werden können.

Da das Signal störgeräuschbereinigt ist, beziehen sich die Pegel der AM auf ein bereinigtes Signal, nicht auf das tatsächlich hörbare Signal. Das kann ein gutes Mittel sein, wenn die physikalischen Eigenschaften der Entstehung und Ausbreitung von AM untersucht werden sollen, stellt aber bei der Beurteilung der Immissionen einen Nachteil dar, weil eben nicht das tatsächlich hörbare Geräusch bewertet wird.

Im Rahmen der Renewable UK (2013) Studie wurde ein Verfahren zur Quantifizierung von AM entwickelt, bei dem jeweils Pegelschriebe für 10-Sekunden-Fenster betrachtet werden. Als Maß der Modulationstiefe wird der Wert der Spektrallinie des Spektrums vom Pegelschrieb einzelner bandgefilterter Zeitreihen gewählt, der aus dem Spektrum hinausragt. Dieser Wert repräsentiert den reinen periodischen Anteil der Modulation. Er stellt ein einfach zu bestimmendes Maß dar, welches in bestimmten Geräuschsituationen zur Überbewertung der Modulationstiefe führen kann, wenn z.B. die Minima nicht dem Verlauf des Sinus folgen. Während bei Martinez (2017) die Bewertung durch die Störgeräuschbereinigung ein Ergebnis liefern kann, dass sich eben nicht auf das tatsächlich hörbare Geräusch bezieht, kann die Bewertung nach Renewable UK (2013) deutlich von der tatsächlich vorhandenen Signalform, und auch von einer idealisierten Signalform, entfernt sein. Verstärkt wird dieses Problem dadurch, dass die bei Renewable UK (2013) vorgesehene Frequenzanalyse grob ist, die Frequenzen der erkannten AM werden so ungenau bestimmt, dass sie sich kaum den verursachenden Anlagen zuordnen lassen. Auch dadurch kann es, neben der falschen Bestimmung der Periodizitäten, zu einer Falschbewertung der AM kommen.

4.4.3 Auswertung der Amplitudenmodulation

4.4.3.1 Kenngrößen

Entsprechend der im Kapitel 4.4.1 definierten Kriterien (z. B. Ausschluss der Messdaten aufgrund von Regen) ergeben sich in Bezug auf die gesamte Messzeit die in der Tabelle 4 aufgeführten auswertbaren Messzeiten. Zur Auswertung der AM wurden für die Kenngröße ΔL_{AM} die Auftrittshäufigkeiten bestimmt. Die Auftrittshäufigkeit beschreibt den prozentualen Anteil der auswertbaren Zeit, in der AM erkannt wurde. Sie schwankt teilweise stark zwischen den einzelnen Untersuchungsgebieten. Im UG 3 liegt die Auftrittshäufigkeit von erkannter und stabil vorliegender AM am Immissionsmesspunkt beispielsweise nur bei 1,7 %, während sie im UG 2 fast 50 % beträgt.

Aus der Gegenüberstellung der Immissionsstandorte zu den Messungen im Emissionsbereich ist erkennbar, dass die erkannte AM emissionsseitig grundsätzlich eine höhere Auftrittshäufigkeit aufweist als im Immissionsbereich.

Die Kenngrößen ΔL_{AM95} bis ΔL_{AM05} sind sogenannte Perzentilpegel. Für die Häufigkeitsverteilung der AM wird auf diese Weise angegeben, welche Modulationstiefe zu 95 %, 50 %, bzw. 5 % der Auswertzeit erreicht bzw. überschritten wird.

Tabelle 4: Kenngrößen der Amplitudenmodulation im Immissionsbereich (22 bis 4 Uhr)

Messposition	Auswertbare Zeit in %	Auftrittshäufigkeit AM in %	ΔL_{AM95} in dB	ΔL_{AM50} in dB	ΔL_{AM05} in dB
Immissionsbereich UG 1	82,0	10,8	1,1	2,0	4,2
Immissionsbereich UG 2	80,6	47,4	1,3	2,4	4,7
Immissionsbereich UG 3	81,4	1,7	0,6	1,4	5,5
Immissionsbereich UG 4	86,6	42,0	0,9	1,5	3,3
Immissionsbereich UG 5	95,8	22,3	0,8	1,6	2,9

Tabelle 5: Kenngrößen der Amplitudenmodulation im Emissionsbereich (22 bis 4 Uhr)

Messposition	Auswertbare Zeit in %	Auftrittshäufigkeit AM in %	ΔL_{AM95} in dB	ΔL_{AM50} in dB	ΔL_{AM95} in dB
Emissionsbereich UG 1	77,7	36,4	1,0	2,1	4,5
Emissionsbereich UG 3	52,5	58,0	1,2	2,2	4,4
Emissionsbereich UG 4	91,8	60,0	0,9	1,5	2,5

Die auswertbare Zeit der Amplitudenmodulation im Immissionsbereich im UG 5 liegt 10 % bis 15 % oberhalb der anderen Standorte. In diesem Untersuchungsgebiet wurde ohne die Bereitstellung von Anlagendaten durch den Betreiber gemessen. An den Standorten UG 1 bis UG 4 wurden dagegen die Zeiträume ohne Anlagenbetrieb ausgeschlossen. Diese konnten im UG 5 nicht ausgeschlossen werden. Da auch Zeiträume ohne Anlagenbetrieb für die Bestimmung der Auftrittshäufigkeit herangezogen werden mussten, mindert dies die relative Auftrittshäufigkeit der AM.

Die mit 52,5% geringe Auftrittshäufigkeit im Emissionsbereich im UG 3 lässt sich durch die Eigenschaften des Untersuchungsgebiets erklären. Hierbei handelt es sich um das Untersuchungsgebiet mit dem größten Abstand zwischen dem Messort und den Windenergieanlagen (ca. 1500 m Distanz zwischen Messort und Anlagenstandort).

Der Anlagenstandort im UG 1 weist eine im Vergleich mit ähnlichen Parkkonstellationen auffällig niedrige Auftrittshäufigkeit auf. Durch maßgeblich unterschiedliche Anlagentypen im Windpark, die vergleichbare Abstände zur Immissionsposition aufweisen, ergeben sich wenige Zeiträume mit frequenzstabiler Amplitudenmodulation. Grund dafür ist, dass von den unterschiedlichen Anlagen zeitgleich unterschiedliche Modulationsfrequenzen ausgehen.

Die unterschiedlichen auswertbaren Zeiten auf der Emissionsseite sind auf die dort verkürzte Messzeit in Kombination mit unterschiedlichen Jahreszeiten zurückzuführen. Je nach Jahreszeit wurden einzelne Zeiträume stärker von Umwelteinflüssen (starke Winde, Regen, Vögel) beeinflusst.

Die Datenauswertung zeigt, dass die Modulationstiefen für alle Standorte im Median bei ca. 1,5 dB bis 2,5 dB liegen. Ein Unterschied in der Modulationstiefe zwischen Emissions- und Immissionsbereich stellt sich in den Gesamtauswertung nicht dar. Beim Vergleich zwischen den verschiedenen Untersuchungsgebieten stechen UG 1 und UG 2 durch höhere Modulationstiefen

heraus. Bei diesen Standorten handelt es sich um die Parkkonstellationen mit den geringsten Anlagenanzahlen in Kombination mit relativ geringen Abständen zwischen den Windenergieanlagen und der Immissionsmessposition.

Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Messkampagnen (Jahreszeit, Topographie, Parkkonstellation, Messentfernung) können aus den Beobachtungen in Bezug auf die Anlagenanzahl und die Messentfernung lediglich Tendenzen abgeleitet werden.

4.4.3.2 Abhängigkeit zwischen AM und den Betriebszuständen der Windenergieanlagen

In Tabelle 6 ist der jeweilige Median der Modulationstiefen klassiert nach normierter elektrischer Leistung pro Messort aufgeführt. 100% entspricht hierbei der Nennleistung der jeweiligen Referenzwindenergieanlage. Für das Untersuchungsgebiet 5 sind die Häufigkeiten aufgrund fehlender Anlagensignale nach der am immissionsseitigen Mikrofon gemessenen Windgeschwindigkeit klassiert. 100% entspricht hierbei 6 m/s auf Immissionshöhe. Die Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe liegen erfahrungsgemäß höher als am Messort.

Tabelle 6: Klassierung der Modulationstiefe nach normierter elektrischer Leistung

Perzentil	Klasse	Immissionsbereich					Emissionsbereich		
		UG 1	UG 2	UG 3	UG 4	UG 5	UG 1	UG 3	UG 4
ΔL_{AM50} in dB	1-20 %	2,1	2,1	1,8	1,6	1,5	2,0	1,8	1,4
	20-40 %	2,0	2,5	1,2	1,5	1,6	2,2	2,2	1,6
	40-60 %	2,2	2,9	1,1	1,5	1,5	1,9	2,7	1,6
	60-80 %	2,2	3,0	1,2	1,5	1,3	1,9	2,9	1,6
	80-100 %	1,7	3,0	1,2	1,4	1,4	1,8	2,7	1,6

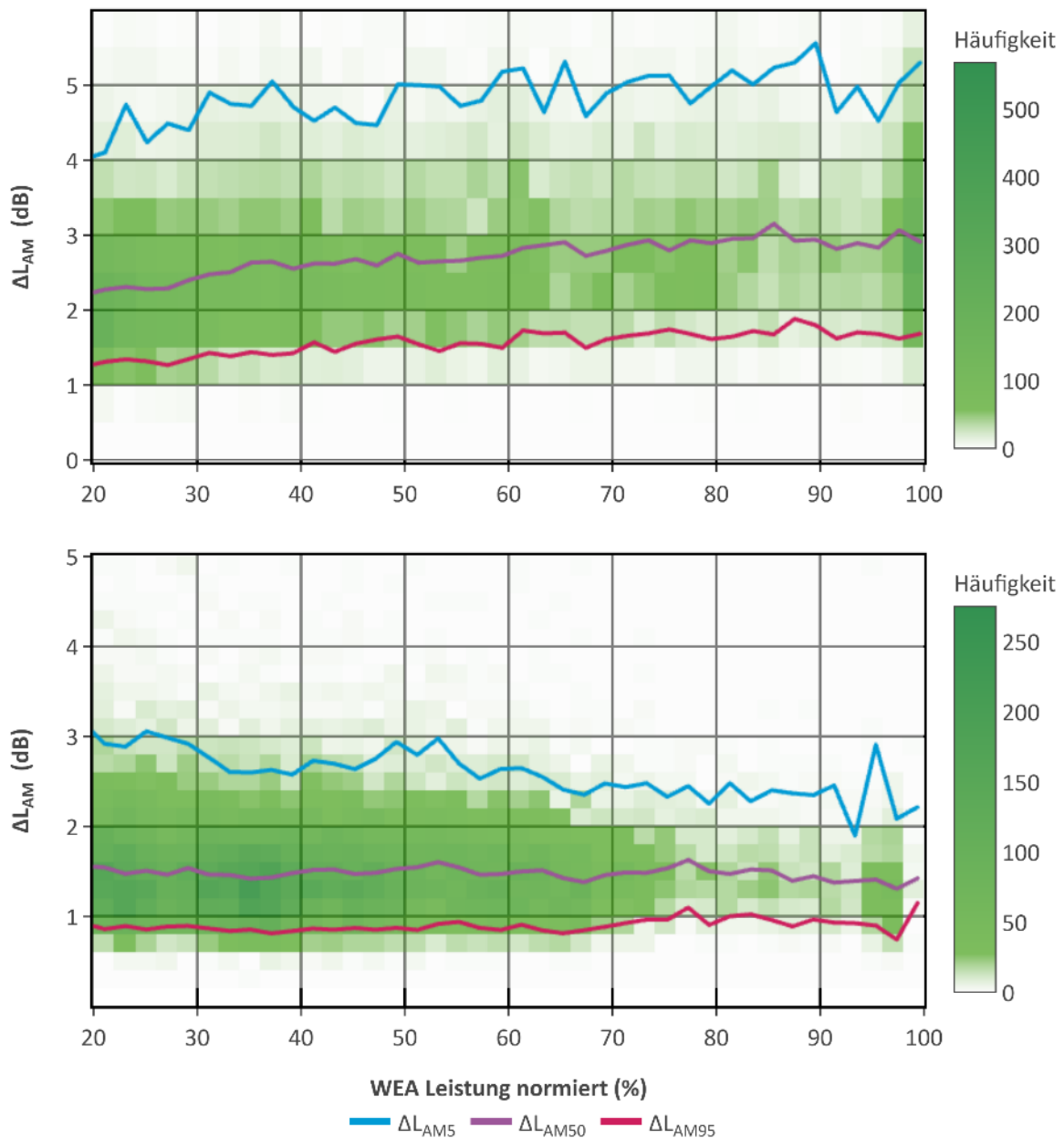
Für die Untersuchungsgebiete 1, 3, 4 und 5 ergibt sich mit zunehmender elektrischer Leistung bzw. zunehmender Windgeschwindigkeit ein konstanter bis schwach abnehmender Median der Modulationstiefe.

Ein anderes Bild zeigt sich für das Untersuchungsgebiet 2. Hier steigt die Modulationstiefe über den Median mit steigender Leistung an. Beim UG2 handelt es sich um das Untersuchungsgebiet mit nur einer Windenergieanlage.

Die Analysen der Messungen in den Emissionsbereichen der Windparks zeigen für UG 1 und UG 4 einen konstanten bzw. leicht abfallenden Median der Modulationstiefe bei zunehmender elektrischer Leistung. Im UG 3 zeigt sich mit zunehmender Leistung der Anlagen ein Anstieg im Median.

In den dargestellten Dichteplots sind jeweils die auf die Nennleistung normierten Leistungswerte gegen die gemessene Modulationstiefe aufgetragen. Abbildung 29 zeigt exemplarisch den leicht steigenden Verlauf im UG 2 sowie den konstanten Verlauf im UG 4.

Abbildung 29: Modulationstiefe vs. Leistung Immission (UG 2 oben, UG 4 unten)

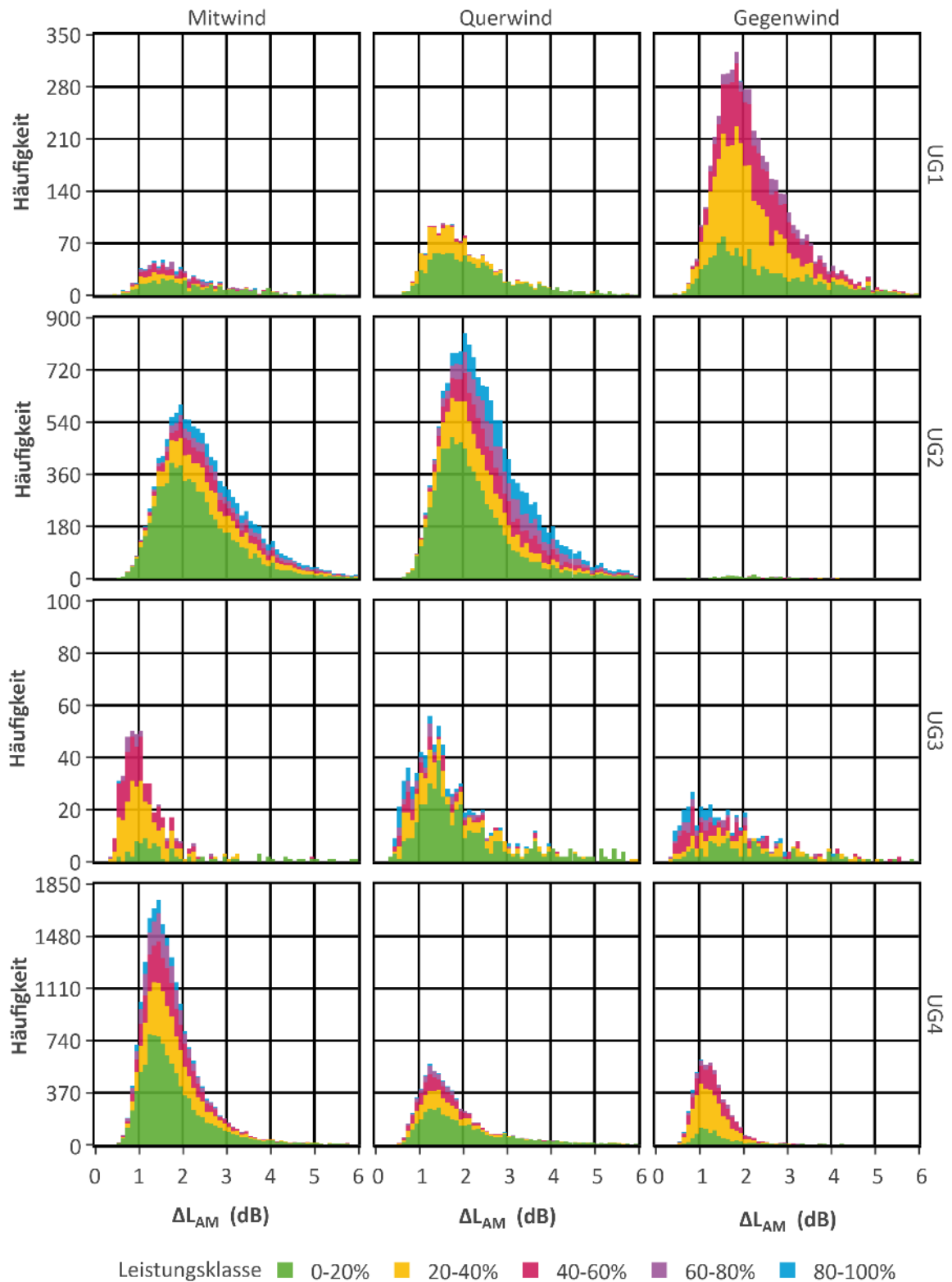


Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

4.4.3.3 Meteorologische Einflüsse

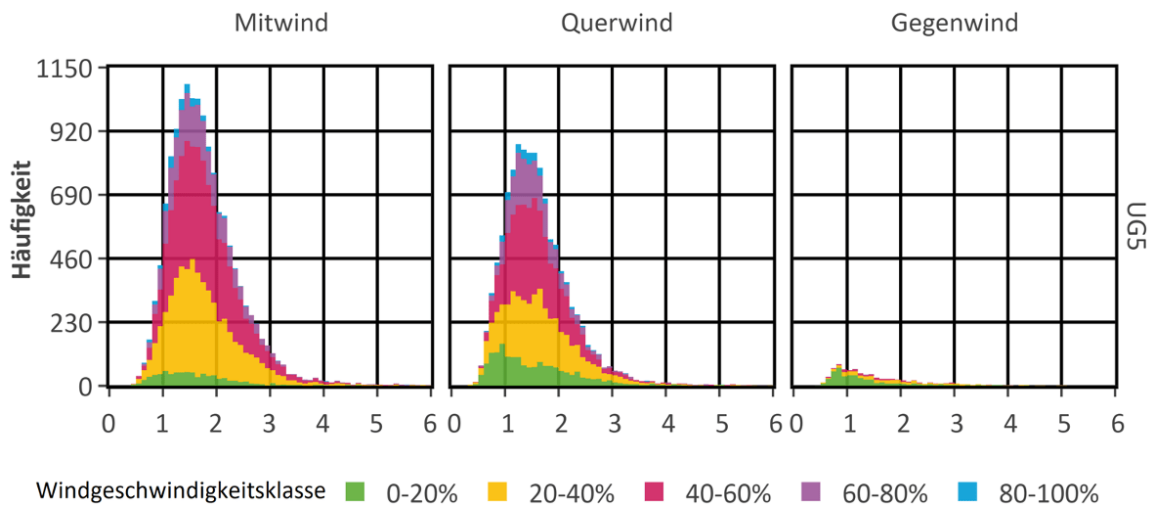
Zur Untersuchung der meteorologischen Abhängigkeit der AM wurden die Datensätze nach elektrischer Leistung und Windrichtungen in den folgenden Abbildung 30 und Abbildung 31 klassiert. Dabei ist anzumerken, dass aufgrund der vorherrschenden Wetterlage während den Messungen nicht alle Windrichtungen an jedem Messort in gleicher Häufigkeit messtechnisch erfasst werden konnten. Es gibt also deutliche Unterschiede in Bezug auf die Häufigkeiten der erfassten Windrichtungen. Der Schwerpunkt der L_{AM} liegt zwischen 1-2 dB. In allen Windrichtungen werden vereinzelt AM mit einer Tiefe von bis zu 6 dB nachgewiesen.

Abbildung 30 Häufigkeitsverteilung ΔL_{AM} klassiert nach Windrichtung und Leistung UG 1 bis UG 4



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 31 Häufigkeitsverteilung ΔL_{AM} klassiert nach Windrichtung und -geschwindigkeit UG 5



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

In Tabelle 7 sind die Modulationstiefen nach normierter elektrischer Leistung und Windrichtung exemplarisch für das UG 2 im Immissionsbereich angegeben.

Tabelle 7: Klassierung der Modulationstiefe nach normierter elektrischer Leistung und Windrichtung im UG 2

Perzentil	Klasse	Immissionsbereich UG 2		
		Mitwind	Querwind	Gegenwind
ΔL_{AM50} in dB	1-20 %	2.0	1.8	-
	20-40 %	2.3	2.2	-
	40-60 %	2.4	2.6	-
	60-80 %	2.7	2.8	-
	80-100 %	2.6	3.0	-

Die Analyse der Messdaten nach Klassierung hinsichtlich Windrichtung und elektrischer Leistung der Windenergieanlagen zeigt, dass bei Querwind die Modulationstiefe im Immissionsbereich im UG 2 mit steigender Leistung um 1,2 dB leicht zunimmt. Bei Mitwindsituationen nimmt dagegen die Modulationstiefe nur um 0,6 dB zu. Dieser Trend lässt sich nur für den Windpark mit der Einzelanlage aus den Daten erkennen. Bei den anderen Untersuchungsgebieten (UG 1 und UG 3 bis 5) lassen sich keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen Leistung und Windrichtung sowie Modulationstiefe erkennen.

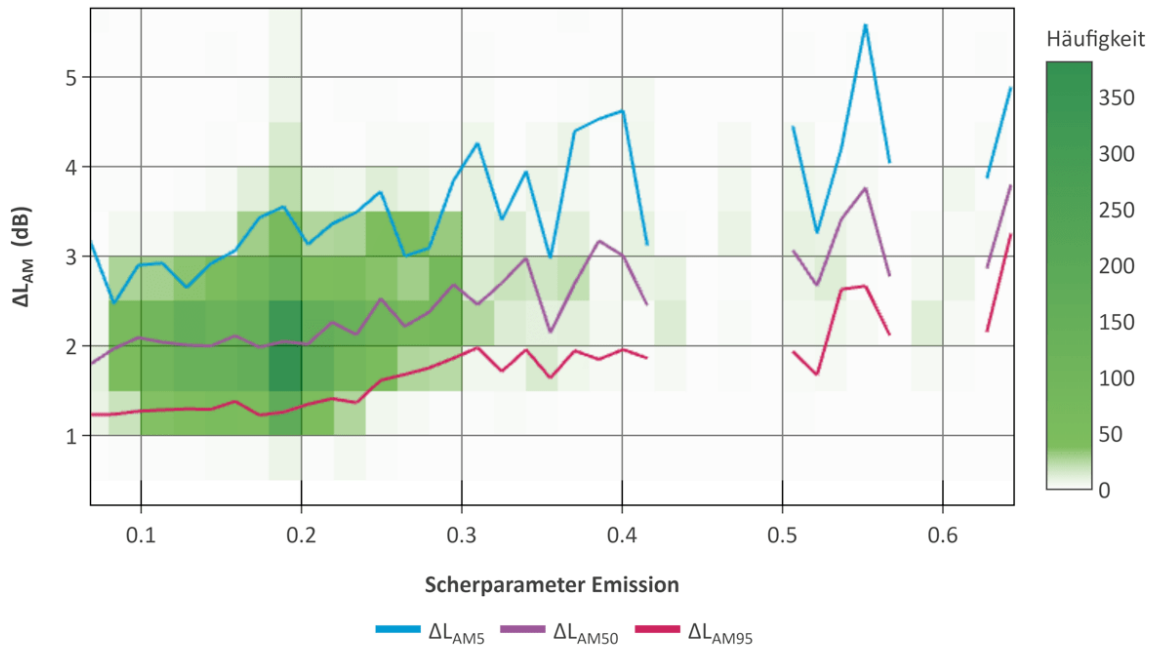
4.4.3.4 Windscherung als Quellmechanismus

Wie schnell und in welcher Form die Windgeschwindigkeit mit der Höhe der Atmosphäre steigt, kann sich deutlich unterscheiden. Die Form des Windprofils wird mit einem Scherparameter beschrieben. Um den Einfluss der Windscherung als Quellmechanismus zu untersuchen, wurden aus den gemessenen meteorologischen Größen dynamisch für 10-Minuten-Abschnitte Scherparameter bestimmt und gegen die gemessene Modulationstiefe in Dichteverteilungen aufgetragen.

Für die emissionsseitige Messung der AM ergab sich ein mit dem Scherparameter steigender Wert für die Modulationstiefe. Exemplarisch ist der Verlauf in Abbildung 32 für die Messung im

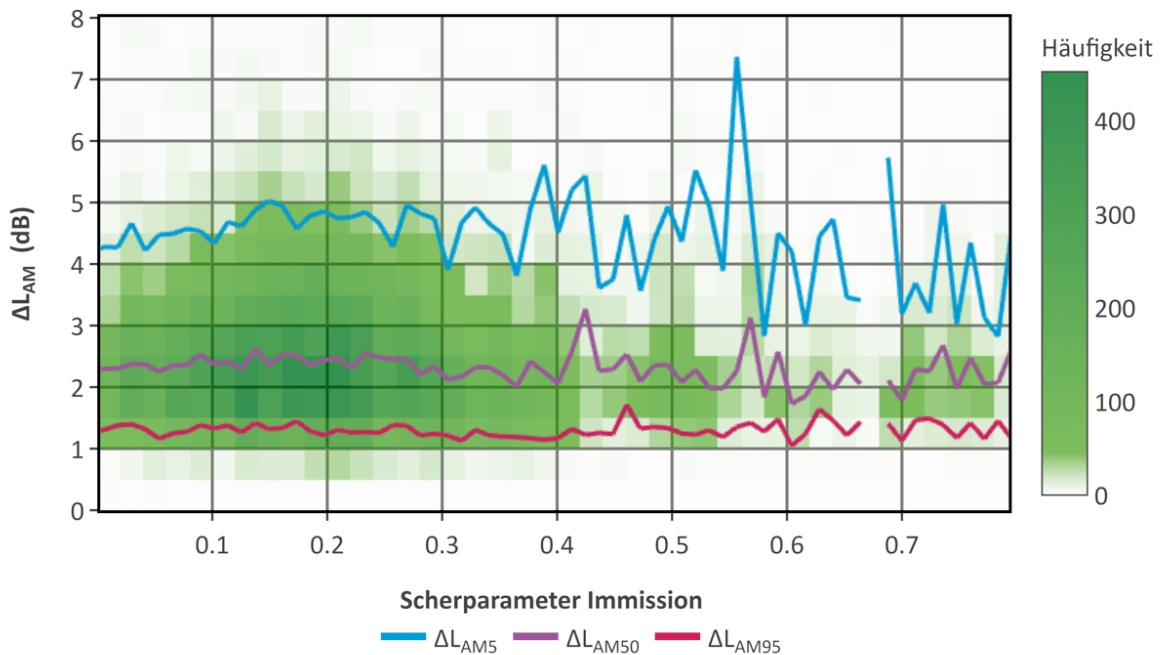
Emissionsbereich des UG 1 dargestellt. Immissionsseitig zeigt sich dagegen für alle Standorte in den Regressionsgeraden kein erkennbarer Anstieg. Exemplarisch ist der Verlauf in Abbildung 33 für den Immissionsort des UG 2 dargestellt. Es ist also festzustellen, dass die gemessene AM am Immissionsort keinem Trend folgt und nicht durch die ermittelte Windscherung beeinflusst wird. Für den Emissionsbereich konnte dagegen ein Trend festgestellt werden, der einen leichten Anstieg der Modulationstiefe bei ansteigendem Scherparameter aufweist.

Abbildung 32: Modulationstiefe gegen Scherparameter im Emissionsbereich im UG 1



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 33: Modulationstiefe gegen Scherparameter im Immissionsbereich im UG 2



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

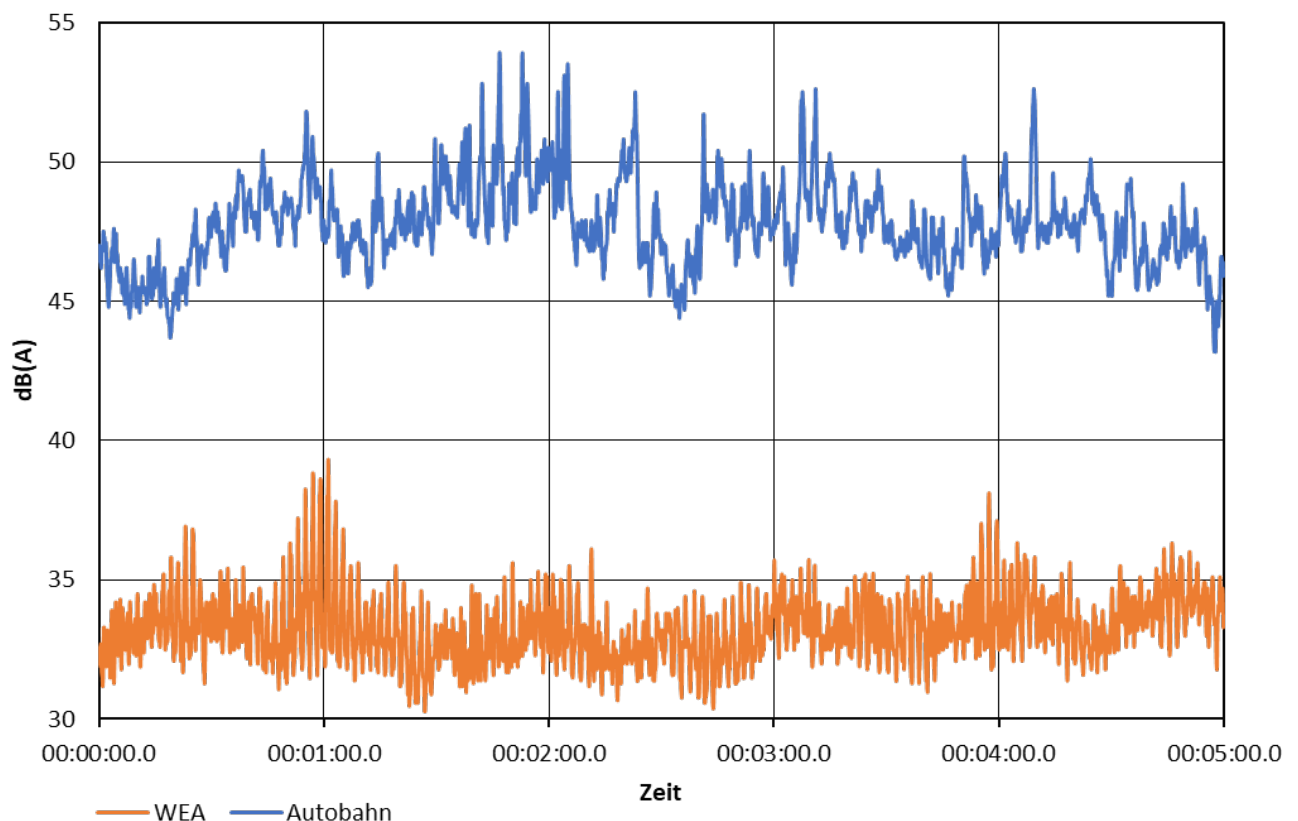
4.4.4 Analyse der AM mit dem Taktmaximalpegelverfahren nach TA Lärm

4.4.4.1 Grundlagen der Auswertung und Limitationen

Im Folgenden wird untersucht, ob die amplitudenmodulierten Geräusche von Windenergieanlagen auch über ein Taktmaximalpegelverfahren ausreichend gut beschrieben werden können. Gemäß der „Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm, TA Lärm“ (1998) wird der Taktmaximal-Mittelungspegel $L_{AF\text{Teq}}$ zur Beurteilung impulshaltiger Geräusche verwendet. Zu diesem Zweck wird die Differenz $L_{AF\text{Teq}} - L_{Aeq}$ als Zuschlag für Impulshaltigkeit definiert. Die Taktzeit beträgt 5 Sekunden.

In der Abbildung 34 ist exemplarisch eine Pegelzeitverlauf aus dem Untersuchungsgebiet 2 sowie ein Pegelzeitverlauf im Umfeld einer Autobahn (3 Fahrstreifen je Fahrriichtung, Messentfernung zur Autobahn ca. 400 m) dargestellt. Die Pegelzeitverläufe stammen jeweils aus der Nachtzeit zwischen 00:00 Uhr und 01:00 Uhr. Für beide Zeitverläufe ergibt sich die Differenz $L_{AF\text{Teq}} - L_{Aeq}$ zu 2,1 dB. Dies zeigt, dass ein Taktmaximalpegelverfahren keine Unterscheidung zwischen dem amplitudenmodulierten Geräusch einer Windenergieanlage und anderen Geräuschen macht, die sich in ihrer Amplitude verändern. Entsprechend ist dieses Verfahren ohne eine detaillierte Erkennung von Zeiträumen, in denen die AM pegelbestimmend auftritt, mit relevanten Fehlern behaftet.

Abbildung 34: Vergleich 10-Hz-Pegelverlauf an einer Autobahn mit Windenergieanlagen



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

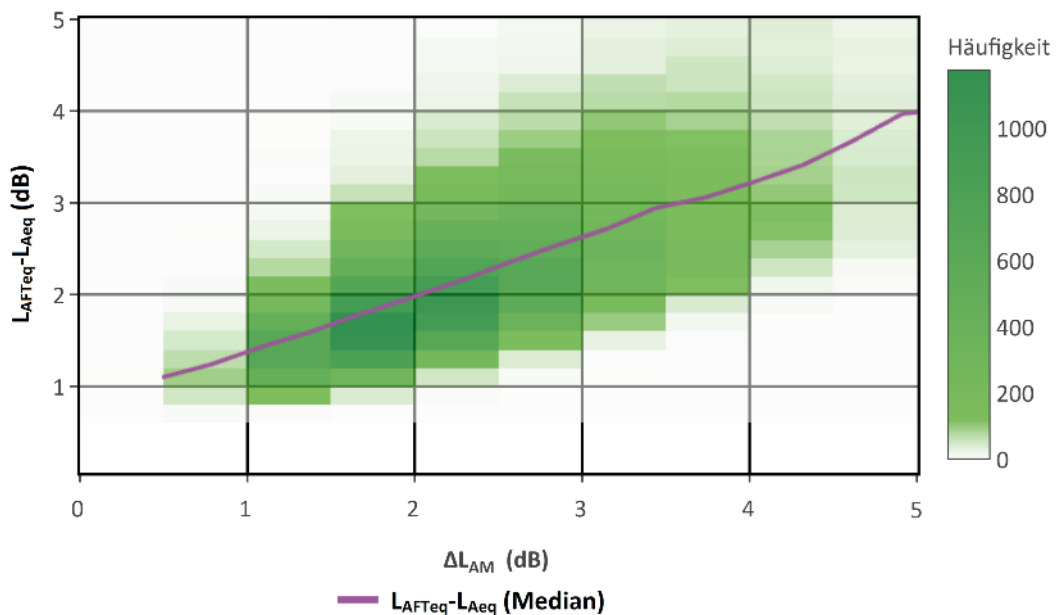
4.4.4.2 Vergleich AM-Verfahren mit Taktmaximalpegelverfahren

Eine Analyse des in Abbildung 34 dargestellten Pegelzeitverlaufs der Windenergieanlage mit dem in dieser Studie entwickelten AM-Verfahren ergab einen Wert von $\Delta L_{AM50} = 2,8$ dB. Zum Vergleich dieses Verfahrens mit dem Taktmaximalpegelverfahren nach TA Lärm (1998) werden im Folgenden Zeiträume analysiert, in denen das AM-Verfahren eine zeitlich stabile Modulationsfrequenz identifiziert hat. Entsprechend kann für diese Zeiträume davon ausgegangen werden, dass hier periodische amplitudenmodulierte Geräusche vorliegen.

Betrachtet werden die Untersuchungsgebiete UG 2, UG 4 und UG 5, da hier die größte Datengrundlage in Bezug auf zeitlich stabile Modulationsfrequenzen vorliegt. Die Ergebnisse des Taktmaximalpegelverfahrens ($L_{AF_{Teq}} - L_{Aeq}$) sind in den Abbildung 35 bis Abbildung 37 über die Ergebnisse des AM-Verfahrens aufgetragen. Die Abbildungen zeigen, dass sich im Median ein relativ lineares Verhältnis zwischen den Ergebnissen des AM-Verfahrens und den Ergebnissen des Taktmaximalpegelverfahrens ergibt. Bei höheren AM ergibt sich durch das Taktmaximalpegelverfahren eine leichte Unterschätzung gegenüber dem AM-Verfahren.

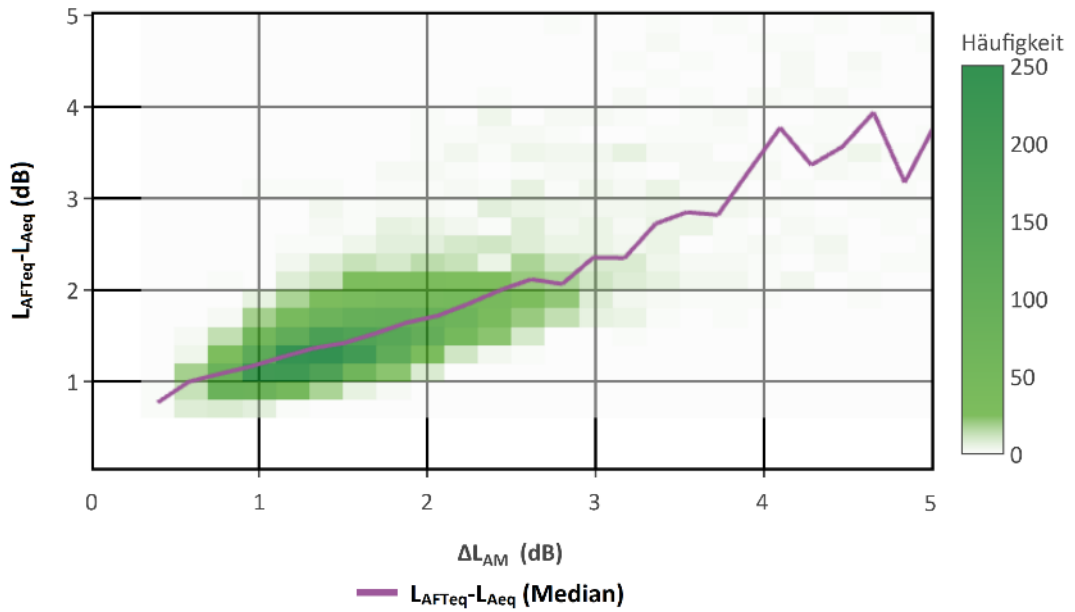
Insofern für einen Zeitraum sichergestellt werden kann, dass es sich bei den Geräuschen maßgeblich um ein periodisch amplitudenmoduliertes Geräusch handelt, zeigen die Untersuchungsgebiete UG 2, UG 4 und UG 5, dass das Taktmaximalpegelverfahren der TA Lärm (1998) für eine Abschätzung der Modulationstiefe herangezogen werden kann.

Abbildung 35: Vergleich AM-Verfahren mit Taktmaximalpegelverfahren (UG 2)



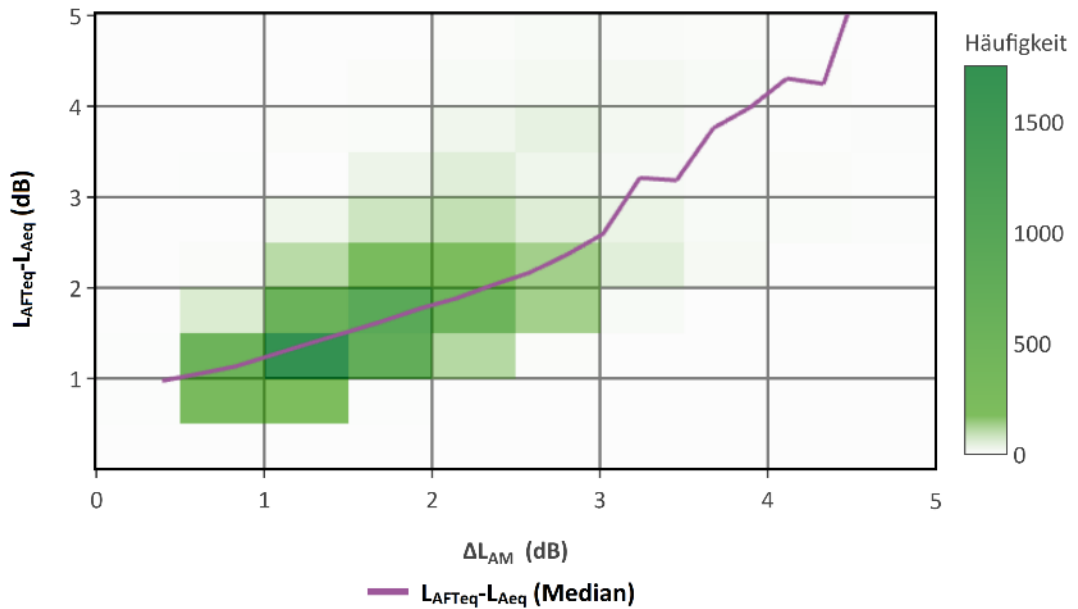
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 36: Vergleich AM-Verfahren mit Taktmaximalpegelverfahren (UG 4)



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 37: Vergleich AM-Verfahren mit Taktmaximalpegelverfahren (UG 5)



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

5 Infraschallmessungen

5.1 Was ist Infraschall?

Das menschliche Gehör ist bei Frequenzen um 1000 Hz am empfindlichsten. Zu tieferen Frequenzen hin wird es immer unempfindlicher, das heißt die Schalldrücke von Geräuschen müssen immer höher werden, damit sie gehört werden können. Folgt man zum Beispiel den Tasten eines Klaviers nach links, dann würden die Töne immer leiser wirken, wenn nicht tatsächlich die Schalldrücke zunehmen würden.

Die A-Bewertung berücksichtigt, dass das Gehör bei sehr hohen und bei tiefen Frequenzen unempfindlicher wird, und verschiebt die Pegel so, dass in etwa Töne mit unterschiedlichen Frequenzen und gleichem A-Pegel gleich laut erscheinen.

Obwohl das Gehör zu tiefen Frequenzen unempfindlicher wird, sind bei ausreichenden Pegeln (Sinus-)Töne immer noch als Töne hörbar. Liegen zwei Töne nicht zu dicht nebeneinander – also haben sie ausreichend unterschiedliche Frequenzen – ist hörbar, dass es sich um zwei unterschiedliche Töne mit unterschiedlichen Tonhöhen handelt.

Bei sehr tiefen Frequenzen kann das menschliche Gehör diese Töne nicht mehr richtig hören. Geräusche können noch wahrgenommen werden, aber nicht mehr im eigentlichen Sinn als Ton gehört werden. Zwei benachbarte Töne können nicht mehr unterschieden werden, ein Ton bei einer einzelnen Frequenz kann nicht von einem breitbandigen Rauschen unterschieden werden. Dies ist unabhängig davon, ob der Schalldruckpegel erhöht wird oder nicht.

Ab diesem Punkt spricht man nicht mehr von Hörschall, sondern von Infraschall. In der Literatur ist die Infraschallgrenze uneinheitlich definiert; die Grenze wird mit 20 Hz (DIN 45680 (1997), ISO 7196 (1995)) oder mit 16 Hz (DIN 1320 (2009)) angegeben. In dieser Studie werden Geräusche unter 20 Hz als Infraschall bezeichnet. Außerdem wird in Normen fast immer eine Untergrenze bei 1 Hz angegeben. Für den Bereich unterhalb von 1 Hz gibt es keine gängige eigenständige Bezeichnung. In dieser Studie wird der Bereich unter 1 Hz zum Infraschall gezählt.

5.2 Entstehung von Infraschall

Windenergieanlagen haben niedrige Drehzahlen, mit der Drehzahl direkt zusammenhängende Schalldruckschwankungen können entsprechend bei tiefen Frequenzen liegen, also tief im Infraschallbereich. Ausführlich ist die Entstehung von Infraschall in Anhang A dargestellt.

Wichtig zu unterscheiden ist, dass die Entstehung von Infraschall an WEA durch einen völlig anderen Prozess geschieht als die Entstehung der Amplitudenmodulationen.

5.3 Aufgabenstellung

Ziel der Untersuchung ist festzustellen, ob durch WEA verursachter Infraschall auch im Immissionsbereich

- ▶ messbar ist;
- ▶ den WEA zuzuordnen ist;
- ▶ zu relevanten Pegeln führt.

Die eingesetzte Messtechnik und das Messkonzept wurden gezielt für die Messung der Amplitudenmodulationen in Kapitel 4.4 gewählt. Nur bei der letzten Messkampagne im Untersuchungsgebiet 5 wurden gezielt zusätzliche Messungen speziell für Infraschallbeiträge durchgeführt.

Neben der direkten Auswertung sollen die Messungen im UG 5 genutzt werden, um auch aus den Messungen in den anderen Untersuchungsgebieten Ergebnisse für Infraschall zu ermitteln.

5.4 Messungen im Untersuchungsgebiet 5

5.4.1 Messdurchführung

Zur Überprüfung der Schallmesstechnik wurde im UG 5 zusätzlich zum Klasse-1-Mikrofon auf einem Stativ auch mit einem Infraschallmikrofon auf einer Bodenplatte gemessen (siehe auch Anhang F). Beide Parameter, die Messung auf der Bodenplatte und die Messung mit einem Infraschallmikrofon haben den Nachteil, dass damit die Anforderungen der TA Lärm (1998) für Hörschallmessungen nicht erfüllt werden. Andererseits ist die Messung bei tiefen Frequenzen mit diesem Messaufbau weniger problembehaftet; der störende Einfluss von Wind ist kleiner als auf einem Stativ und die Empfindlichkeit bei sehr kleinen Frequenzen ist höher als mit einem Klasse-1-Mikrofon.

Die Messungen auf der Bodenplatte wurden mit einem Messsystem der Firma SINUS mit einem Infraschallmikrofon von Microtech Gefell durchgeführt. In Abbildung 38 ist der Blick über das Mikrofon auf der Bodenplatte zu den nächsten Windenergieanlagen zu sehen.

Abbildung 38: Infraschallmikrofon auf Bodenplatte



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

5.4.2 Linien im Schalldruckspektrum

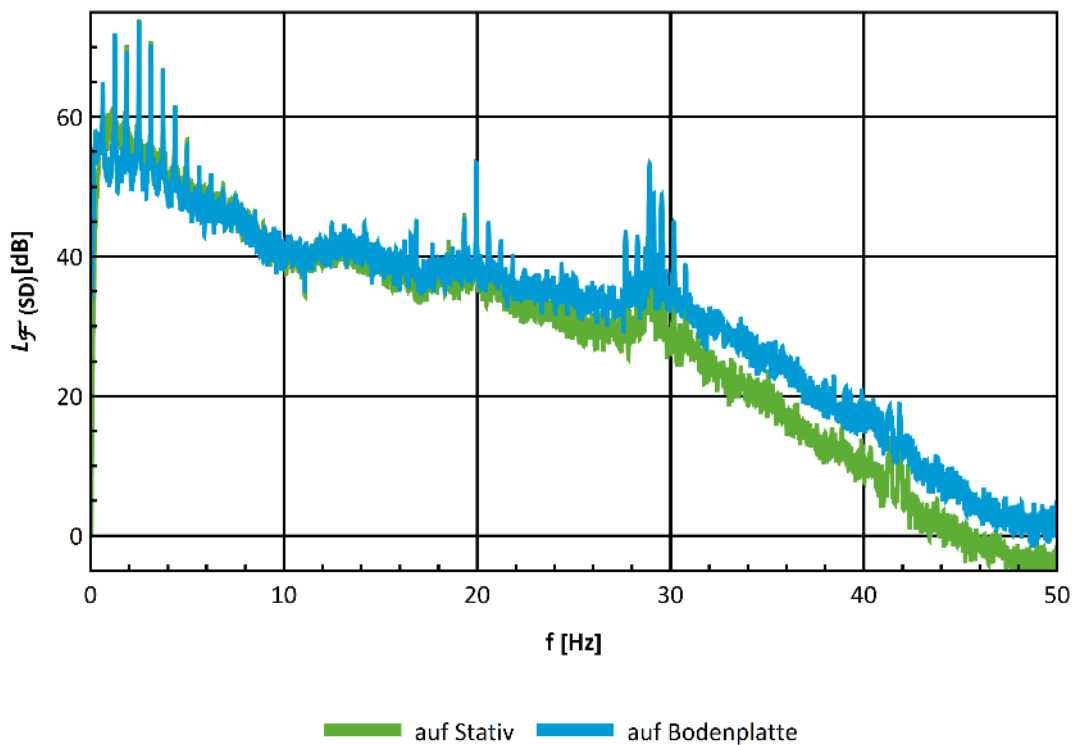
Durch Windenergieanlagen kann Infraschall entstehen, der im deutlichsten Fall Linien im Spektrum verursacht, deren Frequenzen dem ganzzahligen Vielfachen der Drehzahl der Windenergieanlagen multipliziert mit drei entspricht. Der Multiplikator drei ergibt sich, weil eine Windenergieanlage drei Rotorblätter hat, und jedes Mal, wenn ein Rotorblatt am Mast vorbeizieht, eine Druckschwankung entstehen kann.

In Abbildung 39 ist exemplarisch das Schalldruckspektrum eines 10-Minuten-Abschnitts dargestellt. Abbildung 40 zeigt vergrößert das gleiche Spektrum im Bereich bis 8 Hz. Deutlich erkennbar sind die kammartig auftretenden Linien im Spektrum.

Der gewählte Zeitausschnitt ist weder zufällig noch repräsentativ, sondern wurde gerade deshalb gewählt, weil hier die Linienstruktur besonders deutlich erkennbar ist.

Abbildung 39: Schalldruckspektrum mit Einzellinien

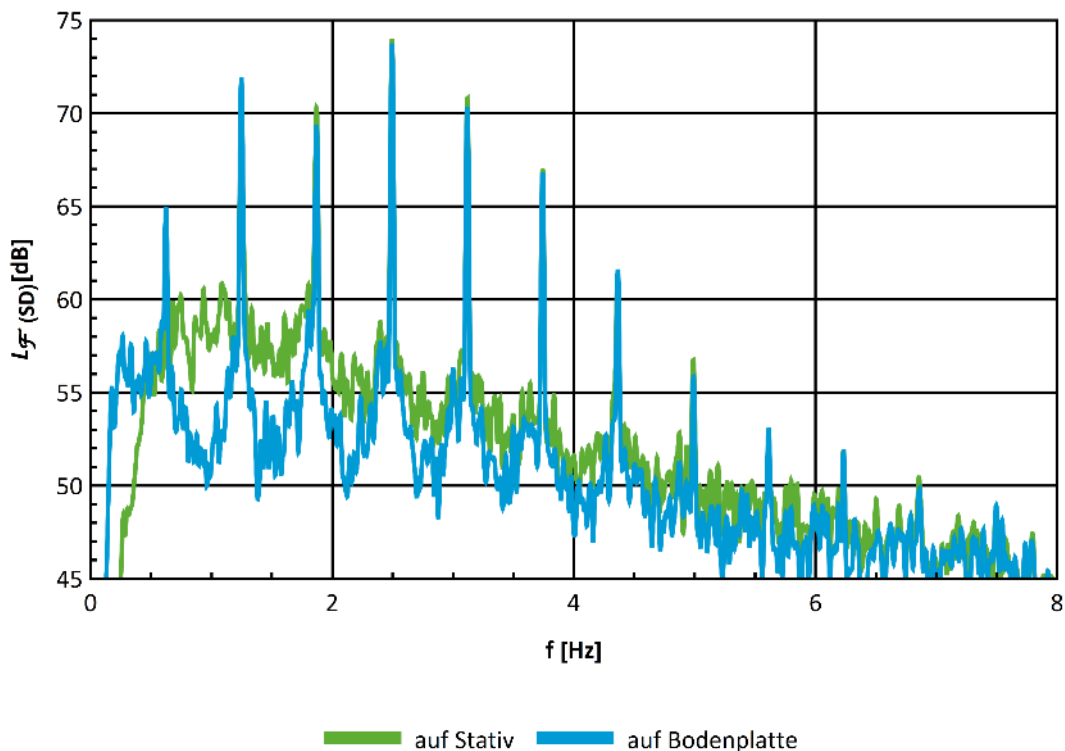
10 Minuten am 14.12.2020 zwischen 0:30 und 0:40 Uhr im Untersuchungsgebiet 5. Das Spektrum ist so normiert, dass Äquivalenzpegel durch Integration über 1 Hz gebildet werden können.



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 40: Schalldruckspektrum mit Einzellinien, Vergrößerung

Gleicher Zeitabschnitt wie in Abbildung 39.



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Im UG 5 stehen keine Betriebsdaten der Windenergieanlagen zur Verfügung. Wenn jedoch deutlich erkennbare AM mit einer konstanten Periodizität gemessen werden, dann kann über die Periodizität der AM die Drehzahl der Anlage bestimmt werden. In diesem Fall waren die AM über den Zeitabschnitt sehr stabil. Die Drehzahl der Anlage, die die AM verursacht hat, konnte daher genau bestimmt werden (siehe Anhang F.2.4). Wenn die gleiche Windenergieanlage, die die AM verursacht, auch die dominierende Quelle des Infraschalls ist, dann sollte die über die AM bestimmte Drehzahl zu den Frequenzen der Linien im Infraschallspektrum passen.

In Tabelle 8 sind die über die AM bestimmte Frequenz und ihre Harmonischen, also ihre ganzzahligen Vielfachen, dargestellt; daneben jeweils die äquivalenten Schalldruckpegel der Linien im Spektrum angegeben. Die Übereinstimmung zwischen den Frequenzen der Linien im Infraschallspektrum und den ganzzahligen Vielfachen der Frequenz der AM ist ein deutlicher Hinweis auf eine gemeinsame Quelle.⁴ Ein derartiges Spektrum mit einer der Drehzahl entsprechenden Frequenz eines Grundtons und weiteren Tönen bei ganzzahligen Vielfachen dieser Frequenz entspricht der Erwartung an ein Spektrum, dass durch die Wechselwirkung zwischen Rotorblättern und Mast der Windenergieanlagen verursacht wird (siehe Anhang A.2).

⁴ In dem UG 5 sind mehrere Windenergieanlagen vorhanden, die Immissionen am Messort verursachen. Ob die Immissionen im gewählten Zeitausschnitt von genau einer Anlage verursacht wurden, oder ob mehrere Anlagen mit genau der gleichen Drehzahl liefern, ist nicht unterscheidbar. Da die Frequenzbestimmung so scharf ist, wären Windenergieanlagen als Quelle auch dann nachgewiesen, wenn die AM durch die eine Anlage und der Infraschall durch die anderen Anlagen verursacht würde.

Tabelle 8: Frequenzen der AM und der Linien im Infraschallbereich

n	n * f _{AM} [Hz]	Stativ		Bodenplatte	
		f [Hz]	L _{Zeq,Linie} [dB]	f [Hz]	L _{Zeq,Linie} [dB]
1	0,624			0,624	53,5
2	1,247	1,247	60,0	1,247	60,5
3	1,871	1,869	58,9	1,871	58,0
4	2,494	2,494	62,6	2,494	62,3
5	3,118	3,118	59,4	3,118	58,9
6	3,742	3,740	55,6	3,740	55,4
7	4,365	4,362	50,0	4,363	50,2
8	4,989	4,989	45,4	4,990	44,5
31	19,331	19,324	34,8	-	-
32	19,955	19,951	41,6	19,951	42,0

Neben den in Tabelle 8 aufgeführten Linien sind im Spektrum (Abbildung 39) im Bereich knapp unter 30 Hz weitere Linien zu sehen, die nicht zu den ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz passen. Die gemessenen Windenergieanlagen haben ein Getriebe mit einer Übersetzung, die mit Drehzahl mal Übersetzung zu einer Frequenz von 28,940 Hz führt. Die größte Linie bei der Messung mit Bodenplatte in diesem Frequenzbereich wurde bei 28,917 Hz und 41,9 dB bestimmt. Die Zuordnung ist also bei weitem nicht so deutlich wie für die ganzzahligen Vielfachen des Grundtons in Tabelle 8, dennoch sind Getriebegeräusche eine mögliche Erklärung für die Linien im Bereich bei 30 Hz.

5.4.2.1 Frequenzgang und Vertrauensbereiche

Bei der Messung von Hörschall werden die Eigenschaften der Messsysteme entsprechend der DIN EN 61672-1 gewährleistet. Für die Messung von Infraschall gibt es keine spezielle Norm, und bei kleinen Frequenzen darf ein DIN EN 61672-1 Klasse 1 konformes System praktisch beliebig große Abweichungen zeigen.

Um die Empfindlichkeit der Messsysteme genauer zu bestimmen, wurden für das deBAKOM-Messsystem und für das SINUS-Messsystem jeweils in einer Druckkammermessung der Tieftonfrequenzgang bestimmt, die Details sind in Anhang F.1.2 dargestellt.

Aus den per Druckkammermessung bestimmten Frequenzgängen und dem Vergleich der zeitgleichen Messungen ergeben sich Vertrauensbereiche für die bestimmten Pegel.

Berücksichtigt man die Frequenzgänge der Messsysteme, dann ergibt sich

- für die Linie bei 1,247 Hz ein Vertrauensbereich von ca. 62 bis ca. 84 dB,
- für die Linie bei 2,494 Hz ein Vertrauensbereich von ca. 62 bis ca. 72 dB,
- für die Linie bei 3,742 Hz ein Vertrauensbereich von ca. 54 bis ca. 61 dB,
- für die Linie bei 4,989 Hz ein Vertrauensbereich von ca. 44 bis ca. 49 dB.

Mit zunehmender Frequenz werden die Vertrauensbereiche immer schmaler, und die Abweichungen zwischen gemessenem Pegel und der Mitte des Vertrauensbereichs immer kleiner.

5.4.2.2 Unsicherheiten

Neben der Unsicherheit der Messung aufgrund des Frequenzgangs ist die Hauptquelle für Unsicherheiten vor allem Wind. Durch Wind verursachte lokale Druckschwankungen führen mit sinkender Frequenz zu zunehmenden Störungen. Dies ist im Spektrum in Abbildung 39 vor allem an dem Hintergrund unterhalb der Einzellinien zu erkennen. Die Messung auf der Bodenplatte ist weniger Windeffekten ausgesetzt, entsprechend ist der Hintergrund unter den Einzellinien deutlich tiefer als für die Messung auf dem Stativ.

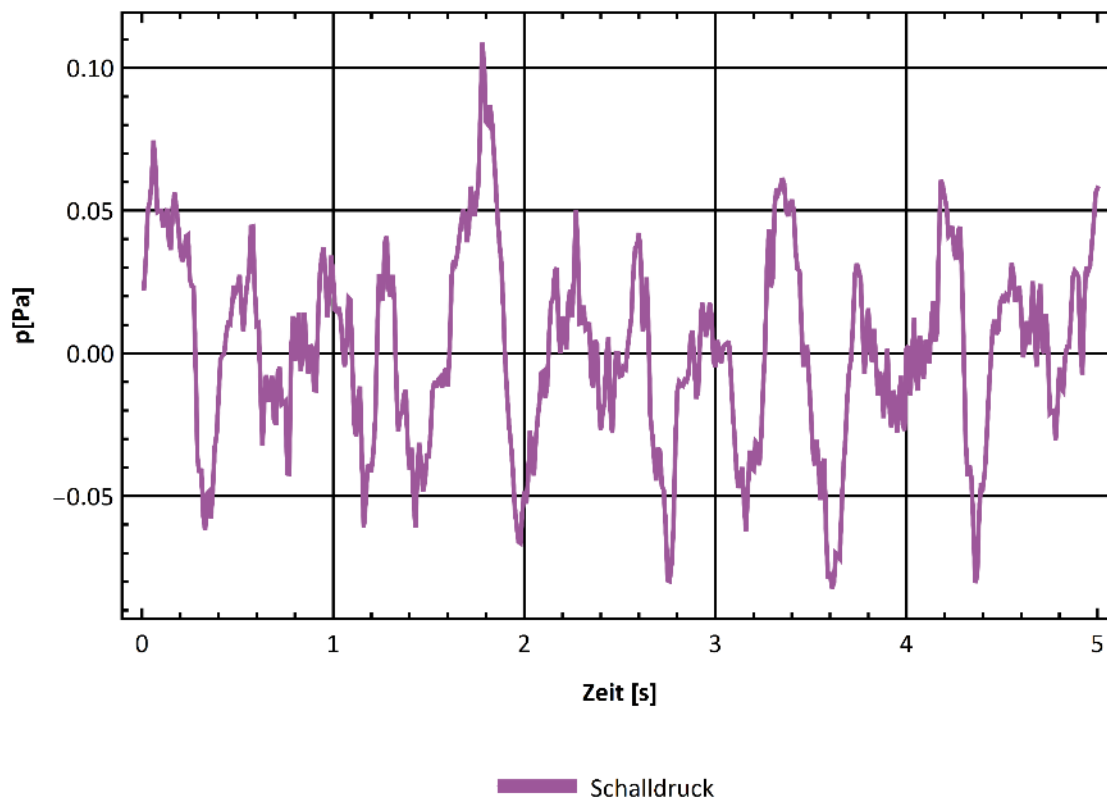
Dieser durch Wind angehobene Hintergrund kann einen Einfluss auf die für Linien in Tabelle 8 angegebenen Pegel haben. Der Pegelabstand der Linie bei 4,9 Hz zum Hintergrund ist z.B. klein genug, dass sich damit die Abweichung der Messung zwischen Bodenplatte und Stativ um 1 dB erklären lässt. Bei den Linien unter 4 Hz liegt der Abstand zwischen Linienmaximum und Hintergrund über 10 dB, d.h. ein Beitrag durch Wind würde das Ergebnis um weniger als 0,5 dB verfälschen.

In dem als Beispiel gewählten Zeitabschnitt ist das Signal besonders deutlich und die Störung durch Wind besonders schwach. In den statistischen Auswertungen über alle Messzeiten werden die Störungen durch Wind im Folgenden besonders berücksichtigt.

5.4.3 Periodische Druckschwankungen

Für einen Zeitausschnitt aus der oben verwendeten Beispielzeit ist in Abbildung 41 der Schalldruckzeitverlauf dargestellt. Die Ursache für die Schallemissionen von Windenergieanlagen im Infrarotbereich und damit die hervortretenden Einzellinien im Spektrum sind Luftdruckschwankungen, wie bei allen anderen Schalldruckvorgängen auch. Je periodischer diese Schwankungen sind, um so feiner werden die Linien im Spektrum. Obwohl die Linien im Spektrum in Abbildung 40 sehr deutlich sind, sieht man in dem Zeitausschnitt in Abbildung 41, dass sich die einzelnen Schwankungen auch in diesem Beispiel recht deutlich voneinander unterscheiden.

Abbildung 41: Zeitverlauf des Schalldruckpegels



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Zum Vergleich der Pegel in Spektrum und Schalldruckschrieb wird die energetische Summe der Pegel der Einzellinien in Tabelle 8 gebildet, die einen L_{Zeq} von 66,9 dB ergibt. Das entspricht einem Schalldruck von 0,044 Pa. Der maximale Schalldruck im Beispielzeitraum ist 0,12 Pa, der entsprechende Maximaldruckpegel beträgt 75,5 dB. Dieser Maximaldruckpegel darf nicht mit einem Äquivalenzpegel verwechselt werden, der dem durchschnittlichen Schalldruckquadrat entspricht, und deshalb immer niedriger ist.

Die dargestellten Schalldrücke sind die gemessenen Schalldrücke, eine Berücksichtigung des Frequenzgangs, um einen „wahren“ Schalldruckzeitverlauf abzuschätzen, ist nicht möglich.

5.4.4 Messergebnisse Langzeitmessung auf Bodenplatte

5.4.4.1 Häufigkeitsverteilungen tieffrequenter Schall

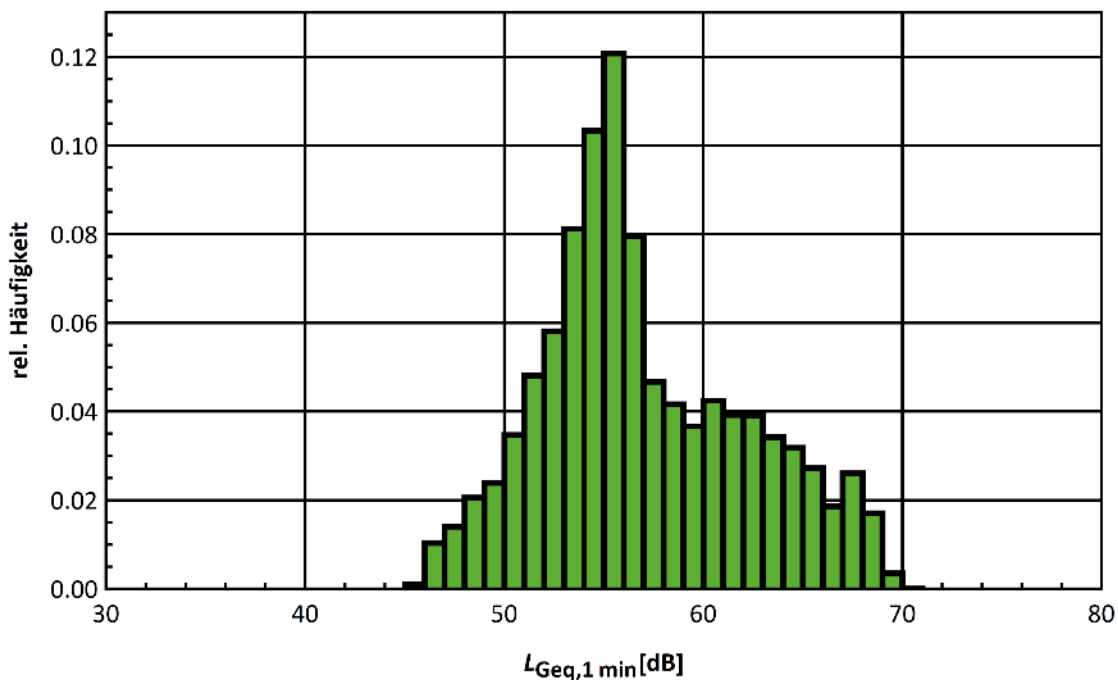
Zur Bewertung von Infraschall können verschiedene Pegel gebildet werden. Hörschall wird z.B. in der Regel A-bewertet, weil die A-Bewertung die Empfindlichkeit des Gehörs bei unterschiedlichen Frequenzen näherungsweise berücksichtigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass unterschiedliche Geräusche mit gleichem A-Pegel in etwa gleich lästig sind, auch wenn sie bei unterschiedlichen Frequenzen liegen.⁵ In den Bereich der ganz tiefen Frequenzen ist der Ansatz über die A-Bewertung nicht übertragbar, deshalb wurde hier die G-Bewertung eingeführt

⁵ Diese Annahme hat ihre Grenzen, denn Bewertungszuschläge für Ton-, Impuls- oder Informationshaltigkeit sollten gerade dort angewendet werden, wo der reine A-bewertete Pegel die Äquivalenz der Lästigkeit von Geräuschen mit gleichem Pegel nicht hinreichend widerspiegelt. Die Frage nach der besonderen Lästigkeit periodisch amplitudenmodulierter Geräusche ist zentrales Thema dieser Studie.

(ISO 7196). Während die A-Bewertung am empfindlichsten auf Töne bei 1000 Hz reagiert, und zu hohen und tiefen Frequenzen in Anlehnung an das menschliche Gehör unempfindlicher wird, ist die G-Bewertung bei 20 Hz am empfindlichsten, reagiert also gerade auf die tiefen Töne am Übergang vom Infraschall zum Hörschall.

In Abbildung 42 ist die Häufigkeitsverteilung der G-bewerteten Pegel exemplarisch für das UG 5 dargestellt. Da die Bewertungskurve der G-Bewertung anders verläuft als die der A-Bewertung, sind die Zahlenwerte nicht direkt vergleichbar. Zur Einordnung der Werte kann man grob ansetzen, dass der Pegel eines Tons bei 20 Hz über 80 dB liegen muss, damit das Geräusch über der Hörschwelle liegt, während höherfrequente Geräusche schon mit niedrigeren G-bewerteten Pegeln hörbar sein können.

Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der G-bewerteten Pegel im UG 5



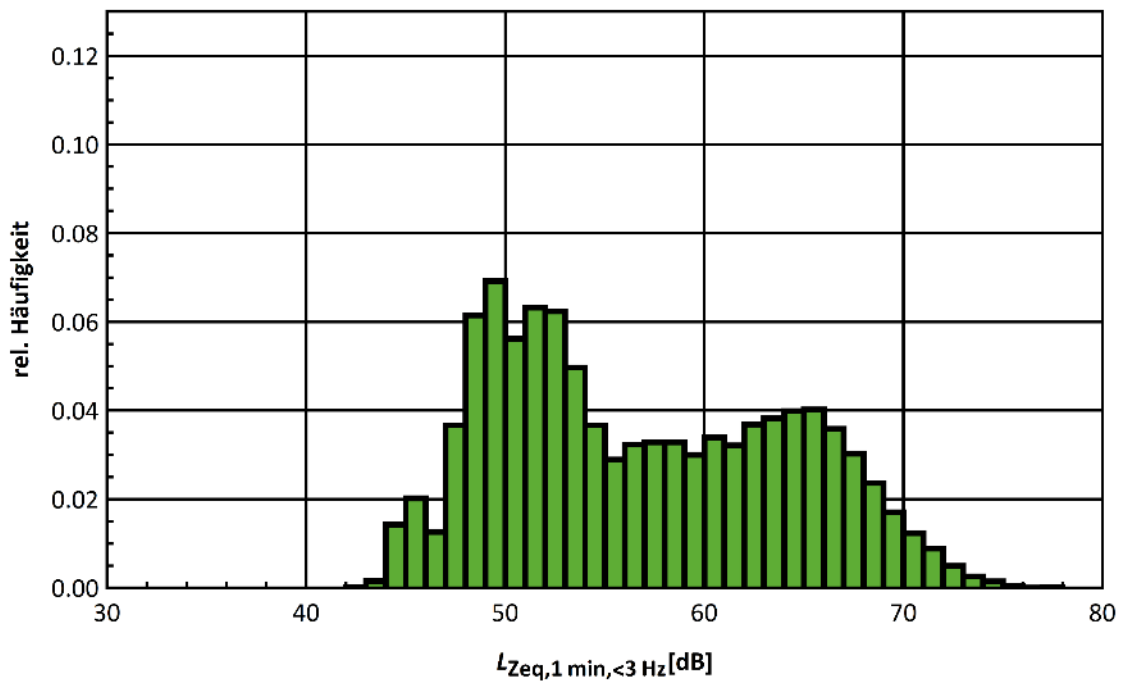
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Da aus G-bewerteten Pegeln ohne weitere Informationen über den Frequenzgehalt nicht direkt abgelesen werden kann, wie groß der Beitrag bei tiefen Frequenzen tatsächlich ist, werden im Folgenden Z-bewertete Pegel für unterschiedliche Frequenzbänder verwendet. Gewählt wurden die Bänder

- ▶ $L_{Zeq,<3Hz}$ sehr tiefe Frequenzen
- ▶ $L_{Zeq,4-7Hz}$ der erweiterte Infraschallbereich
- ▶ $L_{Zeq,8-20Hz}$ der klassische Infraschallbereich
- ▶ $L_{Zeq,25-80Hz}$ tiefe Frequenzen oberhalb des Infraschallbereichs

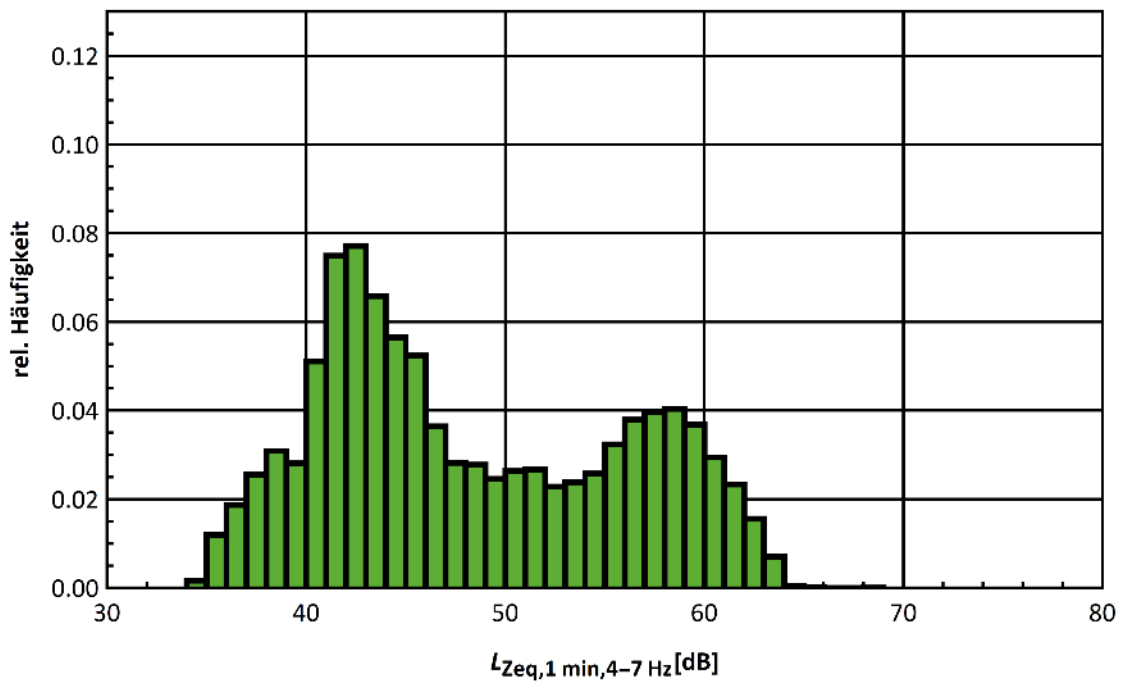
In den Abbildung 43 bis Abbildung 46 sind die Häufigkeitsverteilungen für die Pegel in den vier Bändern dargestellt.

Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band bis 3 Hz im UG 5



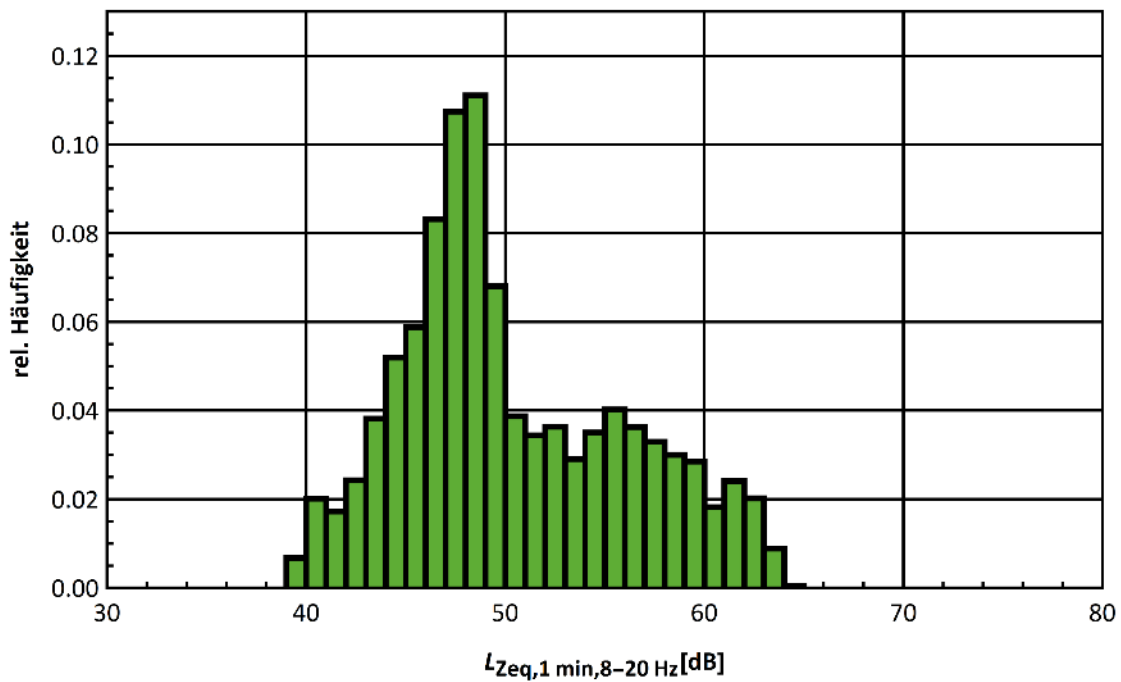
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band bis 4 bis 7 Hz im UG 5



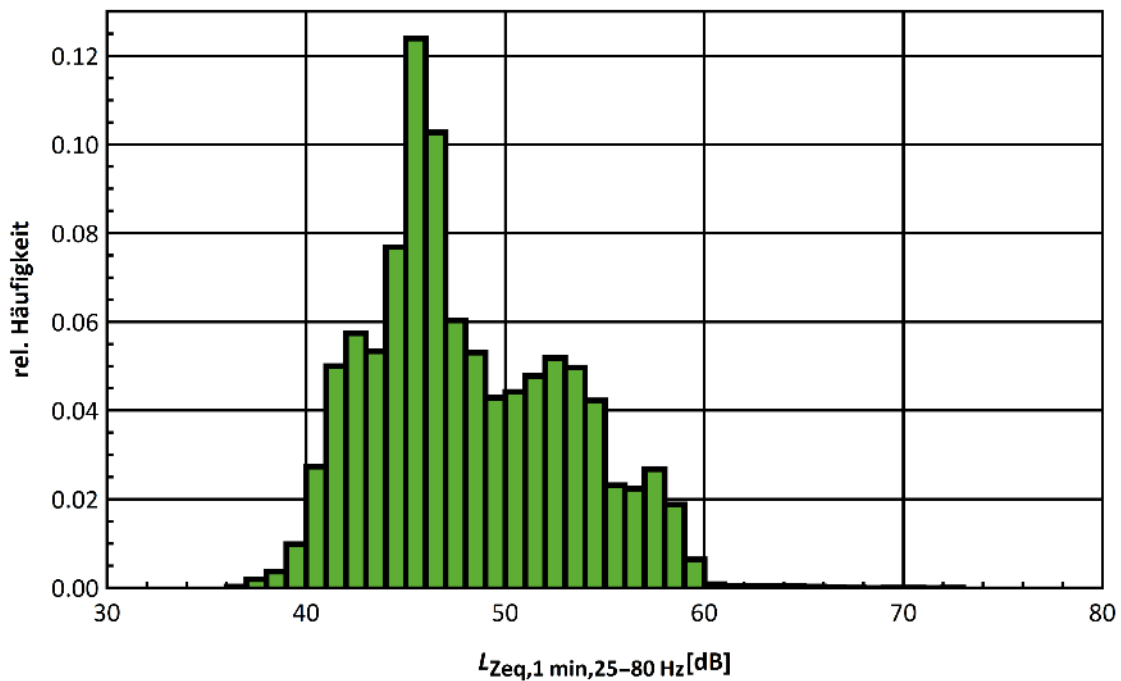
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band 8 bis 20 Hz im UG 5



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band bis 25 bis 80 Hz im UG 5



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Tabelle 9: Vertrauensbereiche Pegel auf Bodenplatte

Auswirkung der Messempfindlichkeit auf die gebildeten Bänder/Bewertung unter Berücksichtigung der Form der Spektren

Band/Bewertung	Rel. Vertrauensbereich
G	-0,5 bis +2,0 dB
<3 Hz	+3 dB bis +23 dB
4-7 Hz	-0,5 dB bis +3,5 dB
8-20 Hz	-0,5 dB bis +1,5 dB
25-80 Hz	-0,5 bis +0,5 dB

5.4.4.2 Bewertung der Häufigkeitsverteilungen

Die in Abbildung 42 bis Abbildung 46 gezeigten Pegel sind die für die Bänder gemessenen Pegel. Die Vertrauensbereiche für diese Bänder können aus den Vertrauensbereichen der Einzelterzen (Anhang F.3.4) bestimmt werden.

Bezogen auf den gemessenen Pegel ergibt sich jeweils ein relativer Vertrauensbereich, die Werte sind in Tabelle 9 angegeben.

Das heißt z.B., dass ein $L_{Zeq,<3Hz}$ von 72 dB einen Vertrauensbereich von 75 dB bis 95 dB hat.

In der DIN 45680 (1997) werden Hörschwellen angegeben:

- ▶ Für Frequenzen bis 8 Hz: >103 dB
- ▶ Für Frequenzen bis 20 Hz: >71 dB
- ▶ Für Frequenzen bis 80 Hz: >28 dB

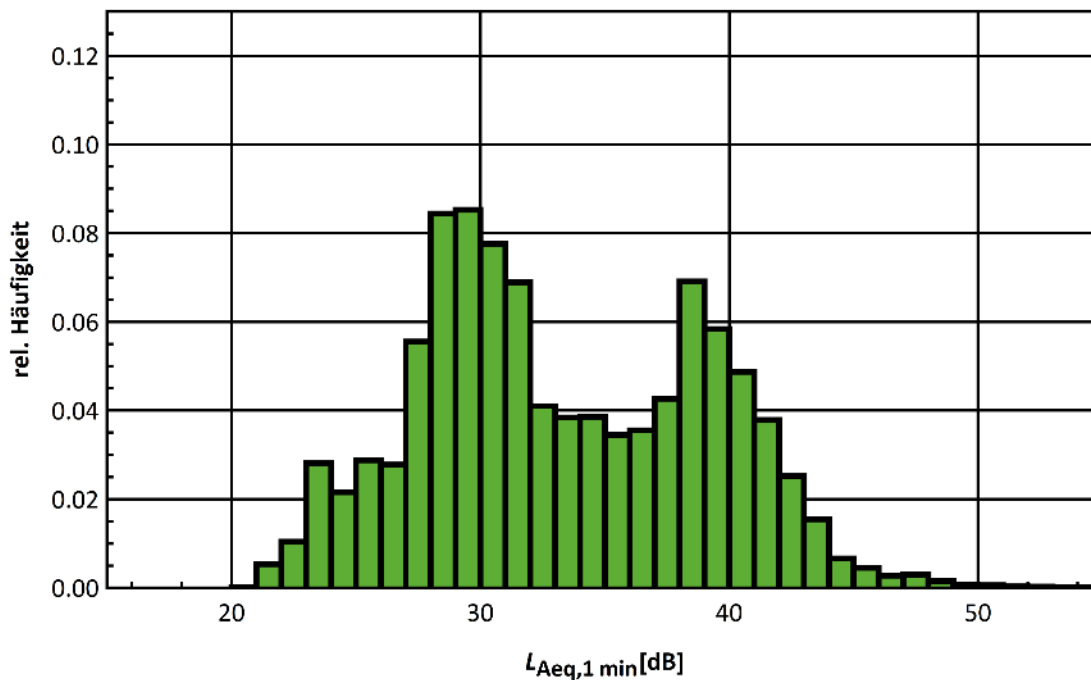
Alle Pegel für die Bänder bis 20 Hz liegen in Bereichen unter den Hörschwellen der DIN 45680. Auch die Oberkanten der Vertrauensbereiche für diese Pegel liegen unter den Hör- bzw. Wahrnehmungsschwellen.

Das Band 25 bis 80 Hz liegt oberhalb des Infraschallbereichs, also im Bereich des tieffrequenten Hörschalls. Die in Abbildung 46 gezeigten Pegel liegen weitgehend oberhalb der Hörschwelle, d. h. während der gemessene Infraschall unter der Hörschwelle liegt, tritt tieffrequenter Hörschall mit Pegeln auf, die ihn hörbar machen.

5.4.4.3 Häufigkeitsverteilungen Hörschall

Zum Vergleich mit den Schalldruckpegeln der tieffrequenten Geräusche ist in Abbildung 47 die Häufigkeitsverteilung des A-bewerteten Pegels dargestellt. Es sind die gleichen Zeiten wie in den anderen Abbildungen berücksichtigt. Eine Fremdgeräusch-Erkennung zum Ausschluss von Messzeiten wurde nicht angewendet. Die dargestellten Pegel können daher lokal in der Vegetation entstehende Windgeräusche und Geräusche von nachtaktiven Vögeln enthalten.

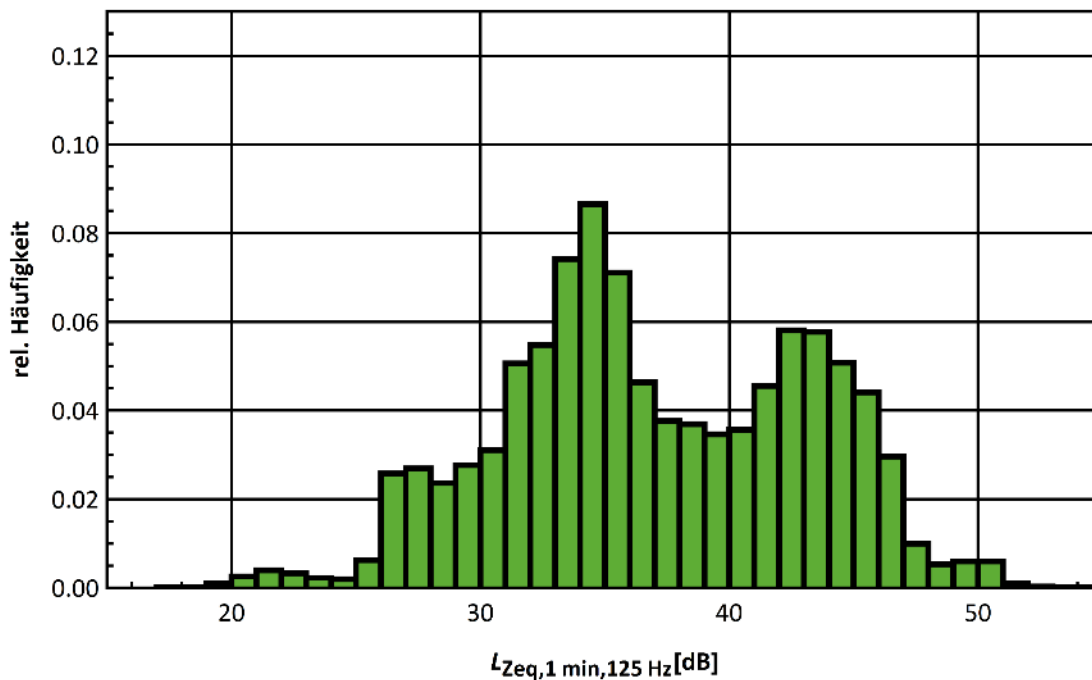
Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der A-bewerteten Pegel im UG 5



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Wenn Windenergieanlagen Immissionen verursachen, dann haben diese im Hörschall typischerweise ein Maximum bei 125 Hz. Um zu ermitteln, wie der Beitrag von Windenergieanlagen zum Hörschall aussieht, ist in Abbildung 48 die Häufigkeitsverteilung für das 125 Hz-Band dargestellt. In dieser Häufigkeitsverteilung sieht man zwei Maxima, ähnlich wie in der Häufigkeitsverteilung der A-Pegel. Der Einfluss von Fremdgeräuschen auf das 125 Hz-Band ist jedoch deutlich kleiner als auf den A-Pegel, weil die meisten Fremdgeräusche bei höheren Frequenzen liegen. Vor allem Vögel verursachen Immissionen bei viel höheren Frequenzen und können damit als Quelle für das zweite Maximum in der Häufigkeitsverteilung ausgeschlossen werden.

Abbildung 48: Häufigkeitsverteilung der Pegel für das Band 125-Hz-Band im UG 5



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Insgesamt zeigen die Häufigkeitsverteilungen aller Pegel grob zwei Maxima. Ein möglicher Grund für solche Verteilungen kann sein, dass das rechte Maximum durch eine zeitweise aktive Quelle entsteht, und das linke Maximum auf die Hintergrundverteilung ohne die zusätzliche Quelle zurückgeht. Im Folgenden wird untersucht, ob Windenergieanlagen als diese zusätzliche Quelle – auch im Infraschallbereich – in Frage kommen.

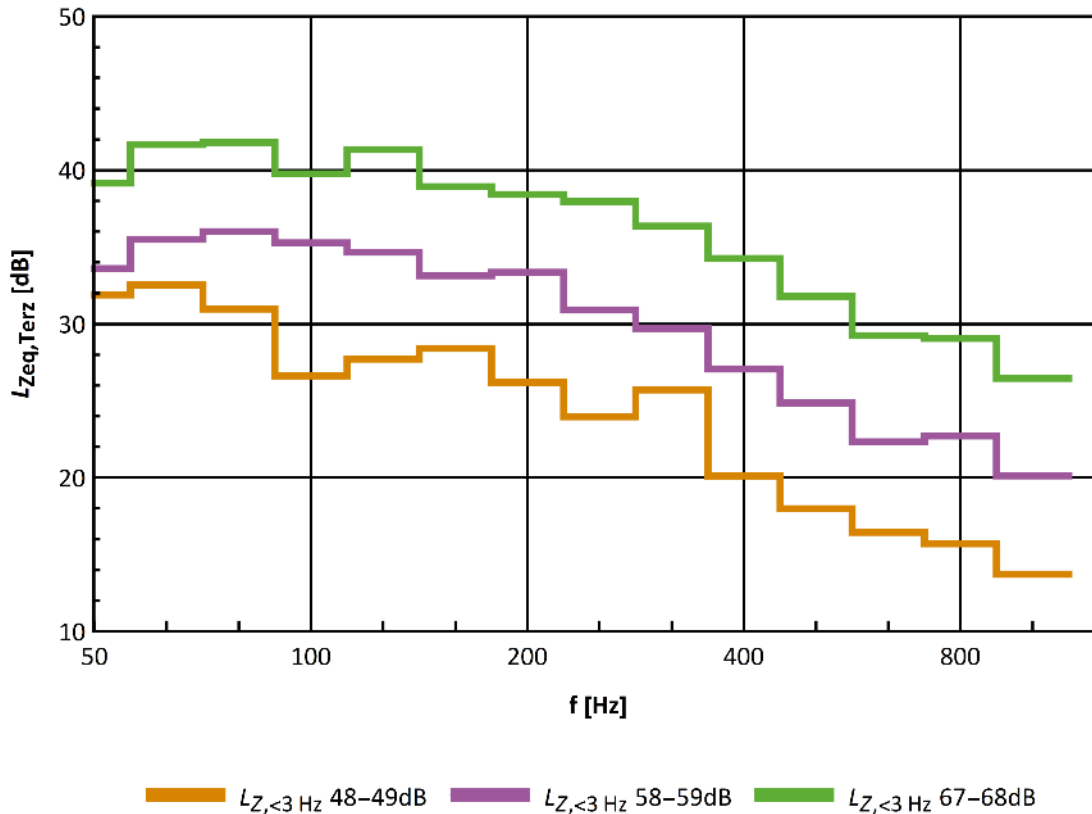
5.4.4.4 Zusammenhang zwischen Hör- und Infraschall

Im Abschnitt 5.4.2 wurde für einen Einzelfall untersucht, ob die Windenergieanlagen im UG 5 Infraschall in den erwarteten Frequenzen verursachen. Es wird nunmehr der Frage nachgegangen, ob die Pegel im Infraschallbereich systematisch mit der Leistung der Windenergieanlagen zusammenhängen. Hierfür wird, repräsentativ für den gemessenen Infraschall, der $L_{eqZ,<3Hz}$ als Summe der Schalldruckpegel im Frequenzbereich 0,5 bis 3 Hz gebildet.

In Abbildung 49 sind die Terzspektren für drei $L_{eqZ,<3Hz}$ dargestellt ($L_{eqZ,<3Hz} = 48$ bis 49 dB, $L_{eqZ,<3Hz} = 58$ bis 59 dB und $L_{eqZ,<3Hz} = 67$ bis 68 dB). Da mit zunehmendem $L_{eqZ,<3Hz}$ offensichtlich die Pegel in den Terzspektren im Bereich des Hörschalls (hier dargestellt zwischen 50 Hz und 900 Hz) ebenfalls zunehmen, wird vermutet, dass die Stärke des Infraschallsignals mit der Stärke des Hörschalls zusammenhängen könnte. Die drei Spektren könnten dann unterschiedlichen Anlagenzuständen mit geringer Last, mittlerer Last und hoher Last zugeordnet werden.

Abbildung 49: Terzspektren im Hörschallbereich im UG 5

1-Minuten-Terzspektren nach $L_{eqZ,<3Hz}$. Die gezeigten Spektren wurden jeweils durch Zusammenfassung aller Spektren für 1-Minuten-Blöcke in der Zeit von 23 bis 5 Uhr mit den gewählten $L_{eqZ,<3Hz}$ und Bildung des 70%-Perzentils bestimmt.



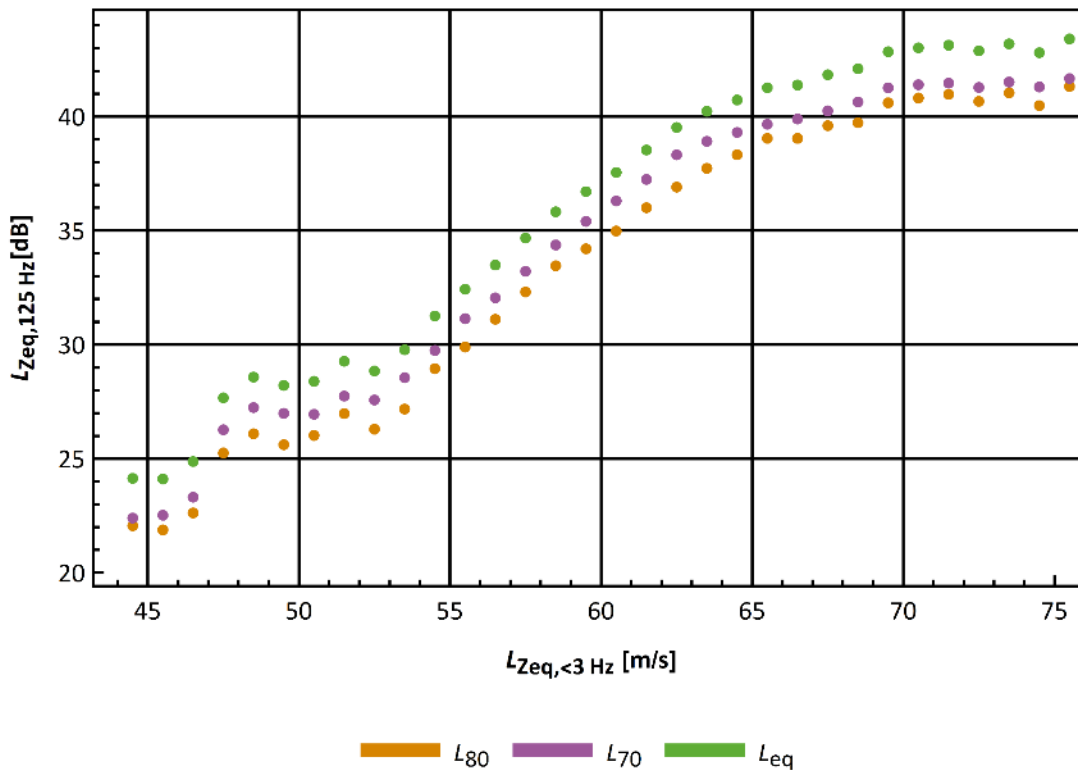
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

In deutlichem Maße nimmt bei Zunahme des $L_{eqZ,<3Hz}$ auch der Pegel bei 125 Hz zu. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass der Pegel bei 125 Hz repräsentativ für die Hörschallimmissionen durch die Windenergieanlagen sei. Dies ist zwar eine stark vereinfachte Annahme, aber typische Emissionsdaten von Windenergieanlagen zeigen verhältnismäßig große Schallemissionen im Hörschallbereich bei 125 Hz.

In Abbildung 50 ist der Pegel im 125-Hz-Band gegen den Infraschallpegel $L_{eqZ,<3Hz}$ aufgetragen. Hieraus ist erkennbar, dass mit zunehmendem Infraschallpegel auch der Hörschallpegel bei 125 Hz steigt. Bei kleinen Pegeln hingegen gibt es vermutlich Störgeräusche im Hörschallbereich, die die Korrelation verändern. Im oberen Bereich flacht der Anstieg im Hörschall ab. Eine naheliegende Erklärung ist, dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit die Emissionen von Windenergieanlagen abflachen und nicht weiter steigen, weil die Rotoren der Windenergieanlagen entsprechend geregelt werden, während die Störung der Strömung zwischen Rotor und Mast mit zunehmender Windgeschwindigkeit weiter ansteigt.

Abbildung 50: Pegel Hörschall gegen Infraschall

$L_{Zeq,125Hz}$ am Klasse-1-Mikrofon auf dem Stativ als für das Windenergieanlagen-Geräusch repräsentativ gegen $L_{Zeq,<3Hz}$ am Infraschallmikrofon auf der Bodenplatte als repräsentativ für den Infraschall aufgetragen. Es sind jeweils das 80%- und 70%-Perzentil und der Äquivalenzpegel dargestellt.



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

5.5 Erweiterung der Untersuchungen auf UG 1 bis 4

5.5.1 Messungen mit Klasse-1-Mikrofon

In den UG 1 bis 4 wurde nur mit einem Klasse-1-Mikrofon auf Stativ gemessen. Das hat für Infraschalluntersuchungen den Nachteil, dass die Empfindlichkeit des Mikrofons bei sehr kleinen Frequenzen deutlich nachlässt – also durch die Messanlage kleinere Pegel bestimmt werden, als sie tatsächlich sind. Zudem ist das Mikrofon durch die größere Höhe mehr Wind und Turbulenzen ausgesetzt, die zu Signalen am Mikrofon führen können, die nicht durch die Windenergieanlagen verursacht werden.

5.5.2 Vergleich der Messsysteme

Um trotz der oben genannten Nachteile eine Abschätzung der Infraschallpegel auch in den UG 1 bis 4 durchzuführen, wurden die beiden Messsysteme (Infraschallmikrofon auf einer Bodenplatte und Klasse-1-Mikrofon auf einem Stativ) miteinander verglichen. Dies wurde exemplarisch im UG 5 durchgeführt. Dort wurden beide Messsysteme für den gesamten ca. 8-wöchigen Messzeitraum simultan eingesetzt (Foto in Abbildung 51). Zusätzlich wurden beide Messsysteme unter Laborbedingungen miteinander verglichen. Die Vorgehensweise bei dem Vergleich der beiden Messsysteme und die Bestimmung der Vertrauensbereiche ist in Anhang F beschrieben.

Zur Verdeutlichung des Einflusses von lokalem Wind auf die Messungen auf dem Stativ sind in Abbildung 52 Differenzspektren zwischen den zeitgleichen Messungen mit Klasse-1-Mikrofon auf Stativ und Infrasschallmikrofon auf Bodenplatte für verschiedene Windgeschwindigkeiten auf Höhe des Mikrofons dargestellt. Dabei bedeuten positive Werte, dass der Pegel am Mikrofon auf dem Stativ höher ist als bei dem Mikrofon auf der Bodenplatte; negative Pegelwerte besagen entsprechend, dass mit dem Infrasschallmikrofon am Boden höhere Werte gemessen wurden.

Bei kleinen Frequenzen zeigt sich, dass die Empfindlichkeit des Infrasschallmikrofons höher ist als die des Klasse-1-Mikrofons. Das Differenzspektrum ist hier negativ. Zusätzlich hat der Wind einen starken Einfluss auf das Differenzspektrum. Die Pegel in den Terzbändern nehmen schon bei kleinen lokalen Windgeschwindigkeiten erheblich zu. Um auch aus den Messungen mit den Klasse-1-Mikrofonen Rückschlüsse auf die Infrasschallimmissionen an den Standorten UG 1 bis UG 4 ziehen zu können, muss also die lokale Windsituation berücksichtigt werden.

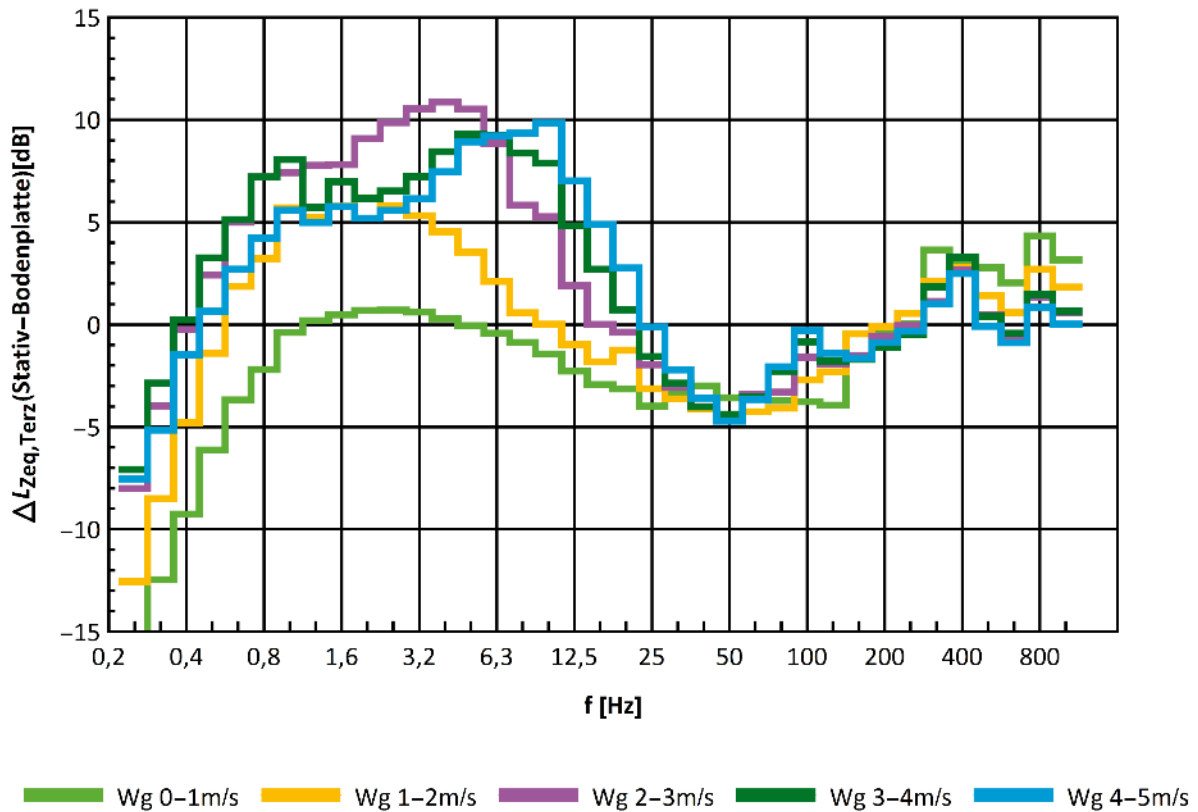
Abbildung 51: Messung auf Bodenplatte neben der Messung auf einem Stativ



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 52: 80%-Perzentil der Differenzspektren (Stativ-Bodenplatte) für verschiedene Windgeschwindigkeiten

Für die Zeiten von 23 bis 5 Uhr wurden für beide Messsysteme jeweils 1-Minuten-Spektren bestimmt und die Differenz gebildet. Dargestellt sind 80iger-Perzentile für verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen auf Höhe des Klasse-1-Mikrofans.



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

5.5.3 Mittelungspegel nach Lastzuständen

Entsprechend der Messung auf der Bodenplatte werden G-bewertete Schallpegel $L_{G_{eq}}$ sowie die Pegel für mehrere Frequenzbänder gebildet:

- ▶ $L_{Z_{eq}, <3\text{Hz}}$ sehr tiefe Frequenzen
- ▶ $L_{Z_{eq}, 4-7\text{Hz}}$ der erweiterte Infraschallbereich
- ▶ $L_{Z_{eq}, 8-20\text{Hz}}$ der klassische Infraschallbereich
- ▶ $L_{Z_{eq}, 25-80\text{Hz}}$ tiefe Frequenz oberhalb des Infraschallbereichs

Zur Berücksichtigung des Windeinflusses bei den Infraschallmessungen mit einem Klasse-1-Mikrofon auf Stativ wurden Extrapolationen zu lokaler Windstille vorgenommen, die im Anhang F beschrieben sind. Die Ergebnisse dieser Extrapolationen sind in Tabelle 10 bis Tabelle 14 für die verschiedenen Untersuchungsgebiete zusammengestellt.

Tabelle 10: L_{Geq} gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB

Angegebene Fehler sind nur die statistischen Fehler aus der Extrapolation zu lokaler Windstille.

Windgeschwindigkeit	UG 1	UG 2	UG 3E	UG 3I	UG 4E	UG 4I
0-2m/s	40,4±0,3	46,2±0,6		44,7±0,3	46,9±2,9	40,1±1,1
2-4m/s	38,9±0,3	48,9±0,6	54,1±0,5	46,6±0,9	50,3±1,1	49,0±0,7
4-6m/s	39,9±0,5	51,5±0,7	56,6±0,2	50,4±0,5	55,6±0,9	51,2±0,5
6-8m/s	43,4±1,0	58,3±0,9	64,1±2,5	51,7±1,1	62,3±0,8	56,0±0,4
8-10m/s	49,2±1,2	56,3±2,5	73,5±0,7	52,3±3,0	64,8±1,0	56,7±0,4
10-12m/s	56,6±2,2		79,5±6,6	51,9±4,8		51,4±6,1

Tabelle 11: $L_{\text{Zeq}, < 3\text{Hz}}$ gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB

Angegebene Fehler sind nur die statistischen Fehler aus der Extrapolation zu lokaler Windstille.

Windgeschwindigkeit	UG 1	UG 2	UG 3E	UG 3I	UG 4E	UG 4I
0-2m/s	33,3±0,8	39,3±2,2	41,3±3,1	43,3±0,5	41,0±1,0	32,3±2,9
2-4m/s	32,7±1,8	43,1±1,7	46,7±0,4	41,8±1,7	41,5±1,2	41,6±1,5
4-6m/s	36,0±1,5	54,6±2,2	52,2±0,5	46,0±1,6	49,7±3,0	41,5±2,9
6-8m/s	41,9±2,8	58,5±3,7	60,7±1,0	52,4±2,2	60,3±0,6	49,6±2,0
8-10m/s	48,8±3,7	58,3±5,0	64,8±1,3	54,1±5,4	60,1±2,1	54,9±1,7
10-12m/s	64,0±2,8		68,7±1,8	52,1±8,4	60,3±4,6	50,4±7,8

Tabelle 12: $L_{\text{Zeq}, 4-7\text{Hz}}$ gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB

Angegebene Fehler sind nur die statistischen Fehler aus der Extrapolation zu lokaler Windstille.

Windgeschwindigkeit	UG 1	UG 2	UG 3E	UG 3I	UG 4E	UG 4I
0-2m/s	32,7±0,4	36,1±1,8	37,8±1,9	40,1±0,7	39,3±1,4	33,9±1,3
2-4m/s	31,2±0,8	41,0±1,2	41,8±0,3	40,6±0,8	38,8±1,3	40,8±0,8
4-6m/s	32,2±1,1	48,6±1,6	46,7±0,7	43,4±0,9	46,4±1,7	40,7±1,7
6-8m/s	39,6±1,9	51,4±3,5	57,0±1,1	48,4±1,5	53,6±1,6	48,5±1,4
8-10m/s	48,0±1,7	51,3±4,8	60,3±1,2	49,2±4,4	58,1±1,0	50,2±1,5
10-12m/s	53,7±3,9		67,1±2,3	47,3±7,0	53,1±5,7	48,3±6,6

Tabelle 13: $L_{Zeq,8-20Hz}$ gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB

Angegebene Fehler sind nur die statistischen Fehler aus der Extrapolation zu lokaler Windstille.

Windgeschwindigkeit	UG 1	UG 2	UG 3E	UG 3I	UG 4E	UG 4I
0-2m/s	34,3±0,3	40,5±0,5			42,6±1,5	34,8±1,0
2-4m/s	32,7±0,5	43,4±0,7	46,6±0,6	41,9±0,7	43,9±1,0	43,2±0,5
4-6m/s	33,6±0,6	47,2±0,8	49,1±0,6	45,2±0,5	49,7±0,9	43,7±0,8
6-8m/s	38,1±1,3	53,3±1,3	58,0±2,3	46,8±1,2	55,6±0,8	49,0±0,7
8-10m/s	43,5±1,5	51,3±3,0	64,0±1,0	47,2±3,4	58,8±1,3	49,4±0,6
10-12m/s	51,1±2,9		64,1±2,3	47,1±5,3		

Tabelle 14: $L_{Zeq,25-80Hz}$ gegen Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe in dB

Angegebene Fehler sind nur die statistischen Fehler aus der Extrapolation zu lokaler Windstille.

Windgeschwindigkeit	UG 1	UG 2	UG 3E	UG 3I	UG 4E	UG 4I
0-2m/s	34,4±0,5	32,5±0,3			37,5±1,9	27,5±0,7
2-4m/s	35,2±0,2	36,5±0,3	44,4±0,4	35,5±0,5	44,7±0,3	36,8±0,8
4-6m/s	36,0±0,3	38,2±0,8	47,7±0,7	39,0±0,3	47,1±0,6	39,6±0,5
6-8m/s	37,8±0,2	44,3±0,4	55,7±0,6	40,2±0,6	52,0±0,6	44,2±0,2
8-10m/s	37,3±0,8	41,8±1,7	55,8±1,0	38,8±2,0	54,6±0,9	45,0±1,0
10-12m/s	44,2±1,1	44,2±5,3	60,9±4,1	40,9±2,6	49,0±4,8	40,5±6,1

Die jeweils in den Tabellen angegebenen Fehler sind die statistischen Fehler, die sich aus der Extrapolation ergeben. Bei den höheren Windgeschwindigkeiten ergeben sich zum Teil große statistische Unsicherheiten. Das hängt damit zusammen, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe niedrige Windgeschwindigkeiten auf Mikrofonhöhe nur noch selten auftreten. Werte bei noch höheren Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe konnten bestimmt werden, wurden aber aufgrund der hohen Unsicherheiten nicht angegeben.

Ähnlich verhält es sich bei der Frage nach der Windrichtungsabhängigkeit der Pegel. Genauso wie die Pegel für alle Windrichtungen bestimmt werden können, kann auch in einzelnen Windrichtungsklassen (also Mitwind, Gegenwind, Querwind) gerechnet werden. Allerdings werden dann die Datensätze so klein, dass die Ergebnisse nicht mehr signifikant sind.

Tabelle 15: Vertrauensbereiche Pegel auf Stativ

Auswirkung der Messempfindlichkeit auf die gebildeten Bänder/Bewertung unter Berücksichtigung der Form der Spektren

Band/Bewertung	Rel. Vertrauensbereich
G	+1,5 bis +5,0 dB
<3 Hz	+10 dB bis +29 dB
4-7 Hz	+1,5 dB bis +7,0 dB
8-20 Hz	+1,5 dB bis +4,5 dB
25-80 Hz	+1,5 bis +3,5 dB

5.5.3.1 Unsicherheiten und Frequenzgang

Die in Tabelle 10 bis Tabelle 14 gezeigten Pegel sind die für die Bänder aus einer Extrapolation bestimmten Pegel. Die Vertrauensbereiche für diese Bänder setzen sich aus mehreren Teilen zusammen. Die Zusammensetzung aus Vertrauensbereichen der Einzelterzen (Anhang F.3.4) und Vertrauensbereichen aufgrund der Verteilungsbreiten in den Windgeschwindigkeitsklassen sind in Tabelle 15 angegeben. Dazu kommen jeweils die in den Tabellen angegebenen Fehler aus der Extrapolation auf lokale Windstille.

5.5.3.2 Bewertung der lastabhängigen Mittelungspegel

An allen Messorten nehmen die Pegel mit zunehmender Leistung der WEA zu. D.h. an allen Messorten ist der Beitrag von WEA zu Infraschall nachweisbar.

Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass - wie erwartet - in den Untersuchungsgebieten, in denen sowohl Emissions- als auch Immissionsmessungen durchgeführt wurden, die Pegel im Emissionsbereich immer größer als im Immissionsbereich sind. Es gibt eine leichte Tendenz, dass die Abnahme der Pegel bei kleineren Frequenzen geringer ist als bei höheren Frequenzen. Zum Beispiel bei 8 bis 10 m/s im UG 3 ist die Differenz zwischen Emissions- und Immissionsmessung für den $L_{Zeq,25-80Hz}$ ca. -15 dB und für den $L_{Zeq,<3Hz}$ ca. -10 dB. Das entspricht tendenziell den theoretischen Erwartungen (Kühner(2016)).

Die in den Immissionsgebieten bestimmten Infraschallpegel liegen für alle UG unterhalb der Hörschwellen. Auch unter Berücksichtigung der Oberkanten der Vertrauensbereiche liegen die Werte unterhalb der Hörschwellen.

Tieffrequenter Hörschall im Frequenzband 25 bis 80 Hz liegt, wenn die Windenergieanlagen in Betrieb sind, oberhalb der Hörschwelle.

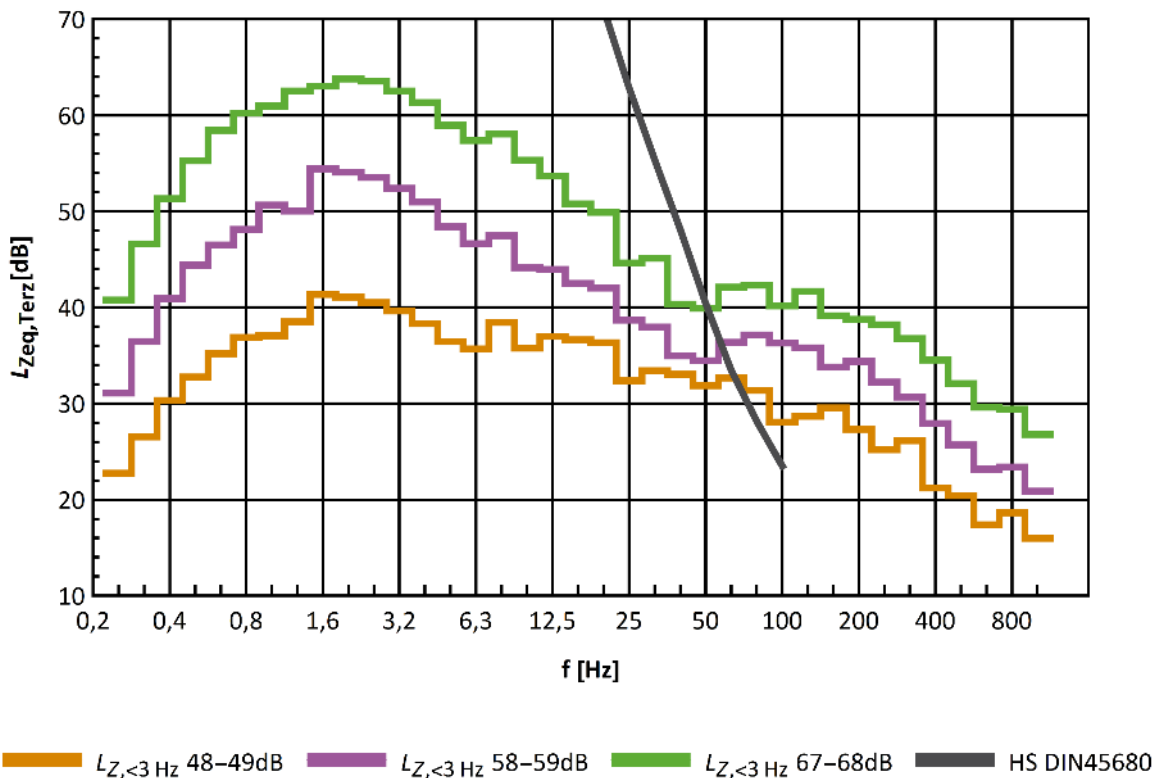
5.6 Terzspektren

5.6.1 Terzspektren im UG 5

Im Rahmen der Messkampagne wurden auch die Terzspektren bestimmt. Für das UG 5 konnte mit dem Infraschallmikrofon auf Bodenplatte direkt - mit wenig Windeinfluss - über den Zeitraum von ca. acht Wochen gemessen werden. In Abbildung 53 sind die Terzspektren für drei verschiedene Pegelklassen dargestellt. Da keine Betriebsdaten der Windenergieanlagen zur Verfügung stehen, wird nach drei Bereichen von $L_{Zeq,<3Hz}$ klassiert, die stellvertretend für kleine Last, mittlere Last und Nennlast der Windenergieanlagen stehen.

Abbildung 53: Gemessenes Terzspektrum für geringe Last, mittlere und große Last, UG 5

Mit der Annahme, dass der Infraschallpegel repräsentativ für die Leistung der Windenergieanlagen ist, wurden Terzspektren für Zeiten mit drei verschiedene Pegelklassen für $L_{Zeq,<3\text{Hz}}$ gebildet.

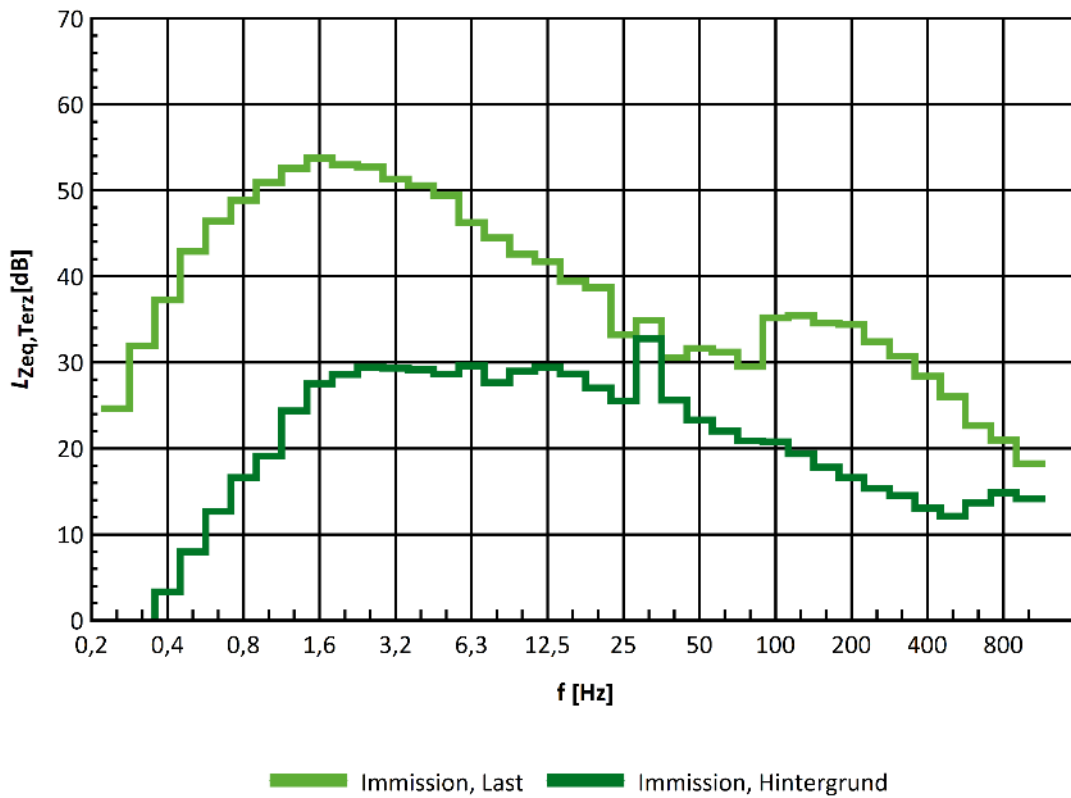


Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

5.6.2 Terzspektren in UG 1 bis 4

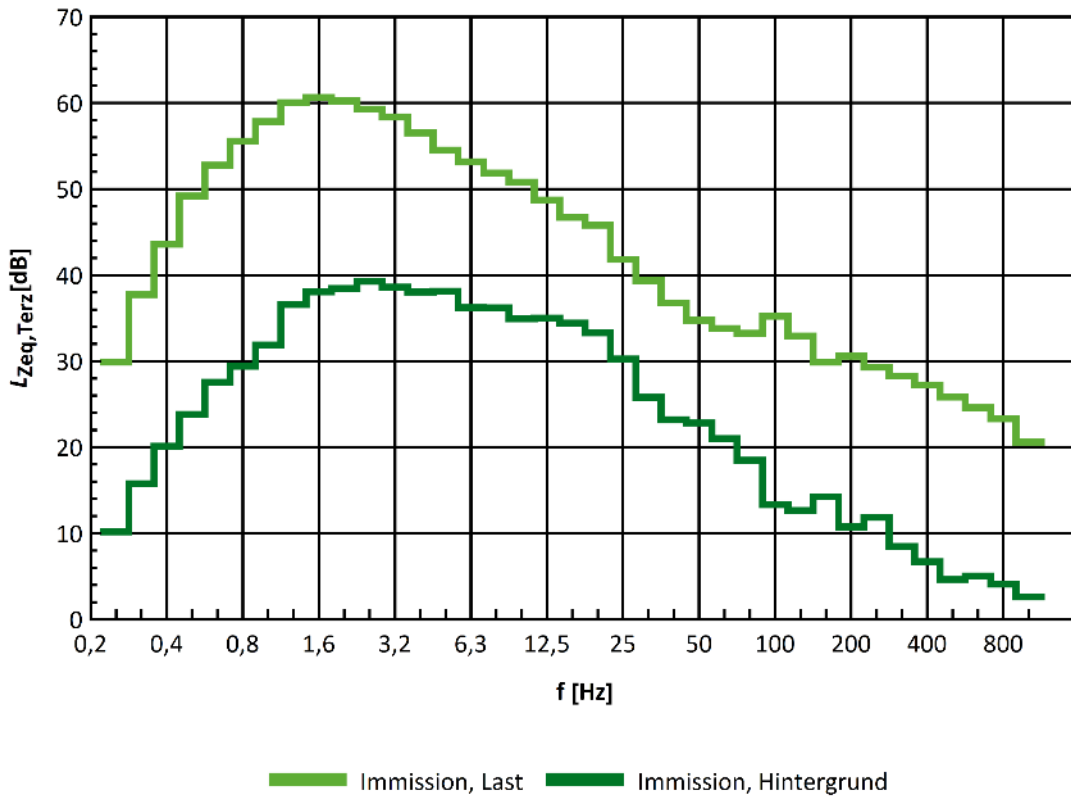
Bei den anderen Untersuchungsgebieten können die Daten der Windenergieanlagen genutzt werden. Um Terzspektren mit möglichst kleinem Windeinfluss zu bestimmen, werden Zeiten gewählt, in denen die lokalen Windgeschwindigkeiten möglichst klein sind. Dabei wird nach Zeiten unterschieden, in denen die Windenergieanlagen keine Energie geliefert haben, und Zeiten mit Nennleistung der Windenergieanlagen und einer Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe von 8 bis 10 m/s. Die Messergebnisse für die UG 1 bis 4 sind in den Abbildungen 46 bis 49 dargestellt.

Abbildung 54: Berechnetes Terzspektrum für Hintergrund und WEA bei Nennleistung, UG 1



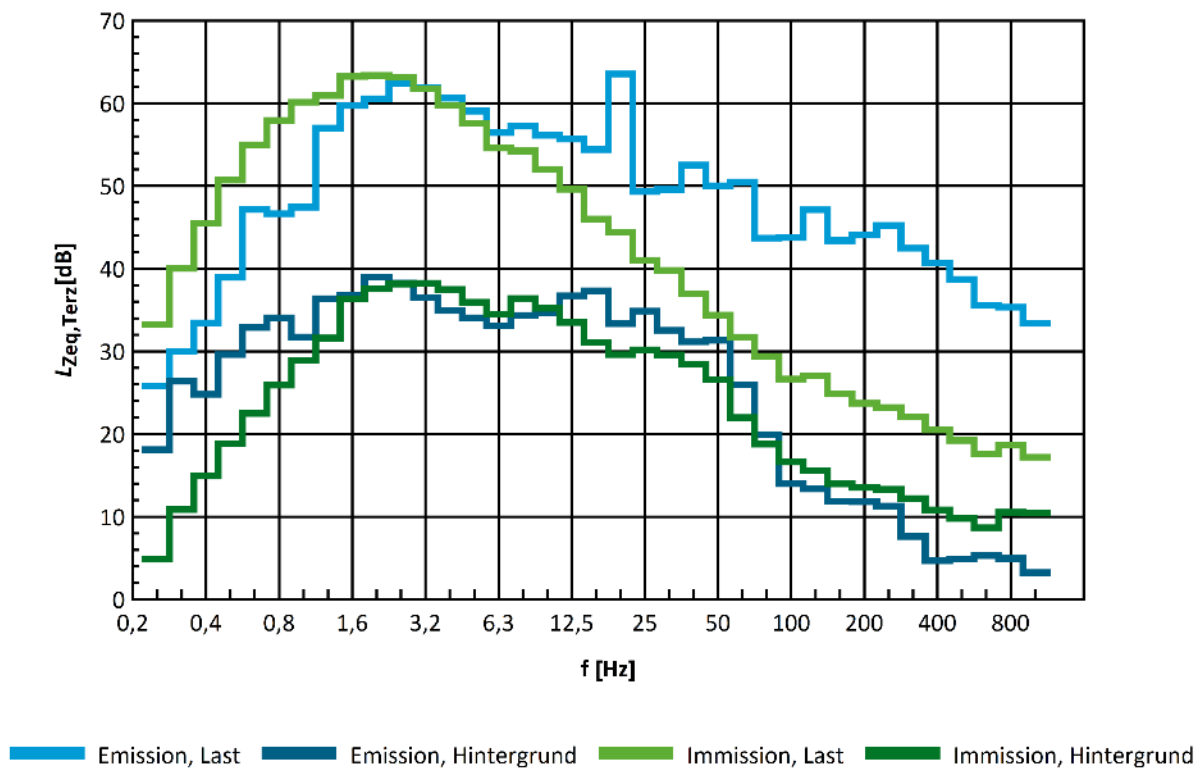
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 55: Berechnetes Terzspektrum für Hintergrund und WEA bei Nennleistung, UG 2



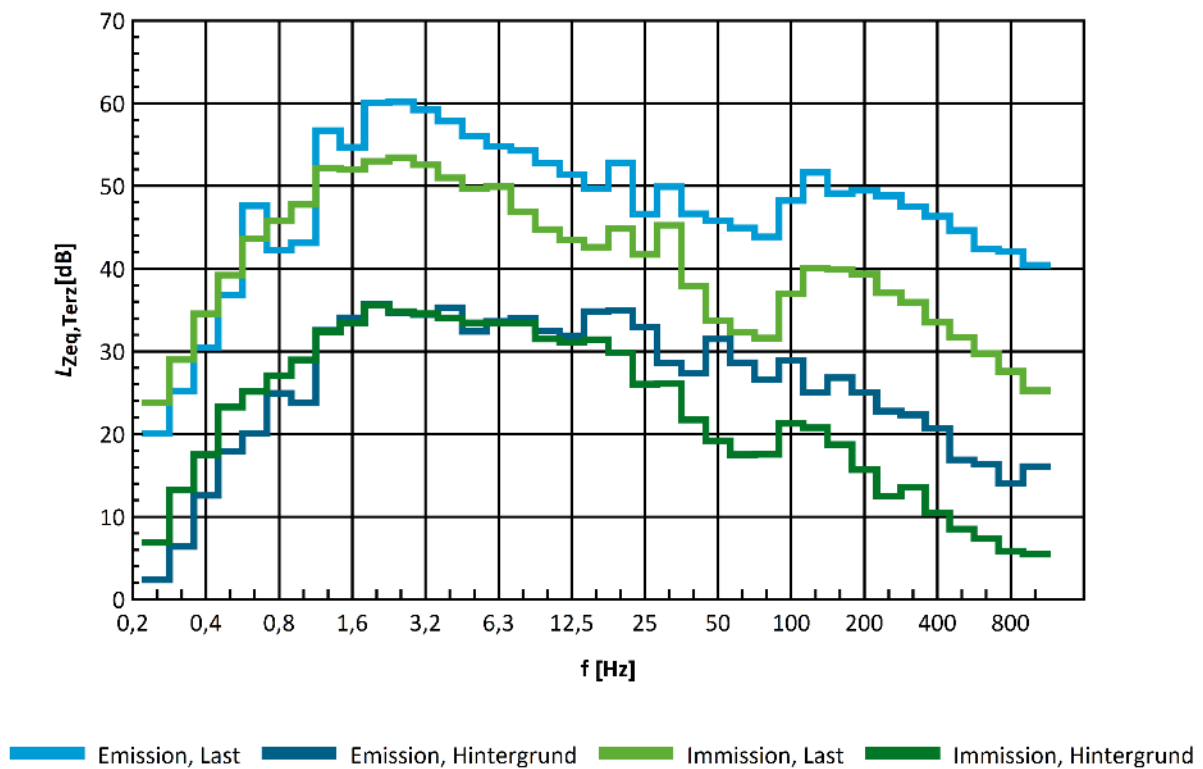
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 56: Berechnetes Terzspektrum für Hintergrund und WEA bei Nennleistung, UG 3



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 57: Berechnetes Terzspektrum für Hintergrund und EA bei Nennleistung, UG 4



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

5.6.3 Frequenzgang und Unsicherheiten

Für die Messungen mit Infraschall-Mikrofon auf Bodenplatte und Klasse-1-Mikrofon auf Stativ gelten die in Anhang F genannten Frequenzgänge. Diese wurden in der Darstellung nicht berücksichtigt, d.h. bei kleinen Frequenzen sind die Terzpegel aufgrund der Frequenzgänge reduziert.

Für die Messungen in UG 1 bis UG 4 wurden jeweils die Zeiten mit den kleinsten lokalen Windstärken berücksichtigt, der verbleibende Einfluss durch lokalen Wind aber nicht (z.B. durch Extrapolation) herausgerechnet. Dadurch können bei kleinen Frequenzen Terzpegel um 1 bis 5 dB erhöht sein.

5.6.4 Bewertung der Terzspektren

In allen Fällen liegen die Terzspektren im Infraschallbereich deutlich unter der Hörschwelle.

Erst bei Frequenzen oberhalb des Infraschallbereichs, also im Bereich des Hörschalls, wird die Hörschwelle überschritten.

5.7 Einordnung der Ergebnisse

5.7.1 Technische Aspekte der Messung

Während es für Hörschall weitgehend klar geregelt ist, wie und mit welcher Messtechnik eine Immissionsmessung durchzuführen ist (TA Lärm (1998), DIN EN 61672-1 (2014)), sind bei der Messung von Infraschall grundlegende Fragen offen.

Für das Mikrofon ist unklar, welche technischen Anforderungen erfüllt werden müssen. Wenn das Mikrofon einen bekannten Frequenzgang hat, dann ist unklar, ob und wie dieser bei der Angabe der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Für Messungen auf einer Bodenplatte spricht, dass dort der Einfluss von Wind kleiner ist als auf einem Stativ. Für eine Messung auf einem Stativ spricht, dass dies eher der Lage eines menschlichen Ohres entsprechen könnte, und eher den Anforderungen der TA Lärm entsprechen würde.

In dieser Studie wurde mit Hilfe des Vergleichs zeitgleicher Messungen mit zwei unterschiedlichen Mikrofonen auf Stativ und auf Bodenplatte ein Vertrauensbereich bestimmt.

5.7.2 Hörschwellen und die Einordnung der Ergebnisse

Wenn es um die Einordnung von Pegeln geht, dann gilt in Deutschland die von der TA-Lärm genannte DIN 45680 (1997) und die darin als Hörschwelle bezeichnete Kurve. Allerdings reicht diese gar nicht bis zu den mit WEA verbundenen tiefen Frequenzen hinab.

Eine Zusammenfassung von wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit Kurven für Wahrnehmungsschwellen findet sich bei Møller und Pedersen (2004). In Müller-BBM (2015) sind neben den Ergebnissen von Hörschwellenuntersuchungen auch die Methoden der Studien aufgeführt.

Besonders bei den sehr tiefen Frequenzen ist die Studienlage zu Wahrnehmungsschwellen dünn. Das hängt auch damit zusammen, dass es nicht trivial ist, ein Signal mit hohem Pegel und sauberer Sinusform bei sehr tiefen Frequenzen so zu erzeugen, dass es Probanden unter kontrollierten Bedingungen vorgespielt werden kann.

Ein Beispiel einer Studie, in der Signale bei sehr tiefen Frequenzen erzeugt wurden, ist die UBA-Studie „Lärmwirkungen von Infraschallimmissionen“ (Umweltbundesamt (2020)). Hier wurde

z.B. bei 2,5 Hz ein Signal mit 105 dB erzeugt, und von einem Großteil der Probanden wahrgenommen.

Wenn nicht ausdrücklich anders erklärt, dann ist mit Hörschwelle immer die mittlere Hörschwelle gemeint. Also der Pegel, ab dem die Hälfte der Personen das Geräusch hören (oder wahrnehmen) kann. Aber auch unterhalb der mittleren Hörschwelle können unter Umständen einzelne Personen das Geräusch wahrnehmen. Wie viele das sind, hängt von der Verteilung der individuellen Hörschwellen und dem Abstand vom Pegel des Geräuschs und der mittleren Hörschwelle ab.

Bei Kurakata, Mizunami (2008) (siehe auch Müller-BBM (2015)) finden sich Verteilungen über individuelle Hörschwellen für 10 Hz und 20 Hz. Für eine Aussage, wie viel Prozent der Menschen in der Umgebung vielleicht doch Infraschall wahrnehmen können, kann versucht werden, die Verteilung über individuelle Hörschwellen zu berücksichtigen. Für Frequenzen im Bereich 1 Hz gibt es keine belastbaren Studien zur Verteilung individueller Hörschwellen, für 10 Hz und 20 Hz finden sich bei Kurakata, Mizunami (2008) Daten. Bei einem Pegel 10 dB unter der Hörschwelle können ca. 5% das Geräusch wahrnehmen.

Wenn die Verteilungsannahmen von Kurakata, Mizunami (2008) auf tiefere Frequenzen übertragbar sind, und die Annahme einer Normalverteilung auch bei 30 dB Abstand zur Hörschwelle noch gilt, dann wäre bei solchen Pegeln nicht mehr zu erwarten, dass Menschen das Geräusch wahrnehmen können.

Die in dieser Studie gemessenen Pegel liegen für ungünstige Situationen in diesem Bereich, mit einem Vertrauensbereich zwischen 10 und 30 dB unterhalb der Literaturhörschwellen. Je nachdem wie die wahren Schalldrücke aussehen, könnten bis zu 5% den Infraschall wahrnehmen, oder praktisch niemand.

Neben der Hörschwelle gibt es eine unbekannte Grenze, ab der sich Infraschall physiologisch auswirken kann. Wie weit diese Grenze unterhalb der Hörschwelle liegt, wie dies individuell verteilt ist, und ob es einen Unterschied macht, wie lange eine Person dem Infraschall ausgesetzt ist, ist nicht ausreichend bekannt, um die Bedeutung von Infraschallimmissionen 10 oder 20 dB unterhalb der Literatur-Hörschwellen einzuordnen.

5.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

In allen Untersuchungsgebieten wurde durch WEA verursachter Infraschall nachgewiesen. In Einzelfällen ist der Infraschall deutlich anhand der Linienstruktur den WEA zuzuordnen. Statistisch ist der Anstieg der Pegel mit der Last der WEA nachgewiesen.

Die durch die WEA verursachten Pegel für den Infraschallbereich liegen alle unter den Hörschwellen der Literatur. Auch die Oberkanten der Vertrauensbereiche für die Pegel liegen unter den Hörschwellen.

6 Belästigungsbefragung und –auswertung

6.1 Befragungskonzept

Die Belästigungsbefragungen wurden im Wohnumfeld aller fünf Untersuchungsgebiete, an denen die Langzeitmessungen stattfanden, im Umkreis von bis zu 3 km zu den Windenergieanlagen durchgeführt. Die Befragungen erfolgten jeweils nach Abschluss der Messungen. Insgesamt gelang es 468 Personen in den Untersuchungsgebieten zu befragen. Von diesen Personen wurden insgesamt 150 im UG 1 erfasst, 108 im UG 2, 95 im UG 3, 45 im UG 4 und die übrigen 70 im UG 5. Von fünf Personen konnten die Beurteilungspegel nicht bestimmt werden, da ihre Geokoordinaten nicht bekannt waren, so dass insgesamt von 463 Personen Akustik- und Befragungsdaten für die Expositions-Wirkungs-Auswertungen vorliegen.

An jedem Standort fanden Telefon- bzw. (optional) Onlinebefragungen zur Wohn- und Lebenssituation im Umfeld der Windenergieanlagen und zur Beeinträchtigung durch Windenergieanlagen-Lärm statt („Hauptbefragung“), gefolgt von vereinzelt persönlichen bzw. telefonischen Vertiefungsinterviews („Vertiefungsbefragung“) einer Teilgruppe der an der Hauptbefragung teilnehmenden Personen, in denen detailliertere, offene Fragen zur Wahrnehmung der Windenergieanlagen-Geräusche, insbesondere zur Amplitudenmodulation gestellt wurden.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Inhalte der verwendeten Fragebögen (Abschnitt), gefolgt von der Durchführungsmethodik 6.3 und den Ergebnissen (Abschnitte 6.4 und 6.4.14). Die Diskussion der Befragungsergebnisse erfolgt im Abschnitt 6.5..

6.2 Befragungsinhalte

6.2.1 Fragebogen der Hauptbefragung

Für die Belästigungsbefragung wurde ein Fragebogen mit insgesamt 95 Fragen ausgearbeitet. Der vollständige Fragebogen ist in Anhang D.1 D.1 zu finden. Er ist in 10 thematisch gegliederte Blöcke (A-J) mit den folgenden Inhalten unterteilt:

- Block A: Gegenwärtiges Wohnumfeld („Häusliche Wohnsituation“), sieben Fragen (Items 1-7)
- Block B: Belästigung durch Umgebungslärm in den letzten 12 Monaten, acht Fragen (Items 8-15)
- Block C: Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsgeräuschen, fünf Fragen (Items 16-20)
- Block D: Gedanken, Gefühle während der letzten Wochen, zehn Fragen (Items 21-30)
- Block E: Folgen des Lärms von Windenergieanlagen, zehn Fragen (Items 31-40)
- Block F: Einstellung („Meinung“) zu Windenergieanlagen, 21 Fragen (Items 41-61)
 - davon:
 - Einstellung zu Windenergieanlagen allgemein: Zwölf Fragen (Items 41-52)
 - Visuelle und sonstige Belästigung: Fünf Fragen (Items 53-57)
 - Aktivitäten gegen Windenergieanlagen-Lärm bzw. Verbindung zu Windenergieanlagen: Vier Fragen (Items 58-61)
- Block G: Möglichkeiten Entwicklung/ Veränderung seit Errichtung der Windenergieanlagen in Ihrer Wohnumgebung: Sechs Fragen (Items 62-67)

Block H: Beschreibung der Geräusche von Windenergieanlagen: Zehn Fragen (Items 68-78)

Block I: Lüftungsgewohnheiten, Fensterart, ruhiger Raum: Sieben Fragen (Items 79-85)

Block J: Angaben zur Person: Elf Fragen (Items 86-96)

Neben diesen Items wurden außerdem an jedem Standort Teilnehmende, die den Fragebogen vollständig bearbeitet hatten gebeten an einem vertiefenden Interview teilzunehmen.

Ferner wurden, um eine eventuelle Änderung der Gesamtsituation aufgrund Corona insbesondere auch einer geänderten Lärmexposition im Alltag (bspw. durch Homeoffice, Kurzarbeit oder zusätzlich freie Tage zur Kinder-Notbetreuung zuhause) Rechnung zu tragen der Fragebogen ab dem dritten Untersuchungsgebiet um zwei weitere Items erweitert, die speziell auf die psychischen Auswirkungen der Pandemie und Ihrer Begleiterscheinungen abzielten, sowie auf etwaige seit Pandemiebeginn eingetretenen Geräuschänderungen in der Wohnumgebung .

6.2.2 Befragungsinhalte der vertiefenden Befragung

Die qualitative Befragung im Anschluss der Hauptbefragung diente der vertiefenden Untersuchung von den Einstellungen und Wahrnehmungen der Anwohnenden bzgl. Windenergieanlagen allgemein und speziell in Wohngebieten, dem Einfluss der Windenergieanlagen auf ihr Wohngebiet und ihren Alltag sowie einer genauen Betrachtung jener Charakteristika der Windenergieanlagen und –Geräusche, die Anwohnende als störend empfinden.

Für die Befragung wurde ein Leitfaden entwickelt, der die folgenden Themen abdeckte:

- ▶ Einstellungen zu Windenergieanlagen (persönlicher Bezug, Berührungspunkte zur Windenergie)
- ▶ Positive und negative Auswirkungen von Windenergieanlagen in der Nähe von Wohngebieten
- ▶ Änderungen durch Bau der Windenergieanlagen
- ▶ Begleiterscheinungen
- ▶ Wahrnehmung von und Störung durch Windenergieanlagen-Geräusche
- ▶ Beschreibung der Geräuschcharakteristika
- ▶ Aktivität in Bürgerinitiative/Vereinigung bzgl. Windenergie

Der Leitfaden für die qualitative Befragung findet sich in Anhang D.2.

6.3 Methodik

6.3.1 Methodik der Hauptbefragung

Im Umkreis von bis zu 3 km um die Windenergieanlagen (bei mehreren zusammenhängenden Windenergieanlagen galt die Distanz bezogen auf die nächstgelegene Windenergieanlage) wurden alle Wohngebäude ausgewählt. Auf Basis der Einwohnendenmeldedaten aller in den ausgewählten Wohngebäuden lebenden Erwachsenen wurde eine Zufallsstichprobe gezogen und die so ausgewählten Personen in einem Anschreiben kontaktiert, über Zweck, Inhalte und

Beteiligte der Befragung (Forschungsnehmende, Auftraggebende) sowie über den Datenschutz informiert und um Teilnahme gebeten. Die angeschriebenen Personen hatten die Möglichkeit sich telefonisch oder online befragen zu lassen wobei für die Onlinebefragung jede Person individuelle Zugangsdaten zum Fragebogen erhielt.

Die Erhebungen wurden nacheinander in den Untersuchungsgebieten durchgeführt. Das erste Untersuchungsgebiet durchlief die Erhebungsphase November 2018 und Februar 2019, das letzte Untersuchungsgebiet zwischen Januar und Februar 2021. Da es über die Durchführung des Projektes zu mehreren Vollschießungen („Lockdowns“) einzelner Wirtschafts- und Gesellschaftszweige kam, die mit bedeutenden Veränderungen des öffentlichen Lebens assoziiert waren, wurde zwischen April 2020 und Oktober 2020 die Erhebung zunächst unterbrochen um die Erhebungsergebnisse von den geänderten Bedingungen unberührt zu lassen. Nachdem sich spätestens im Oktober 2020 abzeichnete, dass die Maßnahmen von längerer, schwer abschätzbarer Dauer sein werden, wurden die Befragungen trotz der anhaltenden und wiederkehrenden Schließungen fortgeführt. Als Reaktion auf die veränderten Bedingungen wurden auf die Corona-Pandemie bezogene Fragen ergänzt. Ebenfalls wurden die im Untersuchungsgebiete 1 und 2 durchgeführten Interviews nicht mehr persönlich, sondern telefonisch durchgeführt, was dazu führte, dass der Teil der qualitativen Vertiefungsinterviews, in denen den befragten Personen Geräusche vorgespielt wurden an den Standorten 3 bis 5 entfiel.

6.3.2 Methodik der Vertiefungsbefragung

Teilnehmende für die qualitativen Befragungen wurden im Rahmen der Hauptstudie rekrutiert. Hier wurden Teilnehmende gefragt, ob sie weiterhin Interesse an einer Teilnahme an einer vertiefenden qualitativen Befragung haben. Sie wurden gebeten in dem Falle eine Telefonnummer oder E-Mail-Adresse anzugeben, unter der sie zu erreichen waren. Eine Zufallsauswahl der interessierten Personen wurde anschließend kontaktiert und um Teilnahme gebeten. In den ersten zwei Standorten wurde ein Termin für die Hörversuch und die qualitativen Befragungen am selben Tag vereinbart, um die Teilnahme so angenehm und unkompliziert wie möglich zu gestalten. Hier kam es auch vor, dass weitere Personen aus dem Haushalt der ursprünglich kontaktierten Person bei dem Termin erschienen und ebenfalls an der Befragung teilnahmen.

An den Standorten 1 und 2 wurden die qualitativen Befragungen vor Ort durchgeführt. Aufgrund der Corona-Pandemie und den damit einhergegangenen Beschränkungen und Maßnahmen wurde die qualitative Befragung an den Standorten 3, 4 und 5 telefonisch durchgeführt. Die Befragungen fanden im Sommer 2019, im Herbst 2020 und im Frühling 2021 statt.

Die Interviews wurden mit Einwilligung der Teilnehmenden aufgezeichnet und anschließend transkribiert, um die Auswertung zu erleichtern. Die Transkription erfolgte nach Kuckartz (2012). Eine Person stimmte der Tonaufzeichnung nicht zu, daher wurden hier detaillierte Notizen von der Interviewerin gemacht. Nennungen von Namen, Straßen oder Orten, die eine Identifizierung der Teilnehmenden ermöglichen könnten, wurden entfernt (also z. B. aus „Hagen“ wurde „[Stadt]“). Unverständliche Satzteile und Wörter wurden durch „[unv.]“ markiert.

Die Kodierung erfolgte in Anlehnung an Mayrings qualitativer Inhaltsanalyse (2015). Die einzelnen Fragen bildeten die Oberkategorien und wurden anhand der Aussagen induktiv mit Unterkategorien aufgefüllt. Mehrfachnennungen wurden nicht erfasst, jedoch konnte eine Aussage mehreren Kategorien zugeordnet werden. Zur Kodierung und Auswertung wurde die Software MAXQDA genutzt.

6.3.3 Methodik der Schallimmissionsprognose

Für die Analysen der Expositions-Wirkungsbeziehungen wurden Schallimmissionsprognosen bezogen auf die Wohngebäude der befragten Personen durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten in Form einer detaillierten Ausbreitungsrechnung entsprechend den LAI-Hinweisen vom 30.06.2016 LAI(2016) gemäß den Vorgaben der „Dokumentation zur Schallausbreitung – Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen, Fassung 2015-05.1“ NALS (2015). In die Berechnung gingen die Oktavbandschallleistungsspektren des jeweiligen Genehmigungsverfahrens ein. Lagen diese nicht vor, wurden Vermessungsberichte des jeweiligen Anlagentyps verwendet. Das Geländemodell wurde für die komplexen Standorte digital nachgebildet, Gebäude fanden keine Berücksichtigung. Die Berechnungen erfolgten mit dem Programm Soundplan (Version 8.2).

6.4 Ergebnisse der Hauptbefragung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der statistischen Analysen der Belästigungsbefragung in den Untersuchungsgebieten dargestellt und die wesentlichen Ergebnisse vorgestellt. Weitere detaillierte Itemstatistiken zu den abgefragten Inhalten sind im Anhang D.3 und D.4 zu finden.

6.4.1 Ergebnisse Block J: Angaben zur Person

Da im letzten Block des Fragebogens (J: Angaben zur Person) die üblichen soziodemographischen Merkmale und Kennziffern abgefragt wurden, werden die Ergebnisse dieses Blocks zuerst berichtet, anschließend werden die Ergebnisse der weiteren Items chronologisch von Block A bis Block I analysiert und besprochen.

Insgesamt gelang es 468 Personen in den Untersuchungsgebieten zu befragen. Von diesen Personen wurden insgesamt 150 in Untersuchungsgebiet 1 erfasst, 108 in Untersuchungsgebiet 2, 95 in Untersuchungsgebiet 3, 45 in Untersuchungsgebiet 4 und die übrigen 70 im Gebiet 5. Alle teilnehmenden Personen machten freiwillig Angaben zu Ihrem Geschlecht: 243 Frauen und 225 Männer sind in der Gesamtstichprobe vorhanden. Berechnet auf den Zeitpunkt der Erhebung in den einzelnen Untersuchungsgebieten lag das Alter der befragten Personen im Mittel bei 59,38 Jahren (SW = 13,74 Jahre). Die jüngsten Teilnehmenden waren 19 Jahre alt, die ältesten 91. Die Jahresangabe musste vor der Auswertung umfangreich bereinigt werden, näheres zu diesem Prozedere wird in Abschnitt 6.4.2 erläutert.

Insgesamt 22 Personen haben ein Hörgerät, 445 verneinten dies. Eine Person wollte dazu keine Angabe machen. 325 Personen gaben an keine Hörschwierigkeiten zu haben, 109 haben nur leichte Schwierigkeiten, 25 große und fünf gaben an gar nicht hören zu können. Drei gaben an dies nicht zu wissen.

6.4.2 Ergebnisse Block A: Gegenwärtiges Wohnumfeld („Häusliche Wohnsituation“)

Zunächst wurde das Jahr des Einzugs in die gegenwärtige Behausung der Teilnehmenden abgefragt. Hier kam es zu zum Teil unschlüssigen Antworten. Erwartet wurde eine Antwort im Format JJJJ. Es waren allerdings auch zweistellige Eingaben in den Feldern. Insgesamt sechs Personen wurden daher pauschal bei der Analyse ausgeschlossen. Obwohl es plausibel klingen mag, dass bspw. der Wert “16” das Jahr 2016 als Jahr des Einzugs beschreiben soll, ist dies lediglich geraten. Abzüglich einiger “weiß nicht” Angaben verblieben noch 419 Angaben zur Analyse.

Nach einer kurzen Plausibilitätskontrolle wurde so der kleinste Wert für das Einzugsjahr auf 1933 gesetzt, der späteste Einzug erfolgte 2019. Die Wohndauer betrug somit zum Zeitpunkt der Auswertung mindestens zwei und maximal 88 Jahre.

Die Zufriedenheit mit den Wohngebäuden und der Wohnumgebung war insgesamt in allen Untersuchungsgebieten gut. Bei den Angaben zur Zufriedenheit mit der Wohnumgebung waren nur 13 (2,78%) Personen nicht zufrieden, neun (1,93%) waren wenig zufrieden 45 (9,64%) gaben an mittelmäßig zufrieden zu sein. Alle weiteren 403 antwortenden Personen waren ziemlich oder sogar sehr zufrieden mit ihrer Wohnumgebung (86,39%). Ähnlich verhielt es sich bei der Zufriedenheit mit dem eigenen Wohnhaus. 292 (62,8 %) waren sehr zufrieden, 135 (29,03%) ziemlich zufrieden nur insgesamt 38 Personen (8,17%) waren nicht bis mittelmäßig mit ihrem Haus oder ihrer Wohnung zufrieden.

Insgesamt 397 (85,75%) Teilnehmende wohnten in freistehenden Einfamilienhäusern, eine befragte Person (0,22%) wohnte in einem Reihenendhaus, vier (0,86%) wohnten in Reihemittelhäusern und 31(6,7%) in Doppelhaushälften. 30 (6,48%) der Befragten bewohnten Wohnungen in mehrstöckigen Mehrfamilienhäusern, zehn davon wohnten im ersten Stockwerk, 14 im zweiten und drei im dritten, eine Angabe fehlte. Die Mehrfamilienhäuser hatten zwischen einer und vier bewohnbare Etagen. 427 Teilnehmende gaben an die bewohnte Immobilie im Eigentum zu haben, 31 wohnten zur Miete, fünf wollten sich dazu nicht äußern.

6.4.3 Ergebnisse Block B: Belästigung durch Umgebungslärm in den letzten 12 Monaten

Im Block B wurde die Belästigung durch Umgebungsgeräusche abgefragt. Die Intensität der Lärmbelästigung wurde auf der fünfstufigen ICBEN-Verbalskala erfasst mit den Werten 1 = überhaupt nicht, 2 = etwas, 3 = mittelmäßig, 4 = stark, 5 = äußerst. Neben der gezielten Abfrage von Belästigung durch Windenergieanlagen insgesamt, im Haus und außerhalb des Hauses (siehe Tabelle 16) wurde auch die Belästigung durch Straßenverkehrslärm abgefragt. Der Mittelwert der Straßenverkehrslärmbelästigung in der Gesamtstichprobe liegt bei 1,78 (SW = 1,06). Aus Tabelle 16 geht hervor, dass der Mittelwert für die Gesamtbelästigung durch Lärm von Windenergieanlagen mit 1,75 (SW = 1,24) in etwa gleich hoch wie der Mittelwert der Straßenverkehrsbelästigung ist. Die Ergebnisse in Tabelle 16 zeigen weiterhin, dass in den Untersuchungsgebieten 4 und 5 die Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen insgesamt, im und außerhalb des Hauses im Durchschnitt höher ist als in den übrigen drei Gebieten. Die höhere Lärmbelästigung in diesen Gebieten korrespondiert auch mit den etwas höheren durchschnittlichen Beurteilungspegeln im Vergleich zu den anderen Untersuchungsgebieten (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 16: Belästigung durch Windenergieanlagen

Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen	Untersuchungsgebiet	Anzahl gültiger Werte	M	SW
Insgesamt	Gesamt	468	1,75	1,24
	1	150	1,37	0,93
	2	108	1,62	1,12
	3	95	1,37	0,8
	4	45	2,29	1,5
	5	70	2,91	1,48
Im Haus/ in der Wohnung	Gesamt	466	1,39	0,88
	1	148	1,17	0,56
	2	108	1,35	0,87
	3	95	1,2	0,56
	4	45	1,69	1,24
	5	70	2,01	1,15
Außerhalb des Hauses (Garten, Terrasse, Balkon)	Gesamt	467	1,75	1,23
	1	149	1,32	0,85
	2	108	1,6	1,08
	3	95	1,53	0,89
	4	45	2,22	1,51
	5	70	2,91	1,50

Belästigungsskala: 1 = überhaupt nicht; 2 = etwas; 3 = mittelmäßig; 4 = stark; 5 = äußerst

M = Mittelwert; SW = Standardabweichung

Die befragten Personen konnten außerdem weitere Lärmquellen frei nennen. Es gab dabei insgesamt 172 Nennungen verschiedener Lärmquellen von 92 Personen. 92 Personen machten mindestens eine Angabe zu einer weiteren Lärmquelle, 60 davon nannten zwei, und 20 der 92 nannten drei. Eine detaillierte qualitative Inhaltsanalyse übersteigt an diesem Punkt den Umfang dieses Berichtes, daher wurden semantisch ähnliche Wörter (z. B. „Flugzeug“ und „Hubschrauber“) zusammengefasst und die Häufigkeiten der Nennungen gezählt (Tabelle 17).

Die Mittelwerte der Belästigung gegenüber sonstigen Lärmquellen liegen noch einmal deutlich über denen der Windenergieanlagen, sowie des Straßenverkehrs mit Mittelwerten zwischen 3,15 (M = 0,98) und 3,44 (M = 1,13). Beispielhaft sind die zehn häufigsten Nennungen in Tabelle 17 zu semantisch ähnlichen Kategorien zusammengefasst. Hieraus geht hervor, dass die meisten Teilnehmenden sich von Fluglärm durch Flugzeuge und Hubschrauber belästigt fühlen. Auch Lärm durch landwirtschaftliche Geräte, Verkehr und Arbeit scheint für einige Anwohnende der in den insgesamt sehr ländlich gelegenen Untersuchungsgebieten ein relevanter Störfaktor zu sein.

Tabelle 17: Häufigste Nennungen sonstiger Lärmquellen

Sonstige Lärmquelle	Anzahl der Nennungen
Landwirtschaftliche Quelle	16
Fahrzeuge	9
Flugzeuge, Fluglärm, Hubschrauber	20
Rasenmäher	6
Straßenverkehr	5
Nachbarn	5
Verkehr	5

6.4.4 Ergebnisse Block C: Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsgeräuschen

Auch zur Abfrage der Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsgeräuschen (Lärmempfindlichkeit insbesondere bezogen auf tiefe Frequenzen) wurde die in Abschnitt 6.4.3 beschriebene fünf-stufige ICBEN-Skala verwendet. Hier wurde die Empfindlichkeit gegenüber fünf verschiedenen Umgebungsgeräuschen abgefragt: Bassgeräuschen, polternden Geräuschen (z. B. Waschmaschinen), Musik mit Bass, monotones Summen, Geräuschen allgemein.

Die Analyse ergab, dass die selbsteingeschätzte Empfindlichkeit der Teilnehmenden gegenüber den abgefragten Geräuschen recht einheitlich war. Am niedrigsten lag diese bei polternden Geräuschen mit einem Mittelwert von 1,73 (SW = 1,73), am höchsten schnitt monotones Summen mit einem Mittelwert von 2,16 (SW = 1,18) ab.

Die Reihenmittelwerte der Items ergeben den Score „Lärmempfindlichkeit“. In der Gesamtstichprobe liegt der Mittelwert bei 2,04 (SW = 0,82). Die Lärmempfindlichkeit unterscheidet sich zwischen den Untersuchungsgebieten zwar statistisch signifikant ($F[4;440] = 3,19; p = 0,013$) aber in absoluten Werten nur marginal mit geringer Effektstärke ($\eta^2_{\text{part}} = 0,03$): Die Mittelwerte der Lärmempfindlichkeit liegen zwischen $M = 1,9$ (SW = 0,72; UG 2) und $M = 2,2$, SW = 0,85; UG 1).

6.4.5 Ergebnisse Block D: Gedanken, Gefühle während der letzten Wochen (*Perceived Stress Scale, PSS-10*)

Im Block D wurde der wahrgenommene psychische Stress mittels der Perceived Stress Scale (PSS-10; Cohen & Williamson, 1988) in der deutschen Fassung von Klein et al. (2016) erhoben. Die Skala enthält insgesamt zehn Items, die „Gedanken und Gefühle“ zu Stresssituationen in den letzten vier Wochen abfragten. Ein grundlegender Ausgangspunkt bei der Annahme gesundheitlicher Wirkungen von Umgebungslärm ist, dass dieser akut stört und Stress auslöst, der bei langjähriger Exposition weitere physische und psychische Gesundheitswirkungen haben kann. Die Lärmbelastigung wird hierbei als eine psychische Stressreaktion verstanden. Für diese Studie wurden Fragen zum wahrgenommenen Stress aufgenommen, die selbst in der Fragenformulierung keinen Bezug zur Windenergieanlagen oder zum Lärm enthält. Es sollte damit geprüft werden, ob der wahrgenommene (allgemeine) Stress bei höherer Windenergieanlagen-Geräuschexposition im höheren Maße ausfällt. Mindestens wurde angenommen, dass selbst wenn der allgemeine wahrgenommene Stress keinen Bezug zu den Windenergieanlagen-Geräuschpegeln hat, dieser dennoch moderierend auf die Beziehung zwischen Windenergieanlagen-Geräuschexposition und Lärmbelastigung einwirkt, d.h. diejenigen Personen, die ihren Antworten nach einen höheren Grad an psychischem Stress

haben, reagieren vulnerabler auf den Windenergieanlagen-Lärm und geben eine höhere Lärmbelastigung an.

Während der Durchführung der Studie hatten die Maßnahmen zur Eindämmung des Infektionsgeschehens durch die COVID-19 Pandemie in ganz Deutschland schwerwiegende Einschnitte in das Alltagsleben und -erleben der aller in Deutschland lebenden BürgerInnen. Aus diesem Grund wurde eine weitere Frage in diesen Block im Anschluss an die PSS-10-Items mit aufgenommen, die direkt nach der ursprünglich letzten Frage gestellt wurde. Das Item lautet „Wie stark hängen Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats mit der Corona-Pandemie zusammen?“.

Ab UG3 wurde diese Frage zusätzlich gestellt, daher ist die Anzahl der Antworten geringer als bei den restlichen Items in diesem Block (N = 205).

Als Antwortoptionen wurde ebenfalls eine fünfstufige Skala vorgegeben auf der die Teilnehmenden die Häufigkeit der erlebten Gefühle und Gedanken in den letzten vier Wochen einschätzen sollten (1 = nie, 2 = fast nie, 3 = manchmal, 4 = ziemlich oft, 5 = sehr oft).

Tabelle 18: Mittelwerte und Standardabweichungen der Items der Perceived Stress Skala PSS-10 aus Block D

Frage	N	M	SW
1. Wie oft wurden Sie im letzten Monat von unerwarteten Ereignissen überrascht?	454	2,31	1,07
2. Wie oft hatten Sie im letzten Monat das Gefühl, dass es Ihnen nicht möglich ist, wichtige Dinge in Ihrem Leben zu kontrollieren?	454	2,10	1,03
3. Wie oft haben Sie sich im letzten Monat nervös oder "gestresst" gefühlt?	457	2,58	1,22
4. Wie oft haben Sie sich im letzten Monat zuversichtlich gefühlt, dass Sie in der Lage sind, persönliche Probleme zu regeln?	452	3,88	0,98
5. Wie oft hatten Sie im letzten Monat das Gefühl, dass die Dinge in Ihrem Leben genauso laufen, wie sie es sollen?	447	3,45	0,97
6. Wie oft hatten Sie im letzten Monat das Gefühl, dass Sie mit anfallenden Aufgaben nicht zu Rande kommen?	455	2,09	0,98
7. Wie oft waren Sie in der Lage mit Widrigkeiten des Lebens kontrolliert umzugehen?	446	3,81	1,00
8. Wie oft fühlten sie sich als Herr der Lage?	449	4,07	0,79
9. Wie oft haben Sie sich über Dinge geärgert, die außerhalb Ihrer Kontrolle lagen?	452	2,93	1,07
10. Wie oft hatten Sie das Gefühl, dass sich Schwierigkeiten so sehr auf türmten, dass sie Ihnen über den Kopf wachsen?	454	1,96	0,94
<i>Zusatzfrage ab Untersuchungsgebiet 3 (nicht zum PSS-10 gehörend)</i>			
Wie stark hängen Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats mit der Corona-Pandemie zusammen?	205	3,20	1,16

Ratingskala PSS-10: 1 = nie, 2 = fast nie, 3 = manchmal, 4 = ziemlich oft, 5 = sehr oft; Ratingskala Corona-Frage: 1 = nicht, 2 = wenig, 3 = mittelmäßig, 4 = ziemlich, 5 = sehr; M = Mittelwert; SW = Standardabweichung

Der Zusammenhang der „Gefühle und Gedanken zur Corona-Pandemie“ in den Untersuchungsgebieten drei bis fünf ist recht stark und liegt mit einem Mittelwert von 3,20 (SW = 1,16)

deutlich über dem theoretischen Mittelwert der Skala von 2,5. Insgesamt betrachtet fallen die Beurteilungen der befragten Personen eher positiv aus. Antworten auf positiv formulierte Items sind größtenteils in den oberen Bereichen der Skalen zu finden, negativ konnotierte Fragen werden eher seltener bejaht. Die PSS Skala erhebt den Grad des wahrgenommenen psychischen Stresses nicht als ein eindimensionales Konzept, sondern erfasst den psychischen Stress untergliedert in zwei Subdimensionen bzw. zwei Faktoren: Faktor „Hilflosigkeit“ (PSS-Fragen 1, 2, 3, 6, 9 und 10) und Faktor „Selbstwirksamkeit“ (PSS-Fragen 4, 5, 7 und 8). Für die Quantifizierung dieser beiden PSS-Faktoren wurden zu den Ratingwerten Mittelwertscores gebildet, das heißt jeder PSS-Faktor kann weiterhin anhand der verwendeten Ratingskala interpretiert werden. Hierbei bedeuten hohe Werte jeweils eine hohe Ausprägung der beiden Faktoren, d.h. hohe Hilflosigkeit oder hohe Selbstwirksamkeit. In der Gesamtstichprobe liegt der Mittelwert der Hilflosigkeit bei 2,33 (SW = 0,71). Die Faktorwerte der Hilflosigkeit liegen in den einzelnen Untersuchungsgebieten insgesamt nah zusammen: der niedrigste Wert wurde für UG4 errechnet (M = 2,17, SW = 0,84), der höchste liegt mit einem Mittelwert von 2,51 (SW = 0,66) in Gebiet fünf nur knapp darüber.

Anders verhält es sich bei dem Score zur Selbstwirksamkeit: ein Mittelwert in der Gesamtstichprobe von 3,8 (SW = 0,72) liegt deutlich über dem Skalenmittelwert. Ähnlich dicht beisammen wie vorher liegen die einzelnen Gebiete: den geringsten Wert erzielt das UG3 mit 3,41 (SW = 0,68), den höchsten wiederum in UG4 (MW = 3,94, SW = 0,59).

Anhand der beiden Skalen kann überprüft werden, ob höher exponierte teilnehmende Personen ein höheres Stressempfinden haben als niedrig exponierte, was auf Basis von Ergebnissen von Hübner et al. (2019) zu erwarten gewesen wäre. Dies konnte in dieser Studie allerdings nicht gezeigt werden, die Korrelationen zwischen den Geräuschpegeln L_{rT} und den beiden PSS-Mittelwertscores liegen nahe bei Null ($r_{\text{Selbstwirksamkeit, } L_{rT}} = -0,09$, $r_{\text{Hilflosigkeit, } L_{rT}} = 0,04$).

Allerdings korreliert Hilflosigkeit leicht mit der Windenergieanlagen-Lärmbelästigung (Lärmbelästigung insgesamt: $r = 0,171$; außen $r = 0,184$; innen: $r = 0,178$). Dies kann ein Indiz dafür sein, dass Hilflosigkeit, wie auch Lärmempfindlichkeit eine Art Vulnerabilitätsmaß („Maß für Anfälligkeit“) und ein Moderator für die Lärmbelästigung ist. Diese Hypothese wird später Korrelationsanalysen im Abschnitt 6.4.13 noch einmal näher untersucht werden.

6.4.6 Ergebnisse Block E: Folgen des Lärms von Windenergieanlagen (Aktivitätenstörungen)

Im folgenden Frageblock wurden die Teilnehmenden detailliert nach den Folgen des Lärms von Windenergieanlagen gefragt. Dabei handelt es sich um die Frage von durch Windenergieanlagen-Lärm verursachten Aktivitätenstörungen. Dieser Block setzt sich insgesamt aus zehn Fragen zusammen, die zu drei Scores zusammengefasst werden können. Die deskriptiven Ergebnisse (Mittelwert, Standardabweichung, Anzahl der Nennungen) zu den zusammenfassenden Scores und den dazugehörigen Items zeigt Tabelle 19.

Aus den Items eins, zwei und fünf, Störungen beim Telefonieren, beim Radio hören/ TV schauen und bei Geselligkeit innerhalb der Räumlichkeiten ergibt sich der Score zu Kommunikationsstörungen innen. Dieser liegt mit einem Mittelwert von 1,17 (SW = 0,49) recht niedrig. Den höchsten Wert erreicht der Score im UG5 mit 1,36 (SW = 0,61), am niedrigsten liegt er im Gebiet zwei mit 1,1 (SW = 0,35). Die weiteren Untersuchungsgebiete liegen eng beieinander dazwischen.

Aus den Items drei und vier (Störungen beim Lesen, Nachdenken usw. und Störungen beim Entspannen) wird der Score der Ruhe- und Konzentrationsstörungen gebildet. Auch dieser liegt insgesamt auf einem niedrigen Niveau (M = 1,23, SW = 0,62). Auch hier erreicht der Wert im

UG5 seinen Spitzenwert (M = 1,48, SW = 0,77), der niedrigste Mittelwert (1,17) wurde in UG1 gemessen (SW = 0,61).

Die Items sechs und sieben bilden zusammen den Score zu den „Außenstörungen“ (Störungen bei Aufenthalt und Erholung im Freien, sowie bei Geselligkeit draußen), der die Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen außerhalb der Häuser und Wohnungen der Teilnehmenden abfragte. Auch dieser liegt insgesamt betrachtet auf einem recht niedrigen Niveau, ist aber trotz alledem der höchste aller Scores in diesem Block und erreicht einen Gesamtmittelwert von 1,7 (SW = 1,1). Auch hier geben die Teilnehmenden im UG 5 den mit Abstand höchsten Wert an (M = 2,66, SW = 1,29), wie bereits bei den analysierten Konzentrationsstörungen liegt der Score zu den Außenstörungen im UG 1 am niedrigsten.

Tabelle 19: Mittelwerte und Standardabweichungen der Items zu den Aktivitätenstörungen aus Block E

Frage	N	M	SW
Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen <u>in den letzten 12 Monaten</u> in den folgenden Situationen insgesamt gestört?			
<i>Kommunikationsstörung innen (Mittelwertsscore)</i>	461	1,17	0,49
Bei Unterhaltungen oder beim Telefonieren in der Wohnung/im Haus	462	1,21	0,60
Beim Radio-/Musikhören oder Fernsehen	463	1,15	0,48
Bei häuslicher Geselligkeit oder, wenn Sie Besuch in der Wohnung/im Haus haben	462	1,17	0,52
<i>Ruhestörung innen (Mittelwertsscore)</i>	461	1,23	0,62
Beim Entspannen und der Feierabendruhe in der Wohnung/im Haus	462	1,24	0,67
Beim Lesen, Nachdenken oder Konzentrieren in der Wohnung/im Haus	462	1,21	0,61
<i>Störungen im Außenbereich (Mittelwertsscore)</i>	463	1,69	1,09
Bei Aufenthalt und Erholung im Freien (auf der Terrasse, dem Balkon, im Garten)	463	1,76	1,17
Bei Unterhaltungen/Gespräche im Freien	463	1,62	1,07
<i>Schlafstörungen (Mittelwertsscore)</i>	460	1,28	0,74
Beim Einschlafen	462	1,34	0,83
Nachts, während des Schlafs (bzw. <i>bei Nachtschicht</i> : während der üblichen Schlafenszeit)	462	1,27	0,77
Beim Ausschlafen am Ende der Schlafzeit	461	1,27	0,74

Ratingskala (ICBEN-Skala): 1 = überhaupt nicht, 2 = etwas, 3 = mittelmäßig, 4 = stark, 5 = äußerst; M = Mittelwert; SW = Standardabweichung; N = Anzahl.

Der letzte gebildete Score vereint drei Fragen zu Schlafstörungen (beim Einschlafen, nachts, während des Schlafs und beim Ausschlafen). Dieser liegt mit einem Gesamtmittelwert von 1,29 (SW = 0,75) wieder auf einem niedrigeren Niveau als der Score der Außenstörungen. Wie bereits bei allen anderen Scores ist auch hier die höchste Belästigung in Gebiet fünf gemessen worden (M = 1,71, SW = 1,01), am geringsten prägen sich die Schlafstörungen im dritten untersuchten Gebiet aus (M = 1,14, SW = 0,52).

Wahrgenommene Aktivitätenstörungen durch Lärm gelten als unmittelbare Folgen der Einwirkung von Lärm und als Mediatoren (vermittelnde Einflussgrößen) des Effekts einer Geräuschbelastung auf die Lärmbelästigung. Sie sind damit ein Element des Prozesses der Urteilsbildung zur Lärmbelästigung (u.a. Guski et al., 2017). Entsprechend korrelieren in dieser Studie die Aktivitätenstörungen mit der Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen-geräusche als auch mit dem Beurteilungspegel L_r .

Zur Interpretation der Höhe der Korrelation kann auf die grobe Klassifizierung der Korrelationskoeffizienten hinsichtlich der Effektstärke nach Cohen (1988) zurückgegriffen werden. Produkt-Moment-Korrelation unter einer Höhe von $r = 0.1$ bedeuten keinen Effekt (keinen Zusammenhang), in Höhe von $0,1 \leq r < 0,3$ bedeuten die Koeffizienten einen kleinen Effekt. Koeffizienten im Bereich $0,3 \leq r < 0,5$ bedeuten einen mittleren oder moderaten Effekt und Koeffizienten in Höhe von $r > 0,5$ bedeuten einen großen Effekt bzw. einen hohen Zusammenhang. Diese grobe Einteilung von Korrelationswerten als Maß von Zusammenhängen gilt auch für nachfolgende Darstellungen von Korrelationen.

Die Korrelationskoeffizienten der Aktivitätenstörungen mit dem Beurteilungspegel liegen in Höhe von $0,130 \leq r \leq 0,280$. Insbesondere die berichteten Außenstörungen ($r = 0,280$), wie die Windenergieanlagen-Lärmbelästigung korrelierten in kleiner Effektstärke mit dem Beurteilungspegel L_r (vgl. auch zur Pegel-Belästigungs-Korrelation Abschnitt 6.4.13). Höhere Korrelationen in moderater bis hoher Effektstärke zeigen sich mit Koeffizienten in Höhe von $0,436 \leq r \leq 0,865$ zwischen den Aktivitätenstörungen und der Windenergieanlagen-Lärmbelästigung. Die höchste Korrelation ergibt sich erwartungsgemäß für die berichteten Störungen im Außenbereich und der Windenergieanlagen-Lärmbelästigung mit $r = 0,865$ (Tabelle 20).

Tabelle 20: Korrelation zwischen Beurteilungspegel, WEA-Lärmbelästigung und Aktivitätenstörungen

	Beurteilungs- pegel L_r	WEA- Lärmbelästigung insgesamt	WEA- Lärmbelästigung innen	WEA- Lärmbelästigung außen
Beurteilungspegel L_r	1,000	0,263**	0,219**	0,272**
Kommunikationsstörung innen ¹	0,137**	0,436**	0,547**	0,492**
Ruhe- und Konzentrationsstörung innen ¹	0,130**	0,467**	0,619**	0,535**
Außenstörungen ¹	0,280**	0,834**	0,676**	0,865**
Schlafstörungen ¹	0,181**	0,631**	0,722**	0,673**

¹Zusammenfassender Score aus mehreren Items (Einzelfragen); * = $p < .05$; ** = $p < .01$; p = Signifikanzniveau

6.4.7 Ergebnisse Block F: Meinungen zu und Belästigung durch Windenergieanlagen

Block F unterteilt sich in insgesamt drei kleinere Abschnitte mit folgenden Inhalten:

- Einstellung der Teilnehmenden zu Windenergieanlagen allgemein und vor Ort

- ▶ Belästigung durch visuelle Einflüsse ausgehend von Windenergieanlagen
- ▶ Engagement im Zusammenhang mit Windenergie allgemein, Windenergieanlagen und etwaigen Beschäftigungs- und/oder Einkommensverhältnissen im Zusammenhang mit Windenergie.

Die drei Abschnitte des Block F werden im Folgenden einzeln analysiert und beschrieben.

6.4.7.1 Ergebnisse Block F: Einstellung zu Windenergie allgemein und vor Ort

Zunächst wurde anhand von zwölf Einzelfragen (Items) die Einstellung zu verschiedenen Inhalten von Windenergie und Windenergieanlagen abgefragt. Die ersten zehn dieser Items wurden auf einer fünfstufigen Verbalskala beantwortet mit den Stufen 1 = „stimme nicht zu“, 2 = „stimme wenig zu“, 3 = „stimme mittelmäßig zu“, 4 = „stimme ziemlich zu“ und 5 = „stimme sehr zu“. Die verbleibenden zwei Fragen bezogen sich auf die Sichtbarkeit von Windenergieanlagen (vgl. Tabelle 21). Zunächst wurde durch eine einfache „ja/nein“ Abfrage erhoben, ob die Teilnehmenden von ihrem Haus/ ihrer Wohnung aus Windenergieanlagen sehen können, in der zweiten Frage wurden die teilnehmenden Personen gebeten die Anzahl der von ihrem Wohnsitz aus sichtbaren Windenergieanlagen zu schätzen. 369 Teilnehmenden gaben an mindestens eine Windenergieanlagen von ihrem Grundstück aus sehen zu können. Der Mittelwert der von Teilnehmenden angegebenen sichtbaren Anlagen beträgt 10,22 (SW = 20,24), die Spannweite der Werte reicht dabei von einer sichtbaren Anlage bis maximal 180. Ob dies plausibel ist, kann diese Untersuchung nicht aufklären.

Mit dem Ziel, der Beantwortung der Einzelitems zugrunde liegende Einstellungsaspekte (sogenannte Einstellungsdimensionen) zu finden, wurde ein statistisches Verfahren der Datenreduktion, die Faktorenanalyse⁶, angewandt. Die Faktorenanalyse ist ein multivariates statistisches Verfahren, das die Antworten zu den einzelnen Items (Fragen) anhand der Homogenität der Beantwortung zu einem Faktor zusammenfasst. Dies führt zu einer „Dimensionsreduktion“. Aus den vielen Einzelfragen werden so einige wenige Faktoren, die inhaltlich das Gleiche ausdrücken, wie die einzelnen Items. Die so erhaltenen Faktoren müssen inhaltlich interpretiert werden, d.h. es gibt keine festen Vorgaben, wie die Faktoren zu benennen sind. Beispielsweise kann mit Hilfe des Verfahrens der Faktorenanalyse von der Lösung von Rechenaufgaben oder Wissensfragen auf die zugrundeliegende, selbst nicht beobachtbare Dimension „Intelligenz“ geschlossen und diese quantifiziert werden.

Die Anwendung der Faktorenanalyse auf die Einstellungsfragen zur Windenergie ergab eine mögliche Zusammenfassung der Antworten auf die zehn Items zu drei Einstellungsscores.

Die drei gefundenen Scores lassen sich inhaltlich wie folgt beschreiben:

1. Mangelnde Restauration/Erholung
2. Negative Bedeutung der Windenergieanlagen für Wohngegend
3. Positive Bedeutung der Windenergieanlagen für Wohngegend.

Das Item, das die Zustimmung der Teilnehmenden zur Aussage „Windenergieanlagen sind gut für den Umweltschutz“ abfragte, wurde aus der Scorebildung ausgeschlossen, da es in der Faktorenanalyse nicht die Anforderungen erfüllte, die eine Zuordnung zu einem der drei Einstellungsscores erlaubt. Das heißt, dass keiner der drei Einstellungsscores (Faktoren) die Varianz der Beantwortung dieser Frage ausreichend aufklären konnte⁷. Inhaltlich könnte dies damit begründet werden, dass das Kriterium der Umweltfreundlichkeit zu global ist für die hier

⁶ Hauptachsenfaktorenanalyse mit Promax-Rotation und Kaiser Normalisierung

⁷ Das Minimalkriterium einer Faktorladung (Kenngröße des Erklärungsanteil des Faktors an der Itemantwort) von mindestens 0,4 wurde von keinem der Faktoren erfüllt.

abgefragten Inhalte und sich kein direkter Bezug dieser Frage für die teilnehmenden Personen vor Ort ergibt, dies ist allerdings eher eine Vermutung als ein Ergebnis und lässt sich statistisch nicht begründen oder verwerfen.

Tabelle 21 beschreibt die Faktorladungen der einzelnen Items (Fragen) auf den drei extrahierten Faktoren. Die Ladungswerte liegen zwischen -1 und +1 und geben an, wie stark ein Item (eine Frage) durch den jeweiligen Faktor erklärt wird, wobei Werte nahe -1/+1 einen hohen Erklärungsanteil widerspiegeln.

Tabelle 21: Faktorladungen der Items zu Einstellungen zu Windenergieanlagen

Item	Faktorladungen		
	Faktor 1 Mangelnde Restauration	Faktor 2 Negative Konse- quenzen der Wind- energieanlagen für Wohngegend	Faktor 3 Positive Konse- quenzen der Wind- energieanlagen für Wohngegend
Verleidung von Aufenthalten auf den Außenanlagen der Wohngebäude durch Windenergieanlagen	0,836		
Erschwerung der Naherholung durch Windenergieanlagen	0,695		
Streit in Nachbarschaft wegen Windenergieanlagen	0,669		
Störungen durch Schattenwurf innerhalb der Wohnräume	0,552		
Wertminderung der Grundstücke durch Windenergieanlagen Betrieb		0,678	
Förderung der Weiterentwicklung der Region durch Windenergieanlagen		0,703	
Verschandelung des Landschaftsbildes durch Windenergieanlagen		0,556	
Entstehung von Arbeitsplätzen in Region			0,691
Sinken der Stromkosten			0,635
Windenergieanlagen sind gut für den Umweltschutz*	-	-	-

Gesamtvarianzaufklärung: 47%; * Nicht in den Scores enthalten

Entsprechend den Ergebnissen der Faktorenanalyse wurden die Items zu Mittelwert-Scores zusammengerechnet. Für alle Items, die zu Scores zusammengefasst wurden, wurde im Vorfeld die Skalenhomogenität mittels Berechnung des Cronbach Alpha bestimmt. Das heißt, es wurde quantifiziert, in welchem Maße die einzelnen Items zusammen ein gemeinsames Konzept (einen inhaltlich konsistenten, homogenen Score) abbilden. Einzelne Items ergeben dann zusammen ein gemeinsames Konzept, wenn bei der Beantwortung der Einzelfragen ein eindeutiger Trend durch einzelne Personen festgestellt werden kann. Der hierfür berechnete Cronbach Alpha-Wert liegt zwischen 0 und 1, wobei Werte nahe 1 eine hohe interne Konsistenz widerspiegeln.

Der erste so erhaltene Score zur mangelnden Restauration hat einen Mittelwert von 2,08 (SW = 1,01), die Skalenhomogenität ist mit $\alpha = 0,76$ akzeptabel. Hohe Werte bedeuten entsprechend der Ausrichtung der Variablen, die in den Score eingingen, ein hohes Maß an mangelnder Restauration, hohe Werte spiegeln also einen negativen Einfluss der Windenergieanlagen auf das Restaurationserleben der Teilnehmenden wider. In diesem Fall liegt der Score auf einem eher niedrigen Niveau, sodass kein Anlass besteht zu vermuten, dass sich der Betrieb und/ oder die Anwesenheit der Windenergieanlagen negativ auf die Restauration, bzw. die empfundene Erholungsmöglichkeit der befragten Personen im Umland der Windenergieanlagen auswirken. Auf die Untersuchungsgebiete bezogen findet sich der geringste Wert im ersten Untersuchungsgebiet (1,84, SW = 0,97) der höchste wird in Gebiet fünf gemessen (M = 2,76, SW = 1,01).

Der zweite hier zusammengefasste Score setzt sich aus drei Items zusammen, die Wertminderung der Grundstücke, Förderung der Region und Verschandelung des Landschaftsbildes abfragen. Je höher der Wert dieses Scores, desto höher wären die negativen Konsequenzen, die von den Befragungsteilnehmern erwartet werden. Auch hier wurde ein Mittelwertsscore gebildet, dessen Skalenhomogenität mit $\alpha = 0,66$ etwas niedriger liegt, als der Score der mangelnden Restauration, aber trotzdem noch akzeptabel erscheint. Das 95% Konfidenzintervall des Alpha liegt mit Werten von 0,61 (unteres) und 0,72 (oberes) entsprechend akzeptabel. Der Score weist einen Mittelwert von 3,42 (SW = 1,07) auf, was auf einen eher negativen Einfluss der Windenergieanlagen auf die Wohnumgebung der befragten Personen schließen lässt. Es wird deutlich, dass es sich bezüglich der hier betrachteten negativen Konsequenzen um bedeutende Inhalte für die Befragungsteilnehmer handelt. Hier weist das Untersuchungsgebiet drei den geringsten Mittelwert für negative Konsequenzen auf (3,07, SW = 1,14), die höchste Zustimmung zu negativen Auswirkungen ist in Untersuchungsgebiet zwei mit einem Wert von 4,03 (SW = 0,49) gemessen worden.

Schließlich wurde auch der Score zu den positiven Konsequenzen für die Wohngegend durch den Betrieb der Windenergieanlagen in gleicher Weise gebildet. Darin geht eine Frage ein, die erfasst ob Stromkosten durch den Betrieb der Windenergieanlagen sinken und eine weitere, die erfasste ob in der Region Arbeitsplätze durch den Betrieb der Windenergieanlagen geschaffen werden. Eine Skalenhomogenitätsprüfung ergibt mit einem $\alpha = 0,64$ ebenfalls einen Wert, der noch im akzeptablen Bereich liegt. Das 95%-Konfidenzintervall umfasst einen Raum zwischen 0,58 (untere Grenze) und 0,71 (obere Grenze). 355 gültige Werte wurden hier insgesamt erfasst. Mit einem Gesamtmittelwert von 1,85 (SW = 0,99) liegt der Score eher niedrig. Die höchste Zustimmung wird im UG3 gemessen, indem das Mittel aus den hier gültigen 60 Antworten 2,26 (SW = 0,88) beträgt, die geringste Zustimmung wird von den 60 Teilnehmenden in UG5 mit einem Mittelwert von 1,54 (SW = 0,83) angegeben.

Anhand der Scorebildung und -auswertung wird deutlich, dass die Meinung zu den Windenergieanlagen eher negativ als positiv ist. Die Meinung wird bestimmt durch die negativen Inhalte und Konsequenzen, die die Windenergieanlagen vor Ort haben. Die drei durch den Faktor „negative Konsequenzen“ erklärten Items zum beeinträchtigten Landschaftsbild, zur Wertminderung der Grundstücke und zur Förderung der Weiterentwicklung der Region (dieses Item wurde sehr negativ bewertet) werden deutlich höher gewichtet als die positiven Konsequenzen. Dies drückt sich in einem niedrigen Wert für den Faktor „positive Konsequenzen“ mit einer mittleren Zustimmung von $M_{\text{Gesamt}} = 1,85$ und einem fast doppelt so hohem Gesamtmittelwert für negative Konsequenzen ($M_{\text{Gesamt}} = 3,42$) aus, dies gilt nicht nur für die Gesamtstichprobe, sondern auch für jedes einzelne Untersuchungsgebiet.

Es sei hier allerdings auch noch einmal auf die Höhe der Cronbachs α -Werte als Maß für die Homogenität der gebildeten Scores verwiesen. Insbesondere die Scores zu negativen und positiven Konsequenzen haben mit Werten des Cronbach α von 0,66 bei positiven

Konsequenzen und 0,64 für negative Konsequenzen Homogenitätswerte, die an der unteren Grenze einer zufriedenstellenden Homogenität liegen (nach Konvention bei Cronbach α -Werten ab 0,7; Bland & Altman, 1997).

6.4.7.2 Ergebnisse Block F: Visuelle Belästigung durch Windenergieanlagen

In diesem Teil des Fragebogens wurden die Teilnehmenden gefragt, wie sehr sie sich von verschiedenen visuellen Charakteristiken der Windenergieanlagen belästigt fühlen. Im Einzelnen fragten die Items nach der visuellen Belästigung durch Windenergieanlagen ausgehend von ihrem Anblick in der Wohnumgebung, dem Schattenwurf, der Hinderniskennzeichnung, der Drehbewegung der Rotoren und dem Anblick im Landschaftsbild.

Alle fünf Items aus dem Teilabschnitt „visuelle Belästigung“ des Block F: Meinungen zu Windenergieanlagen lassen sich zu einem Score zusammenfassen der entsprechend als „visuelle Belästigung durch Windenergieanlagen“ bezeichnet wird. Die Faktorenanalyse wurde unter den gleichen Voreinstellungen berechnet, wie bereits in Abschnitt 6.4.7.1 beschrieben und klärt einen Gesamtvarianzanteil von 62% auf. Die Skalenhomogenität ist mit einem Cronbach α von 0,93 annähernd perfekt. Im Einzelnen betrachtet geht die geringste Belästigung vom Schattenwurf der Anlagen aus (M = 1,38, SW = 0,9), die höchste von der Wirkung im Landschaftsbild (M = 2,38, SW = 1,43). Der Score hat mit einem Gesamtmittelwert von 1,78 eine vergleichsweise geringe Bedeutung, es sei allerdings erwähnt, dass dies in den unterschiedlichen Gebieten teilweise deutlich schwankt: Zwischen dem geringsten Mittelwert im Untersuchungsgebiet drei (1,4, SW = 0,58) und dem höchsten in Untersuchungsgebiet fünf (M = 2,49, SW = 1,12) liegt mehr als eine ganze Bewertungseinheit.

6.4.7.3 Ergebnisse Block F: Aktivitäten gegen Windenergieanlagen -Lärm, bzw. Verbindung zu Windenergieanlagen

Abgeschlossen wurde dieser Block mit vier multiple choice Fragen, die drei verschiedene Inhalte finanzieller Abhängigkeit der befragten Personen von Windenergieanlagen ergründeten, sowie erörterte, ob das Teilnehmenden sich jemals in einem Verein o.ä. für oder gegen Windenergieanlagen eingesetzt haben. In der Gesamtstichprobe waren zwölf Personen (2,59 %) in Beschäftigungsverhältnissen mit Verbindung zu den Windenergieanlagen., 452 (97,41 %) waren dies nicht. Immerhin 22 Teilnehmende (4,76 %) gaben an finanziell an den Anlagen beteiligt zu sein, die übrigen 440 (95,24 %) verneinten dies. Nur neun (2,12 %) der Befragten gaben an durch die Windenergieanlagen an Stromkosten zu sparen, während die übrigen 416 (97,88 %) dies verneinten.

Die letzte Frage im Block F fragte die Teilnehmenden, ob es jemals ein Engagement in einer Bürgerinitiative oder einem Verein gab, dass sich entweder für oder gegen Windenergieanlagen aussprach. Sechs Personen (1,29 %) hatten sich demnach in einer solchen Vereinigung für Windenergieanlagen eingesetzt, 20 (4,3 %) hatten sich dagegen engagiert, die übrigen 439 (94,41 %) hatten weder das eine noch das Andere getan.

6.4.8 Ergebnisse Block G: Mögliche Entwicklungen/ Veränderungen seit Errichtung der Windenergieanlagen in Ihrer Wohnumgebung

Block G beinhaltete insgesamt sechs Fragen, die darauf abzielten wahrgenommene Veränderungen, die mit Windenergieanlagen in Verbindung stehen zu ergründen. Mit der ersten Frage wurde erfasst, ob es eine Änderung bezüglich des Lärms der Windenergieanlagen gegeben hat, seit diese errichtet wurden. Die Teilnehmenden konnten wählen, ob der Lärm zu- oder abgenommen hat, oder ob es keine Änderung gab. 101 (23,01 %) gaben an, der Lärm habe zugenommen, nur fünf (1,14 %) er habe abgenommen die übrigen 333 (75,85 %) gaben an, der Lärm habe sich weder verringert noch verstärkt.

Das zweite Item erfragte, ob sich die Art der Geräusche der Windenergieanlagen mit der Zeit verändert habe. 68 (16,87 %) Personen gaben an, dass er sich verändert habe, 335 (83,13 %) gaben an, es sei zu keiner Änderung gekommen. Die Teilnehmenden, die angegeben hatten eine Änderung bemerkt zu haben, wurden gebeten zu beschreiben, wie sich das Geräusch geändert hat. Dies erfolgte in Form einer offenen Antwort, 61 Teilnehmende machten hierzu weitere Angaben. Die Antworten unterschieden sich in Umfang und Präzision deutlich. Die meisten beschrieben verschiedene Arten zusätzlicher Geräuschentwicklungen, viele weitere, dass die Geräuschbelastung mit der Zeit zugenommen habe. Die meisten der 61 Antworten bestanden aus ganzen Sätzen, was eine kurze Analyse anhand von Schlagworten erschwerte, woran auch das Löschen von Stoppwörter („den Häufigsten in einer Sprache vorkommenden Wörtern“) wenig änderte. Auch das zurückführen der Worte in ihre Ursprungsform („stemming“) mit Hilfe von Porter’s Algorithmus (Feinerer, Hornik und Meyer, 2008) konnte hier nichts bewirken. 16 Antworten beinhalteten das Wort „lauter“, was das am häufigsten genannten Wort insgesamt in diesem offenen Item war, dazu könnte man ebenfalls das Wort „laut“ das weitere fünfmal genannt wurde hinzuzählen. „Leiser“ wurde siebenmal genannt, außerdem nannten die Leute als weitere Geräuschcharakteristiken „rauschen“ (viermal), „brummen“, „pfeifen“ und „quietschen“ (jeweils dreimal). Alle weiteren genannten Worte wurden weniger als dreimal genannt. 309 der Befragten gaben außerdem an, es habe weitere Veränderungen seit der Errichtung der Windenergieanlagen gegeben, allerdings machten nur 13 Personen hierzu weitere Angaben. Zwei berichteten es habe wegen der Windräder Streit in der Nachbarschaft oder mit den Flächenbesitzern gegeben. Vereinzelt gab es außerdem Aussagen zu verschiedenen Änderungen in der örtlichen Infrastruktur, die allerdings vermutlich kaum im Zusammenhang zu den Windenergieanlagen stehen, eine Person gab an weniger Wildtiere zu sehen.

Schließlich wurden die Befragten gebeten, eine Einschätzung darüber zu treffen, wie sehr sie sich in den nächsten zwölf Monaten vom Lärm der Windenergieanlagen belästigt fühlen werden. Das Antwortformat entspricht der verbalen fünf-Stufen Skala, die bereits in Abschnitt 6.4.3 verwendet wurde. 52 (11,98%) der Befragten gaben an, sich voraussichtlich stark oder äußerst belästigt zu fühlen, die übrigen 382 Personen erwarten keine oder höchstens eine mittelmäßige Belästigung (88,02%).

6.4.9 Ergebnisse Block H: Beschreibung der Geräusche von Windenergieanlagen

Bereits die in Block G gezeigten Ergebnisse lassen vermuten, dass sich die Arten von Geräuschen, die von Windenergieanlagen ausgehen je nach Anlage und/oder Untersuchungsgebiet unterscheiden. Um zu ergründen wie unterschiedlich Geräuschemissionen von Windenergieanlagen sind und wie diese von den Teilnehmenden wahrgenommen werden, wurden in Block H insgesamt elf verschiedene Fragen gestellt.

Für die ersten acht Fragen in diesem Block wurden die Befragten gebeten ihre Zustimmung zu acht verschiedenen Geräuschmerkmalen der lokalen Windenergieanlagen genauer zu beschreiben. Die Befragungsteilnehmenden wurden instruiert ihre Zustimmung zu den acht vorgebenden Geräuschmerkmalen auf einer siebenstufigen-Skala mit den verbalen Extrema „1 = stimme nicht zu“ und „7 = stimme voll zu“ anzugeben. Die Ergebnisse sind Tabelle 22 zu entnehmen.

In der Gesamtstichprobe werden die Windenergieanlagen-Geräusche am häufigsten als Rauschen (M = 3,85, SW = 2,2) und Wuschen (Zustimmung: M = 4,23, SW = 2,4) wahrgenommen, vor allem im Untersuchungsgebiet 5, gefolgt in absteigender Reihenfolge von UG 4 und UG 2. Am wenigsten werden die Windenergieanlagen-Geräusche als ein Rauschen und Wuschen in UG 1 und UG 3 wahrgenommen (Tabelle 22). Das Wuschen wird oftmals als subjektives Pendant der Amplitudenmodulation verstanden, ggf. auch das Rauschen, sofern es als pulsierend oder in Intervallen wahrgenommen wird, was in den Vertiefungsinterviews erwähnt wurde. Eine leichte

Übereinstimmung im Grad der Wahrnehmung der Windenergieanlagen-Geräusche als Wuschen und Rauschen ergibt sich in Bezug auf die prozentuale Auftretshäufigkeit der erkannten, stabil vorliegenden (periodischen) AM (Tabelle 22). Das heißt, in UG 2 und UG 4, in denen die AM prozentual deutlich höher auftritt als in den übrigen UGs (47,4% in UG 2 und 42% in UG 4) erfährt die Beschreibung der Windenergieanlagen-Geräusche als Wuschen bzw. Rauschen nach UG 5 die stärkste Zustimmung. Allerdings findet sich die höchste Zustimmung zu den Geräuschmerkmalen Wuschen bzw. Rauschen als kennzeichnend für die Windenergieanlagen-Geräusche im UG 5, in dem jedoch die Auftretshäufigkeit der AM und ihre Modulationstiefe nicht die höchsten Werte der betrachteten Untersuchungsgebiete einnimmt. Ob die hier dargestellten Gebietsunterschiede in der Auftretshäufigkeit der erkannten periodischen AM und der subjektiv wahrgenommenen Geräuschmerkmale Wuschen bzw. periodisches Rauschen mit Gebietsunterschieden in der Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen korrespondieren, wurde im Rahmen einer Kovarianzanalyse untersucht, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

6.4.9.1 Kovarianzanalyse zu Gebietsunterschieden in der Lärmbelästigung durch Windenergieanlagengeräusche

Es wurde eine Kovarianzanalyse durchgeführt um zu untersuchen, ob und inwiefern sich die Werte der Belästigung durch Windenergieanlagengeräusche zwischen den Untersuchungsgebieten unterscheiden. In einem weiteren Schritt wurden die gebietsbezogenen Lärmbelastigungsunterschiede mit den Kenngrößen der AM (vgl. hierzu auch Tabelle 4, S. 62) und den subjektiv wahrgenommenen Geräuschmerkmalen im Hinblick auf eine mögliche Korrespondenz verglichen. Die in der Kovarianzanalyse betrachteten Gebietsunterschiede in der Lärmbelästigung wurden anhand des Beurteilungspegels L_r als Kovariate adjustiert, d. h. die Gebietsunterschiede wurden bei Unterstellung eines konstanten Beurteilungspegels untersucht. In der ersten Zeile in Tabelle 22 sind die um den Geräuschpegel kontrollierten WEA-Lärmbelastigungsurteile in den fünf Untersuchungsgebieten aufgelistet. Die Kovarianzanalyse offenbart hoch signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten in der WEA-Lärmbelästigung $F(4,457) = 24,53, p < 0,001$. Post-hoc-Tests zur Analyse von Einzelunterschieden zwischen den Gebieten ergaben, dass der Grad der WEA-Lärmbelastigungsurteile in den Gebieten UG 1 und UG 3 statistisch signifikant niedriger ist als in den übrigen Gebieten, während sich die adjustierte WEA-Lärmbelastigung in den Gebieten UG 2, 4 und 5 statistisch nicht signifikant voneinander unterscheiden.

6.4.9.2 Korrespondenz zwischen Gebietsunterschieden in der Lärmbelästigung, beurteilten Geräuschmerkmalen und Kenngrößen der stabilen, periodischen AM

Die um den Effekt unterschiedlicher Beurteilungspegel in den Untersuchungsgebieten bereinigten Belästigungsunterschiede zwischen den Gebieten scheinen sowohl mit den Unterschieden in der Geräuschwahrnehmung als Wuschen bzw. Rauschen zu korrespondieren, als auch teilweise mit den Kenngrößen der AM aus Tabelle 4, Abschnitt 3.4.3, die in Tabelle 22 noch einmal übernommen wurden. Denn in UG 1 und UG 3 ist sowohl die Wahrnehmung der Windenergieanlagen-Geräusche als „Wuschen“ oder Rauschen“ geringer als in den übrigen Untersuchungsgebieten als auch die Auftretshäufigkeit der erkannten, stabil vorliegenden (periodischen) AM. Allerdings korrespondieren die Belästigungsunterschiede nicht mit der gemessenen Modulationstiefe der Windenergieanlagen in den verschiedenen Untersuchungsgebieten.

Tabelle 22: Deskriptive Statistiken zur WEA-Lärmbelastigung, zu den Kenngrößen der AM und den abgefragten Geräuschmerkmalen

	UG 1	UG 2	UG 3	UG 4	UG 5	Gesamt
WEA-Lärmbelastigung gesamt *	1,32	2,06	1,24	2,12	2,59	--
<i>Kenngrößen der AM (aus Tabelle 4)</i>						
Auftrittshäufigkeit erkannter, stabil vorliegender (periodischer) AM in %	10,8	47,4	1,7	42,0	22,3	--
ΔL_{AM95} in dB	1,1	1,3	0,6	0,9	0,8	--
ΔL_{AM50} in dB	2,0	2,4	1,4	1,5	1,6	--
ΔL_{AM05} in dB	4,2	4,7	5,5	3,3	2,9	--
<i>Ich würde das WEA-Geräusch beschreiben als ... "Stimme nicht zu" (1) bis "Stimme voll zu" (7) Mittelwert (Standardabweichung)</i>						
Poltern	1,47 (1,16)	1,45 (1,26)	1,29 (0,77)	1,35 (0,98)	2,13 (1,79)	1,53 (1,26)
Dröhnen	1,57 (1,33)	2,00 (1,83)	1,44 (0,98)	1,68 (1,36)	2,44 (1,94)	1,80 (1,56)
Rauschen	3,11 (2,12)	4,18 (2,46)	3,14 (1,59)	5,08 (2,14)	5,00 (1,72)	3,85 (2,20)
Brummen	1,87 (1,60)	2,33 (1,96)	1,76 (1,18)	2,00 (1,80)	3,24 (2,08)	2,20 (1,80)
Pulsieren	2,22 (1,93)	2,38 (2,00)	2,15 (1,37)	2,26 (1,94)	2,42 (1,84)	2,30 (1,85)
Pfeifen	1,68 (1,49)	2,04 (1,92)	1,65 (1,25)	2,03 (1,80)	2,81 (2,00)	1,98 (1,72)
Wuschen	3,79 (2,43)	4,10 (2,54)	3,61 (2,05)	4,95 (2,49)	5,81 (1,71)	4,23 (2,40)
Ständige Schwankung	2,53 (2,05)	3,33 (2,58)	2,28 (1,71)	2,81 (2,40)	2,81 (2,11)	2,74 (2,19)

N = 396 – 420; * Mittelwert adjustiert nach Beurteilungspegel L_r

Das nächste Item erfragte, welches der genannten Geräuschmerkmale am stärksten belästigte. Absolute und relative Häufigkeiten der Antworten sind Tabelle 23 zu entnehmen.

Tabelle 23: Häufigkeitstabelle der belästigsten Geräuschmerkmale von Windenergieanlagen

Geräuschmerkmal								
	Poltern	Dröhnen	Rauschen	Brummen	Pulsieren	Pfeifen	Wuschen	Ständige Schwankung
N	11	8	45	23	13	21	127	7
%	4,31	3,14	17,65	9,02	5,1	8,24	49,8	2,75

Auch hierbei bestätigt sich die Bedeutung der Wahrnehmung der WEA-Geräusche als Wuschen. Das „Wuschen“ ist nicht nur das Geräuschmerkmal, das die höchste Zustimmung bezüglich der emittierten Geräuschmerkmale aufweist, sondern mit Abstand auch die höchste Belästigung verursacht.

Im Einklang damit stehen die Ergebnisse der Korrelationsanalysen zwischen den wahrgenommenen Geräuschmerkmalen und der WEA-Lärmbelästigung (Tabelle 24), auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

6.4.9.3 Korrelation zwischen Lärmbelästigung durch Windenergieanlagengeräusche und wahrgenommenen Geräuschmerkmalen

Vor allem drei der hier untersuchten Geräuschcharakteristika kämen einer Beschreibung amplitudenmodulierter Geräusche nahe: Pulsieren, Wuschen, Schwankung. Die Korrelationstabelle (Tabelle 24) legt nahe, dass ein Zusammenhang zwischen diesen Geräuschmerkmalen und der WEA-Lärmbelästigung besteht. Die höchsten Korrelationen zeigen sich zwischen der WEA-Lärmbelästigung insgesamt und außen und dem Merkmal „Wuschen“ ($r_{\text{Wuschen, LB insgesamt}} = 0,455$, $r_{\text{Wuschen, LB außen}} = 0,446$). Je mehr also zugestimmt wird, dass die WEA-Geräusche durch „Wuschen“ gekennzeichnet sind, desto stärker ist die angegebene WEA-Lärmbelästigung. Diese Befunde geben zusammen genommen einen Hinweis darauf, dass die subjektiv wahrgenommenen amplitudenmodulierter Geräusche tatsächlich als belästigender beurteilt werden als stetige Geräusche.

Tabelle 24: Korrelationstabelle der wahrgenommenen Geräuschmerkmale und WEA-Lärmbelästigung

	Poltern	Dröhnen	Rauschen	Brummen	Pulsieren	Pfeifen	Wuschen	Schwankung
LB insgesamt	0,358	0,414	0,393	0,424	0,266	0,363	0,455	0,358
LB innen	0,295	0,346	0,338	0,354	0,265	0,381	0,356	0,386
LB außen	0,332	0,378	0,409	0,408	0,236	0,380	0,446	0,336

LB = WEA-Lärmbelästigung; Wertebereich der Korrelationen: -1 bis +1. Je näher der Wert an 1,0 bzw. -1,0 desto stärker ist der positive oder entgegengesetzte Zusammenhang.

Die Teilnehmenden wurden außerdem gefragt, ob es weitere Begriffe gibt, die Geräusche von Windenergieanlagen beschreiben, 56 bejahten dies. Unter den genannten Begriffen waren viele, die bereits vorher abgefragt wurden. Viele weitere Ausführungen referenzierten Geräusche die Parallelen zu Flügelschlagen aufweisen (bspw. „Flappflapp“) viele weitere beschreiben auch stetige Geräusche und/ oder ziehen Parallelen zu Flugverkehrslärm verschiedenster Art.

6.4.10 Ergebnisse Block I: Lüftungsgewohnheiten, Fensterart, ruhiger Raum

Im letzten Block wurden die Teilnehmenden ausführlich zur Ausrichtung ihrer Räumlichkeiten sowie Lüftungsgewohnheiten befragt. Insgesamt sieben Items wurden im multiple-choice Format abgefragt, wobei allerdings immer nur eine Antwort zulässig war.

Im Hinblick auf die Fensterart herrscht sowohl im Wohn- als auch Schlafzimmer mit über 80% der Fälle die Doppelverglasung vor. Danach folgt mit 12 bzw. 13% die Dreifachverglasung im Schlaf- bzw. Wohnzimmer. Nur wenige Personen haben zuhause eine einfache Verglasung, keine der befragten Personen hat Schallschutzfenster in Verbindung mit Lüftern (Tabelle 25).

Tabelle 25: Absolute und relative Häufigkeiten der Verglasungen und Fensterarten

		Fenster,- bzw. Verglasungsart			
Raum		Einfache Verglasung	Doppelte Verglasung	Schallschutzfenster oder Dreifachverglasung	Schallschutzfenster in Verbindung mit Lüftern
Schlafzimmer	N	13	392	56	-
	%	2,82	85,03	12,15	-
Wohnzimmer	N	7	393	61	-
	%	1,52	85,25	13,23	-

128 (27,83 %) Teilnehmende gaben an das Fenster in ihren Wohnzimmern in der warmen Jahreszeit tagsüber überwiegend geschlossen zu halten, 332 (72,17 %) gaben an die Fenster dann zu öffnen bzw. zu kippen. 396 der befragten Personen hielten die Fenster in der warmen Jahreszeit im Schlafzimmer nachts geöffnet (85,34 %), nur 68 gaben an die Fenster dann geschlossen zu halten (14,66 %). 336 (77,42 %) gaben zudem an einen ruhigen Raum in ihrer Wohnung zu haben, in den sie sich zum Schutz vor Umgebungslärm zurückziehen können.

Tabelle 26: Absolute und relative Häufigkeiten der Raumausrichtung zur Windenergieanlage

		Raumausrichtung zur Windenergieanlage			
Raum		Abgewandt	Seitlich	Zugewandt	
Schlafzimmer	N	182	122	151	
	%	40	26,81	33,19	
Wohnzimmer	N	168	106	180	
	%	37	23,35	39,65	

Um zu prüfen, ob es eine erfolgreiche Lärmbewältigungsstrategie sein kann, das Schlafzimmer in einem der Windenergieanlage abgewandten Raum einzurichten, wurde eine Kovarianzanalyse durchgeführt, die prüft ob die Belästigung durch den Lärm von Windenergieanlagen in Abhängigkeit der von der Raumausrichtung im Schlafzimmer unterschiedlich ausfällt. Wie auch schon im vorherigen Block wurde dabei der Effekt des Geräuschpegels kontrolliert. Zusätzlich wurde das Modell um die Interaktion der Raumausrichtung und Geräuschpegel ergänzt. Es zeigte sich, dass die WEA-Lärmbelästigung insgesamt und innen in Abhängigkeit von der Schlafräumeausrichtung zu den Windenergieanlagen hin unterschiedlich ausfällt: Die Belästigung ist am höchsten, wenn der Schlafräum den Windenergieanlagen zugewandt ist und am niedrigsten, wenn er von den Windenergieanlagen abgewandt ist (Tabelle 27). Der Effekt der Raumausrichtung ist statistisch signifikant (für WEA-Lärmbelästigung insgesamt: Wald-Chi-Quadrat = 7,76, df = 2, p = 0,021; für WEA-Lärmbelästigung innen: Wald-Chi-Quadrat = 6,47, df = 2, p = 0,039). Dieser Effekt ist unabhängig von der Höhe des Beurteilungspegels, d.h. Beurteilungspegel und die Raumausrichtung interagieren nicht miteinander im Effekt auf die WEA-Lärmbelästigung innen und insgesamt (p > 0,05).

Tabelle 27: WEA-Lärmbelästigung in Abhängigkeit von der Schlafräumeausrichtung zur WEA

Räumeausrichtung im Schlafzimmer	WEA-Lärmbelästigung insgesamt	WEA-Lärmbelästigung innen
	Mittelwert (Randmittel) und Standardfehler, adjustiert nach Beurteilungspegel L_r	
Der WEA abgewandt	1,61 (0,083)	1,23 (0,062)
Zur WEA seitlich ausgerichtet	1,68 (0,102)	1,35 (0,075)
Der WEA zugewandt	1,90 (0,113)	1,49 (0,079)

6.4.11 Deskriptive Statistik der Geräuschpegeldaten

Die berechneten Dauerschallpegel L_{Aeq} für Tag und für Nacht wurden mit den Adressdaten kombiniert, sodass für das Wohngebäude jeder Befragungsperson in der Stichprobe berechnete Geräuschpegel vorliegen. Da in der Prognose von einem Dauerbetrieb der Windenergieanlage von 24 Stunden ausgegangen wurde, entspricht der Beurteilungspegel für den Tag ($L_{r,Tag}$) dem für die Nachtzeit ($L_{r,Nacht}$). Tabelle 28 zeigt Mittelwerte, Standardabweichung und errechnete Minimum und Maximum der Beurteilungspegel bezogen auf die jeweilige Wohnadresse der Befragten für die Gesamtstichprobe und pro Untersuchungsgebiet.

Tabelle 28: Beurteilungspegel L_r in dB in der Gesamtstichprobe der Befragungspersonen und pro Untersuchungsgebiet

L_r in dB	N	M	SW	Min	Max
Insgesamt	463	31,29	5,53	17,0	43,0
UG 1	149	31,97	2,89	24,0	42,0
UG 2	108	23,92	5,08	17,0	36,0
UG 3	94	33,02	1,92	30,0	37,0
UG 4	43	35,20	4,32	26,0	43,0
UG 5	69	36,52	1,94	30,0	42,0

M = Mittelwert über Beurteilungspegel bezogen auf die jeweilige Wohnadresse der Befragungspersonen in dB; SW = Standardabweichung in dB; Min = Minimum; Max = Maximum. Der Beurteilungspegel L_r gilt für den Tag- und Nachtzeitraum.

6.4.12 Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen pro Beurteilungspegelklasse

Tabelle 29 zeigt für die Gesamtstichprobe der befragten Personen die Lärmbelästigung pro Beurteilungspegelklasse L_r . Deutlich wird, dass die Lärmbelästigung insgesamt sowie innerhalb und außerhalb des Hauses in den obersten beiden Pegelklassen 35,1 – 40,0 dB und $\geq 40,1$ dB teils deutlich höher ist als in den Pegelklassen darunter. In den Pegelklassen bis $L_r = 35$ dB, das sind die Pegelklassen von ≤ 20 dB bis zur Pegelklasse 30,1 – 35,0 dB, ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Beurteilungspegel und Belästigungsurteil erkennbar. Vermutlich sind die Beurteilungspegel unterhalb von 35 dB zu gering, als dass sie bei Anwohnenden systematische Belästigungsunterschiede hervorrufen.

Tabelle 29: Lärmbelästigung pro Beurteilungspegelklasse

Pegelklasse L_r	N	Lärmbelästigung durch WEA insgesamt	Lärmbelästigung durch WEA im Haus	Lärmbelästigung außerhalb des Hauses
		M (SW)	M (SW)	M (SW)
≤ 20 dB	23	1,04 (0,21)	1,00 (0,0)	1,04 (0,21)
20,1 - 25,0 dB	56	1,79 (1,09)	1,39 (0,80)	1,77 (1,10)
25,1 - 30,0 dB	57	1,46 (1,09)	1,30 (0,76)	1,46 (1,07)
30,1 - 35,0 dB	206	1,37 (0,89)	1,17 (0,57)	1,38 (0,81)
35,1 - 40,0 dB	109	2,53 (1,46)	1,78 (1,11)	2,55 (1,50)
$\geq 40,1$ dB	12	3,33 (1,24)	2,67 (1,72)	3,17 (1,80)

N = Anzahl; M = Mittelwert; SW = Standardabweichung in dB(A)

Die höchste Geräuschbelastung zeigt sich über die Befragungsstichprobe hinweg im Durchschnitt im UG 5, dort ist auch die WEA-Lärmbelästigung höher als in übrigen Gebieten (vgl. Tabelle 29)

6.4.13 Korrelationen mit Beurteilungspegel und Lärmbelästigung

Eine Korrelationsberechnung zeigt die Stärke bilateraler Zusammenhänge zwischen zwei Größen auf und gibt damit für die nachfolgenden Expositions-Wirkungsanalysen erste Hinweise auf die Beziehungen zwischen den Variablen Beurteilungspegel, WEA-Lärmbelästigung insgesamt, innen und außen und weiteren möglichen Einflussgrößen der WEA-Belästigung. Werte nahe 1 weisen auf einen hohen gleichläufigen Zusammenhang („je mehr, desto mehr“), Korrelationswerte nahe -1 auf einen entgegengerichteten Zusammenhang („je mehr, desto weniger“) hin. Werte 0 bedeuten, dass kein Zusammenhang vorliegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 30 dargestellt.

Zunächst zeigen die in Tabelle 30 dargelegten Ergebnisse, dass der Beurteilungspegel L_r in kleiner Effektstärke (Cohen, 1988) mit den WEA-Lärmbelästigungsurteilen korreliert. Die Korrelationskoeffizienten liegen mit $0,219 \leq r \leq 0,272$ in einem Bereich wie er aus der Literatur zur WEA-Lärmbelästigung bekannt ist. So nennen Guski et al. (2017) in ihrem systematischen Review zur Belästigung durch Umgebungslärm für die WEA-Lärmbelästigung eine durchschnittliche Korrelation zwischen Lärmbelästigung und Geräuschpegel in Höhe von $r = 0,278$ bei einer Spannweite von $0,130 \leq r \leq 0,464$.

Untereinander korrelieren die WEA-Lärmbelästigungsurteile hoch, wobei die WEA-Lärmbelästigung insgesamt stärker mit der WEA-Lärmbelästigung außen korreliert ($r = 0,801$) als mit der WEA-Lärmbelästigung innen ($r = 0,646$).

Tabelle 30: Korrelationen zwischen Lärmbelastigung, Beurteilungspegel und weiteren potenziellen Einflussgrößen der WEA-Lärmbelastigung

	Beurteilungs- pegel L_r	WEA- Lärmbelastigung insgesamt	WEA- Lärmbelastigung innen	WEA- Lärmbelastigung außen
Beurteilungspegel L_r	1,000	0,263**	0,219**	0,272**
WEA-Lärmbelastigung innen	0,219**	0,672**	1,000	0,646**
WEA-Lärmbelastigung außen	0,272**	0,801**	0,646**	1,000
Lärmempfindlichkeit	0,027	0,174**	0,177**	0,163**
PSS1_Stress-Mittelscore Hilflosigkeit	0,039	0,171**	0,178**	0,184**
PSS2_Stress-Mittelscore Selbstwirksamkeit	-0,093*	-0,007	-0,084	-0,069
Mangelnde Restauration ¹	0,148**	0,681**	0,582**	0,687**
Negative Konsequenzen ¹	-0,198**	0,442**	0,313**	0,446**
Positive Konsequenzen ¹	0,010	-0,307**	-0,258**	-0,298**
Visuelle Beeinträchtigung ¹	0,085	0,744**	0,591**	0,726**
Poltern	0,105*	0,366**	0,317**	0,343**
Dröhnen	0,045	0,380**	0,327**	0,354**
Rauschen	0,039	0,368**	0,317**	0,388**
Brummen	0,048	0,411**	0,341**	0,403**
Pulsieren	-0,016	0,279**	0,274**	0,251**
Pfeifen	0,088	0,359**	0,373**	0,378**
Wuschen	0,128**	0,414**	0,330**	0,418**
Schwankung	-0,085	0,353**	0,368**	0,321**

¹ Zusammenfassender Score aus mehreren Items (Einzelfragen); * = $p < .05$; ** = $p < .01$; p = Signifikanzniveau

Neben dem Geräuschpegel stehen noch weitere Faktoren im Zusammenhang mit der WEA-Lärmbelastigung. Es zeigt sich, dass beinahe alle weiteren potenziellen Einflussgrößen mit der WEA-Lärmbelastigung signifikant korrelieren. Eine Ausnahme stellt der Stress-Selbstwirksamkeitsscore dar, der mit keiner der Belastigungsurteile korreliert.

So steht z.B. die visuelle Beeinträchtigung in einem starken Zusammenhang mit der WEA-Lärmbelastigung insgesamt ($r = .744$) und außen ($r = .726$), ein Befund der auch aus anderen Studien bekannt ist (u.a. Michaud et al., 2018a,b; Hübner et al, 2019). Das heißt, je stärker eine

visuelle Beeinträchtigung durch die Windenergieanlagen wahrgenommen wird, desto höher ist die WEA-Lärmbelastung. Dabei korreliert die visuelle Beeinträchtigung nicht mit dem Beurteilungspegel. Ebenso zeigt Tabelle 30 deutliche Zusammenhänge der WEA-Lärmbelastung mit den Einstellungen zu Windenergieanlagen. So korreliert der wahrgenommene Mangel an Restaurationsmöglichkeiten mit Koeffizienten in Höhe von $0,582 \leq r \leq 0,687$ und die Befürchtung negativer Konsequenzen des Betriebs der lokalen Windenergieanlagen mit Koeffizienten in Höhe von $0,313 \leq r \leq 0,446$ mit der WEA-Lärmbelastung innen, insgesamt und außen. Etwas geringer, mit Korrelationskoeffizienten in Höhe von $-0,307 \leq r \leq -0,258$, ist die WEA-Lärmbelastung mit wahrgenommenen positiven Konsequenzen des lokalen Windenergieanlagen-Betriebs verbunden, wonach die WEA-Lärmbelastung umso geringer ist, je positiver die Konsequenzen der Windenergieanlagen beurteilt werden. Der Einstellungsscore „Mangelnde Restauration“ korreliert auch gering, aber statistisch dennoch signifikant mit $r = 0,148$ mit dem Beurteilungspegel, wonach die mangelnden Restaurationsmöglichkeiten im Wohnumfeld umso stärker beurteilt werden, je höher die Geräuschbelastung ist. Interessanterweise ist das bei den Befürchtungen negativer Konsequenzen umgekehrt, nämlich dass diese in geringer belasteten Gebieten etwas stärker ausfallen als in höher belasteten Gebieten. Dazu muss man sich noch einmal vor Augen halten, aus welchen Einzelaspekten dieser Einstellungsscore zusammengesetzt ist, nämlich aus ökonomischen Aspekten (Grundstückswertminderung, keine Förderung der regionalen Weiterentwicklung) und dem visuellen Aspekt der Verschandelung des Landschaftsbilds. Die auf die ökonomischen Konsequenzen bezogenen Beurteilungen können eher Befürchtungen als Ergebnis von konkreten Erfahrungen sein, da sie in der Frageformulierung nicht die eigene Person, sondern eher erwartete Konsequenzen für die Region betreffen. Die Einschätzung der Windenergieanlagen als Landschaftverschandelung ist etwas, was mit der Sichtbarkeit der Windenergieanlagen zusammenhängt, die auch aus größerer Distanz zur Windenergieanlagen (vielleicht sogar besser) und damit bei geringerem Beurteilungspegel gegeben ist. Andere Autorinnen und Autoren haben schon darauf hingewiesen, dass die Sichtbarkeit von Windenergieanlagen und die Anzahl der lokalen Anlagen, die gesehen werden können, einen Effekt auf die Lärmbelastung haben kann (zusammenfassend: Freiberg et al. 2019, Van Kamp & van den Berg, 2017, 2020). Im geringeren Maße, aber dennoch statistisch signifikant, korreliert die individuelle Lärmempfindlichkeit mit der Windenergieanlagen-Lärmbelastung ($0,163 \leq r \leq 0,177$), aber nicht mit dem Beurteilungspegel. Das war zu erwarten, weil die Lärmempfindlichkeit ein individuelles, stabiles Persönlichkeitsmerkmal darstellt, das nicht von einer konkreten Lärmsituation, der eine Person ausgesetzt ist, abhängt (u. a. Job, 1999). In gleicher Weise und Stärke wie die Lärmempfindlichkeit korreliert der Stressscore „Hilflosigkeit“ mit der WEA-Lärmbelastung und weist keinen Zusammenhang zum Beurteilungspegel auf. Es kann angenommen werden, dass der Stressfaktor „Hilflosigkeit“ als auch die Lärmempfindlichkeit die generelle Vulnerabilität (Anfälligkeit) einer Person gegenüber Umweltgeräuschbelastungen widerspiegelt (vgl. auch Abschnitt 6.4.5).

Alle Variablen, die die Geräuschcharakteristika der Windenergieanlagen beschreiben wie Poltern, Rauschen und Wuschen, korrelieren signifikant mit den Belästigungsvariablen (siehe Tabelle 30), am stärksten hierbei die Geräuschmerkmale „Wuschen“ und „Brummen“, wobei das „Wuschen“ vor allem mit der WEA-Lärmbelastung insgesamt ($r = 0,414$) und im Außenbereich ($r = 0,418$), das „Brummen“ stärker mit der WEA-Lärmbelastung insgesamt ($r = 0,411$) und im Innenbereich ($r = 0,403$) korreliert. Die Zusammenhänge bedeuten, dass die WEA-Lärmbelastung umso stärker ausgeprägt ist, je stärker die WEA-Geräuschmerkmale als „Wuschen“ bzw. „Brummen“ wahrgenommen wird. Der Zusammenhang zwischen den wahrgenommenen Geräuschcharakteristika und dem Beurteilungspegel ist weniger stark ausgeprägt. So weisen beispielsweise nur Poltern ($r = .105$) und Wuschen ($r = .128$) eine

signifikante Beziehung zum Beurteilungspegel auf, d. h. diese Geräuschmerkmale werden bei höheren Beurteilungspegeln geringfügig stärker wahrgenommen.

6.4.14 Expositions-Wirkungsbeziehungen zum WEA-Lärm

6.4.14.1 Expositions-Wirkungsanalysen zur WEA-Lärmbelastigung

Es wurden einfache und multiple logistische Regressionsmodelle berechnet, um den Zusammenhang zwischen dem Prozentanteil hoch belastigter Personen (%HA) und dem Beurteilungspegel L_r darzustellen.

Die hochbelastigten Personen sind diejenigen, die auf der 5-stufigen Belästigungsskala eine Antwort auf einer der obersten beiden Stufen 4 und 5 (stark und äußerst) angaben. Die belästigten Personen sind diejenigen, die eine der oberen drei Stufen wählten (mittelmäßig, stark, äußerst). Die einfachen Modelle (Basismodelle) haben nur den Beurteilungspegel als Prädiktor (Einflussfaktor). Die multiplen Modelle (erweiterten Modelle) beinhalten darüber hinaus weitere mit dem Belästigungsurteil verbundene Einflussgrößen, wie sie anhand der Korrelationsberechnungen (vgl. Abschnitt 6.4.13) identifiziert wurden. Von den in den Korrelationsanalysen untersuchten Größen wurde lediglich der Einstellungsscore „Selbstwirksamkeit“ aus den weiteren Modellanalysen herausgenommen, da dieser Score keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zur WEA-Lärmbelastigung aufweist. Es wurden demnach die folgenden verbleibenden potenziellen Einflussgrößen in die Modellierung aufgenommen:

- ▶ die Lärmempfindlichkeit,
- ▶ der wahrgenommenen stressbezogenen Faktoren „Hilflosigkeit“,
- ▶ die Einstellungsfaktoren zu Windenergieanlagen „mangelnde Restauration“, „negative Konsequenzen“, „positive Konsequenzen“,
- ▶ die Geräuschcharakteristiken Poltern, Dröhnen, Rauschen, Brummen, Pulsieren, Pfeifen, Wuschen, Schwankung.

Die tabellarisch dargestellten Ergebnisse der Regressionsanalysen (Koeffizienten) finden sich im Anhang D.5.

6.4.14.2 Regressionsmodelle zum Anteil hoch belastigter Personen

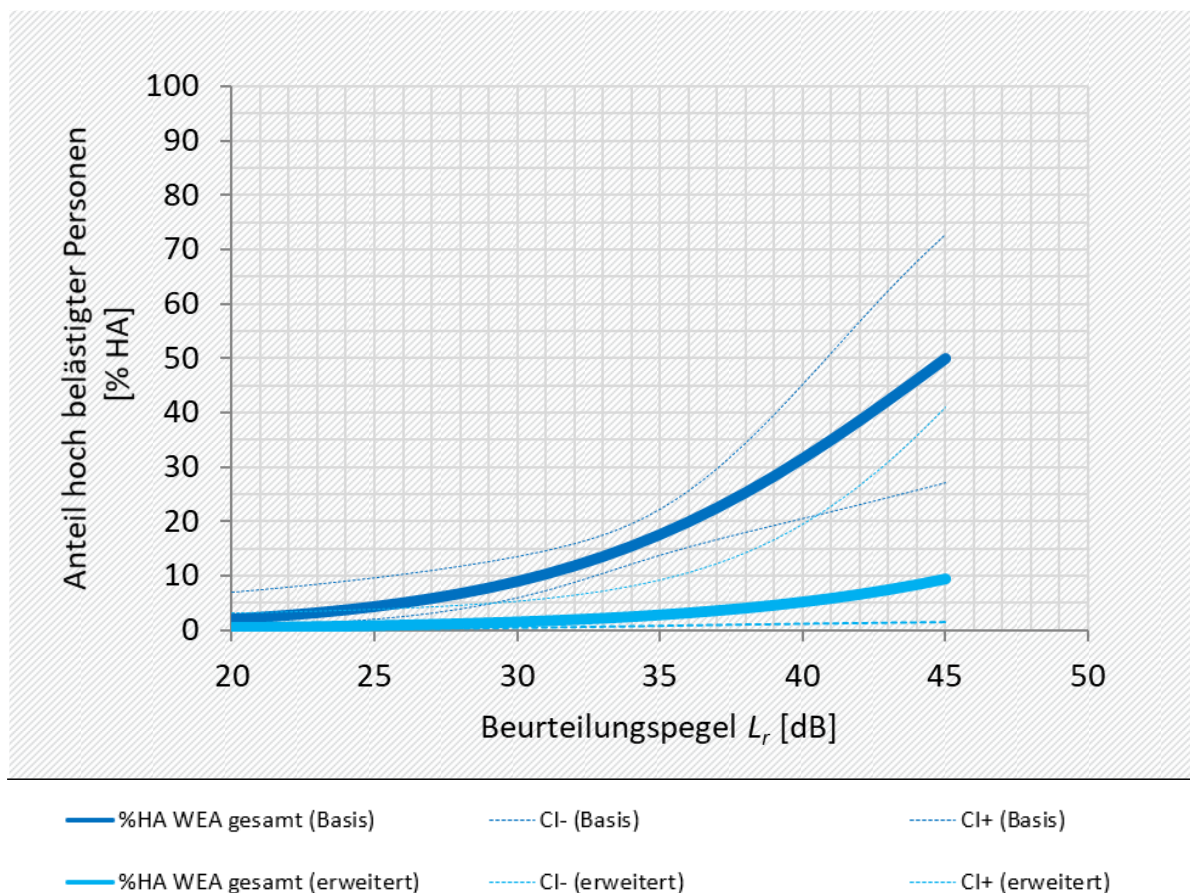
Abbildung 58 bis Abbildung 60 zeigen die Expositions-Wirkungskurven für %HA durch Windenergieanlagen insgesamt, im Außen- und im Innenbereich. Dargestellt sind die %HA-Kurven (durchgezogene Kurven), die angeben, bei welchem Beurteilungspegel wieviel Prozent von Personen hoch belastigt sind. Die gestrichelten Linien (CI- und CI+) geben die unteren und oberen Grenzen des Vertrauensbereichs (95%-Konfidenzintervalls) der jeweiligen %HA-Kurve an. Während das Basismodell auf ein Vorhersagemodell mit nur dem Beurteilungspegel als Einflussgröße beruht, sind im erweiterten Modell zusätzlich noch die im Abschnitt 6.4.14.1 genannten weiteren Einflussgrößen berücksichtigt, d. h. die %HA-Kurve nach diesen weiteren Einflussgrößen „adjustiert“. Die weiteren Einflussgrößen führen dazu, dass die %HA-Kurve bezogen auf den Beurteilungspegel "flacher" wird, d. h. die Varianz im %HA-Anteil, die durch den Beurteilungspegel aufgeklärt wird, sinkt. Für die WEA-Lärmbelastigung im Innenbereich gilt, dass bei Hinzufügung der weiteren Einflussgrößen der %HA-Anteil durch den Beurteilungspegel kaum noch prognostizierbar ist. Für den %HA-Anteil insgesamt und im Außenbereich zeigt sich, dass bei Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen der %HA-Anteil

über den untersuchten Beurteilungspegelbereich geringer ausfällt als in den Basismodellen ohne Berücksichtigung der weiteren Einflussgrößen.

Unter den einstellungsbezogenen Einflussgrößen sind es vor allem die Wahrnehmung der eingeschränkten Außennutzung und mangelnden Erholungsmöglichkeit (mangelnde Restauration) sowie die visuelle Beeinträchtigung durch die Windenergieanlagen, die einen Einfluss auf das Lärmbelastungsurteil haben (siehe auch Abbildung 61). Unter den wahrgenommenen Geräuschmerkmalen sind es vor allem das Wuschen, sowie das Rauschen und wahrgenommene Schwankungen, die den Anteil hoher Belästigung ausmachen. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Merkmale handelt, die die subjektive Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen widerspiegeln.

Der Vergleich und die Bewertung der ermittelten Regressionsmodelle erfolgen detailliert in Abschnitten 6.6 und 6.7.

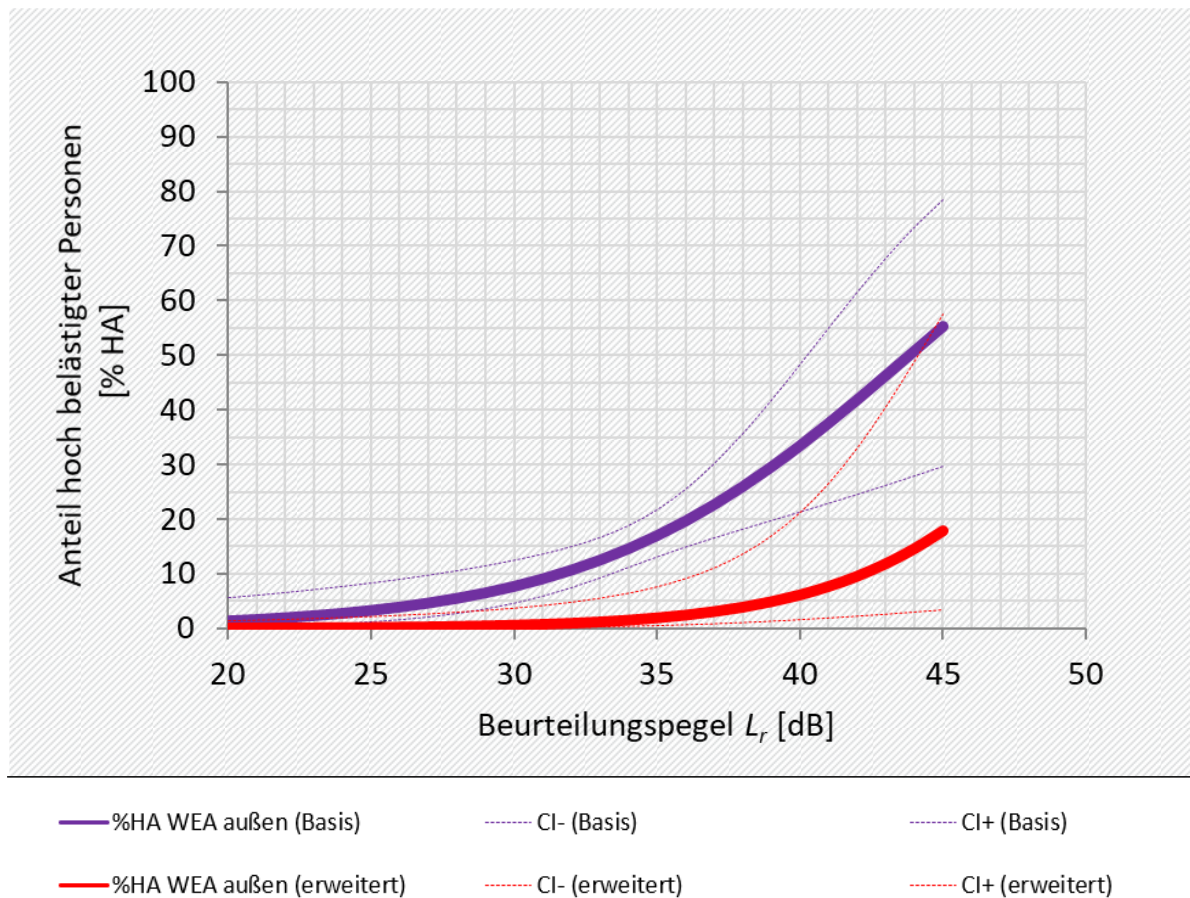
Abbildung 58: Prozentanteil hoch belästigter Personen (% HA) durch Windenergieanlagen insgesamt



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

% HA = % hoch Belästigte; WEA = Windenergieanlage; CI-/+= untere/obere Grenze des Konfidenzintervalls der Expositions-Wirkungs-Kurve; Basis: Einflussfaktor Beurteilungspegel L_r ohne Adjustierung; Erweitert: Einflussfaktoren Beurteilungspegel L_r , Lärmempfindlichkeit, Einstellung zu WEA, wahrgenommenen Stress, visuelle WEA-Beeinträchtigung, Geräuschmerkmale

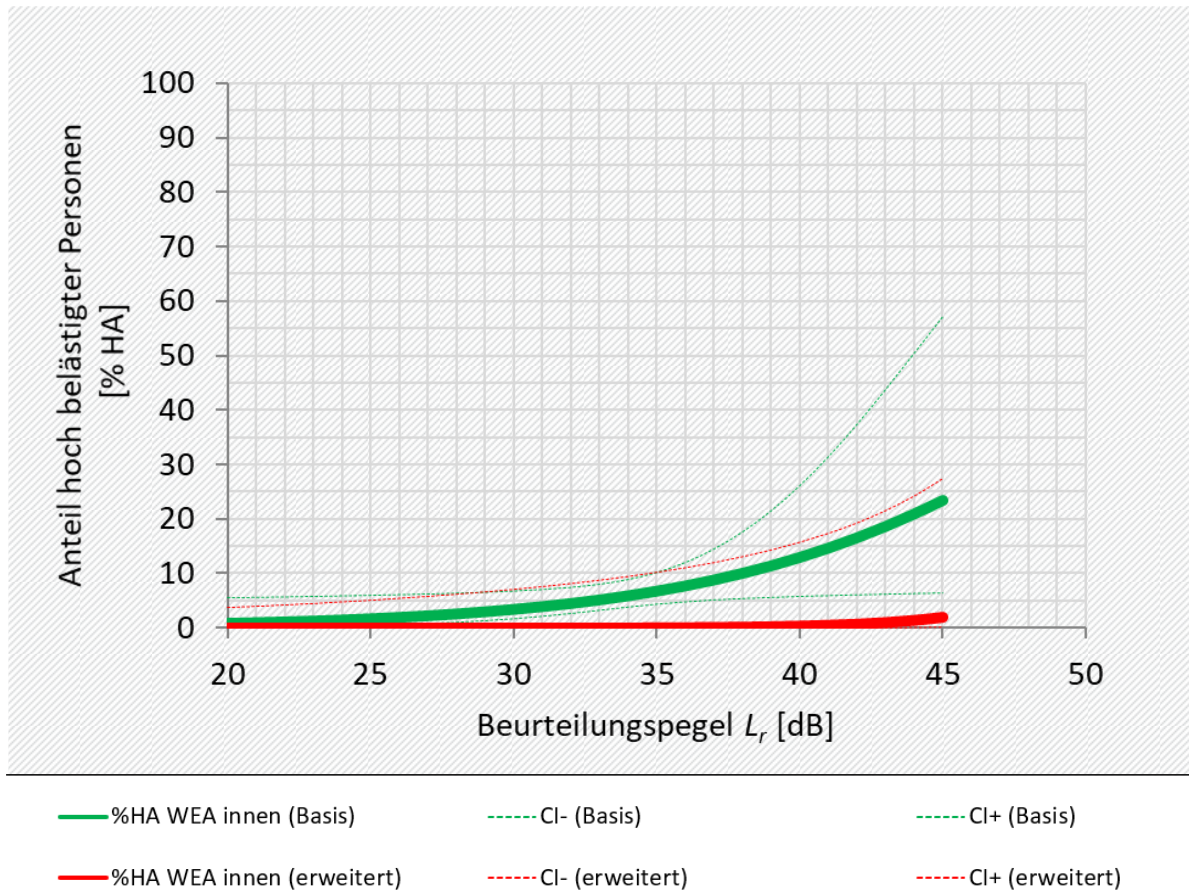
Abbildung 59: Prozentanteil im Außenbereich hoch belastigter Personen (% HA) durch Windenergieanlagen



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

% HA = % hoch Belästigte; WEA = Windenergieanlage; CI-/+ = untere/obere Grenze des Konfidenzintervalls der Expositions-Wirkungs-Kurve; Basis: Einflussfaktor Beurteilungspegel L_r ohne Adjustierung; Erweitert: Einflussfaktoren Beurteilungspegel, Lärmempfindlichkeit, WEA-Einstellung, wahrgenommenen Stress, visueller WEA-Beeinträchtigung, Geräuschmerkmalen

Abbildung 60: Prozentanteil im Innenbereich hoch belastigter Personen (%HA) durch Windenergieanlagen

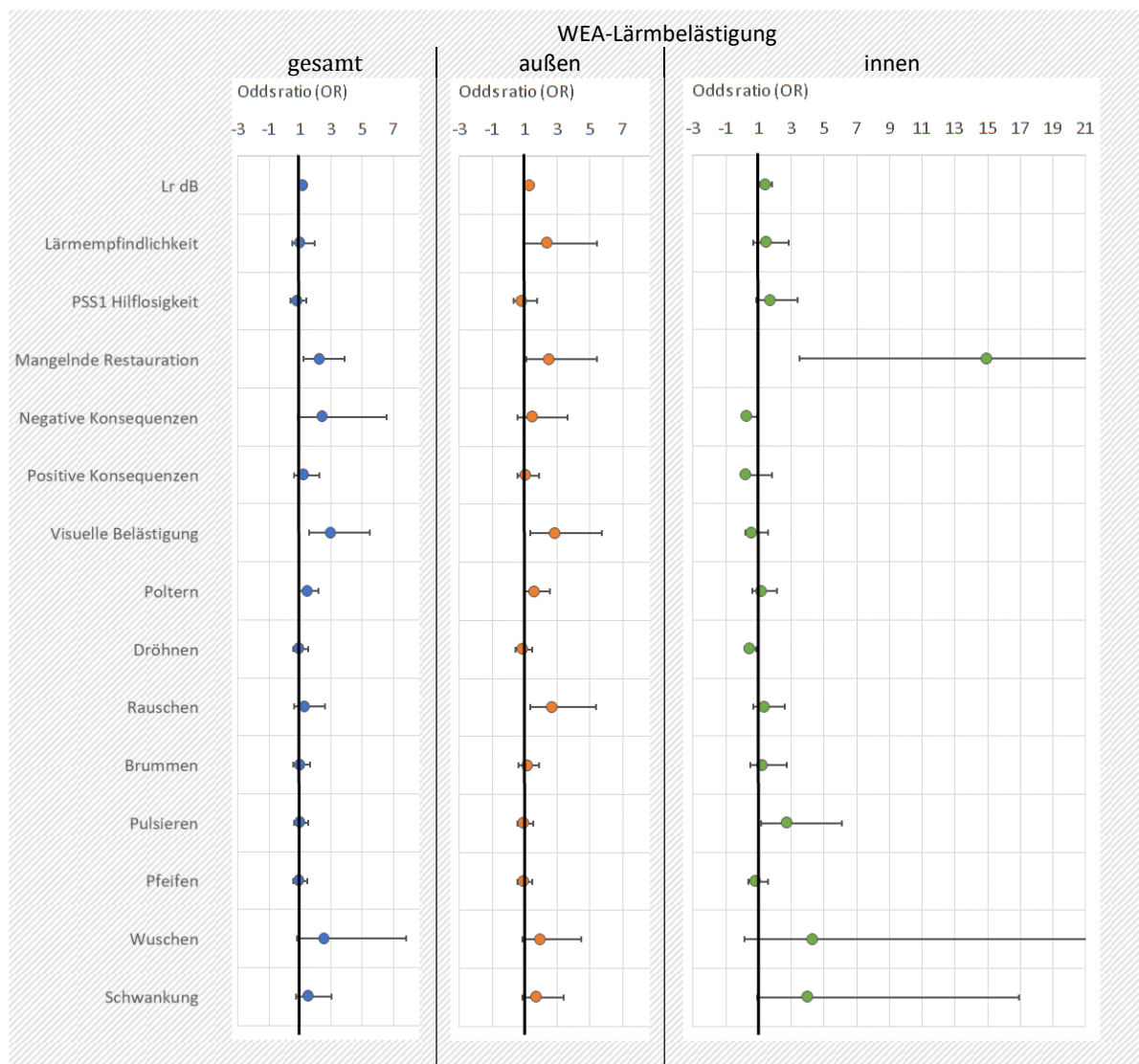


Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

% HA = % hoch Belästigte; WEA = Windenergieanlage; CI-/+= untere/obere Grenze des Konfidenzintervalls der Expositions-Wirkungs-Kurve; Basis: Einflussfaktor Beurteilungspegel L_r ohne Adjustierung; Erweitert: Einflussfaktoren Beurteilungspegel L_r , Lärmempfindlichkeit, WEA-Einstellung, wahrgenommenen Stress, visueller WEA-Beeinträchtigung, Geräuschmerkmalen

Abbildung 61 zeigt die Stärke der verschiedenen Einflussfaktoren auf die WEA-Lärmbelastigung insgesamt, außen und innen mit dem Odds Ratio (OR) als Maß der Effektstärke. Referenzwert ist der Wert 1. Ist das Odds Ratio (Punkte in den Diagrammen) einschließlich seines Konfidenzintervalls (schwarze Linien oberhalb/unterhalb des Punktes) vollständig unterhalb oder oberhalb des Referenzwertes 1, handelt sich um einen statistisch signifikanten Einfluss. Je mehr das Odds Ratio einschließlich seines Konfidenzintervalls vom Wert 1 abweicht, desto größer ist die Effektstärke. Anders als bei den im Abschnitt 6.4.13 vorgestellten Korrelationskoeffizienten geben die hier dargestellten Odds Ratios der jeweiligen Einflussgrößen die jeweils über den Einfluss der übrigen Faktoren hinausgehende Einflusstärke wieder.

Abbildung 61: Effektstärke (Odds Ratio) der Einflussgrößen der WEA-Lärmbelastigung



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

Die dargestellten Punkte geben das Odds Ratio (OR) als Maß der Effektstärke des jeweiligen Einflussfaktors auf die WEA-Lärmbelastigung insgesamt (blaue Punkte), im Außenbereich (orange Punkte) und im Wohnungsinneren (grünen Punkte) wieder. Die wahrgerechten Linien durch die Punkte geben das 95%-Konfidenzintervall des OR wieder. Referenz ist ein OR = 1. Liegt ein OR-Wert einschließlich seines Konfidenzintervalls oberhalb (in der Abbildung rechts) von 1, dann hat der Einflussfaktor einen belästigungserhöhenden Einfluss. Liegt der OR-Wert unterhalb (in der Abbildung links) von 1, dann hat diese Einflussgröße einen belästigungsmindernden Einfluss.

6.5 Ergebnisse der vertiefenden Interviews

Insgesamt nahmen 25 Personen an der qualitativen Befragung teil. Diese wurden randomisiert ausgewählt. Über die verschiedenen Untersuchungsgebiete war die Aufteilung wie folgt: jeweils fünf Personen aus UG 1, UG 2 und UG 5, vier Personen aus UG 3 und sechs aus UG 4.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der qualitativen Befragung in der Reihenfolge des Leitfadens dargestellt. Zunächst erfolgt für jedes Thema eine Gesamtbetrachtung der Aussagen der Probandinnen und Probanden über alle Untersuchungsgebiete hinweg. Dort, wo es Unterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten gibt, werden diese hervorgehoben und

besprochen. Die Zahl in Klammern gibt die Anzahl der Personen an, die die jeweilige Aussage getroffen haben.

6.5.1 Einstellungen zu Windenergieanlagen

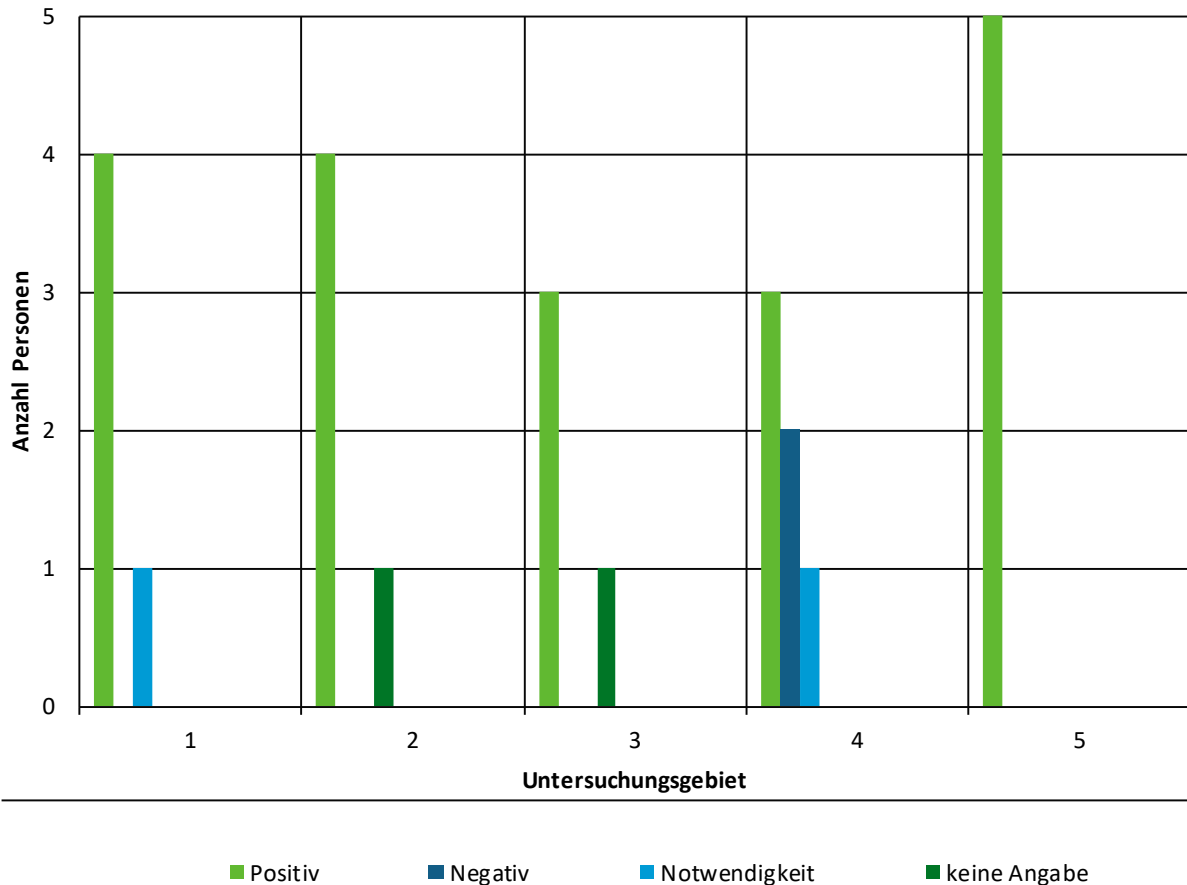
Die meisten Teilnehmenden haben eine positive Einstellung gegenüber Windenergieanlagen (N = 19), wobei vier Personen hier anmerken, dass der Bau und die Nutzung der Anlagen mit der Umgebung vereinbar sein müssen und weder Natur noch Mensch beeinträchtigen sollten. Zwei weitere Personen sprechen sich nicht direkt positiv zu den Windenergieanlagen aus, halten sie aber zwingend für notwendig. Zwei Personen, welche beide aus UG 4 kommen, haben eine negative Einstellung gegenüber Windenergieanlagen. Eine grafische Darstellung zu den Einstellungen zu Windenergieanlagen findet sich in Abbildung 62.

Für 11 Befragte besteht kein persönlicher Bezug oder Berührungspunkt zu den Windenergieanlagen. Andere nennen die visuelle (N = 5) und akustische Wahrnehmung (3) der Anlagen. Drei Personen haben einen beruflichen Bezug bzw. Berührungspunkt zu Windenergieanlagen. Eine Person befürchtet, dass die Anlagen negative Auswirkungen auf ihren Betrieb haben könnten, da Gäste sich bereits über die Windenergieanlagen beschwert haben. Für drei weitere Personen ist das Thema der Windenergie an sich relevant.

Viele Menschen sehen die durch Windenergieanlagen erzeugte Energie als nachhaltig, sauber und als notwendige Alternative zu anderen Energiegewinnungsmethoden an (19). Zwei Personen weisen darauf hin, dass die Speicherung der Windenergie allerdings nicht möglich ist.

Abbildung 62: Einstellungen zu Windenergieanlagen im Vergleich zwischen den Untersuchungsgebieten (n=25)

Einstellungen zu Windenergieanlagen



Quelle: eigene Darstellung, ZEUS GmbH

6.5.2 Auswirkungen von Windenergieanlagen in der Nähe von Wohngebieten

Insgesamt nannten Teilnehmende deutlich mehr negative Auswirkungen von Wohngebiets-nahen Windenergieanlagen als positive Auswirkungen. Bei dieser Frage konnten Teilnehmende auch mehrere Aspekte nennen. Anzumerken ist, dass Teilnehmende sowohl für sich selbst spürbare Auswirkungen nannten sowie auch Auswirkungen, die sie sich generell vorstellen können oder von denen sie von anderen Personen gehört haben.

17 Personen nennen den Lärm der Anlagen als negative Auswirkungen ebenfalls genannte negative Auswirkungen sind Schattenwurf (N = 9), der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes (N = 6) und der Beleuchtung der Windenergieanlagen (N = 5), die vor allem nachts stören kann. Drei Personen kritisieren, dass der erzeugte Strom nicht vor Ort genutzt werden könne. Zwei Befragte aus UG5 gaben zudem die Abholzung des lokalen Waldes als negative Auswirkung an.

6.5.3 Änderungen durch Bau der Windenergieanlagen

Alle Teilnehmenden gaben an, bereits vor dem Aufbau der Windenergieanlagen im Untersuchungsgebiet wohnhaft gewesen zu sein und konnten einen Vergleich zwischen einem Wohnen mit und ohne Windenergieanlagen ziehen. Insbesondere die nun wahrnehmbaren Geräusche (N = 8) und die visuellen Veränderungen (N = 4) fallen hierbei ins Gewicht. Sechs

Personen können keinen Unterschied bzw. Änderungen in ihrem Alltag bzgl. der Windenergieanlagen feststellen.

6.5.4 Begleiterscheinungen

Weiterhin wurden Teilnehmende gefragt, ob sie neben der Wahrnehmung von Windenergieanlagen-Geräuschen noch andere Begleiterscheinungen bemerkt haben oder, ob sie welche vermuten. Die meisten Befragten haben keine anderen physischen oder psychischen Begleiterscheinungen abgesehen von den Geräuschen wahrgenommen. Insgesamt vier Personen gaben an, weitere physische und/oder psychische Begleiterscheinung neben den Geräuschen von den Windenergieanlagen wahrgenommen zu haben. Drei dieser Personen kommen aus UG 3. Zwei der drei Personen geben an, dass sie aufgrund der Windenergieanlagen schon einmal ein Unwohlsein verspürt haben und die dritte Person aus UG 3 gibt an, schon einmal ein Druckgefühl direkt neben einer Windenergieanlagen stehend verspürt zu haben. Eine Person aus UG 2 hat Vibrationen wahrgenommen.

6.5.5 Wahrnehmung von und Störung durch WEA-Geräusche

Bei 16 Personen sind die Geräusche der Windenergieanlagen zuhause hörbar; neun Personen können die Geräusche der Windenergieanlagen zuhause nicht wahrnehmen. Personen, die die Geräusche zuhause wahrnehmen können, wurden gebeten die Lautheit dieser Geräusche anhand einer Skala einzuschätzen. Die Ergebnisse sind sehr divers und insgesamt sowie für die einzelnen Untersuchungsgebiete in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Wahrgenommene Lautheit der WEA-Geräusche (n=16)

Skala	UG 1	UG 2	UG 3	UG 4	UG 5	Gesamt
Sehr laut					1	1
Laut			1		1	2
Eher laut als leise		1		1		2
Weder laut noch leise		1		1	1	3
Eher leise als laut	1	1	1	1		4
Leise	1			1		2
Sehr leise		1	1			2
Gesamt	2	4	3	4	3	16

Etwa ein Drittel der Befragten gab an, sich von den Geräuschen der Windenergieanlagen schon einmal gestört gefühlt zu haben (8). Als Gegenmaßnahmen gaben drei Teilnehmende an, den Geräuschen aus dem Weg zu gehen, indem sie sich draußen von den Anlagen entfernen oder innerhalb des Hauses den Raum wechseln. Eine Person gab an, aufgrund der Geräuschbelastung das Schlafzimmer in einem den Windenergieanlagen abgewandten Raum verlegt zu haben. Viele Befragte leiten keine unmittelbaren Maßnahmen ein, wenn sie sich durch den Lärm von den Anlagen gestört fühlen.

6.5.6 Beschreibung der Geräuschcharakteristika

Der nächste Themenblock behandelte die Geräuschmerkmale sowie die Häufigkeit und den Zeitpunkt des Auftretens. Die Geräusche ausgehend von den Windenergieanlagen werden teils

sehr unterschiedlich beschrieben. Die häufigste Beschreibung für die Geräusche, die von den Windenergieanlagen ausgehen, war ein „Rauschen“ (7). Andere beschrieben es als eine Art „Wuschgeräusch“ (3), ein „Huschen“ (1) oder als „Flopp flopp“ (1). Die Geräusche wurden mit einem Flugzeugüberflug verglichen (2), einem vorbeifahrenden Zug (2), aber auch ähnlich der Geräusche einer laufenden Waschmaschine (1) oder von Meeresrauschen (1) beschrieben. Zwei Personen nahmen auch Geräusche vom Getriebe wahr, wenn sie sich nahe an den Windenergieanlagen aufhielten. Zwei weitere Personen empfanden die Geräusche als angenehm. Einige beschreiben die Windenergieanlagen-Geräusche als intervallartiges Rauschen (3), oder intervallartiges Huschen (1), andere hingegen als gleichmäßig (2). Das Geräusch kommt je nach Windrichtung vor (3). Drei Personen geben an, dass es selten vorkommt und bei zwei Personen tritt es regelmäßig auf. Laut sechs Teilnehmenden tritt das Geräusch vor allem abends auf, insbesondere, wenn andere Geräuschquellen wie Verkehr entfallen oder stark abnehmen. Die Geräusche stören besonders beim Aufenthalt im Freien (4) und bei der Erholung (3).

Die Darstellung der Ergebnisse im Hinblick auf die neun Wortpaarvergleiche erfolgt nur für die ersten beiden Untersuchungsgebiete (UG 2 und UG 1), da nur Teilnehmende der persönlichen Interviews vor Ort das Geräuschbeispiel (Amplitudenmodulation) vorgespielt werden konnte. Eine genaue Übersicht des Wortpaarvergleichs findet sich in Anhang D.6. Es fällt auf, dass Befragte aus UG 1 das Geräusch als wesentlich angenehmer, ruhiger, statischer, harmonischer und komplexer wahrnehmen als Personen aus UG 2. Personen aus UG 2 benutzen insgesamt deutlich häufiger die Antwortkategorie „weder noch“ (22) als Personen aus UG 1 (7 Nennungen „weder noch“). Ein Wortpaar bei dem beide Gruppen besonders häufig „weder noch“ geantwortet haben ist „warm oder kalt“ (jeweils 3).

Keine der befragten Personen ist Mitglied in einer Bürgerinitiative oder sonstigen Vereinigung, die sich mit dem Thema Windenergie auseinandersetzt. Als sonstige, abschließende Anmerkungen sagten zwei Personen, dass Windenergieanlagen einen guten Kompromiss zu bisherigen Energiegewinnungsmethoden darstellen. Zwei Personen waren zudem der Meinung, dass eine Gewinnbeteiligung einer Gemeinde/von Anwohnenden die Akzeptanz von Windenergieanlagen fördern könnte. Eine andere Person kritisierte, dass eine Teilhabe an den Windenergieanlagen für Bürgerinnen und Bürger zu teuer sei. Andere äußerten eine Enttäuschung gegenüber der Politik (1), eine Sorge bzgl. eines geplanten Ausbaus und welche Auswirkungen dieser haben wird (1) und die störende Beleuchtung der Windenergieanlagen (1).

6.6 Schlussfolgerung aus den Befragungsergebnissen

6.6.1 Schlussfolgerung zu den Ergebnissen der Hauptbefragung

Es wurden 463 Anwohnerinnen und Anwohner zu Lärmbelästigung und Störungen durch Windenergieanlagen, ihrem Stressempfinden, den Einstellungen zur Windenergieanlagen und zu verschiedenen Wohnbedingungsaspekten gefragt und für ihren Wohnadressen Beurteilungspegel berechnet.

Die Ergebnisse der Hauptbefragung zeigen, dass die Lärmbelästigungsurteile durch Windenergieanlagen an den fünf untersuchten Standorten gering ausfällt. Das heißt, im Durchschnitt liegt der Grad der Belästigung durch Windenergieanlagen insgesamt bei 1,75 auf einer Beurteilungsskala von 1 (überhaupt nicht gestört oder belästigt) bis 5 (äußerst gestört oder belästigt). Dies entspricht in etwa dem in der Befragungsstichprobe geäußerten durchschnittlichen Grad der Belästigung durch Straßenverkehrslärm von 1,78 in den insgesamt eher ländlich strukturierten Untersuchungsgebieten mit vergleichsweise geringem

Straßenverkehrsaufkommen. Der Bereich des Beurteilungspegels L_r für Tag und Nacht liegt in den Untersuchungsgebieten im Bereich von 16 dB bis 43 dB. Es konnten keine Messungen oder Berechnungen von Geräuschpegeln anderer Lärmquellenarten, z. B. Straßenverkehr, vorgenommen werden, die als Referenzwert für die fünf betrachteten Untersuchungsgebiete herangezogen werden könnten. Ein Quellenvergleich in Bezug auf die Belästigung ist aus den vorliegenden Studiendaten heraus nur eingeschränkt möglich, da für eine Interpretation von Gemeinsamkeiten (z. B. in der Lästigkeit von WEA- und Straßenverkehrsgeräuschen) und Unterschieden, die Geräuschbelastungen, die den Belästigungsurteilen zugrunde liegen, für alle zu vergleichenden Quellenarten bekannt sein müsste. Es ist aber möglich, die in dieser Studie gefundenen Ergebnisse zur WEA-Belästigung mit allgemeinen, generalisierten Ergebnissen der Lärmwirkungsforschung zu vergleichen. Eine Möglichkeit stellen die Leitlinien für Umgebungslärm in der europäischen Region von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) von 2018 (WHO, 2018) dar sowie das für die Wirkung der Lärmbelästigung den Leitlinien zugrundeliegende systematische Review zur Umgebungslärmbelästigung (Guski et al., 2017). Hierauf wird im nächsten Abschnitt 6.7 weiter eingegangen.

Bezüglich der Frage, welche Bedeutung amplitudenmodulierten Geräuschemissionen der Windenergieanlagen für die Lärmbelästigung der befragten Anwohnenden an den Windenergieanlagen-Standorten haben, ergibt sich folgendes Bild:

- ▶ Unter den Geräuschmerkmalen ist es am ehesten der Grad der Zustimmung zur Beschreibung der -Geräusche als „Wuschen“, der einen Einfluss auf die WEA-Lärmbelästigung hat, gefolgt von der Beschreibung als (vermutlich periodisch gemeintes) „Rauschen“ aber auch „Pulsieren“. Vor allem das „Wuschen“ ist dasjenige Geräuschmerkmal, das von den befragten Personen im Vergleich zu anderen Geräuschcharakteristika häufiger als das am stärksten belästigende Merkmal genannt wird. Diese Geräuschbeschreibungen „Wuschen“, (periodisches) „Rauschen“ sowie das „Pulsieren“ können als subjektive Beschreibungsmerkmale von Amplitudenmodulationen verstanden werden.
- ▶ Die WEA-Lärmbelästigung unterscheidet sich zwischen den Untersuchungsgebieten und zwar dahingehend, dass die Belästigung in UG 1 und UG 3 niedriger ist als in den übrigen Untersuchungsgebieten. Diese Gebiete zeichnen sich dadurch aus, dass in ihnen die Befragten im geringeren Maße die WEA-Geräusche als „Wuschen“ beschreiben und es sind die Gebiete mit niedrigeren Auftrittshäufigkeiten von erkannten, stabil vorliegenden AM als in den übrigen Gebieten. Insofern gibt es eine augenscheinliche Korrespondenz zwischen den gebietsbezogenen Unterschieden in der Lärmbelästigung, der subjektiv wahrgenommen AM und den unterschiedlichen Auftrittshäufigkeiten der während der Messungen erkannten AM in den Gebieten. Keine Korrespondenz scheint es dagegen in Bezug auf die Modulationstiefe der AM zu geben.
- ▶ Aus den Befunden wird daher abgeleitet, dass die Auftrittshäufigkeit von erkannten, stabil vorliegenden periodischen AM und deren subjektive Wahrnehmung einen steigernden Effekt auf die WEA-Lärmbelästigung hat. Auch die von den befragten Personen der Vertiefungsstudie erhaltenen Hinweise zum störenden Charakter der WEA-Geräusche bestätigen diesen Eindruck. Wie im Kapitel 7 noch im Detail gezeigt wird, zeigt sich auch in den Hörversuchen ein deutlicher Einfluss der AM auf die Kurzzeitbelästigung.

Neben dem Beurteilungspegel haben auch nicht-akustische Faktoren einen Einfluss auf das Lärmbelästigungsurteil: die individuelle Lärmempfindlichkeit, die Einstellung zur Windenergie und zu den lokalen Windenergieanlagen, das allgemeine psychische Stressempfinden, d.h. vor allem der stressfördernde Faktor „Hilflosigkeit“ (in Stresssituationen) und die visuellen Beeinträchtigungen (der bloße Anblick, Schattenwurf, das Hinderniskennzeichen, die

Drehbewegungen, und die Wirkung auf das Landschaftsbild). Unter diesen Faktoren sind es vor allem die Einstellung der durch die Windenergieanlagen verursachte Einschränkung der Nutzung des Außenwohnbereichs und die hierbei eingeschränkten Erholungsmöglichkeiten und die visuellen Beeinträchtigungen, die das Lärmbelästigungsurteil prägen.

Bezogen auf den %HA-Anteil durch WEA-Lärm insgesamt sowie im Außenbereich sind es unter den nicht-akustischen Faktoren insbesondere die Einstellung, dass die Windenergieanlagen-geräusche Aufenthalt und Erholung im Freien beeinträchtigen, und die visuelle Belästigung durch die Anlagen, die auf das Lärmbelästigungsurteil einwirken. Für die WEA-Lärmbelästigung im Innenbereich hat die wahrgenommene Beeinträchtigung von Aufenthalts- und Erholungsmöglichkeit im Freien einen sehr deutlichen Einfluss auf den %HA-Anteil. Es wird angenommen, dass die befragten Personen das Erleben der mangelnden Erholungsmöglichkeit im Außenbereich „mit ums Haus“ bzw. fühlen sich in der Wohnung / im Haus umso mehr durch WEA-Geräusche belästigt wenn sie dabei die Wahrnehmung haben, sich draußen nicht in Ruhe aufhalten und sich im Wohnumfeld erholen zu können.

Der statistische Zusammenhang (die Korrelation) zwischen Beurteilungspegel und der Lärmbelästigung durch Windenergieanlagen ist im Vergleich zu der üblichen Stärke des Zusammenhangs zwischen Geräuschpegeln und Belästigungsurteilen beim Verkehrslärm (Guski et al., 2017) geringer. Wenngleich die Beurteilungspegel in einfachen und erweiterten Modellen signifikant sind, d. h. mit zunehmendem Beurteilungspegeln auch die WEA-Lärmbelästigung ansteigt, so zeigen die Analysen in dieser Studie, dass andere Faktoren, insbesondere die oben genannten nicht-akustischen Faktoren zur WEA-Lärmbelästigung beitragen und diese eine teilweise höhere Effektstärke in der Vorhersage des Anteils belästigter bzw. hoch belästigter Personen aufweisen. Diese weiteren Faktoren modifizieren die Expositions-Wirkungsrelation zwischen Beurteilungspegeln und WEA-Lärmbelästigung. Dies wird dadurch ersichtlich, dass bei statistischer Kontrolle der weiteren nicht-akustischen Faktoren und wahrgenommenen Geräuschmerkmale in den Expositions-Wirkungsmodellen diese sich in der Höhe und in der Steigung (nach unten) verschieben. Der %HA-Anteil, der durch den Beurteilungspegel aufgeklärt wird, sinkt dabei. Im Falle der WEA-Lärmbelästigung im Innenbereich trägt der Beurteilungspegel kaum noch zur Vorhersage des %HA-Anteils bei wenn die weiteren Einflussgrößen dem Vorhersagemodell hinzugefügt werden.

6.6.2 Schlussfolgerung zu den Ergebnissen der vertiefenden Befragung

Aus der Vertiefungsbefragung geht hervor, dass die befragten Personen generell eine positive Einstellung gegenüber Windenergie allgemein und den lokalen Windenergieanlagen haben. Auch wenn die meisten Befragten sich nicht direkt durch die Windenergieanlagen gestört fühlen, können sie sich vorstellen, dass sich andere Personen beispielsweise durch Lärm, Schattenwurf sowie den Eingriff in das Landschaftsbild und die Beleuchtung gestört fühlen. Die Geräusche, die von den Windenergieanlagen ausgehen, werden größtenteils als Rauschen beschrieben, das vor allem abends auffällt. Dies ist ein Hinweis auf den störenden Charakter der Amplitudenmodulation. Grundsätzlich gibt es im Gegensatz zu den Ergebnissen der Hauptbefragung augenscheinlich sehr wenige Unterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten in den Aussagen zu den Geräuschmerkmalen der Windenergieanlagen. Neben Lärm scheinen auch in der Vertiefungsbefragung visuelle Auswirkungen relevant zu sein. Aufgrund der kleinen Stichprobe von 25 Personen in der Vertiefungsbefragung lassen sich aus den identifizierten Unterschieden keine konkreten Schlüsse ziehen. Sie unterstützen jedoch die Erkenntnisse aus der Hauptbefragung.

6.7 Diskussion und Einordnung der Befragungsergebnisse

Der in dieser Studie verwendete Beurteilungspegel L_r beschreibt einen 24h-Betrieb der Windenergieanlagen. Das heißt, aufgeteilt auf den Tagespegel von 6 bis 22 Uhr $L_{r,Tag}$ und den Nachtpegel für die Zeit von 22 bis 6 Uhr $L_{r,Nacht}$ ergeben sich die gleichen Pegelwerte für $L_{r,Tag}$ und $L_{r,Nacht}$ am jeweiligen Wohngebäude der befragten Personen. Insgesamt weisen sehr viele Wohngebäude einen geringen berechneten Pegelwert von < 20 bis 43 dB auf. Dies geht einher mit einer gering ausgeprägten Lärmbelastigung der teilnehmenden Personen. D. h. auf der fünfstufigen verbalen Belästigungsskala liegt das Belästigungsurteil der befragten Personen im Durchschnitt zwischen den verbalen Kategorien „überhaupt nicht gestört oder belästigt“ (1) und „etwas gestört oder belästigt (2). Dieses Ergebnis ist so zu verstehen, dass, da die befragten Personen geringen Pegelwerten ausgesetzt sind, auch deren Windenergieanlagen-Lärmbelastigung über die ganze Stichprobe betrachtet im Mittelwert der gesamten Belästigungsskala von 1 (überhaupt nicht belästigt) bis 5 (äußerst belästigt) gering ist. Eine Expositions-Wirkungskurve zeichnet hingegen eine Wenn-Dann-Situation der hoch belästigten Personen ab, d. h. diese gibt an, wie hoch der Prozentanteil hoch belästigter Personen bei einem bestimmten Pegel ist, auch wenn dieser in der Stichprobe nur selten vorkommt.

In dieser Studie sind solche Expositions-Wirkungskurven für den Anteil hoch belästigter Personen bezogen auf die WEA-Lärmbelastigung insgesamt, sowie getrennt nach Außen- und Innenbereich der Wohnung bezogen auf den Beurteilungspegel in Regressionsanalysen erstellt worden. Sie werden im Nachfolgenden im Vergleich zu den Leitlinien für Umgebungslärm für die europäische Region der Weltgesundheitsorganisation (WHO) von 2018 eingeordnet. Allerdings unterliegt diese Einordnung der Einschränkung, dass sich der Beurteilungspegel in dieser Studie (L_r), errechnet nach dem Interimsverfahren, von dem jahresgemittelten Tag-Abend-Nacht-Pegel L_{den} , der von der WHO in den Leitlinien verwendet wird, unterscheidet. Der L_{den} ist zusammengesetzt aus einem Mittelungspegel für die Tagzeit von 6 bis 18 Uhr (L_{day}), einem Mittelungspegel für die Abendzeit von 18 bis 22 Uhr ($L_{evening}$) und einem Mittelungspegel für die Nachtzeit von 22 bis 6 Uhr (L_{night}). Vor energetischer Aufsummierung dieser drei Mittelungspegel wird der Abendpegel mit einem Zuschlag von 5 dB und der Nachtpegel mit einem Zuschlag von 10 dB versehen, um dem besonderen Ruheanspruch zu diesen Tageszeiten Rechnung zu tragen.

Piorr (2019) liefert einen Vorschlag zur Umrechnung des Beurteilungspegels, berechnet nach Interimsverfahren, in den Tag-Abend-Nachtpegel. Aufgrund fehlender Informationen über ganzjährige Windbedingungen (Geschwindigkeit, Richtung) und Betriebszeiten wird in dieser Studie keine direkte Umrechnung des Beurteilungspegels vorgenommen, sondern lediglich ein grober Vergleich durchgeführt.

Die WHO-Leitlinien für Umgebungslärm (WHO, 2018) setzen bei der Lärmbelastigung die Schwelle für die gesundheitsbezogene Relevanz bei einem Wert des Tag-Abend-Nachtpegels L_{den} an, bei dem unter den Personen, die dieser Belastung ausgesetzt sind, der Anteil hoch belästigter Menschen (%HA; *highly annoyed*) den Wert von 10% überschreitet. Bei welchen Pegelwerten dies der Fall ist, ergibt sich aus generalisierten, quellenspezifischen Expositions-Wirkungsfunktionen. Das Review von Guski et al. (2017) zur Umgebungslärmbelastigung enthält solche Expositions-Wirkungsfunktionen, auf die sich die WHO in ihren Leitlinienempfehlungen im Hinblick auf die Lärmbelastigung stützt. Für andere Gesundheitswirkungen liegen weitere systematische Reviews vor, die im Zuge der Entwicklung der WHO-Umgebungslärmleitlinien erarbeitet wurden. Für verschiedene entscheidende Gesundheitswirkungen - neben der Lärmbelastigung sind dies Schlafstörungen, Herzerkrankungen, kognitive Beeinträchtigung und Hörschäden – wurden von der WHO (2018) in den Leitlinien Schwellenwerte formuliert, bei denen nach Einschätzung der WHO Guideline Development Group die gesundheitliche Relevanz

erreicht ist, d. h. oberhalb dessen gesundheitsrelevante Wirkungen auftreten. Die Relevanzschwellen sind in den Leitlinien pro Gesundheitswirkung des Umgebungslärms getrennt nach Lärmquellenart definiert. Auch wenn unterschiedliche Gesundheitseffekte von der WHO berücksichtigt wurden, orientieren sich die Empfehlungen für den Ganztagesdauerschallpegel (L_{den}) für alle Lärmquellen an der chronischen Lärmbelastigung, da die Relevanzschwelle von 10% HA im Vergleich zu den anderen Relevanzschwellen beim niedrigsten Dauerschallpegel überschritten wurde. Für die verschiedenen Lärmquellen wurden die folgenden Leitlinienwerte durch die WHO festgelegt:

- ▶ Flugverkehrslärm bei $L_{den} = 45$ dB(A),
- ▶ Straßenverkehrslärm bei $L_{den} = 53$ dB(A),
- ▶ Schienenverkehrslärm bei $L_{den} = 54$ dB(A),
- ▶ WEA-Lärm bei $L_{den} = 45$ dB(A)

Der Wert von $L_{den} = 45$ dB für Windenergielärm beruht ausschließlich auf den Ergebnissen des systematischen Evidenz-Reviews zur Lärmbelastigung von Guski et al. (2017). Dort wurden die Ergebnisse der Meta-Analyse von Janssen et al. (2011) und einer japanischen Studie von Kuwano et al. (2014) vorgestellt und die genannten Leitlinienwerte anhand von Meta-Analysen ermittelt, die sich auf Basis-Modelle beziehen, d. h. nur den Beurteilungspegel L_{den} berücksichtigen. In diesen WHO-Analysen sind nicht-akustische Faktoren und weitere Geräuschmerkmals-Prädiktoren nicht enthalten. Grund ist, dass die verschiedenen internationalen Studien (a) unterschiedliche Einflussgrößen und (b) diese in verschiedener Weise erfassen und damit eine Vergleichbarkeit von erweiterten Vorhersagemodellen zum %HA-Anteil, die mehrere Einflussfaktoren enthalten, erheblich erschwert ist.

In der vorliegenden Studie liegen die Werte des Beurteilungspegels L_r , bei denen ein Anteil von 10% hoch belastigter Personen überschritten wird (%HA = 10%), nach dem Basismodell, also dem Vorhersagemodell, in dem nur der Geräuschpegel aber keine weiteren Einflussfaktoren berücksichtigt wurde,

- ▶ für die WEA-Lärmbelastigung insgesamt bei $L_r = 31$ dB,
- ▶ für die WEA-Lärmbelastigung im Außenbereich bei $L_r = 32$ dB,
- ▶ für die WEA-Lärmbelastigung im Innenbereich bei einem Beurteilungspegel außen in Höhe von bei $L_r = 38$ dB

Bei der vereinfachenden Annahme einer ganzjährigen Mitwindsituation und einer täglichen gleichmäßigen WEA-Geräuschverteilung über 24 Stunden wären dem Beurteilungspegel L_r ein Wert von 6,4 dB hinzuzuaddieren, um auf den entsprechenden L_{den} -Wert zu kommen. Aber selbst dann würde in dieser Studie der 10%-Anteil hoch durch WEA-Geräusche belastigter Personen bei mindestens 1 bis 8 dB niedrigeren L_{den} -Werten liegen als es die WHO für den 10%-HA-Anteil angibt. Diese Studie als auch die Empfehlungen der WHO (2018) zu WEA-Geräuschen zeigen, dass WEA-Geräusche bei gleicher Dauerschallbelastung L_{den} zu einem höheren %HA als Verkehrslärm führen. Dies gilt insbesondere für den Straßen- und Schienenverkehrslärm.

Mehrere Reviews zeigten ebenfalls (u. a. Freiberg et al., 2019; van den Berg & van Kamp, 2017; van Kamp & van den Berg, 2020), dass bei gegebenem Pegel eine höhere Lärmbelastigung durch Windenergieanlagen besteht als im Vergleich zu anderen Umgebungslärmquellen. Michaud et al. (2016b) gehen davon aus, „that communities are between 11 and 26 dB [A-weighted SPL] less tolerant of WTN than of other transportation noise sources“ (S. 1455). Der Vergleich des Basis-Modells dieser Studie mit anderen Lärmquellen, insbesondere Straßenverkehrslärm, kommt

anhand der 10%HA-Relevanzschwelle ebenfalls zu dem Ergebnis, dass WEA-Lärm bei gleichem Pegel als stärker belästigend empfunden wird.

In den Analysen der erweiterten Modelle hat sich gezeigt, dass von den nicht-akustischen Prädiktoren die Einstellungen zu lokalen Windenergieanlagen, der allgemeine Stressfaktor „Hilflosigkeit“ (als Indikator für höhere Vulnerabilität), die visuelle Beeinträchtigung und das Geräuschmerkmal Wuschen einen teils hohen Einfluss auf den Prozent-Anteil hoch belästigter Personen haben. Das heißt, die anderen Einflussgrößen moderieren die Expositions-Wirkungsbeziehung zur WEA-Lärmbelastigung und üben einen stärkeren Effekt auf die WEA-Lärmbelastigung aus als der Beurteilungspegel selbst.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die visuelle Beeinträchtigung (inklusive Schattenwurf, blinkender Hinderniszeichnung, die Tatsache, dass die Windenergieanlagen überhaupt sichtbar sind, die Zerstörung des Landschaftsbilds) zur WEA-Lärmbelastigung beitragen. Dies deckt sich zum Beispiel mit der in den USA durchgeführten Studie zu WEA-Lärm von Haac et al. (2019), die zeigten, dass die visuelle Beeinträchtigung die Lärmbelastigung am meisten erklärt. Hübner und Kollegen (2019) verglichen die Ergebnisse von Haac et al. (2019) mit eigenen Daten aus Erhebungen in Deutschland und der Schweiz. In dieser Re-Analyse wurde kein Zusammenhang zwischen der Lärmbelastigung durch Windenergieanlagen und dem Pegel gefunden. Dies deckt sich mit den niedrigen Korrelationen zwischen WEA-Lärmbelastigung und dem Beurteilungspegel in dieser Studie. Weiterhin zeigten die Ergebnisse von Haac et al. (2019) und Hübner et al. (2019), dass die Sichtbarkeit von Windenergieanlagen die Lärmbelastigung erhöht, was ebenfalls im Einklang mit den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens steht, indem die visuelle Beeinträchtigung zur Erklärung der Lärmbelastigung beitragen. Hübner et al. (ebd.) fanden ebenso eine hohe Bedeutung der Einstellungsfaktoren zu den lokalen Windenergieanlagen für die Vorhersage der WEA-Lärmbelastigung, wobei in dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben vor allem die mangelnde Erholungsmöglichkeit im Außenbereich einen hohen Einfluss aufweist. Eine in Kanada groß angelegte Studie zu den Gesundheitswirkungen von WEA-Lärm kommt ebenfalls anhand ihrer Ergebnisse zu dem Schluss, dass einstellungsbezogene Faktoren zur Lärmbelastigung beitragen (Michaud et al., 2016a, b).

Sowohl Hübner et al. (2019) als auch Michaud et al. (2018a, b) schlagen vor, die Lärmbelastigung nicht separat zu betrachten, sondern vielmehr von einer allgemeinen Belästigung durch Windenergieanlagen zu sprechen und einen „composite annoyance score“ (Michaud et al., 2018a, b) zu bilden, welcher verschiedene Merkmale von Windenergieanlagen u. a. WEA-Lärm und visuelle Belästigung (Michaud et al., 2018a, b) als auch mindestens einen selbstberichteten Stresssymptom (Hübner et al., 2019) zu einem Wert aggregiert. Nach den Ergebnissen von Hübner et al. (2019) kann dieser Wert die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der US-Studie und den deutschen/schweizerischen Studien zur WEA-Lärmwirkung erklären. Es zeigt sich, dass sich die mittlere Lärmbelastigung kaum unterscheidet, jedoch die Gesamtbelastigung durch Windenergieanlagen in Europa höher ist, was insgesamt auf eine generell negativere Einstellung zu Windenergieanlagen und geringerer wahrgenommenen Fairness zurückzuführen ist. Der von Michaud et al. (2018a, b) faktorenanalytisch gebildete composite annoyance score zeigt eine gute Korrelation mit der Distanz zu Windenergieanlagen und mit selbstberichteter Gesundheit. Auch die hier vorliegende Studie zeigt die hohe Bedeutung von WEA-Einstellung und der Korrelation zwischen Lärmbelastigung und visueller Beeinträchtigung, dementsprechend würden die Befunde dieser Studie einer Zusammenlegung von Lärm- und visueller Belästigung nicht widersprechen.

Pohl et al. (2018) fanden in ihrer in Niedersachsen durchgeführten Feldstudie zu den Effekten und Gründen von WEA-Lärm, dass die AM eine wesentliche Ursache der erhobenen

Lärmbeschwerden ist. Schäffer et al. (2018) zeigen in einem Laborversuch, dass die Amplitudenmodulation – hier neben dem Pegel - einen wichtigen akustischen Prädiktor der Lärmbelastung darstellt. Auch Bradley (1994) und Hafke-Dys (2016) zeigen in ihren Laborversuchen, dass amplitudenmodulierte WEA-Geräusche lästiger sind als unmodulierte. Diese Ergebnisse decken sich mit den Befunden der vorliegenden Studie, in denen das Wuschen als Geräuschmerkmal unter allen Geräuschmerkmalen den höchsten Erklärungsanteil am %HA-Anteil aufweist. Das Wuschen wird oftmals als subjektive Wahrnehmung von Amplitudenmodulation verstanden. Damit korrespondierend decken sich die Belästigungsunterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten im Großen und Ganzen mit den Unterschieden in der Auftrittshäufigkeit von erkannten, stabil vorliegenden Amplitudenmodulationen an den verschiedenen Standorten.

7 Hörversuche

Die Lästigkeit von Schallereignissen von Windenergieanlagen hängt maßgeblich von dem Immissionspegel am Ort des Hörers ab. Andere Einflussgrößen, wie z. B. das Spektrum des Signals oder dessen zeitliche Struktur, wirken sich jedoch ebenfalls auf das Empfinden der Lästigkeit aus. Darüber hinaus werden aber auch weitere Einflussgrößen wirksam, die sich nicht direkt aus dem Signal ableiten lassen. Deshalb wurden in dieser Studie AM nicht nur basierend auf einer Signalanalyse und einer Belästigungsbefragung analysiert, sondern ihre Lästigkeit wurde im Rahmen von Hörversuchen in einer Laborsituation in drei Untersuchungsgebieten untersucht. Zusätzlich wurden Vergleichsexperimente an einem weiteren Standort mit typischerweise nicht von den Lärmemissionen von Windenergieanlagen betroffenen Probanden durchgeführt. Die Untersuchungen zielen darauf ab, einen Bezug zwischen dem Immissionspegel und der Stärke der AM zu bestimmen. Die im Folgenden detailliert beschriebenen Untersuchungen unterteilten sich in zwei Teilversuche. In dem ersten wird der Einfluss zeitlich konstanter AM untersucht, im zweiten zeitlich ansteigende bzw. abfallende AM.

7.1 Stimuli

Für die in den Hörversuchen genutzten Stimuli wurden sowohl die Verwendung von aufgenommenen Stimuli als auch von synthetisch erzeugten Stimuli erwogen. Für synthetische Stimuli spricht insbesondere die freie Parametrierbarkeit der einzelnen Einflussgrößen, insbesondere der Stärke, des zeitlichen Verlaufes und der Dauer der AM. Allerdings haben synthetische Stimuli den Nachteil, dass sie nicht exakt den Signalen von Windenergieanlagen gleichen und somit die Lästigkeitsbewertung um einen unbekanntem Wert beeinflussen könnten. Um zu prüfen, ob die Lästigkeit von der genauen Lärmsituation am Immissionsort (Anlagentyp, Anzahl der Anlagen, Abstand und daraus resultierend dem Spektrum der aufgenommenen Signale) abhängt, wurden Stimuli von zwei verschiedenen Aufnahmeorten genutzt. Für die Hörversuche wurde dazu auf Audioaufnahmen der Messkampagnen (Abschnitt 2) zurückgegriffen, die im Jahr 2018 an zwei Messorten durchgeführt wurden.

- Aufnahmeort 1: Abstand von ca. 1 km zu einem Windpark mit drei Windenergieanlagen der 2 MW- bis 3 MW-Klasse mit einem Rotordurchmesser zwischen 80 m and 100 m
- Aufnahmeort 2: Abstand von ca. 750 m zu einer einzelnen Windenergieanlage der 2 MW- bis 3 MW-Klasse mit einem Rotordurchmesser von ungefähr 130 m

Somit variieren die Charakteristika der im Rahmen der Hörversuche eingesetzten Stimuli aufgrund der unterschiedlichen Typen, Größen und Anzahl der Windenergieanlagen, sowie dem Abstand zwischen Aufnahmeort und Anlagen. Die Aufnahmen erfolgten mit einem B&K 4189 Mikrofon, das in einer Höhe von 7 m aufgestellt war. Als Vorverstärker fungierte ein B&K 2669C, als AD-Wandler ein RME HDSPe AIO. Für beide Anlagen wurden Stimuli aus den Aufnahmen der Anlagen extrahiert, die unterschiedliche AM aufweisen.

Als Maß für auftretende AM wurden die Kenngrößen $L_{HP,05}-L_{HP,95}$ und ΔL_{AM} nach Abschnitt 3.4 genutzt. Der $L_{HP,05}-L_{HP,95}$ ist der Differenzwert zwischen den Perzentilhäufigkeiten 5 und 95 des hochpassgefilterten Signals bei der Betrachtung einer einzelnen AM. Dieses Maß für die AM wurde in vergleichbarer Form auch in (Schäffer et al., 2016; Schäffer et al., 2017) genutzt.

Die Länge der Stimuli wurde auf jeweils 25 Sekunden begrenzt. Die Wahl der Darbietungsdauer der Stimuli orientierte sich an der Studie von Schäffer et al. (2016), in der erforderliche und hinreichende Längen für eine Lästigkeitsbeurteilung zur Durchführung von Hörversuchen ermittelt wurden. Da sämtliche in dieser Studie genutzten Stimuli von im Realbetrieb gemessenen Anlagen stammen, sind auftretende Pegelschwankungen und dementsprechend auch die AM über einen Aufnahmezeitraum von 25 s nicht vollständig konstant, sondern

schwanken geringfügig. Um die im Hörversuch verwendeten Nennwerte der AM von 0 dB, 2 dB, 4 dB, 6 dB und 8 dB zu erzeugen, wurden manuell aus den Langzeitaudioaufnahmen entsprechende Bereiche extrahiert. Für die Stimuli des Aufnahmeortes 1 wurden Sequenzen vom 15.05.2018 gewählt, bei dem Aufnahmeort 2 vom 28.11.2018 (dynamische Stimuli und 4 dB AM), vom 06.12.2018 (6 dB AM und 8 dB AM) und vom 15.12.2018 (2 dB AM). Alle Stimuli stammen von Messungen in Nächten zwischen 00:00 Uhr und 03:00 Uhr.

Aus den daraus vorausgewählten Stimuli wurden dann die Sequenzen gewählt, die möglichst die AM von 2 dB, 4 dB, 6 dB und 8 dB im Signal aufwies. Da die Abschnitte mit konstanten AM oft deutlich kürzer als 25 s waren und bei einem Aneinanderhängen der Abschnitte leicht perceptiv wiedererkennbare Sequenzen entstehen, wurde jeweils nur eine einzelne Periode gewählt, die dann so oft hintereinander gesetzt wurde, bis der Stimulus die gewünschte Länge von 25 s hatte. Die einzelnen Audioteile wurden mittels Cross-Fades derart aneinandergereiht, dass es keine hörbaren Übergänge gab. Da die Periodendauer auch einen Einfluss auf die Wahrnehmung haben kann, wurden AM mit einer möglichst identischen Periodendauer von $1,2 \pm 0,1$ s verwendet (Ausnahme Aufnahmeort 2 8 dB AM: Periodendauer 1,6 s). Dies sind für Windenergieanlagen übliche Periodendauern bei üblichen Leistungszuständen.

Für den zweiten Teil der Hörversuche wurden Stimuli extrahiert, die über der Zeit ansteigende oder abfallende Pegelschwankungen aufweisen. Dieses wird im Folgenden als dynamisch bezeichnet. Hierzu wurden für beide Anlagen Stimuli mit einer Dauer von ebenfalls 25 s entsprechend folgender Vorgehensweise erstellt. Es wurden Stimuli gewählt, bei denen ein möglichst gleichmäßiger Anstieg bzw. Abfall der AM über kurze Zeiträume von 5 s bis 8 s erfolgt. Dieser dynamische, d. h. der sich in der Amplitudenmodulation verändernde Teil wird in die Mitte des synthetisierten Stimulus gelegt, zu den früheren sowie den späteren Zeitabschnitten werden wieder passend Perioden aus diesem kurzen Abschnitt ergänzt. Dabei wird die gleiche Vorgehensweise wie für die Synthese der statischen Stimuli gewählt, und es werden jeweils die Segmente einer Periode mehrfach aneinandergehängt. Es ergaben sich für den Aufnahmeort 2 Sequenzen, bei denen sich die AM von 4 dB nach 5 dB, sowie von 6,5 dB nach 5 dB verändert. Für den Aufnahmeort 1 wiesen die ausgewählten Sequenzen deutlich stärkere Änderungen der AM von 3,5 dB nach 7,5 dB und von 8 dB nach 4 dB auf. Bei diesen Stimuli lag die Periodendauer im Bereich von $1,6 \pm 0,3$ s und schwankte somit etwas mehr als bei den statischen Stimuli.

Schließlich wurden für die Darbietungen in den Hörversuchen auch Stimuli aus den Aufnahmen synthetisiert, die keine AM aufweisen. Solche Stimuli waren allerdings in den untersuchten Zeitabschnitten der Messungen nicht vorhanden. Deshalb wurden diese Signale ebenfalls durch die Zusammensetzung verschiedener Audioaufzeichnungen erstellt und es wurde dazu die folgende Vorgehensweise gewählt: Das Signal mit der AM von 2 dB wird vielfach randomisiert zyklisch zeitverschoben mit sich selbst überlagert. Es wurden 125 zeitlich zufällige Überlagerungen gewählt. Abschließend wurde durch eine Normierung wieder die ursprüngliche mittlere Energie in dem Signal rekonstruiert. Daraus ergab sich ein Signal, das ein nahezu unverändertes Frequenzspektrum und die gleiche mittlere Energie aufweist, in dem jedoch AM nicht mehr wahrnehmbar sind. Als rechnerisches Maß $L_{HP,05}-L_{HP,95}$ für die auftretende AM ergaben sich für diese Stimuli noch AM von ca. 1,4 dB. Trotzdem werden diese Stimuli im Folgenden als 0 dB AM gekennzeichnet. Weitere Angaben zu dem $L_{HP,05}-L_{HP,95}$ jedes Stimulus, sowie dem gemäß des in Abschnitt 4.4 erläuterten Verfahren bestimmten ΔL_{AM} finden sich in Anhang E.

Für beide Versuchsteile wurden Stimuli mit unterschiedlich hohen AM und mittleren Wiedergabepegeln -3 dB, 0 dB + 3 dB, +6 dB in Bezug auf einen für Windenergieanlagen typischen Immissionspegel L_{eq} von 35 dB(A) erstellt. Es wurden im ersten Versuchsteil für jede der Anlagen 20 Stimuli präsentiert, und es ergab sich ein Hörversuchsdesign bestehend aus 4 Immissionspegeln \times 5 AM \times 2 Aufnahmeorten. Für den zweiten Versuchsteil wurden für jede

gemessene Anlage 12 Stimuli verwendet. Der zweite Hörversuchsteil hatte somit ein Design von 4 Immissionspegeln × 3 dynamische Varianten der AM × 2 Aufnahmeorten.

7.2 Aufbau

Für die Wiedergabe der Stimuli wurde sowohl eine lautsprecherbasierte als auch eine kopfhörerbasierte Hörbarmachung erwogen. Die Entscheidung fiel für eine kopfhörerbasierte Wiedergabe der Stimuli, weil hier die Wiedergabepegel besser kontrollierbar sind und z. B. nicht von dem genauen Abstand zwischen Hörer und Lautsprecher abhängen. Weiterhin spielt bei Kopfhörerdarbietung der Wiedergaberaum nur eine untergeordnete Rolle. Raumakustische Eigenschaften, wie z. B. Raumreflexionen oder Nachhall beeinflussen hier die Versuchsdurchführung nicht. Einzig Hintergrundgeräusche im Wiedergaberaum müssen berücksichtigt werden, bzw. in Bezug auf das über Kopfhörer dargebotene vernachlässigbar sein. Dieser Einfluss wurde durch die Verwendung geschlossener Kopfhörer (AKG K 271) reduziert. Die Darbietung der Stimuli erfolgte über eine an ein Notebook Lenovo V130 angeschlossene externe Soundkarte (Focusrite Scarlet 2i2).

Zur Kalibrierung der Wiedergabepegel diente eine vorab durchgeführte Labormessung. Hierzu wurde ein Kunstkopf des Typs Neumann KU 100 verwendet. Somit konnte ein definierter Schalldruckpegel am Ohr des Kunstkopfes eingestellt werden, der einem definierten Schalldruckpegel im Freifeld ohne Kopfhörer entspricht. Insgesamt wurden die Hörversuche mit drei komplett baugleichen Systemen aus Kopfhörern und externer Soundkarte durchgeführt. Jeder einzelne der verwendeten Kopfhörer und jede der verwendeten Soundkarten wurde auf den vorgegebenen Wiedergabepegel kalibriert. Die Unterschiede zwischen den baugleichen Kopfhörern und den baugleichen Soundkarten lagen allerdings bei weniger als 1 dB.

7.3 Durchführung

Die wahrgenommene Lästigkeit wurde basierend auf der 11-Punkte-Skala der ISO/TS 15666 (2003) beurteilt. Diese Skala umfasst 11 Werte von 0 – 10. Hierbei entspricht der Wert 0 „überhaupt nicht lästig“, der Wert 10 der maximalen Lästigkeit. Die Skala wurde in Schäffer (2016) für die Lästigkeit von WEA-Geräuschen erprobt und evaluiert. Basierend auf der ISO/TS 15666 (2003) bewerten die Probanden die Lästigkeit, indem sie die folgende Frage beantworteten [in Deutsch, modifiziert aus ISO/TS 15666]: "Wenn Sie sich vorstellen, dass dies die Klangsituation in Ihrem Garten ist, welche Zahl von 0 bis 10 repräsentiert am besten, wie sehr Sie sich dadurch belästigt, gestört oder geärgert fühlen würden?".

Die psychoakustischen Hörversuche wurden in Form von „Fokustests“ durchgeführt, d. h. die Teilnehmenden sollten bewusst auf die dargebotenen Stimuli hören und diese während oder direkt nach der Wiedergabe bewerten. Vor Beginn des eigentlichen Tests wurden in einer Einführung fünf Stimuli präsentiert, die nicht in die Auswertung einbezogen wurden. Diese Stimuli waren so gewählt, dass sie sowohl potenziell sehr lästige und sehr wenig lästige Stimuli beinhalteten. Auf diese Weise konnten sich die Probanden an den Ablauf und an die Unterschiedlichkeit der dargebotenen Stimuli gewöhnen.

In dem Hörversuch wurde das Abspielen des nächsten Stimulus direkt nach der Bewertung des vorigen gestartet und konnte durch die Probanden nicht abgekürzt oder unterbrochen werden. Jeder Stimulus wurde von den Probanden nur einmal bewertet. Eine häufigere Bewertung hätte zwar eine Beurteilung von Varianzen der Bewertungen durch die Teilnehmenden ermöglicht, die Tests aber erheblich verlängert. Die Teilnehmenden führten die Hörversuche einzeln oder mit zwei Probanden gleichzeitig an zwei völlig getrennten Systemen in demselben Raum durch. In diesen Fall gab es keine Interaktion der Probanden untereinander. Die Steuerung des Ablaufes der Hörversuche wurde durch die Software PsychoPy (Peirce, 2019) vorgenommen.

Diese übernahm die randomisierte Wiedergabe der Stimuli und auch die Erfassung der Beurteilungen, über eine grafische Benutzeroberfläche von den Probanden mit Hilfe der Maus eingegeben.

7.3.1 Hörversuchsorte

Die Versuche wurden an den vier verschiedenen Hörversuchsorten durchgeführt

- UG 1: Turnhalle im Bürgerhaus. Hintergrundgeräuschpegel von 25 dB(A)
- UG 2: Gemeinschaftsraum im Bürgerhaus. Hintergrundgeräuschpegel von 25 dB(A)
- UG 3: Gemeindezentrum, Hintergrundgeräuschpegel von 20 dB(A)
- TH Köln: Seminarraum (ZW8-3), Campus Deutz Hintergrundgeräuschpegel < 25 dB(A).

Somit wurde an allen Standorten ein ausreichender Geräuschabstand zwischen den Immissionspegeln der leisesten dargebotenen Stimuli mit einem L_{eq} von 32 dB(A) und dem Hintergrundgeräusch des Raumes gewährleistet. Zusätzlich war hier auch noch unterstützend die nicht näher bestimmte Einfügungsdämpfung der geschlossenen Kopfhörer wirksam.

7.3.2 Versuchsteilnehmende

Von den vier Hörversuchsserien befanden sich drei an Orten, an denen sich im direkten Umfeld Windenergieanlagen befinden. An diesen Orten waren die Probanden im Rahmen von vorangegangenen Befragungen (vgl. Abschnitt 4) zum Thema Belästigung durch Geräusche von Windenergieanlagen auf die Hörversuche aufmerksam gemacht worden. Die Teilnahme an den Hörversuchen erfolgte unentgeltlich und freiwillig. Es ist davon auszugehen, dass an den Versuchen an den drei Standorten von Windenergieanlagen nur Personen teilgenommen haben, die mit Lärmwirkungen von Windenergieanlagen vertraut oder zumindest über die Lärmproblematik informiert sind. Zusätzlich wurde an der TH Köln ein Kontrollversuch mit Teilnehmenden durchgeführt, die zum großen Teil weder Betroffene von Windenergieanlagen-Lärm sind, noch detaillierte Kenntnisse über diese Problematik verfügen. Diese waren zum großen Teil Studierende oder wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der TH Köln, die über einen Emailverteiler für eine freiwillige, unentgeltliche Teilnahme angefragt wurden. Keiner dieser Teilnehmenden hatte einen direkten Bezug zu dem Forschungsvorhaben.

Es nahmen an den Experimenten im UG 1 16 Personen (11 männlich, 5 weiblich im Mittelwert 60 Jahre), im UG 2 25 Personen (18 männlich, 7 weiblich, Mittelwert 56 Jahre), sowie im UG 3 20 Personen (7 männlich, 13 weiblich, Mittelwert 49 Jahre) teil. An dem Kontrollversuch an der TH Köln beteiligten sich 18 Personen (4 weiblich, 14 männlich, Mittelwert 29 Jahre).

7.4 Ergebnisse

Die Darstellungen erfolgen im Folgenden auf Basis des $L_{HP,05}-L_{HP,95}$. Die Ergebnisse in Bezug auf ΔL_{AM} sind im Anhang E dokumentiert. Generell ergeben sich durch die unterschiedlichen rechnerischen Ermittlungen der Modulationstiefe bei den ausgewählten Stimuli nur geringfügige Änderungen in Bezug auf die Untersuchungsergebnisse.

Die statistische Auswertung wurde mit der Software SPSS und mit MATLAB durchgeführt. Die statistische Auswertung zielt darauf ab, den Einfluss der verschiedenen Inner-Subjekt-Faktoren (wie z. B. der Einfluss der Stärke der AM oder der Einfluss des Wiedergabepiegels) zu bestimmen. Dabei ist nicht von besonderem Interesse, wie die Absolutwerte zwischen den Probanden z. B. aufgrund unterschiedlicher Skalenverankerung schwanken. Deshalb wurde durch Normalisierung der Rohdaten für jeden Teilnehmenden mit dem jeweiligen Mittelwert über alle Werte pro Proband und Probandin (Mittelwertbefreiung) zunächst die Zwischen-

Subjekt-Varianz reduziert. Somit fällt in der weiteren Auswertung z. B. nicht ins Gewicht, in welchem Wertebereich die jeweiligen Probanden die Lästigkeits-Skala genutzt haben. Die normalisierten Daten wurden mittels einer mehrfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung analysiert, um signifikante Haupt- und Interaktionseffekte der einzelnen Inner-Subjekt-Faktoren zu identifizieren. Schließlich wurde eine Regressionsanalyse ermittelt, mit dem Ziel, die Auswirkung der im Versuch präsentierten Wiedergabepegel und der AM zu vergleichen.

7.4.1 Auswertungen zur konstanten Amplitudenmodulation

Im ersten Versuchsteil werden die Beurteilungen der über der Zeit nicht variierenden Amplitudenmodulationen untersucht.

7.4.1.1 Varianzanalyse

In einem ersten Schritt wurde eine dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Diese wurde nach Greenhouse-Geisser (1959) korrigiert, um eine Verletzung der Sphärizität zu kompensieren und mit den Inner-Subjekt-Faktoren AM, Pegel, und Aufnahmeort durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der größte Anteil der Unterschiede zwischen den Beurteilungen durch den Pegel des Signals und die Stärke der AM hervorgerufen wird.⁸ Der Aufnahmeort beeinflusst die Ergebnisse allerdings auch, wenn auch in viel geringerem Maße. Die Ursache könnte in den unterschiedlichen Charakteristika der Stimuli liegen, die an den verschiedenen Orten aufgenommen wurden (z.B. Anzahl der Anlagen, Unterschiedlicher Abstand, Unterschiedlicher Anlagentyp). Allerdings sind diese Einflüsse im Vergleich zu den anderen beiden Haupteffekten klein.

7.4.1.2 Mittelwerte und Konfidenzintervalle

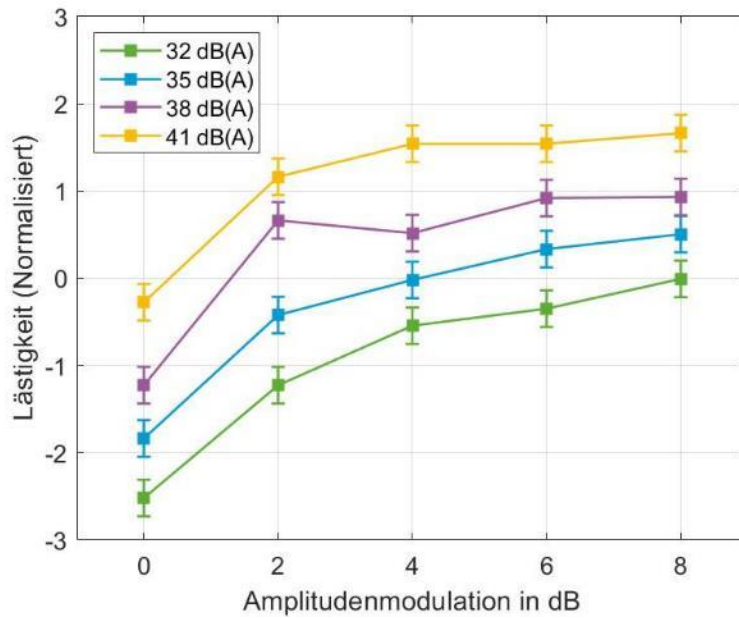
Abbildung 63 zeigt die normalisierten Lästigkeiten in Abhängigkeit von der AM und dem im Hörversuch dargebotenen Immissionspegeln. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lästigkeit sowohl mit zunehmender AM als auch mit zunehmendem Immissionspegel ansteigt. Weiterhin lässt sich aus den Abbildungen erkennen, dass der stärkste Anstieg der Lästigkeit zwischen 0 dB⁹ und 2 dB AM auftritt, d. h. dann, wenn die AM gerade wahrnehmbar wird.

⁸ Die Analyse ergab einen signifikanten Haupteffekt für AM [F (4,324) = 80,08, p < ,001, $\eta^2 = ,50$, $\epsilon = ,37$] und Pegel [F (3,243) = 181,11, p < ,001, $\eta^2 = ,69$, $\epsilon = ,49$], sowie für Aufnahmeort [F (1,81) = 7,53, p = ,007, $\eta^2 = ,09$, $\epsilon = 1$]. Darüber hinaus zeigte die ANOVA signifikante Interaktionseffekte mit vergleichsweise geringer Effektstärke zwischen AM und Pegel [F (12,972) = 2,66, p = ,002, $\eta^2 = ,003$, $\epsilon = ,78$] und zwischen AM und Aufnahmeort [F (4,324) = 12,43, p < 0,001, $\eta^2 = ,13$, $\epsilon = ,94$]. Es werden die Greenhouse-Geisser korrigierten p-Werte und Greenhouse-Geisser korrigierten ϵ -Werte angegeben.

⁹ Die mit 0 dB gekennzeichneten Stimuli wiesen keine perzeptiven AM auf. Das zur Bestimmung der AM genutzte LHP,05-LHP,95 ergab jedoch Werte im Bereich von 1,4 dB.

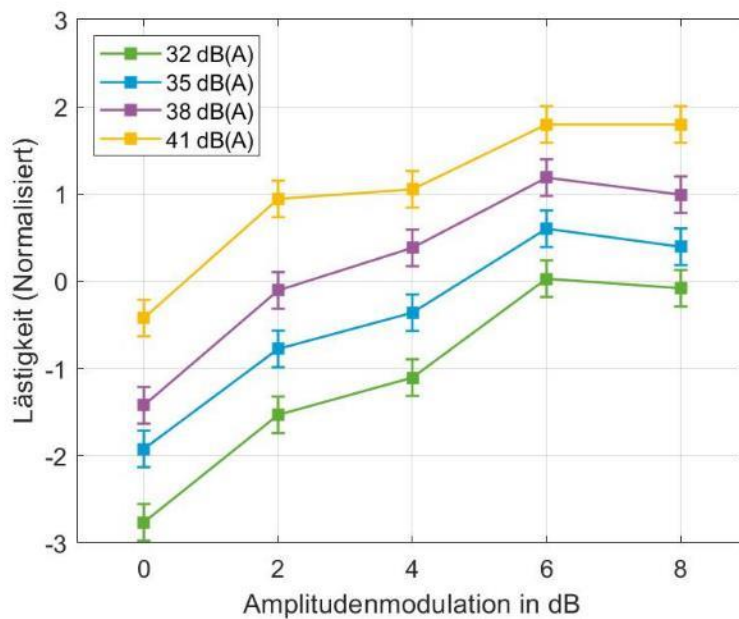
Abbildung 63: Lästigkeit zeitinvariante Amplitudenmodulationen

Wahrgenommene (normalisierte) Lästigkeit in Abhängigkeit von der AM (x-Achse), von dem dargebotenen Immissionspegel (Farbe) sowie von dem Aufnahmeort (a: Aufnahmeort 1, b: Aufnahmeort 2). Dargestellt sind die über die Hörversuchsteilnehmenden gemittelten normalisierten Lästigkeitsbewertungen und 95% Inner-Subjekt-Konfidenzintervalle des Haupteffekts für den Faktor AM.



(a) Aufnahmeort 1

Quelle: eigene Darstellung, TH Köln



(b) Aufnahmeort 2

Quelle: eigene Darstellung, TH Köln

Interessant ist, dass die Ergebnisse für die Kontrollgruppe am Hörversuchsort TH Köln sich nicht maßgeblich von den Ergebnissen an den Standorten der Windenergieanlagen unterscheiden. Hier weichen z. B. die Ergebnisse am UG 2 stärker von den anderen Ergebnissen ab als die Hörversuche mit der (potenziell von Windenergieanlagen) unbelästigten Kontrollgruppe an der TH Köln. Die Diagramme im Anhang E stellen dies detailliert dar.

7.4.1.3 Regressionsanalyse

Wie oben beschrieben, zeigte die ANOVA signifikante Haupteffekte für Pegel und AM. Aber die statistische Analyse zeigte darüber hinaus Einflüsse, die sich aus der Kombination von Pegel und AM ergeben (sog. signifikanter Interaktionseffekt). Diese Zusammenhänge sollen im nächsten Schritt im Rahmen einer Regressionsanalyse näher quantifiziert werden. Die Regressionsanalyse erfolgte getrennt für geringe AM im Bereich von 0 bis 2 dB und für die stärkeren AM im Bereich von 2 bis 8 dB, weil wie in Abbildung 63 dargestellt deutlich unterschiedliche Steigungen beobachtet werden konnten.

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind in Tabelle 32 und Tabelle 33 im Detail angegeben. Für beide Aufnahmeorte zeigte sich ein grundsätzlich ähnlicher Zusammenhang: Für geringe AM im Bereich von 0 dB – 2 dB wirkt sich ein Anstieg der AM (Regressionsfaktor AM) wesentlich stärker aus als ein Anstieg des Pegels (Regressionsfaktor Pegel). Zwischen 2 dB und 8 dB AM sind diese Unterschiede in den Regressionsfaktoren deutlich kleiner. Wie in Tabelle 32 und Tabelle 33 im Detail dargestellt, unterscheiden sich die Regressionsfaktoren zwar zwischen den Aufnahmeorten, die Tendenz ist aber ähnlich. Wesentlich ist, dass für geringe AM der Einfluss von zunehmender AM größer ist als für höhere AM.

Tabelle 32: Regressionsanalyse Aufnahmeort 1

Betrachteter AM-Bereich	Regressionsfaktor AM	Regressionsfaktor Pegel
0 – 8 dB	0,26 ± 0,02 / dB	0,24 ± 0,02 / dB
0 – 2 dB	0,78 ± 0,12 / dB	0,27 ± 0,03 / dB
2 – 8 dB	0,13 ± 0,03 / dB	0,23 ± 0,02 / dB

Ergebnisse der Regressionsanalyse für den Aufnahmeort 1. Angegeben sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen.

Tabelle 33: Regressionsanalyse Aufnahmeort 2

Betrachteter AM-Bereich	Regressionsfaktor AM	Regressionsfaktor Pegel
0 – 8 dB	0,32 ± 0,03 / dB	0,24 ± 0,02 / dB
0 – 2 dB	0,66 ± 0,13 / dB	0,27 ± 0,04 / dB
2 – 8 dB	0,23 ± 0,03 / dB	0,24 ± 0,02 / dB

Ergebnisse der Regressionsanalyse für den Aufnahmeort 2. Angegeben sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen.

Im Folgenden werden die Regressionsfaktoren für die AM und für den Pegel zueinander in Bezug gesetzt. Basierend auf den Regressionsfaktoren der über alle Probanden und alle

Aufnahmeorte gemittelten Hörversuchsergebnisse ergibt sich, dass ein Anstieg der AM von 0 dB auf 2 dB die Lästigkeit in gleichem Maße beeinflusst, wie eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 5,3 dB. Für Aufnahmeort 1 ergibt sich 5,8 dB und 4,9 dB für Aufnahmeort 2. Im Bereich von 2 dB – 8 dB verringert sich der Einfluss durch den Anstieg der AM auf die Lästigkeit. Hier ergibt sich, dass ein Anstieg der AM um 1 dB die Lästigkeit in gleichem Maße beeinflusst wie eine Erhöhung des mittleren Schalldruckpegels zwischen 0.6 dB (Aufnahmeort 1) und 1 dB (Aufnahmeort 2).

Die Analyse der Regressionsdaten zeigt, dass der Einfluss der Stärke der AM auf die Lästigkeit deutlich abnimmt, sobald eine wahrnehmbare AM erst einmal vorhanden ist. Die Stärke der AM hat somit eine deutlich geringere Auswirkung auf die Lästigkeit als das Vorhandensein der AM. Die Steigung der Regressionsgerade des Pegels hängt hingegen für beide Hörversuchsstandorte kaum von der Stärke der AM ab.

7.4.2 Auswertungen zu zeitveränderlichen Amplitudenmodulationen

Im zweiten Versuchsteil wurde der Einfluss von ansteigenden bzw. abfallenden AM untersucht. Als Vergleichsstimuli wurden, wie bereits oben erläutert, Geräusche von Windenergieanlagen ohne AM dargeboten.

7.4.2.1 Varianzanalyse

Zur Analyse der (mittelwertbefreiten) Daten wurde eine Greenhouse-Geisser-korrigierte dreifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung mit den Inner-Subjekt-Faktoren Pegel, Steigung der AM und Aufnahmeort durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass sowohl der Pegel als auch die Steigung und der Aufnahmeort die Ergebnisse beeinflussen.¹⁰ Der durch die ANOVA ermittelte Haupteffekt für Steigung zeigt, dass die Stimuli, die veränderliche AM aufweisen, als signifikant lästiger bewertet wurden als die Stimuli ohne AM. Eine weitere verschachtelte ANOVA nur für Bedingungen mit an- und absteigender AM zeigte keine signifikanten Unterschiede für die Art der Veränderung der AM (an- oder absteigend). Damit kann für die hier untersuchten Stimuli davon ausgegangen werden, dass es für die Lästigkeit nicht wesentlich ist, ob die Stimuli über der Darbietungsdauer in der AM stärker oder schwächer werden.

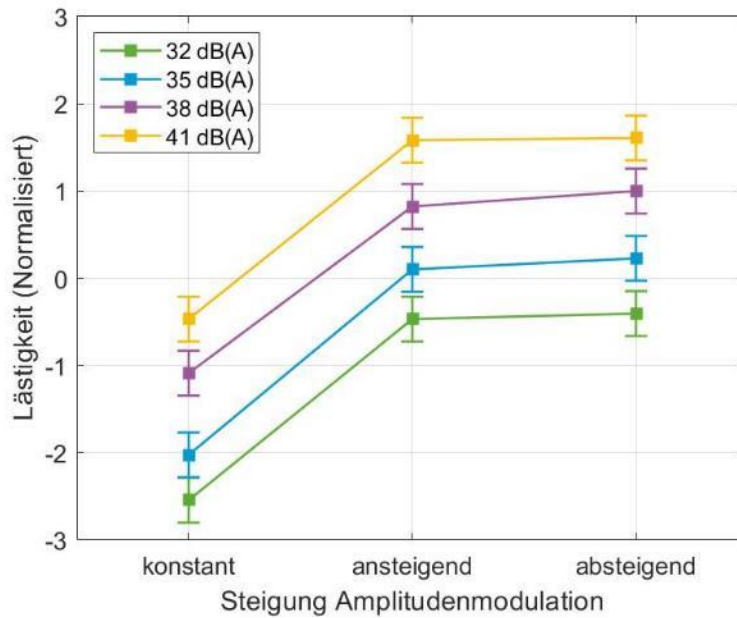
7.4.2.2 Mittelwerte und Konfidenzintervalle

Abbildung 64 stellt die normalisierten Lästigkeiten in Abhängigkeit von der Art des Verlaufes der AM (ansteigend vs. abfallend) und dem im Hörversuch dargebotenen Immissionspegel dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lästigkeit kaum von der Art der Änderung der AM abhängt. Für die Stimuli ohne AM ergaben sich wesentlich geringere Lästigkeiten.

¹⁰ Die ANOVA ergab einen signifikanten Haupteffekt für Pegel [$F(3,234) = 153,6, p < ,001, \eta^2 = ,66, \epsilon = ,56$], sowie für Steigung [$F(2,156) = 86,35, p < ,001, \eta^2 = ,52, \epsilon = ,57$] und für Aufnahmeort [$F(1,78) = 18,71, p < ,001, \eta^2 = ,19, \epsilon = 1$]. Weitere signifikante Interaktionseffekte traten nicht auf.

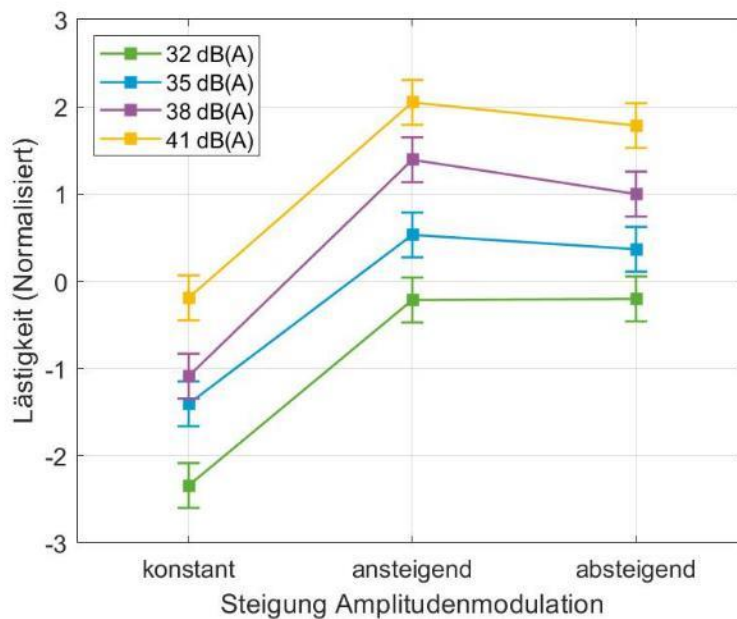
Abbildung 64: Lästigkeit zeitveränderliche Amplitudenmodulationen

Wahrgenommene (normalisierte) Lästigkeit in Abhängigkeit von der Steigung der AM (keine AM, ansteigende AM, absteigende AM) und von dem dargebotenen Immissionspegel (Farbe) für beide Aufnahmeorte (a) 1 und (b) 2. Dargestellt sind die über Probanden und Aufnahmeort gemittelten normalisierten Lästigkeitsbewertungen und 95% Inner-Subjekt-Konfidenzintervalle des Haupteffekts für den Faktor Steigung.



(a) Aufnahmeort 1

Quelle: eigene Darstellung, TH Köln



(b) Aufnahmeort 2

Quelle: eigene Darstellung, TH Köln

7.4.2.3 Regressionsanalyse

Im Unterschied zu Versuch 1 ist die Aussagekraft der Regressionsanalyse hier gering. Sie kann nur zeigen, inwieweit die Lästigkeit sich mit dem Pegel ändert. Für den Aufnahmeort 1 ergab sich $0,19 \pm 0,08$ / dB, für Aufnahmeort 2 $0,18 \pm 0,09$ / dB. Bei einer Mittelung über beide Aufnahmeorte ergab sich $0,19 \pm 0,06$ / dB. Dies liegt geringfügig unter den Werten für den Einfluss des Pegels bei den statischen Stimuli. Eine Prüfung der Signifikanz dieser Unterschiede ist schwer möglich, da diese Unterschiede auch auf Skaleneffekten beruhen können, da die Stimuli im Rahmen von unterschiedlichen Hörversuchen beurteilt wurden.

7.4.3 Vergleich mit anderen Studien

Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen Resultate aus von Hünenbein et al. (2013) [Figure 9.4, S. 201]. Dort zeigte sich ebenfalls ein stärkerer Anstieg der Lästigkeit für geringe Modulationstiefen. Für die dort präsentierten Teststimuli von 35 dB(A) und 40 dB(A), die im Bereich der in der hier vorliegenden Studie untersuchten Immissionspegel liegen, zeigte sich der stärkste Anstieg der Lästigkeit zwischen Modulationstiefen von 0 dB und 2 dB und ein im weiteren Verlauf abflachender Verlauf. Hier entsprach ein Anstieg der Modulationstiefe um 2 dB einer Pegeländerung um ca. 4 dB. Allerdings konnten in von Hünenbein et al. (2013) die statistische Signifikanz nicht belegt werden, u.a. aufgrund der in diesem Testteil geringen Anzahl an Probanden. Übereinstimmend sind unsere Ergebnisse auch mit Schäffer et al. (2016) [Fig. 8], in der ebenfalls gezeigt wurde, dass sich durch die AM die Lästigkeit erhöhte. Der zeitlich dynamische Verlauf der AM spielte in dieser Studie ebenfalls keine signifikante Rolle.

7.5 Zusammenfassung

Die Analyse der Untersuchungen zu den statischen Stimuli ergab signifikante Haupteffekte von Pegel, AM, aber auch mit einer geringeren Effektstärke stellte der Aufnahmeort einen Haupteffekt dar. Die Hörversuche bestätigen, dass die wahrgenommene Lästigkeit deutlich von der AM abhängt und die Lästigkeit mit zunehmender AM erwartungsgemäß ansteigt. Wesentlich entscheidender als die Stärke der AM scheint aber die bloße Wahrnehmbarkeit einer AM für die Lästigkeit zu sein. Es erscheint somit sachgerecht, im Falle von perzeptiv wahrnehmbaren AM bereits von einer erhöhten Lästigkeit auszugehen. Bei einer detaillierteren Betrachtung sollte auch eine Berücksichtigung in Abhängigkeit von der Stärke der AM erfolgen. Die Auswirkungen der AM und des Pegels auf die Lästigkeitsempfindung sind sehr stabil zwischen den einzelnen Untersuchungsgebieten und -gruppen. Die Hörversuche mit der Kontrollgruppe an der TH Köln ergaben nur geringfügig andere Ergebnisse als die Hörversuche in der Umgebung von Windenergieanlagen. Bei der Untersuchung der zeitveränderlichen dynamischen Stimuli zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen in der AM ansteigenden und in der AM absinkenden Stimuli.

Der Einfluss des zeitlichen Verlaufes der AM müsste in Folgeuntersuchungen weiter erforscht werden. Darüber hinaus basieren die in dieser Studie durchgeführten Hörversuche nur auf Stimuli von zwei verschiedenen Aufnahmeorten und es muss in Folgestudien untersucht werden, inwieweit sie auf unterschiedliche Arten von Windenergieanlagen mit variierenden akustischen Eigenschaften verallgemeinert werden können. Darüber hinaus müssen verschiedene Aspekte der AM, wie z. B. zeitliche Variationen in der AM, genauer untersucht werden. Dazu sind weitere Studien notwendig, die auch auf einem höheren Abstraktionsniveau, synthetische sowie natürlichen Schallsignale vergleichen, und den Einfluss von AM auf die Belästigung für verschiedene Formen von Lärm untersuchen. Von besonderer Bedeutung für Folgeuntersuchungen ist es schließlich die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Laborversuche um Experimente, die die Lästigkeit in natürlicher Hörumgebung und über einen längeren Zeitraum studieren, zu erweitern.

8 Abschlussdiskussion

In der vorliegenden Studie wurden zahlreiche Aspekte der Geräuschwirkungen der Nutzung von Windenergieanlagen an Land untersucht.

Windenergieanlagen verfügen über eine besondere Geräuschcharakteristik. Diese wurde von Befragten im Umfeld der untersuchten Gebiete insbesondere als „Rauschen“ (womit sie nicht nur kontinuierliches Rauschen, sondern auch „Rauschen in Intervallen“ meinen) oder „Wuschen“ beschrieben. In der akustischen Messtechnik werden diese sich periodisch wiederholenden Geräusche von Windenergieanlagen als Amplitudenmodulation (AM) bezeichnet. Durch Langzeitschallmessungen wurden amplitudenmodulierte Geräusche an fünf Standorten untersucht. Die ausgewählten Anlagenstandorte verfügten über unterschiedliche Parkkonstellationen mit 1 bis 21 Windenergieanlagen und unterschieden sich durch die verbauten Anlagen und die topographischen Gegebenheiten. Die Messorte lagen ca. 800 m bis zu 1500 m von den Windenergieanlagen entfernt. Es wurde folgende Zusammenhänge in Bezug auf das Auftreten von AM analysiert:

- ▶ topographische Struktur der Gebiete
- ▶ aktuelle Leistung der Anlagen
- ▶ Windrichtung
- ▶ Windgeschwindigkeit, so wie
- ▶ thermischen Schichtung der Atmosphäre

Ein eindeutiger Zusammenhang konnte nicht festgestellt werden.

AM wurde sowohl bei geringen als auch bei hohen Immissionspegeln festgestellt. In den untersuchten Gebieten hatten insbesondere der Abstand zur Anlage und die Anzahl der Anlagen einen Einfluss auf die Häufigkeit der amplitudenmodulierten Geräusche und auf die Modulationstiefe. Je mehr Anlagen vorhanden sind, desto weniger ausgeprägt ist die AM. Je größer der Abstand, desto weniger stark ausgeprägt ist die AM. Auf Grund der oben genannten Unterschiedlichkeiten der Untersuchungsgebiete, kann diese Aussage nur bedingt auf andere Standorte übertragen werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Algorithmus entwickelt, der die periodischen AM von Windenergieanlagen automatisch erkennen und quantifizieren kann. Die gängigen Verfahren zur Beschreibung von ausgeprägten Geräuschmerkmalen, wie z. B. die Impulshaltigkeit nach TA Lärm (1998), sind für die Beschreibung der „Wusch“-Geräusche von Windenergieanlagen nur bedingt geeignet, da zwischen periodisch modulierten Geräuschen und anderen modulierten Geräuschen nicht unterschieden werden kann. Insofern für einen Zeitraum sichergestellt werden kann, dass es sich bei den Geräuschen maßgeblich um ein periodisch amplitudenmoduliertes Geräusch handelt, zeigt sich für die hier untersuchten Gebiete, dass eine Abschätzung der Modulationstiefe anhand des Taktmaximalpegelverfahrens nach TA Lärm (1998) möglich ist.

Des Weiteren wurden an einem Standort über einen Zeitraum von acht Wochen Infraschallmessungen durchgeführt. Für die verbleibenden vier Standorte wurden Infraschallpegel aus den auf Hörschall ausgerichteten Messungen bestimmt. An allen Messorten wurde durch Windenergieanlagen verursachter Infraschall gemessen. Die Pegel des gemessenen Infraschalls liegen unterhalb der Wahrnehmungsschwellen.

Im Rahmen von Hörversuchen wurden amplitudenmodulierte Geräusche aus den Messungen unter laborähnlichen Bedingungen dargeboten und bewertet. Die teilnehmenden Personen bewerteten die amplitudenmodulierten Geräusche als deutlich lästiger als nicht-amplitudenmodulierte Geräusche. Auffällig war, dass die Lästigkeit deutlich ansteigt, sobald die AM wahrnehmbar ist. Inwieweit sich die in den Hörversuchen unter Laborbedingungen ermittelte Lästigkeit mit einer Erhöhung des mittleren Schalldruckpegels abgleichen lässt, sollte in Folgeuntersuchungen noch weiter evaluiert werden. Zumindest aber korrespondieren die Ergebnisse der Hörversuche mit den Ergebnissen der Befragungsstudie. Danach haben eine AM kennzeichnende Geräuschmerkmale, wie das „Wuschen“ oder das (pulsierend gemeinte) „Rauschen“, einen deutlichen Effekt auf die Lärmbelästigung und die Lärmbelastigungsunterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten korrespondieren mit der Auftretshäufigkeit der erkannten periodischen AM.

In den Untersuchungsgebieten wurden Anwohnende zur Belästigung durch Geräusche der Windenergieanlagen befragt. Sie waren einer berechneten Geräuschimmissionsbelastung mit einem Beurteilungspegel L_r von im Mittel 31 dB(A) in einem Pegelbereich von unter 20 dB(A) bis 43 dB(A) ausgesetzt. Die Befragungen ergaben, dass die Windenergieanlagengeräusche zu einem höheren Anteil von hoch belästigten Personen unter den Befragten führt, als es bei gleichem Geräuschpegel von anderen Quellen des Umgebungslärms, z. B. Straßenverkehr, bekannt ist.

Die Lärmwirkungsforschung weist per Konvention Expositions-Wirkungsbeziehungen aus, bei denen pro dB-Wert eines Geräuschpegels der Anteil hoch belästigter Personen angegeben ist. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) nennt unter Bezug auf solche generalisierten Expositions-Wirkungsfunktionen einen Prozentanteil von 10% hoch belästigter Personen als gesundheitlich relevante Schwelle (WHO, 2018). Für WEA-Geräusche gibt die WHO an, dass bei einem Tag-Abend-Nachtpegel von $L_{den} = 45$ dB(A) der Anteil von hoch belästigten Personen überschritten wird. Im Vergleich dazu liegt der entsprechende L_{den} -Wert beim Straßenverkehrslärm laut WHO bei 53 dB(A).

In dieser Studie sind 10% der Personen bereits bei einem Beurteilungspegel von $L_r = 31$ dB(A) insgesamt durch WEA-Geräusche hoch belästigt. Bei $L_r = 32$ dB(A) sind 10% im Außenbereich durch WEA-Geräusche, bei einem Pegel von 38 dB(A) im Innenbereich durch WEA-Geräusche hoch belästigt. Selbst bei sehr vereinfachender Annahme extremer Bedingungen wie ganzjährigen Mitwind und einer gleichmäßigen Verteilung der WEA-Geräusche über 24 Stunden eines Tages würden diese Beurteilungspegel von 31 dB(A) bis 38 dB(A) umgerechnet (überschätzten) L_{den} -Werten entsprechen, die unterhalb von $L_{den} = 45$ dB(A) liegen – dem Wert, den die WHO (2018) als Leitlinienwert für WEA-Geräusche nennt. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen damit zumindest auch das Vorgehen der WHO, für WEA-Geräusche einen niedrigeren Leitlinienwert anzusetzen als für Straßen- und Schienenverkehrslärm.

Die Befragungsstudie zeigt, dass weitere Kontextfaktoren für die Lärmbelästigung mindestens ebenso wesentlich sind, wie der Beurteilungspegel. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen der internationalen Lärmwirkungsforschung (u. a. Freiberg et al., 2019; Hübner et al., 2019; van Kamp & van den Berg, 2020). Um also in einem Wohngebiet rund um Windenergieanlagen die Belästigung durch WEA-Geräusche zu reduzieren, bedarf es eines holistischen Lärmmanagementansatzes, der die akustischen Aspekte ebenso wie die kontextuellen Einflüsse im Blick hat und Lösungsansätze in einem Gesamtansatz – im besten Fall unter Einbezug der Anwohnerschaft – verfolgt.

Die vorliegende Untersuchung kommt zu dem Fazit, dass AM eine wichtige Geräuscheigenschaft ist, durch die eine Lärmbelästigung von Anwohnenden verstärkt werden kann. Dies zeigt sich in

der subjektiven Wahrnehmung des besonders belästigenden Geräuschmerkmals („Wuschen“), der augenscheinlichen weitgehenden Korrespondenz von Lärmbelästigung und Auftrittshäufigkeit der erkannten periodischen Amplitudenmodulationen in den Untersuchungsergebnissen, als auch in den Ergebnissen der Hörversuche.

Dennoch, mehr als die Geräuschpegel selbst, scheinen die optische Wahrnehmung der Windenergieanlagen ebenso wie die von den Menschen wahrgenommenen bzw. erwarteten negativen Auswirkungen der lokalen Anlagen für die eigene Region auf das Lärmbelästigungsurteil einzuwirken. Windenergieanlagen-Geräusche stellen demnach, wie es Schick (1997) allgemein zum Konzept der Belästigung formulierte, nicht die alleinige Ursache, sondern einen Anlass zur Belästigung dar. Die Lärmbelästigung speist sich dabei möglicherweise aus verschiedenen akustischen und visuellen Merkmalen von Windenergieanlagen ebenso wie aus dem Kontext der Planung, Implementierung und des Betriebs dieser Anlagen. Auch aus diesem Grund schlagen verschiedene Autoren wie Michaud et al. (2018a, b) und Hübner et al. (2019) die Erfassung eines kombinierten Belästigungskonzepts vor. Dieses fasst die verschiedenen akustischen und visuellen Merkmale von Windenergieanlagen zusammen, die potentiell belästigen können.

Um zu verstehen, warum Geräuschpegel allein die Lärmbelästigungsurteile nicht erklären können, muss man sich die Definition der Lärmbelästigung vor Augen halten. Lärmbelästigung ist keine reine Schallreaktion. Sie beinhaltet die (1) wiederholte Erfahrung von Störungen durch die Geräusche und der Aufnahme von Verhaltensweisen, diesen Störungen zu entgehen. Sie beinhaltet weiterhin (2) eine emotionale Reaktion auf die Geräusche und durch sie verursachten Störungen und (3) einen wahrgenommenen Verlust an Kontrolle über die Lärmsituation (Guski et al., 2017). Ein wahrgenommener Kontrollverlust kann sich ergeben, wenn sich im Wohnumfeld Veränderungen ergeben, die u. a. eine Änderung der Geräuschsituation beinhalten können und auf die die Anwohnenden selbst keinen Einfluss wahrnehmen. Dabei ist es nicht relevant, ob man tatsächlich keine Einflussmöglichkeiten oder Bewältigungsmöglichkeiten bzw. keine Kontrolle hat, sondern, ob Anwohnende diese subjektiv wahrnehmen (Glas & Singer, 1972). Der Grundstein für diese Wahrnehmungen wird bereits bei der Planung der Errichtung von Windenergieanlagen gelegt. Umso wichtiger ist es, bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Planungen den Effekt des breiteren Kontextes von Windenergieanlagen und ihren Geräuschen auf die Lärmbelästigung zu berücksichtigen. Um die Akzeptanz von Windenergieanlagen zu erhöhen und Anwohnenden das Erleben von Kontrolle über die eigene Wohnsituation zu ermöglichen, sollte aus Sicht der Befragten der Nutzen für die Anwohnenden herausgestellt werden. Sie sollten frühzeitig in die Planung der Errichtung von Anlagen einbezogen werden. Das bedeutet nicht, die Situation schön zu reden; auch mögliche negative Veränderungen sollten transparent gemacht werden. Generell zählt das Vertrauen in Verantwortliche zu den wichtigsten Faktoren der Lärmbelästigung. Das gilt für die Belästigung durch Windenergieanlagenlärm (Hübner et al., 2019) als auch für andere Lärmquellen, z. B. Fluglärm (Schreckenberget al., 2017). Wird dieses Vertrauen durch keine oder unvollständige Informationsgabe verspielt, löst dies das Lärmbelästigungsproblem nicht. Besser noch als eine reine Gabe von Informationen ist es, Anwohnende in Entscheidungsprozesse rund um die Errichtung von Windenergieanlagen so gut es geht einzubeziehen, um ein Kontroll- und Bewältigungserleben zu ermöglichen.

9 Forschungsbedarf

Es konnten bei der Auswertung der messtechnischen erfassten Amplitudenmodulation, Hinweise auf verschiedene Zusammenhänge erkannt werden. Es traten innerhalb der Messzeit nicht alle meteorologischen Bedingungen auf, oder zu selten, um statistisch signifikante Ergebnisse abzuleiten. Die dennoch erkennbaren Tendenzen sollten mit einer größeren Stichprobe von Messungen weiter erforscht werden.

Messungen im Innenraum von Wohngebäuden könnten dazu beitragen, ein mögliches Auftreten und einer einhergehenden Belästigung durch Amplitudenmodulation in Räumen in Relation zu den vorhandenen Ergebnissen zu bringen und diese Situation zusätzlich zu bewerten.

Im Rahmen von Folgeuntersuchungen sollten systematische Hörversuche zum Einfluss der AM für eine größere Bandbreite von Quellsignalen durchgeführt werden. Erst durch solche weiterführenden psychoakustischen Untersuchungen wird es möglich, die AM, die üblicherweise bei dem Betrieb von Windenergieanlagen auftreten in Bezug zu AM anderer Geräuschquellen (z. B. Straßenverkehr) zu setzen. Diese Hörversuche sollten zudem durch systematische Befragungen ergänzt werden, um sicherzustellen, dass die unter abstrahierten Laborbedingungen durchgeführten Experimente die Wahrnehmungen potentiell Belästigter abbilden. Dabei sollten Kenngrößen für die AM bezogen auf den Immissionsort (Wohngebäude betroffener Anwohnenden) bestimmt und mit den Lärmwirkungen der betroffenen Personen in Beziehung gesetzt werden. Die Lärmwirkungen sollten ebenso wie die AM ereignisnah – etwa durch wiederholte Kurzbefragungen mehrmals am Tag über mehrere Tage – erfasst werden. In einer Zwischenuntersuchung können aus den umfangreichen in den Langzeitmessungen erhobenen akustischen Daten dieses Vorhabens anhand von Ausbreitungsberechnungen geeignete akustische Kenngrößen über die Beurteilungspegel hinaus auf die Immissionsorte (Wohnadressen) der befragten Anwohnenden bezogen und im Rahmen von Expositions-Wirkungsanalysen vertiefend untersucht werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Studie ist der umfangreiche akustische Datensatz, der in diesem Umfang für Lärmwirkungsanalysen selten zur Verfügung steht und in künftigen Re-Analysen stärker als es in dieser Studie möglich war, ausgeschöpft werden kann und sollte.

10 Quellenverzeichnis

- Bland, J.M. & Altman, D.G. (1997). Cronbach's Alpha, *British Medical Journal*, 514, 572.
- Bradley, J.S. (1994). Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sounds containing rumble. *Noise Control Engineering Journal*, 42 (6), 203-208.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed), L. Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey.
- Cohen, S. & Williamson, G.M. (1988). Perceived stress in a probability sample of the United States. In S. Pappas & S. Oskamp (Eds.). *The social psychology of Health*. Newbury Park, CA: Sage.
- DIN 1320 (2009). *Akustik - Begriffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 45645-1 (1996). *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen - Teil 1: Geräuschmissionen in der Nachbarschaft*, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 45680 (1997). *Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft*, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN 45681 (2005). *Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 61672-1 (2014). *Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 61672-2 (2018). *Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 2: Baumusterprüfung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN ISO 9613-2 (1999). *Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren*, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DLR Internal Report 22314-94/B5, Wolfgang Neise and Ulf Michel (1994). *Aerodynamic noise of turbomachines*. DLR, <https://doi.org/10.13140/2.1.3408.9760>
- Feinerer, I., Hornik, K. und Meyer, D. (2008). Text Mining Infrastructure in R. *Journal of Statistical Software* 25(5): 1-54. URL: <https://www.jstatsoft.org/v25/i05/>
- Freiberg, A., Scheffer, C., Girbig, M., Murta, V.C. & Seidler, A. (2019). Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review. *Environmental Research*, 169, 446-463. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.032>.
- Glass, D.C., and Singer, J. E. (1972). *Urban stress. Experiments on noise and social stressors* New York: Academic Press.
- Greenhouse, S. W., and Geisser, S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, 24, 95–112. doi:10.1007/BF02289823
- Guski, R., Schreckenber, D. & Schuemer, R. (2017). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14, 1539. doi:10.3390/ijerph14121539.
- Haac, T.R., Kaliski, K., Landis, M., Hoen, B., Rand, J., Fireston, J., [...] & Pohl, J. (2019). Wind turbine audibility and noise annoyance in a national U.S. survey: Individual perception and influencing factors. *Acoustical Society of America*, 146 (2), 1124-1141. <https://doi.org/10.1121/1.5121309>

- Hafke-Dys, H., Preis, A., Kaczmarek, T., Biniakowski, A. & Kleka, P. (2016). Noise Annoyance Caused by Amplitude Modulated Sounds Resembling the Main Characteristics of Temporal Wind Turbine Noise. *Archives of Acoustics*, 41 (2), 221-232. DOI: 10.1515/aoa-2016-0022.
- Hübner, G.; Pohl, J.; Hoen, B.; Firestone, J.; Rand, J.; Elliott, D.i; Haac, R. (2019). Monitoring annoyance and stress effects of wind turbines on nearby residents: A comparison of U.S. and European samples. In: *Environment international* 132, S. 105090. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105090.
- Hubbard, H.H., Shepherd, K.P. (1991). "Aeroacoustics of Large Wind Turbines". *Journal of the Acoustical Society of America* 89(6), p. 2495 - 2508. DOI: 10.1121/1.401021
- ISO/TS15666 (2003). Technical specification: Acoustics–Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys.
- ISO 28961 (2012). Akustik - Statistische Verteilung von Freifeld-Normalhörschwellen, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- ISO 7196 (1995). Akustik - Frequenzbewertungs-Charakteristik für Infraschallmessungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- JCGM 100:2008 (2008). Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement
- Janssen, S.A., Vos, H., Eisses, A.R. & Pedersen, E. (2011). A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 130, 3746– 3753. doi:10.1121/1.3653984.
- Job, R.S.F. (1999). Noise sensitivity as a factor influencing human reaction to noise. *Noise & Health*, 3, 57-68.
- Klein, Eva M.; Brähler, Elmar; Dreier, Michael; Reinecke, Leonard; Müller, Kai W.; Schmutzer, Gabriele et al. (2016): The German version of the Perceived Stress Scale - psychometric characteristics in a representative German community sample. In: *BMC Psychiatry* 16, S. 159. DOI: 10.1186/s12888-016-0875-9.
- Kuckartz, Udo (2012): *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim: Beltz-Juventa.
- Kühner, T. (2016), Aspekte der Ausbreitung tieffrequenten Schalls durch die bewegte Atmosphäre. DAGA 2016.
- Kurakat. Kurakata K, Mizunami T. The Statistical Distribution of Normal Hearing Thresholds for Low-Frequency Tones. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. 2008;27(2):97-104. doi:10.1260/026309208785844149
- Kuwano, S., Yano, T., Kageyama, T., Sueoka, S. & Tachibanae, H. (2014). Social survey on wind turbine noise in Japan. *Noise Control Eng. J.*, 62, 503–520.
- LAI (2016): Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windkraftanlagen (WKA), 30.06.2016
- Lecocq, T., Hicks, S.P., Van Noten, K., van Wijk, K., Koelemeijer, P., De Plaen, R.S.M. et al. (2020). Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures. *Science*, 369, 1338-1343.
- Martinez, Fennel (2017): Windenergieanlagen: AM bei Messungen an Einzelanlagen und Windparks DAGA 2017
- Michaud, D.S., Feder, K., Keith, S.E., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J. et al. (2016). Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects. *Acoustical Society of America*, 139 (3), 1443-1454. <http://dx.doi.org/10.1121/1.4942391>
- Michaud, D.S., Marro, L. & McNamee, J. (2018a). Derivation and application of composite annoyance reaction construct based on multiple wind turbine features. *Canadian Journal of Public Health*, 109, 242-251. <https://doi.org/10.17269/s41997-018-0040-y>.

- Michaud, D.S., Marro, L. & McNamee, J. (2018b). The association between self-reported and objective measures of health and aggregate annoyance scores toward wind turbine installations. *Canadian Journal of Public Health*, 109, 252-260. <https://doi.org/10.17269/s41997-018-0041-x>.
- Mayring, Philipp (2015): *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. 12., überarbeitete Auflage. Weinheim, Basel: Beltz Verlag. Online verfügbar unter <http://d-nb.info/1063369835/04>.
- Møller, H., Pedersen, C. S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health*. 2004 Apr-Jun;6(23):37-57. PMID: 15273023.
- Müller BBM (2015). Forschungsprojekt zu Kurven gleicher Lautstärke für DIN 45680. Abschlussbericht Nr. M111460/04. <https://www.din.de/resource/blob/79878/0ead974b8c0a42234c55b7d7ceb950da/forschungsbericht-data.pdf>
- NALS (2015): Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen, Fassung 2015-05.1
- NASA 1218 (1989). Brooks, F., Pope, S., Marcolini, M., *Airfoil Self-Noise and Prediction*. NASA Reference Publication 1218, National Aeronautics and Space Administration, USA.
- Němec, J. (1967). Noise of axial fans and compressors: Study of its radiation and reduction. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 6, Issue 2, September 1967, Pages 230-236. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(67\)90230-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90230-1)
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., Macaskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., Lindeløv, J.K (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behav. Res. Methods*, 51, 195–203.
- Pohl, J., Gabriel, J. & Hübner, G. (2018). Understanding stress effects of wind turbine noise – The integrated approach. *Energy Policy*, 112, 119-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.007>.
- Renewable UK. (2013) *Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect*, December 2013
- Rylander, R. (2004): Physiological aspects of noise-induced stress and annoyance. In: *Journal of Sound and Vibration* 277 (3), S. 471–478. DOI: 10.1016/j.jsv.2004.03.008.
- Schäffer, B., Pieren, R., Schlittmeier, S. J., Brink, M., and Heutschi, K. (2017). “Annoyance to wind turbine noise – influence of different acoustical characteristics,” *Proc. Internoise*, 2017.
- Schäffer, B., Pieren, R., Schlittmeier, S.J. & Brink, M. (2018). Effects of Different Spectral Shapes and Amplitude Modulation of Broadband Noise on Annoyance Reactions in a Controlled Listening Experiment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 1029. doi:10.3390/ijerph15051029.
- Schäffer, B., Schlittmeier, S. J., Pieren, R., Heutschi, K., Brink, M., Graf, R., and Hellbruck, J. (2016). Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: A laboratory study. *J Acoust Soc Am*, 139, 2949. doi:10.1121/1.4949566 [doi]
- Schick, A. (1997). *Das Konzept der Belästigung in der Lärmforschung*. Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Schreckenberger, D., Benz, S., Kuhlmann, J., Conrady, M. & Felscher-Suhr, U. (2017). Attitudes towards authorities and aircraft noise annoyance. Sensitivity analyses on the relationship between non-acoustical factors and annoyance. *Proceedings of the 12th ICBen Congress on Noise as a Public Health Problem*, June 18-22, 2017. Zurich, Switzerland. Zugriff am 15.06.2021 unter http://www.icben.org/2017/ICBEN%202017%20Papers/SubjectArea06_Schreckenberger_P28_3636.pdf
- Sharland, I.J. (1964). Sources of noise in axial flow fans. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 1, Issue 3, July 1964, Pages 302-322, [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(64\)90068-9](https://doi.org/10.1016/0022-460X(64)90068-9)

TA Lärm (1998). Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) (GMBI Nr. 26/1998 S. 503), zuletzt geändert durch Bekanntmachung des BMUB vom 1. Juni 2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5) in Kraft getreten am 9. Juni 2017.

Umweltbundesamt (2020), Reihe 163/2020. Lärmwirkungen von Infraschallimmissionen (FKZ 3714 51 100 0). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/laermwirkungen-von-infraschallimmissionen>

Van den Berg, F. & van Kamp, I. (2017). Health effects related to wind turbine noise. Federal Office for the Environment, Bern, Switzerland.

Van Kamp, I. & van den Berg, F. (2020). Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound. Australian Acoustical Society, 46, 31-57. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0115-6>.

VDI 3723 Blatt 1 (1993). Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen, Beuth Verlag GmbH, Berlin

VDI 3723 Blatt 2 (2006). Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen - Teil 2: Qualitätsprüfung bei der Beurteilung von Geräuschsituationen, Beuth Verlag GmbH, Berlin

Von-Hunerbein, S. King, A., Piper, B., Cand, M. (2013). Wind turbine amplitude modulation: research to improve understanding as to its cause & effect.

World Health Organization (WHO). (2018). Environment noise guidelines for the European region. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe. Available http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/383921/noise-guidelines-eng.pdf?ua=1

A Windenergieanlagen als Geräuschquelle

A.1 Grundsätzliches

Aus physikalischer Sicht können Windenergieanlagen als riesige, langsam laufende Ventilatoren betrachtet werden. Die gleichen Prozesse verursachen Schalldruckwellen, egal ob PC-Lüfter, industriell genutzter Axial-Ventilator oder Windenergieanlage.

Zwei aerodynamische Prozesse sind die Hauptquellen für Geräusche von Ventilatoren¹¹: Turbulenzen, die direkt an den Rotorblättern entstehen und Druckschwankungen, die entstehen, wenn ein Rotorblatt sich an einem Strömungshindernis vorbei bewegt.

Im Folgenden werden die beiden Prozesse diskutiert.

A.2 Wechselwirkung Rotorblatt und Mast

A.2.1 Linien im Spektrum

Ein Ventilator mit sich bewegenden Rotorblättern verursacht jedes Mal, wenn ein Rotorblatt an einem fest in der Strömung stehenden Gegenstand vorbeikommt, eine Druckschwankung.¹² Das kann bei einem Computer-Lüfter ein Plastiksteg sein, der die Nabe hält, bei einem Axial-Lüfter ein Stator – eine sich nicht mitdrehende Schaufel, die die Strömung positiv beeinflussen soll – und bei einer Windenergieanlagen der Mast. Wie die Strömung in diesem Bereich gestört wird, und welche Form die Druckschwankung hat, kann sehr von Details wie der Geometrie, insbesondere dem Abstand zwischen Rotorblatt und Strömungshindernis, abhängen. Aber jedes Mal, wenn ein Rotorblatt an dem Hindernis vorbeikommt, entsteht wieder eine ähnliche Druckschwankung. Anders formuliert, die Druckschwankungen entstehen mit genau der Frequenz, mit der die Rotorblätter am Hindernis vorbeikommen.

Während ein typischer Lüfter mit Drehzahlen bei mehreren hundert oder über tausend Umdrehungen pro Minute läuft, dreht sich eine Windenergieanlage in der Regel weniger als zwanzig Mal in der Minute. Da Windenergieanlagen (fast immer) drei Rotorblätter haben, kommt für jede Umdrehung drei Mal ein Rotorblatt am Mast der Anlage vorbei. Jedes Mal entsteht eine Druckschwankung, d. h. es entsteht ein Geräusch mit einer Grundfrequenz von

$$f_{BP} = UPM \frac{3}{60 \text{ min}^{-1}} \text{ Hz}$$

Diese Frequenz wird Blattdurchgangsfrequenz (engl. *Blade passing frequency*) genannt.

In dem idealisierten Fall, dass sich die Anlage mit konstanter Drehzahl dreht und eine konstante Strömung anliegt, wird bei jeder Vorbeibewegung eines Rotorblatts am Mast die gleiche Druckschwankung erzeugt. In diesem Fall setzt sich das entstehende Geräusch aus scharfen

¹¹ Darstellungen finden sich in zahlreichen Lehrbüchern und Berichten, z. B. als DLR Internal Report 22314-94/B5, wissenschaftliche Veröffentlichungen ab den 1960igern, z. B. Sharland, I.J. (1964). Speziell für Windenergieanlagen bei Hubbar und Shepherd (1991)

¹² Beispiel einer frühen Studie des Effekts wie der Rotor gegen das feststehende Element gekippt wird in Némec, J. (1967)

Sinustönen zusammen, die bei ganzzahligen Vielfachen der Blattdurchgangsfrequenz liegen.¹³ Diese Vielfache der Grundfrequenz werden auch als Harmonische¹⁴ bezeichnet.

Typische Werte für Blattdurchgangsfrequenzen bei Windenergieanlagen liegen im Bereich 0,3 bis höchstens 1 Hz.

A.2.2 Pegel der Linien

Damit eine Quelle bei sehr kleinen Frequenzen ein starkes Signal abstrahlen kann, reicht es nicht, dass sie z.B. eine sehr kleine Drehzahl hat, die Dimensionierung der Quelle muss auch ausreichend groß sein. Aufgrund der großen Rotorblatt- und Mastlängen können WEA im Prinzip Pegel bei sehr tiefen Frequenzen erzeugen.

Wenn die Druckschwankungen, die zwischen Rotorblättern und Mast entstehen, nicht sehr impulsartig aussehen, dann kann erwartet werden, dass die Beiträge der Harmonischen bei steigenden Frequenzen relativ schnell fallen.

Bei den meisten Ventilatoren entsteht im Spektrum ein kammartiges Muster durch die mit konstantem Abstand auftretenden Linien, aber selten sind deutlich mehr als 10 Linien erkennbar. Entsprechend ist die Erwartung, dass solche Linien im Spektrum einer Windenergieanlagen nur bei sehr tiefen Frequenzen zu beobachten sind.

A.2.3 Beiträge zum Hörschall

Eine Windenergieanlage, die sich mit 15 Upm dreht, hat eine Blattdurchgangsfrequenz von 0,75 Hz. Der tiefste Ton eines Klaviers liegt bei 27,5 Hz¹⁵, es müsste also noch die 36. Harmonische einen wesentlichen Beitrag liefern, wenn die Wechselwirkung zwischen Rotor und Mast in diesem Bereich hörbar werden soll.

A.2.4 Verbreiterung der Linien

Anders als bei typischen Ventilatoren sind die Strömungsbedingungen an Windenergieanlagen weniger konstant. Der Wind ist durch Böen und Turbulenzen überlagert, wodurch die zwischen Rotorblättern und Mast entstehenden Druckschwankungen von Durchgang zu Durchgang variieren. Weil das so entstehende Schallsignal nicht streng periodisch ist, kann es im Spektrum zu Verbreiterungen der einzelnen Linien kommen.

¹³ Für eine mathematische Analyse kann z. B. eine Fourierreihe gebildet werden. Es entsteht ein kontinuierliches Signal, das sich nur aus Frequenzen zusammensetzt, die ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind.

¹⁴ Physiker verwenden gerne den Begriff *Harmonische*, weil damit ausschließlich ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz gemeint sind. Der Begriff *Oberton* bei Musikern bedeutet fast das gleiche, kann aber unter Umständen auch gebrochenzahlige Vielfache bedeuten, weshalb die Verwendung des Begriffs *Harmonische* etwas sicherer ist.

¹⁵ Beim Höreindruck tiefer Töne eines Klaviers ist zu beachten, dass auch dort im Wesentlichen Harmonische gehört werden, und der Grundton nur zu einem sehr kleinen Teil.

A.3 Strömungsgeräusche an den Rotorblättern

A.3.1 Aerodynamik am Rotorblatt

Ausgehend von der Trivialaussage, dass eine Windenergieanlage durch den Wind angetrieben wird, ist die tatsächliche Funktion viel beeindruckender, als sie auf den ersten Blick erscheint.

An jeder Stelle hat der Querschnitt des Rotorblatts die Form eines Flügelprofils. Weil sich der Rotor außen schneller bewegt als innen, verändert sich von innen nach außen das Profil des Rotorblatts so, dass es optimal an die bei dem jeweiligen Radius erwarteten Geschwindigkeiten angepasst ist.

Eine Strömung über einen Flügel erzeugt eine Kraft. Der Anteil quer zur Strömungsrichtung wird als dynamischer Auftrieb bezeichnet, der Anteil der Kraft in Strömungsrichtung als Strömungswiderstand¹⁶. Das bekannteste Bild dazu ist das horizontal fliegende Motorflugzeug, bei dem die Luft über den Flügel strömt und dabei Auftrieb genau nach oben erzeugt und es so in der Luft hält. Die zweite Komponente der Strömungskraft ist der Widerstand, der das Flugzeug abbremst. Je höher die Geschwindigkeit, umso größer der Widerstand, deshalb entspricht eine feste Motorleistung immer einer bestimmten Geschwindigkeit.

Genau wie der Widerstand, steigt auch der Auftrieb mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit. Und genau dieser Auftrieb am Flügelprofil der Rotorblätter erzeugt die Drehung der Windenergieanlagen. Mit Auftrieb ist nicht speziell der Anteil der Kraft nach oben gemeint, sondern der Anteil der Kraft quer zur Strömung, bzw. der Anteil der Kraft, der den Rotor in seiner Drehung antreibt.

Durch die aus der Entfernung so beschaulich aussehende Drehung einer Windenergieanlage darf man sich nicht täuschen lassen. Die Strömung über den Rotoren liegt nicht bei den ca. 10 m/s des Winds, sondern ist vor allem durch die Rotation selbst verursacht. Dreht sich die Anlage mit 15 Upm, dann ist die selbst verursachte Strömung in 50 m Radius bei ca. 80 m/s, zur Gesamtströmung über den Rotor trägt der Wind dann nur noch einen kleinen Teil bei.

Die große Kunst beim Design von Flügelprofilen ist es, einen möglichst großen Teil der Strömungskraft „nach vorne“ in Bewegungsrichtung zu haben. Der Teil der Kraft, der das Rotorblatt nur in Mitwindrichtung biegen will, lässt sich nicht zur Energiegewinnung nutzen.

Relevant für das Folgende ist, dass die Querschnitte von Windenergieanlagen-Rotorblättern im Grunde Flügelprofile sind und dass hohe Geschwindigkeiten an den Rotorblättern nötig sind, um hohe Leistungen erzeugen zu können.

A.3.2 Strömungsgeräusche

Eine Strömung über ein Flügelprofil verursacht Geräusche, insbesondere wenn sie so schnell ist wie oben erwähnt. Es entsteht ein breitbandiges Rauschen, dessen Frequenzbereich von der Breite des Flügels (der Sehne), dem Anstellwinkel und der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Da sich alle drei Faktoren von innen nach außen am Rotorblatt verändern, entsteht ein sehr breitbandiges Rauschen, das bei unter 100 Hz anfängt und bis mehrere hundert bis tausend Herz reicht.

¹⁶ Für verschiedene Anwendungen werden die Begriffe Auftrieb und Widerstand zum Teil etwas anders verwendet, etwa bezogen auf die Bewegungsrichtung statt die Strömungsrichtung. Für den folgenden Text spielt diese Unterscheidung keine entscheidende Rolle.

Natürlich spielt auch die genaue Form der Flügel eine Rolle, aber zur Vereinfachung wird in technischen Studien nach wie vor gerne auf eine NASA-Studie aus dem Jahr 1989 (NASA 1218) zurückgegriffen, in der Strömungsgeräusche an Standard-Profilen untersucht wurden. Neben der Form der Spektren der Geräusche werden dort auch Aussagen über die Richtcharakteristik der Windenergieanlagen gemacht. Die Geräusche sind relativ stark gerichtet, das heißt sie strahlen vom Flügel nicht in alle Richtungen gleich ab.

A.3.3 Amplitudenmodulationen

Für die Windenergieanlagen als Geräuschquelle ergibt sich als Konsequenz aus der Richtcharakteristik, dass sich das Geräusch für den Beobachter ändert, je nachdem wo der Rotor sich gerade befindet. Im Rhythmus der Drehung der Windenergieanlagen wird es lauter und leiser – es kommt zu Amplitudenmodulationen.

Im Freien steigt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe, d. h. ein Rotorblatt ist im oberen Teil der Bewegung höheren Windgeschwindigkeiten ausgesetzt als im unteren Teil. Und weil höhere Windgeschwindigkeiten zu höheren Geräusch-Emissionen führen, ergibt sich auch durch diesen Effekt ein Auf und Ab im Pegel, das ebenso zu den Amplitudenmodulationen beiträgt wie die Richtcharakteristik.

Ist der Immissionspunkt nicht genau vor oder hinter der Anlage, dann bewegen sich die Rotorblätter auch noch auf den Beobachter zu und wieder von ihm weg. Weil die Rotorblätter sich dabei sehr schnell bewegen, wirkt ein deutlicher Doppler-Effekt. Es kommt zu der bekannten Frequenzverschiebung zwischen Bewegung auf den Beobachter zu und vom Beobachter weg. Diese Frequenzverschiebung ist bei dem extrem breitbandigen Geräusch nicht sehr auffällig. Der Doppler-Effekt führt allerdings auch zu einer Verstärkung des Pegels, wenn sich die Quelle auf den Beobachter zu bewegt. Kommt das Rotorblatt auf den Beobachter zu, wird es durch den Doppler-Effekt um bis zu mehreren dB lauter, bewegt es sich weg, wird es entsprechend leiser. Da eine Windenergieanlagen typischerweise über drei Rotorblätter verfügt, gleicht sich dieser Effekt zum Teil zwischen den Rotorblättern aus, es kann aber ein hörbarer Effekt bleiben.

Neben der Entstehung von AM direkt an der Quelle, können AM auch auf dem Ausbreitungsweg entstehen bzw. verstärkt werden. Die Höhe der Quelle ändert sich durch die Drehung der Rotoren ständig, und die Ausbreitungsbedingungen von der Quelle zum Immissionsort können von der Höhe der Quelle abhängig sein. Es besteht die Möglichkeit, dass in größerer Entfernung von der Windenergieanlagen ausgeprägtere AM beobachtet werden als in der Nähe der Windenergieanlagen.

Zusammengefasst, entsteht an der Windenergieanlage breitbandiges Rauschen. Und dieses Rauschen kann sich aus verschiedenen Gründen im Rhythmus der Drehung der Anlage im Pegel anheben und absenken, ein Effekt der als Amplitudenmodulation bezeichnet wird.

A.4 Sonstige Geräusche

Windenergieanlagen sind große technische Geräte. Es können Getriebegeräusche entstehen, Generatorgeräusche, und auch das Drehen der Gondeln kann in der Nähe hörbar sein. Unter Immissionsschutzaspekten spielen diese sonstigen Geräusche jedoch keine Rolle.

B Messergebnisse für alle Untersuchungsgebiete

In diesem Anhang sind die Messdaten für die fünf Untersuchungsgebiete zusammengestellt. Es sind jeweils die Messdaten über die gesamte Messzeit im Immissionsbereich dargestellt. Hierfür wurden nur Mittelwerte (Mittelungszeit 10 min in den UG 2 bis UG 5 und 60 min im UG 1) herangezogen, bei denen folgende meteorologische Voraussetzungen gegeben sind:

- ▶ Maximal 20 % Regen,
- ▶ relative Luftfeuchte < 95 %.
- ▶ Temperatur > 0°C
- ▶ Windgeschwindigkeit am Mikrofon < 5 m/s

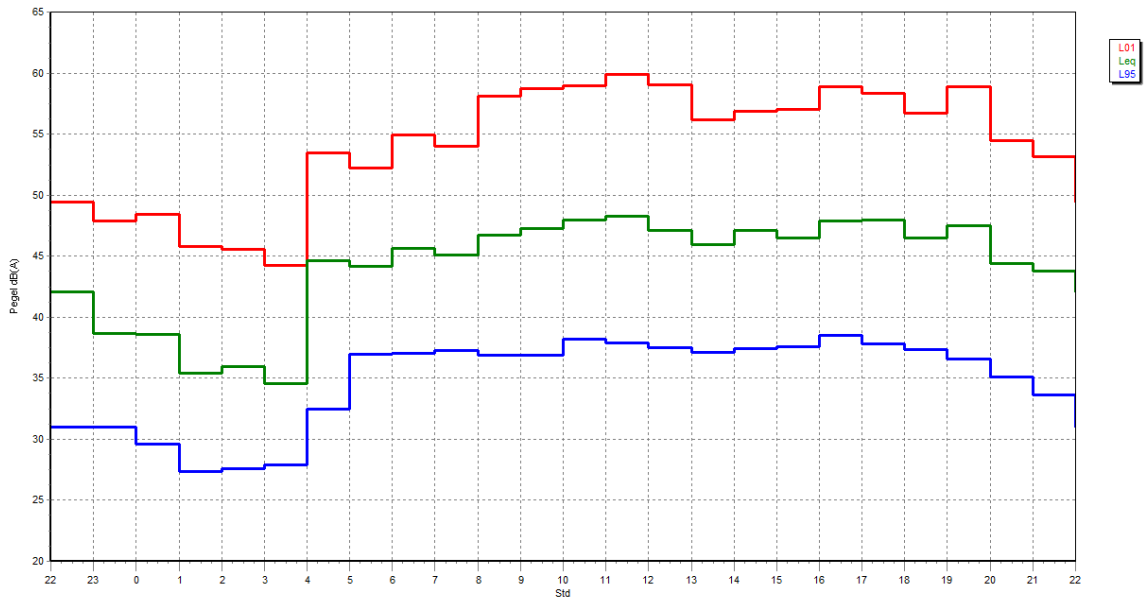
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen u. a. die Verläufe der Hintergrundpegel (L_{95}), der Mittelungspegel (L_{eq}) und der Spitzenpegel (L_1) im Langzeitmittel über die gesamte Messzeit.

Stellvertretend für die Geräuschsituation während der Nachtzeit werden die gemittelten Perzentspektren für den Zeitraum von 02:00 Uhr bis 04:00 Uhr dargestellt, da in dieser Zeit mit dem geringsten Anteil an Fremdgeräuschen durch beispielsweise Straßenverkehr oder Vogelgezwitscher zu rechnen ist.

In den Darstellungen der Mittelungspegel über elektrischer Leistung der Windenergieanlagen bzw. über die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe sind Zeiträume mit identifizierten Fremdgeräuschen ausgeschlossen worden. Traten innerhalb der Mittelungszeit von 10 Minuten Fremdgeräusche auf, so wurden die gesamten 10 Minuten von der Auswertung ausgeschlossen. Die Auswertung der Amplitudenmodulation erfolgt in Mittelungszeiträumen von 10 Sekunden. Entsprechend werden Fremdgeräusche deutlich feiner ausgeschlossen. Aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlage sind die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar.

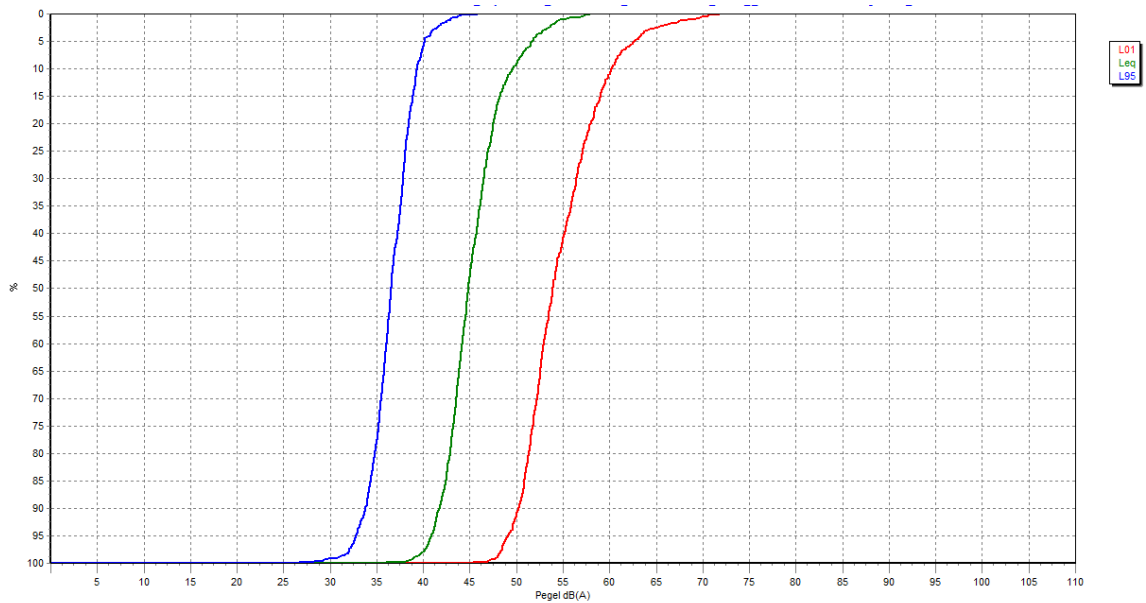
B.1 Untersuchungsgebiet 1

Abbildung 65: Tagesgang der Mittelungspegel UG 1



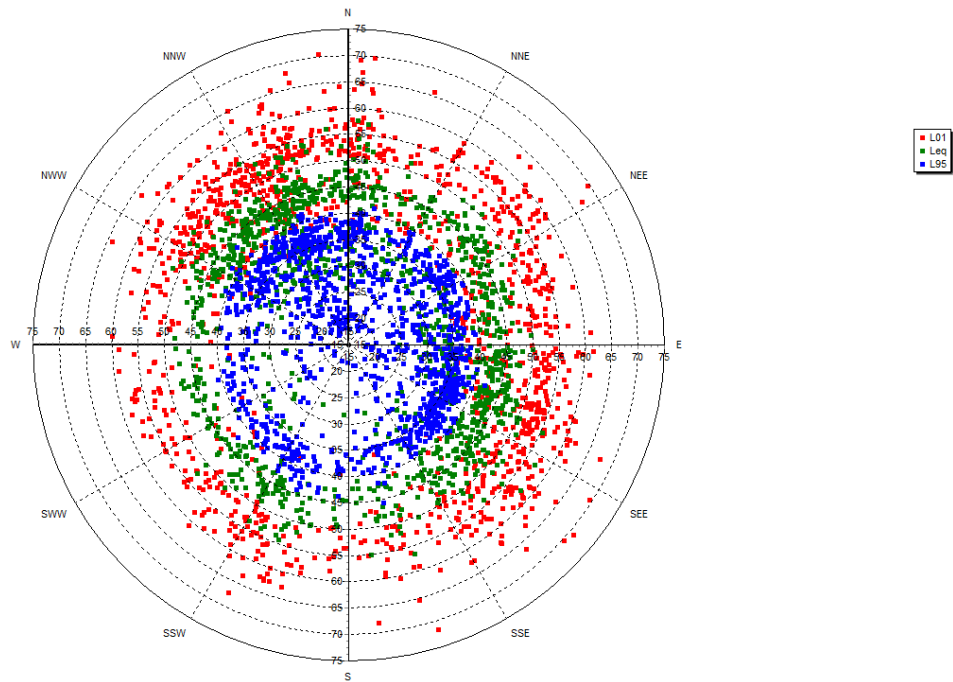
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 66: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 1



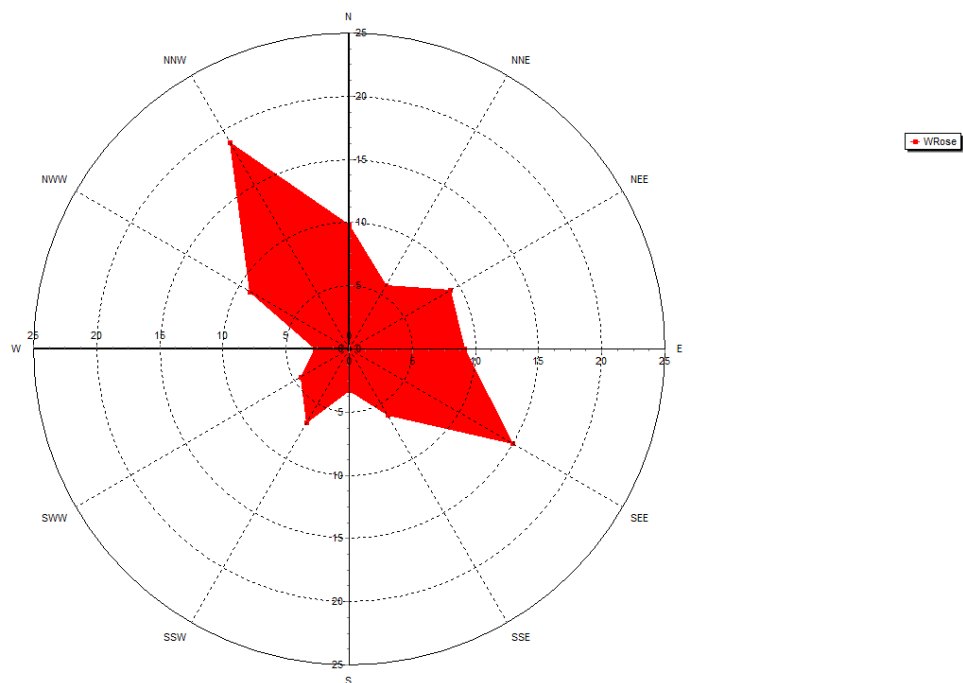
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 67: Pegelverteilung über Windrichtung UG 1



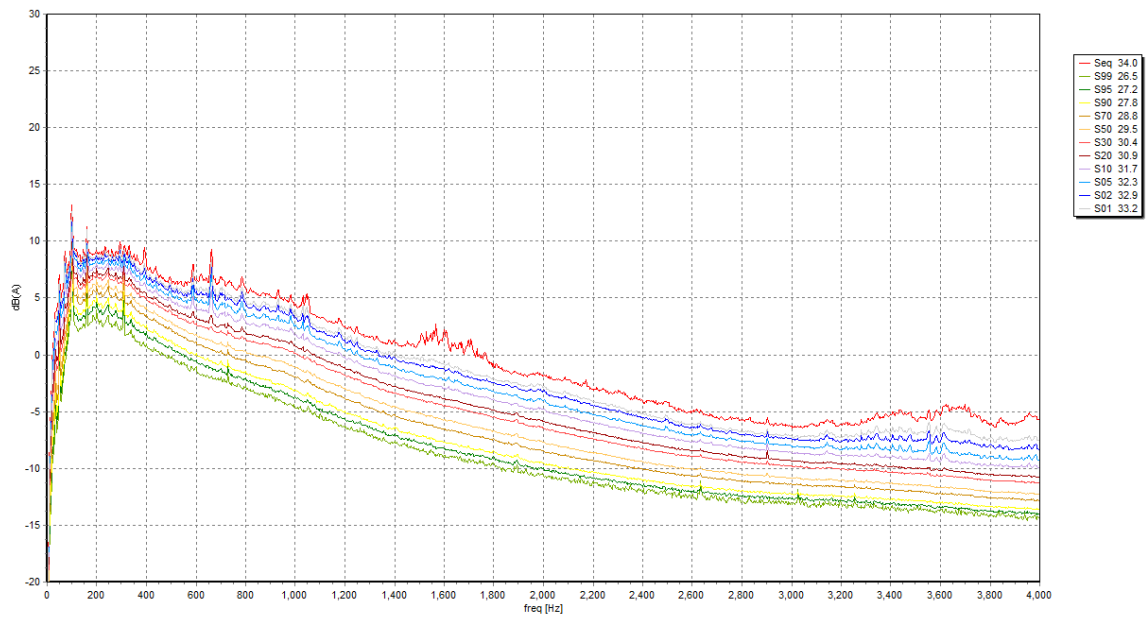
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 68: Windverteilung im UG 1



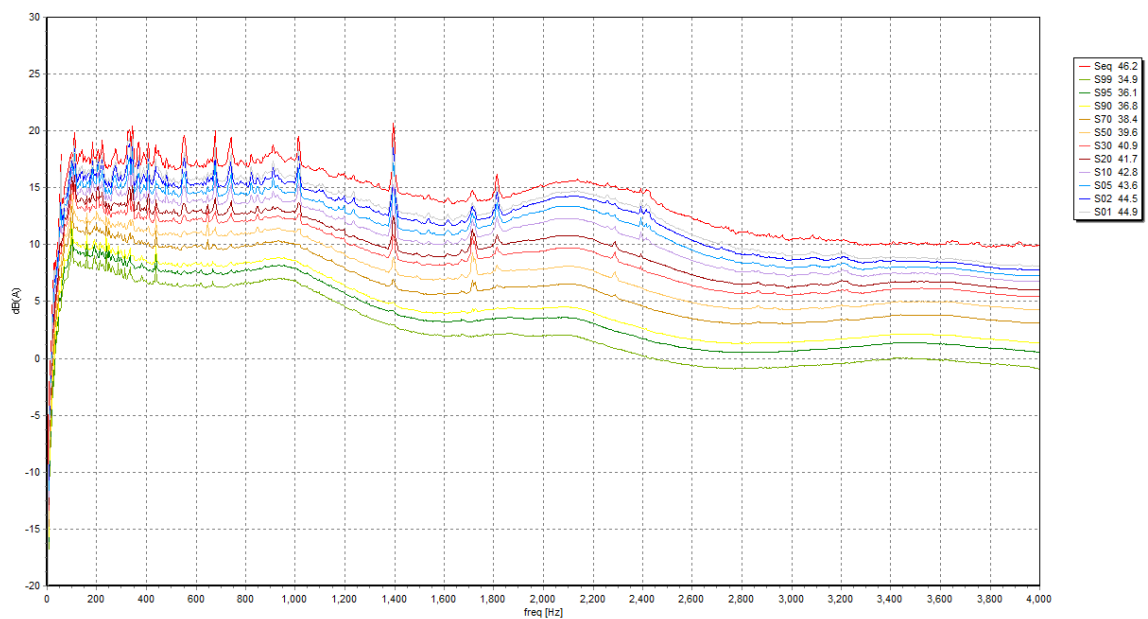
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 69: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 1



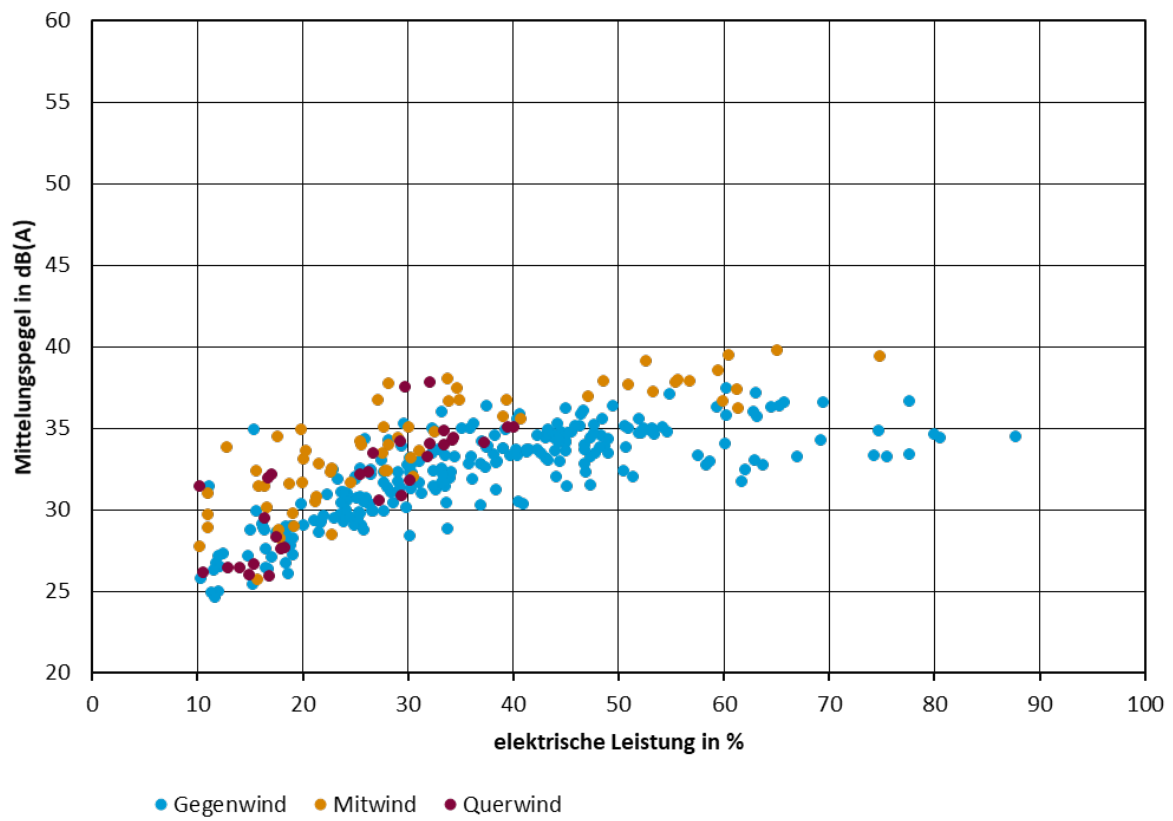
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 70: Gemittelte Perzentilspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 1



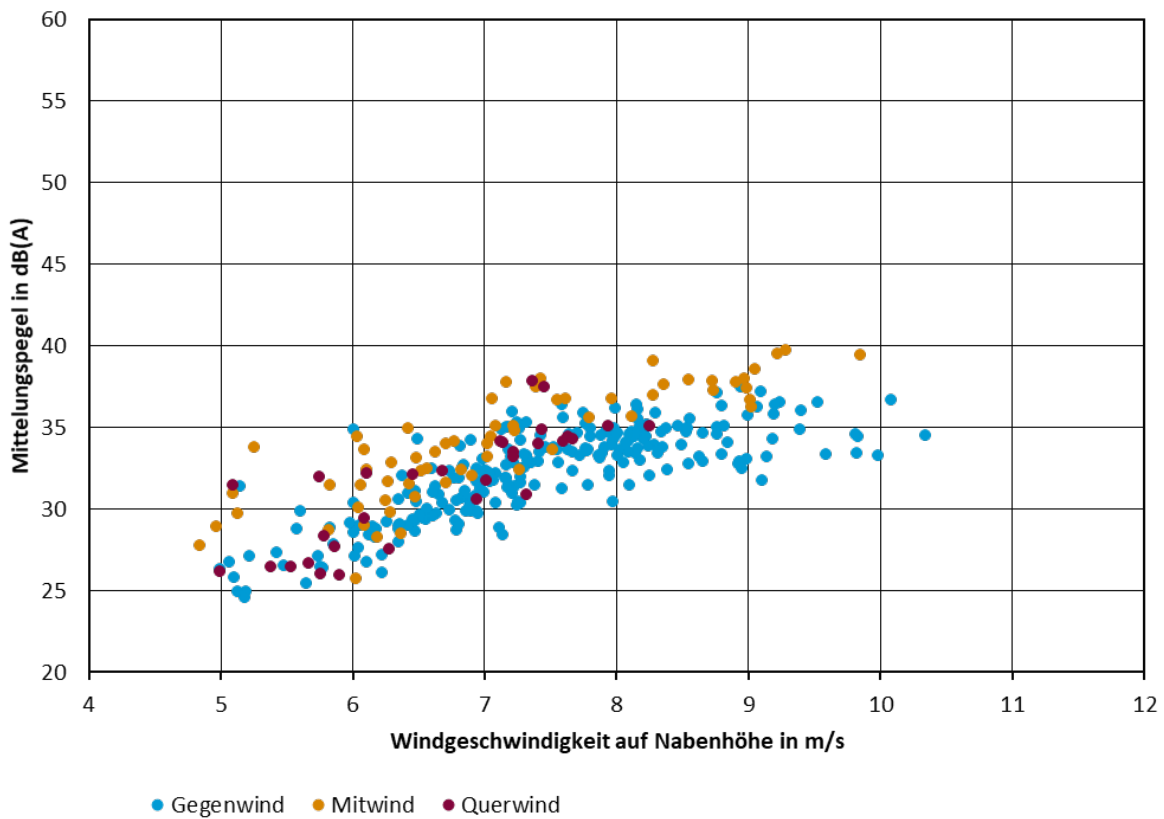
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 71: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des gesamten Windparks UG 1



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

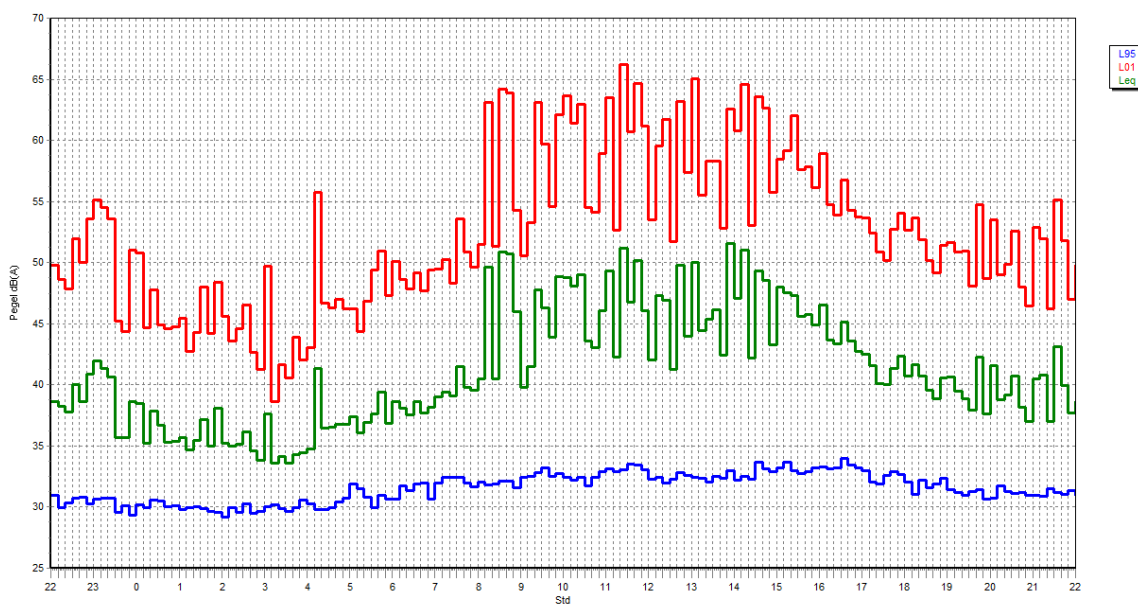
Abbildung 72: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 1



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

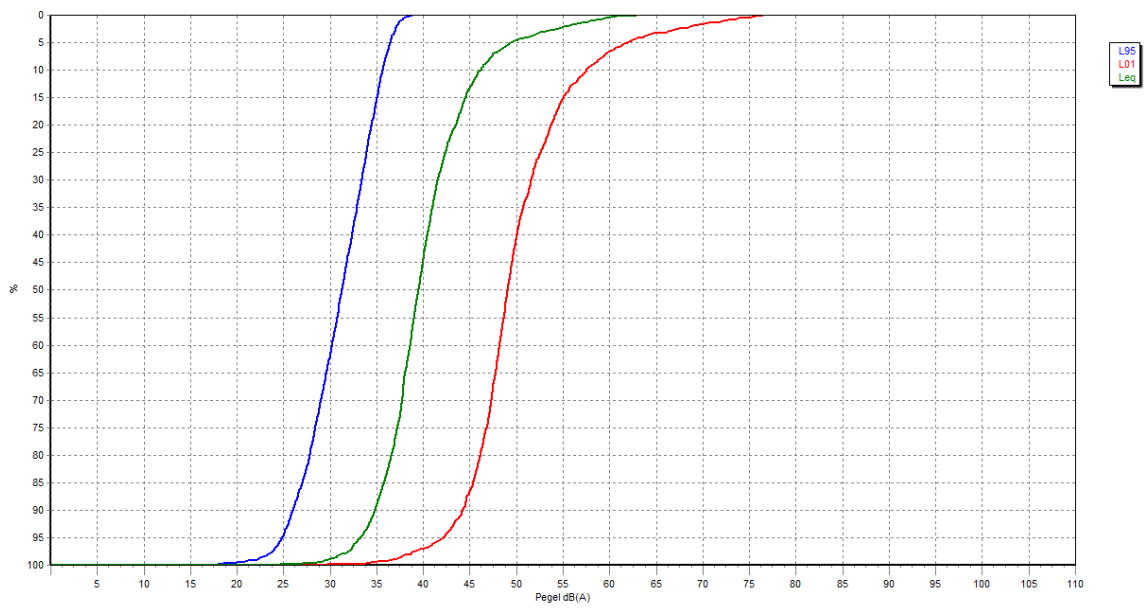
B.2 Untersuchungsgebiet 2

Abbildung 73: Tagesgang der Mittelungspegel UG 2



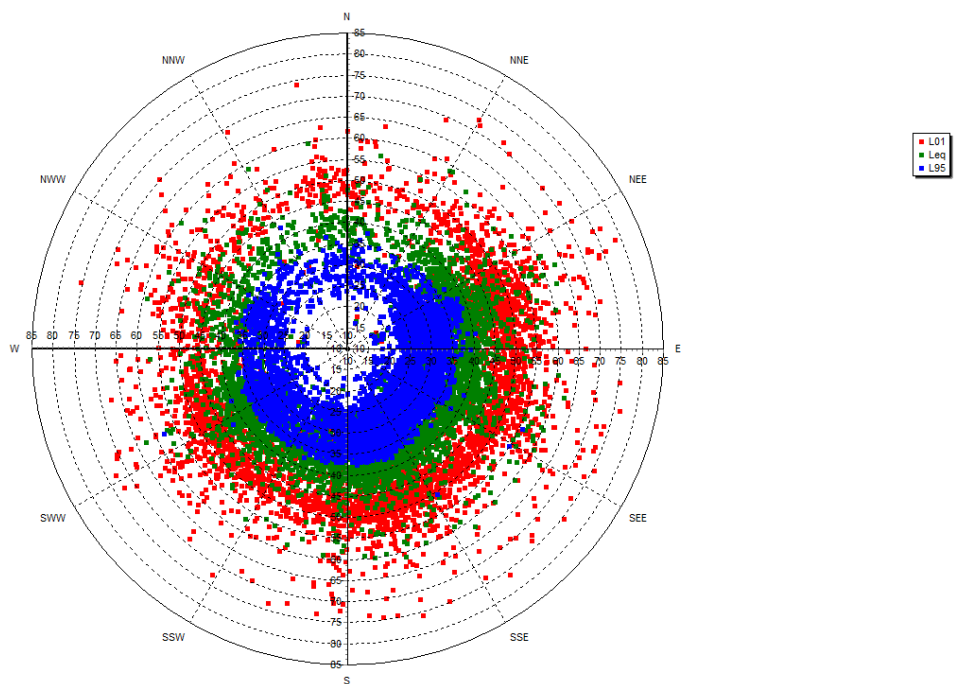
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 74: Summenhäufigkeit der Mittelungspiegel UG 2



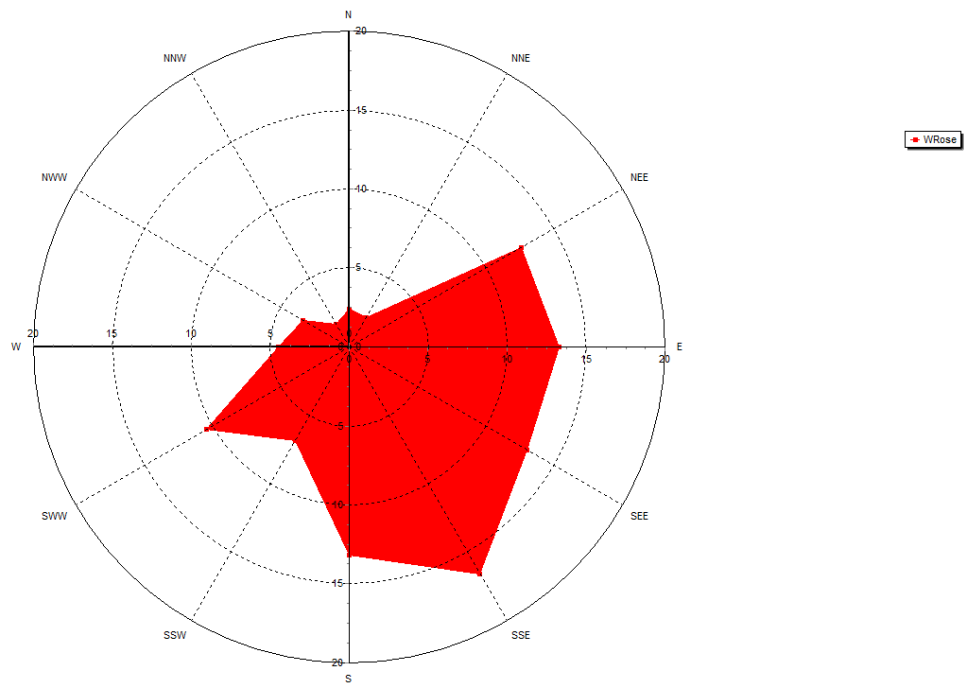
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 75: Pegelverteilung über Windrichtung UG 2



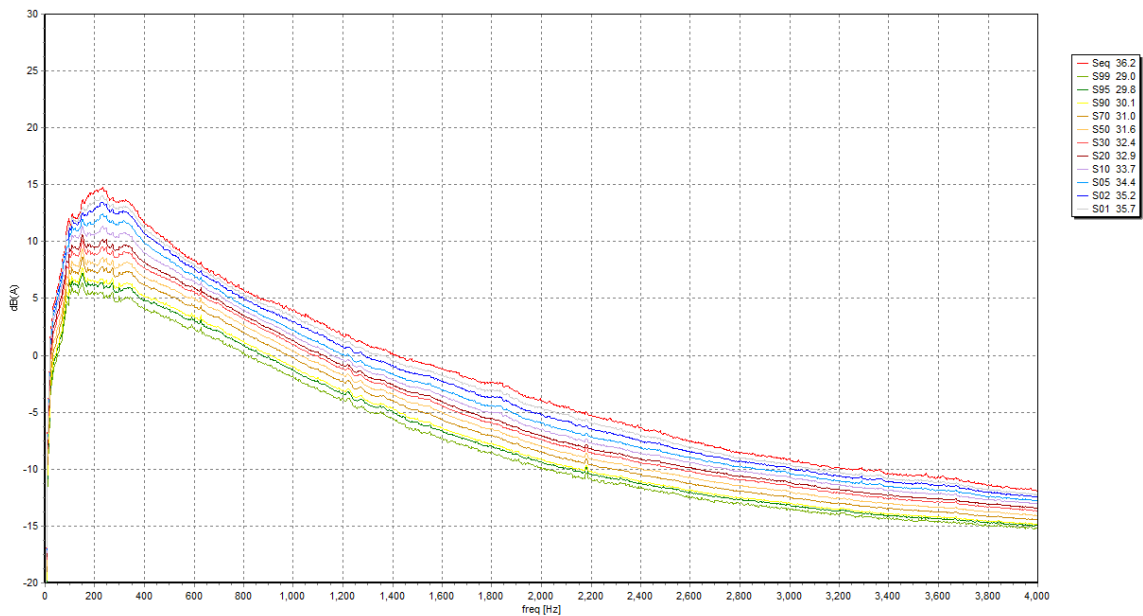
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 76: Windverteilung im UG 2



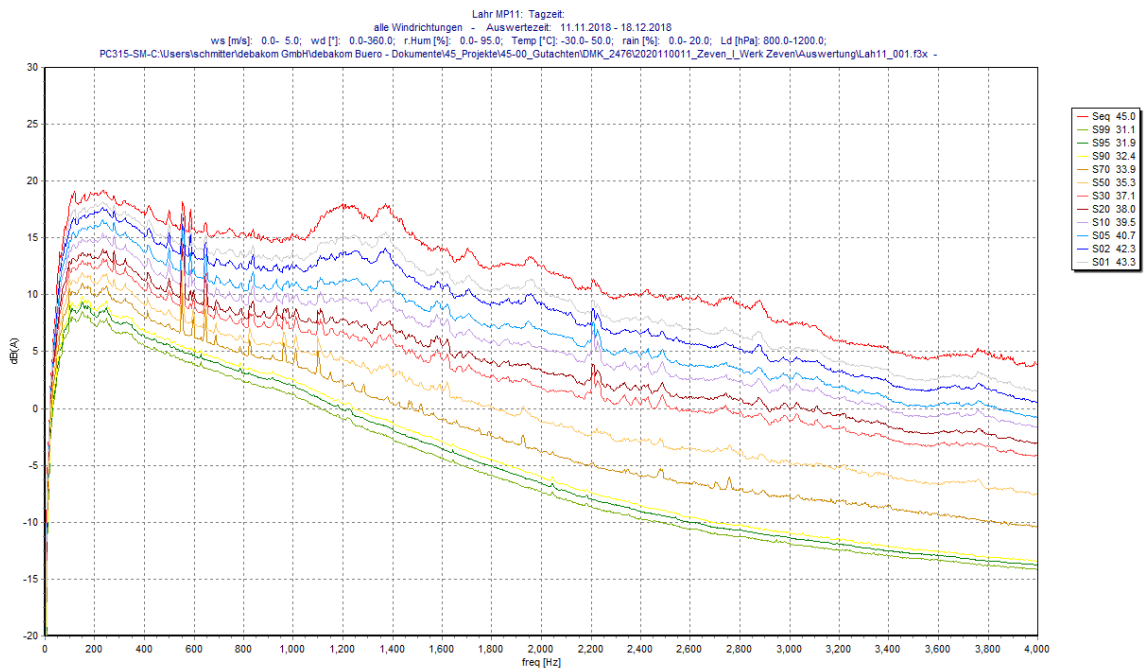
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 77: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 2



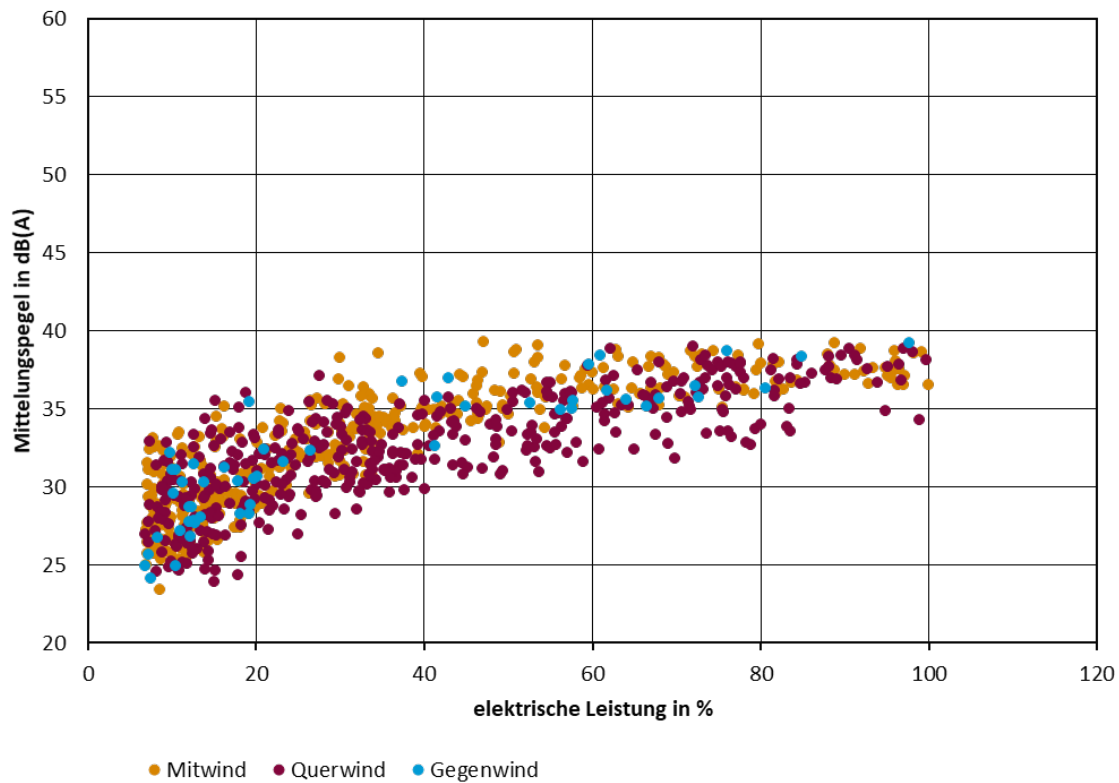
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 78: Gemittelte Perzentilspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 2



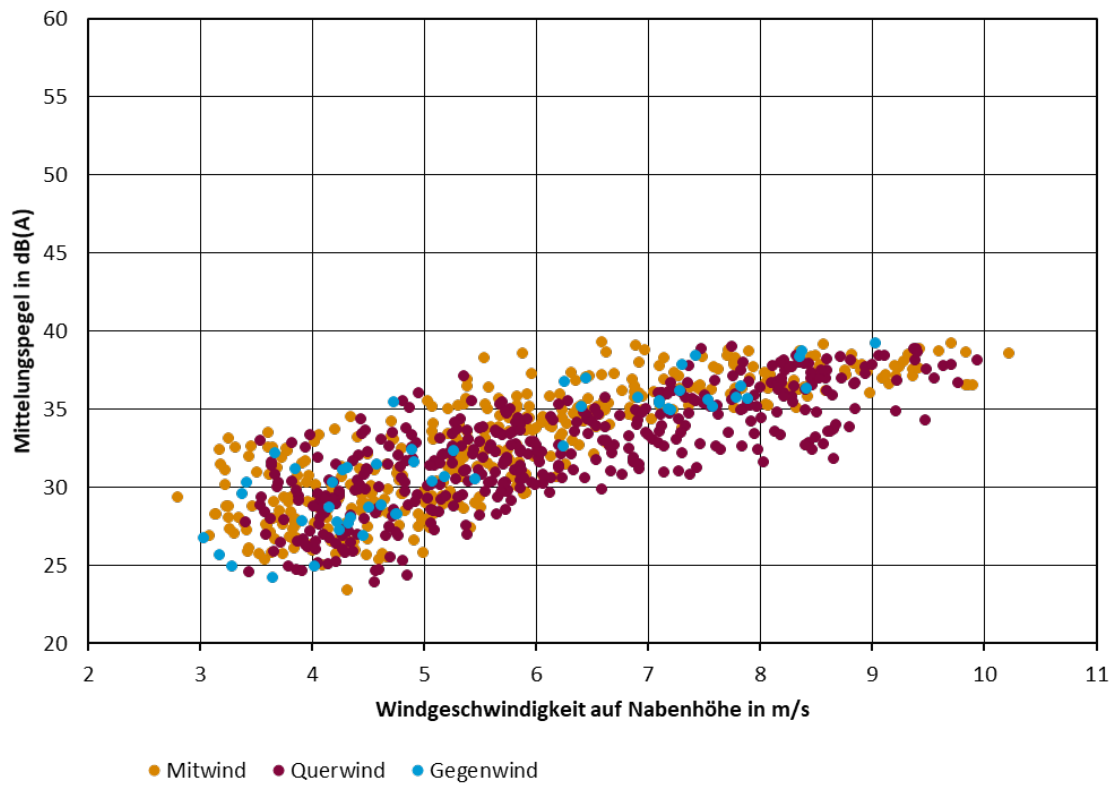
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 79: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des gesamten Windparks UG 2



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

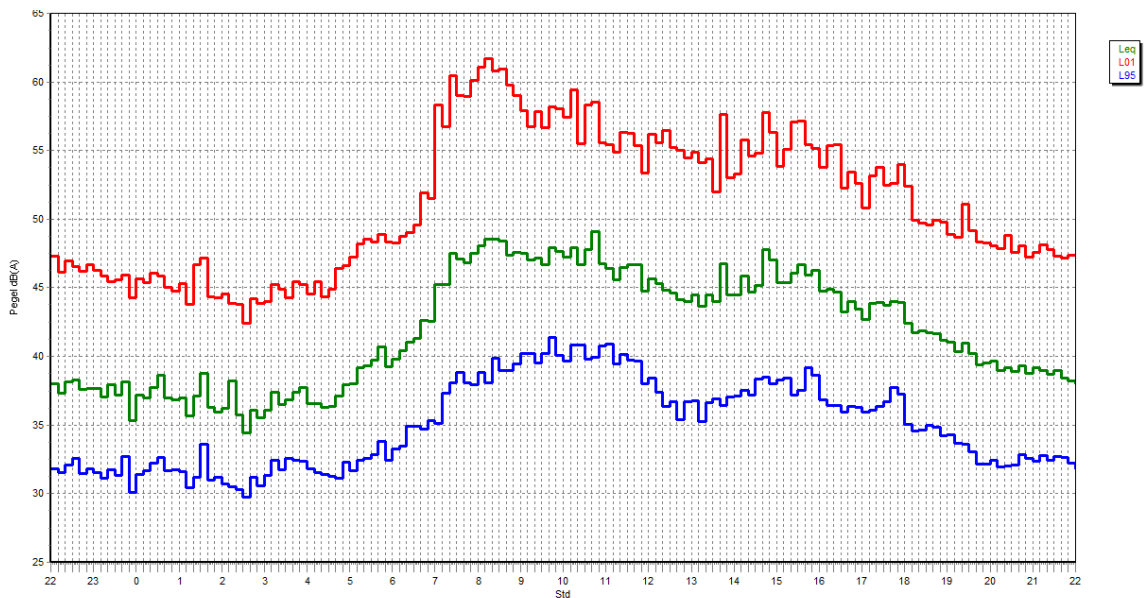
Abbildung 80: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 2



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

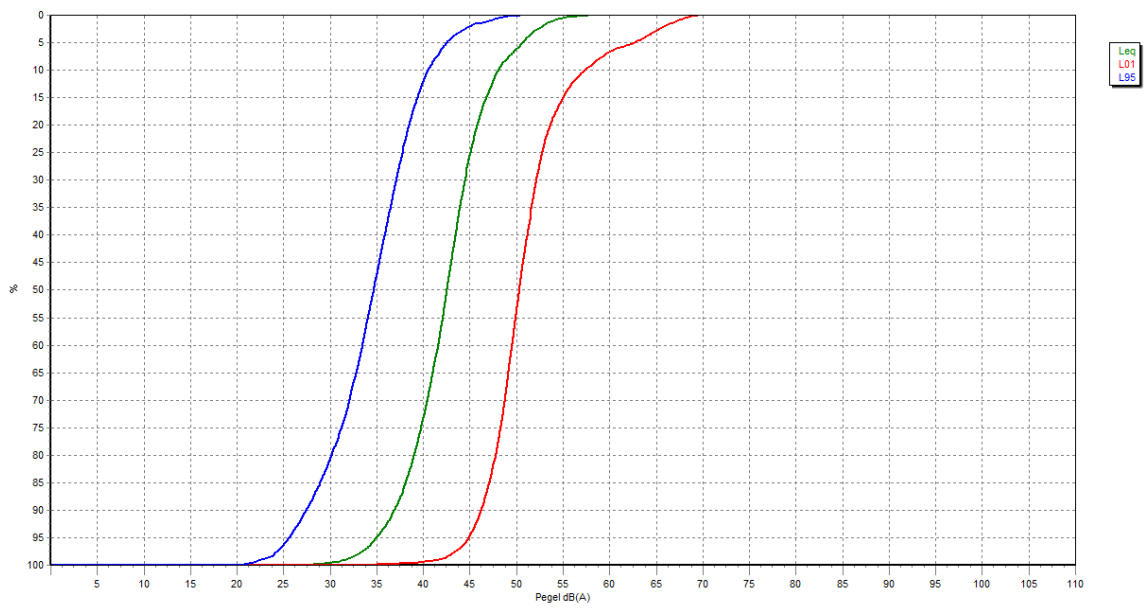
B.3 Untersuchungsgebiet 3

Abbildung 81: Tagesgang der Mittelungspegel UG 3



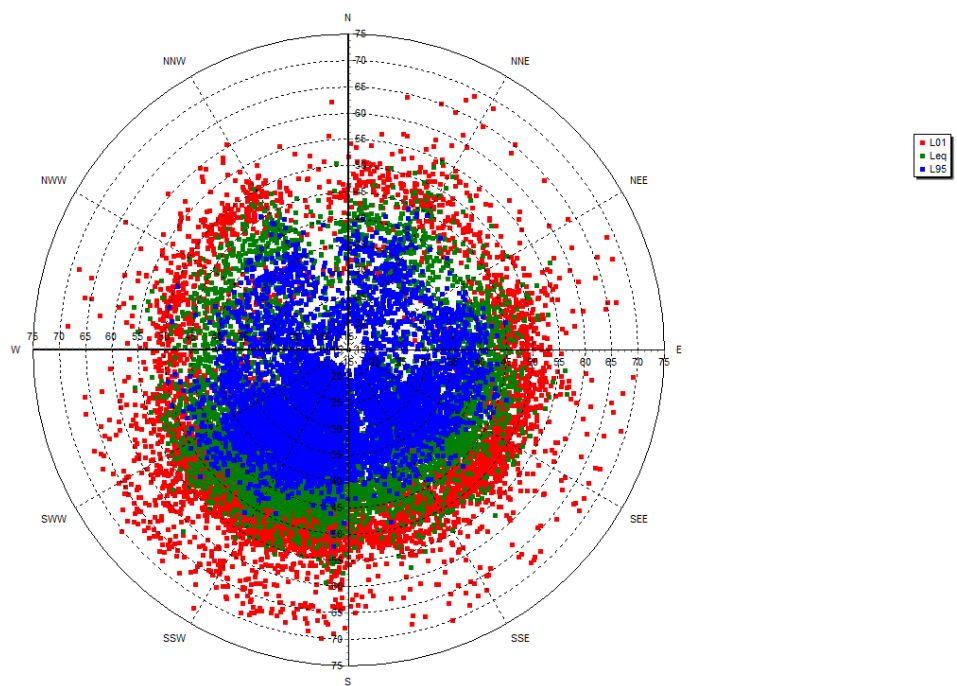
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 82: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 3



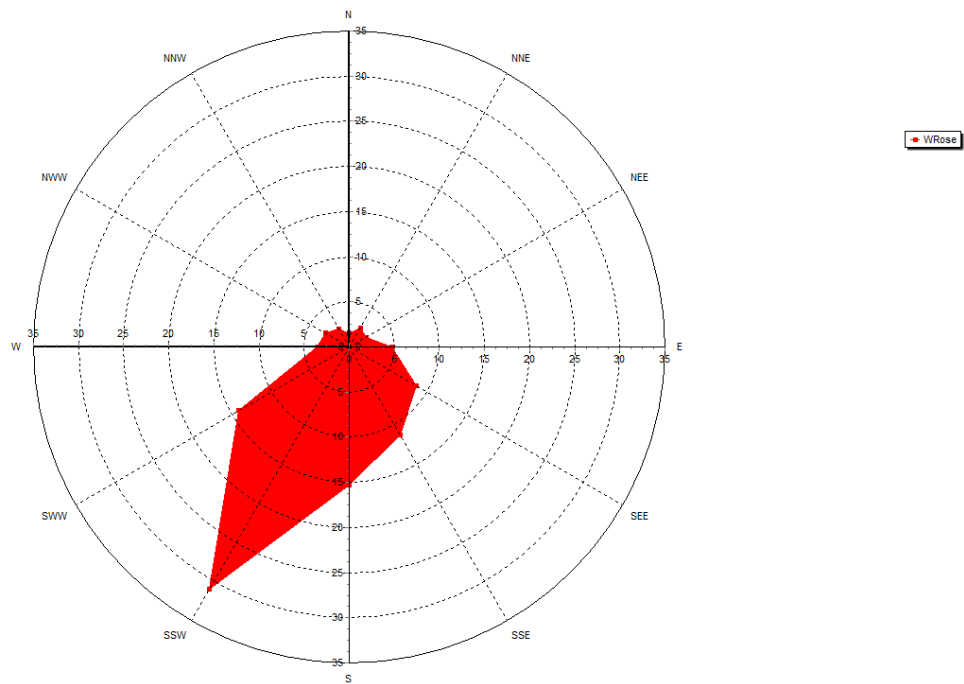
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 83: Pegelverteilung über Windrichtung UG 3



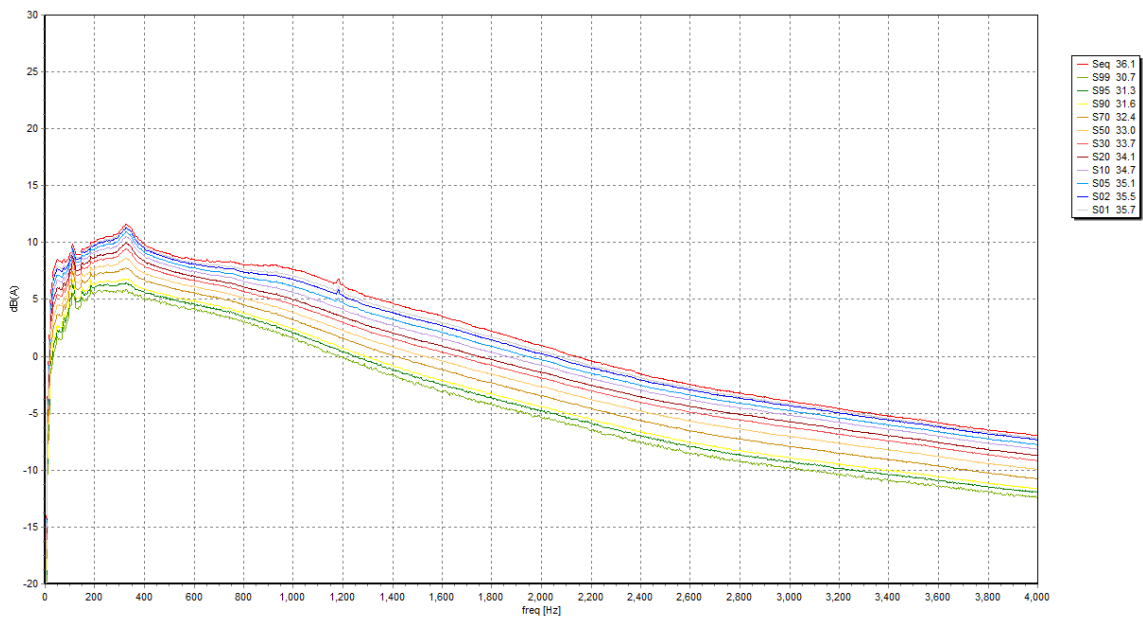
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 84: Windverteilung im UG 3



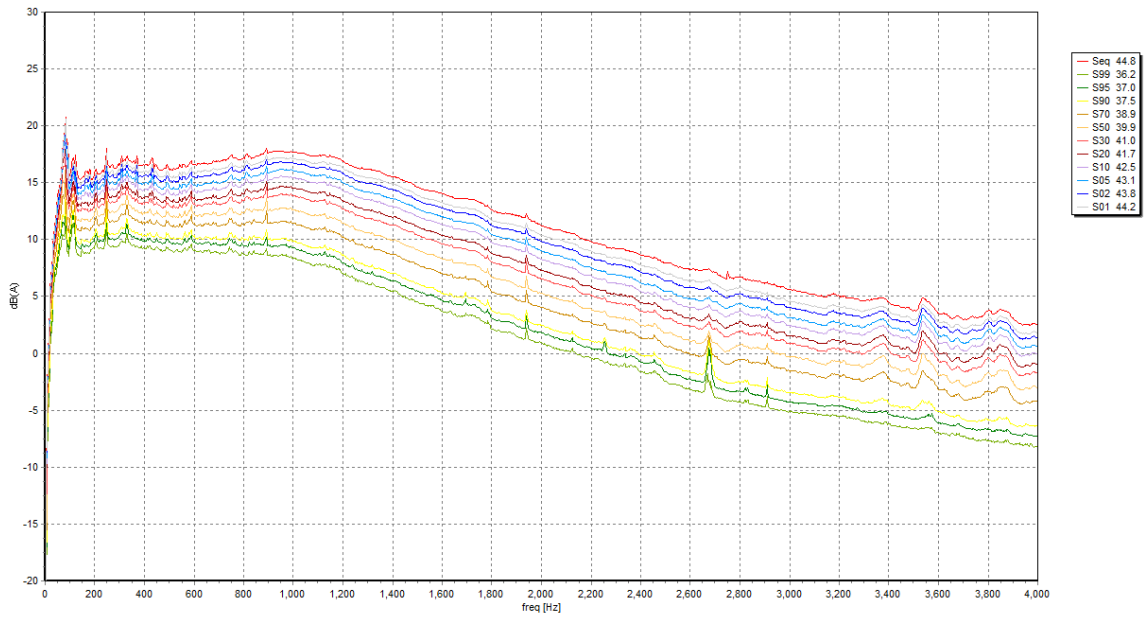
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 85: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 3



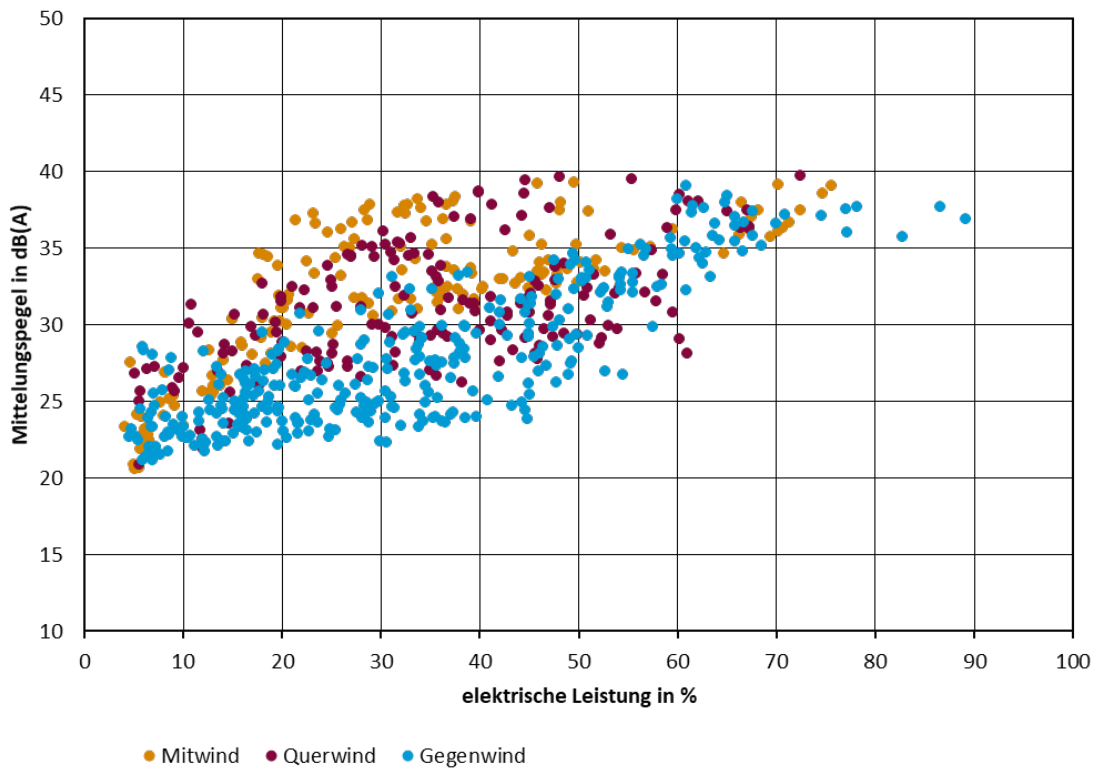
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 86: Gemittelte Perzentspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 3



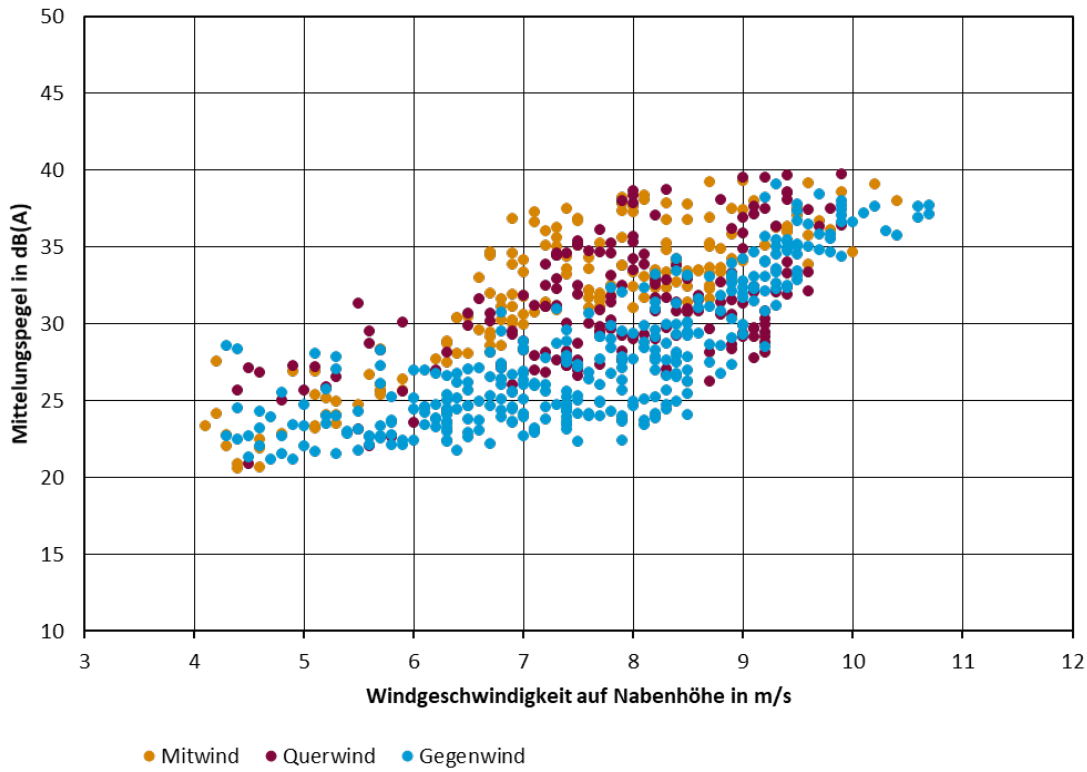
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 87: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des gesamten Windparks UG 3



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

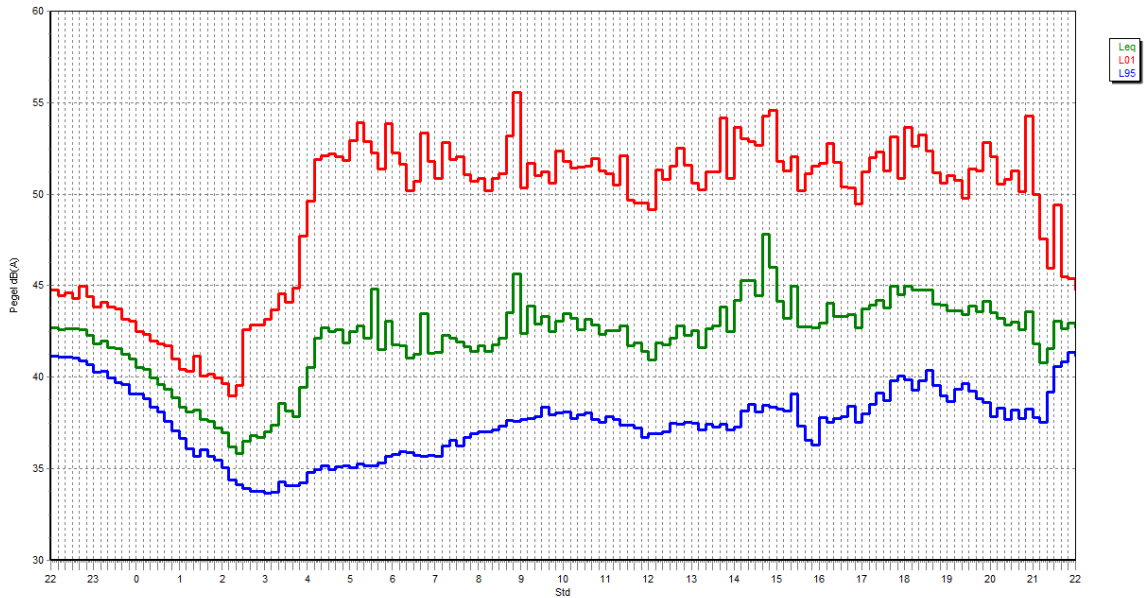
Abbildung 88: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 3



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

B.4 Untersuchungsgebiet 4

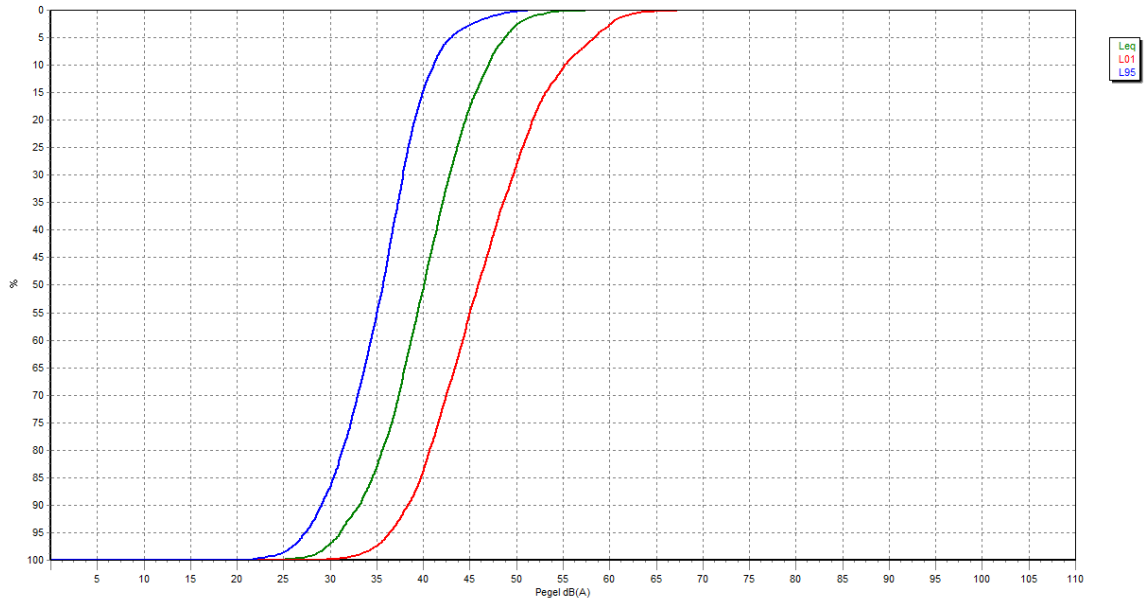
Abbildung 89: Tagesgang der Mittelungspegel UG 4



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

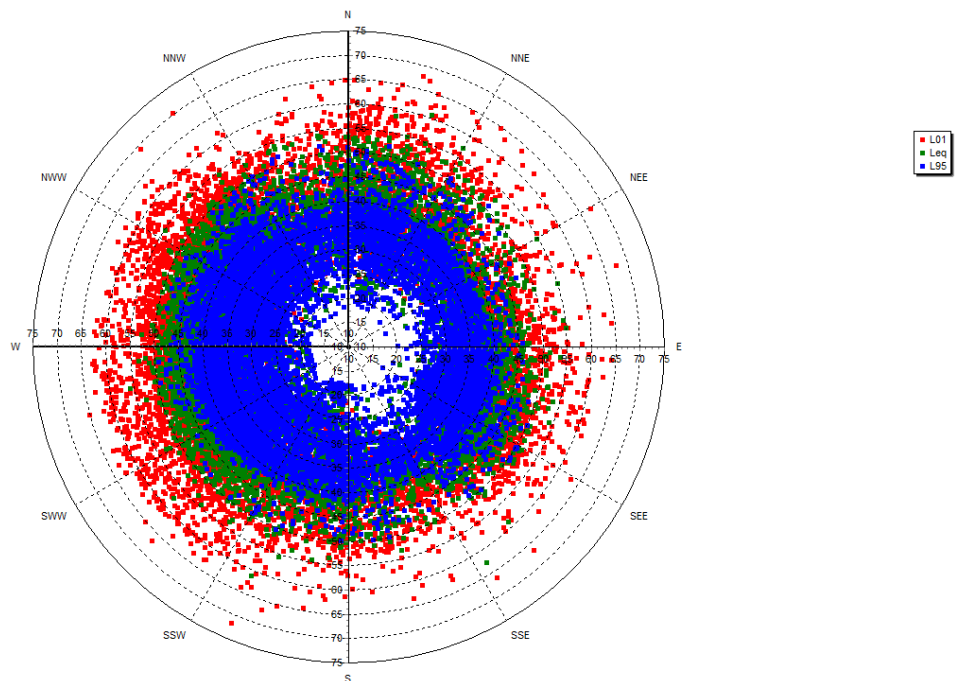
Anmerkung: Der Tagesgang ist maßgeblich durch Geräusche von Grillenzirpen an einzelnen Messtagen beeinflusst, welches über die Nacht abnahm.

Abbildung 90: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 4



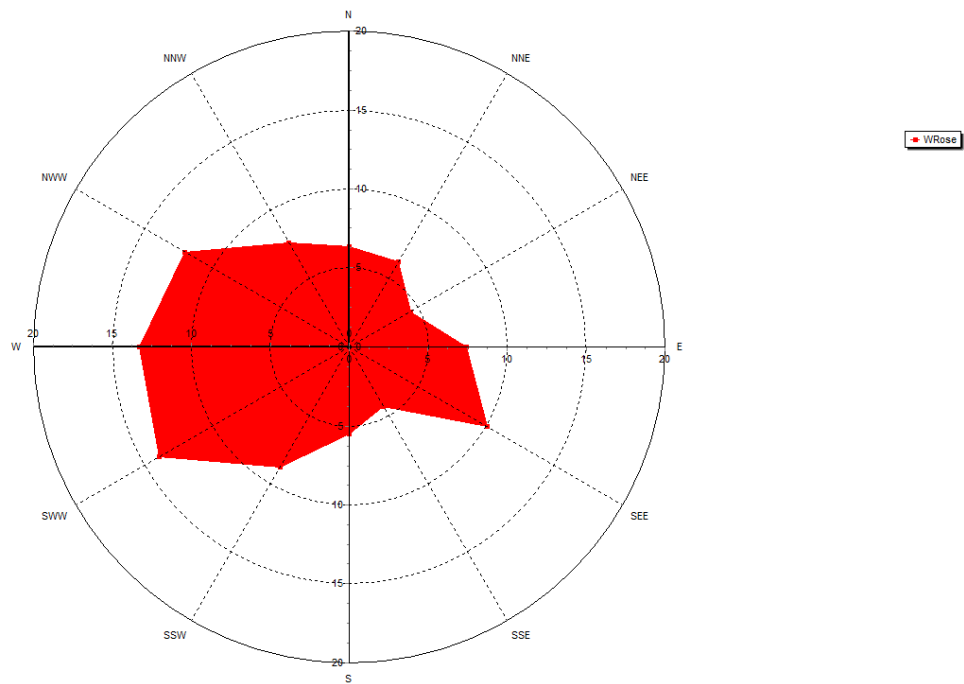
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 91: Pegelverteilung über Windrichtung UG 4



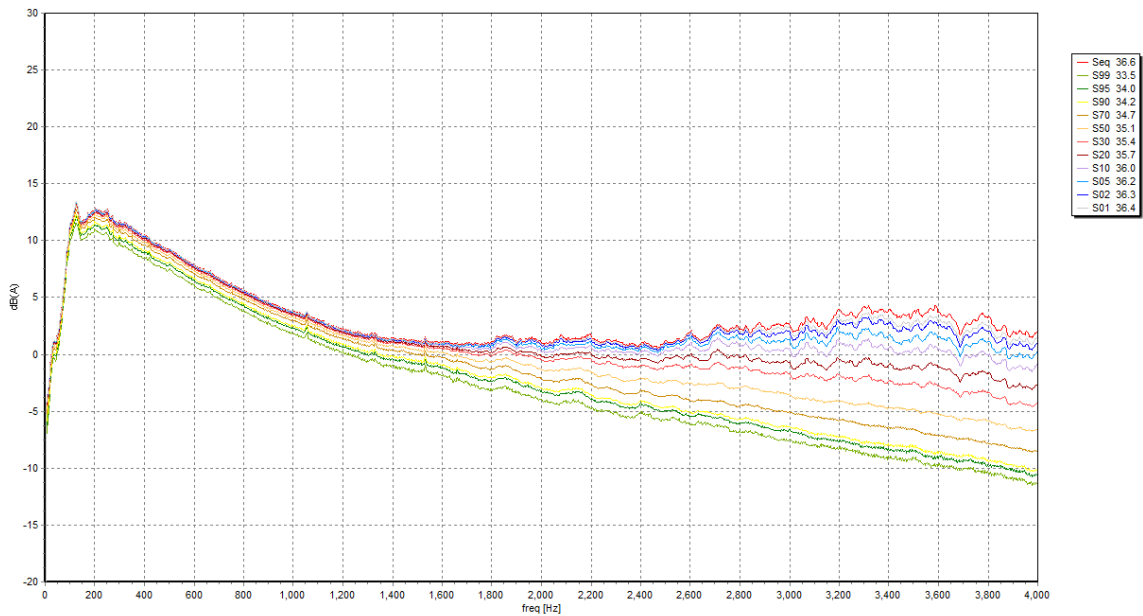
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 92: Windverteilung im UG 4



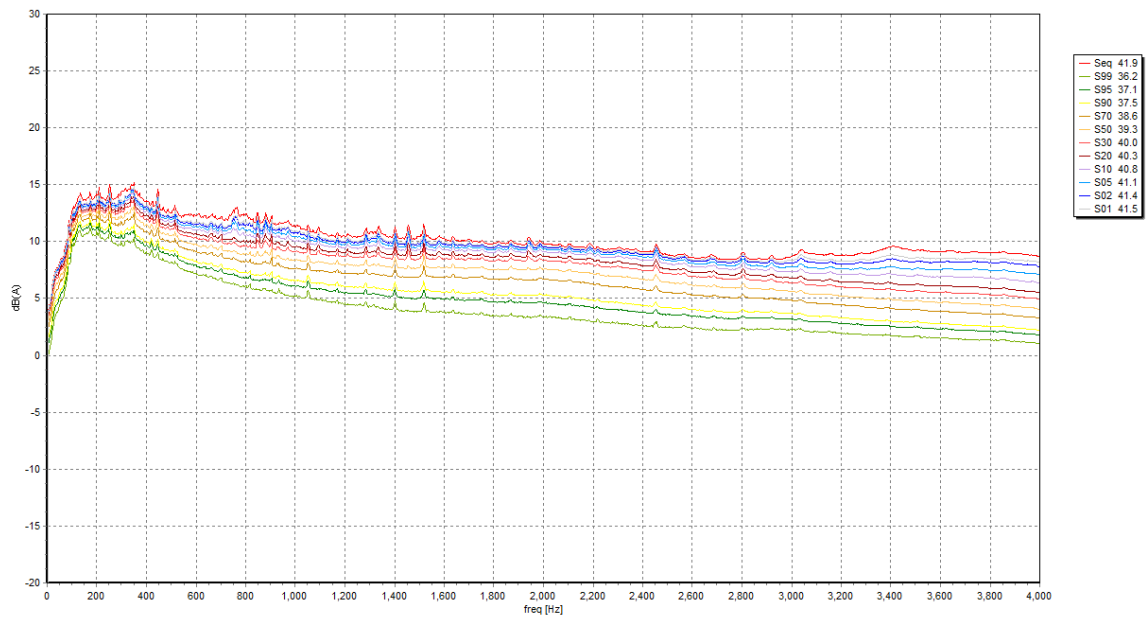
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 93: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 4



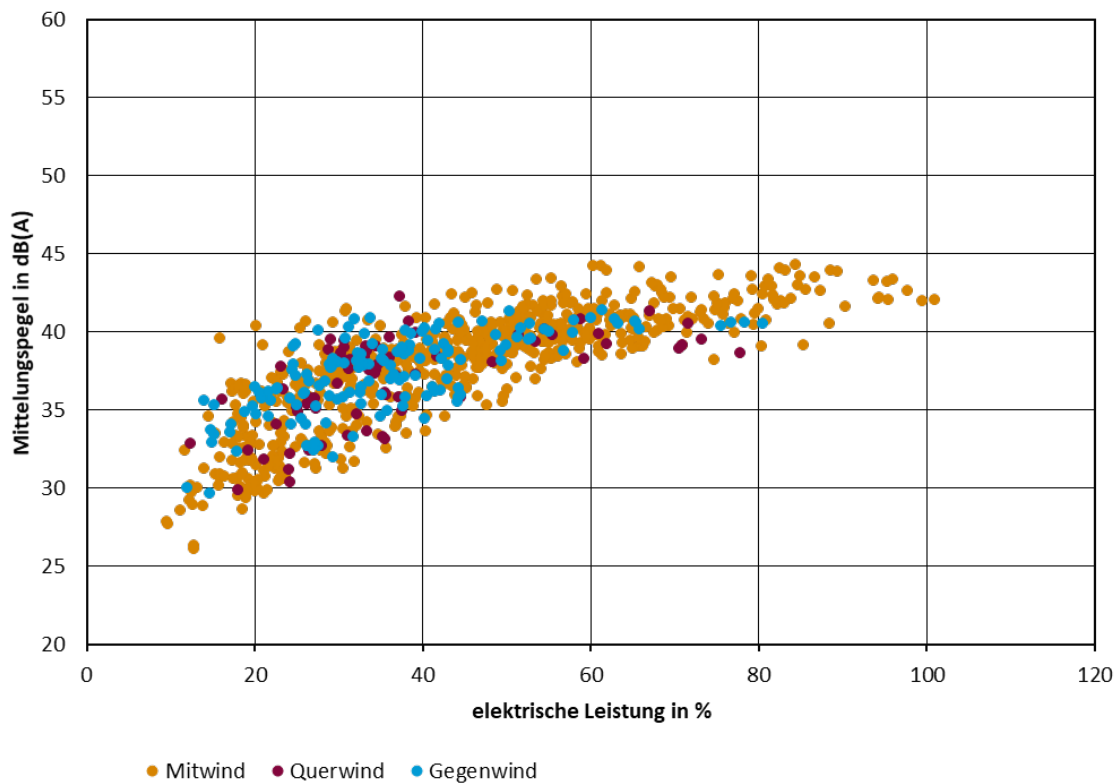
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 94: Gemittelte Perzentilspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 4



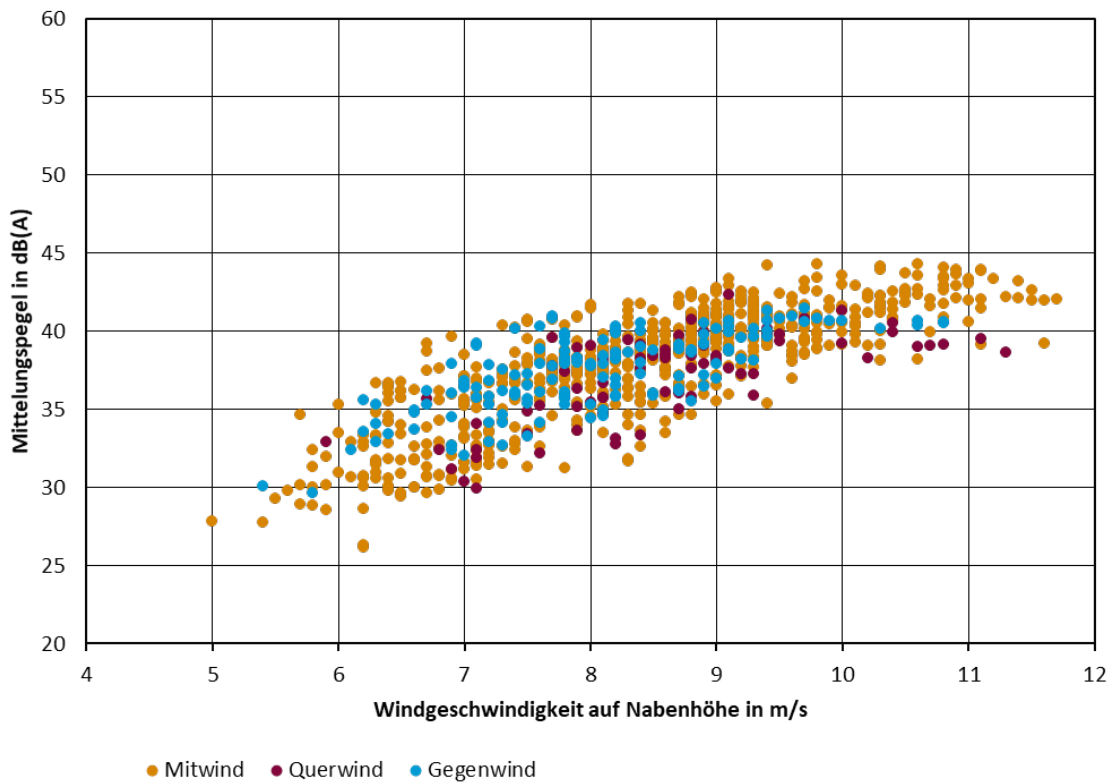
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 95: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Leistung des gesamten Windparks UG 4



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

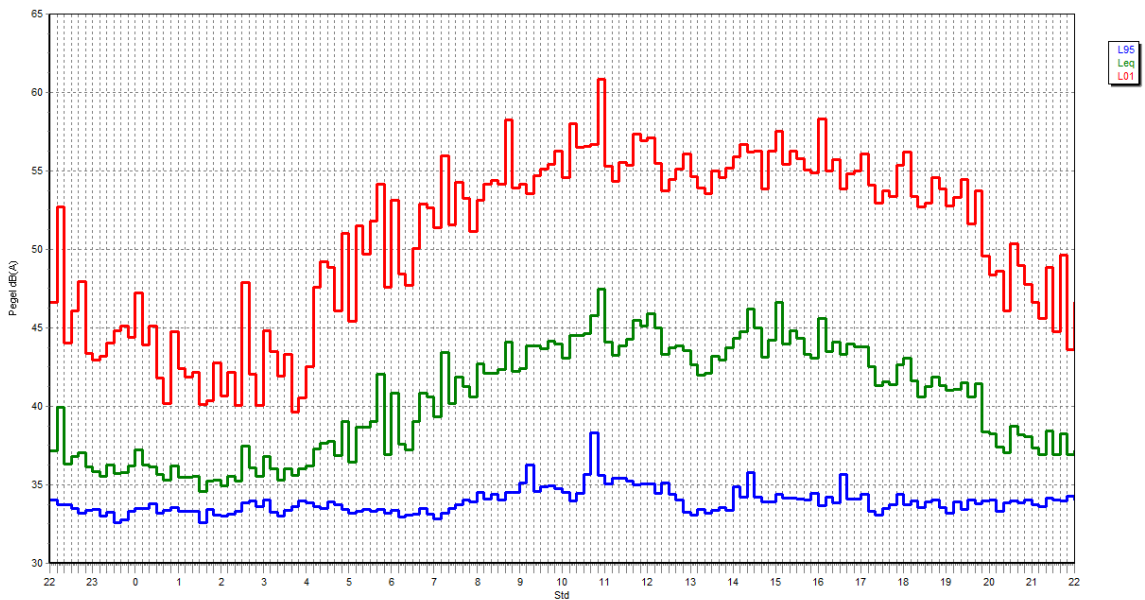
Abbildung 96: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 4



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

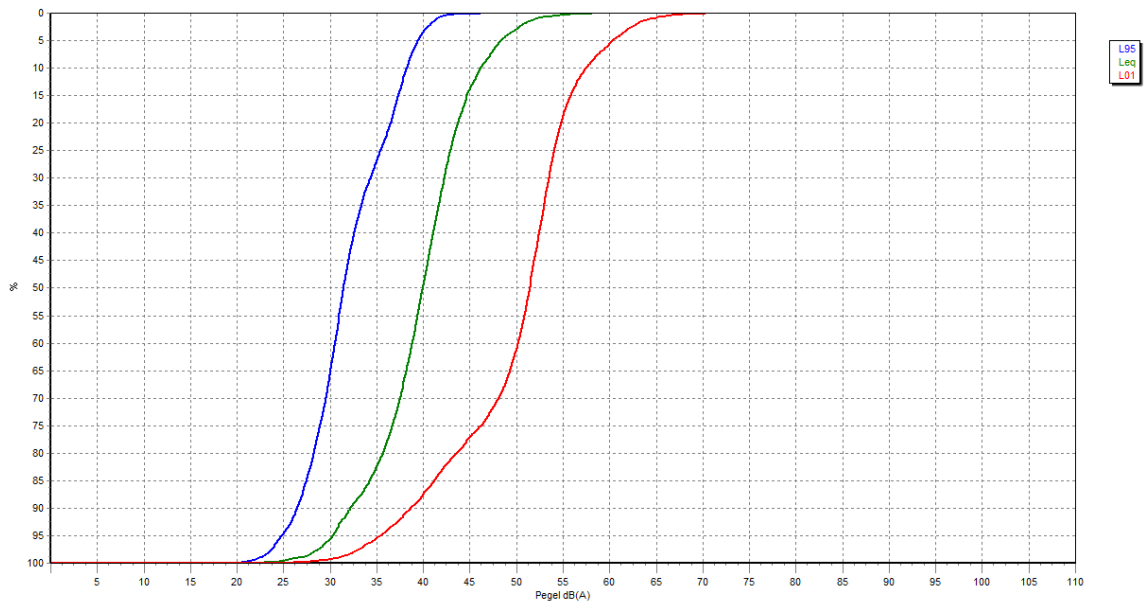
B.5 Untersuchungsgebiet 5

Abbildung 97: Tagesgang der Mittelungspegel UG 5



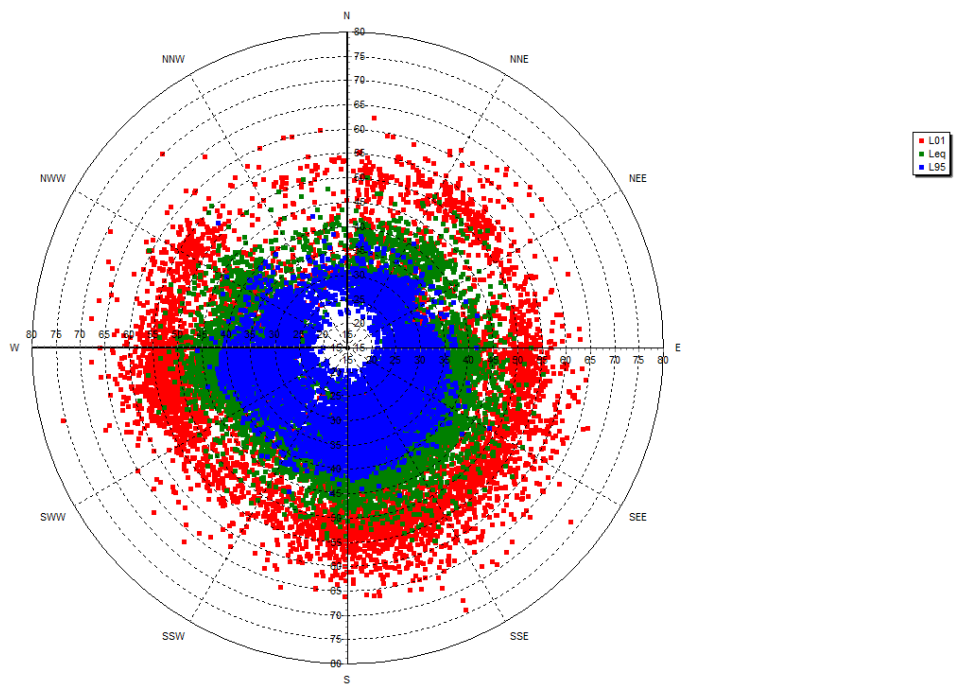
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 98: Summenhäufigkeit der Mittelungspegel UG 5



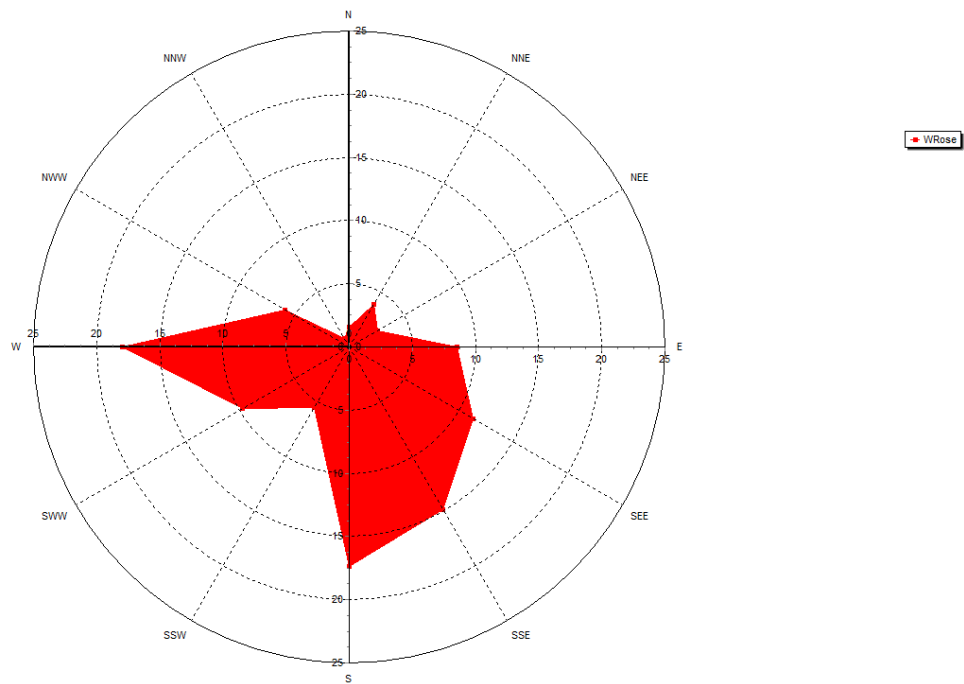
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 99: Pegelverteilung über Windrichtung UG 5



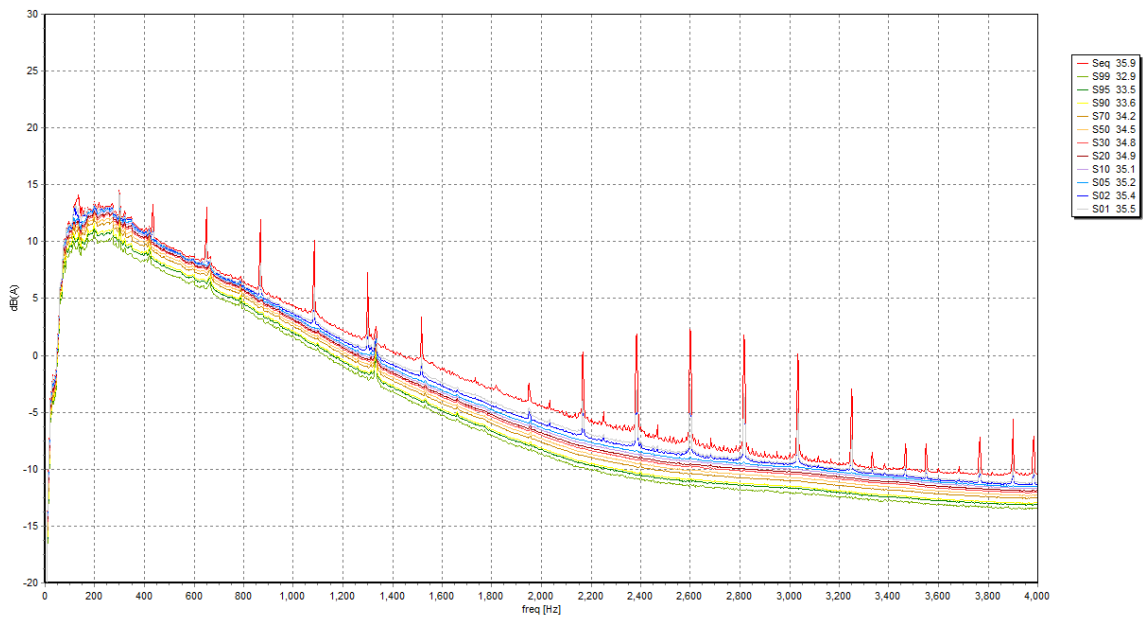
Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 100: Windverteilung im UG 5



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

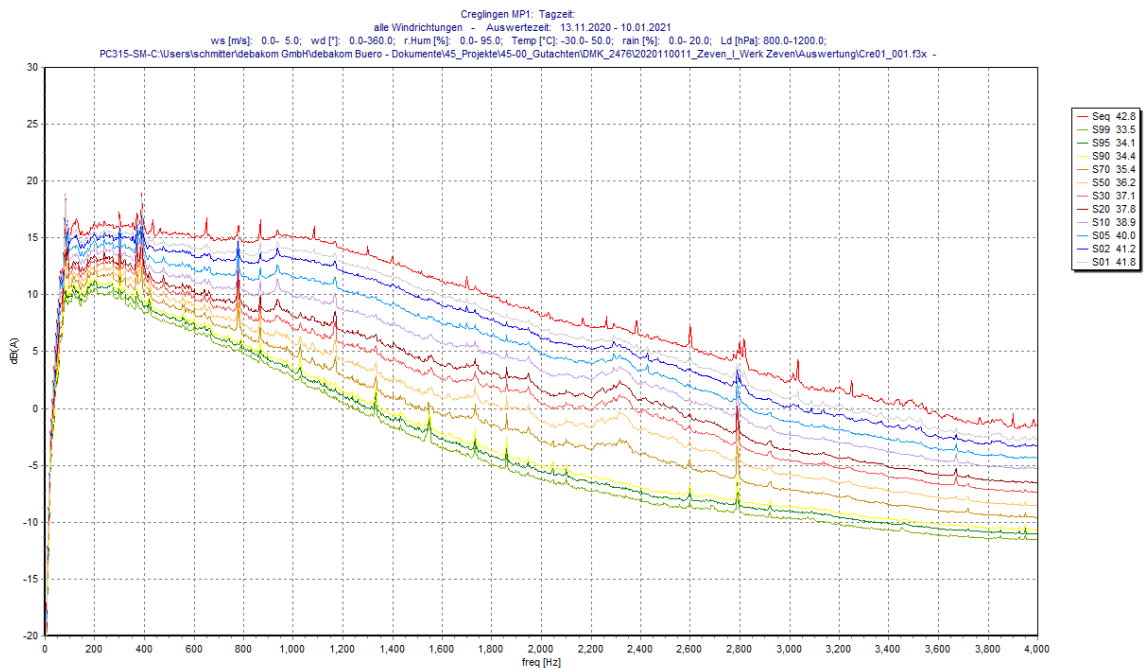
Abbildung 101: Gemittelte Perzentilspektren Nacht (02:00 Uhr – 04:00 Uhr) UG 5



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

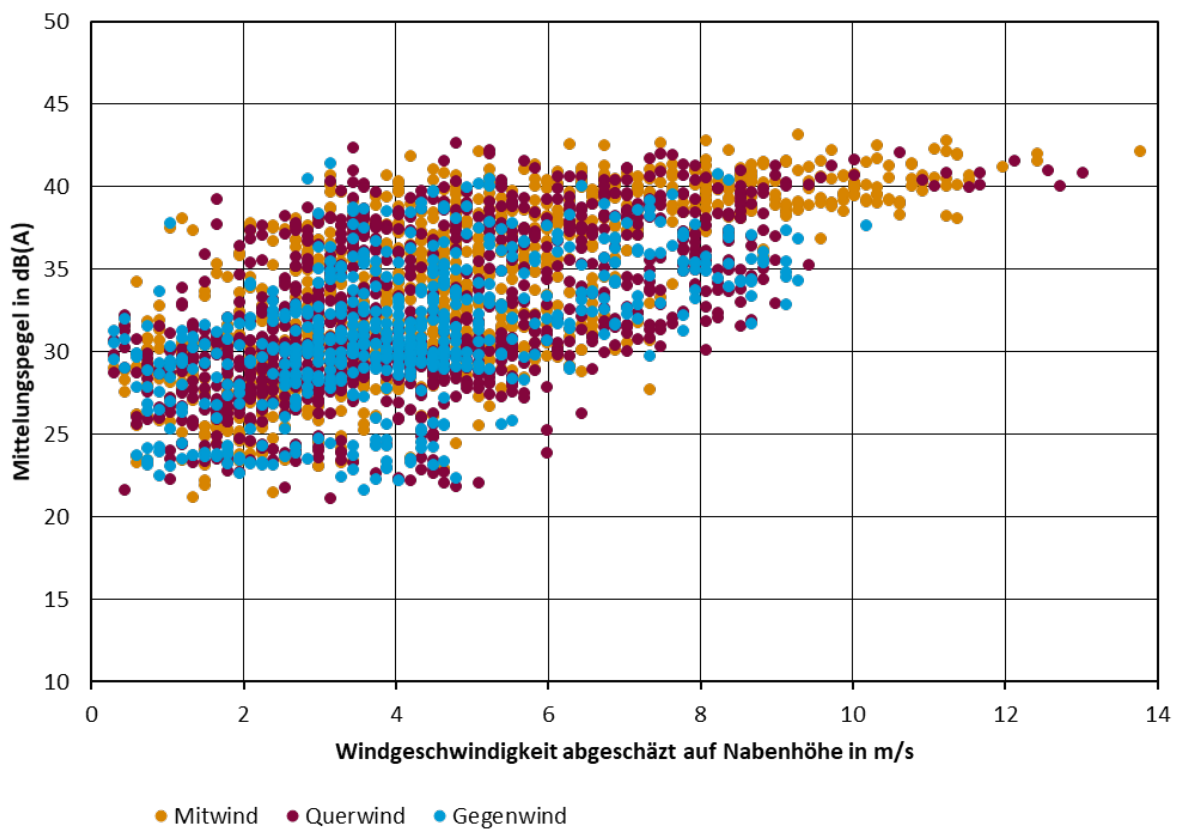
Anmerkung: Sichtbar in den Spektren sind die kurzzeitigen Einflüsse der Glocke der Dorfkirche

Abbildung 102: Gemittelte Perzentspektren Tag (06:00 Uhr – 22:00 Uhr) UG 5



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 103: 10-min-Mittelungspegel über mittlerer Windgeschwindigkeit UG 5



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Anmerkung: Im Untersuchungsgebiet 5 wurden die Messungen ohne die Unterstützung eines Betreibers durchgeführt, so dass keine Anlagendaten vorliegen. Die Windgeschwindigkeit am Mikrofon war teilweise durch das nächstgelegene Gebäude sowie durch Bäume im Umfeld der Messposition beeinflusst. Die Darstellung der Pegel über die Windgeschwindigkeit auf Messhöhe spiegelt das Geräuschverhalten der Windenergieanlagen nur bedingt wider. Aus diesem Grund wurden die Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe über die nächstgelegene Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (Entfernung weniger als 20 km) abgeschätzt.

C Amplitudenmodulation

C.1 Algorithmus

Der folgende Algorithmus dient der Bestimmung von Größe und Periodenlänge von AM in einem 30-Sekunden-Zeitfenster.

1. Ausgangspunkt ist ein Pegelschrieb von $L_{Aeq100ms}$, A-bewerteten 100ms- L_{eq} , mit einer Länge von ca. 30 Sekunden und einer Schrittweite zwischen den Werten von 20ms.
2. Um den Pegel von langsameren Schwankungen – z. B. durch sich ändernde meteorologische Bedingungen - zu befreien, wird der Pegelschrieb mit einer Eckfrequenz von 0,25Hz hochpassgefiltert:

$$L_{HP} = \text{Hochpassfilter}(L_{eq100ms}, 0,25\text{Hz})$$

3. Bestimmung der AM-Frequenz

- a) Die Pegel L_{HP} werden so verschoben, dass der arithmetische Mittelwert des Pegelschriebs bei Null liegt, und anschließend mit einem Parzenfenster multipliziert. Dabei wird das Fenster so gewählt, dass das Maximum in der Mitte des Zeitabschnitts liegt, und direkt außerhalb des Zeitabschnitts auf Null geht.

$$P(x) = \begin{cases} -2(-1 + 2x)^3 & \text{für } \frac{1}{4} < x \leq \frac{1}{2} \\ 2(1 + 2x)^3 & \text{für } -\frac{1}{2} \leq x < -\frac{1}{4} \\ 1 - 24x^2 - 48x^3 & \text{für } -\frac{1}{4} \leq x < 0 \\ 1 - 24x^2 + 48x^3 & \text{für } 0 \leq x \leq \frac{1}{4} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Das Parzenfenster ist der Gaussfunktion sehr ähnlich. Bei Fouriertransformation führt das Parzenfenster ähnlich der Gaussfunktion zu einer weichen Verbreiterung von Linien.

- b) Die Zeitreihe wird durch Anhängen von Nullen auf die zehnfache Länge gebracht (Padding).
- c) Für die neu entstandene Zeitreihe wird eine Fouriertransformation durchgeführt. In dem Fenster von 0,3 bis 1,2 Hz wird die Frequenz mit dem größten Betrag in der Fouriertransformierten gesucht. Diese Frequenz f_{AM} wird als mögliche Frequenz für AM betrachtet.
4. Wenn die Windenergieanlagen mit einer Frequenz f_{AM} (quasi-)periodische Signale erzeugt, dann sollten sich diese mit einer Periodendauer $\tau = 1/f_{AM}$ wiederholen. Im Folgenden wird statt $L_{HP}(t_i)$ die Zeitreihe auf eine Periodenlänge „zusammengeschoben“, indem t_i durch $t_i \text{ mod } \tau$ ersetzt wird. Dabei steht *mod* für Modulo, d. h. wenn t_i größer als τ ist wird so lange τ abgezogen, bis t_i zwischen 0 und τ liegt.
 - a) Die Zeit von 0 bis τ wird in 25 Intervalle unterteilt. Für die Pegel in diesen Intervallen wird jeweils ein (energetischer) Mittelungspegel $L_{eq\tau}$ gebildet.
 - b) Das Maß für AM ist die Pegeldifferenz zwischen dem größten und kleinsten $L_{eq\tau}$:

$$\Delta L_{AM} = \max(L_{eq\tau}) - \min(L_{eq\tau})$$

5. Die in den Schritten 2 c) und 4 b) bestimmten Wertepaare f_{AM} und ΔL_{AM} werden als Datenschieb aufgefasst.
- Der Schrieb der Frequenz f_{AM} wird in zwölf 0,1 Hz breite Bänder aufgeteilt.
 - Für ein gleitendes Fenster von 10 Minuten, entsprechend 360 Wertepaaren, wird die Anzahl der Punkte in den jeweiligen Bändern gezählt. Bei gleichmäßiger Verteilung würden 20 Werte pro Band erwartet.
 - Liegen mehr als 40 Werte innerhalb eines Bandes wird das Wertepaar als Teil einer zeitlich und wertmäßig angehäuften Menge gewertet, die einem technischen Ursprung hat. Da dies im betrachteten Frequenzbereich und in der Umgebung von Windenergieanlagen hauptsächlich durch Windenergieanlagen erzeugte Amplitudenmodulation bedeuten kann, wird das Wertepaar der weiteren statistischen Auswertung zugeführt.

Im Rahmen dieser Studie bedeutet dies die Auswertung nach Häufigkeitsverteilungen des Wertes ΔL_{AM} und der Frequenz f_{AM}

C.1.1 Auswertung von Amplitudenmodulation

In Tabelle 34 sind die Modulationstiefen unterteilt nach normierter elektrischer Leistung pro Messort klassiert. 100% entspricht hierbei der Nennleistung der jeweiligen Referenzwindenergieanlage. Für das Untersuchungsgebiet UG 5 sind die Häufigkeiten aufgrund fehlender Anlagensignale nach der am immissionsseitigen Mikrofon gemessenen Windgeschwindigkeit klassiert. 100% entspricht hierbei 6 m/s. Die Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe liegen erfahrungsgemäß höher als am Messort.

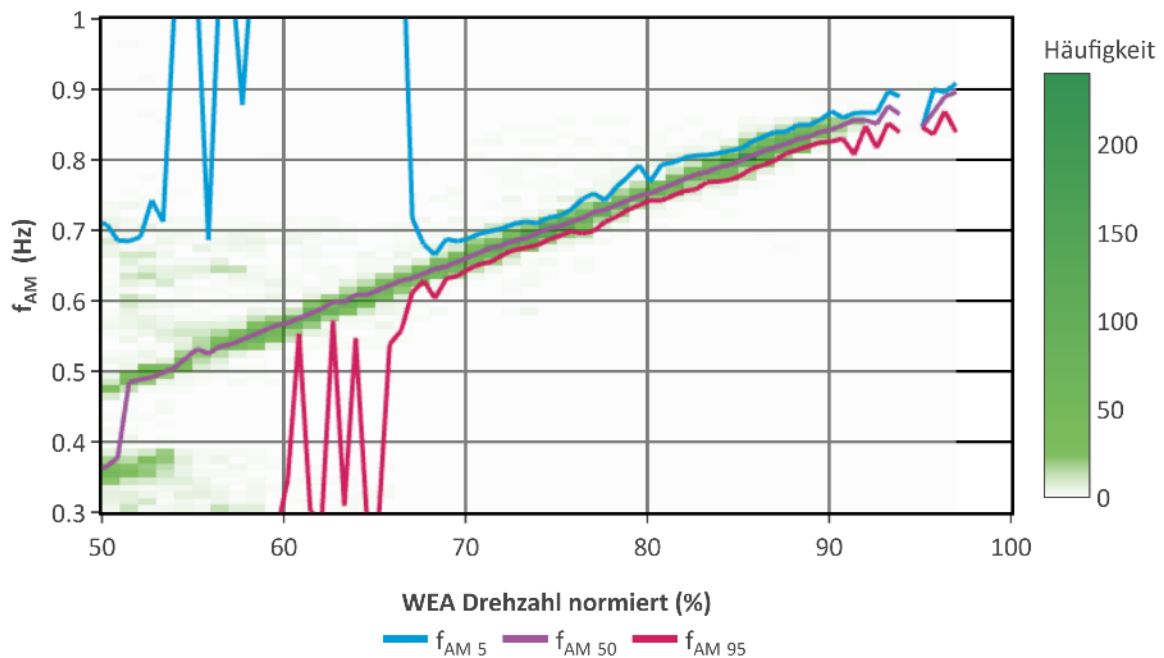
Tabelle 34: Klassierung der Modulationstiefe nach normierter elektrischer Leistung

Perzentil	Klasse	Immissionsbereich					Emissionsbereich		
		UG 1	UG 2	UG 3*	UG 4	UG 5	UG 1	UG 3	UG 4
ΔL_{AM05} in dB	1-20 %	4,8	4,2	7,1	4,0	3,0	4,8	3,6	3,9
	20-40 %	3,8	4,7	3,8	2,8	2,9	3,5	3,6	2,2
	40-60 %	4,0	5,2	3,7	2,6	2,7	2,8	5,5	2,4
	60-80 %	3,9	5,3	3,4	2,4	2,3	2,7	6,0	2,4
	80-100 %	2,9	5,3	3,5	2,3	1,4	2,6	6,1	2,4
ΔL_{AM50} in dB	1-20 %	2,1	2,1	1,8	1,6	1,5	2,0	1,8	1,4
	20-40 %	2,0	2,5	1,2	1,5	1,6	2,2	2,2	1,6
	40-60 %	2,2	2,9	1,1	1,5	1,5	1,9	2,7	1,6
	60-80 %	2,2	3,0	1,2	1,5	1,3	1,9	2,9	1,6
	80-100 %	1,7	3,0	1,2	1,4	1,4	1,8	2,7	1,6

Perzentil	Klasse	Immissionsbereich					Emissionsbereich		
ΔL_{AM95} in dB	1-20 %	1,0	1,2	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0	0,8
	20-40 %	1,1	1,4	0,6	0,9	0,9	1,3	1,3	1,0
	40-60 %	1,2	1,6	0,5	0,9	0,9	1,2	1,4	1,0
	60-80 %	1,1	1,7	0,5	0,9	0,8	1,2	1,4	1,0
	80-100 %	0,9	1,7	0,5	0,9	1,4	1,2	1,4	1,0

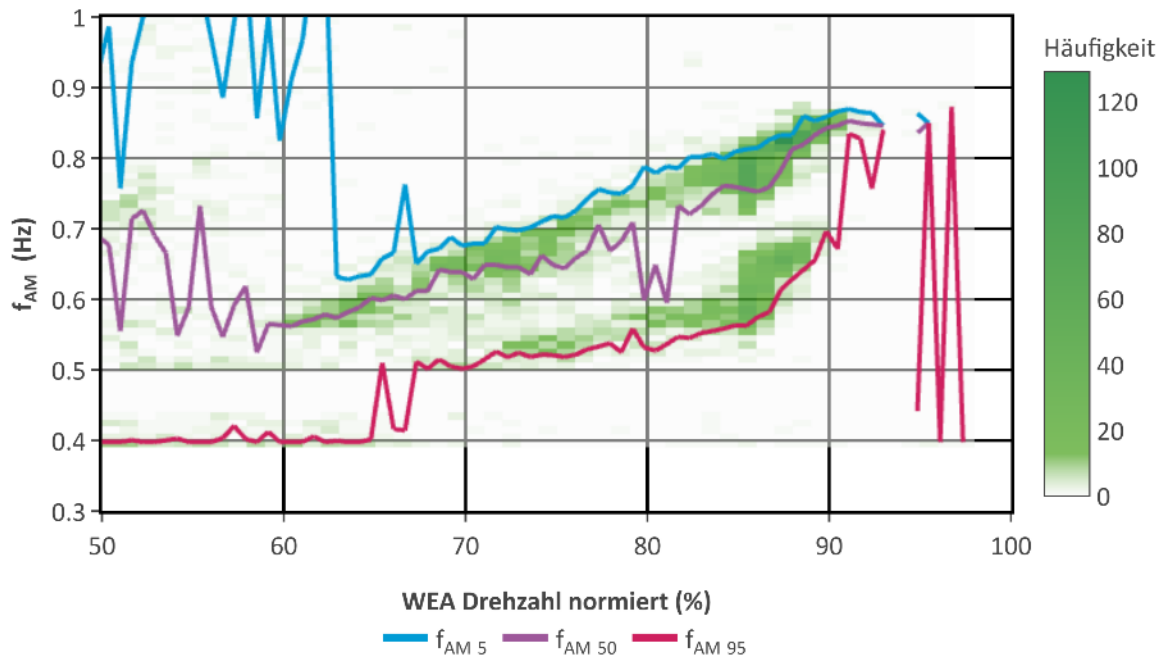
*geringe Datengrundlage

Abbildung 104: UG 1, Emission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert)



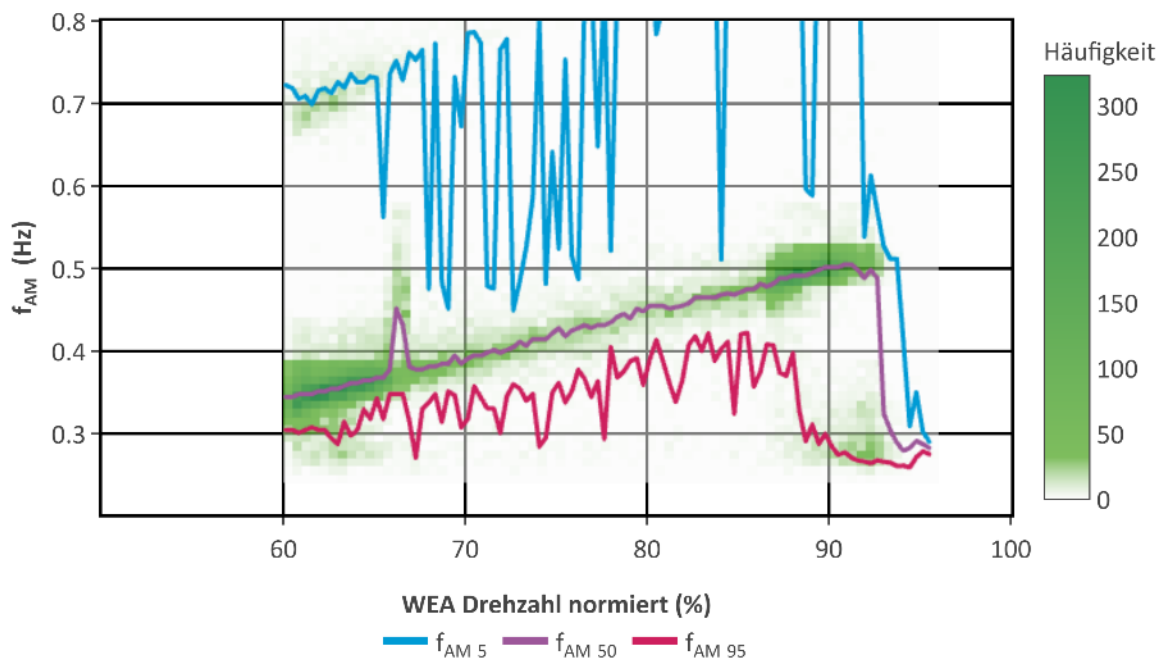
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 105: UG 1, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert)



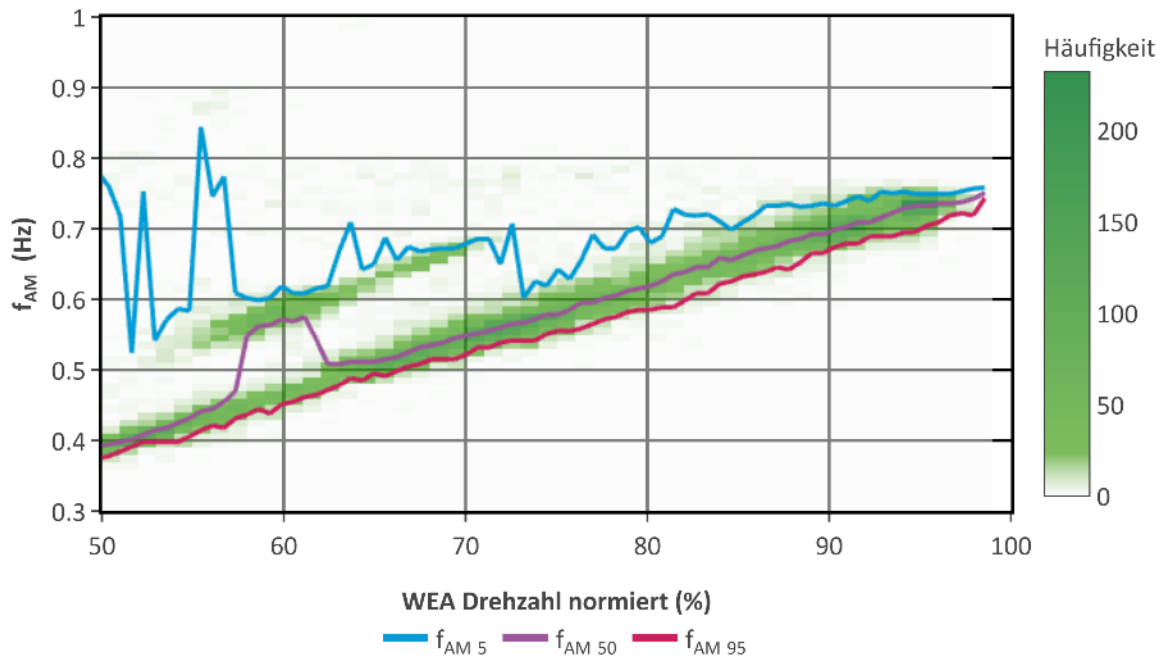
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 106: UG 2, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert)



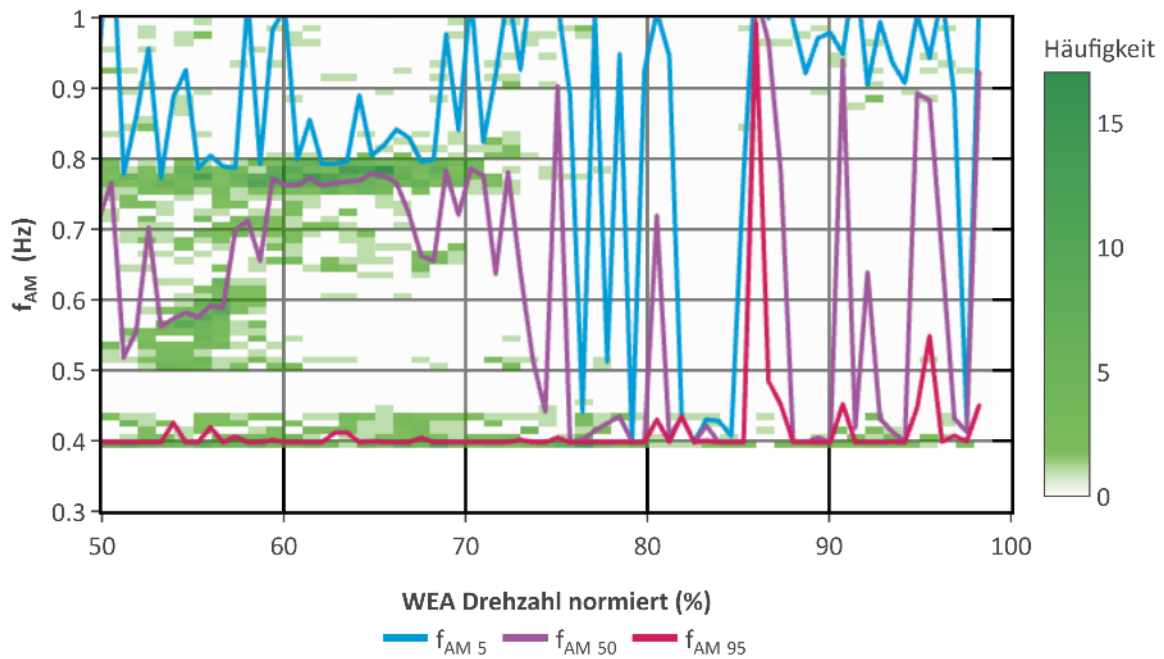
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 107: UG 3, Emission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert)



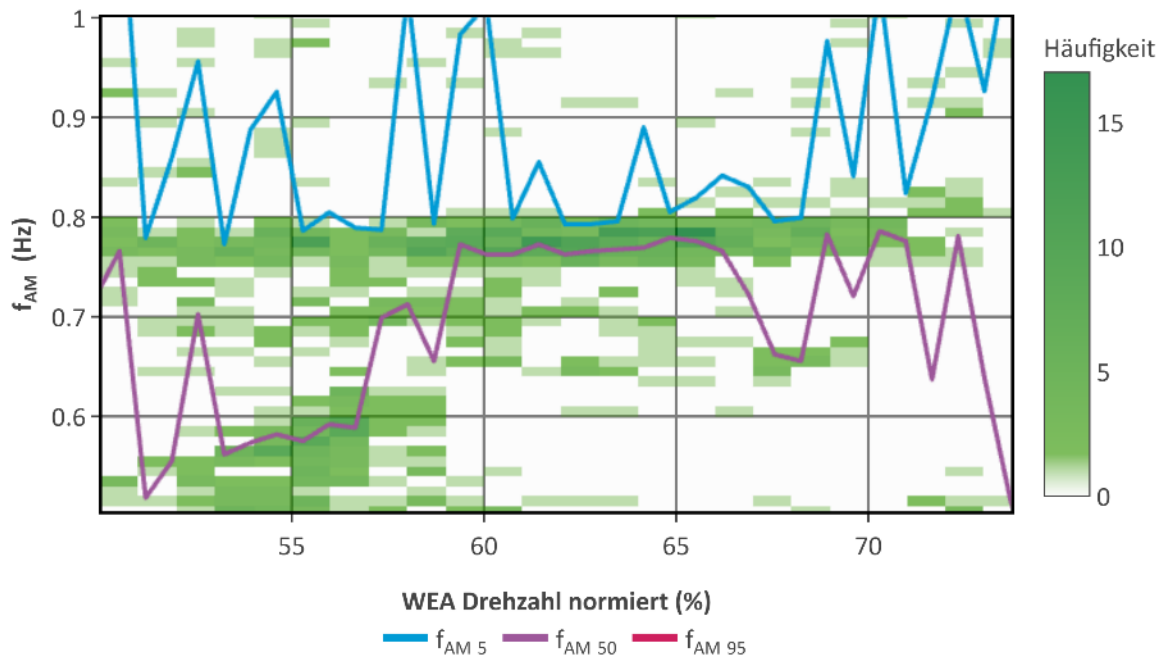
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 108: UG 3, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert)



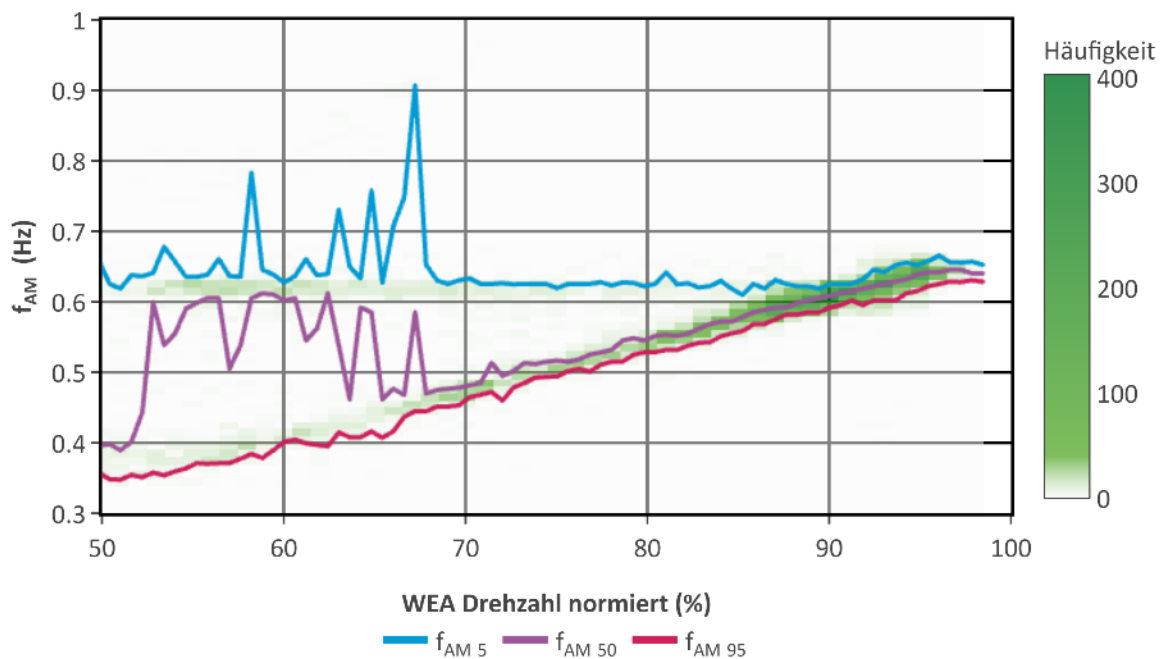
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 109: UG 3, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert) – Ansicht vergrößert



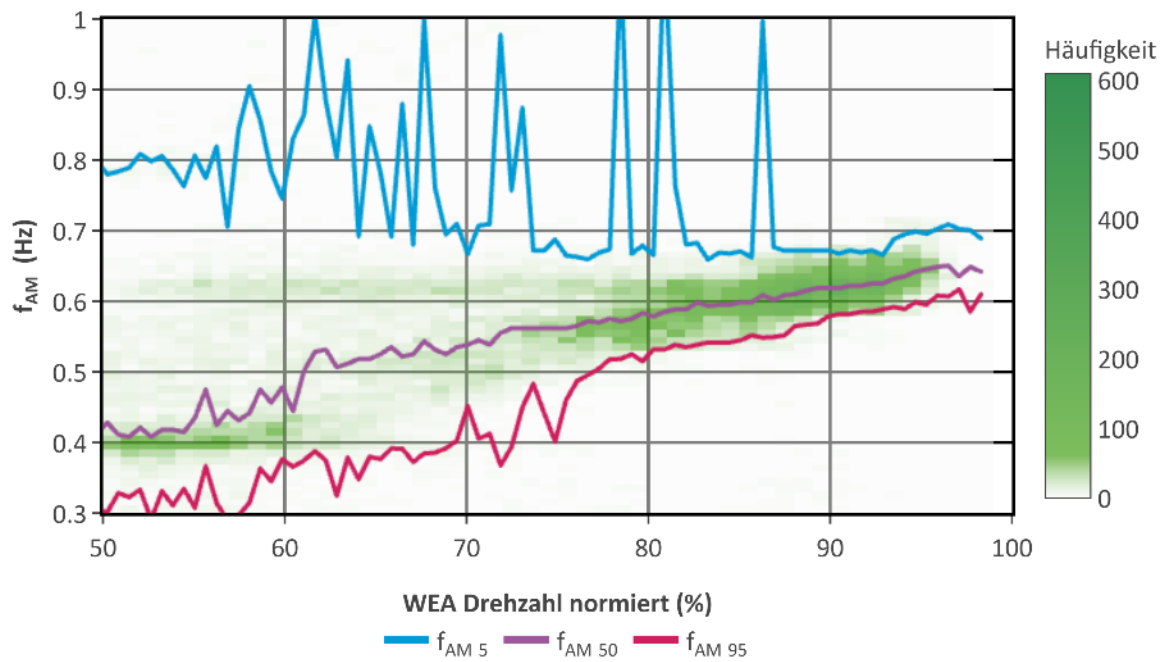
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 110: UG 4, Emission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert)



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

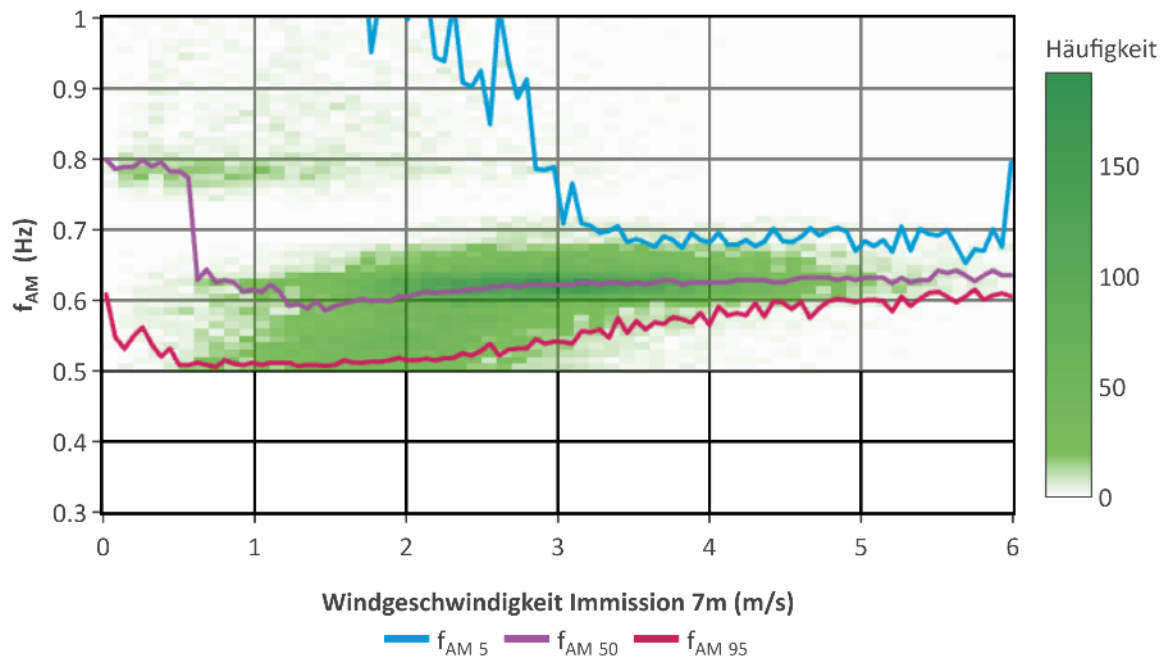
Abbildung 111: UG 4, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert)



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

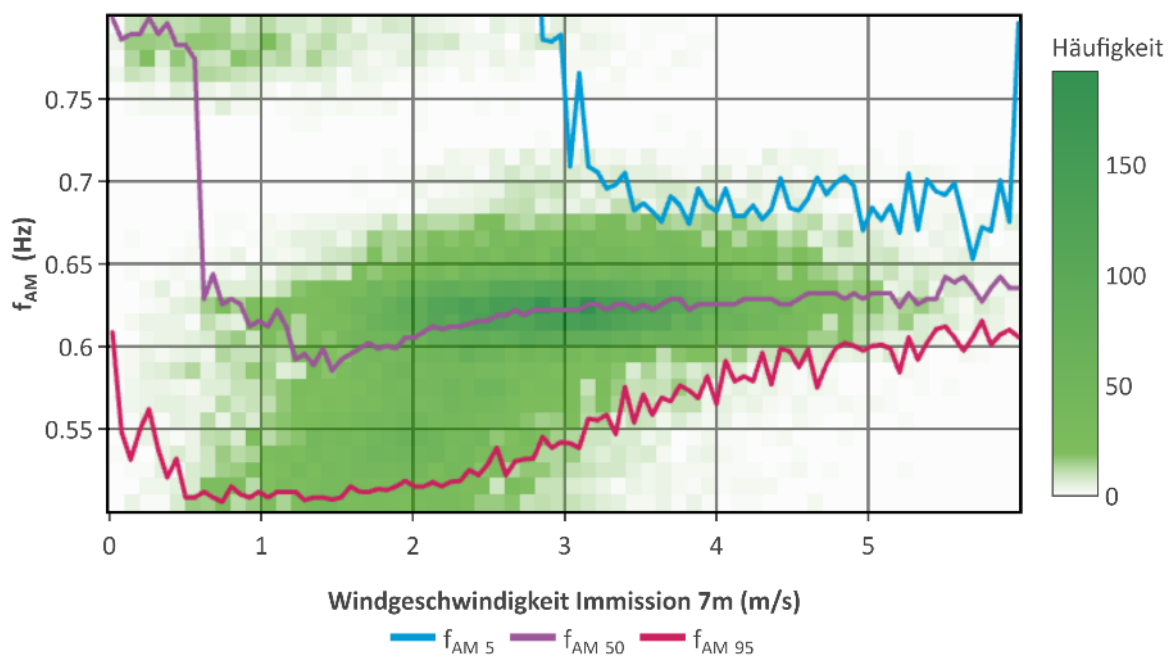
In Abbildung 112 ist die detektierte Frequenz gegen die immissionsseitige Windgeschwindigkeit aufgetragen, da keine Anlagendaten zur Verfügung standen. Auch hier lässt sich der typische und zu erwartende Anstieg von Drehzahlen mit steigender Windgeschwindigkeit beobachten.

Abbildung 112: UG 5, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert)



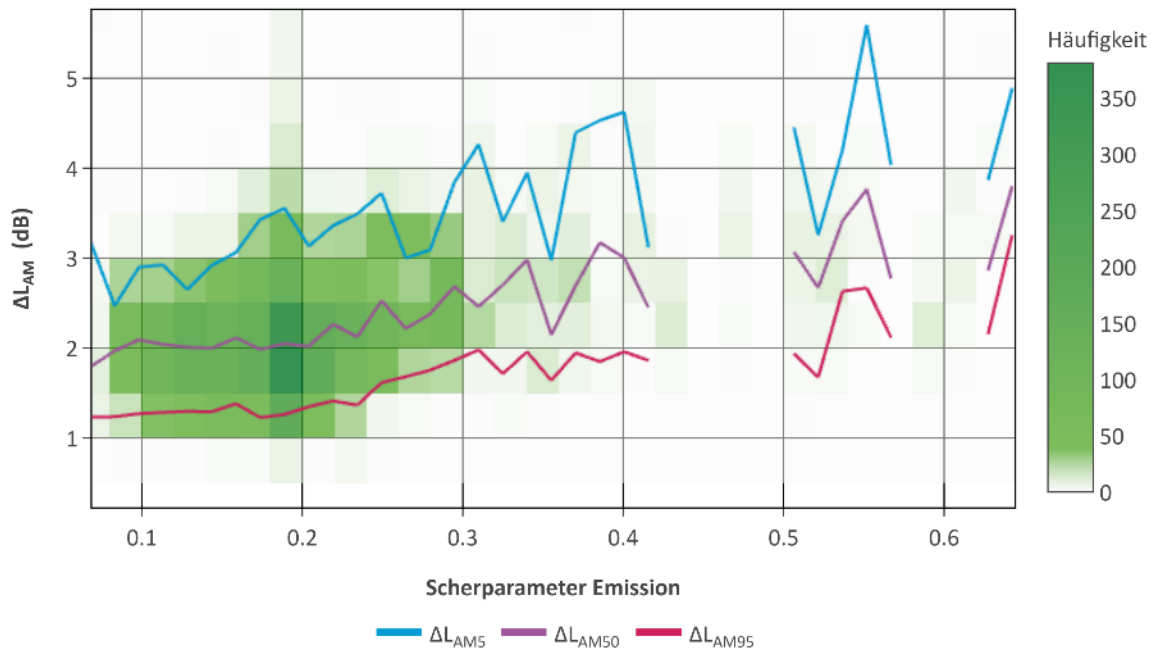
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 113: UG 5, Immission, Frequenz der Amplitudenmodulation und Drehzahl der Windenergieanlagen (normiert) - Ansicht vergrößert



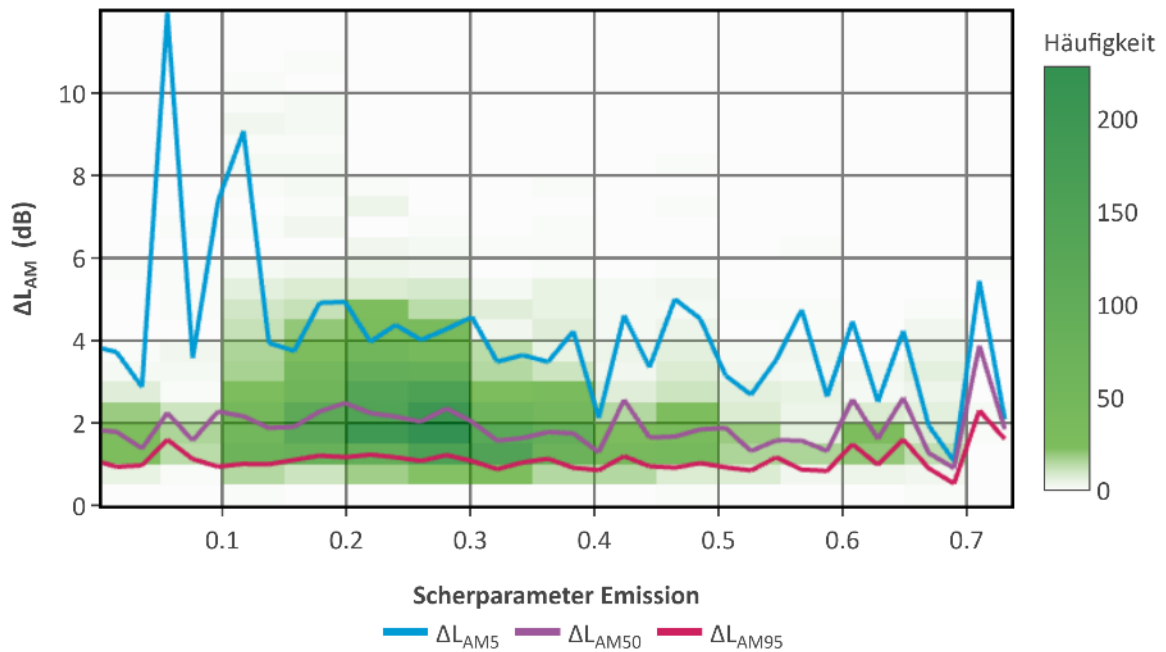
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 114: UG 1, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter



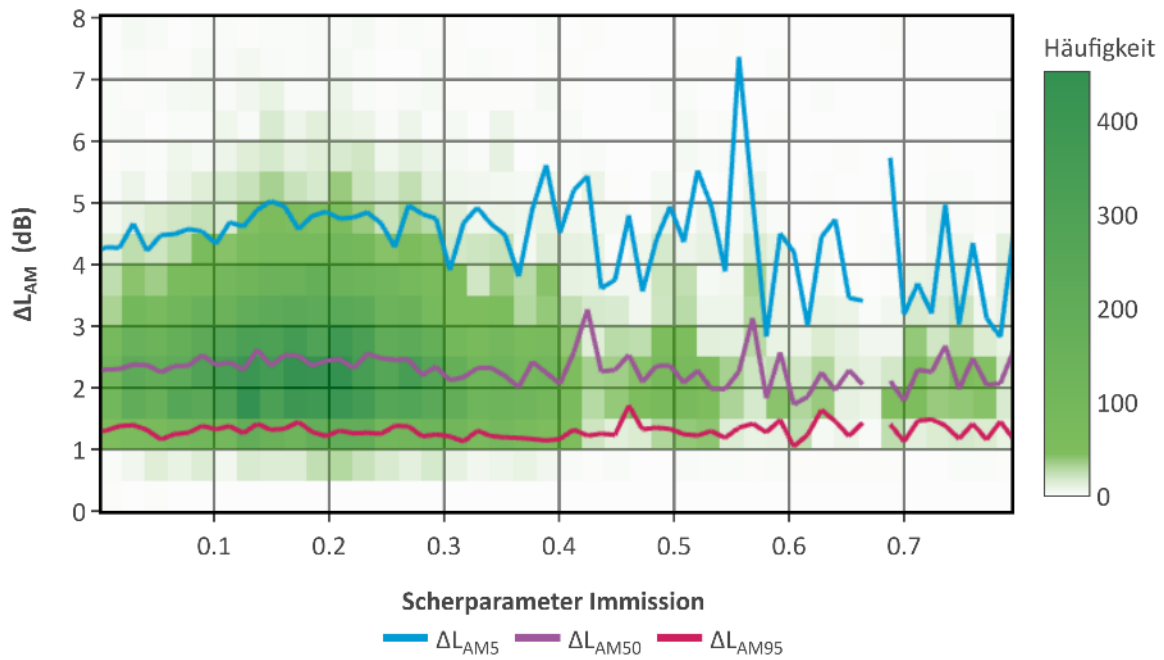
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 115: UG 1, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter



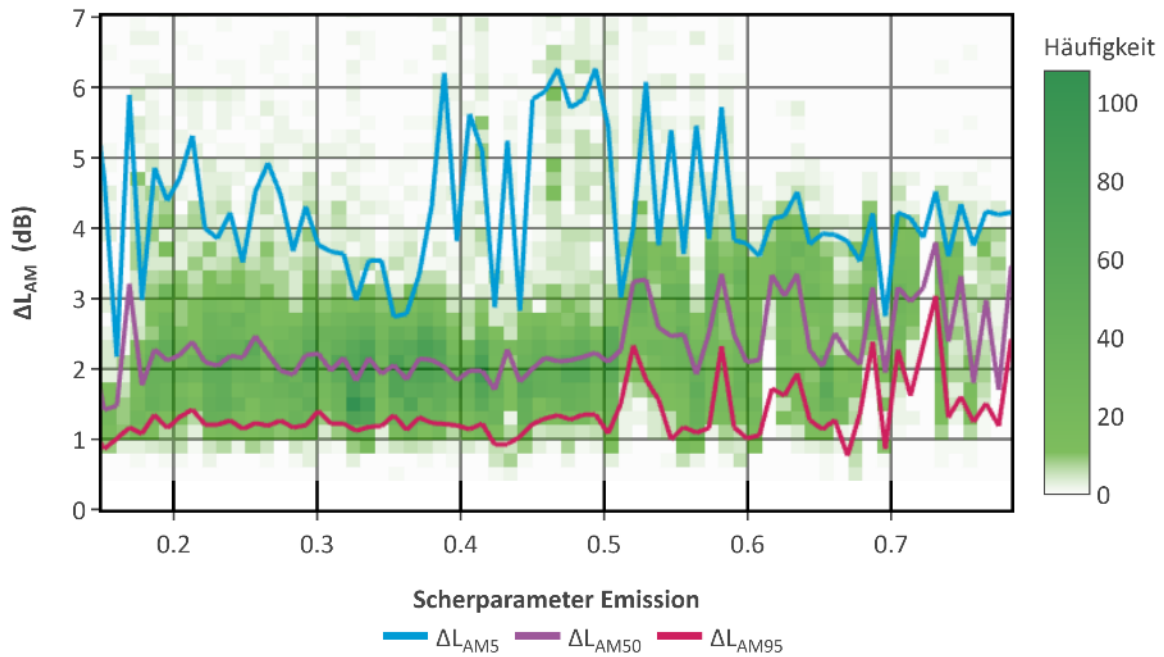
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 116: UG 2, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter



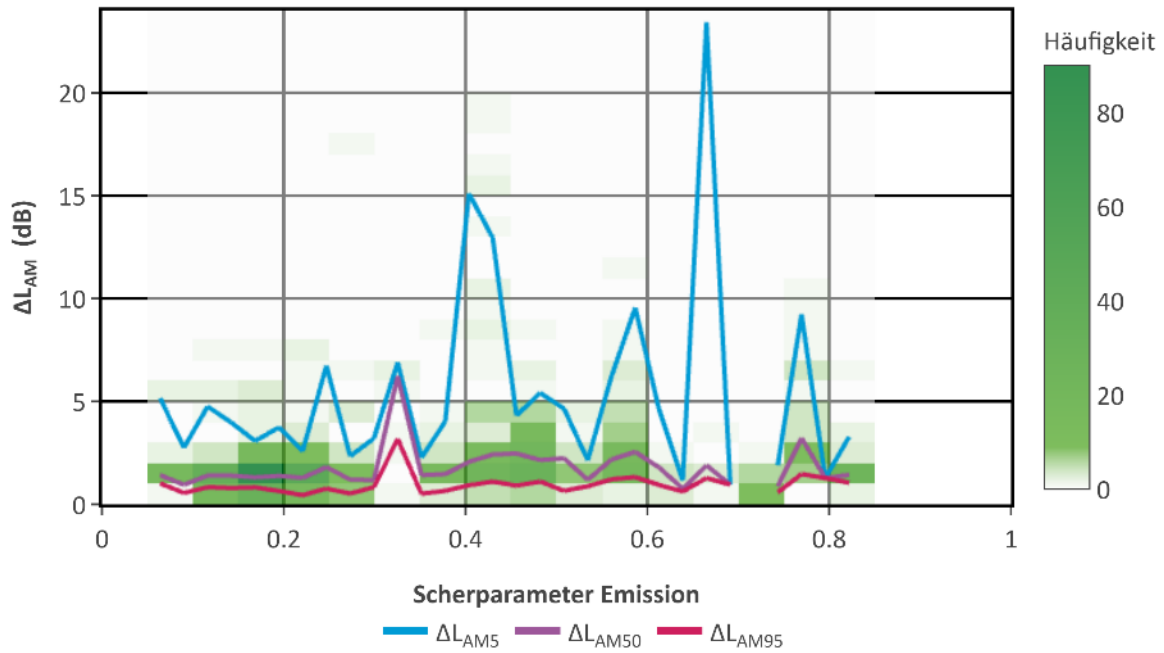
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 117: UG 3, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter



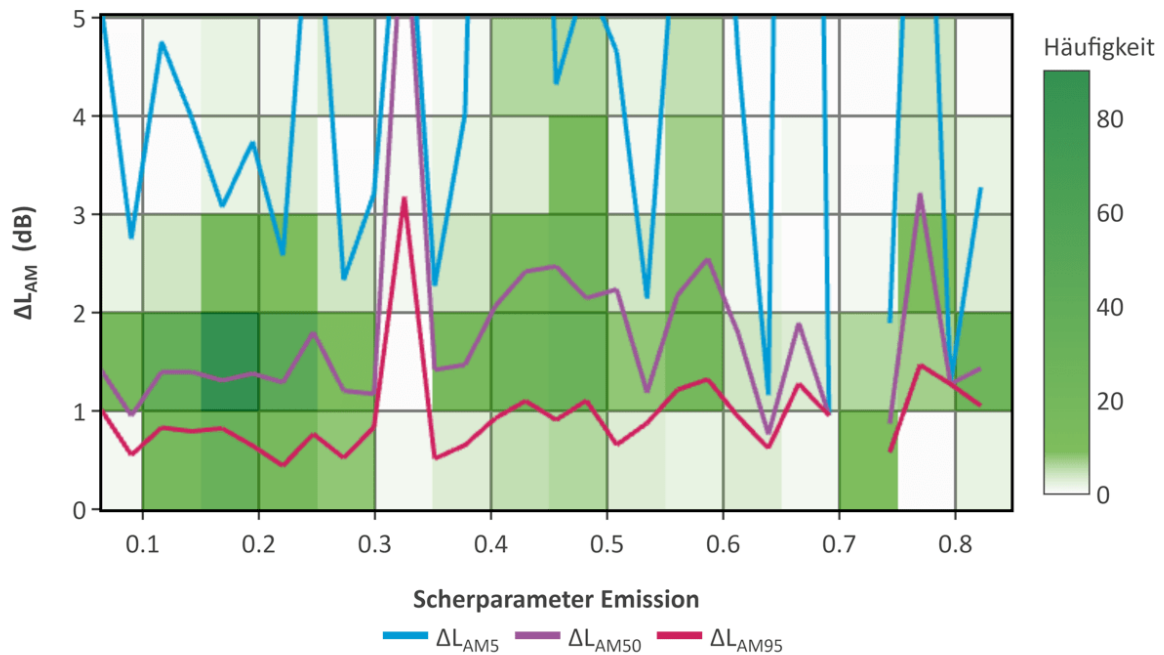
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 118: UG 3, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

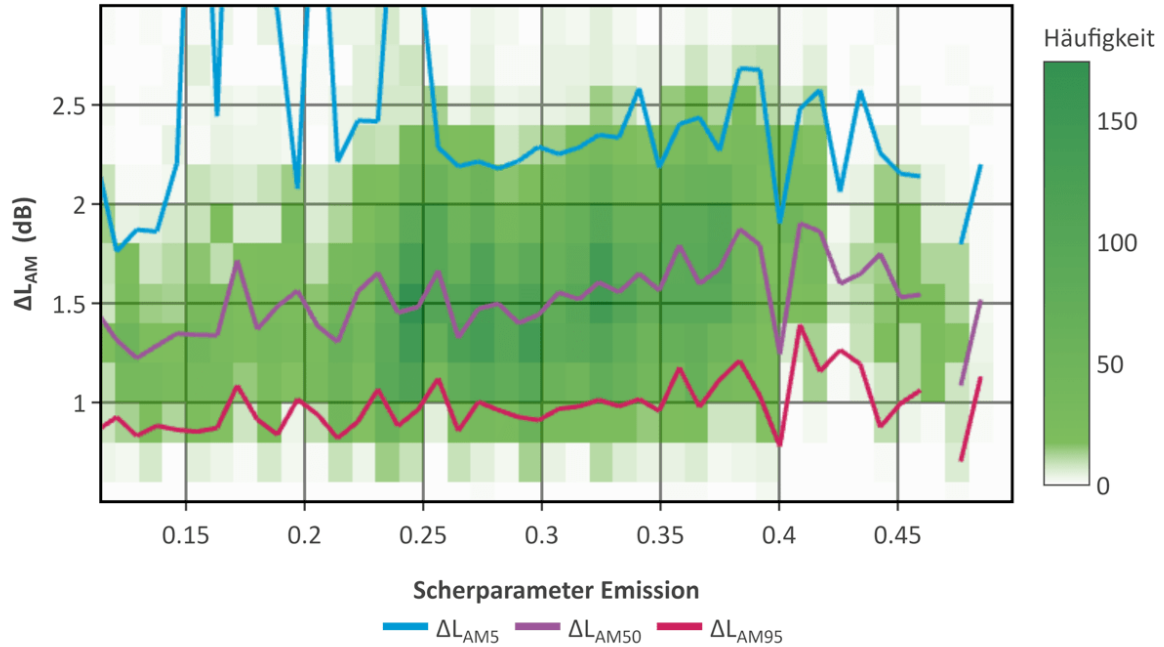
Abbildung 119: UG 3, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter - Ansicht vergrößert



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

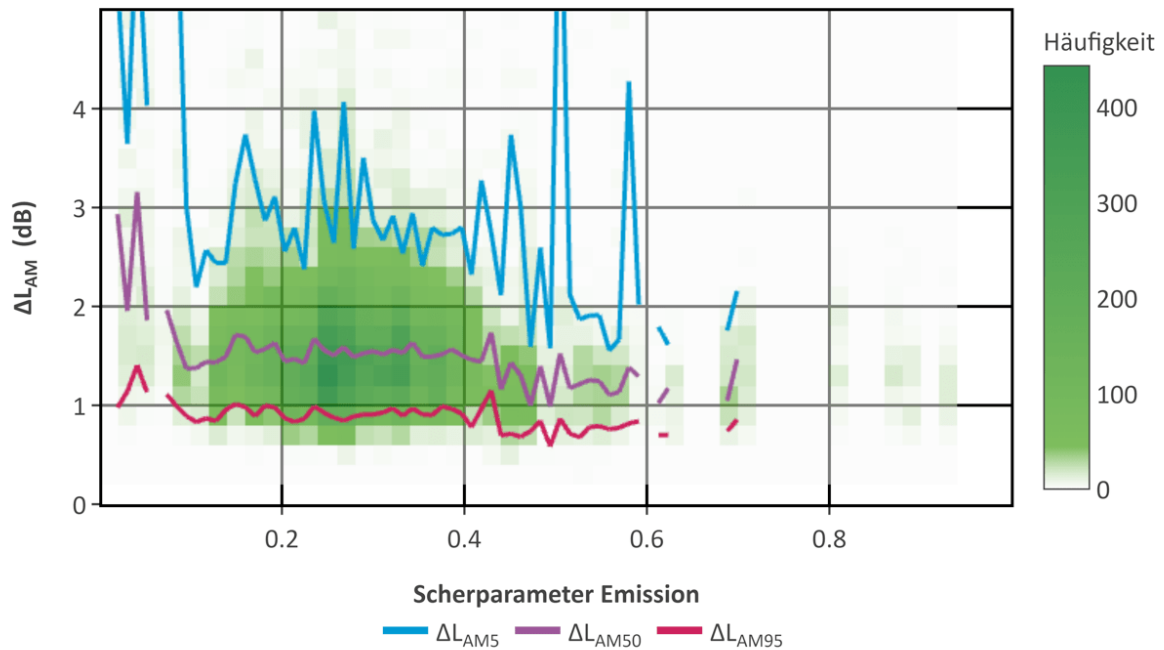
Abbildung 120: UG 4, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter

flacher Zusammenhang zwischen Modulationstiefe und Scherparameter



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 121: UG 4, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Scherparameter



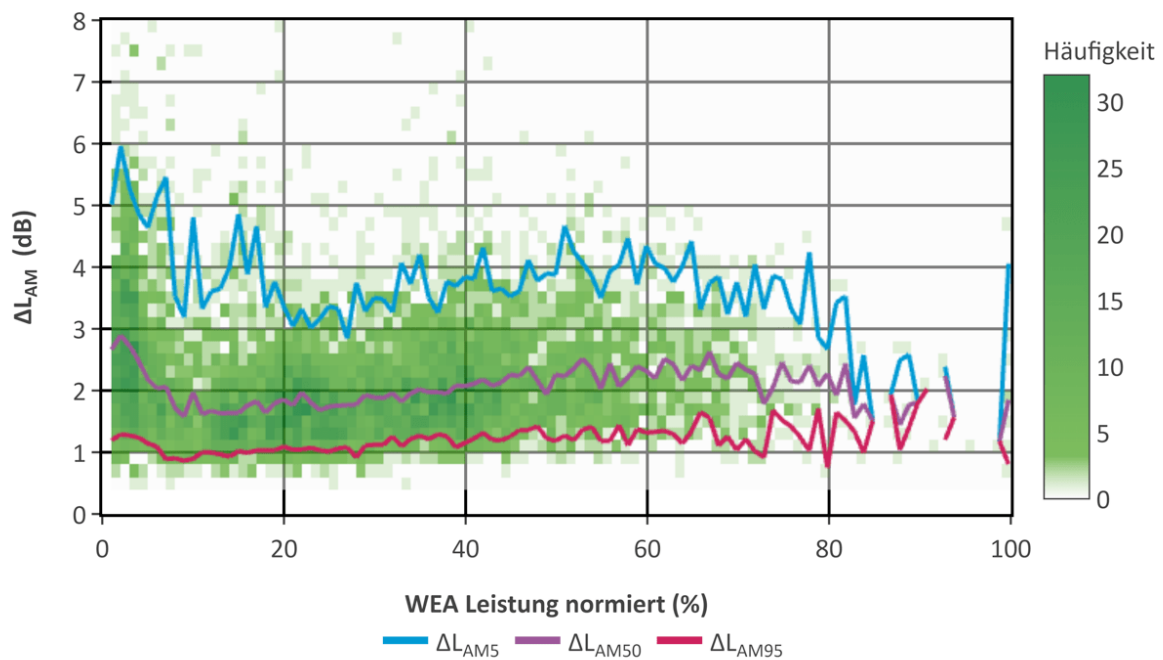
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 122: UG 1, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)



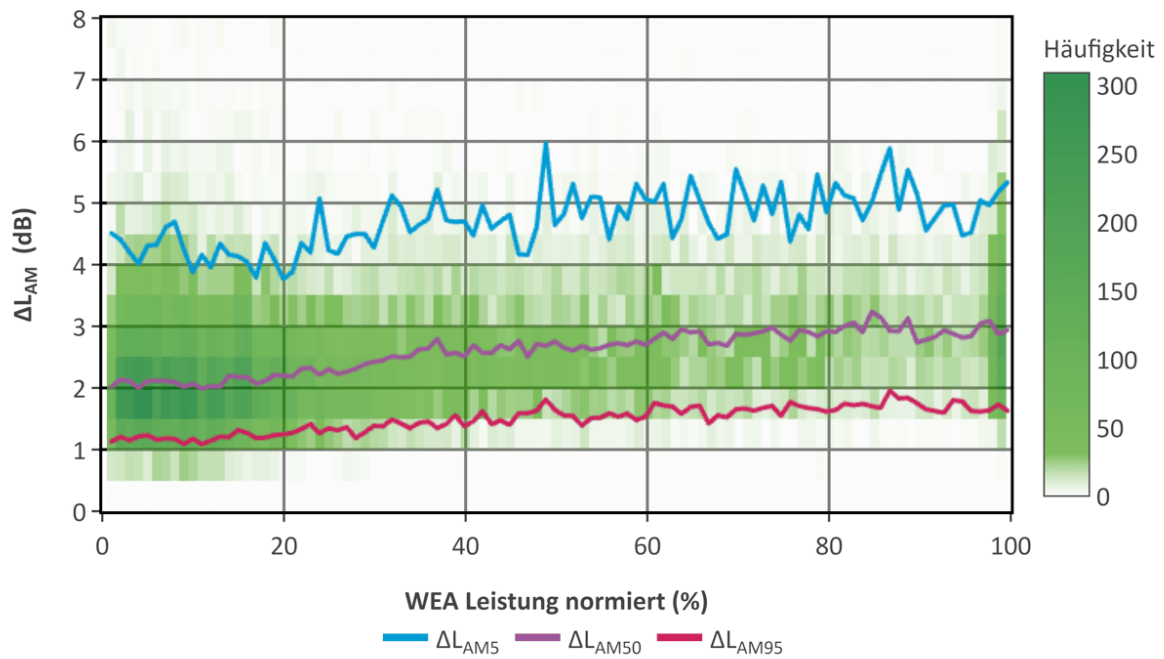
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 123: UG 1, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)



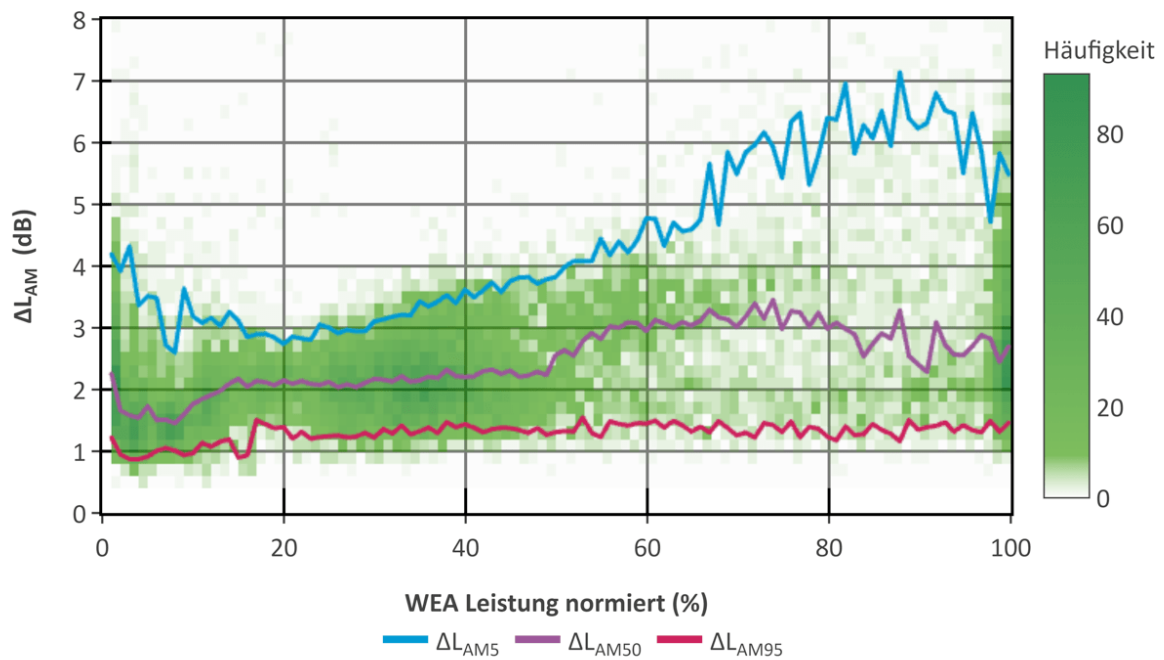
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 124: UG 2, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)



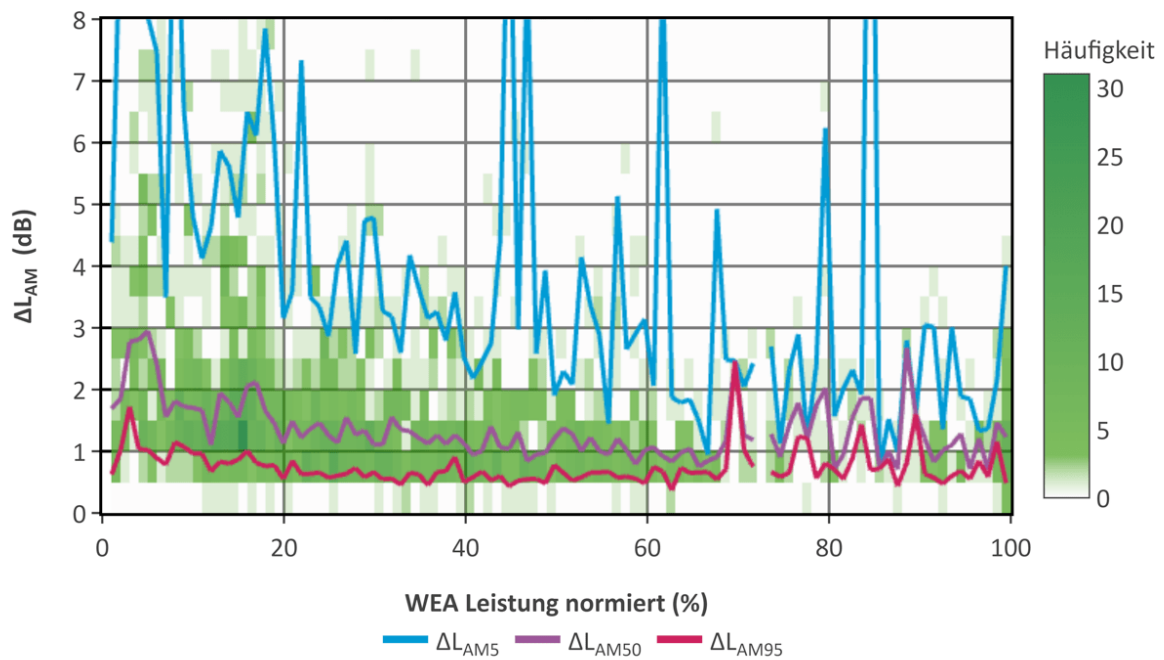
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 125: UG 3, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)



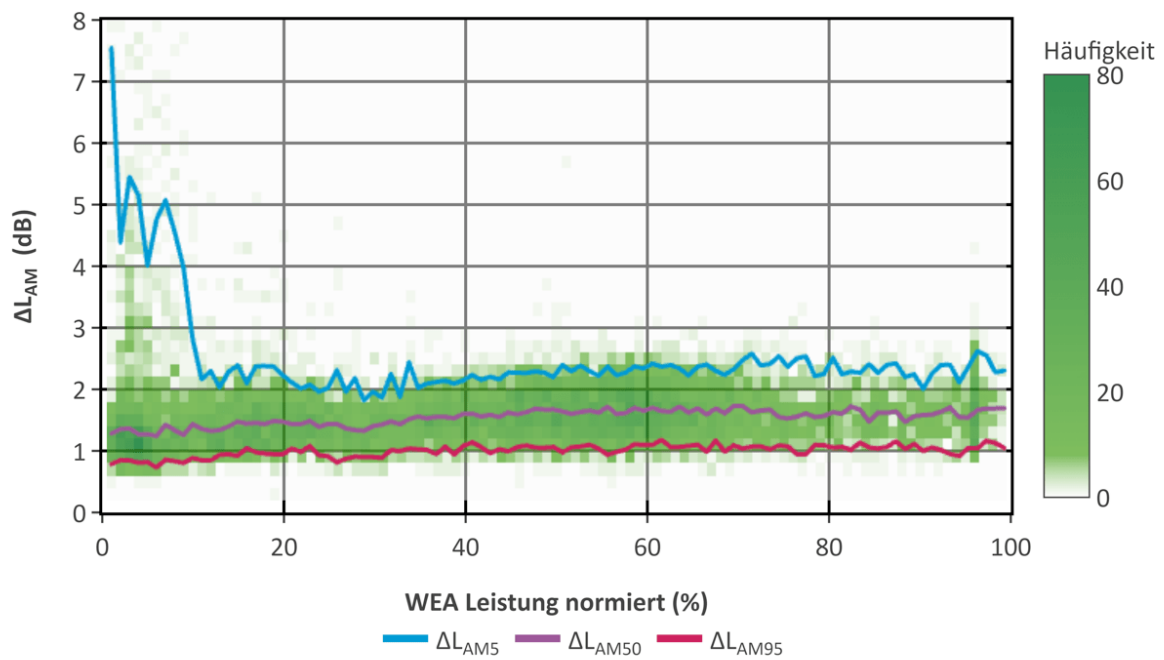
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 126: UG 3, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)



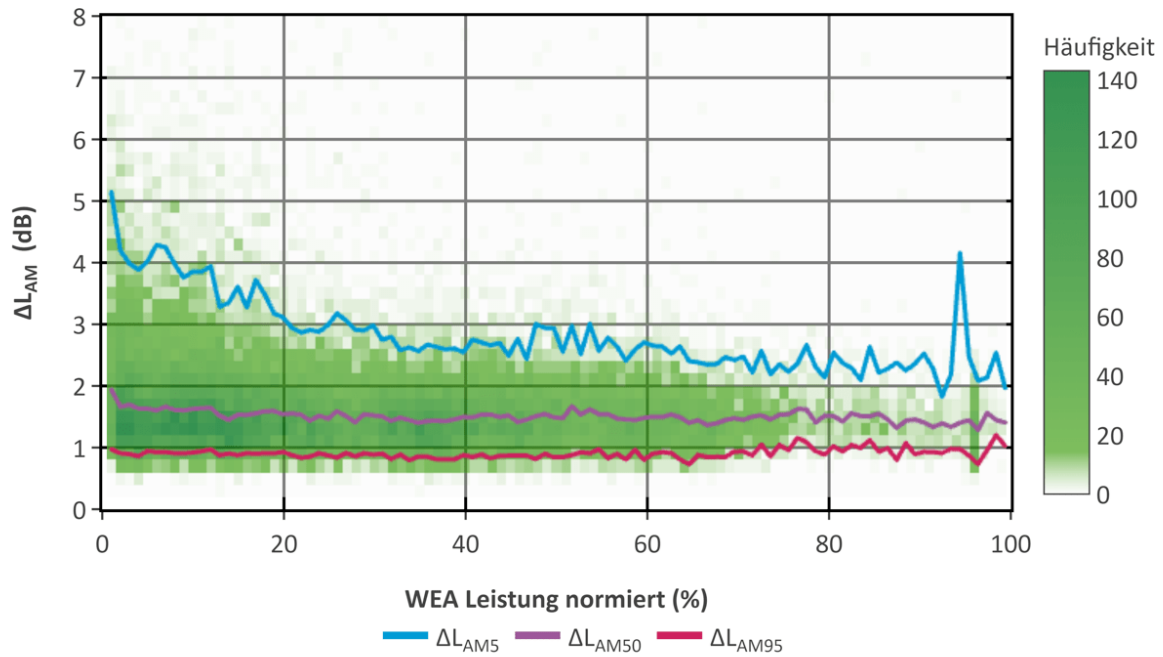
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 127: UG 4, Emission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)



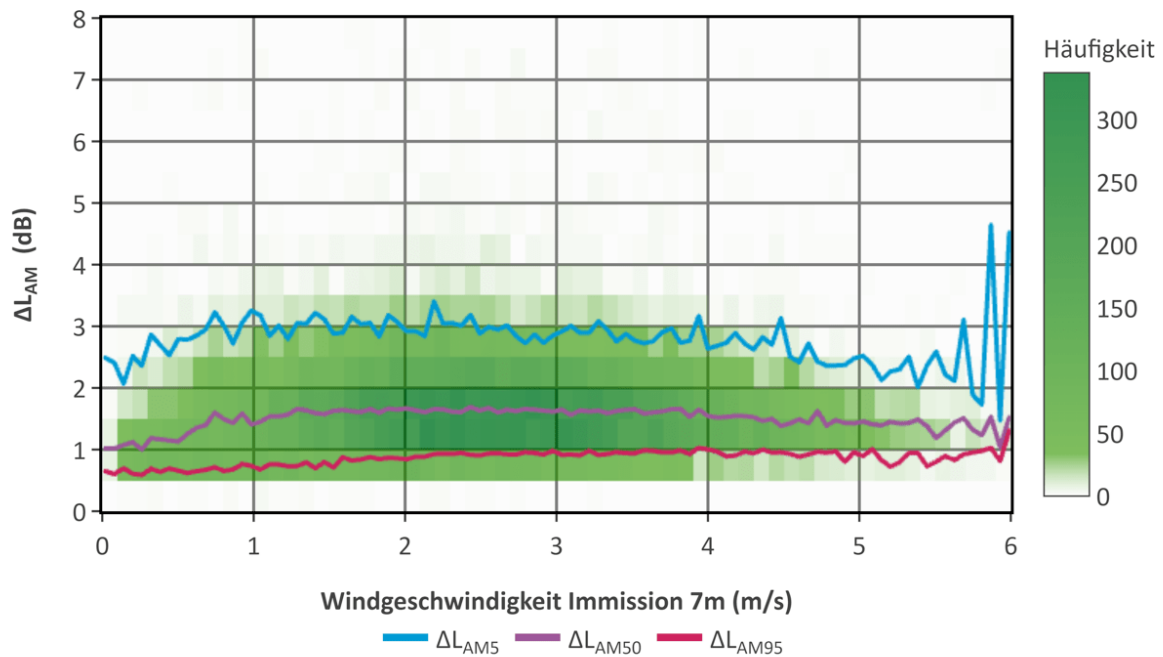
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 128: UG 4, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Leistung der Windenergieanlagen (normiert)



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 129: UG 5, Immission, Modulationstiefe der Amplitudenmodulation (5, 50 und 95 Perzentil) und Windgeschwindigkeit Immission in 7 m



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

D Belästigungsbefragung

D.1 Fragebogen Hauptbefragung

Fragebogen "UBA WEA Telefon 3"



1. Guten Tag/Moin, mein Name ist %interviewer_name% Institut für Umfragen, Analysen und Data Science (UADS) - in Dulsburg.

Sie haben von uns kürzlich ein Schreiben erhalten, in dem wir Sie um die Teilnahme an einer vom Umweltbundesamt (UBA) in Auftrag gegebenen wissenschaftlichen Studie gebeten haben. In der Befragung geht es um Wohn- und Lebensbedingungen und Umgebungsgeräusche. Dabei sollen die Auswirkungen von Umwelteinflüssen im Wohngebiet auf die Wohnbevölkerung und deren Lebensqualität untersucht werden.

Zu diesem Zweck würde ich gerne mit %u_anrede% %u_vorname% %u_name% sprechen.

Sind Sie das selbst oder ist das eine andere Person in Ihrem Haushalt?

Interviewer:

- Zielperson (ZP) ist am Apparat
- Zielperson wird an den Apparat geholt
- Kontaktperson (KP) verweigert Zugang zu ZP
- Verweigerung, unklar ob KP oder ZP
- Termin mit KP oder ZP
- Sprachqualität schlecht, Termin vereinbaren
- ZP in Feldzeit nicht erreichbar
- Neutraler Ausfall, ZP verzogen, nicht befragbar

2. Wenn Sie damit einverstanden sind, würden wir Ihnen jetzt gerne einige Fragen stellen. Die Befragung wird ca. 15-20 Minuten in Anspruch nehmen.

Haben Sie jetzt Zeit, oder sollen wir zu einer anderen Zeit anrufen?

Interviewer:

- Ja, Interview
- Nein, Verweigerung (ZP)
- Termin vereinbaren
- Unterlagen erneut senden, Termin ca. eine Woche später legen
- Unterlagen erneut senden, aber Interview beginnen

3. Guten Tag, mein Name ist %interviewer_name% Institut für Umfragen, Analysen und Data Science (UADS) - in Dulsburg.

Sie haben von uns kürzlich ein Schreiben erhalten, in dem wir Sie um die Teilnahme an einer vom Umweltbundesamt (UBA) in Auftrag gegebenen wissenschaftlichen Studie gebeten haben. In der Befragung geht es um Wohn- und Lebensbedingungen und Umgebungsgeräusche. Dabei sollen die Auswirkungen von Umwelteinflüssen im Wohngebiet auf die Wohnbevölkerung und deren Lebensqualität untersucht werden.

Wenn Sie damit einverstanden sind, würden wir Ihnen jetzt gerne einige Fragen stellen. Die Befragung wird ca. 15 Minuten in Anspruch nehmen.

Haben Sie jetzt Zeit, oder sollen wir zu einer anderen Zeit anrufen?

Interviewer:

UBA/Ökolinst - 2019/20 - ...

16.07.2020 16:02:41 Uhr

Seite 1

- Ja, Interview
- Nein, Verweigerung (ZP)
- Termin vereinbaren
- Unterlagen erneut senden, Termin ca. eine Woche später legen
- Unterlagen erneut senden, aber Interview beginnen

4. Wie lautet Ihre E-Mail-Adresse?

Interviewer:
Die E-Mail-Adresse wird ausschließlich dazu verwendet, die Informationen zur Befragung zuzusenden.

- E-Mail-Adresse
- (keine Angabe)

5. Wären Sie so freundlich mir bitte kurz zu sagen, weshalb Sie an der Befragung nicht teilnehmen wollen?

Interviewer:
Wir fragen dies aus Qualitätsgründen, denn nur wenn wir wissen, weshalb einzelne Personen die Teilnahme verweigern. Nur dann können wir die Qualität der Ergebnisse dieser Studie vernünftig einschätzen.

- Person gibt eine Antwort
- Person verweigert Auskunft bzw. hat bereits aufgelegt
- Person möchte doch kooperieren

6. Wie laut/ lauten die Antwort(en) der Person auf die Frage, weshalb sie an der Umfrage nicht teilnehmen will?

Interviewer:
Mehrfachantworten möglich.
Falls keine Gründe genannt wurden: "Keine Angabe von Verweigerungsgründen" auswählen.

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

• **Keine Zeit/ Interesse allgemein**

- keine Zeit, Zeitmangel (auch keine Terminfindung möglich)
- Keine Lust, kein Interesse, "habe Wichtigeres zu tun"

• **Bedenken, Ängste bzgl. Fragen und Datenschutz**

- Datenschutz-/ Anonymitätsbedenken/ Auswahlfragen (Herkunft der Nummer)
- Angst vor Verkäufen
- Angst vor heiklen Fragen
- Wissensfrage oder Befürchtung, zu dem Thema nichts sagen zu können.

• **Ablehnende Haltung gegenüber Befragungen allgemein**

- Ständige Befragungen, Person hat "oft genug" an Befragungen teilgenommen
- Prinzipiell keine Teilnahme

• **Themenbezogene Ablehnung**

- Diese Befragung bringt nichts
- Zweck dieser Befragung unklar.
- Person fühlt sich nicht lärmbeeinträchtigt, nicht betroffen, Thema Lärm interessiert nicht
- Resignation: Umfragen ändern nichts (an Lärmsituation) etc.

• **Mangelnde Eignung**

- Person fühlt sich zu alt
- Person ist dauerhaft erkrankt
- Person meint: "Ich spreche nicht gut genug deutsch"

• **Sonstige/ weitere Gründe**

- Weiterleitung auf Mobiltelefon
- Anderer Modus (z.B. online oder postalisch) gewünscht
- Sonstige Verweigerungsgründe:
- Person hat wortlos aufgelegt
- Person hat etwas Unverständliches gesagt und aufgelegt
- Person will/ wollte keine Verweigerungsgründe nennen
- Person möchte doch kooperieren

7. Darf ich Sie aus Qualitätsgründen noch nach Ihrer Lärmbeeinträchtigung fragen?

Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate dort bei Ihnen denken: Wie stark haben Sie sich durch den Lärm von Windenergieanlagen insgesamt gestört oder belästigt gefühlt?

Haben Sie sich (in den letzten 12 Monaten)...

Interviewer:

- 1 überhaupt nicht,
- 2 etwas,
- 3 mittelmäßig,
- 4 stark oder
- 5 äußerst gestört oder belästigt gefühlt?
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

- Hauptschul-/ Volksschulabschluss
- Realschulabschluss/ mittlere Reife
- Polytechnische Oberschule der DDR mit Abschluss der 10. Klasse
- Fachhochschulreife, Abschluss Fachoberschule
- Allgemeine oder fachgbsondere Hochschulreife/ Abitur (Gymnasium bzw. Erweiterte Oberschule (EOS), auch EOS mit Lehre)
- Schule beendet ohne Abschluss
- noch keinen Schulabschluss
- Polytechnische Oberschule der DDR mit Abschluss der 8. oder 9. Klasse
- sonstiger Schulabschluss
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

12. Dann bedanke ich mich recht herzlich bei Ihnen und wünsche Ihnen noch einen schönen Tag.

Interviewer:

Verweigerung

Bitte das Gespräch beenden und die angezeigte Ergebniskategorie zuordnen:

050 Verweigerung: Kontaktperson (KP) verweigert Zugang zu ZP 051 Verweigerung, unklar ob KP oder ZP
074 ZP in Feldzeit nicht erreichbar 075 ZP verzogen, nicht befragbar 052 Verweigerung ZP

13. Interviewer:

Termin

Bitte das Gespräch beenden und die angezeigte Ergebniskategorie zuordnen:

020 Termin mit KP (unbestimmt) 022 Termin Sprachqualität 021 Termin mit ZP (bestimmt) 023 Termin
Unterlagen erneut zusenden

Interviewer:

Bei Klick auf "Weiter" erfolgt ein Sprung zum Anfang des Screenings!

8. Geschlecht erheben ohne nachzufragen:

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- männlich
- weiblich
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

9. In welchem Jahr sind Sie geboren?

Interviewer:

Falls Person die Antwort verweigert, dann bitte die Kategorien vorlesen.

- Geburtsjahr:
- 1999 bis 2018 (unter 20 Jahre)
- 1979 bis 1998 (20 bis unter 40 Jahre)
- 1959 bis 1978 (40 bis unter 60 Jahre)
- bis einsch. 1958 (60 Jahre und älter)
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

10. Bitte Alter der Befragungsperson einschätzen:

Interviewer:

- unter 20 Jahre
- 20 bis unter 40 Jahre
- 40 bis unter 60 Jahre
- älter als 60 Jahre
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

11. Welchen höchsten Schulabschluss haben Sie?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

14. Bevor wir mit der Befragung beginnen, benötige ich noch Ihr Einverständnis zum Datenschutz. Haben Sie die Information zum Datenschutz in dem Forschungsvorhaben, die wir dem Anschreiben beigelegt haben, gelesen?

Ich würde mit Ihnen die wichtigsten Punkte gern noch einmal kurz durchgehen:

- **Zweck, Verantwortlichkeit:** In der Befragung geht es um Wohn- und Lebensbedingungen und Umgebungsgeräusche.
- **Die Studie ist vom Umweltbundesamt beauftragt, wir, das UADS und das umweltspsychologische Unternehmen ZEUS GmbH aus Hagen sind für die Befragung verantwortlich; bei uns ist es Herr Prof. Frank Faulbaum und bei der ZEUS GmbH Herr Dr. Dirk Schreckenberg**
- **Erhaltene Daten:** Ihren Namen und Ihre Anschrift haben wir per Zufall aus Meldeamtsdaten gezogen, Ihre Rufnummer aus einem öffentlichen Telefonverzeichnis.
- **Zum Forschungsvorhaben gehört, dass das Ingenieurbüro deBAKOM, Odenthal, Immissionsberechnungen für die Wohngebäude aller Befragungspersonen durchführt, dazu verfügen die Ingenieure über Haus-Geokoordinaten der Wohngebäude (bei Nachfrage: Bei den Immissionsberechnungen handelt es sich um Geräuschpegelberechnungen von Lärmquellen aus der Umgebung Ihres Wohngebäudes)**
- **Freiwilligkeit:** Ihre Interviewteilnahme ist freiwillig; Sie können sie verweigern oder das Interview jederzeit beenden. Es entstehen Ihnen dadurch keine Nachteile.
- **Vertraulichkeit, Anonymität:** Ihre Befragungsdaten werden getrennt von Ihren personenbezogenen Daten, d.h. Ihrem Namen und Ihrer Anschrift oder den Hauskoordinaten gespeichert.
- **Die Auswertungen erfolgen ausschließlich statistisch und lassen später keinerlei Rückschlüsse auf Ihre Person oder Ihre Adresse zu. Die Verarbeitung Ihrer Daten erfolgt ausschließlich zu Zwecken der wissenschaftlichen Forschung zu Wohn- und Lebensbedingungen und Umgebungsgeräuschen.**
- **Verarbeitung, Speicherung:** Ihr Name und Ihre Anschrift (Straße, Hausnummer und -zusatz, Postleitzahl, Ort) werden nach Abschluss des Forschungsvorhabens gelöscht; die Befragungsdaten bleiben zusammen mit einer ID-Nummer ohne Ihren Namen und Ihre Anschrift für die weiteren wissenschaftlichen, statistischen Datenauswertungen erhalten.
- **Die Geo-Koordinaten der Wohngebäude werden beim Ingenieurbüro deBAKOM zusammen mit den Immissionsdaten getrennt für dieses Forschungsprojekt und für etwaige wissenschaftliche Nachnutzungen gespeichert. Sie haben jederzeit das Recht dieser Speicherung der Geo-Koordinaten für die wissenschaftliche Nachnutzung zu widersprechen und die Löschung dieser Daten zu veranlassen.**

Haben Sie die Datenschutzbestimmungen gelesen und stimmen Sie diesen zu?

Interviewer:

- Ja (=> Weiter zum Interview)
- Nein (=> Verschiebung)

15. Ihre Entscheidung, nicht an der Befragung teilzunehmen bedauern wir sehr.

Bitte bestätigen Sie durch einen Klick auf "Weiter", dass Sie nicht teilnehmen möchten.

Ein Zurückgehen bzw. ein erneuter Aufruf der Fragebogenseite ist nach einem Klick auf "Weiter" nicht möglich!

16. In welchem Jahr sind Sie in Ihre Wohnung bzw. Ihr Haus eingezogen?

Interviewer:

- Jahr des Einzugs:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

17. Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit Ihrer Wohngegend bzw. Ihrer näheren Wohnumgebung?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 nicht zufrieden
- 2 wenig zufrieden
- 3 mittelmäßig zufrieden
- 4 ziemlich zufrieden
- 5 sehr zufrieden
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

18. Und wie zufrieden sind Sie insgesamt mit Ihrer Wohnung bzw. mit Ihrem Haus?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 nicht zufrieden
- 2 wenig zufrieden
- 3 mittelmäßig zufrieden
- 4 ziemlich zufrieden
- 5 sehr zufrieden
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

19. Wohnen Sie in einem/ einer...

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- freistehendes Einfamilienhaus
- Reihenhedhaus
- Reihemittelhaus
- Doppelhaushälfte
- Wohnung in einem mehrstöckigen Mehrfamilienhaus, einschließlich Hochhaus
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

20. In welchem Stockwerk liegt Ihre Wohnung?

Interviewer:

- Stockwerk:
- Erdgeschoss
- Keller
- Dachgeschoss
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

25. Im Folgenden geht es darum, wie stark Sie sich bei Ihnen durch bestimmte Lärmquellen gestört oder belästigt fühlen.

Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken:

Wie stark haben Sie sich durch den Lärm von Windenergieanlagen in Ihrer Wohnung/ Ihrem Haus gestört oder belästigt gefühlt?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

26.

Im Folgenden geht es darum, wie stark Sie sich bei Ihnen durch bestimmte Lärmquellen gestört oder belästigt fühlen.

Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken:

Wie stark haben Sie sich durch den Lärm von Windenergieanlagen außerhalb Ihrer Wohnung/ Ihres Hauses, z.B. im Garten oder auf der Terrasse/ dem Balkon gestört oder belästigt gefühlt?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

21. Wie viele Stockwerke (ohne Keller und unbewohntem Dachgeschoss) hat das Mehrfamilienhaus insgesamt?

Interviewer:

- Anzahl Stockwerke:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

22. Sind Sie bzw. jemand aus Ihrem Haushalt Eigentümer/in Ihrer Wohnung bzw. Ihres Hauses oder wohnen Sie zur Miete?

Interviewer:

- Eigentümer/in
- Mieter/ in
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

23. Im Folgenden geht es darum, wie stark Sie sich bei Ihnen durch bestimmte Lärmquellen gestört oder belästigt fühlen.

Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken:

Wie stark haben Sie sich durch den Lärm vom Straßenverkehr gestört oder belästigt gefühlt?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

24. Im Folgenden geht es darum, wie stark Sie sich bei Ihnen durch bestimmte Lärmquellen gestört oder belästigt fühlen.

Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken:

Wie stark haben Sie sich durch den Lärm von Windenergieanlagen insgesamt gestört oder belästigt gefühlt?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

27. Wenn Sie an die Geräusche von Windenergieanlagen denken:

Wie stark haben Sie sich insbesondere durch das "Wuschgeräusch" von Windenergieanlagen gestört oder belästigt gefühlt?

Interviewer:

Wuschgeräusch nachmachen ("SchuhSchuh...")

Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

28. Wenn Sie noch einmal an die Geräusche von Windenergieanlagen denken:

Was belästigt Sie sonst noch genau an der Lärmquelle?

Interviewer:

- Nennung:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

29. Gibt es weitere Lärmquellen?

Falls ja, nennen Sie bitte die drei Quellen, die Sie am stärksten belästigt haben.

Interviewer:

- sonstige Lärmquelle 1:
- sonstige Lärmquelle 2:
- sonstige Lärmquelle 3:
- Nein, keine weiteren Lärmquellen
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

30. Wenn Sie wieder an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken:

Wie stark haben Sie sich durch den Lärm von %Q29A1% gestört oder belästigt gefühlt?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

31. Wenn Sie wieder an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken:

Wie stark haben Sie sich durch den Lärm von %Q29A2% gestört oder belästigt gefühlt?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

32. Wenn Sie wieder an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken:

Wie stark haben Sie sich durch den Lärm von %Q29A3% gestört oder belästigt gefühlt?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

33. Jeder Mensch reagiert anders auf Belastungen aus der Umwelt. Für wie empfindlich halten Sie sich selbst im Allgemeinen gegenüber Geräuschen aus der Umgebung?

Bassgeräuschen, tiefen Tönen

Interviewer:
Antworten vorlesen.

36. Jeder Mensch reagiert anders auf Belastungen aus der Umwelt. Für wie empfindlich halten Sie sich selbst im Allgemeinen gegenüber Geräuschen aus der Umgebung?

monotones Summen, z.B. von Computern, Lüftungsanlagen

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

37. Jeder Mensch reagiert anders auf Belastungen aus der Umwelt. Für wie empfindlich halten Sie sich selbst im Allgemeinen gegenüber Geräuschen aus der Umgebung?

Geräuschen allgemein

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

38. Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats. Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft wurden Sie im letzten Monat von unerwarteten Ereignissen überrascht?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

34. Jeder Mensch reagiert anders auf Belastungen aus der Umwelt. Für wie empfindlich halten Sie sich selbst im Allgemeinen gegenüber Geräuschen aus der Umgebung?

polternden Geräuschen, z.B. von Waschmaschinen, Gehgeräusche im Treppenhaus

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

35. Jeder Mensch reagiert anders auf Belastungen aus der Umwelt. Für wie empfindlich halten Sie sich selbst im Allgemeinen gegenüber Geräuschen aus der Umgebung?

Musik mit Bass

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

39. Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats. Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft hatten Sie im letzten Monat das Gefühl, dass es Ihnen nicht möglich ist, wichtige Dinge in Ihrem Leben zu kontrollieren?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

40. Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats. Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft haben Sie sich im letzten Monat nervös oder "gestresst" gefühlt?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

41. Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats. Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft haben Sie sich im letzten Monat zuversichtlich gefühlt, dass Sie in der Lage sind, persönliche Probleme zu regeln?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

42.
Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats
Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft hatten Sie im letzten Monat das Gefühl, dass die Dinge in Ihrem Leben genauso laufen, wie sie es sollen?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

43.
Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats
Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft hatten Sie im letzten Monat das Gefühl, dass Sie mit anfallenden Aufgaben nicht zu Rande kommen?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

47.
Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats
Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft hatten Sie das Gefühl, dass sich Schwierigkeiten so sehr aufstürmten, dass sie Ihnen über den Kopf wachsen?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

48. Wie stark hängen Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats mit der Corona-Pandemie zusammen?

- 1 nicht
- 2 wenig
- 3 mittelmäßig
- 4 ziemlich
- 5 sehr
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

49. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Bei Unterhaltungen oder beim Telefonieren in der Wohnung/ im Haus

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

44.
Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats
Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft waren Sie in der Lage mit Widrigkeiten des Lebens kontrolliert umzugehen?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

45.
Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats
Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft fühlten sie sich als Herr der Lage?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

46.
Im Folgenden geht es um Ihre Gefühle und Gedanken während des letzten Monats
Wählen Sie bitte die Antwort aus, die Ihrer Zustimmung am besten entspricht.

Wie oft haben Sie sich über Dinge geärgert, die außerhalb Ihrer Kontrolle lagen?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 nie
- 2 fast nie
- 3 manchmal
- 4 ziemlich oft
- 5 sehr oft
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

50. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Beim Radio-/Musikhören oder Fernsehen

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

51. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Beim Lesen, Nachdenken oder Konzentrieren in der Wohnung/ im Haus

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

52. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Beim Entspannen und der Feierabendruhe in der Wohnung/ im Haus

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

53. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Bei häuslicher Geselligkeit oder, wenn Sie Besuch in der Wohnung/ im Haus haben

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

54. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Bei Aufenthalt und Erholung im Freien

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

55. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Bei Unterhaltungen/Gespräche im Freien

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

59. Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land. Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Windenergieanlagen fördern die Weiterentwicklung der/ einer Region.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

60. Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land. Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Durch den Betrieb von Windenergieanlagen kommt es zu einer Wertminderung der umgebenden Häuser und Grundstücke.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

61. Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land. Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Durch den Betrieb von Windenergieanlagen entstehen neue Arbeitsplätze in der Region.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

56. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Beim Einschlafen

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

57. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Nachts, während des Schlafs (bzw. bei Nachtschicht: während der üblichen Schlafenszeit)

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

58. Wie stark hat Sie Lärm von Windenergieanlagen in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?

Beim Ausschlafen am Ende der Schlafzeit

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

62. Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land. Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Durch den Betrieb von Windenergieanlagen wird einem der Aufenthalt im Garten, auf der Terrasse oder auf dem Balkon verleidet.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

63. Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land. Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Die Windenergieanlagen sind Grundlage für Streitigkeiten innerhalb der Nachbarschaft.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

64.
Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land.
Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Durch Windenergieanlagen wird das Landschaftsbild verschandelt.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

65.
Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land.
Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Der Betrieb von Windenergieanlagen ist gut für den Umweltschutz.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

66.
Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land.
Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Der Schattenwurf der Windenergieanlagen stört mich innerhalb meiner Wohnräume.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

**71. Wie stark fühlen Sie sich von dem
Anblick der Windenergieanlagen
in Ihrer Wohnumgebung belästigt?**

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

**72. Wie stark fühlen Sie sich von dem
Schattenwurf der Windenergieanlagen
in Ihrer Wohnumgebung belästigt?**

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

**73. Wie stark fühlen Sie sich von der
Hinderniskennzeichnung der Windenergieanlagen
in Ihrer Wohnumgebung belästigt?**

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

**74. Wie stark fühlen Sie sich von der
Drehbewegung der Windenergieanlagen
in Ihrer Wohnumgebung belästigt?**

Interviewer:
Antworten vorlesen.

67.
Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land.
Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Durch den Betrieb der Windenergieanlagen wird die Naherholung erschwert.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

68.
Nun kommen wir zu allgemeinen Ansichten zum Betrieb von Windenergieanlagen an Land.
Bitte sagen Sie mir, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Durch den Betrieb von Windenergieanlagen sinken die Stromkosten.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2 stimme wenig zu
- 3 mittelmäßig
- 4 stimme ziemlich zu
- 5 stimme sehr zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

69. Können Sie von Ihrer jetzigen Wohnung/ Ihrem Haus aus die Windenergieanlagen sehen?

Interviewer:

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

70. Wie viele Windenergieanlagen können Sie sehen?

Interviewer:

- Anzahl:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

**75. Wie stark fühlen Sie sich von der
Wirkung im Landschaftsbild
der Windenergieanlagen in Ihrer Wohnumgebung belästigt?**

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

**76. Steht Ihr Beschäftigungsverhältnis oder das einer anderen Person aus Ihrem Haushalt jetzt oder
zukünftig in irgendeiner Weise in Verbindung mit der/ den Windenergieanlage/n?**

Interviewer:

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

**77. Sind Sie oder eine andere Person aus Ihrem Haushalt finanziell an der/ den Windenergieanlage/n
beteiligt (außerhalb eines Beschäftigungsverhältnisses, z.B. am Betrieb der Anlage oder der Verpachtung
der Windenergieanlagenfläche)?**

Interviewer:

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

**78. Haben Sie in Ihrem Haushalt eine Stromkostensparnis bzw. einen vergünstigten Stromtarif aufgrund
der Windenergieanlage/n in Ihrer Wohnumgebung?**

Interviewer:

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

79. Sind Sie in einer Bürgerinitiative oder sonstigen Vereinigung aktiv, die sich mit Windenergieanlagen auseinandersetzt?

Interviewer:

- Ja, für Windenergieanlagen
- Ja, gegen Windenergieanlagen
- Nein, weder noch
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

80. Haben Sie seit der Errichtung der Windenergieanlagen eine Änderung des WEA-Lärms wahrgenommen?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- Ja, der Lärm hat insgesamt zugenommen
- Ja, der Lärm hat insgesamt abgenommen
- nein, der Lärm hat sich nicht geändert
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

81. Hat sich die Art der Geräusche der Windenergieanlagen mit der Zeit verändert?

Interviewer:

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

82. Können Sie beschreiben wie sich das Geräusch verändert hat?

Interviewer:

- Beschreibung:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

83. Hat es dort bei Ihnen ansonsten seit der Errichtung der Windenergieanlagen weitere Veränderungen in Ihrer Nachbarschaft gegeben?

Interviewer:

87. Bitte beschreiben Sie das Geräusch der Windenergieanlagen anhand der folgenden Begriffe genauer.

Ich würde das Geräusch beschreiben als ein...
Dröhnen

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 stimme voll zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

88. Bitte beschreiben Sie das Geräusch der Windenergieanlagen anhand der folgenden Begriffe genauer.

Ich würde das Geräusch beschreiben als ein...
Rauschen

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 stimme voll zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

89. Bitte beschreiben Sie das Geräusch der Windenergieanlagen anhand der folgenden Begriffe genauer.

Ich würde das Geräusch beschreiben als ein...
Brummen

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

84. Was hat sich geändert?

Interviewer:

- Änderung:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

85. Was meinen Sie:

Wie stark werden Sie sich dort bei Ihnen in den nächsten 12 Monaten durch den Lärm von Windenergieanlagen belästigt fühlen:

Würden Sie sagen...

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 überhaupt nicht
- 2 etwas
- 3 mittelmäßig
- 4 stark
- 5 äußerst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

86. Bitte beschreiben Sie das Geräusch der Windenergieanlagen anhand der folgenden Begriffe genauer.

Ich würde das Geräusch beschreiben als ein...
Poltern

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 stimme voll zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

- 1 stimme nicht zu
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 stimme voll zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

90. Bitte beschreiben Sie das Geräusch der Windenergieanlagen anhand der folgenden Begriffe genauer.

Ich würde das Geräusch beschreiben als ein...
Pulsieren

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 stimme voll zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

91. Bitte beschreiben Sie das Geräusch der Windenergieanlagen anhand der folgenden Begriffe genauer.

Ich würde das Geräusch beschreiben als ein...
Pfeifen

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 stimme voll zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

92. Bitte beschreiben Sie das Geräusch der Windenergieanlagen anhand der folgenden Begriffe genauer.

Ich würde das Geräusch beschreiben als ein...
Wuschen

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 stimme voll zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

93. Bitte beschreiben Sie das Geräusch der Windenergieanlagen anhand der folgenden Begriffe genauer.

Das Geräusch unterliegt einer ständigen Schwankung, d.h. wechselt ständig zwischen laut und leise.

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- 1 stimme nicht zu
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 stimme voll zu
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

94. Welches der genannten Geräuschmerkmale ist für Sie am stärksten belästigend?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- einfache Fensterscheiben
- Doppelverglasung oder Doppelfenster (Isolierglas, Kastenfenster)
- Schallschutzfenster, Dreifachverglasung, oder Fenster mit dicken Scheiben
- Schallschutzfenster in Verbindung mit Lüllern
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

99. Welche Verglasung haben die Fenster im Wohnraum Ihrer Wohnung bzw. Ihres Hauses (Hauptwohnraum)?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- einfache Fensterscheiben
- Doppelverglasung oder Doppelfenster (Isolierglas, Kastenfenster)
- Schallschutzfenster, Dreifachverglasung, oder Fenster mit dicken Scheiben
- Schallschutzfenster in Verbindung mit Lüllern
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

100. Wie ist das bei Ihnen üblicherweise in den warmen Jahreszeiten?

Haben Sie tagsüber die Fenster in Ihren Wohnräumen überwiegend...

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- geschlossen oder
- geöffnet bzw. gekippt
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

101. Und haben Sie in warmen Jahreszeiten nachts die Fenster in Ihrem Schlafzimmer überwiegend...

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- geschlossen oder
- geöffnet bzw. gekippt
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

102. Gibt es in Ihrer Wohnung bzw. Ihrem Haus einen ruhigen, von dem Umgebungslärm draußen abgewandten Raum, in den Sie sich zurückziehen können?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- Poltern
- Dröhnen
- Rauschen
- Brummen
- Pulsieren
- Pfaffen
- Wischen
- Ständige Schwankungen
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

95. Gibt es weitere Begriffe, die das Geräusch beschreiben könnten?

Interviewer:

- Ja, und zwar:
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

96. Wie ist die Ausrichtung Ihres Schlafzimmers zur Windenergieanlage?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- von der Windenergieanlage abgewandt
- seitlich zur Windenergieanlage ausgerichtet
- der Windenergieanlage zugewandt
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

97. Wie ist die Ausrichtung Ihres Wohnzimmers zur Windenergieanlage?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- von der Windenergieanlage abgewandt
- seitlich zur Windenergieanlage ausgerichtet
- der Windenergieanlage zugewandt
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

98. Und welche Verglasung haben die Fenster in Ihrem Schlafzimmer?

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

103. Unterscheidet sich die jetzige Geräuschsituation hier bei Ihnen von der Geräuschsituation bei Ihnen vor der Corona-Pandemie?

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

104. Wie unterscheidet sich die Situation?

- Nennung:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

105. Wir sind jetzt fast am Ende angelangt, abschließend haben wir nur noch einige Fragen zur Statistik.

Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

Interviewer:
Antworten vorlesen.

- männlich
- weiblich
- divers
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

106. In welchem Jahr sind Sie geboren?

Interviewer:

- Geburtsjahr:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

107. Haben Sie ein Hörgerät?

Interviewer:

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

108. Können Sie hören bzw. verstehen, was in einem Gespräch gesagt wird, wenn mehrere Personen gleichzeitig sprechen, gegebenenfalls mit Hörgerät?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- Ja, ohne Schwierigkeiten
- Ja, mit leichten Schwierigkeiten
- Ja, mit großen Schwierigkeiten
- Nein, gar nicht
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

109. Welchen höchsten Schulabschluss haben Sie?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- Hauptschul-/ Volksschulabschluss
- Realschulabschluss/ mittlere Reife
- Polytechnische Oberschule der DDR mit Abschluss der 10. Klasse
- Fachhochschulreife, Abschluss Fachoberschule
- Allgemeine oder fachgebundene Hochschulreife/ Abitur (Gymnasium bzw. Erweiterte Oberschule (EOS), auch EOS mit Lehre)
- Schule beendet ohne Abschluss
- noch keinen Schulabschluss
- Polytechnische Oberschule der DDR mit Abschluss der 8. oder 9. Klasse
- sonstiger Schulabschluss
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

110. Welche höchste abgeschlossene Berufsausbildung haben Sie?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- Arbeiter/in
- ungelernter Arbeiter/in
- Angelernter oder gelernter Arbeiter/in
- Facharbeiter/in
- Vorarbeiter/in
- Meister
- Angestellter
- mit einfacher Tätigkeit
- mit qualifizierter Tätigkeit
- Industrie-/Werkmeister
- mit hochqualifizierter Tätigkeit oder Leitungsfunktion
- mit umfassender Führungstätigkeit u. Entscheidungsbefugnissen
- Selbständiger
- selbständiger Landwirt/ Genossenschaftsbauer/in
- Freiberuflich, selbständiger Akademiker/in
- sonstiger Selbständiger mit bis zu 9 Mitarbeitern/innen oder Partner/innen
- sonstiger Selbständiger mit 10 und mehr Mitarbeitern/innen oder Partner/innen
- Mithelfende/ Familienangehörige/r
- Beamter/in
- einfacher Dienst
- mittlerer Dienst
- gehobener Dienst
- höherer Dienst
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

113. Wie viele Personen leben ständig in Ihrem Haushalt, Sie selbst mit eingerechnet?

Zählen Sie dabei bitte auch Kinder mit.

- Anzahl Personen:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

114. Wie viele davon sind Kinder unter 14 Jahren?

- Anzahl Kinder < 14:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

115. Wie viele davon sind Jugendliche von 14 bis unter 18 Jahren?

- Anzahl Jugendliche 14 bis < 18:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

- noch in beruflicher Ausbildung (Berufsvorbereitungsjahr, Auszubildende/r, Praktikant/-in, Student/-in)
- keinen beruflichen Abschluss und nicht in beruflicher Ausbildung
- beruflich-betriebliche Berufsausbildung (Lehre) abgeschlossen
- beruflich-schulische Ausbildung (Berufsfachschule, Handelsschule, Vorbereitungsdienst für den mittleren Verwaltungsdienst abgeschlossen)
- Ausbildung an einer Fachschule der DDR abgeschlossen
- Ausbildung an Meister-, Berufs- oder Fachakademie abgeschlossen
- Ausbildung an Ingenieur-/ Technikerschule abgeschlossen
- Bachelor an Fachhochschule abgeschlossen
- Bachelor an Hochschule/ Universität abgeschlossen
- Fachhochschulabschluss (z.B. Diplom, Master)
- Universitätsabschluss (z.B. Diplom, Magister, Staatsexamen, Master)
- einen anderen beruflichen Abschluss
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

111. Sind Sie...

Interviewer:

Antworten vorlesen.

- vollzeiterwerbstätig
- teilzeiterwerbstätig
- geringfügig erwerbstätig, 400-Euro-Job, Minijob, Gelegenlich oder unregelmäßig beschäftigt
- "Ein-Euro-Jobber/in" (bei Bezug von Arbeitslosengeld II)
- Altersteilzeit (in der Arbeitsphase befindlich)
- in einer beruflichen Ausbildung/Lehre oder Umschulung
- Schüler/in oder Studierende/r, die/der nicht gegen Geld arbeitet
- in Mutterschafts-, Erziehungsurlaub, Elternzeit oder sonstige Beurlaubung
- in Pension/Rente, Altersteilzeit (in Freistellungsphase befindlich)
- zurzeit nicht erwerbstätig (arbeitslos, Vorruheständler/-innen)
- noch nie erwerbstätig gewesen
- im Wehrdienst/Zivildienst, freiwilliges Soziales Jahr (BuFi)
- Hausmann/-frau
- Sonstiges
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

112. Welche berufliche Position nehmen Sie gegenwärtig ein?

Interviewer:

Antworten vorlesen.

116. Wie viele davon sind Erwachsene über 18 Jahren?

- Anzahl Erwachsene:
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

117. Noch eine letzte Frage zu Ihrem Haushalt:

Damit wir in unserer Studie die Angaben aus verschiedenen Einkommensgruppen vergleichen können, würde es uns sehr helfen, wenn Sie uns sagen, in welche Gruppe das monatliche Nettoeinkommen Ihres Haushaltes – also aller im Haushalt lebenden Personen - gehört?

Ist es...

Interviewer:

Antworten vorlesen.

Zum Nettoeinkommen zählt das Einkommen aller Haushaltsmitglieder zusammen (einschließlich Erziehungsgeld, Kindergeld, Beihilfen, sonstige Einkünfte), nach Abzug von Steuern und Sozialabgaben

- unter 1250 €
- 1250 bis unter 1750 €
- 1750 bis unter 2250 €
- 2250 bis unter 3000 €
- 3000 bis unter 4000 €
- 4000 bis unter 5000 €
- 5000 € und mehr
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

118. Im Zeitraum von August 2020 und März 2021 wird die Technische Hochschule Köln zusammen mit dem Forschungspartner ZEUS (Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt- und Sozialforschung) eine Vertiefungsstudie zu diesem Forschungsprojekt durchführen. Diese schließt Hörversuche ein, um die Lästigkeit von Geräuschen von Windenergieanlagen näher zu untersuchen.

Es ist wichtig, dass an diesen Hörversuchen auch Personen teilnehmen, die im Alltag mit Geräuschen von Windenergieanlagen konfrontiert sind. Die Hörversuche finden in Ihrer Nähe statt, die genaue Räumlichkeit würde Ihnen noch bekannt gegeben.

Darf die Technische Hochschule Köln Sie hierzu kontaktieren?

Interviewer:

- Ja
- Nein
- (weiß nicht)
- (keine Angabe)

119. Vielen Dank!

Wir dürfen Sie die Kolleginnen und Kollegen der Technischen Hochschule Köln Sie am besten erreichen, per E-Mail oder Telefon?

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

• E-Mail-Adresse:
• Telefonnummer:
• (keine Angabe, verweigert)

120. Zusätzlich werden durch das Institut ZEUS, Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt und Sozialforschung ab Ende Juli 2020 vertiefende Telefoninterviews durchgeführt.

Darin geht es darum, mehr von Ihren Eindrücken der Geräusche von den Windenergieanlagen bei Ihnen zu erfahren. Eine Terminabsprache mit den Mitarbeitern von ZEUS kann hierfür flexibel und nach Ihren Präferenzen abgestimmt werden.

Darf das Institut ZEUS Sie in den kommenden Wochen zwecks einer Terminabsprache hierzu kontaktieren?

• Ja
• Nein
• (weiß nicht)
• (keine Angabe)

121. Vielen Dank!

Wie dürfen Sie die Kolleginnen und Kollegen von ZEUS Sie am besten erreichen, per E-Mail oder Telefon? (Doppelte Angabe, da nur diese Angaben an den jeweiligen Projektpartner weitergegeben werden.)

• E-Mail-Adresse:
• Telefonnummer:
• (keine Angabe, verweigert)

122. Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Falls Sie weitere Anmerkungen haben, können Sie diese hier eingeben:

• Bemerkungen:
• keine Bemerkungen

Quelle: eigene Darstellung, Zeus GmbH

D.2 Leitfaden für Vertiefungsinterviews

Leitfaden für qualitativen Vertiefungsinterviews

Zum Thema Lärm von Windenergieanlagen im Projekt „Geräuschwirkungen bei der Nutzung von Windenergie an Land“

Projekt im Auftrag des Umweltbundesamtes

Qualitative Telefoninterviews

Untersuchungsgebiet:

Datum:

Identifikationsnummer des quantitativen Fragebogens:

Gesprächseröffnung:

Es geht heute um das Thema der Windenergieanlagen bei Ihnen, über das im Fragebogen vor ein paar Wochen einige Fragen gestellt wurden, zu vertiefen. Uns interessieren selbst dabei einige Aspekte der Geräusche der Windenergieanlagen. Dabei möchten wir Ihnen aber auch noch einmal die Gelegenheit haben, über ein paar Sachen zu sprechen, die Sie vielleicht gerne gesagt hätten, aber dazu in dem Fragebogen, den Sie vor ein paar Wochen bearbeitet haben, keine Zeit oder Gelegenheit hatten.

- 1. Zum Beginn: Gibt es weitere Sachen, die Sie auf Basis des telefonischen Interviews zum Windenergieanlagen-Lärm noch anzumerken haben, an der Sie Ende letzten Jahres oder Anfang diesen Jahres teilgenommen haben?**
- 2. Wie stehen Sie zu Windenergieanlagen?**
 - Haben Sie einen persönlichen Bezug dazu?
 - Wenn Sie an *Ihren* Alltag zuhause oder auf der Arbeit denken, gibt es einen oder mehrere Berührungspunkte, an denen sich für Sie irgendein Zusammenhang zur Windenergie oder einem Teilbereich ergibt?
- 3. Was würden Sie sagen: Welche Aspekte der Energiegewinnung aus Windkraft sind für die Menschen allgemein von größter Bedeutung?**
 - Wie begründen Sie Ihre Argumente?
 - Einmal abgesehen von Ihrer persönlichen Situation, wie betrachten Sie ganz allgemein Windenergieanlagen?
- 4. Welche negativen bzw. positiven Auswirkungen haben Windenergieanlagen Ihrer Meinung nach, in der Nähe von Wohngebieten?**
 - Und ganz allgemein?
- 5. Gab es eine Zeit, in der Sie nicht in der Nähe einer Windenergieanlagen gewohnt haben? Beispielsweise an einem anderen Wohnort oder bevor die Anlagen in Betrieb genommen wurden?**

Wenn ja:

Wie würden Sie die Änderungen in Bezug auf Ihren Alltag beschreiben, die Sie konkret den Windenergieanlagen zu schreiben?

6. Gibt es- neben den Geräuschen von Windenergieanlagen- weitere Begleiterscheinungen, die Sie bemerkt haben, oder die Sie grundsätzlich vermuten?

- Falls nichts konkret zu Symptomen gesagt wird, nachfragen: Druck, Vibration, Unwohlsein?

7. Können Sie bei Ihnen zu Hause eine oder mehrere Windenergieanlagen hören?

- Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate hier bei Ihnen denken, wie laut sind bei Ihnen die Windenergieanlagen

sehr laut	laut	eher laut als leise	weder laut, noch leise	eher leise als laut	leise	sehr leise
+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

8. Wenn Sie akut durch den Lärm der Windenergieanlagen gestört werden, was fühlen Sie dann?

9. Gibt es bestimmte Gegenmaßnahmen, die Sie unmittelbar einleiten, wenn Sie die störenden Geräusche wahrnehmen?

10. Sind Sie in einer Bürgerinitiative oder sonstigen Vereinigungen aktiv, die sich mit Windenergieanlagen auseinandersetzt?

- Falls ja, sind Sie für oder gegen den Betrieb der Windenergieanlagen? Bitte erzählen Sie uns hierzu, was für Sie hierbei wichtig ist!
- Richtet sich das Engagement gegen bzw. für Windenergieanlagen insgesamt, oder nur gegen die hier vor Ort?

Abschluss

Abgesehen davon, was wir bereits besprochen, gibt es noch weitere Sachen in Bezug zu Windenergieanlagen, die Sie gern sagen möchten?

Vielen Dank für Ihre Teilnahme.

D.3 Tabelle mit Mittelwerten und Standardabweichungen für die wichtigsten Fragebogenitems und berechneten Scores

Items/Scores	Untersuchungsgebiete					Gesamt
	UG 1	UG 2	UG 3	UG 4	UG 5	
WEA-Lärmbelästigung insgesamt	1,37 (0,93)	1,62 (1,12)	1,37 (0,8)	2,29 (1,5)	2,91 (1,48)	1,75 (1,24)
WEA-Lärmbelästigung im Haus	1,17 (0,56)	1,35 (0,87)	1,2 (0,56)	1,69 (1,24)	2,01 (1,15)	1,39 (0,88)
WEA-Lärmbelästigung außer Haus	1,32 (0,85)	1,6 (1,08)	1,53 (0,89)	2,22 (1,51)	2,91 (1,5)	1,75 (1,23)
Score Kommunikationsstörungen	1,13 (0,49)	1,1 (0,35)	1,15 (0,43)	1,27 (0,63)	1,36 (0,61)	1,17 (0,49)
Ruhe- /Konzentrationsstörungen	1,17 (0,61)	1,18 (0,54)	1,15 (0,46)	1,33 (0,8)	1,48 (0,77)	1,23 (0,62)
Außenstörungen	1,39 (0,92)	1,52 (0,99)	1,49 (0,76)	2,13 (1,27)	2,66 (1,29)	1,7 (1,1)
WEA-Schlafstörungen	1,17 (0,59)	1,23 (0,72)	1,14 (0,52)	1,5 (0,94)	1,71 (1,01)	1,29 (0,75)
Mangelnde Restauration	1,82 (0,97)	2 (1,05)	1,97 (0,67)	2,24 (1,08)	2,76 (1,01)	2,08 (1,01)
Negative Konsequenzen für Wohnumgebung	3,07 (1,14)	4,03 (0,49)	2,87 (0,85)	3,54 (1,23)	3,78 (1,1)	3,42 (1,07)
Positive Konsequenzen für Wohnumgebung	1,84 (0,99)	1,8 (1,03)	2,26 (0,88)	1,81 (1,12)	1,54 (0,83)	1,85 (0,99)
Visuelle Belästigung	1,46 (0,83)	1,94 (1,06)	1,4 (0,58)	2,2 (1,08)	2,49 (1,12)	1,78 (1)
Zukünftige Belästigung durch Windenergieanlagen	1,53 (1,01)	1,8 (1,23)	1,37 (0,8)	1,81 (1,1)	2,63 (1,36)	1,77 (1,17)

D.4 Häufigkeitstabellen sonstige Variablen

Items	Prozentuale Antworten mit „Ja“ in Untersuchungsgebieten					
	UG 1	UG 2	UG 3	UG 4	UG 5	Gesamt
Beschäftigungsverhältnis mit Bezug zu Windenergieanlagen	0,65	0,43	0,22	0,65	0,65	2,59
Finanzielle Beteiligung an Windenergieanlagen	0,43	1,3	1,95	0,22	0,87	4,76
Stromkostenvorteile durch Windenergieanlagen	0,24	0,24	0,47	0,71	0,47	2,12
Engagement pro Windenergieanlagen	0,22	0,43	0,43	0,22	0	1,29
Engagement contra Windenergieanlagen	1,29	0,22	0,43	0,22	2,15	4,3
Zunahme des Lärms von Windenergieanlagen seit Errichtung	3,64	5,24	1,82	3,19	9,11	23,01
Abnahme des Lärms von Windenergieanlagen seit Errichtung	0	0	1,14	0	0	1,14

D.5 Ergebnisse der Regressionsrechnungen zum Anteil der belästigten bzw. hoch belästigten Personen (Expositions-Wirkungsanalysen)

Basismodelle

Parameter	B	SE	p	OR	95% Wald-Konfidenzintervall I für OR	
					Untere Grenze	Obere Grenze
%HA Gesamt						
(Konstanter Term)	-6,934	1,532	0,000	0,001	0,000	0,020
L_r dB(A)	0,154	0,0446	0,001	1,167	1,069	1,273
%HA innen						
(Konstanter Term)	-7,671	2,3238	0,001	0,000	0,000	0,044
L_r dB(A)	0,144	0,0674	0,033	1,154	1,012	1,317
%HA außen						
(Konstanter Term)	-7,887	1,7422	0,000	0,000	0,000	0,011
L_r dB(A)	0,18	0,0503	0,000	1,197	1,085	1,321

B = Regressionskoeffizient, SE = Standardfehler (*standard error*), p = Irrtumswahrscheinlichkeit, OR = Odds ratio

Erweiterte Modelle

Parameter	B	SE	p	OR	95% Wald-Konfidenzintervall I für OR	
					Untere Grenze	Obere Grenze
%HA gesamt						
(Konstanter Term)	-8,11	2,19	0,00	0,00	0,00	0,02
L_r dB(A)	0,13	0,06	0,04	1,14	1,01	1,29
Lärmempfindlichkeit	-0,04	0,36	0,91	0,96	0,47	1,95
PSS1 Hilflosigkeit	-0,29	0,32	0,35	0,75	0,40	1,38
Mangelnde Restauration	0,78	0,29	0,01	2,19	1,25	3,84
Negative Konsequenzen	0,86	0,52	0,10	2,37	0,86	6,57
Positive Konsequenzen	0,17	0,32	0,61	1,18	0,63	2,22
Visuelle Beeinträchtigung	1,09	0,32	0,00	2,96	1,59	5,52

Parameter	B	SE	p	OR	95% Wald-Konfidenzintervall I für OR	
Poltern	0,34	0,23	0,13	1,41	0,90	2,20
Dröhnen	-0,09	0,25	0,72	0,92	0,56	1,50
Rauschen	0,24	0,37	0,52	1,27	0,62	2,63
Brummen	-0,05	0,29	0,87	0,96	0,55	1,67
Pulsieren	-0,03	0,24	0,89	0,97	0,61	1,54
Pfeifen	-0,11	0,24	0,64	0,89	0,56	1,44
Wuschen	0,92	0,58	0,11	2,51	0,80	7,85
Schwankung	0,40	0,37	0,28	1,49	0,73	3,04
%HA innen						
(Konstanter Term)	-18,69	7,28	0,01	0,00	0,00	0,01
Lr dB(A)	0,33	0,14	0,02	1,39	1,05	1,83
Lärmempfindlichkeit	0,34	0,36	0,34	1,41	0,70	2,82
PSS1 Hilfslosigkeit	0,52	0,36	0,15	1,69	0,84	3,40
Mangelnde Restauration	2,70	0,74	0,00	14,92	3,48	63,96
Negative Konsequenzen	-1,55	0,75	0,04	0,21	0,05	0,92
Positive Konsequenzen	-1,84	1,25	0,14	0,16	0,01	1,84
Visuelle Beeinträchtigung	-0,61	0,55	0,27	0,54	0,18	1,60
Poltern	0,15	0,31	0,64	1,16	0,63	2,13
Dröhnen	-0,88	0,37	0,02	0,42	0,20	0,86
Rauschen	0,29	0,35	0,40	1,34	0,68	2,63
Brummen	0,17	0,43	0,69	1,19	0,52	2,73
Pulsieren	0,99	0,42	0,02	2,70	1,19	6,12
Pfeifen	-0,23	0,36	0,52	0,80	0,40	1,60
Wuschen	1,45	1,71	0,40	4,27	0,15	121,92
Schwankung	1,37	0,74	0,07	3,94	0,92	16,93
%HA außen						
(Konstanter Term)	-12,33	3,27	0,00	0,00	0,00	0,00
Lr dB(A)	0,24	0,09	0,01	1,27	1,08	1,50

Parameter	B	SE	p	OR	95% Wald-Konfidenzintervall I für OR	
Lärmempfindlichkeit	0,84	0,43	0,05	2,31	0,99	5,40
PSS1 Hilflosigkeit	-0,28	0,43	0,51	0,75	0,33	1,75
Mangelnde Restauration	0,90	0,40	0,03	2,46	1,12	5,41
Negative Konsequenzen	0,34	0,49	0,49	1,40	0,54	3,63
Positive Konsequenzen	0,01	0,31	0,97	1,01	0,55	1,87
Visuelle Beeinträchtigung	1,03	0,37	0,01	2,79	1,36	5,74
Poltern	0,45	0,25	0,07	1,56	0,96	2,55
Dröhnen	-0,19	0,29	0,53	0,83	0,47	1,48
Rauschen	0,97	0,36	0,01	2,65	1,31	5,34
Brummen	0,11	0,28	0,70	1,11	0,65	1,91
Pulsieren	-0,09	0,27	0,73	0,91	0,54	1,54
Pfeifen	-0,10	0,24	0,68	0,91	0,56	1,46
Wuschen	0,66	0,42	0,12	1,94	0,84	4,45
Schwankung	0,52	0,35	0,14	1,68	0,84	3,36

B = Regressionskoeffizient, SE = Standardfehler (standard error), p = Irrtumswahrscheinlichkeit, OR = Odds ratio

D.6 Vertiefungsinterview: Ergebnisse der Wortpaarvergleiche

Wortpaarvergleiche	UG 2	UG 3	Gesamt
Ereignisreich	1	2	3
Ereignisarm	4	3	7
Weder noch	0	0	0
Unangenehm	0	1	1
Angenehm	1	3	4
Weder noch	4	1	5
Warm	1	2	3
Kalt	4	0	1
Weder noch	3	3	6
Ruhig	2	5	7
Chaotisch	0	0	0
Weder noch	3	0	3
Dynamisch	2	2	4
Statisch	0	3	3
Weder noch	3	0	3
Lebhaft	1	1	2
Leblos	2	3	5
Weder noch	2	1	3
Harmonisch	0	3	3
Unharmonisch	2	2	4
Weder noch	3	0	3
Ausdrucksstark	0	1	1
Ausdruckslos	2	3	5
Weder noch	3	1	4
Einfach	4	2	6
Komplex	0	3	3
Weder noch	1	1	2

E Hörversuche - Details zu den dargebotenen Stimuli

Tabelle 35: Werte Amplitudenmodulationen Aufnahmeort 1 – statische Stimuli

Nennwert AM im Hörversuch	$L_{HP,05}-L_{HP,95}$ in dB	ΔL_{AM} in dB
0 dB	1,4	0,7
2 dB	2,4	2,9
4 dB	4,1	4,6
6 dB	6,0	6,3
8 dB	8,0	9,1

Werte der Amplitudenmodulation für die einzelnen in Hörversuch dargebotenen Stimuli mit statischen AM für den Aufnahmeort 2. Neben den für die Auswertung und alle weiteren Betrachtungen verwendeten Nennwerten der AM sind die $L_{HP,05}-L_{HP,95}$ jedes Stimulus, sowie die gemäß des in Abschnitt 4.4 erläuterten Verfahrens bestimmten ΔL_{AM} angegeben.

Tabelle 36: Werte Amplitudenmodulationen Aufnahmeort 2 – statische Stimuli

Nennwert AM im Hörversuch	$L_{HP,05}-L_{HP,95}$ in dB	ΔL_{AM} in dB
0 dB	1,4	1,0
2 dB	2,1	2,3
4 dB	3,8	4,5
6 dB	6,1	6,6
8 dB	7,7	8,5

Werte der Amplitudenmodulation für die einzelnen in Hörversuch dargebotenen Stimuli mit statischen AM für den Aufnahmeort 2. Neben den für die Auswertung und alle weiteren Betrachtungen verwendeten Nennwerten der AM sind die $L_{HP,05}-L_{HP,95}$ jedes Stimulus, sowie die gemäß des in Abschnitt 4.4 erläuterten Verfahrens bestimmten ΔL_{AM} angegeben.

Tabelle 37: Werte Amplitudenmodulationen Aufnahmeort 1 – dynamische Stimuli

Änderung der AM	$L_{HP,05}-L_{HP,95}$ in dB		ΔL_{AM} in dB	
	Anfang	Ende	Anfang	Ende
ansteigend	3,5	7,7	2,9	8,1
abfallend	7,9	4,3	5,7	3,9

Werte der Amplitudenmodulation für die einzelnen in Hörversuch dargebotenen Stimuli mit dynamischen AM für den Aufnahmeort 1. Angegeben ist die für die Auswertungen genutzte Tendenz der Änderung der AM, sowie die $L_{HP,05}-L_{HP,95}$ jedes Stimulus, sowie die gemäß des in Abschnitt 4.4 erläuterten Verfahrens bestimmten ΔL_{AM} . Die Werte wurden getrennt für den Anfang und das Ende des Stimulus bestimmt (jeweils Abschnitte von 10 s Dauer).

Tabelle 38: Werte Amplitudenmodulationen Aufnahmeort 2 – dynamische Stimuli

Änderung der AM	$L_{HP,05}-L_{HP,95}$ in dB		ΔL_{AM} in dB	
	Anfang	Ende	Anfang	Ende
ansteigend	4,2	5	3,6	4,3
abfallend	6,4	4,9	5,8	4,6

Werte der Amplitudenmodulation für die einzelnen in Hörversuch dargebotenen Stimuli mit dynamischen AM für den Aufnahmeort 2. Angegeben ist die für die Auswertungen genutzte Tendenz der Änderung der AM, sowie die $L_{HP,05}-L_{HP,95}$ jedes Stimulus, sowie die gemäß des in Abschnitt 4.4 erläuterten Verfahrens bestimmten ΔL_{AM} . Die Werte wurden getrennt für den Anfang und das Ende des Stimulus bestimmt (jeweils Abschnitte von 10 s Dauer).

F Infraschallmessungen

F.1 Messsysteme

F.1.1 Prüfung der Schallmesstechnik

Die Untersuchungen über amplitudenmodulierte Geräusche zeigen, dass diese stark mit der Umdrehungsfrequenz der Windenergieanlagen zusammenhängen. Die Anlagen weisen geringe Umdrehungsfrequenzen auf, die auch Geräusche im Infraschallbereich erzeugen. Das wirft die Frage auf, ob das Auftreten von Infraschall mit der Modulation der Geräusche der Windenergieanlagen zusammenhängt. Zur Beantwortung dieser Frage wurde zunächst die eingesetzte Schallmesstechnik hinsichtlich ihrer Eignung für diese Aufgabenstellung überprüft.

Für die Infraschallmessungen waren sowohl Klasse-1-Mikrofone auf einem Stativ als auch Infraschallmikrofon auf einer Bodenplatte vorgesehen.

Schallpegelmessers mit der Genauigkeitsklasse 1 nach DIN EN 61672 (Beuth 2014/2018) werden nach dieser Norm nicht für den Frequenzbereich unterhalb 10 Hz spezifiziert. Das Verhalten eines Schallpegelmessers der Genauigkeitsklasse 1 im Frequenzbereich unterhalb 10 Hz ist demnach, ohne weitere Angaben des Herstellers, die im vorliegenden Fall nicht bestehen, undefiniert. Die in dieser Studie genutzte Schallmesstechnik der Firma deBAKOM vom Typ „deBAKOM 2014-Q-m“ bestehend aus Messrechner, Anpassungsverstärker und der wetterfesten Mikrofoneinheit B&K 4198 wurde deshalb dahingehend untersucht wie sich der Frequenzgang unterhalb von 250 Hz, im speziellen aber unterhalb von 10 Hz, verhält. Zu diesem Zweck wurde eine sogenannte Tieftonkalibrierung in einem Labor der Firma Norsonic-Tippkemper durchgeführt.

Als Messtechnik für die Infraschallmessung auf einer Bodenplatte im UG 5 wurden die folgenden Komponenten eingesetzt:

- Schallpegelmessers von Sinus Messtechnik: Soundbook mit GFM 212
- Messmikrofon von Microtech Gefell: MK3222 + MV212 mit einem Frequenzbereich von 0,5 Hz bis 250 Hz.

Für dieses zweite Messsystem wurde ebenfalls eine Tieftonkalibrierung, beim Hersteller Microtechgefell durchgeführt.

Das Kalibrierverfahren wird von der Firma Norsonic-Tippkemper wie folgt beschrieben:

„Zur Bestimmung des Tieftonfrequenzganges der gesamten Messkette bestehend aus dem Mikrofon Typ B&K 4189 dem Impedanzwandler Typ 2669-C-001 und dem Messsystem ImmSound Measurement System wurde das Mikrofon in einem Tieftonkuppler montiert. Mit einem Adapter wird die Entlüftung des Mikrofons in den Kuppler geführt. Vor der Messung wird über die Insert-Voltage Messung die Vorverstärkerdämpfung des Referenzmikrofons gemessen. Die Anzeige des Schallpegelmessers wird so direkt auf das Referenzmikrofon bezogen.“
(Norsonic-Tippkemper GmbH, 2020)

F.1.2 Ergebnisse der Kalibrierung

Die Ergebnisse der Kalibrierungen werden im Folgenden dargestellt und diskutiert. Dabei steht die quantitative Auswertbarkeit von im Infraschallbereich vorhandenen Messdaten im Vordergrund.

Es ist zunächst festzustellen, dass es sich um Kalibrierungen der Schallmesstechnik unter Laborbedingungen handelt und der gemessene Frequenzgang nur eine Orientierung für den Einsatz des Messgeräts im Feld ist. Faktoren wie der statische Luftdruck, die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit am Einsatzort beeinflussen den Frequenzgang im Betrieb und können im Rahmen der Betrachtungen nicht im Detail untersucht werden.

Seriennummern der Messkettenkomponenten

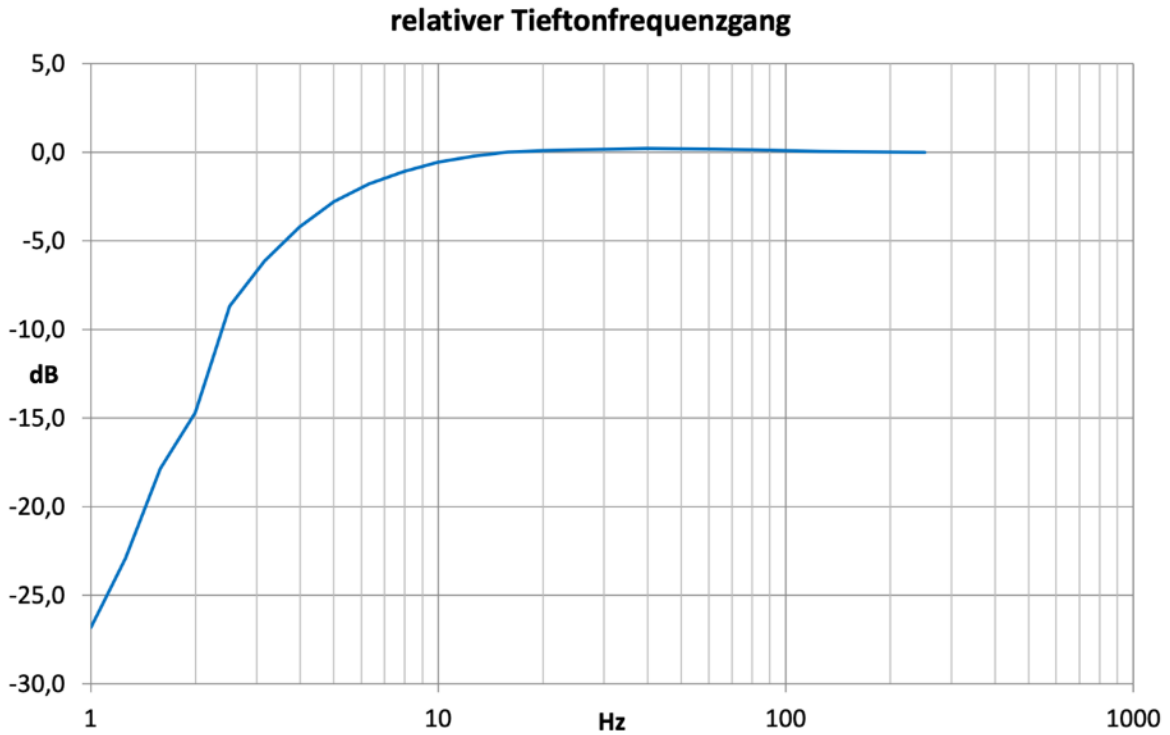
Messsystem deBAKOM

Komponente	Hersteller	Gerätetyp	Seriennummer
Messrechner	deBAKOM	deBAKOM 2014-Q-m	1406335
Außenmikrofoneinheit	Brüel & Kjær	B&K 4198	1946369
Mikrofonvorverstärker	Brüel & Kjær	B&K 2669-C	2745477
Mikrofonkapsel	Brüel & Kjær	B&K 4189	2741544
Anpassungsverstärker	deBAKOM	deBAKOM MicV5	1308002

Messsystem Sinus

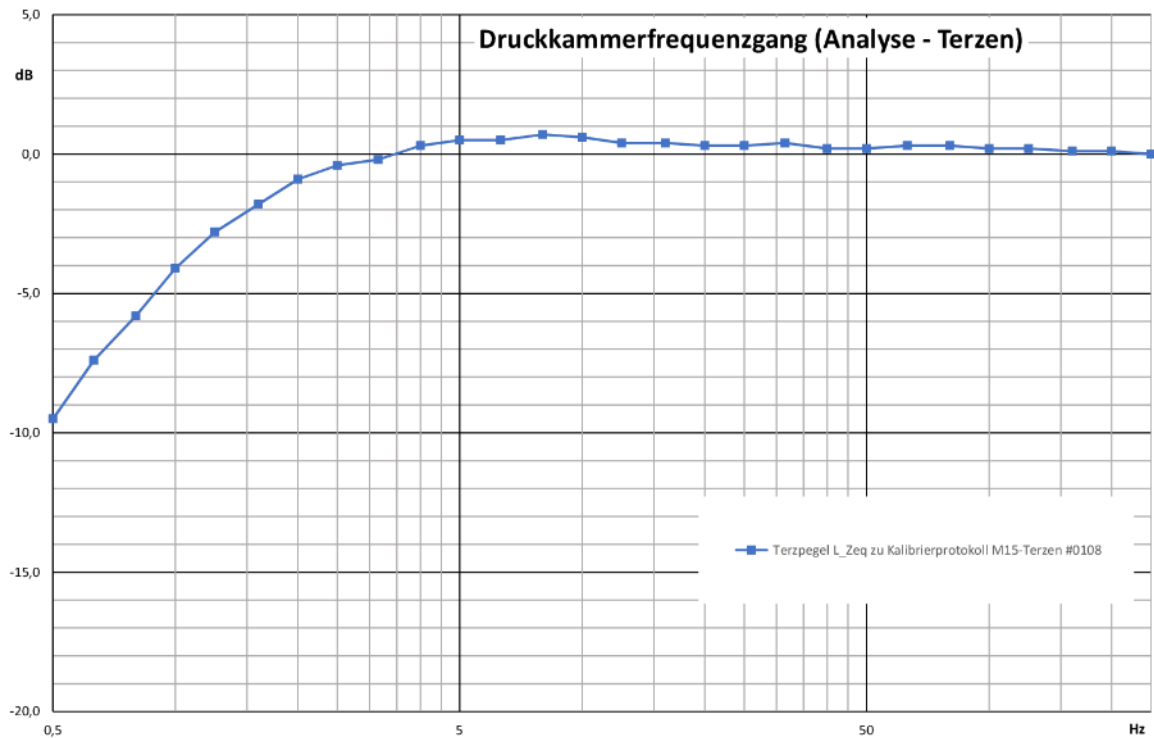
Komponente	Hersteller	Gerätetyp	Seriennummer
Messrechner	Sinus	Soundbook MK2_2LG	07398
Mikrofonvorverstärker	MTG	MV212	0002
Mikrofonkapsel	MTG	MKS222	38657

Abbildung 130 relativer Tieftonfrequenzgang (Auszug aus Kalibrierprotokoll deBAKOM 2014-Q-m)



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 131 Tieftonfrequenzgang (Auszug aus Kalibrierprotokoll deBAKOM 2014-Q-m)



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Den gemessenen Frequenzgang ist zu entnehmen, dass die untere Grenzfrequenz (-3 dB Eckfrequenz) des Sinus Messtechnik Messsystems bei etwa 1,25 Hz liegt während das deBAKOM Messsystem eine untere Grenzfrequenz von etwa 5 Hz aufweist. Das Sinus Messsystem weist eine um etwa 20 dB geringere Dämpfung bei 1 Hz auf als das deBAKOM Messsystem.

Da die Anforderungen für Klasse-1-Schallpegelmessgerät bei 10 Hz von $+3/-\infty$ dB (siehe Tabelle 3, S.21) in der DIN EN 61672 (Beuth 2014) zugrunde gelegt werden, arbeiten beide untersuchten Schallmesssysteme im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 Hz entsprechend den Akzeptanzgrenzen für die unterste in der DIN EN 61672 (Beuth 2014) spezifizierte Frequenz von 10 Hz.

Betrachtungen von Pegelanteilen in diesem Frequenzbereich können demnach mit einer an die Genauigkeitsklasse 1 der DIN EN 61672 (Beuth 2014) angelehnten Qualität getroffen werden.

Bei der Betrachtung der Akzeptanzgrenzen der DIN EN 61672 (Beuth 2014) fällt auf, dass für die Genauigkeitsklasse 1 bereits bei Frequenzen unterhalb von 16 Hz ein Fehler von $-\infty$ dB toleriert wird. Außerdem stellt die lineare Erfassung von (Infra-)Schall bis hin zum statischen Luftdruck mittels Messmikrofonen eine erhöhte Anforderung an die Konstruktion der Schallmesstechnik dar, welche physikalisch bedingt Hochpasscharakter aufweist. Für eine ideale Infraschallmessung wäre somit eine Schallmesstechnik mit idealem linearem Frequenzgang unterhalb von 20 Hz erforderlich.

Welche Fehler bei der Erfassung des Schalldruckpegels akzeptabel sind, hängt grundsätzlich von dem Zweck der durchgeführten Messung ab. In der vorliegenden Studie sollte das Audiosignal auf den Präsenz von Einzeltönen im Infraschallbereich untersucht werden. Hierfür ist die Genauigkeit des Pegels zunächst zweitrangig. Lediglich eine starke Dämpfung bis in den Bereich des Grundrauschens würde die angestrebte Betrachtung unmöglich machen. Einzeltöne im Infraschallbereich deren Betrachtung interessant im Sinne der Wahrnehmbarkeit durch Menschen sind, weisen erwartungsgemäß Pegel oberhalb von 60 dB auf und würden damit einen Mindestabstand zum Grundrauschpegel (durch den Hersteller mit 10,5 dB angegeben) des Messsystems von 49,5 dB aufweisen. Die Dämpfung des Gesamtmesssystems von 26,8 dB bei 1 Hz würde weiterhin einen Abstand zum Grundrauschpegel von 22,7 dB „übrig“ lassen.

Mit einem Mindestpegelabstand von Einzeltönen zum Grundrauschen von mindestens 20 dB lassen sich daher unter Zuhilfenahme der Ergebnisse aus der Tieftonkalibrierung oberhalb von 1 Hz auch frequenzgangkorrigierte Pegel bestimmen. Die so bestimmten Pegel können zwar eine Messung mit möglichst linear ausgelegtem Frequenzgang aller Komponenten nicht ersetzen, ermöglichen jedoch eine Betrachtung der Pegel im Infraschallbereich mit definierten endlichen Messfehlern.

Unterhalb von 1 Hz ist mit einer Weiterführung der Steigung des Frequenzgangs von 12 dB/Oktave zu rechnen. Es ergeben sich nach dieser Annahme für die Oktavmittenfrequenzen 0,5 Hz, 0,25 Hz und 0,125 Hz Dämpfungen von 38 dB, bis 63 dB.

Auf den nächsten Seiten sind die Kalibrierprotokolle zur Vollständigkeit aufgeführt.

Abbildung 132 Kalibrierprotokoll Messsystem Sinus



microphones & acoustic systems - founded 1928 by Georg Neumann

Kalibrierprotokoll M15-Terzen Werkskalibrierung Factory Calibration	Prot.-Nr.: 0108 Seite: 1 von 4
Frequenzgang-Kalibrierung Druckkammerverfahren Mikrofonkapsel Kondensatortyp mit Vorverstärker und Schallpegelmesser	

Gegenstand <i>Object</i>	Messmikrofonkapsel + Vorverstärker, stromgesp. + Schallpegelmesser	Microtech Gefell kalibriert die physikalischen Größen Schalldruck und Beschleunigung mit Werkserzertifikat.
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Microtech Gefell GmbH + Sinus Messtechnik GmbH	Die Normale für Schalldruck und Referenzmikrofone sind rückführbar auf PTB-Normale. (Physikalisch Technische Bundesanstalt).
Typ <i>Type</i>	MKS222 + MV212 + Soundbook MK2_2LG	Die Normale für Beschleunigung und Referenzbeschleunigungssensoren sind rückführbar auf DKD-Normale. (Deutscher Kalibrierdienst)
Fabrikate/Serien/Nr. <i>Serial number</i>	38657 + 0002 + 07398	Microtech Gefell calibrates the physical quantities sound pressure and acceleration with factory certificate.
Prüfmittelnummer <i>PM number</i>	-	The standards for sound pressure and reference microphones conform to PTB standards (Physikalisch Technische Bundesanstalt).
Equipmentnummer <i>Equipment number</i>	-	The standards of acceleration and reference accelerometers conform to DKD standards (Deutscher Kalibrierdienst).
Auftraggeber <i>Customer</i>	Umweltamt Dessau 06844 Dessau	
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	zu DK21-028	
Anzahl der Seiten des Zertifikats <i>Number of pages of the certificate</i>	4	
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	14.07.2021	

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung der **Microtech Gefell GmbH** und des Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the **Microtech Gefell GmbH** and its calibration laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Laborleiter <i>Head of laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person responsible</i>
	23.07.2021	Udo Wagner	Stephan Patzer

Microtech Gefell GmbH • Georg-Neumann-Platz • 07926 Gefell • Germany
 info@microtechgefell.de • www.microtechgefell.de • Phone +49 (0) 36649 882-0 • Fax +49 (0) 36649 882-11

MICROTECH GEFELL



microphones & acoustic systems - founded 1928 by Georg Neumann

Kalibrierprotokoll M15-Terzen Werkskalibrierung Factory Calibration	Prot.-Nr.: 0108
	Seite: 2 von 4
Frequenzgang-Kalibrierung Druckkammerverfahren Mikrofonkapsel Kondensatortyp mit Vorverstärker und Schallpegelmessers	

Kalibriergegenstand:

Messmikrofonkapsel Kondensatortyp:	MKS222,	Seriennummer: 38657
Wandlertyp:	kapazitiver Druckempfänger	
Nomineller Druckleerlaufübertragungskoeffizient:	50,0 mV/Pa +/- 1,5 dB (@ 250Hz)	
Frequenzbereich (+/- 2 dB):	0,5 Hz bis 250 Hz (zu prüfender Messbereich)	
Messmikrofonverstärker stromgespeist:	MV212,	Seriennummer: 0002
Schallpegelmessers:	Soundbook MK2_2LG,	Seriennummer: 07398

Kalibrierverfahren:

Das Messmikrofon (Messmikrofonkapsel + Messmikrofonverstärker) des zu kalibrierenden Schallpegelmessers wird zusammen mit dem Referenzmikrofon in der Messkammer für Druckkammermessungen installiert. Die größte Kammerinnenausdehnung ist kleiner als ca. 10% der kleinsten Wellenlänge, die bei der Druckkammermessung an der oberen Grenze des Frequenzbereichs auftritt ($f \leq 250\text{Hz}$). Umgebungsgeräusche werden durch die massive Kammerwand um ca. 40dB gedämpft. Die Messanordnung wird schwingungsisoliert aufgestellt. Über einen elektrodynamischen Lautsprecher wird das Erregersignal eingespeist.

Erregersignal: Sinus 0,5Hz bis 250Hz mit Schrittweite von 1/3-Oktave

Messdauer: jeweils 20sec

Die Kalibrierung erfolgt durch Bestimmung des Frequenzganges von Messmikrofonkapsel mit Messmikrofonvorverstärker und Schallpegelmessers. Die Übertragungsfunktion der zu kalibrierenden Kombination aus Messmikrofonkapsel, Messmikrofonvorverstärker und Schallpegelmessers wird aus dem Vergleich ihres gemessenen Frequenzganges mit dem rückgeführten Frequenzgang des Referenzmikrofons (Frequenzgang des Druckbetriebsübertragungsmaßes) bestimmt.

MICROTECH GEFELL



microphones & acoustic systems - founded 1928 by Georg Neumann

Kalibrierprotokoll M15-Terzen Werkskalibrierung Factory Calibration	Prot.-Nr.: 0108
	Seite: 3 von 4
Frequenzgang-Kalibrierung Druckkammerverfahren Mikrofonkapsel Kondensatortyp mit Vorverstärker und Schallpegelmessers	

Bestandteile der Kalibriereinrichtung:

Messkammer:	MTG	Tiefenmesskammer		
Referenzmesskette:				
Mikrofon:	MTG	Typ:	MK222 mit MV203	S.-Nr.: 26826 S.-Nr.: 0125
Soundbook:	Sinus	Typ:	CF18 Quadro plus G	S.-Nr.: 6128
Frequenzgenerator:	Agilent	Typ:	33210A	S.-Nr.: MY48015289

Kalibrierbedingungen:

Das Messmikrofon des zu kalibrierenden Schallpegelmessers ist in der Druckkammer montiert. Die Druckkammer ist gegenüber der Messumgebung abgedichtet. Die Druckkammer ist mit weichem Dämmmaterial auf einer massiven Arbeitsplatte installiert, um Rückwirkungen der Umgebung weitgehend auszuschließen.

Erregersignal:	Sinus 0,5Hz bis 250Hz mit Schrittweite von 1/3-Oktave
Soundbook:	Analyse - Terzen, L_{Zeq} mit Mittelungszeit = 20s

Umgebungsbedingungen:

Temperatur des Prüflings:	22,5 °C
Relative Luftfeuchtigkeit:	56,2 %
Luftdruck:	948,1 hPa
Speisung:	200V (Polarisationsspannung)

Messergebnisse:

(siehe beiliegender Messschrieb)

Kalibrierintervall (nicht bindende Empfehlung): jährlich

Microtech Gefell GmbH • Georg-Neumann-Platz • 07926 Gefell • Germany
 info@microtechgefell.de • www.microtechgefell.de • Phone +49 (0) 36649 882-0 • Fax +49 (0) 36649 882-11

MICROTECH GEFELL



microphones & acoustic systems - founded 1928 by Georg Neumann

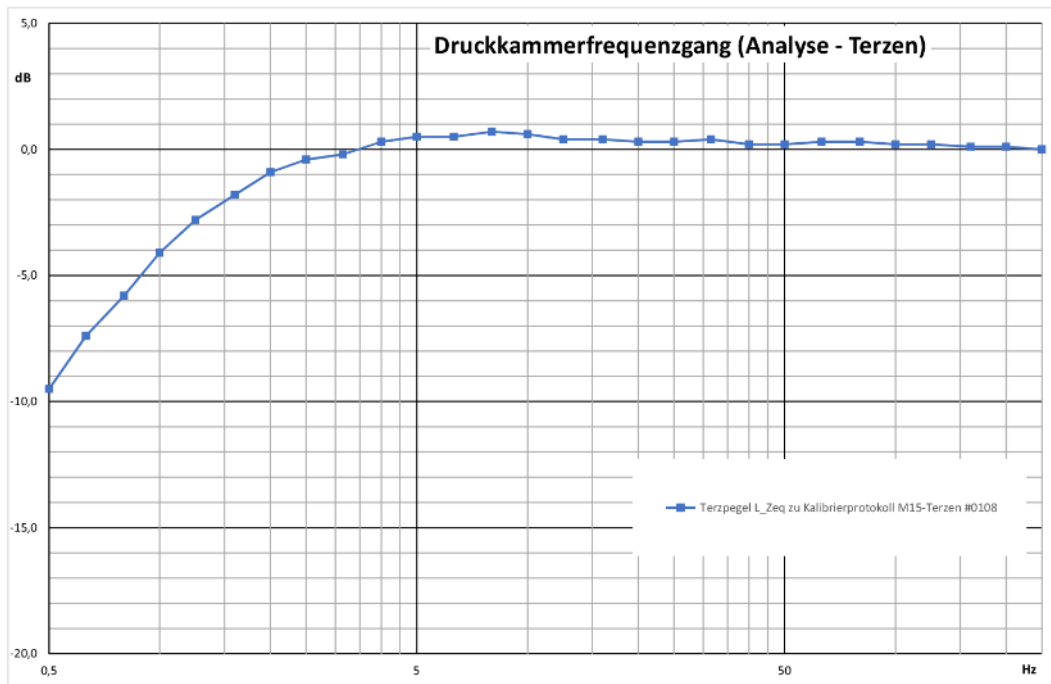
Kalibrierprotokoll M15-Terzen Werkskalibrierung Factory Calibration	Prot.-Nr.: 0108
	Seite: 4 von 4
Frequenzgang-Kalibrierung Druckkammerverfahren Mikrofonkapsel Kondensatortyp mit Vorverstärker und Schallpegelmesser	

Messunsicherheit:

Messunsicherheit: siehe Bemerkung

Bemerkung: siehe Physikalisch-Technische Bundesanstalt bzw. DKD

	Kalibriermittel:	Seriennummer:	kalibriert am:	durch:
Kalibrierschein für	B&K 4180	2787479	13.04.2021	PTB
	mit B&K 2673	2966562		
Kalibrierschein für	MTG MK221	37532	10.03.2020	PTB
	mit MTG MV203	0125		
Kalibrierschein für	MTG MK222	26826	25.06.2015	DKD
	mit MTG MV203	0125		
Kalibrierschein für	B&K 4231	2528549	06.10.2020	PTB
Kalibrierschein für	MTG 4000	30840	07.10.2020	PTB
Kalibrierschein für	MTG 4010	10010	19.04.2021	PTB
Kalibrierschein für	B&K 4228	1742031	06.10.2020	PTB
Kalibrierschein für	MTG 5002	0102	14.05.2020	PTB
Kalibrierschein für	Ahlborn FHAD 46-C2	19080150 & 11708263	04.09.2019	DKD
Kalibrierschein für	Agilent 33210A	MY48015289	07.08.2019	DKD



Quelle: eigene Darstellung, deBAKOM GmbH

Abbildung 133 Kalibrierschein Messsystem deBAKOM



Werkskalibrierschein


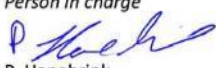
Calibration certificate

Kalibrierschein-Nr.: 25040/20

Certificate-No.:

Gegenstand <i>Object</i>	Schallpegelmesser mit Außenmikrofon	Die Kalibrierung erfolgt durch Vergleich mit Bezugsnormalen bzw. Bezugsnormalmesseinrichtungen, die kalibriert und damit rückgeführt sind auf die nationalen Normale, mit denen die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) die physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darstellt. Für die Kalibrierung und deren Dokumentation trägt der Aussteller dieses Kalibrierscheins die alleinige Verantwortung. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
Hersteller <i>Manufacturer</i>	deBAKOM	
Typ <i>Type</i>	ImmSound Measurement System	
Serien-Nr. <i>Serial number</i>	1406335	
Ident-Nr. <i>Ident No.</i>	---	
Auftraggeber <i>Customer</i>	deBAKOM Gesellschaft für sensorische Messtechnik mbH Bergstraße 36 51519 Odenthal	
Anzahl der Seiten <i>Number of pages</i>	3	
Kalibrierdatum <i>Date of Calibration</i>	24.09.2020	The calibration is performed by comparison with reference standards or standard measuring equipment which are calibrated and thus traceable to the national measurement standards maintained by the PTB for the realization of the physical units according to the International System of Units (SI). The issuing company is solely responsible for the performance and the documentation of the calibration. The user is obliged to have the

Auswertung *Evaluation*

Datum <i>Date</i>	Leiter des Kalibrierlaboratoriums <i>Head of the calibration laboratory</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
24.09.2020	 W. Thomann	 P. Hanebrink

Norsonic-Tippkemper GmbH
Zum Kreuzweg 12
59302 Oelde

Telefon: 02529 / 9301-0
Telefax: 02529 / 9301-49
E-Mail: tippkemper@norsonic.de



1. Verwendete Messgeräte

Referenzmikrofon Typ:	B&K 4180	Seriennr.:	2564071	Kalibrierscheinnr.:	PTB-1.61-4099091/19
Generator Typ:	Standfort DS360	Seriennr.:	149069	Kalibrierscheinnr.:	25024/20
Calibration unit Typ:	Norsonic 483B	Seriennr.:	25750	Kalibrierscheinnr.:	24052/19
Voltmeter Typ:	Keysight 34401A	Seriennr.:	SG53001511	Kalibrierscheinnr.:	1-11111939237-1
Tieftonkuppler Typ:	G.R.A.S. 42AE	Seriennr.:	95644		

2. Kalibriergegenstand

Messmikrofon Typ:	B&K 4189	Seriennr.:	2564071
Impedanzwandler Typ:	B&K 2669-C-001	Seriennr.:	2745477
Wetterschutzmodul Typ:	B&K 4198	Seriennr.:	1946369
Schallpegelmesser Typ:	ImmSound Measurement System V2.0.1	Seriennr.:	1406335
Kabel Typ:	B&K-AO0414-D-100-2018W05		

3. Kalibrierverfahren

Zur Bestimmung des Tieftonfrequenzganges der gesamten Messkette bestehend aus dem Mikrofon Typ B&K 4189, dem Impedanzwandler Typ 2669-C-001 und dem Messsystem ImmSound Measurement System wurde das Mikrofon in einem Tieftonkuppler montiert. Mit einem Adapter wird die Entlüftung des Mikrofons in den Kuppler geführt. Vor der Messung wird über die Insert-Voltage Messung die Vorverstärkerdämpfung des Referenzmikrofons gemessen. Die Anzeige des Schallpegelmessers wird so direkt auf das Referenzmikrofon bezogen.

4. Messbedingungen

Die Messeinrichtung wurde mindestens eine Stunde vor Messbeginn aufgebaut und in Betrieb genommen, um eine ausreichende Stabilisierungszeit zu erhalten.

Umgebungsbedingungen zur Zeit der Messung

Temperatur:	24,5 °C
rel. Luftfeuchtigkeit:	33 %
Luftdruck:	986,54 hPa

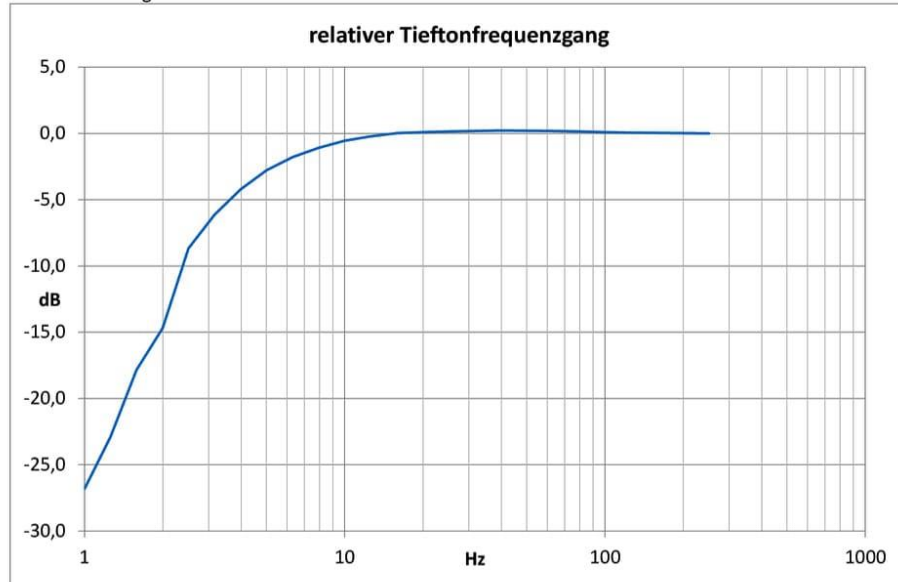
5. Messergebnisse auf Umgebungsbedingungen bezogen

Angabe des relativen Frequenzganges der gesamten Messkette auf 250 Hz bezogen.

Numerische Werte

Frequenz	Pegel	Frequenz	Pegel
dB	dB	dB	dB
1,000	-26,8	19,95	0,1
1,259	-22,9	25,12	0,2
1,585	-17,8	31,62	0,2
1,995	-14,7	39,81	0,2
2,512	-8,7	50,12	0,2
3,162	-6,1	63,10	0,2
3,981	-4,2	79,43	0,1
5,012	-2,8	100,0	0,1
6,310	-1,8	125,9	0,1
7,943	-1,1	158,5	0,0
10,00	-0,6	199,5	0,0
12,59	-0,2	251,2	0,0
15,85	0,0		

Grafische Anzeige



F.2 Auswertung der Messungen aus Bodenplatte

F.2.1 Messzeiten

Es wurden alle Zeiten zwischen 23 und 5 Uhr berücksichtigt, in denen es nicht geregnet hat, und in denen der Wind auf 6m Höhe kleiner als 6m pro Sekunde war.

Äquivalenzpegel wurden jeweils für 1-Minuten-Intervalle gebildet.

F.2.2 G-Bewertung und Hörschwelle

Das Verhältnis eines G-bewerteten Pegels zur Hörschwelle hängt von der Frequenz des Tons ab.

Bei 20Hz erhöht die G-Bewertung den Pegel um 9dB, die DIN 45680 (Beuth 1997) Hörschwelle liegt bei 71dB, also muss die G-Bewertung für einen Ton bei 20Hz über 80dB liegen, um über der Hörschwelle zu sein. Bei 25Hz ergibt sich entsprechend $3,7\text{dB} + 63\text{dB} = 66,7\text{dB}$, bei 31,5Hz $-4,0\text{dB} + 55\text{dB} = 51\text{dB}$.

F.2.3 Frequenzbänder

Die Bänder

- ▶ $L_{Zeq,<3\text{Hz}}$ sehr tiefe Frequenzen
- ▶ $L_{Zeq,4-7\text{Hz}}$ der erweiterte Infrasschallbereich
- ▶ $L_{Zeq,8-20\text{Hz}}$ der klassische Infrasschallbereich
- ▶ $L_{Zeq,25-80\text{Hz}}$ tiefe Frequenz oberhalb des Infrasschallbereichs

werden durch Summierung der entsprechenden Terzbänder gebildet.

Da die A-Bewertung für sehr tiefe Frequenzen ungeeignet ist, wird keine Frequenzbewertung angewendet, bzw. die Z-Bewertung (IEC 61672-1) genutzt, die bei allen Frequenzen gleich Null ist.

F.2.4 Bestimmung der Drehzahl der WEA in Abschnitt 5.4.2

In Abschnitt 5.4.2 ist ein Linienspektrum für einen Zeitausschnitt der Messung im UG5 dargestellt.

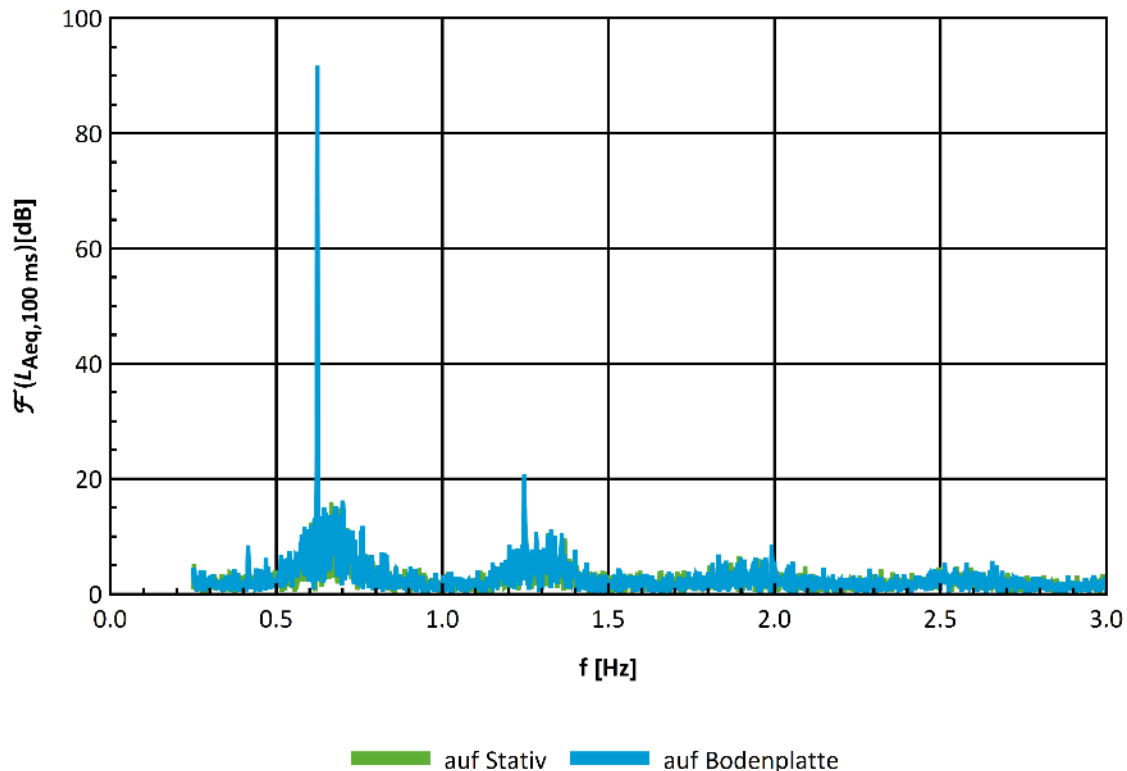
Im UG5 stehen keine Betriebsdaten der WEA zur Verfügung, ein Abgleich der Drehzahlen der WEA mit den Frequenzen der Linien im Spektrum ist nicht möglich, deshalb muss die Drehzahl akustisch bestimmt werden. Wenn die gleiche WEA, die das Infrasschallspektrum verursacht, auch Amplitudenmodulationen verursacht, dann kann ihre Drehzahl über die Frequenz der Amplitudenmodulationen bestimmt werden (vgl. Abschnitte 4.4 und C.1).

Abbildung 134 zeigt die Fouriertransformierte der $L_{Aeq,100\text{ms}}$ in dem Zeitausschnitt. Das der Drehzahl der WEA entsprechend Maximum ist sehr deutlich erkennbar.

In dem UG5 steht eine Vielzahl an WEA, die Immissionen am Messort verursachen. Ob die Immissionen im gewählten Zeitausschnitt von genau einer Anlage verursacht wurden, oder ob mehrere Anlagen mit genau der gleichen Drehzahl liefen, ist nicht unterscheidbar. Da die

Frequenzbestimmung so scharf ist, wären WEA als Quelle auch dann nachgewiesen, wenn die AM durch die eine Anlage und der Infraschall durch die andere Anlage verursacht würde.

Abbildung 134: Fouriertransformierte der $L_{Aeq,100ms}$



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

F.3 Vergleich Messungen mit Klasse 1 Mikrophon auf Stativ und Infraschallmikrophon auf Bodenplatte

Bei den UG1 bis 4 wurde nur mit einem Klasse 1-Mikrofon auf Stativ gemessen. Das hat für Infraschalluntersuchungen den Nachteil, dass die Empfindlichkeit des Mikrofons bei sehr kleinen Frequenzen deutlich nachlässt – also durch die Messanlage als kleiner bestimmt werden, als sie tatsächlich sind – und, dass das Mikrofon durch die größere Höhe mehr Wind und Turbulenzen ausgesetzt ist, die zu Signalen am Mikrofon führen können, die nicht durch die WEA verursacht werden.

Um dennoch eine Abschätzung der Infraschallpegel auch in den UG 1 bis 4 durchzuführen, wurden die beiden Messsysteme Infraschallmikrophon auf einer Bodenplatte und Klasse-1-Mikrofon auf einem Stativ umfangreich miteinander verglichen. Für den Vergleich dienten die ca. 8-wöchigen Langzeitmessungen im UG 5. In UG 5 konnten beide Messsysteme für den gesamten Messzeitraum simultan eingesetzt und betrieben werden. Zusätzlich wurden beide Messsysteme unter Laborbedingungen miteinander verglichen.

F.3.1 Einfluss von lokalem Wind auf Messergebnisse

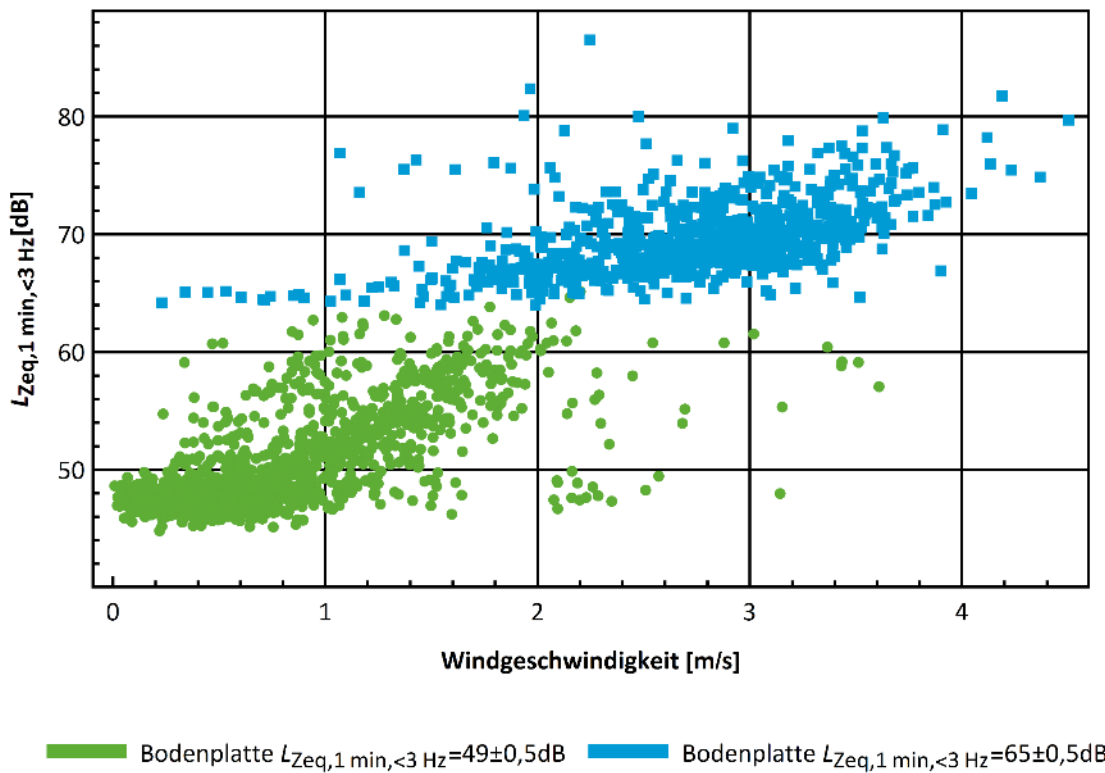
Bei Windgeschwindigkeiten bis 6 m/s im Bereich des Mikrofons entstehen praktisch keine Windgeräusche im Frequenzbereich des Hörschalls bzw. tragen kaum zu einem A-bewerteten Pegel bei. Bei höheren Windgeschwindigkeiten entstehen Geräusche direkt am Mikrofon, weil die Luftströmung verwirbelt wird. Um auch bei hohen Windgeschwindigkeiten möglichst wenig Störung durch Windgeräusche zu haben, sind die deBAKOM-Mikrofone mit sekundären Windschirmen ausgestattet.

Bei der Messung sehr tieffrequenter Geräusche ist die Situation etwas anders. Hier spielen Verwirbelungen in der Atmosphäre, die mit den schwankenden Windfeldern und ihren Turbulenzen zusammenhängen eine größere Rolle. Die hierdurch verursachten Druckschwankungen lassen sich durch Windschirme nicht unterdrücken.

Um den Einfluss durch lokalen Wind auf Messungen mit einem Klasse-1-Mikrofon auf einem Stativ und Messungen mit einem Infrashallmikrofon auf Bodenplatte zu untersuchen, wurden Messzeiten ausgewählt, in denen der Pegel auf der Bodenplatte in einem kleinen Zeitfenster lag. Dann wurden die zeitgleich gemessenen Pegel auf dem Stativ für diese Zeitausschnitte gegen die lokale Windgeschwindigkeit auf Höhe des Mikrofons auf Stativ aufgetragen. In den Abbildungen 124 bis 127 sind diese Pegel für vier Frequenzbänder und jeweils für zwei konstante Pegel auf der Bodenplatte dargestellt. Ohne Windeinfluss würden idealerweise alle Punkte auf horizontalen Linien liegen. Tatsächlich lässt sich die Tendenz erkennen, dass mit zunehmendem lokalem Wind der Pegel steigt. Da gleichzeitig der auf der Bodenplatte gemessene Pegel konstant ist, ist dies ein klares Indiz dafür, dass der lokale Wind zu einer Störung der Messung und zu großen Pegeln führt.

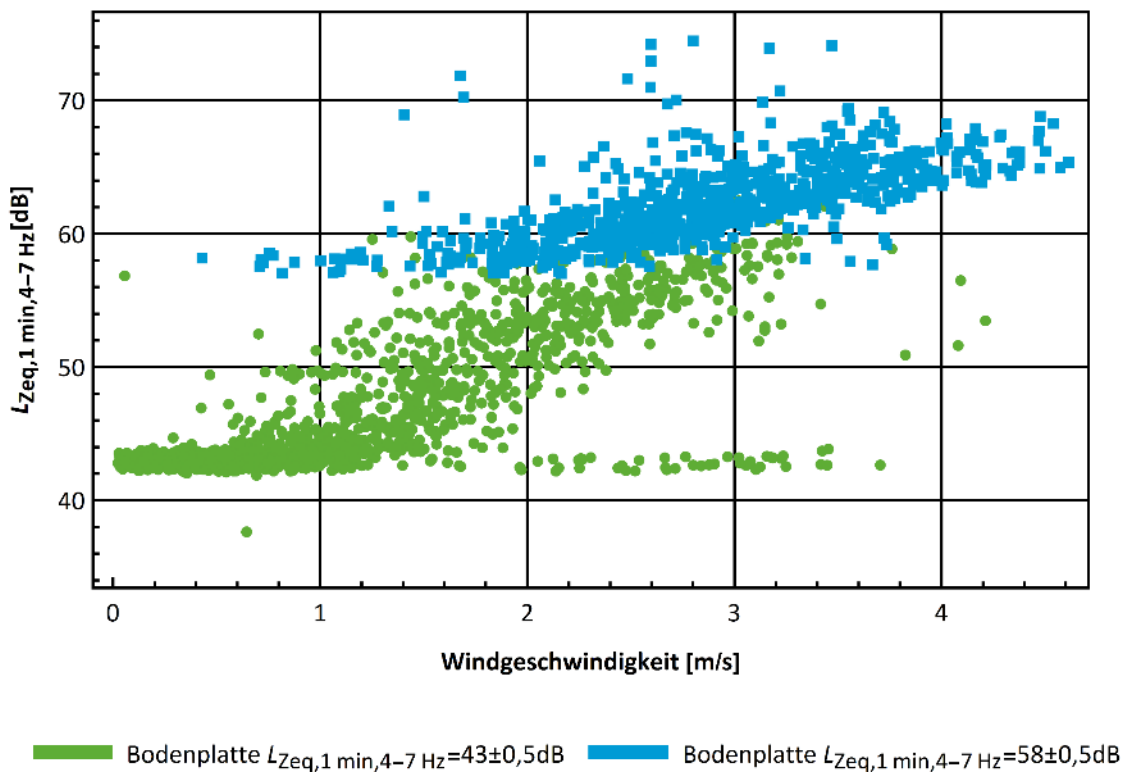
In Abbildung 127 ist der Pegel für das Frequenzband 25-80 Hz dargestellt. In diesem Frequenzbereich ist die Abhängigkeit von der lokalen Windgeschwindigkeit bis 3 m/s klein. Der Einfluss lokalen Winds auf das Messergebnis ist also vor allem bei sehr tiefen Frequenzen problematisch. Um dennoch auch in diesem Frequenzbereich Messungen mit dem Mikrofon auf dem Stativ durchführen zu können, kann zu lokaler Windstille extrapoliert werden. Als Beispiel sind in Abbildung 128 L_{Geq} -Pegel für Zeiten aufgetragen, in denen die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe im Bereich 6-8 m/s lag. Es ist erkennbar, dass die Pegel mit der lokalen Windgeschwindigkeit steigen. Hierzu wurde die lokalen Windgeschwindigkeiten in Intervalle aufgeteilt. In jedem Intervall wurden die unteren Datenpunkte als Basis für eine Extrapolation zu lokaler Windgeschwindigkeit Null durchgeführt.

Abbildung 135: $L_{Zeq,1min,<3Hz}$ auf Stativ vs. Windgeschwindigkeit für feste $L_{Zeq,1min,<3Hz}$ auf Bodenplatte



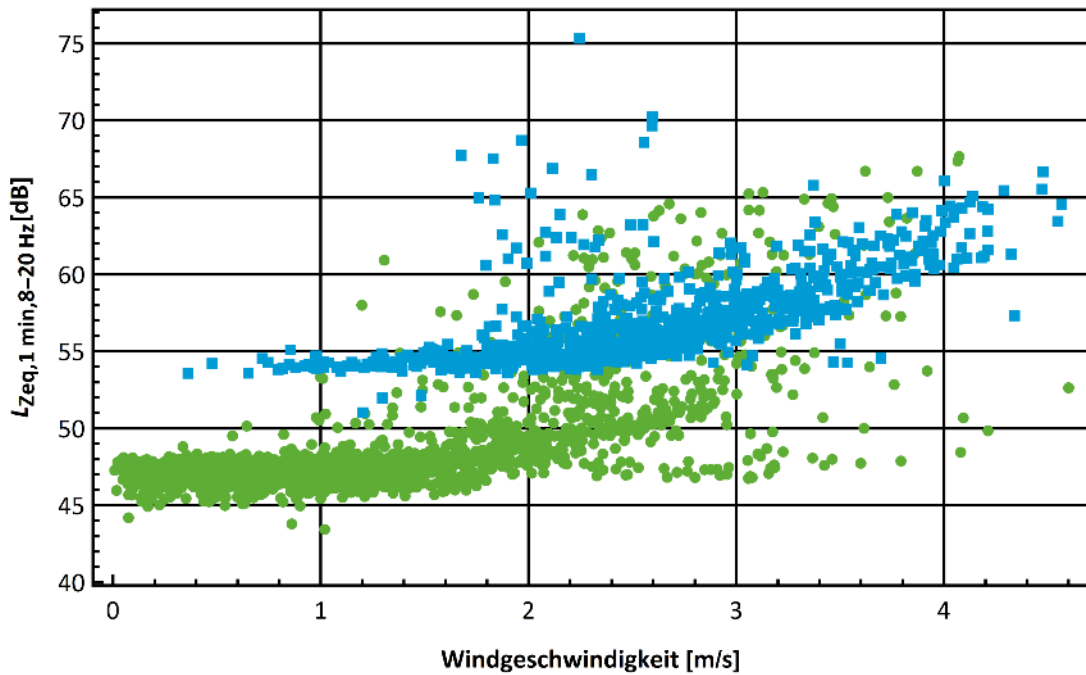
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 136: $L_{Zeq,1min,4-7Hz}$ auf Stativ vs. Windgeschwindigkeit für feste $L_{Zeq,1min,4-7Hz}$ auf Bodenplatte



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

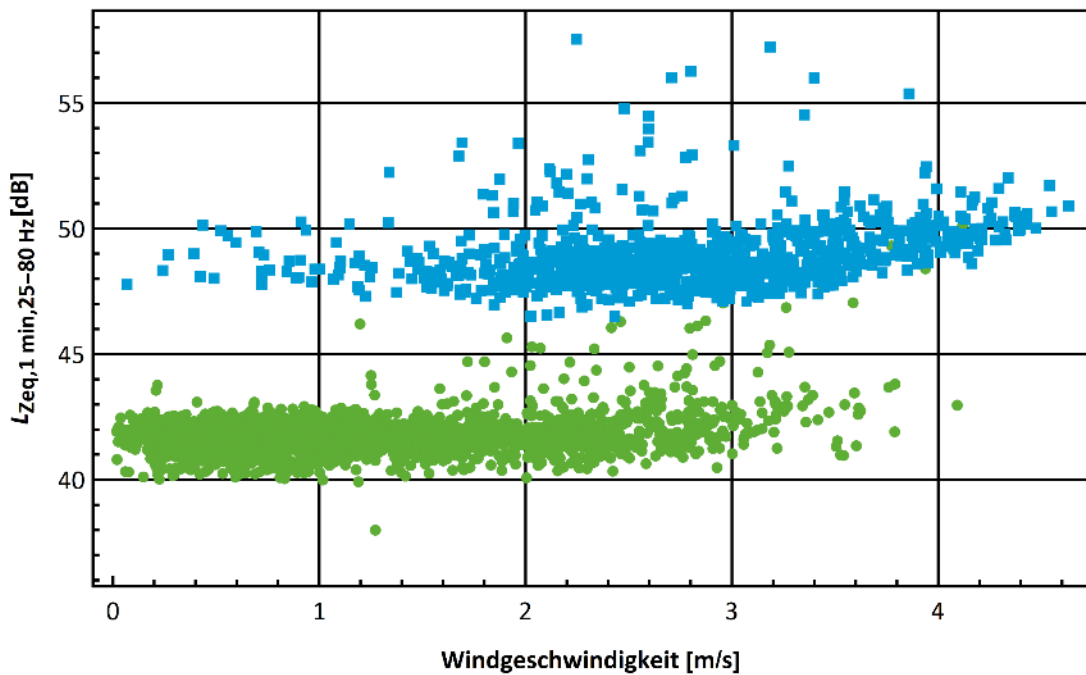
Abbildung 137: $L_{Zeq,1min,8-20Hz}$ auf Stativ vs. Windgeschwindigkeit für feste $L_{Zeq,1min,8-20Hz}$ auf Bodenplatte



■ Bodenplatte $L_{Zeq,1 min,8-20 Hz}=48\pm 0,5dB$ ■ Bodenplatte $L_{Zeq,1 min,8-20 Hz}=55\pm 0,5dB$

Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 138: $L_{Zeq,1min,25-80Hz}$ auf Stativ vs. Windgeschwindigkeit für feste $L_{Zeq,1min,25-80Hz}$ auf Bodenplatte

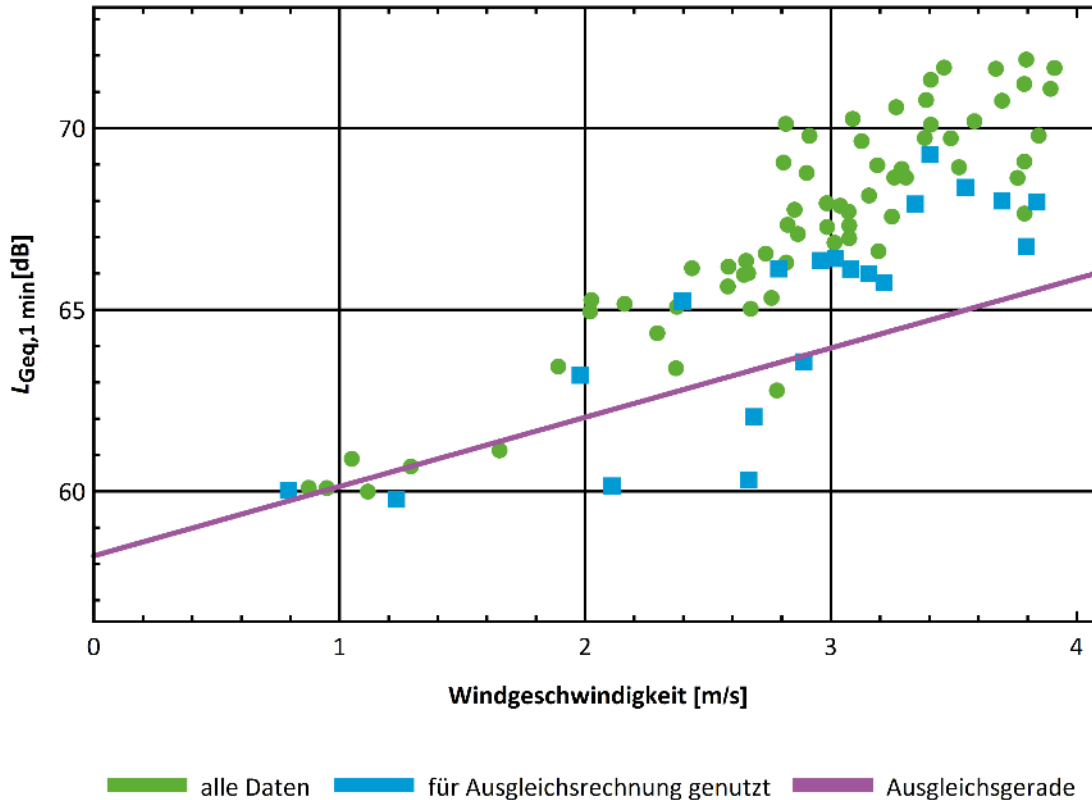


■ Bodenplatte $L_{Zeq,1 min,25-80 Hz}=45\pm 0,5dB$ ■ Bodenplatte $L_{Zeq,1 min,25-80 Hz}=53\pm 0,5dB$

Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 139: $L_{\text{Geq},1\text{min}}$ gegen die Windgeschwindigkeit auf Höhe des Mikrofons

Im UG 2 gemessen und auf Zeiten beschränkt, in denen die Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe der Windenergieanlagen 6-8 m/s ist und die Windenergieanlagen Leistung produziert. Die lokalen Windgeschwindigkeiten wurden in Intervalle aufgeteilt. In jedem Intervall wurden die unteren Datenpunkte als Basis für eine Extrapolation zu lokaler Windgeschwindigkeit Null durchgeführt.



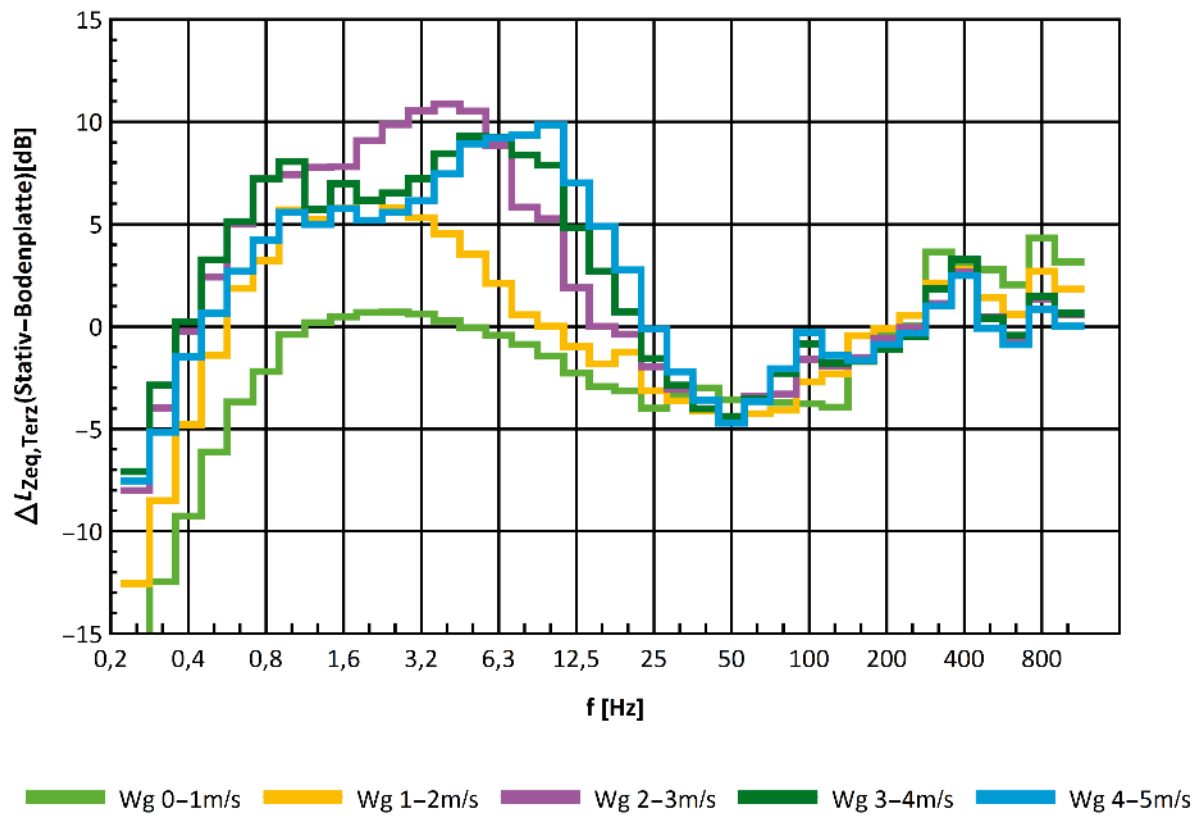
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

F.3.2 Differenzspektren zwischen Messungen auf Bodenplatte und Stativ

Neben dem Einfluss durch lokalen Wind unterscheiden sich die Messungen mit einem Mikrofon auf einem Stativ von denen mit einem Infraschallmikrofon am Boden auch darin, dass bei tiefen Frequenzen das Infraschallmikrofon empfindlicher ist, und dass es auf einer Bodenplatte liegt. Für einen Vergleich der beiden Mikrofone werden jeweils für eine-Minuten-lange Zeitabschnitte die Spektren für beide Mikrofone gebildet und aus der Differenz ein Spektrum bestimmt. In Abbildung 140 ist das 70%-Perzentil des Differenzspektrums als Terzspektrum dargestellt. Dabei ist nach verschiedenen Windgeschwindigkeiten am Mikrofon auf dem Stativ klassiert. Positive Werte bedeuten, dass der Pegel am Mikrofon auf dem Stativ höher ist und negative Werte, dass an der Bodenplatte höhere Pegel gemessen wurden.

Wie zu erwarten, wirkt sich der lokale Wind deutlich auf die Form des Differenzspektrums aus. Aber auch für die Zeiten mit lokalen Windgeschwindigkeiten kleiner 1m/s ist eine Frequenzabhängigkeit der Differenzfunktion von mehreren dB zu erkennen. Bei kleinen Frequenzen ist zu sehen, dass die Empfindlichkeit des Infraschallmikrofons höher ist als die des Klasse-1-Mikrofons. Das Differenzspektrum ist hier negativ.

Abbildung 140: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte) vs Windgeschwindigkeit



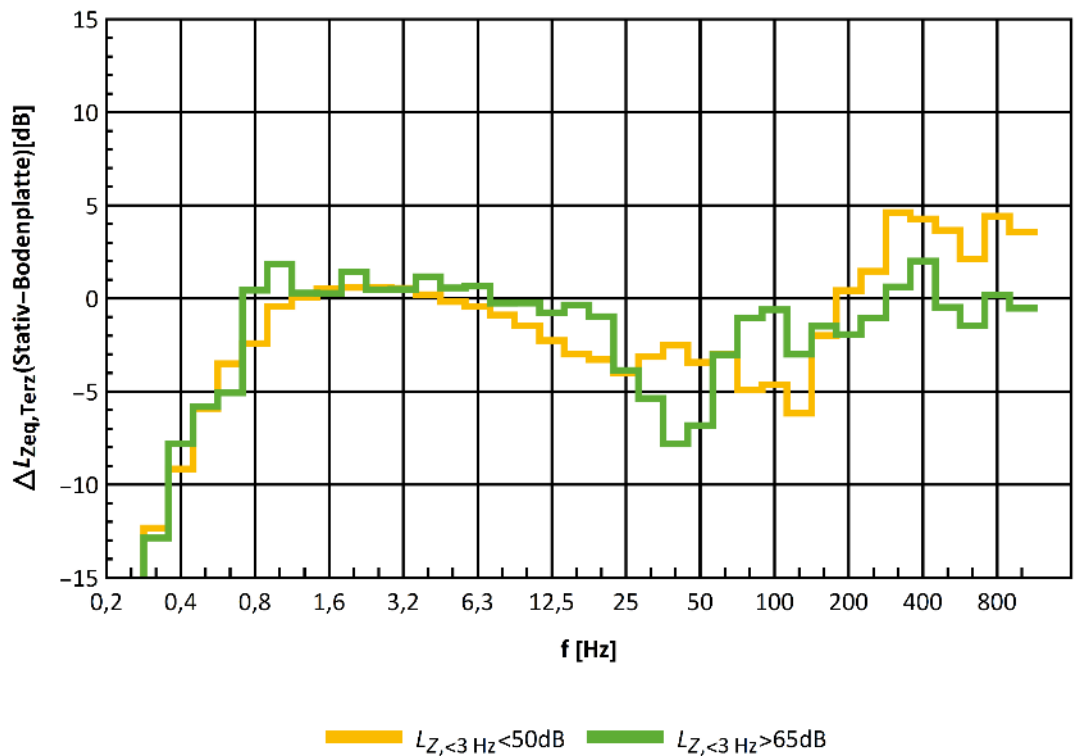
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

F.3.3 Weitere Differenzspektren bei Anwendung verschiedener Mikrofone

Im Rahmen des Vergleichs des Klasse-1-Mikrofons auf einem Stativ mit dem Infraschallmikrofon am Boden wurden für eine vertiefende Analyse verschiedene Differenzspektren erstellt. In Abbildung 141 und Abbildung 142 sind die Differenzspektren nach dem Pegel $L_{Z_{eq}, <3\text{Hz}}$ auf der Bodenplatte klassiert. Bei sehr kleiner lokaler Windgeschwindigkeit (Abbildung 141) ist die Transferfunktion kaum abhängig vom Pegel. In Abbildung 142 sieht man bei etwas größerer lokaler Windgeschwindigkeit, dass die Spektren bei kleinen Pegeln empfindlicher auf Wind reagieren als bei großen Pegeln. Die durch Wind verursachten Beiträge sind also energetisch additiv zu dem tatsächlichen vorhandenen Infraschall, und wirken nicht pauschal verstärkend.

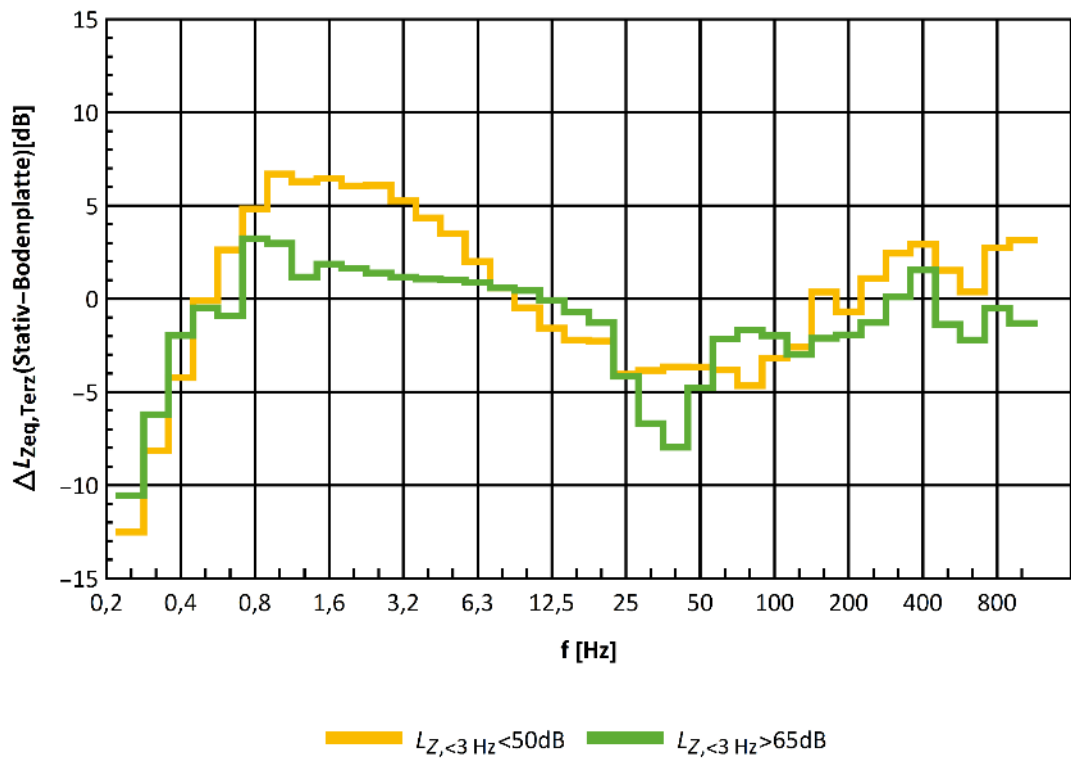
In den Abbildung 143 bis Abbildung 147 sind verschiedene Perzentile der Differenzspektren für verschiedene lokale Windgeschwindigkeitsklassen dargestellt.

Abbildung 141: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte) für kleine und große Pegel bei 0-1m/s Windgeschwindigkeit



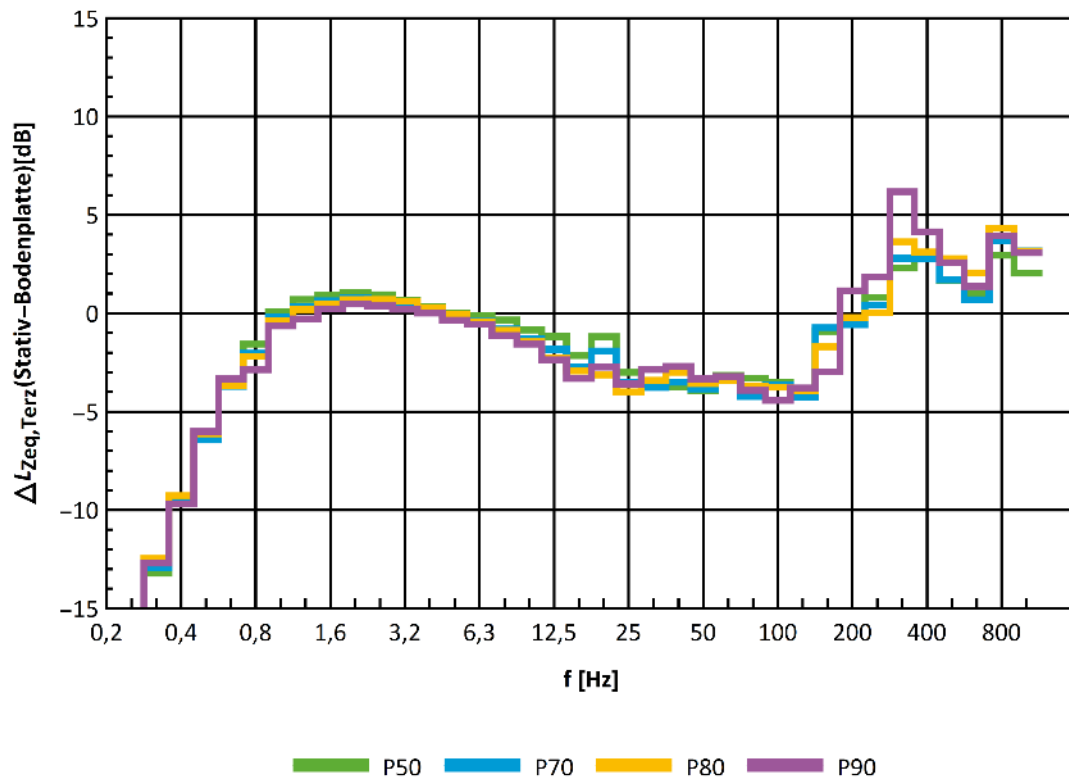
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 142: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte) für kleine und große Pegel bei 1-2 m/s Windgeschwindigkeit



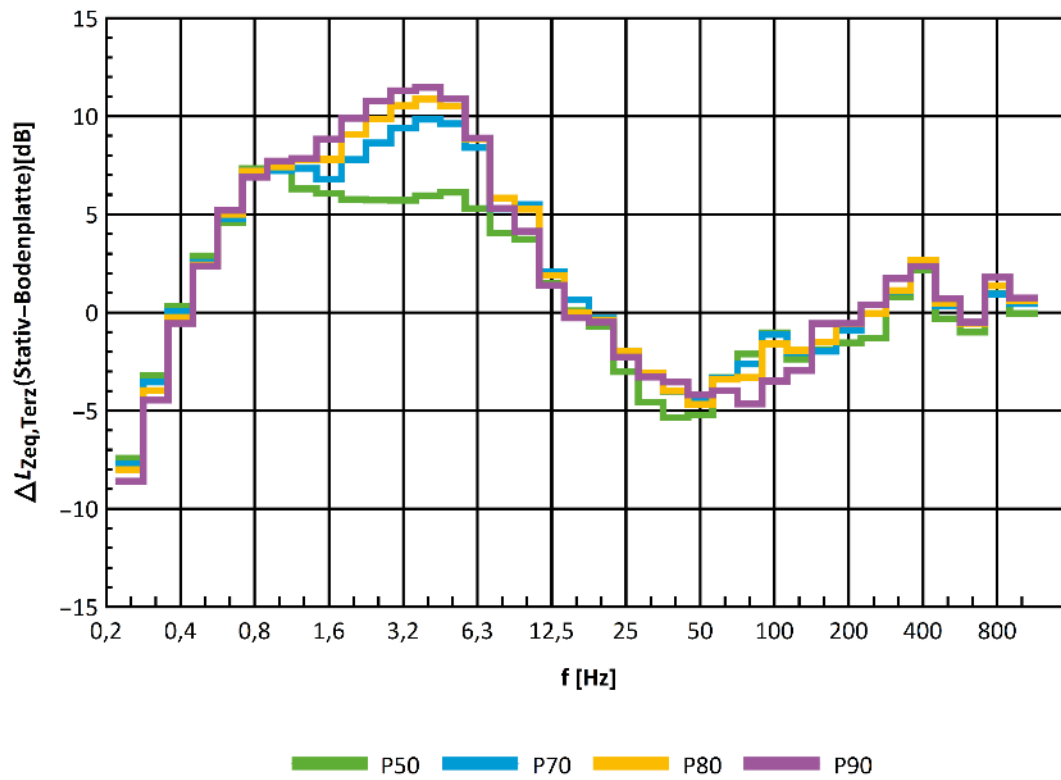
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 143: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 0-1 m/s



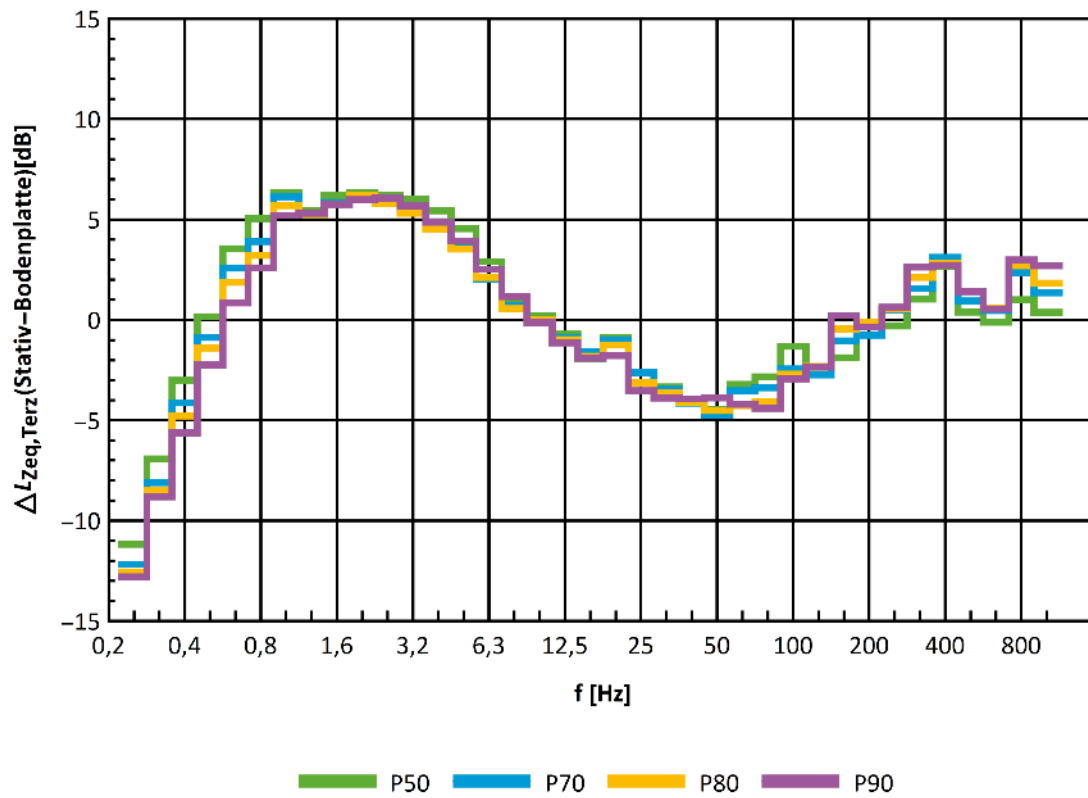
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 144: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 1-2 m/s



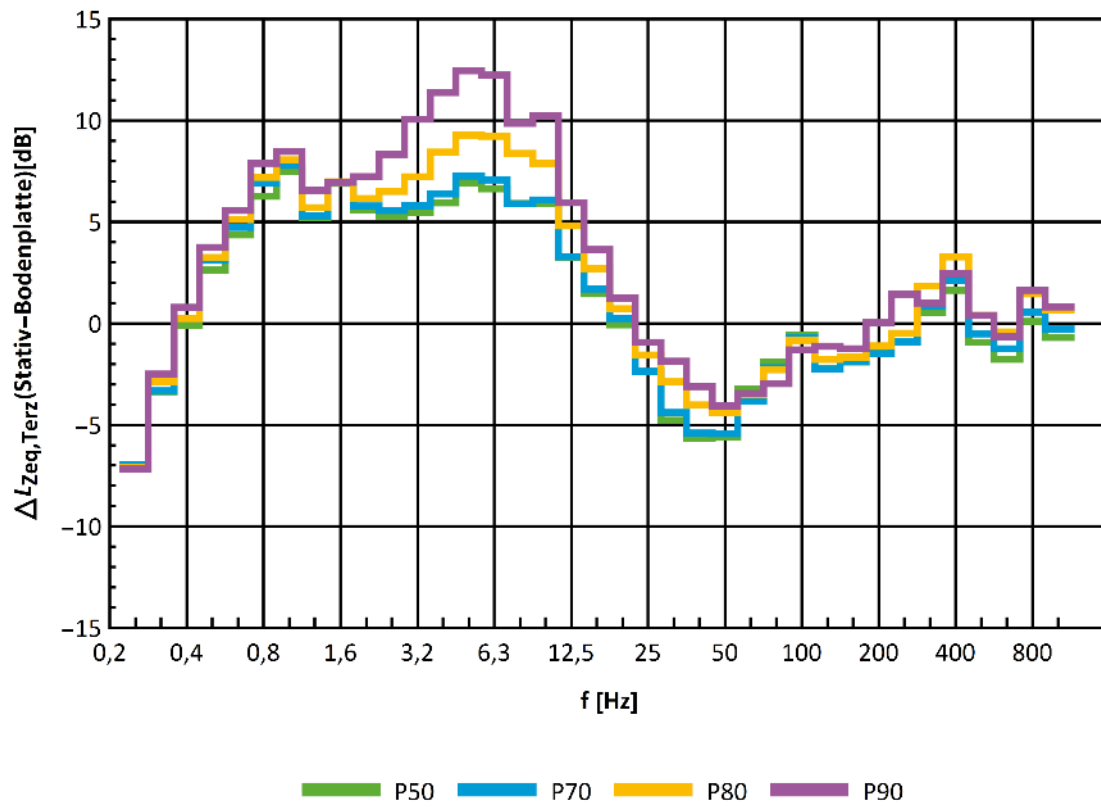
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 145: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 2-3 m/s



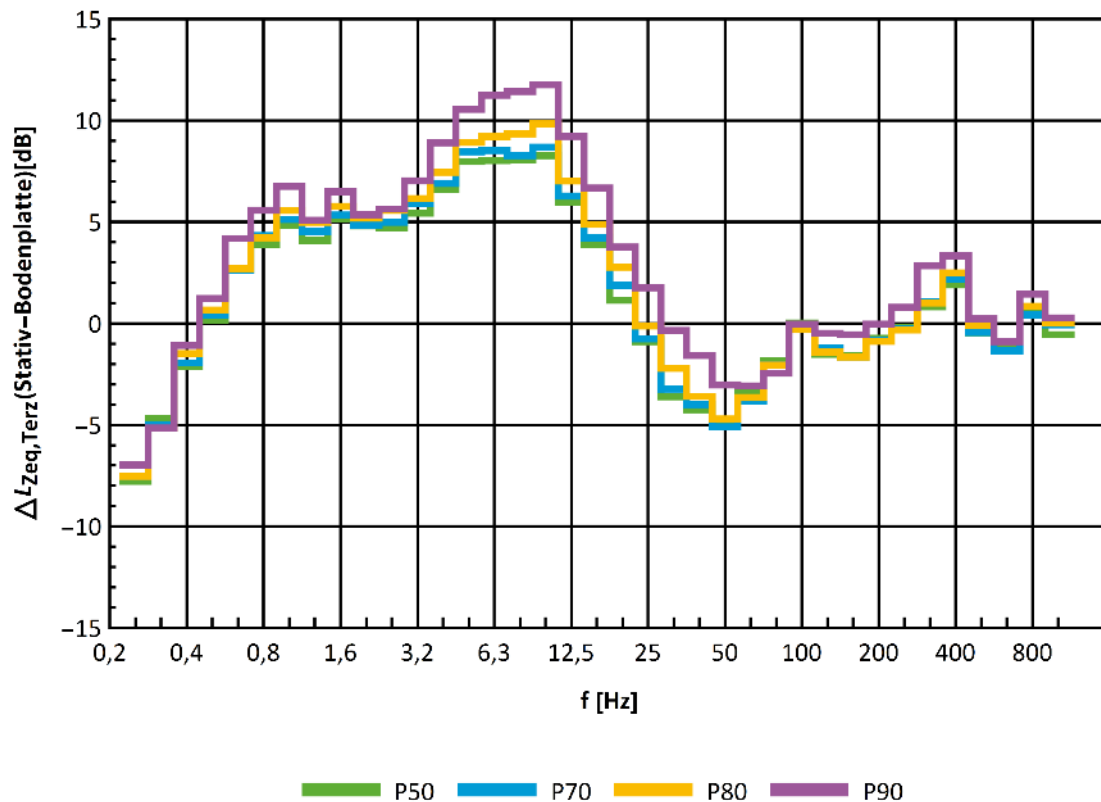
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 146: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 3-4 m/s



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 147: Differenzspektrum (Stativ-Bodenplatte), Windgeschwindigkeit 4-5 m/s



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

F.3.4 Unsicherheiten und Vertrauensbereiche

Zur Bestimmung des Frequenzgangs der Messung mit Klasse-1-Mikrophon auf Stativ bieten sich zwei Wege an, deren Ergebnis in Abbildung 148 dargestellt ist:

- ▶ Auf Basis der Vergleichsmessungen mit dem Infraschallmikrofon auf der Bodenplatte.

Es kann der Vergleich der Parallelmessungen mit Klasse-1-Mikrophon auf Stativ und Infraschallmikrofon auf Bodenplatte im UG5 herangezogen werden. Der Frequenzgang des Infraschallmikrofons ist aus der Druckkammermessung bekannt, zusätzlich kann das Differenzspektrum für kleinste Windstärken aus Abbildung 52 (oder eines der anderen Perzentile in Abbildung 143) wie eine Übertragungsfunktion genutzt werden.

- ▶ Auf Basis der Druckkammermessung des Klasse 1 Mikrofons.

Ein zweiter Weg zur Berücksichtigung des Frequenzgangs des Klasse-1-Mikrofons auf dem Stativ ist die Nutzung des Ergebnisses der Druckkammermessung (siehe Anhang F.1.2).

In Abbildung 148 sind die Ergebnisse für den möglichen Frequenzgang mit beiden Wegen dargestellt. Offensichtlich besteht ein erheblicher Unterschied zwischen den über die beiden Wege bestimmten Frequenzgängen. Aus dieser Diskrepanz ergibt sich eine Erweiterung des

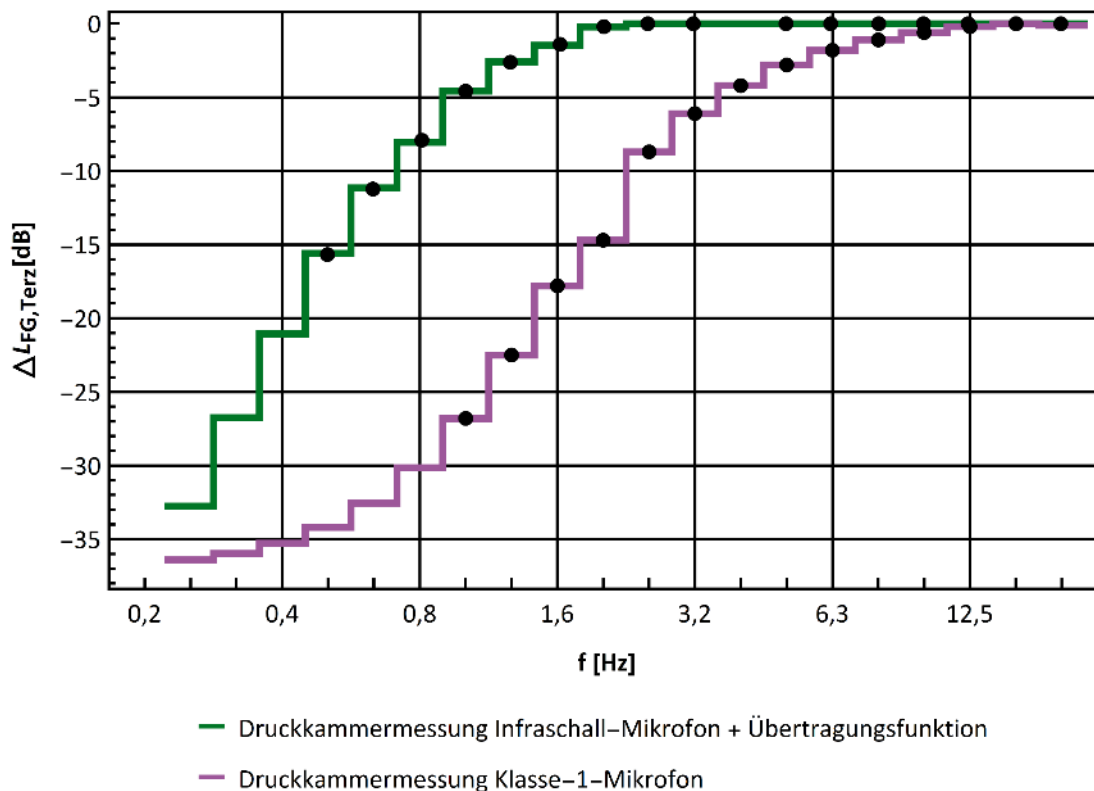
Vertrauensbereichs für Messergebnisse mit dem Klasse-1-Mikrofon, die in Abbildung 149 dargestellt ist.

Da die Ursache für die Diskrepanz zwischen den beiden Wegen für den Frequenzgang des Klasse-1-Mikrofons ungeklärt ist, muss eine entsprechende Unsicherheit auch für die Messung auf der Bodenplatte angenommen werden. Die entsprechenden Vertrauensbereiche sind in Abbildung 150 dargestellt.

Da für die kleinsten Frequenzbänder keine Tieftonkalibrierung vorliegt, und die Frequenzgänge nur extrapoliert sind, sind die Angaben zu Vertrauensbereichen für Frequenzen unter 1 Hz nur grobe Anhaltswerte.

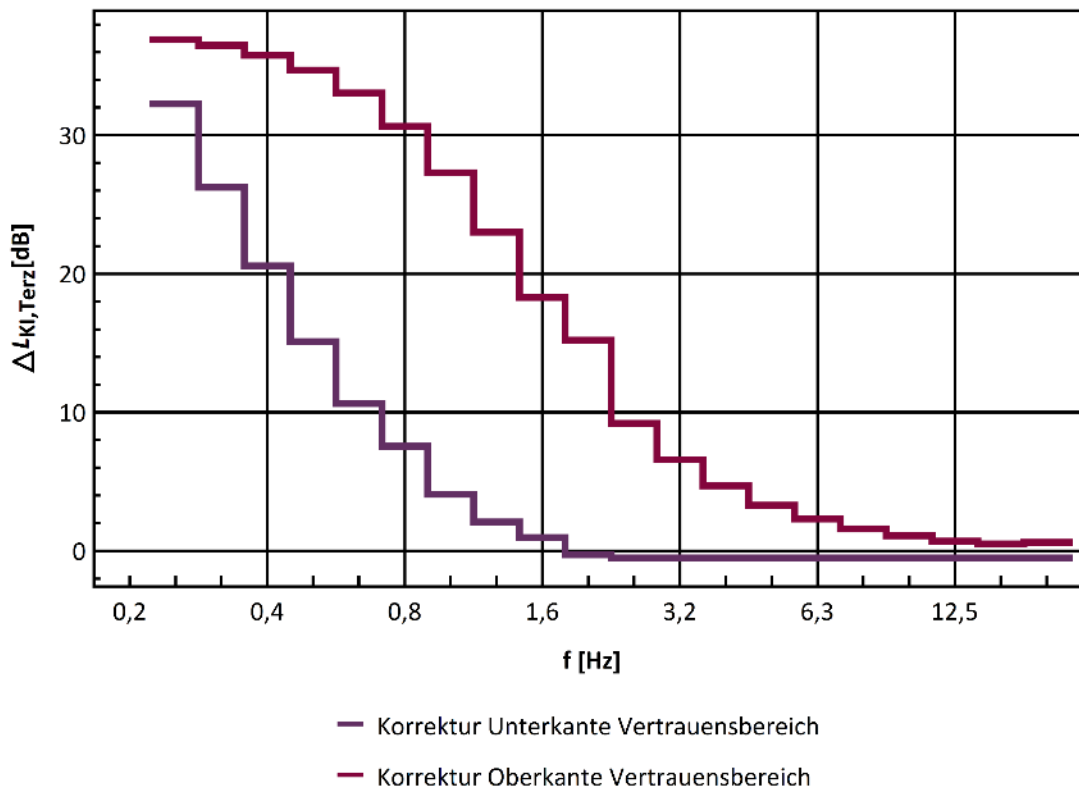
Abbildung 148: Effektiver Frequenzgang Klasse-1-Mikrofon auf Stativ

Für Terzen mit schwarzem Punkt liegen Daten aus Druckkammermessungen vor, Terzen ohne schwarzen Punkt sind extrapoliert.



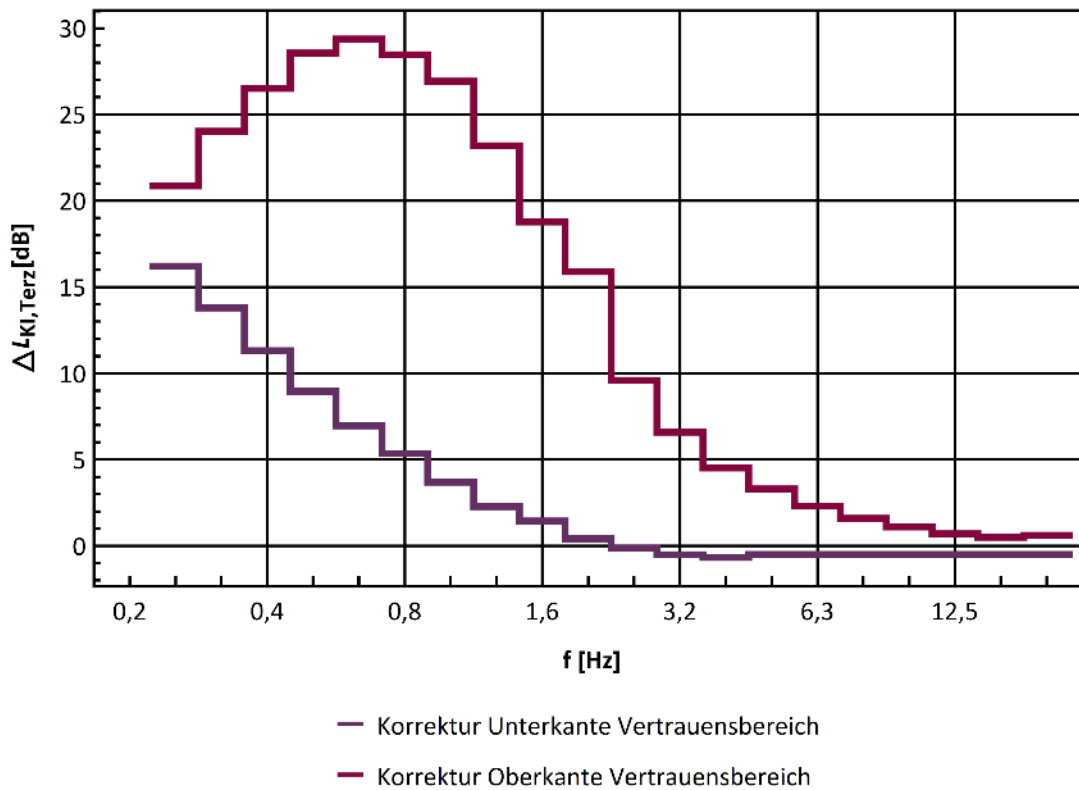
Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 149: Vertrauensbereich Klasse-1-Mikrofon auf Stativ



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH

Abbildung 150: Vertrauensbereich Infraschallmikrofon auf Bodenplatte



Quelle: eigene Darstellung, Dr. Kühner GmbH