

BACHELORARBEIT

Untersuchung der frequenzabhängigen Schallausbreitung bei Windenergieanlagen

vorgelegt am 10. November 2025
Simon Karl Jablonka
Matrikel-Nr.: XXXXXXXXXX

Erstprüferin: Dr.-Ing. Dagmar Rokita
Zweitprüfer: Dr. Rasmus Fischer (TÜV NORD)

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Umwelttechnik
Ulmenliet 20
21033 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	7
1.1 Motivation / Aufgabenstellung	8
2 Grundlagen zum Schall.....	9
2.1 Definition von Schall	9
2.2 Frequenzbereiche	9
2.3 Grundgrößen und Pegel	10
3 Wahrnehmung und Bewertung von Schall	12
3.1 Wahrnehmung von Schall.....	12
3.2 Rechtlicher Rahmen und Bewertung	13
4 Schallausbreitung im Freien	16
4.1 Geometrische Dämpfung von Schall bei seiner Ausbreitung	16
4.2 Geometrische Ausbreitung.....	17
4.3 Atmosphärische Absorption.....	18
4.4 Bodeneffekte	19
4.5 Abschirmung durch Hindernisse.....	20
5 Windenergieanlagen als Schallquelle	21
5.1 Aerodynamische Geräusche.....	21
5.2 Mechanische Geräusche.....	22
5.3 Schallemissionen von Windenergieanlagen.....	22
6 Prognoseverfahren für Windenergieanlagen	24
6.1 Standardverfahren nach DIN ISO 9613-2.....	24
6.2 Alternatives Verfahren nach DIN ISO 9613-2.....	25
6.3 Interimsverfahren	25
7 Modellierung	27
7.1 Grundlagen von WindPRO	27
7.2 Anwendung von WindPRO	29
8 Praxisbeispiel.....	31
8.1 Standortbeschreibung und Annahmen	31
8.2 Ergebnisse	33
8.3 Bewertung.....	37
9 Versuche mit einer WEA.....	38
9.1 Versuch I - Vorgehen und Annahmen	38

9.2	Ergebnis und Bewertung.....	39
10	Überholende Isophonen.....	41
10.1	Vorgehen und Annahmen	41
10.2	Versuch II – Änderung einzelner Oktavbänder im tieffrequenten Bereich.....	43
10.2.1	Hypothese.....	43
10.2.2	Ergebnisse	44
10.2.3	Bewertung	45
10.3	Versuch III – Änderung einzelner Oktavbänder im hochfrequenten Bereich.....	47
10.3.1	Hypothese.....	47
10.3.2	Ergebnisse	48
10.3.3	Bewertung	49
10.4	Versuch IV – Kompensation der Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz.....	51
10.4.1	Hypothese.....	52
10.4.2	Ergebnisse	52
10.4.3	Bewertung	56
10.4.4	Bewertung - Doppelte Überholung	57
10.4.5	Bewertung – Ort der Überholung nach der 25 dB(A) Isophone	62
10.5	Versuch V – Früheres Auftreten einer Überholung	64
10.5.1	Hypothese.....	65
10.5.2	Ergebnisse	65
10.5.3	Bewertung	67
11	Zusammenfassung und Fazit	69
11.1	Fragestellung.....	69
11.2	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	69
11.3	Fazit und Ausblick	71
	Literaturverzeichnis.....	73
	Anhang A: Rechnungen zum Praxisbeispiel	75
	Anhang B: Berechnungen zu Versuch II.....	76
	Anhang C: Berechnungen zu Versuch III	78
	Anhang D: Berechnungen zu Versuch IV	80
	Anhang E: Berechnungen für die doppelte Überholung	82
	Anhang F: Berechnungen für den Ort der Überholung nach der 25 dB(A) Isophone.....	83
	Anhang G: Berechnungen zu Versuch V	84

Abkürzungsverzeichnis

DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	Internationale Organisation für Normung
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
WEA	Windenergieanlage
GG	Grundgesetz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
4. BImSchV	Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetz
IP	Immissionspunkt

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hörfläche des menschlichen Ohres	10
Abbildung 2: Gegenüberstellung von Lautstärkepegel, Lautheit, Schalldruckpegel, Schalldruck und Schallintensität für 1000 Hz Standardschall.....	13
Abbildung 3: Schallabstrahlung von reflektierenden Flächen	17
Abbildung 4: Schallquellen am Rotorblatt	21
Abbildung 5: Das Basismodul mit den vier Funktionsbereichen und deren Module.....	29
Abbildung 6: Benutzeroberfläche WindPRO 4.0	30
Abbildung 7: Isophonen des Zu- und Rückbaus von Windpark I	33
Abbildung 8: Isophonen und Ort der Überholung des Zu- und Rückbaus von Windpark I.....	34
Abbildung 9: Vergleich relativer Anteile am Summenschallleistungspegeln von Windpark I.....	36
Abbildung 10: Schallimmissionen hervorgerufen durch ein tieffrequenzlastige Schallquelle.....	40
Abbildung 11: Schallimmissionen hervorgerufen durch ein mittelfrequenzlastige Schallquelle.....	40
Abbildung 12: Schallimmissionen hervorgerufen durch ein hochfrequenzlastige Schallquelle	40
Abbildung 13: Visuelle Ergebnisse der Modellierung von Versuch II	44
Abbildung 14: Visuelle Ergebnisse der Modellierung von Versuch II vergrößert.....	45
Abbildung 15: Visuelle Ergebnisse der Modellierung von Versuch III	48
Abbildung 16: Visuelle Ergebnisse der Modellierung von Versuch III vergrößert	49
Abbildung 17: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch IV (+0,3 bis +0,6).....	54
Abbildung 18: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch IV (+0,7 bis +1,0).....	54
Abbildung 19: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch IV (+1,0 bis +1,5).....	55
Abbildung 20: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch IV (+1,5 bis +2,0).....	55
Abbildung 21: Visuelle Ergebnisse der unterschiedlichen Kompensationswerte von Zielspektrum +0,6 dB(A).....	59
Abbildung 22: Visuelle Ergebnisse der unterschiedlichen Kompensationswerte von Zielspektrum +0,9 dB(A).....	60
Abbildung 23: Visuelle Ergebnisse der unterschiedlichen Kompensationswerte von Zielspektrum +1,5 dB(A).....	60
Abbildung 24: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch V	66
Abbildung 25: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch V vergrößert	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: A-Frequenzbewertung der Oktavbänder	12
Tabelle 2: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden	14
Tabelle 3: Luftdämpfungskoeffizienten	18
Tabelle 4: Geschätzte Genauigkeit für Pegel von Breitbandquellen, berechnet unter Anwendung von Gleichung 1 bis 10 der DIN 9613-2	25
Tabelle 5: Eigenschaften von Windpark I.....	32
Tabelle 6: Oktavbänder von Windpark I.....	32
Tabelle 7: Differenzen der Oktavbänder von Windpark I.....	35
Tabelle 8: Relative Anteile am Summenschallleistungspegel von Windpark I	36
Tabelle 9: Oktavbänder von Versuch I.....	39
Tabelle 10: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffsets von Versuch II	43
Tabelle 11: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren der +2,0 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 63 Hz, 500 Hz und des Referenzbands von Versuch II.....	46
Tabelle 12: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffsets von Versuch III	47
Tabelle 13: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren der +2,0 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 1000 Hz, 8000 Hz und des Referenzbands von Versuch III	50
Tabelle 14: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffset von Versuch IV	51
Tabelle 15: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +0,8 dB(A), +1,1 dB(A), +2,0 dB(A) und des Referenzbands von Versuch IV	56
Tabelle 16: Vergleich des Summenschallleistungspegels und der relativen Anteile des Spektrums +0,4 dB(A) mit dem Referenzspektrum von Versuch IV	57
Tabelle 17: Ergebnisse für die Zielspektren +0,6 dB(A), +0,9 dB(A) und +1,5 dB(A) mit jeweils zwei unterschiedlichen Kompensationswerten von Versuch IV	59
Tabelle 18: Relative Anteile der Oktavbänder an der Summenschalleistung der Erhöhung um +1,5 dB(A) mit einer Kompensation von -1,0 dB(A) und -1,1 dB(A) und des Referenzbands von Versuch IV	61
Tabelle 19: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +0,3 dB(A) und +0,6 dB(A) im Vergleich zum Referenzspektrum von Versuch IV.....	62
Tabelle 20: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffset in dB(A) von Versuch V	64
Tabelle 21: Relativen Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +1,5 dB(A) auf den Oktavbänder 250 Hz & 2000 Hz sowie 125 Hz & 4000 Hz im Vergleich zum Referenzspektrum von Versuch V..	67

1 Einleitung

Die Energiewende ist ein politisches und gesellschaftliches Ziel in der Bundesrepublik Deutschland, um dem anthropogenen Klimawandel entgegenzuwirken und wichtige Ressourcen zu schonen. Es setzt auf die Umstellung der Energieversorgung von fossilen Energieträgern, z.B. Kohle, Erdöl und Erdgas, auf sogenannte erneuerbare Energien. Ein wichtiger Bestandteil der Energiewende in Deutschland ist die Verankerung von Klimaschutzzielen im Grundgesetz (GG) Artikel 20a [1]. Hierbei wird als Staatszielbestimmung der Schutz der natürlichen Lebensgrundlage und das Tierwohl im Rahmen der Verfassungsmäßigen Ordnung ergänzt.

Windenergieanlagen (WEA), sofern ihre Gesamthöhe mehr als 50 m beträgt, unterliegen dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), was bedeutet, dass für diese Anlagen ein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren erforderlich ist [2]. Das BImSchG hat den Zweck, nicht nur den Mensch, sondern auch die gesamte Flora und Fauna samt ihrer Lebensräume sowie auch die Atmosphäre und das Klima vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen. Insofern es sich um genehmigungsbedürftige Anlagen handelt, dient das BImSchG außerdem der Vermeidung und Verminderung schädlicher Umwelteinwirkungen und erheblicher Belästigungen durch Emissionen. Gerade vor dem Hintergrund der Vermeidung erheblicher Belästigungen, aber auch gesundheitlicher Schädigungen durch Langzeitfolgen, wird in einem immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen in der Regel eine von einem unabhängigen Sachverständigen erstellte Schallimmissionsprognose gefordert.

Mit dem § 16b BImSchG ist im August 2021 eine vergleichsweise neue Regelung in Kraft getreten, die das Ziel verfolgt, Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Erzeugung von elektrischem Strom aus erneuerbaren Energien, wie beispielsweise Windenergieanlagen, zu beschleunigen [2]. Er regelt insbesondere die Genehmigung von Modernisierungen solcher Anlagen. Hierbei stellt ein typisches Szenario der Rückbau von leistungsschwächeren WEA, gefolgt von einem Zubau von leistungsstärkeren WEA in unmittelbarer Nähe (sog. „Repowering“) dar. Laut § 16b BImSchG reicht es in einem solchen Fall aus, für eine Beurteilung der Genehmigungsfähigkeit nachzuweisen, dass durch das geplante Vorhaben keine nachteiligen Auswirkungen im Sinne schädlicher Umwelteinwirkungen zu erwarten sind. Bezogen auf Schall bzw. Lärm wäre somit zu zeigen, dass durch das geplante „Repowering“ die Schallimmissionen an den umgebenden relevanten Immissionspunkten nicht weitere erhöht, sondern eher gesenkt werden. Eine wie sonst übliche Betrachtung aller als Vorbelastung im Sinne der TA Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm) einwirkenden Anlagen sowie eine abschließende Darstellung und Bewertung der resultierenden Gesamtbelastung entfällt in diesem Fall [3].

1.1 Motivation / Aufgabenstellung

Die Bearbeitung bisheriger Projekte hat gezeigt, dass es bei Vergleichen der prognostizierten Schallimmissionsbeiträge der zurückzubauenden WEA mit denen der neu zu errichtenden WEA nicht selten zu einer Art „Überholung“ der Linien gleichen Schalldrucks (Isophonen) kommt. So kann es durchaus vorkommen, dass die Schallimmissionen der neuen WEA innerhalb der bewohnten Gebiete, die dem Windpark am nächsten gelegen sind, die Schallimmissionen der zurückzubauenden WEA unterschreiten, es sich aber in größeren Entfernungen zum Windpark, in denen die WEA beispielsweise nur noch auf reine Wohngebiete einwirken, umgekehrt verhält. Als wesentlicher Grund hierfür vermuten wir das frequenzabhängige Verhalten der Schallausbreitung. So werden hochfrequente Anteile im Spektrum einer Schallquelle bei der Ausbreitung in Luft wesentlich stärker gedämpft als die tieffrequenten Anteile. Aus diesem Grund kommt es regelmäßig vor, dass unterschiedliche Typen von Windenergieanlagen trotz gleichem Summenschallleistungspegel unterschiedliche Schalldruckpegel an Immissionsorten in der Umgebung hervorrufen, weil die emittierte Schallleistung spektral unterschiedlich verteilt ist. Dies kann sogar dazu führen, dass eine WEA mit einem niedrigeren Summenschallleistungspegel am maßgeblichen Immissionsort einen höheren Schalldruckpegel hervorruft als eine Anlage mit einem höheren Summenpegel.

Das beschriebene Verhalten der sich „überholenden Isophonen“ soll im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht werden. Hierbei ist das Ziel, Aussagen über die frequenzabhängige Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien zu treffen. Hierzu wird ein fiktiver, aber realitätsnaher Fall aus der Praxis ausgewählt, von dem ausgehend eine systematische Untersuchung auf Basis von selbst entworfenen Testfällen durchgeführt wird. Für die Durchführung der erforderlichen Berechnungen wird die Software WindPRO der Firma EMD genutzt. Des Weiteren kann auf eine Vielzahl an Emissionsdaten sowohl von aktuellen, als auch älteren Typen von Windenergieanlagen zurückgegriffen werden. Diese Daten dürfen im Rahmen der Arbeit jedoch nur anonymisiert verwendet werden, sodass keine Rückschlüsse auf den Anlagenhersteller gezogen werden können.

2 Grundlagen zum Schall

In den folgenden Kapiteln werden die wissenschaftlichen und gesetzlichen Grundlagen herausgearbeitet, auf denen diese Bachelorarbeit aufbaut. Zu Beginn, werden die allgemeinen Grundlagen der Akustik zum Thema Schall erläutert. Dazu gehören die physikalischen Grundlagen, Wahrnehmung und Bewertung von Schall und die Schallausbreitung im Freien. Anschließend wird auf Schall bei Windenergieanlagen und die zugehörigen Prognoseverfahren eingegangen. Abschließend wird noch die Software WindPRO und das Modul „DEZIBEL“, mit seinen Eigenschaften, vorgestellt.

2.1 Definition von Schall

Die Akustik ist die Lehre vom Schall. Sie beschäftigt sich mit dessen Eigenschaften, der Entstehung und Ausbreitung von Schallwellen sowie mit der Erzeugung, Wahrnehmung und Messung von Schall. Als Schall wird eine mechanische Schwingung bezeichnet, die sich in Medien wie Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen ausbreiten kann. Die Schwingungen verlaufen wellenförmig und bewirken periodische Druckänderungen im jeweiligen Medium. In der Luft führt dies zu Veränderungen des Luftdrucks, dem sogenannten Schalldruck, der vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden kann. Für das Hören sind vor allem die Merkmale Lautstärke und Tonhöhe entscheidend. Die Lautstärke hängt direkt mit dem Schalldruck zusammen. Je größer die Druckschwankungen sind, desto mehr Energie transportiert die Schallwelle und umso lauter wird sie bei gleichbleibender Tonhöhe wahrgenommen. Die Tonhöhe wiederum wird durch die Frequenz der Schwingung bestimmt, also durch die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde. Je höher die Frequenz, desto höher ist auch der wahrgenommene Ton [4].

2.2 Frequenzbereiche

Das menschliche Gehör ist in der Lage, einen sehr weiten Bereich an Schalldruckpegeln und Frequenzen zu erfassen. Ein gesunder Mensch kann Töne zwischen einer Frequenz von 16 Hz und 20.000 Hz wahrnehmen. Dieser Bereich wird auch Hörschall genannt. Frequenzen unterhalb dieses Bereichs werden als Infraschall bezeichnet, Frequenzen darüber als Ultraschall. Die obere Wahrnehmungsgrenze des Gehörs wird durch die Schmerzgrenze in der Abbildung 1 dargestellt. Die Schmerzgrenze liegt etwa bei einem Schalldruckpegel zwischen 120 Dezibel (dB) bis 140 dB [5, Kapitel 6.2].

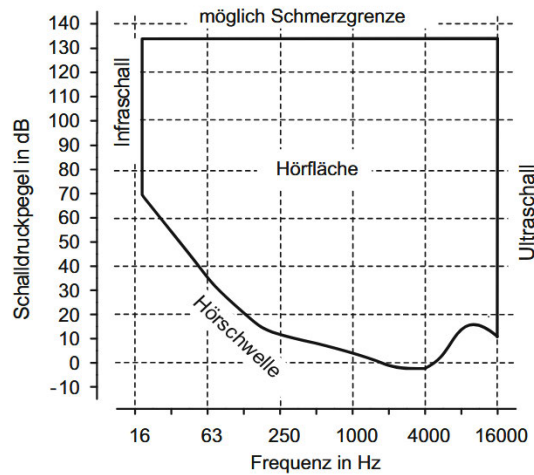


Abbildung 1: Hörfläche des menschlichen Ohres
Quelle: Ingenieurakustik, S.286 [5]

2.3 Grundgrößen und Pegel

Um Schall physikalisch zu beschreiben und berechnen zu können, werden verschiedene akustische Größen verwendet. In Gasen und Flüssigkeiten äußert sich Schall durch die geringe Abweichung von den Zustandsgrößen wie Druck, Dichte und Geschwindigkeit gegenüber ihren jeweiligen Ruhewerten. Die drei relevanten Grundgrößen werden Schalldruck, Schalldichte und Schallschnelle genannt. Der Schalldruck beschreibt die Druckschwankung in einem Medium und kann mit einem Mikrofon gemessen werden. Die Schalldichte gibt an, wie stark sich die Dichte eines Mediums im Vergleich zum Ruhezustand durch Schall verändern wird. Die Schallschnelle wiederum beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich die Teilchen im Schallfeld bewegen. Diese drei Größen werden auch als Schallfeldgröße bezeichnet.

$$\text{Schalldichte} = \rho$$

$$\text{Schalldruck} = p$$

$$\text{Schallschnelle} = v$$

Auf Basis dieser Größen lassen sich weitere Kenngrößen ableiten, wie die Schallintensität und Schallleistung. Die Schallintensität gibt die pro Fläche und Zeit übertragene Schallenergie an. Aus der Schallintensität lässt sich die Schallleistung integrieren. Die Schallleistung ist die insgesamt von einer Schallquelle pro Zeiteinheit abgestrahlte Schallenergie für eine umschlossene Fläche (F). Die Gleichungen (2.1) und (2.2) geben die Formeln für die Schallintensität und Schallleistung an.

$$\text{Schallintensität: } I = p \cdot v \quad (2.1)$$

$$\text{Schallleistung: } P = \int_F I \cdot dA \quad (2.2)$$

Diese physikalischen Größen umfassen sehr große Wertebereiche und es werden demzufolge sogenannte Pegelmaße zur Bewertung verwendet. Die Größen werden logarithmisch skaliert und in der Einheit Dezibel (dB) angegeben. Die Verwendung einer logarithmischen Skala ermöglicht es, die großen Wertebereiche von Schalldruck und Schallintensität auf kleiner Wertebereiche der Pegelwerte abzubilden. Bei einer Rechnung mit Schallpegeln, gelten nicht die üblichen Rechenregel. Beispielsweise ergibt die Addition zweier gleichgroßen Schallpegel von 50 dB nicht 100 dB, sondern lediglich 53 dB. Eine Veränderung des Schallpegels um 3 dB entspricht dabei einer Verdopplung oder Halbierung der Schallintensität. Der Schalldruckpegel ist eine Verhältnisgröße, die aus dem Bezugsschalldruck (z.B. Schalldruck bei der Hörschwelle bei 1 kHz: $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa) und dem momentanen Schalldruck gebildet wird. Das gleiche gilt auch für den Schallintensitätspegel, bei dem die Bezugsintensität mit der Größe von $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ definiert ist. Beide Formeln sind in Gleichung (2.3) und (2.4) dargestellt.

$$\text{Schalldruckpegel: } L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) = 20 \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (2.3)$$

$$\text{Schallintensitätspegel: } L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = 10 \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.4)$$

Der Schalldruckpegel beschreibt die Stärken des Schalldrucks an einem bestimmten Immissionsort innerhalb des Schallfeldes, während der Schallleistungspegel die von der Quelle gesamte abgestrahlte Schallenergie kennzeichnet. Mit der Bezugsschallleistung $P_0 = 10^{-12}$ W gilt für die Schallleistung Gleichung (2.5) [6, Kapitel 2.1].

$$\text{Schallleistungspegel: } L_W = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) = 10 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (2.5)$$

3 Wahrnehmung und Bewertung von Schall

Aufbauend auf den physikalischen Grundlagen des Schalls wird in diesem Kapitel die Wahrnehmung und Bewertung von Schall behandelt. Schall ist nicht nur eine physikalische Größe, sondern wird vom Menschen individuell wahrgenommen und bewertet. Daher werden zunächst die physiologischen Grundlagen der Hörwahrnehmung erläutert, bevor anschließend die rechtlichen Rahmenbedingungen und Bewertungsmaßstäbe vorgestellt werden, die zur Beurteilung von Lärmimmissionen herangezogen werden.

3.1 Wahrnehmung von Schall

Die physikalische Beschreibung des Schalls bildet die Grundlage für dessen technische Erfassung. Für die Beurteilung von Lärm ist jedoch vor allem die menschliche Wahrnehmung maßgeblich. Das Gehör reagiert nicht auf alle Frequenzen gleich empfindlich, sondern weist eine frequenzabhängige Hörschwelle auf. Der hörbare Bereich reicht dabei von der Hörschwelle bei etwa 0 dB (bei 1 kHz) bis hin zur Schmerzschwelle bei etwa 120 bis 140 dB. Innerhalb dieses Bereichs liegt die höchste Empfindlichkeit zwischen etwa 2 und 5 kHz, während tiefe Frequenzen unterhalb von 100 Hz nur bei deutlich höheren Schalldruckpegeln wahrgenommen werden können (vgl. Abbildung 1).

Um diese Unterschiede technisch abbilden zu können, wird in der Praxis eine frequenzabhängige Gewichtung vorgenommen. Ohne Gewichtung wird der Schalldruckpegel in Dezibel (dB) angegeben, was die physikalische Größe unabhängig von der Wahrnehmung beschreibt. Mit der sogenannten A-Bewertung wird diese Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs genormt berücksichtigt. Sie dient als frequenzabhängige Gewichtung, bei der mittlere Frequenzen zwischen 1 kHz und 5 kHz stärker und tiefe sowie sehr hohe Frequenzen schwächer bewertet werden. Das Ergebnis wird als A-bewerteter Schalldruckpegel in dB(A) angegeben.

In Tabelle 1 sind die A-Frequenzbewertungen für die genormten Oktavbänder dargestellt. Diese Gewichtung sorgt dafür, dass A-bewertete Pegel besser mit dem subjektiven Lautstärkeindruck des Menschen korrelieren und bildet damit die Grundlage für nahezu alle praxisrelevanten Lärmbewertungen.

Tabelle 1: A-Frequenzbewertung der Oktavbänder
Quelle: DIN EN 61672-1, modifiziert Tabelle 3 [7]

A-Frequenzbewertung der Oktavbänder								
Nennfrequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A-Frequenzbewertung in dB	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	+1,2	+1,0	-1,1

Ein und derselbe Schall kann daher physikalisch beispielsweise 60 dB betragen, in der A-Bewertung aber nur 50 dB(A), wenn er überwiegend tieffrequent ist. Die A-Bewertung ist in DIN EN 61672-1

festgelegt und stellt in Deutschland die maßgebliche Bewertungsgröße dar [7]. Auch die TA Lärm sowie die DIN ISO 9613-2 schreiben die Verwendung von dB(A) für Immissionsprognosen vor.

Darüber hinaus ist der Zusammenhang zwischen physikalischem Pegel und dem empfundenen Lautstärkeindruck nicht linear. Eine Pegelerhöhung um etwa 10 dB entspricht in der Wahrnehmung ungefähr einer Verdopplung der Lautheit [6, Kapitel 7]. Für die Beschreibung dieses subjektiven Lautstärkeindrucks werden daher zusätzlich psychoakustische Größen wie Phone und Sone herangezogen. Zur groben Einordnung ist in Abbildung 3 die Gegenüberstellung von Lautstärke, Lautheit, Schalldruckpegel, Schalldruck und Schallintensität für 1000 Hz dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass nicht nur die Lautheit selbst die Geräuschbelastung bestimmt. Auch leise Töne können belastend wirken, wenn sie bestimmte Merkmale wie auffällige Töne, Wiederholungen oder Schwankungen aufweisen. Für eine detaillierte Erklärung von Phone und Sone wird auf das Kapitel 7.2 „Schallempfindung, Lautstärke“ aus der Fachliteratur Technische Akustik von R. Lerch verwiesen [6].

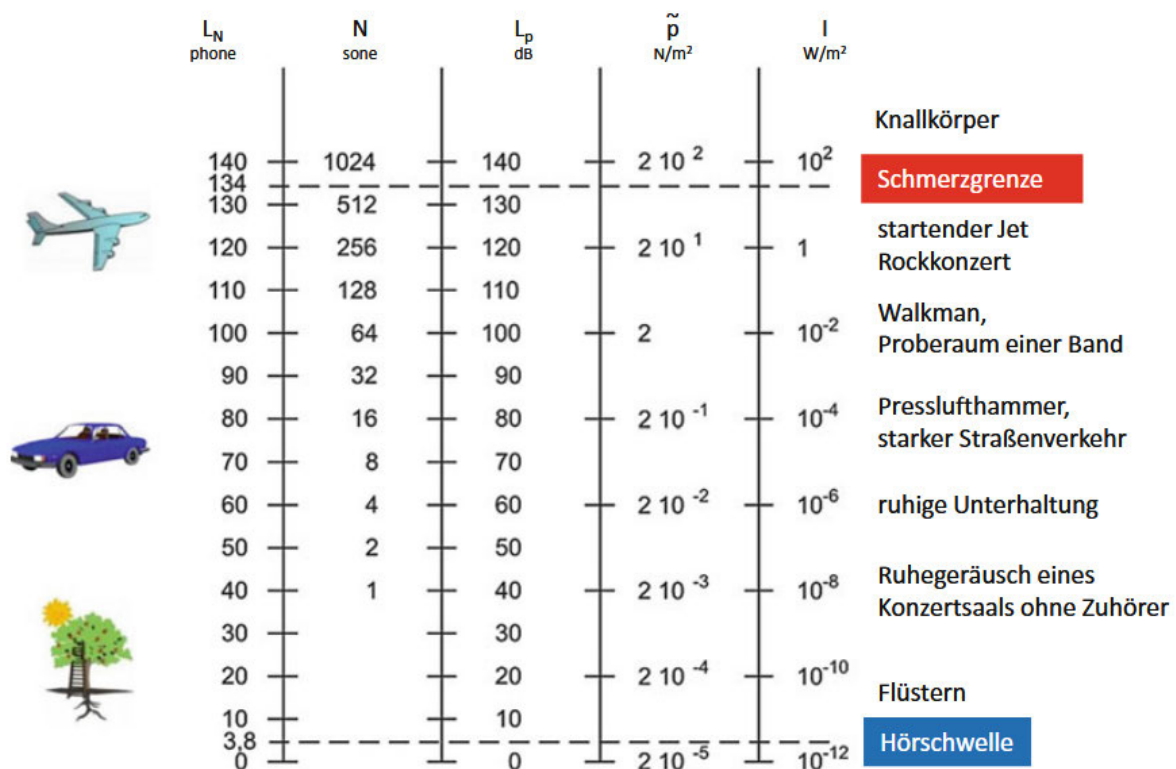


Abbildung 2: Gegenüberstellung von Lautstärkepegel, Lautheit, Schalldruckpegel, Schalldruck und Schallintensität für 1000 Hz Standardschall
Quelle: Ingenieurakustik, S. 292 [5]

3.2 Rechtlicher Rahmen und Bewertung

Geräusche wirken nicht nur physikalisch auf den Menschen ein, sondern beeinflussen auch maßgeblich dessen Wohlbefinden und Gesundheit. Um sicherzustellen, dass die Bevölkerung sowie die Umwelt vor schädlichen Lärmeinwirkungen geschützt werden, ist eine gesetzliche Regelung der zulässigen

Schallbelastung unerlässlich. Die zentrale Rechtsgrundlage in Deutschland ist das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), dessen Zweck es ist, Menschen, Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Atmosphäre sowie Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu bewahren (§ 1 BImSchG) [2]. Nach § 4 des BImSchG in Verbindung mit der Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BImSchV) sind Anlagen genehmigungspflichtig, von denen erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen können [8]. Dazu zählen auch Windenergieanlagen, sobald ihre Gesamthöhe 50 m überschreitet. Betreiber solcher Anlagen sind nach § 22 BImSchG verpflichtet, schädliche Umwelteinwirkungen zu vermeiden oder soweit wie möglich zu vermindern.

Die konkreten Anforderungen erfolgen durch die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm), die als Verwaltungsvorschrift für die Genehmigungsbehörden verbindlich ist. Sie legt Immissionsrichtwerte fest, die je nach Gebietsart unterschiedlich streng ausfallen. Zudem wird zwischen Tag- und Nachtzeit unterschieden, da Lärm während der Nachtzeit eine besonders hohe Störwirkung entfaltet. So gelten für bewohnte Gebiete nachts niedrigere Grenzwerte als tagsüber. In der Tabelle 2 sind die Immissionsrichtwerte zu finden [3]. Neben den Immissionsrichtwerten berücksichtigt die TA Lärm im Anhang auch Zuschläge und Richtwerte für bestimmte Geräuschmerkmale und Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit. Für Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit wird ein Zuschlag von 6 dB vorgesehen. Bei ein oder mehreren hervortretenden Tönen oder informationshaltigen Geräuschen wird je nach Auffälligkeit ein Zuschlag von 3 oder 6 dB angesetzt [3].

Tabelle 2: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden
Quelle: TA Lärm, 6.1 [3]

Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden		
Gebiet	Tageszeit	Immissionsrichtwert
Industriegebiete		70 dB(A)
Gewerbegebiete	tags	65 dB(A)
	nachts	50 dB(A)
urbanen Gebiete	tags	63 dB(A)
	nachts	45 dB(A)
Kerngebiete, Dorfgebiete und Mischgebiete	tags	60 dB(A)
	nachts	45 dB(A)
Allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete	tags	55 dB(A)
	nachts	40 dB(A)
Reine Wohngebiete	tags	50 dB(A)
	nachts	35 dB(A)
Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten	tags	45 dB(A)
	nachts	35 dB(A)

Für die Prognose der zu erwartenden Geräuschimmissionen verweist die TA Lärm auf die DIN ISO 9613-2, die ein international anerkanntes Verfahren zur Berechnung der Schallausbreitung darstellt [9]. Auf dieser Grundlage wird der Beurteilungspegel (L_r) ermittelt, der als energieäquivalenter

Dauerschallpegel über 16 Stunden am Tag (06:00–22:00 Uhr) bzw. 8 Stunden in der Nacht (22:00–06:00 Uhr) gebildet wird. Damit wird nicht ein einzelnes Ereignis bewertet, sondern die gesamte Schallbelastung über den jeweiligen Beurteilungszeitraum.

Gerade bei Windenergieanlagen hat dieses Vorgehen eine besondere Bedeutung. Da sie in der Regel über viele Stunden am Tag in Betrieb sind und ihre Geräuscentwicklung stark vom Betriebsmodus sowie von den jeweiligen Umwelteinflüssen abhängt. Durch die standardisierte Vorgehensweise von TA Lärm und DIN ISO 9613-2 wird sichergestellt, dass die Geräuschbelastung objektiv beurteilt und rechtssicher mit den zulässigen Immissionsrichtwerten verglichen werden kann.

4 Schallausbreitung im Freien

Die vom Emissionsort ausgehenden Schallwellen erfahren auf ihrem Weg zum Empfänger verschiedene Einflüsse, die zu Veränderungen im Frequenzspektrum führen. Zu den wesentlichen Mechanismen gehören die geometrische Ausbreitung, frequenzabhängige Absorptionseffekte in der Atmosphäre, Reflexionen und Absorptionen durch den Boden, meteorologische Einflussgrößen wie Windrichtung und Temperaturverlauf sowie Abschirmwirkungen durch natürliche oder bauliche Hindernisse. Diese Effekte werden in der Praxis über standardisierte Berechnungsverfahren, insbesondere die Norm DIN ISO 9613-2 [9], quantifiziert und einheitlich berücksichtigt.

4.1 Geometrische Dämpfung von Schall bei seiner Ausbreitung

Unter der Annahme, dass sich Schall gleichmäßig in alle Richtungen ausbreitet und der umgebende Luftraum homogen sowie frei von Hindernissen ist, bildet sich um eine punktförmige Schallquelle ein kugelförmiges Wellenfeld aus. Die Änderung des Schalldruckpegels (ΔL) lässt sich allein aufgrund des geometrischen Abstands (d) zur Punktschallquelle bestimmen, wenn der Abstand zwischen Schallquelle und Empfangspunkt von d_1 auf d_2 verändert wird.

$$\Delta L = L_{p1} - L_{p2} = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \quad (2.6)$$

Die Pegelabnahme nach Formel 2.6 wird als Ausbreitungsdämpfung bezeichnet. Sie besagt, dass sich der Schalldruckpegel bei einer Verdopplung des Abstands um 6 dB verringert [5 S.307]. Unter den idealisierten Annahmen stellt dieser Wert die maximal zu erwartende Dämpfung aufgrund der geometrischen Ausbreitung dar. Ein besonderer Fall liegt vor, wenn die Schallabstrahlung in unmittelbarer Nähe zu einer stark reflektierenden Oberfläche erfolgt, etwa vor einer massiven Wand oder über einem harten Boden wie Beton. In solchen Situationen wird der Schall nicht in den gesamten Raum, sondern nur in einen Halbraum abgestrahlt, da die reflektierende Fläche den Schallanteil in eine Richtung umlenkt. Ein reflektierender Untergrund beeinflusst die Schallausbreitung erheblich. Um diesen Effekt zu analysieren, kann die Methode der geometrischen Spiegelung herangezogen werden. Dabei wird zusätzlich zur realen Schallquelle (Q) eine virtuelle, sogenannte Spiegelschallquelle (S) eingeführt, welche den Anteil des Schalls modelliert, der von der reflektierenden Fläche zurückgeworfen wird. Wie die Abbildung 2 verdeutlicht, trifft im Fall einer bodennahen Schallquelle sowohl der Direktschall als auch der reflektierte Schall am Empfangspunkt (E) ein. Da technische Geräusche in der Regel breitbandig und inkohärent sind, lassen sich deren Schalldruckpegel energetisch addieren. Liegen die reale Quelle und ihre Spiegelquelle sehr nahe beieinander (z. B. bei geringer Quellhöhe über dem Boden), sind ihre Schallbeiträge nahezu gleich stark. Daraus ergibt sich eine Pegelzunahme von etwa 3 dB gegenüber einer reflexionsfreien Ausbreitung.

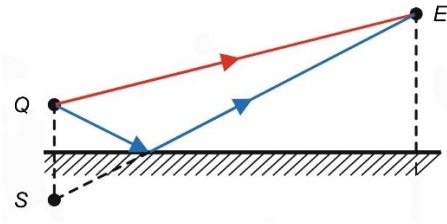


Abbildung 3: Schallabstrahlung von reflektierenden Flächen
Quelle: Ingenieurakustik, S.309, modifiziert [5]

In der praktischen Schallausbreitungsrechnung wird die Dämpfung jedoch nicht nur über die reine Entfernungsabnahme beschrieben, sondern in verschiedene Einzelterme zerlegt. Die DIN ISO 9613-2 stellt hierfür die folgende Grundgleichung (2.7) auf:

$$L_p = L_W + D_c - A \quad (2.7)$$

D_c ist dabei die Richtwirkungskorrektur, die für eine ungerichtete, ins freie abstrahlende Punktschallquelle gleich Null ist. Die Ausbreitungsdämpfung (A) setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen und ist der Gleichung (2.8) zu entnehmen. Die Komponenten sind die geometrische Ausbreitung A_{div} , die atmosphärische Absorption A_{atm} , der Bodeneffekt A_{gr} , die Abschirmung durch Hindernisse A_{bar} und die Dämpfung aufgrund verschiedener anderer Effekte A_{misc} .

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (2.8)$$

4.2 Geometrische Ausbreitung

Die Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung lässt sich auch als Ausbreitungsdämpfung A_{div} formulieren. Sie berücksichtigt die kugelförmige Abstrahlung einer Punktschallquelle im Freifeld. Dabei verteilt sich die abgestrahlte Schallleistung gleichmäßig auf die Oberfläche einer Kugel. Die Formel wird in Gleichung (2.9) gegeben.

$$A_{div} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d^2}{d_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \text{ dB} \quad (2.9)$$

Als Bezugspunkt wurden $d_0 = 1 \text{ m}$ gesetzt. Der konstante Summand von +11 dB resultiert dabei direkt aus der Kugeloberfläche (4π).

4.3 Atmosphärische Absorption

Neben der geometrischen Ausbreitung führt auch die Dämpfung in der Atmosphäre zu einer Verringerung des Schallpegels mit zunehmender Entfernung zur Quelle. Diese sogenannte atmosphärische Absorption beruht auf verschiedenen physikalischen Verlustmechanismen, die beim Durchgang der Schallwellen durch die Luft auftreten. Der wichtigste Einflussfaktor bei der atmosphärischen Dämpfung ist die Frequenzabhängigkeit. Höhere Frequenzen werden deutlich stärker absorbiert als tiefe. Aus diesem Grund erscheinen entfernt liegende Schallquellen, insbesondere bei großer Distanz, deutlich tiefer bzw. dumpfer im Klang. Zusätzlich wirken sich Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit aus. Trockene und kühle Luft erhöht die Absorption, während warme und feuchte Luft die Schallausbreitung begünstigt. Der Effekt ist bei Ausbreitungsstrecken unterhalb von etwa 200 m meist noch gering, wird aber mit zunehmender Entfernung immer relevanter. Neben Temperatur und Luftfeuchtigkeit spielt auch der Wind eine entscheidende Rolle. Bei Mitwindbedingungen wird der Schall in Ausbreitungsrichtung gebeugt und kann sich weiter ausbreiten.

Die atmosphärische Dämpfung wird häufig in Form eines Absorptionskoeffizienten (α) angegeben. Die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption (A_{atm}) lässt sich mit folgender Gleichung (2.10) berechnen:

$$A_{atm} = \alpha \cdot \frac{d}{1000} \quad (2.10)$$

Für standardisierte Berechnungen, im Rahmen der DIN ISO 9613-2 [9], gilt die Tabelle 3 mit typischen Werten für den Absorptionskoeffizienten. Diese sind abhängig von Frequenz, Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Tabelle 3: Luftdämpfungskoeffizienten
Quelle: DIN ISO 9613-2, Tab. 2 [9]

Temperatur °C	Rel. Feuchte %	Luftdämpfungskoeffizient α , dB/km							
		Bandmittelfrequenz, Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Als vereinfachte Näherung kann für den A-bewerteten Mittelwert der atmosphärischen Absorption bei einer Temperatur von 10 °C und 70 % relativer Feuchte ein Wert von 1,9 dB(A)/km angenommen werden. Dieser Näherungswert bezieht sich auf das Oktavband mit 500 Hz, das für die A-Bewertung typischerweise besonders gewichtet wird. In detaillierten Berechnungen werden jedoch frequenzspezifische Werte verwendet, die für jedes Oktavband separat in die Pegelprognose einfließen.

4.4 Bodeneffekte

Ein weiterer Einfluss auf die Schallausbreitung im Freien ist der Bodeneffekt. Dieser entsteht durch die Überlagerung des Direktschalls mit dem an der Bodenoberfläche reflektierten Schallanteil, die am Immissionsort zu einer Verstärkung oder Abschwächung des Schalldruckpegels führen kann. Die Stärke dieses Effekts ist abhängig von der Entfernung zwischen Quelle und Empfänger, den Höhen der beteiligten Punkte über Grund sowie von den akustischen Eigenschaften der Bodenoberfläche. In der DIN ISO 9613-2 wird der Bodeneinfluss über den Bodenfaktor G beschrieben, der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Ein Wert von $G = 0$ entspricht einem harten Boden wie Beton, Asphalt oder Wasser, wohingegen $G = 1$ für einen porösen Boden steht, wie er beispielsweise bei Wiesen, Ackerflächen oder Schnee vorliegt. Typischerweise liegen Mischböden vor die für G einen Wert zwischen 0 und 1 vorstehen. Um unterschiedliche Gegebenheiten entlang der Ausbreitungsstrecke erfassen zu können, unterteilt die Norm den Ausbreitungsweg in drei Teilbereiche, nämlich den Quellbereich, den Mittelbereich und den Empfängerbereich. Für jeden Abschnitt wird ein spezifischer Beitrag zum Bodeneinfluss berechnet, die sich zur Gesamtdämpfung (A_{gr}) summieren. Da die Überlagerung von Direkt- und Reflexionsschall frequenzabhängig ist, wird die Berechnung für jedes Oktavband getrennt durchgeführt. Insbesondere im tieffrequenten Bereich kann es durch Interferenzen zu deutlichen Auslöschungen oder Pegelverstärkungen kommen, während bei höheren Frequenzen die Reflexion durch Absorption im Boden zunehmend abgeschwächt wird. Das genaue Verfahren und die relevanten Rechnungen werden in der DIN ISO 9613-2 Kapitel 7.3.1 „Allgemeines Berechnungsverfahren“ erläutert [9].

Zusätzlich wird in Kapitel 7.3.2 „Alternatives Verfahren zur Berechnung A-bewerteter Schalldruckpegel“ auf ein vereinfachtes Näherungsverfahren eingegangen, das für die frequenzunabhängige Überschlagsrechnung zur Bestimmung des A-bewerteten Immissionspegels genutzt werden kann. Die Formel wird in Gleichung 2.11 angegeben:

$$A_{gr} = 4,8 - \left(\frac{2h_m}{d} \right) \cdot \left(17 + \left(\frac{300}{d} \right) \right) dB > 0 dB \quad (2.11)$$

Für die mittlere Höhe (h_m) gilt: $h_m = \frac{F}{d}$, wobei F die umschlossene Fläche zwischen dem Abstand (d) von Quelle und Empfänger ist.

Diese Näherung gilt allerdings nur laut der DIN ISO 9613-2, wenn der A-bewertete Schalldruckpegel am Immissionsort von Interesse ist, wenn der Schall sich über porösen oder gemischten Boden ausbreitet und wenn der Schall kein reiner Ton ist.

4.5 Abschirmung durch Hindernisse

Schallwellen können auf ihrem Weg von der Quelle zum Empfänger durch Hindernisse wie Gebäude, Wälle oder Geländeerhebungen abgeschwächt werden. Wird der direkte Schallweg teilweise oder vollständig blockiert, gelangt nur noch der gebeugte Schall über die Hinderniskanten zum Immissionsort. Die Stärke der Abschirmung hängt dabei von der Größe und Lage des Hindernisses sowie von der Frequenz des Schalls ab. Während tieffrequente Schallanteile mit großen Wellenlängen Hindernisse weitgehend passieren und nur gering gedämpft werden, erfahren hochfrequente Schallanteile eine deutlich stärkere Reduktion. In der DIN ISO 9613-2 wird dieser Effekt durch den Dämpfungsterm A_{bar} beschrieben.

5 Windenergieanlagen als Schallquelle

Windenergieanlagen sind technische Bauwerke, die die kinetische Energie des Windes in elektrische Energie umwandeln. Kommerziell haben sich Anlagen mit drei Rotorblättern, einem Maschinenhaus für Triebstrang und Generator sowie einem Turm mit Fundament durchgesetzt, da sie ein günstiges Verhältnis zwischen Kosten und Energiegewinnung, eine hohe Standfestigkeit und einen vergleichsweise geringen Verschleiß aufweisen. Windenergieanlagen unterscheiden sich in ihrem Geräuschverhalten deutlich von klassischen Industrieanlagen. Ihre Schallemissionen entstehen sowohl durch aerodynamische Prozesse an den Rotorblättern als auch durch mechanische Komponenten wie Getriebe und Generator. Die aerodynamischen Geräusche verursachen einen Großteil der Geräusche und sollen im Folgenden näher erläutert werden.

5.1 Aerodynamische Geräusche

Die aerodynamischen Geräusche moderner Windenergieanlagen entstehen im Wesentlichen an den Rotorblättern durch die Wechselwirkung mit der anströmenden Luft. An der Vorderkante können Turbulenzen der Zuströmung in Abhängigkeit von den Windbedingungen und dem Anstellwinkel Schallereignisse verursachen. Entlang der Blattoberfläche bildet sich eine Grenzschichtströmung, die bei zunehmender Strömungsgeschwindigkeit von laminar in turbulent übergeht. In der turbulenten Grenzschicht entstehen Wirbel, die Luftdruckschwankungen in der Strömung verursachen. Besonders an der Hinterkante führt die Ablösung turbulenter Strömungen und die damit verbundenen Luftdruckschwankungen zur Entstehung von Schall, der für ein Großteil der Geräuschemissionen verantwortlich ist [10]. An der Blattspitze entstehen durch die Ausbildung von Blattspitzenwirbeln zusätzliche Geräusche, die sich aufgrund der hohen Blattspitzengeschwindigkeit bemerkbar machen. Hinter dem Rotor bildet sich zudem ein turbulenter Nachlauf, der Druckschwankungen erzeugt und niederfrequente Geräuschteile hervorrufen kann. Die Intensität dieser Schallquellen hängt maßgeblich von der Blattspitzengeschwindigkeit (Rotordrehzahl und Rotorradius), vom Anstellwinkel, der Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Rauigkeit oder Erosionsschäden) sowie von der Geometrie der Blattkante und Blattspitze ab [11].

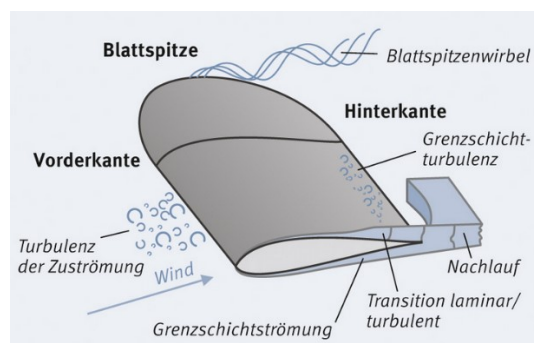


Abbildung 4: Schallquellen am Rotorblatt
Quelle: Wind Turbine Noise, S.14, übersetzt [12]

5.2 Mechanische Geräusche

Neben den aerodynamischen Geräuschen tragen auch die mechanischen Komponenten der Windenergieanlage zur Gesamtemission bei. Diese entstehen im Wesentlichen im Triebstrang, also im Getriebe, im Generator sowie in den Hilfsaggregaten wie Lüftern und Hydraulikpumpen. Besonders das Getriebe gilt als eine der Hauptquellen mechanischer Schallemissionen, da Zahneingriffe zwangsläufig periodische Kräfte erzeugen, die sowohl Luftschall abstrahlen als auch über den Triebstrang als Körperschall auf Gondel und Turm übertragen werden. Ein hohler Stahlurm wirkt dabei häufig als Resonanzkörper und kann einzelne Frequenzen verstärken. Der Generator verursacht ebenfalls Geräusche, die aus elektromagnetischen Schwingungen, Lagergeräuschen und vor allem aus den Kühlsystemen resultieren. Messungen an realen Anlagen zeigen, dass sich die mechanischen Geräusche als eine konstante Frequenz äußern und beispielsweise einen konstanten 4,5-kHz-Ton darstellen [13].

Durch Fortschritte in der Konstruktion und durch gezielte Schwingungs- und Körperschallisolierung konnten mechanische Geräusche in modernen Anlagen stark reduziert werden. So werden Getriebe heute mit Gummilagern oder anderen elastischen Elementen von der Gondelstruktur entkoppelt, und auch Generatoren werden häufig gekapselt oder mit optimierten Lüftersystemen ausgestattet. Während bei älteren und kleineren Windenergieanlagen die mechanischen Geräusche das Klangbild noch dominierten, sind sie bei aktuellen Großanlagen meist nur noch von untergeordneter Bedeutung. Dennoch können sie im Nahfeld oder bei ungünstigen Resonanzeffekten weiterhin hörbar sein und zu charakteristischen Einzeltonemissionen führen.

5.3 Schallemissionen von Windenergieanlagen

Die Geräuschcharakteristik von Windenergieanlagen weist mehrere Merkmale auf, die sie deutlich vom klassischen Industrie- oder Verkehrslärm unterscheiden. Ein zentrales Kennzeichen ist die Amplitudenmodulation des Schalls. Sie entsteht durch die periodische Bewegung der Rotorblätter, bei der sich Richtung und Intensität der Schallemissionen während jeder Umdrehung verändert. Dadurch wird der Schalldruckpegel am Immissionsort in regelmäßigen Abständen verstärkt oder abgeschwächt, was als ein rhythmisches Auf- und Abschwellen des Geräusches wahrgenommen wird. Das menschliche Gehör reagiert besonders empfindlich auf diese periodischen Pegeländerungen, weshalb die Amplitudenmodulation psychoakustisch häufig als besonders auffällig und störend empfunden wird [11].

Ein weiteres charakteristisches Merkmal ist der hohe Anteil an tieffrequenten Geräuschen. Diese entstehen vor allem durch die Ablösung turbulenter Strömungen an der Hinterkante der Rotorblätter sowie durch instationäre Druckschwankungen im Nachlauf. Hinzu kommt die sogenannte Rotorblatt-Turm-Interaktion, bei der das Vorbeistreichen der Rotorblätter am Turm periodische Druckimpulse erzeugt, die sich im Infraschallbereich bemerkbar machen können. Während diese Infraschallanteile

physikalisch eindeutig nachweisbar sind, liegen sie in der Regel unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsschwelle [11], [13].

Darüber hinaus unterliegen die Geräusche einer starken zeitlichen und räumlichen Variabilität. Pegel und Frequenzzusammensetzung ändern sich abhängig von der Rotordrehzahl, der Windrichtung, der Windscherung und den jeweiligen meteorologischen Bedingungen. Besonders nachts treten die Emissionen aufgrund des ruhigeren Hintergrunds deutlicher hervor und werden entsprechend intensiver wahrgenommen.

Zusammenfassend sind Windenergieanlagen als Schallquelle durch breitbandige Hinterkantengeräusche, tieffrequente und teilweise Infraschall haltige Anteile, die periodische Amplitudenmodulation sowie eine ausgeprägte Abhängigkeit von den Betriebs- und Umweltbedingungen charakterisiert. Diese Eigenschaften erklären, warum das Geräusch von Windenergieanlagen psychoakustisch häufig auffälliger und belastender wahrgenommen wird als gleichmäßigere Industrie- oder Verkehrslärmquellen.

6 Prognoseverfahren für Windenergieanlagen

Die Beurteilung der Schallemissionen von Windenergieanlagen erfolgt im Genehmigungsverfahren nicht nur anhand von Messungen, sondern hauptsächlich durch standardisierte Prognoseverfahren. Diese Verfahren dienen dazu, die zu erwartenden Geräuschimmissionen an relevanten Immissionsorten unter speziellen Betriebs- und Umgebungsbedingungen rechnerisch zu bestimmen und mit den Immissionsrichtwerten der TA Lärm zu vergleichen. In Folgenden werden die in Deutschland maßgeblichen Berechnungsverfahren dargestellt.

6.1 Standardverfahren nach DIN ISO 9613-2

Die TA Lärm verweist im Anhang (Nr. A.2.3.4) verbindlich auf die DIN ISO 9613-2 als Ausbreitungsmodell. Diese Internationale Norm beschreibt die Berechnung der Schallausbreitung im Freien und hat das Ziel, auf Grundlage einer bekannten Emissionsquelle die Schallpegel unterschiedlicher Immissionsorte in der Umgebung vorherzusagen. In der Rechnung werden unter anderem geometrische Abnahme des Schalls, atmosphärische Absorption, Bodeneffekte und Hindernisse berücksichtigt. Die Berechnung kann frequenzabhängig in Oktavbändern erfolgen, wodurch insbesondere tieffrequente Geräuschanteile berücksichtigt werden. Gerade bei Windenergieanlagen ist dies von Bedeutung, da diese Frequenzen über große Entfernungen wahrnehmbar bleiben.

Die Norm wurde ursprünglich für bodennahe Industrieschallquellen entwickelt. In Tabelle 3 ist die Tabelle 5 der DIN ISO 9613-2 abgebildet und gibt eine geschätzte Genauigkeit des äquivalenten A-bewerteten Dauerschalldruckpegels bei Mitwind von ± 3 dB an. Dieser Toleranzbereich entspricht bereits einer Verdopplung bzw. Halbierung der Schallleistung und ist daher in der praktischen Anwendung von erheblicher Relevanz. Die geschätzte Genauigkeit gilt nur für eine Höhe bis 30 m und eine Entfernung bis 1000 m. Bei modernen Windkraftanlagen ist eine Nabenhöhe von über 100 m und einem Einwirkungsbereich von mehreren Kilometern üblich. Damit wird der Geltungsbereich der Norm deutlich überschritten, was zu erheblichen Unsicherheiten in der Prognose führt. Zudem werden meteorologische Effekte wie Temperaturgradienten oder Windscherung nur sehr eingeschränkt berücksichtigt. In der Realität können diese Faktoren jedoch die Schallausbreitung stark beeinflussen. Besonders während der Nacht treten häufig Temperaturinversionen auf, bei denen sich wärmere Luftschichten über kältere bodennahe Luftschichten ausbreiten. Diese stabile Schichtung führt dazu, dass sich die Schallwellen nicht wie üblich nach oben ausbreiten, sondern zum Boden hin gekrümmt werden und dadurch über größere Entfernungen mit höherer Intensität hörbar bleiben [6 S.68]. Infolgedessen können insbesondere nachts deutlich höhere Schalldruckpegel auftreten, als nach der vereinfachten Berechnung nach DIN ISO 9613-2 prognostiziert wird.

Tabelle 4: Geschätzte Genauigkeit für Pegel von Breitbandquellen, berechnet unter Anwendung von Gleichung 1 bis 10 der DIN 9613-2
 Quelle: DIN ISO 9613-2, Tab. 5 [9]

Höhe, h	Abstand, d^*	
	$0 < d < 100 \text{ m}$	$100 \text{ m} < d < 1000 \text{ m}$
$0 < h < 5 \text{ m}$	$\pm 3 \text{ dB}$	$\pm 3 \text{ dB}$
$5 \text{ m} < h < 30 \text{ m}$	$\pm 1 \text{ dB}$	$\pm 3 \text{ dB}$
* h ist die mittlere Höhe von Quelle und Empfänger. d ist der Abstand zwischen Quelle und Empfänger.		
ANMERKUNG: Diese Schätzungen basieren auf Situationen, wo weder Reflexionen noch Abschirmung auftreten.		

6.2 Alternatives Verfahren nach DIN ISO 9613-2

Das alternative Verfahren nach DIN ISO 9613-2 (Kapitel 7.3.2) wurde eingeführt, um eine vereinfachte Berechnung von A-bewerteten Schalldruckpegeln zu ermöglichen. Hintergrund war, dass in der Praxis häufig nur ein A-bewerteter Schallleistungspegel einer Quelle bekannt ist, während detaillierte Oktavbanddaten fehlen. Für die Luftabsorption wurde eine unabhängig von der tatsächlichen Frequenz, Temperatur oder Luftfeuchtigkeit konstante Dämpfung von 1,9 dB pro Kilometer angesetzt. Dieser Wert entspricht einer Bandmittelfrequenz von 500 Hz bei einer Temperatur von 10 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 70 % (siehe Tabelle 1). Die 500 Hz wurden gewählt, weil in diesem Bereich das menschliche Gehör besonders empfindlich ist und als repräsentativ für die allgemeine Lärmbewertung angesehen wird.

Durch diesen Ansatz wird die frequenzabhängige Absorption jedoch nicht realistisch abgebildet. Hohe Frequenzen werden überschätzt, tieffrequente Anteile, die bei WEA besonders relevant sind, dagegen unterschätzt. Untersuchungen, beispielsweise des LANUV NRW (Schalltechnischer Bericht der erweiterten Hauptuntersuchung), zeigen, dass mit zunehmender Entfernung systematische Abweichungen entstehen. Im Mitwindbereich bei Freifeldbedingungen lagen die gemessenen Pegel im Mittel rund 3 dB je Abstandsverdopplung über den nach dem alternativen Verfahren berechneten Werten (Tabelle 28, uppenkamp und partner, 2014). Damit erwies sich dieses Verfahren als unzureichend, um die Schallausbreitung moderner Windenergieanlagen realistisch vorherzusagen, was letztlich zur Entwicklung des Interimsverfahrens führte.

6.3 Interimsverfahren

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde das Prognosemodell vom Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) erweitert. Daraus entstand das sogenannte

Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen von Windenergieanlagen [14]. Es handelt sich dabei nicht um einen offiziellen Normtext, sondern um eine Übergangslösung. Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz (LAI) empfiehlt die Anwendung dieses Verfahrens als Berechnungsgrundlage, solange keine Anpassung der DIN ISO 9613-2 erfolgt ist [15]. Das Interimsverfahren berücksichtigt unter anderem die frequenzabhängige Luft- und Bodendämpfung sowie die spezifischen Anforderungen hochliegender Schallquellen und ermöglicht dadurch eine realistischere Abbildung der Schallausbreitung moderner WEA. Im Vergleich zum alternativen Verfahren, erfolgt die Berechnung im Oktavspektrum. Somit wird die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption (A_{atm}) frequenzabhängig berücksichtigt. Als Quelle wird eine ungerichtet ins Freie abstrahlende Punktschallquelle am Ort des Rotormittelpunktes angenommen. Die Richtwirkungskorrektur erhält einen festen Wert von $D_c = 0$ dB. Die Dämpfung aufgrund des Bodeneffektes wird unabhängig von der Frequenz, den Bodeneigenschaften und der Entfernung zur Quelle festgelegt mit $A_{gr} = -3$ dB. Sie berücksichtigt, dass es bei der Windenergieanlage als hochliegende Quelle zu lediglich einer Bodenreflexion kommt. Es wird keine Meteorologiedämpfung berücksichtigt ($C_{met} = 0$ dB). Mit diesen Anpassungen führt das Interimsverfahren tendenziell zu höheren Beurteilungspegeln, wodurch im Sinne des Immissionsschutzes eine konservativere und damit verlässlichere Prognose gewährleistet wird.

7 Modellierung

Die in den Grundlagen dargestellten Prognoseverfahren bilden die Grundlage für die Berechnung und Beurteilung der Schallausbreitung bei Windenergieanlagen. In der praktischen Anwendung sind diese Verfahren jedoch äußerst umfangreich und komplex. Bereits bei einfachen Szenarien muss eine Vielzahl von Einflussgrößen berücksichtigt werden. Eine manuelle Berechnung wäre nicht nur mit erheblichem Aufwand verbunden, sondern auch sehr fehleranfällig.

Vor diesem Hintergrund haben sich spezialisierte Softwarelösungen etabliert, die die Vorgaben von Normen wie der DIN ISO 9613-2 und deren Erweiterungen in standardisierten Rechenverfahren umsetzen. Sie stellen sicher, dass die Prognose reproduzierbar, transparent und den Anforderungen der Genehmigungsbehörden entsprechend durchgeführt werden kann. Bekannte Tools sind unter anderem CadnaA [16] und SoundPLAN [17], welche umfangreiche Möglichkeiten zur Simulation, Analyse und Bewertung von Schallausbreitung in komplexen Umgebungen bietet und in zahlreichen Bereichen wie Industrie-, Umwelt- und Verkehrslärbewertung eingesetzt werden.

In der Windenergiebranche wird häufig die Software WindPRO von EMD International A/S genutzt [18]. Sie wurde speziell für Anwendungen im Bereich der Windenergienutzung entwickelt und stellt eine umfassende Planungs- und Analyseumgebung zur Verfügung. Neben der Berechnung von Schallimmissionen unterstützt WindPRO unter anderem die Standortbewertung, die Auslegung von Windparklayouts sowie verschiedene umweltrelevante Analysen. Aus diesem Grund ist es besonders für Planer, Projektierer und Gutachter von Windparks geeignet.

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Software WindPRO vorgestellt und die relevanten Module für die Schallprognose sowie die Implementierung der Prognoseverfahren erläutert. Darauf aufbauend erfolgt die Modellierung eines konkreten Projektszenarios.

7.1 Grundlagen von WindPRO

Die Software WindPRO zählt zu den bekanntesten Planungstools für Windenergieprojekte. Sie wurde 1986 von der dänischen Firma EMD International A/S entwickelt und wird kontinuierlich erweitert. Ziel ist es, sämtliche Arbeitsschritte von der Standortbewertung über die technische Auslegung bis zu umweltrelevanten Gutachten in einer Plattform zusammenzuführen.

Typisch für WindPRO ist der modulare Aufbau, der eine flexible Anpassung an unterschiedliche Projektanforderungen ermöglicht. Wie in Abbildung 5 dargestellt, können Anwender aus einer Vielzahl spezialisierter Module wählen, die jeweils bestimmte Aufgaben übernehmen, von der Ertragsberechnung über die Wirtschaftlichkeitsanalyse bis hin zur Bewertung von Umweltauswirkungen. Grundlage bildet dabei stets das BASIS-Modul, das sämtliche Projekt- und Standortdaten verwaltet, GIS- und Geländemodelle integriert und mit umfangreichen Datenbanken wie dem WEA-Katalog (mehr als 1100 Anlagentypen) verknüpft ist [19].

Die Module von WindPRO lassen sich in vier zentrale Funktionsbereiche gliedern, die unterschiedliche Aufgaben im Planungs- und Bewertungsprozess von Windenergieprojekten übernehmen. Der Bereich Energy & Siting umfasst Werkzeuge zur Analyse der Standortbedingungen, zur Erstellung langjähriger Windstatistiken und zur Berechnung des erwarteten Energieertrags unter Berücksichtigung von Verlusten und Unsicherheiten. Dazu zählen unter anderem die Auswertung von Windmessdaten (METEO), die Langzeitkorrelation von Winddaten (Measure Correlate Predict) und die Energieertragsberechnung (PARK). Weitere Funktionen unterstützen die Bewertung der Anlagenauslastung sowie die Optimierung des Anlagenlayouts im Hinblick auf Energieproduktion und Wirtschaftlichkeit.

Der Bereich Environmental befasst sich mit der Untersuchung und Bewertung von Umweltauswirkungen. Hierzu gehören die Berechnung von Schallimmissionen (DECIBEL), Verschattungsanalysen (SHADOW), Blendgutachten (GLARE) sowie Bewertungen möglicher Beeinträchtigungen durch Sichtbarkeit oder Radarstörungen (ZVI). Mit dem Modul IMPACT lassen sich zudem zusammenfassende Umweltberichte für Genehmigungsverfahren erstellen.

Im Bereich Visualisation werden Werkzeuge bereitgestellt, mit denen geplante Windenergieanlagen realitätsnah dargestellt werden können. Dazu zählen die Integration von Anlagen in Landschaftsaufnahmen (PHOTOMONTAGE), animierte Visualisierungen (ANIMATION) sowie eine Schnittstelle zu externen 3D-Modellierungsprogrammen (SketchUp Integration).

Der vierte Bereich, Planning, deckt wirtschaftliche und technische Aspekte der Projektplanung ab. Mit WINDBANK können Wirtschaftlichkeitsanalysen durchgeführt werden, während eGRID die Berechnung und Auslegung elektrischer Netzanschlüsse unterstützt. Diese Funktionen gewährleisten eine umfassende Planung, bei der technische Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Genehmigungsfähigkeit berücksichtigt werden.

Im Bereich der Schallprognose bietet WindPRO mit dem DECIBEL-Modul ein leistungsfähiges Werkzeug, das die in Deutschland maßgeblichen Berechnungsverfahren DIN ISO 9613-2, das alternative Verfahren sowie das Interimsverfahren integriert. Damit unterstützt die Software nicht nur eine sichere Prognose, sondern auch die rechtssichere Dokumentation im Rahmen von Genehmigungsverfahren [20].

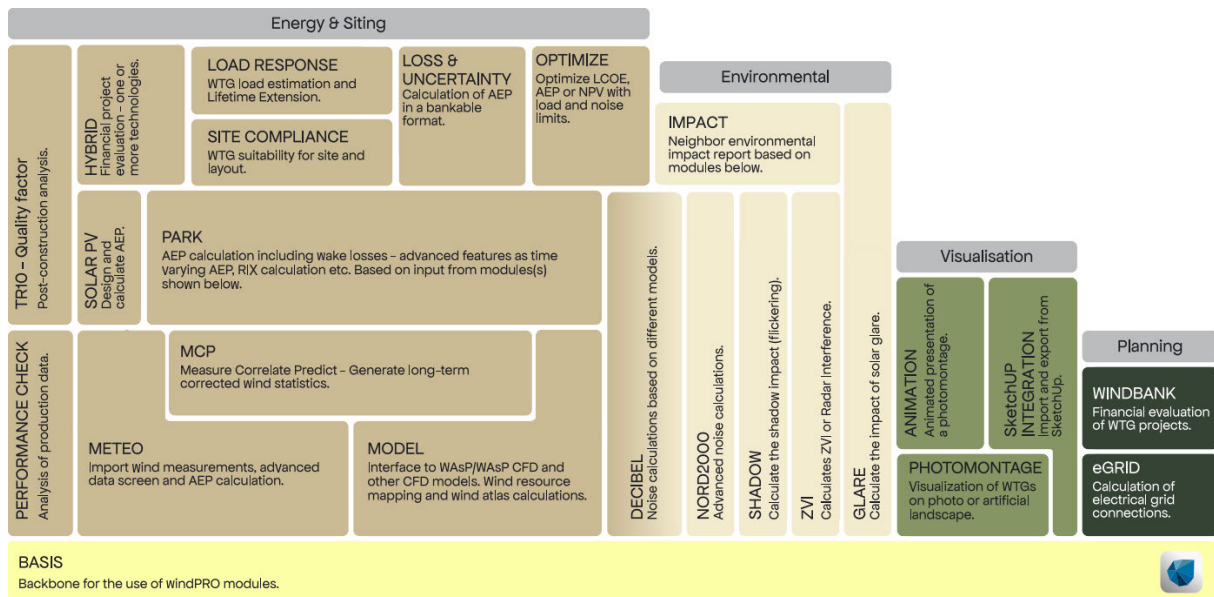


Abbildung 5: Das Basismodul mit den vier Funktionsbereichen und deren Module
 Quelle: [https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Hauptseite_\(DE\)](https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Hauptseite_(DE)) [21]

7.2 Anwendung von WindPRO

Die Anwendung von WindPRO erfolgt innerhalb einer klar strukturierten Benutzeroberfläche wie in Abbildung 6 dargestellt. Über das Menüband werden alle Module und Werkzeuge der Software aufgerufen, die für die unterschiedlichen Anwendungen benötigt werden. Die Objektliste dient zur Verwaltung aller projektrelevanten Elemente wie Windenergieanlagen, Immissionspunkte oder Geländedaten. Diese werden in der Arbeitskarte räumlich dargestellt, die als visuelle Arbeitsfläche fungiert und die Kontrolle von Standorten, Abständen und topografischen Gegebenheiten ermöglicht. Ergänzend erlaubt der Objektlayerbereich die gezielte Steuerung der Sichtbarkeit einzelner Ebenen, sodass spezifische Objekte oder Datensätze wahlweise in der Arbeitskarte ein- oder ausgeblendet werden können.

Das Berechnungsfenster bildet die Basis für alle Simulationen innerhalb eines Projekts. Hier werden die angelegten Berechnungen mit den zugehörigen Parametern verwaltet. Neue Simulationen können gestartet oder bestehenden Berechnungen bei geänderten Eingabedaten erneut ausgeführt werden. Die Annahmen und Ergebnisse, einer abgeschlossenen Rechnung, können in Form von voreingestellten Dokumenten ausgegeben werden. Die berechneten Ergebnisse werden zusätzlich im Ergebnislayer ausgegeben, der eine visuelle Darstellung von Schallimmissionen, Isophonen oder Schattenwurfzonen ermöglicht. Die Layer können individuell angepasst, farblich dargestellt oder exportiert werden. Darüber hinaus bietet WindPRO die Möglichkeit, Vergleichslayer als Differenz zweier Ergebnislayer zu erzeugen. Das gibt dem Anwender die Möglichkeit unterschiedliche Ergebnisse miteinander zu vergleichen und zu bewerten.

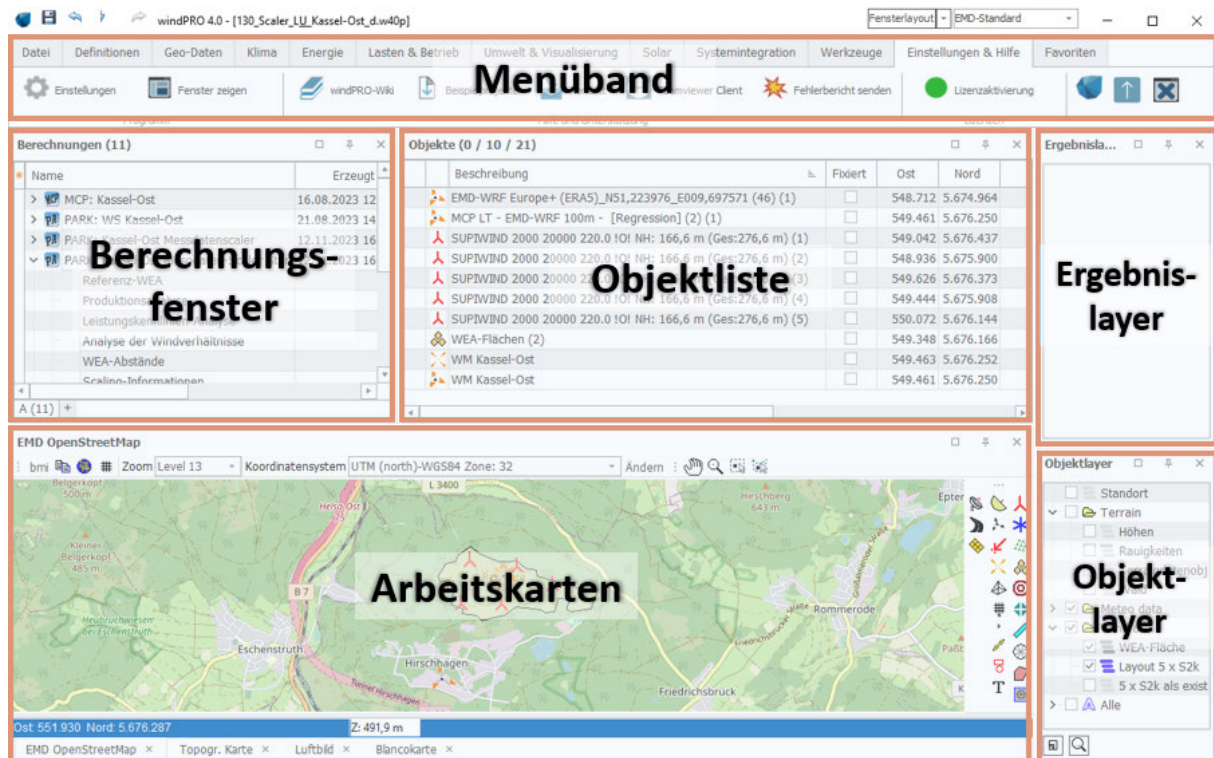


Abbildung 6: Benutzeroberfläche WindPRO 4.0

Quelle: [https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Hauptseite_\(DE\)](https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Hauptseite_(DE)) [21]

8 Praxisbeispiel

In den vorherigen Kapiteln wurden die theoretischen Grundlagen sowie die Software WindPRO als Hilfsmittel für die Schallprognose vorgestellt. Auf dieser Basis wird im Folgenden ein Praxisbeispiel modelliert, das als Ausgangspunkt für die systematische Analyse der frequenzabhängigen Schallausbreitung im Freien dient.

Um das Verhalten der sich überholenden Isophonen zu veranschaulichen, werden die Eigenschaften eines realitätsnahen Windparks herangezogen, bei dem dieses Phänomen in der Modellierung beobachtet wird. Aus Datenschutz- und Vertraulichkeitsgründen wird der Windpark anonymisiert und an einen anderen Standort in Deutschland verlegt. Auf diese Weise lässt sich das beobachtete Verhalten nachbilden, ohne projekt- und herstellerspezifische Details offenzulegen.

Das Praxisbeispiel dient dazu, die frequenzabhängige Schallausbreitung unter kontrollierten Bedingungen in WindPRO 4.1 nachzubilden. Auf Grundlage der berechneten Immissionspegel können die im ersten Kapitel formulierten Fragestellungen weiterführend untersucht und systematisch analysiert werden. Ziel ist es, die Ursache des Phänomens der überholenden Isophonen detailliert zu untersuchen, die Ergebnisse darzustellen und mögliche Schlussfolgerungen zur Frequenzabhängigkeit zu ziehen.

8.1 Standortbeschreibung und Annahmen

Für die Modellierungen wurde ein fiktiver Standort in Schleswig-Holstein gewählt. Die Region zeichnet sich durch weitgehend flaches Gelände aus und ist daher für die Untersuchung der Schallausbreitung besonders geeignet, da topografische Einflüsse weitgehend ausgeschlossen werden können. Der genaue Standort für die Modellierungen befindet sich in Richtung Sankt Peter-Ording im Kreise Nordfriesland.

Der betrachtete Windpark (Windpark I) umfasst zwei zurückzubauende Anlagen (WEA I & WEA II) sowie zwei neu zu errichtende Anlagen (WEA n I & WEA n II). Die wesentlichen technischen Eigenschaften wie Nennleistung, Nabenhöhe, Rotordurchmesser und Summenschallleistungspegel sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Um keine Rückschlüsse auf die Anlagentypen treffen zu können, wird ein Spektrum für die Rotordurchmesser angegeben. Es ist zu beachten, dass es sich bei dem Szenario um unterschiedliche Anlagentypen handelt. Die Eigenschaften der zurückzubauenden Anlagen weisen auf zwei verschiedene Anlagentypen hin. Die neu zu errichtenden Anlagen haben die gleichen Eigenschaften.

WEA I unterscheidet sich deutlich von der WEA II und den neu zu errichtenden Anlagen im Hinblick auf die Nennleistung und den Rotordurchmesser. Die Nennleistung unterscheiden sich um 2.000 kW, der Rotordurchmesser um 36 Meter und der Nabenhöhe um lediglich 2 m. Trotz der geringeren Leistung hat die WEA I den höchsten Summenschallleistungspegel von 107 dB(A). Die WEA II weist die gleichen Eigenschaften wie die WEA I n und die WEA II n auf. Die Summenschallleistungspegel des Zubaus sind gesamt etwas geringer als die vom Rückbau.

Die WEA II unterscheidet sich zu den neu zu errichtenden Anlagen lediglich im Oktavbandspektrum. In Tabelle 6 liegen die frequenzabhängige Schallemissionsdaten der unterschiedlichen WEA in Oktavbändern vor, die eine detaillierte Analyse der frequenzabhängigen Schallausbreitung ermöglichen.

Tabelle 5: Eigenschaften von Windpark I

Quelle: Eigene Darstellung

Windpark I: Eigenschaften				
Name WEA	Nennleistung in kW	Nabenhöhe in m	Rotordurchmesser in m	Summenschallleistungspegel in dB(A)
WEA I	3.600	149	120 - 130	107,0
WEA II	5.600	151	160 - 170	106,4
WEA n I	5.600	151	160 - 170	106,4
WEA n II	5.600	151	160 - 170	106,4

Tabelle 6: Oktavbänder von Windpark I

Quelle: Eigene Darstellung

Windpark I: Oktavbänder in dB(A)								
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
WEA I	86,2	93,1	99,4	101,8	102,1	98,0	91,0	72,0
WEA II	87,7	95,2	99,8	101,5	100,4	96,3	89,4	79,6
WEA n I	89,1	98,7	99,0	99,1	100,1	98,8	91,3	79,6
WEA n II	89,1	98,7	99,0	99,1	100,1	98,8	91,3	79,6

8.2 Ergebnisse

Abbildung 7 zeigt die in WindPRO berechneten Isophonen für den Rückbau und den anschließenden Zubau des betrachteten Windparks. Zur besseren Unterscheidung sind die Isophonen des Rückbaus als dünne Linien dargestellt, während die dickeren Linien die Ergebnisse des Zubaus markieren. Bis zur 35 dB(A) Isophone, etwa 1500 m entfernt vom Zentrum des Windparks I, ruft der Zubau niedrigere Schallimmission als der Rückbau hervor. Zwischen den 35 dB(A) Isophone und dem 30 dB(A) Isophone ist eine Überholung zu erkennen. Ab etwa dem 30 dB(A) Isophone, etwa 2300 m entfernt vom Zentrum des Windparks I, sind die Schallimmissionen des Zubaus höher.

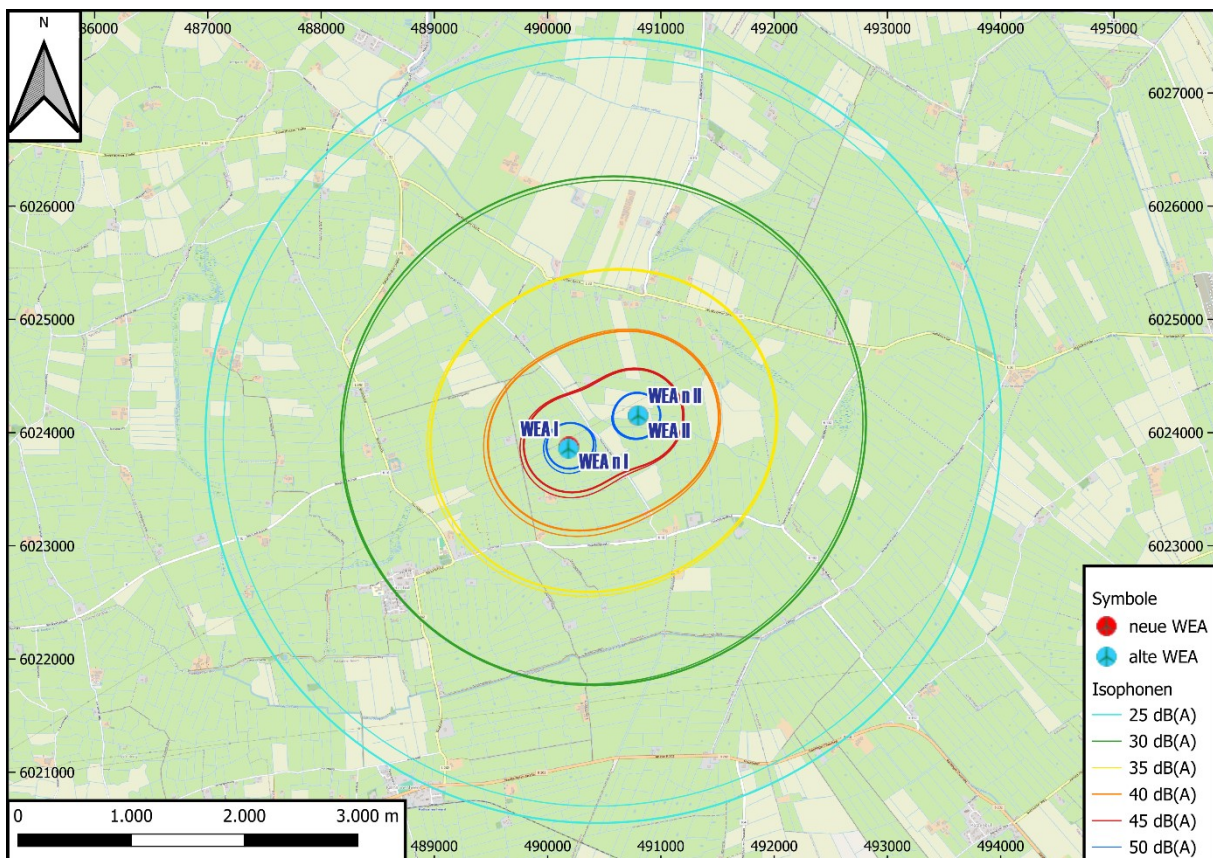


Abbildung 7: Isophonen des Zu- und Rückbaus von Windpark I
Quelle: Eigene Darstellung

Am Ort der Überholung sind die Immissionen des Rückbaus identisch mit den Immissionen des Zubaus. Die Differenz ist an diesem Ort gleich Null. Um den Ort der Überholung zu ermitteln, werden die Ergebnisse des Zubaus vom Rückbau abgezogen. Dies ist in WindPRO mit der Erzeugung eines Vergleichslayers möglich. Die Differenz der beiden Ergebnislayer wird graphisch in der Arbeitskarte angezeigt. Abbildung 8 zeigt die Linie der Überholung für den Windpark I. Die Linie der Überholung ist nicht kreisrund, sondern eher oval, dass liegt an den unterschiedlichen Anlagentypen und ihren Eigenschaften (vgl. Tabelle 5). Durch das Setzen von zwei Immissionspunkten (IP) auf den ersten und letzten Ort der Überholung, ergibt sich die erste Überholung nördlich des Windparks bei 33,3 dB(A) und die letzte Winderholung südwestlich bei 30,5 dB(A).

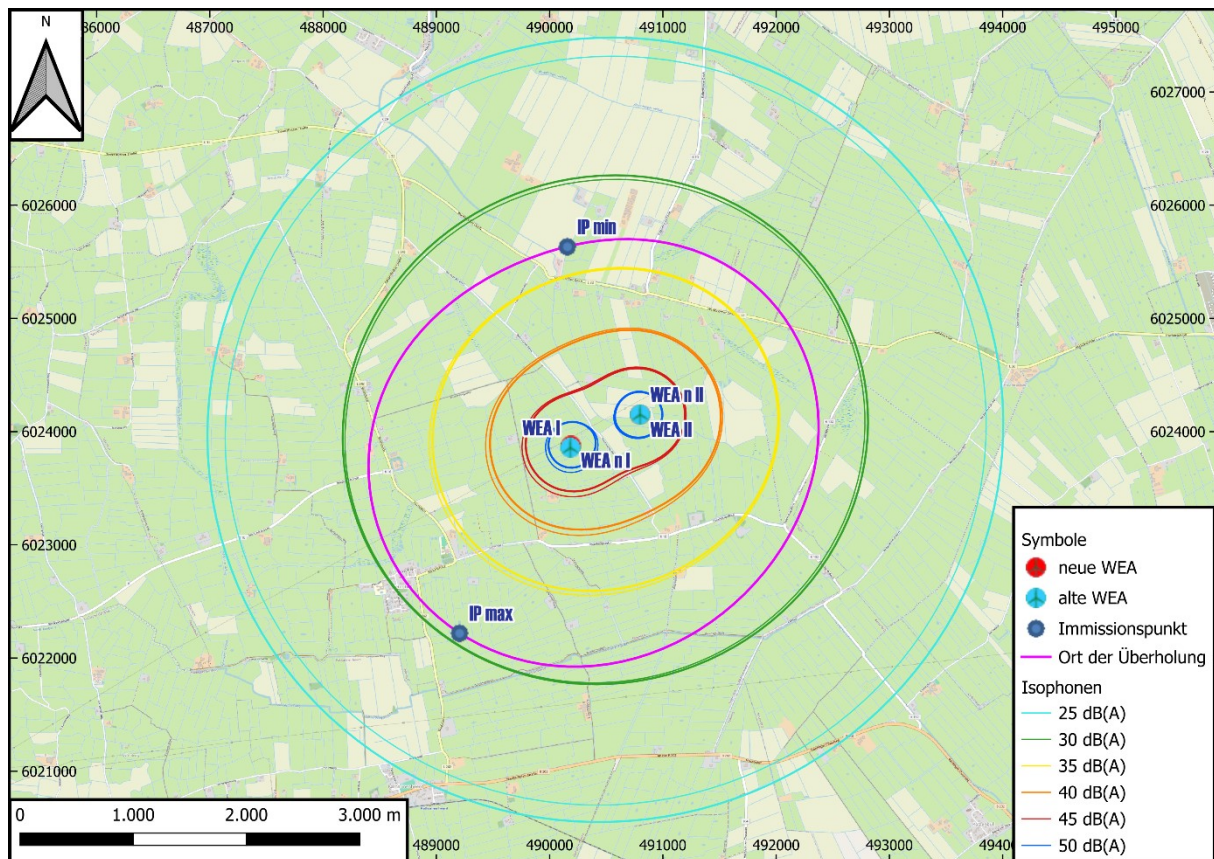


Abbildung 8: Isophonen und Ort der Überholung des Zu- und Rückbaus von Windpark I

Quelle: Eigene Darstellung

Um Aussagen über die Überholung der Isophonen treffen zu können, ist eine genauere Betrachtung der Oktavbänder nötig. In der Tabelle 7 sehen wir die berechnete Differenz zwischen den Oktavspektren der neuen und alten Anlagen. Zur besseren Veranschaulichung sind die Differenzen farblich markiert:

- Negative Werte niedriger als -3 dB(A) sind rot markiert
- Negative Werte zwischen -3 dB(A) und -1 dB(A) sind orange markiert
- Positive Werte zwischen 1 dB(A) und 3 dB(A) sind grün markiert

Auffällig ist, dass bei den alten Anlagen die Werte für die Oktavbänder von 2000 Hz bis 8000 Hz alle niedriger sind als die Werte der neuen Anlagen. Hier sticht besonders die Differenz von $-7,6 \text{ dB(A)}$ bei dem Oktavband von 8000 Hz für WEA I heraus.

Im mittleren Bereich des Oktavspektrum von Oktavband 250 Hz bis 1000 Hz sind alle berechneten Differenzen im positiven Bereich. Somit sind die alten Anlagen in dem Bereich lauter als die neuen Anlagen.

Für den tieffrequenten Bereich von 63 Hz und 125 Hz sind wiederum alle Differenzen im negativen Bereich und damit sind die alten Anlagen in dem Bereich leiser. Besonders deutliche Unterschiede liegen auf dem Oktavband für 125 Hz , dort ist für WEA I eine Differenz von $-5,6 \text{ dB(A)}$ berechnet worden und für WEA II eine Differenz von $-3,5 \text{ dB(A)}$.

Tabelle 7: Differenzen der Oktavbänder von Windpark I
Quelle: Eigene Darstellung

Windpark I: Differenzen der Oktavbänder in dB(A)								
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
WEA n I	89,1	98,7	99,0	99,1	100,1	98,8	91,3	79,6
WEA n II								
WEA I	86,2	93,1	99,4	101,8	102,1	98,0	91,0	72,0
Diff.	-2,9	-5,6	0,4	2,7	2,0	-0,8	-0,3	-7,6
WEA II	87,7	95,2	99,8	101,5	100,4	96,3	89,4	79,6
Diff.	-1,4	-3,5	0,8	2,4	0,3	-2,5	-1,9	0,0

Ergänzend zu diesen Auffälligkeiten, ist es interessant herauszufinden ob unterschiedlich Frequenzen unterschiedliche Auswirkungen auf den Summenschallleistungspegel haben. Zur weiteren Betrachtung wird Gleichung (2.5) aus den Grundlagen herangezogen. Wenn die Formel für den Schallleistungspegel nach Leistung umgestellt wird, erhalten wir Gleichung (8.1).

$$P = P_0 \cdot 10^{\frac{L_W}{10}} \quad (8.1)$$

Die Gleichung (8.1) gilt auch für die Schallleistungspegel der einzelnen Oktavbänder (L_i) und der einzelnen Schallleistungen der Oktavbänder (P_i). Damit ergibt sich die Gleichung (X.2).

$$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (8.2)$$

Mit Gleichung (8.2) lassen sich dann die einzelnen Leistungen der Oktavbänder in Watt berechnen. Um den jeweiligen Anteil am Summenschallleistung zu bestimmen, wird im Nenner die Schallleistung der einzelnen Oktavbänder summiert.

$$\text{Anteil}_i[\%] = \frac{P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}}{\sum_i P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}} \quad (8.3)$$

Damit kürzt sich P_0 raus Gleichung (8.3) und es bleibt die Gleichung (8.4).

$$\text{Anteil}_i[\%] = \frac{10^{\frac{L_i}{10}}}{\sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}} \quad (8.4)$$

Für L_i können wir jetzt die dB(A) Werte der Oktavbänder eintragen. Die Summen im Nenner kann aus dem Summenschallleistungspegel berechnet werden. Die Gleichung (8.5) zeigt eine Beispielrechnung mit den Werten aus Tabelle aus 5 und 6 für das Oktavband 63 Hz der WEA n I.

$$\frac{10^{\frac{89,1}{10}}}{10^{\frac{106,4}{10}}} = 0,0187 = 1,87\% \quad (8.5)$$

Für jede WEA und jedes Oktavband wurden die Anteile ausgerechnet und sind in der Tabelle 8 dargestellt. Eine ausführliche Rechnung ist im Anhang A zu finden. In der darauffolgenden Abbildung 9 sind die Anteile für die drei unterschiedlichen Oktavspektren gegenübergestellt.

Tabelle 8: Relative Anteile am Summenschallleistungspegel von Windpark I
Quelle: Eigene Darstellung

Windpark I: relative Anteile am Summenschallleistungspegel in %								
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
WEA I	0,83	4,07	17,38	30,21	32,37	12,59	2,51	0,03
WEA II	1,35	7,57	21,82	32,27	25,05	9,75	1,99	0,21
WEA n I	1,87	17,02	18,24	18,66	23,49	17,42	3,10	0,21
WEA n II								

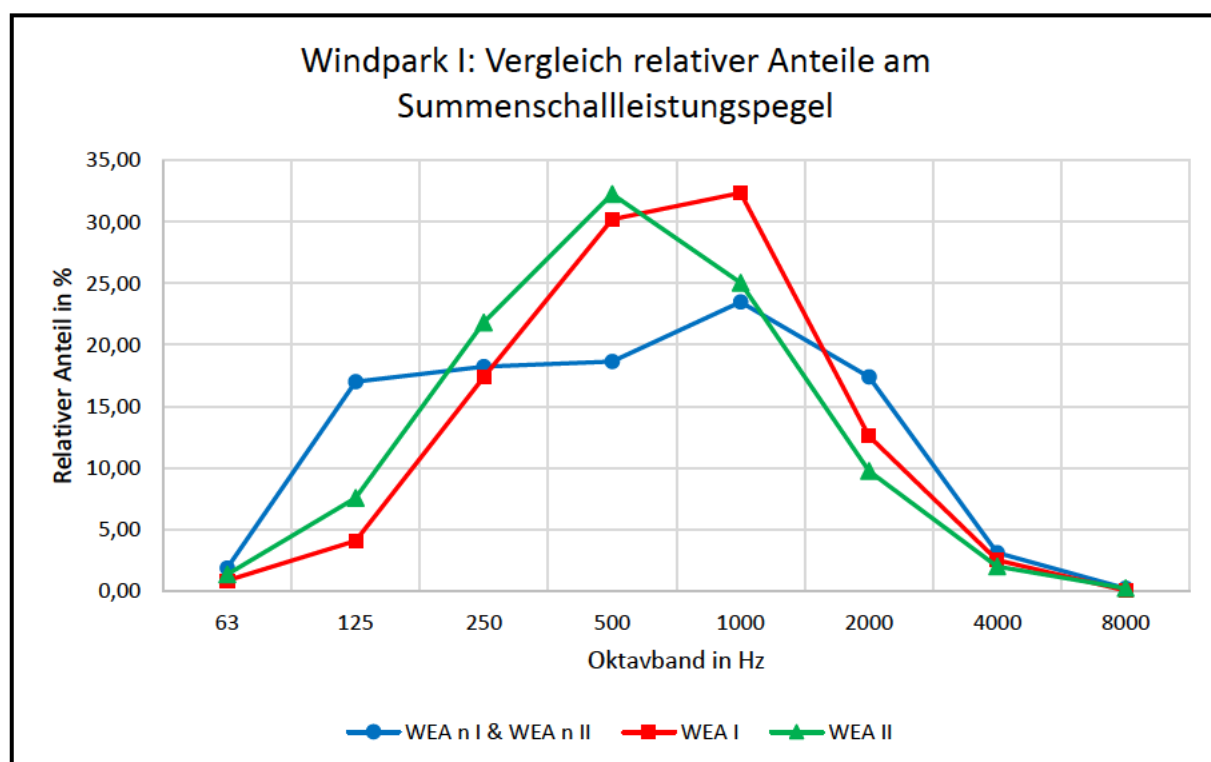


Abbildung 9: Vergleich relativer Anteile am Summenschallleistungspegeln von Windpark I
Quelle: Eigene Darstellung

Für jedes Oktavband sind die relativen Anteile am Summenschallleistungspegel unterschiedlich. Auffällig ist, dass bei den rückzubauenden Anlagen die Oktavbänder von 500 Hz und 1000 Hz etwa 2/3 des Summenschallleistungspegels abdecken. Im Vergleich dazu, wird bei den neu zu errichtenden Anlagen das Frequenzspektrum breiter genutzt (vgl. Abbildung 9). Für die Oktavbänder von 125 Hz bis 2000 Hz sind die relativen Anteile deutlich gleichmäßiger verteilt. Beim Betrachten der tieffrequenten Anteile 63 Hz und 125 Hz fällt auf, dass bei den neuen Anlagen das Oktavband für 125 Hz doppelt bis

vierfach so stark belegt ist, wie bei den rückzubauenden Anlagen. Die rückzubauenden Anlagen sind bei den Oktavbändern von 500 Hz und 1000 Hz deutlich dominanter und machen Anteile bis zu etwas über 32% von der Summenschallleistung aus. Für die Oktavbänder von 2000 Hz haben die neuen Anlagen den höchsten Anteil von etwa 17,4 %. Im hochfrequenten Bereich von 4000 Hz und 8000 Hz weisen die neuen Anlagen etwas höhere Werte auf.

8.3 Bewertung

Die relativen Anteile der Oktavbänder können nun mit den Isophonen verglichen werden. Dabei können einige Zusammenhänge festgestellt werden. Im näheren Umfeld um den Windpark I weisen die neuen Anlagen geringere Immissionen als die rückzubauenden Anlagen auf. Dies könnte dadurch begründet werden, dass die Oktavbänder von 500 Hz und 1000 Hz bei den neuen Anlagen weniger stark belegt sind. Mit dem Wissen aus den Grundlagen, können angenommen werden, dass diese sich nicht so weit wie die tiefen Frequenzen in der Umgebung ausbreiten und dadurch im Nahbereich deutlich dominanter und signifikanter sind. Besonders im Nahbereich bestimmen die mittleren Oktavbänder von 500 Hz und 1000 Hz, wie hoch die Immissionen einer Anlage sind.

Durch den höheren Anteil an tiefen Frequenzen bei den neuen Anlagen ist anzunehmen, dass sich dadurch der Schall weiter ausbreitet und die Isophone der neuen Anlagen, die der alten Anlagen überholen.

9 Versuche mit einer WEA

Das Praxisbeispiel hat gezeigt, dass die beobachtete Überholung der Isophonen durch Unterschiede im Oktavspektrum der betrachteten WEA erklärt werden können. Um dieses Phänomen systematisch zu überprüfen, wird im Folgenden nur eine WEA betrachtet. Hierfür werden fiktive Oktavbänder definiert, mit deren Hilfe die Auswirkungen einzelner Frequenzbereiche auf die Schallausbreitung isoliert untersucht werden können.

9.1 Versuch I - Vorgehen und Annahmen

Für die Untersuchung wird eine vereinfachte Modellumgebung gewählt, in der ausschließlich eine einzelne WEA betrachtet wird. Damit werden Einflüsse durch unterschiedliche Anlagentypen und komplexe Layouts vermieden, sodass das Frequenzspektrum als alleinige Variable im Fokus steht.

Um die Vergleichbarkeit der Modellierungen sicherzustellen, werden sämtliche technischen und atmosphärischen Rahmenbedingungen konstant gewählt. Dabei wird die Nabenhöhe auf 150 m und der Summenschallleistungspegel auf 105 dB(A) festgelegt. Der Standort ist identisch zum Praxisbeispiel gewählt und befindet sich in Schleswig-Holstein in der Nähe von Sankt Peter-Ording. Die Region zeichnet sich durch weitgehend flaches Gelände aus und ist daher für die Untersuchung der Schallausbreitung besonders geeignet, da topografische Einflüsse weitgehend ausgeschlossen werden können. Die atmosphärischen Bedingungen werden mit einer Temperatur von 10 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % angesetzt, sodass keine zusätzlichen Unterschiede durch variable Dämpfungseffekte entstehen. In der Realität haben Nennleistung und Rotordrehzahl einen maßgeblichen Einfluss auf die Schallemissionen einer WEA und werden hier als konstant angenommen. In dieser Untersuchung ist die Belegung der Oktavbänder fiktiv festgelegt. Die genannten Einflussgrößen sind bereits im Spektrum berücksichtigt und wirken sich auf die Modellierung nicht zusätzlich aus.

Die Variationen erfolgen ausschließlich über die Verteilung der Schallleistung auf die einzelnen Oktavbänder. Dabei sollen zunächst drei Szenarien modelliert werden, die unterschiedliche Schwerpunkte setzen:

- tieffrequenzlastig (Schwerpunkt im Bereich 63 Hz - 250 Hz)
- mittelfrequenzlastig (Schwerpunkt im Bereich 500 Hz - 1000 Hz)
- hochfrequenzlastig (Schwerpunkt im Bereich 2000 Hz - 8000 Hz)

Diese Szenarien erlauben es, die Wirkung einzelner Frequenzbereiche auf die Schallleistung gezielt zu untersuchen. Erwartet wird, dass sich im Nahbereich der WEA vor allem die mittleren Frequenzen (500 Hz – 1000 Hz) und hohen Frequenzen (ab 2000 Hz) durchsetzen, während in größerer Entfernung

die tiefen Frequenzen (63Hz – 250 Hz) überwiegen. Die fiktiven Oktavbänder sind in der folgenden Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Oktavbänder von Versuch I
Quelle: Eigene Darstellung

Versuch I: Oktavbänder in dB(A)								
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
tieffrequenzlastig	102,0	102,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
mittelfrequenzlastig	1,0	1,0	1,0	102,0	102,0	1,0	1,0	1,0
hochfrequenzlastig	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	102,0	102,0

9.2 Ergebnis und Bewertung

Die Abbildungen 10 bis 12 zeigen graphisch die Ergebnisse der in 9.1 beschriebenen Modellierungen in WindPRO. In jeder Abbildung ist der Maßstab identisch gewählt, um den Unterschied der räumlichen Ausbreitung der Isophonen zu verdeutlichen. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Isophonen des tieffrequenzlastigen Szenarios (Abbildung 10) am weitesten ausbreiten. Das mittelfrequenzbetonte Szenario (Abbildung 11) weist eine geringere Ausdehnung der Isophonen auf, während die hochfrequentlastige Variante (Abbildung 12) die kleinste Ausbreitungsreichweite zeigt. Damit bestätigt der Versuch, dass bei einem tieffrequenzlastigen Spektrum die Dämpfung am geringsten ist und der Schall sich somit am weitesten ausbreitet.

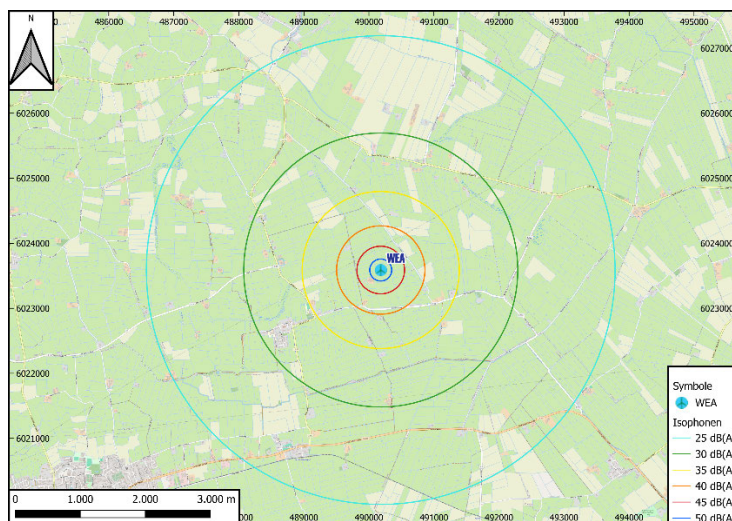


Abbildung 10: Schallimmissionen hervorgerufen durch ein tieffrequenzlastige Schallquelle
Quelle: Eigene Darstellung

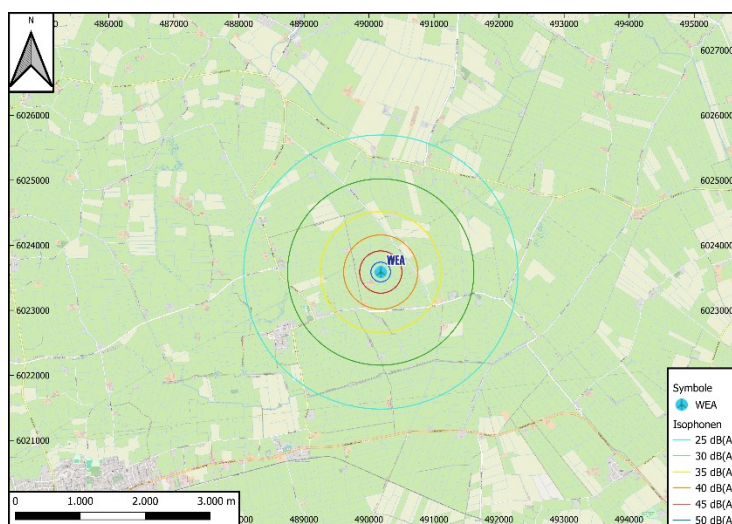


Abbildung 11: Schallimmissionen hervorgerufen durch ein mittelfrequenzlastige Schallquelle
Quelle: Eigene Darstellung

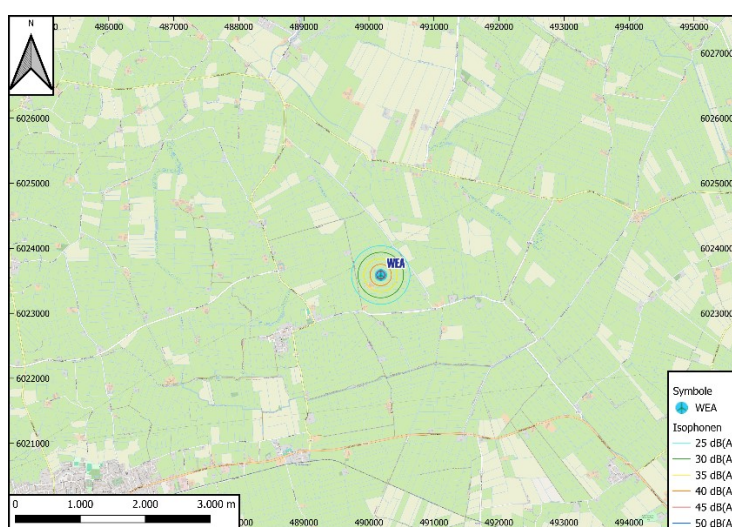


Abbildung 12: Schallimmissionen hervorgerufen durch ein hochfrequenzlastige Schallquelle
Quelle: Eigene Darstellung

10 Überholende Isophonen

Die Ergebnisse der Modellierung im vorherigen Kapitel bestätigen die Annahme, dass sich tieffrequente Schallanteile bei Windenergieanlagen über größere Entfernung ausbreiten als mittlere oder hochfrequente Anteile. Dies verstärkt die Vermutung, dass bei Vergleich zweier Oktavspektren das tieffrequenzlastigere Spektrum mit zunehmender Distanz eine Überholung der Isophonen verursachen kann. Aufbauend auf dieser Vermutung soll im folgenden Kapitel systematisch untersucht werden, unter welchen spektralen Bedingungen eine solche Überholung auftritt.

10.1 Vorgehen und Annahmen

Für die Untersuchung wird angenommen, dass sich zwei baugleiche Windenergieanlagen lediglich durch die spektrale Zusammensetzung ihrer Schallleistungspegel unterscheiden. Der Summenschallleistungspegel beider Anlagen ist identisch, sodass Unterschiede in der Schallausbreitung ausschließlich auf die Oktavbandverteilung zurückzuführen sind. Eine Anlage dient als Referenz (Referenzspektrum) mit einem festgelegten, realitätsnahen Oktavspektrum, während bei der zweiten Anlage (Zielspektrum) gezielt einzelne oder mehrere Oktavbänder verändert werden.

Würden einzelne oder mehrere Schallleistungspegel der Oktavbänder angepasst werden, verändert sich der Summenschallleistungspegel. Um sicherzustellen, dass der Summenschallleistungspegel konstant bleibt, wird nach jeder Änderung eine Kompensation durchgeführt. Dabei werden die Schallleistungspegel mehrerer Oktavbänder um einen einheitlichen Pegeloffset (x) angepasst, sodass die Schallleistung lediglich über die acht Oktavbänder umverteilt wird und somit der Summenschallleistungspegel konstant bei einem Wert von 105 dB(A) bleibt. Zur Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit werden alle Oktavbänder der Kompensation mit einem einheitlichen Pegeloffset x belegt. Eine differenzierte Belegung einzelner Oktavbänder wäre zwar theoretisch möglich, würde jedoch die Klarheit der Zusammenhänge zwischen Oktavbandänderung und Kompensation minder und die Auswertung deutlich komplexer gestalten.

Der einheitliche Pegeloffset der Kompensation kann auf Grundlage des Summenschallleistungspegels aus Gleichung (10.1) gebildet werden.

$$\text{Summenschallleistungspegel: } L_{\Sigma} = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (10.1)$$

Der Summenschallleistungspegel kann für die Kompensation gedanklich unterteilt werden in:

- Zielbänder/-band: $Z = \sum 10^{\frac{L_Z}{10}}$
- Kompensationsbänder: $K = \sum 10^{\frac{L_K}{10}}$

- Restliche Bänder: $R = \sum 10^{\frac{L_r}{10}}$

Damit ergibt sich für das Referenzband die Gleichung (10.2).

$$L_{\Sigma,Ref} = 10 \log_{10}(Z + K + R) \quad (10.2)$$

Die Zielbänder werden um Δ_z dB(A) erhöht. Damit wird aus Z, Z' in Gleichung (10.3).

$$Z' = Z \cdot 10^{\frac{\Delta_z}{10}} = \sum_{z \in Z} 10^{\frac{(L_z + \Delta_z)}{10}} \quad (10.3)$$

Für die Kompensationsbänder ergänzen wir den einheitlichen Pegeloffset x . Daraus ergibt sich K' in Gleichung (10.4).

$$K' = K \cdot 10^{\frac{x}{10}} = \sum_{k \in K} 10^{\frac{(L_k + x)}{10}} \quad (10.4)$$

Die restlichen Bänder R' bleiben unverändert und somit gilt Gleichung (10.5).

$$R' = R \quad (10.5)$$

Daraus ergibt sich für die veränderte Oktavspektrum die Gleichung (10.6).

$$L_{\Sigma,Neu} = 10 \log_{10}(Z' + K' + R') \quad (10.5)$$

Um nun den einheitlichen Pegeloffset x für die Kompensation zu erhalten werden $L_{\Sigma,Ref}$ und $L_{\Sigma,Neu}$ gleichgesetzt und gekürzt. Daraus ergibt sich Gleichung (10.6).

$$L_{\Sigma,Ref} = L_{\Sigma,Neu} \Rightarrow Z + K = Z \cdot 10^{\frac{\Delta_z}{10}} + K \cdot 10^{\frac{x}{10}} \quad (10.6)$$

Nach x aufgelöst folgt Gleichung (10.7).

$$x = 10 \log_{10} \left(1 - \frac{Z}{K} \left(10^{\frac{\Delta_z}{10}} - 1 \right) \right) \quad (10.7)$$

Mit Gleichung (10.7) lässt sich der einheitliche Pegeloffset (x) für die Kompensation berechnen. Die Voraussetzung ist, dass die Zielbänder je um einen einheitlichen Wert erhöht werden.

10.2 Versuch II – Änderung einzelner Oktavbänder im tieffrequenten Bereich

Wie in Kapitel 10.1 beschrieben, wird ein Szenario mit zwei baugleichen Windenergieanlagen modelliert. Zunächst werden für die Zielspektren (Ziels.) die Oktavbänder 63 Hz bis 500 Hz systematisch um +2,0 dB(A) erhöht. Für die Kompensation werden die Oktavbänder 2000 Hz bis 8000 Hz genutzt. Diese Oktavbänder eignen sich besonders gut für die Kompensation, weil die frequenzabhängige A-Bewertung tiefere Anteile stärker abschwächt und hochfrequente Anteile stärker gewichtet (vgl. Tabelle 1). Das Referenzspektrum (Refs.) bleibt dauerhaft unverändert mit einem konstanten Summenschallleistungspegel von 105,0 dB(A). Das Referenzspektrum, die Zielspektren und die Kompensationen werden in Tabelle 10 dargestellt. Eine ausführliche Rechnung ist im Anhang B zu finden. Zur besseren Veranschaulichung wurden die veränderten Oktavbänder blau und die Oktavbänder für die Kompensation orange markiert.

Tabelle 10: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffsets von Versuch II
Quelle: Eigene Darstellung

Versuch II: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffsets in dB(A)										
Oktavbänder [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L_{Σ}	x
Refs.	84,0	90,4	96,8	99,7	99,9	97,1	90,0	75,4	105,0	
Ziels.										
+2 dB(A) 63 Hz	86,0	90,4	96,8	99,7	99,9	97,0	89,9	75,3	105,0	-0,1
+2 dB(A) 125 Hz	84,0	92,4	96,8	99,7	99,9	96,6	89,5	74,9	105,0	-0,5
+2 dB(A) 250 Hz	84,0	90,4	98,8	99,7	99,9	94,5	87,4	72,8	105,0	-2,6
+2 dB(A) 500 Hz	84,0	90,4	96,8	101,7	99,9	87,7	80,6	66,0	105,0	-9,4

10.2.1 Hypothese

Anhand der Tabelle 10 und den Ergebnissen aus Kapitel 9 ist zu erwarten, dass alle vier Zielspektren höhere Immissionen aufweisen als das Referenzspektrum. Das Oktavspektrum mit der +2,0 dB(A) Erhöhung im Oktavband 63 Hz wird die höchsten Immissionen aufweisen, aufgrund der Erhöhung des Oktavbands mit der tiefsten Frequenz und des geringen Pegeloffsets auf den Kompensationsbändern. Daraufhin folgt das Szenario +2,0 dB(A) im Oktavband 125 Hz, +2,0 dB(A) im Oktavband 250 Hz und dann +2,0 dB(A) im Oktavband 500 Hz.

10.2.2 Ergebnisse

Die Abbildungen 13 und 14 zeigen die Ergebnisse der Modellierung von Versuch II. Wie erwartet hat das Referenzspektrum für die geringsten Immissionen gesorgt. Überraschend ist, dass das Oktavspektrum mit +2,0 dB(A) Erhöhung auf Oktavband 63 Hz die geringsten Immissionen verursacht. In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass die Immissionen des Oktavspektrums mit +2,0 dB(A) Erhöhung auf Oktavband 63 Hz leicht höher sind als die des Referenzbandes. Die höchsten Immissionen entstehen durch das Oktavspektrum mit +2,0 dB(A) im Oktavband 500 Hz. Bei dem Versuch die tiefenfrequenten Oktavbänder stärker zu belegen, konnte keine Überholung der der Isophonen zwischen den Zielspektren und dem Referenzspektrum bei gleichbleibendem Summenschallleistungspegel festgestellt werden.

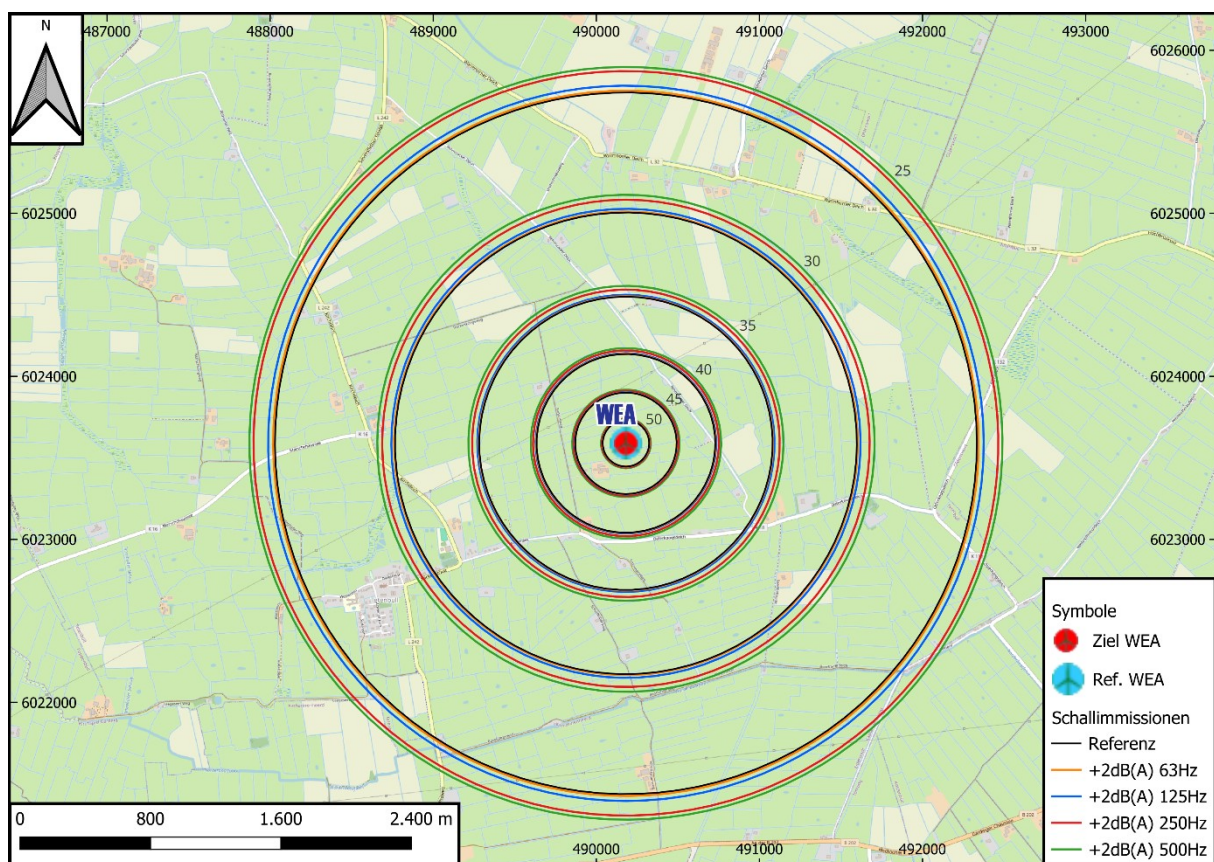


Abbildung 13: Visuelle Ergebnisse der Modellierung von Versuch II
Quelle: Eigene Darstellung

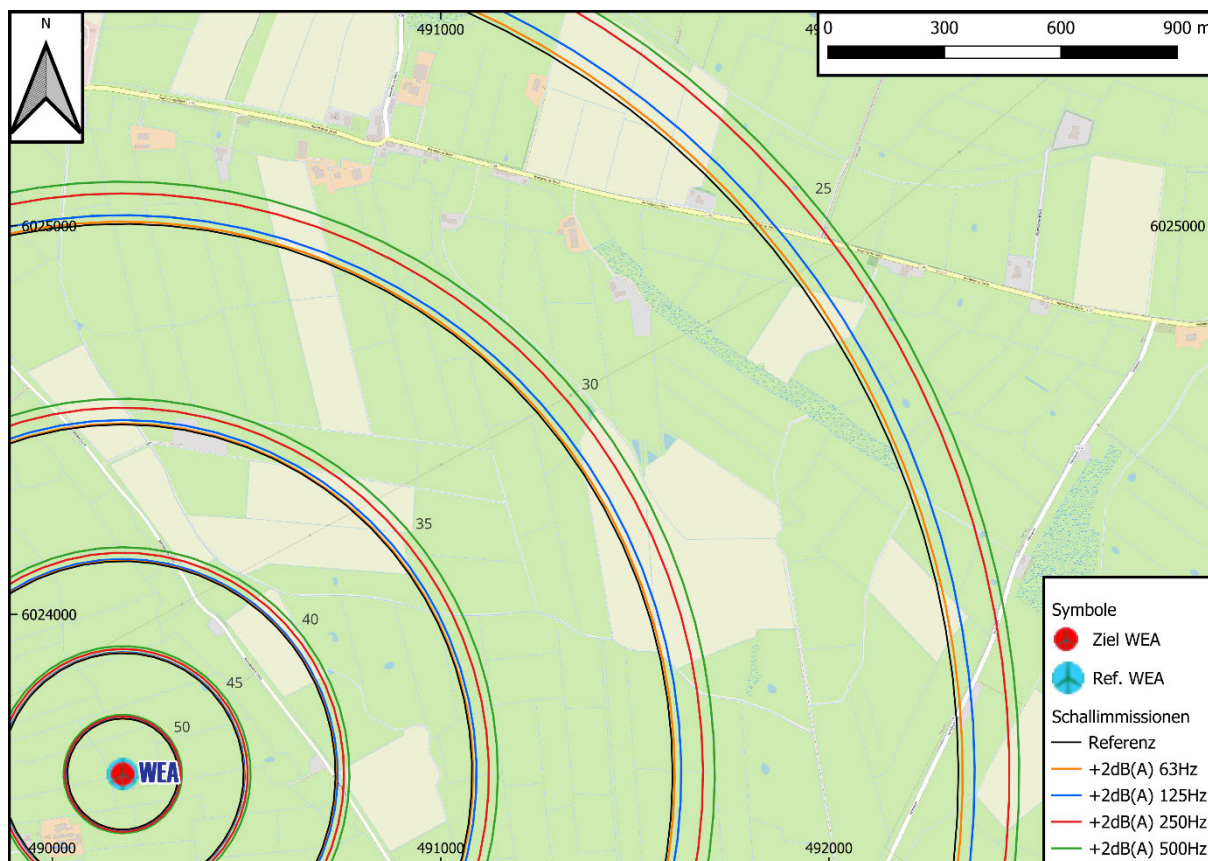


Abbildung 14: Visuelle Ergebnisse der Modellierung von Versuch II vergrößert
Quelle: Eigene Darstellung

10.2.3 Bewertung

Um die Ergebnisse der Modellierung nachvollziehen zu können, sind in Tabelle 11 die relativen Anteile der Oktavbänder an der Summenschallleistung der +2,0 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 63 Hz, 500 Hz und des Referenzbands dargestellt. Eine ausführliche Berechnung der relativen Anteile ist in Anhang B zu finden. Entgegen der ursprünglichen Hypothese breitet sich jedoch nicht das Spektrum mit der Erhöhung des tieffrequenten 63 Hz Oktavbands am weitesten aus, sondern das mit der Erhöhung des 500 Hz Oktavbands.

Bei der Erhöhung des 63 Hz Oktavbands um +2,0 dB(A) und einem Pegeloffset von $-0,1$ dB(A) steigt der relative Anteil dieses Oktavbands 63 Hz von 0,80 % auf 1,27 %, während die relativen Anteile der Kompensationsbänder (2000–8000 Hz) leicht abnehmen. Dies erklärt die nur geringfügig erhöhten Immissionen. Dagegen führt die Erhöhung des 500 Hz Oktavbands um +2,0 dB(A) bei einem Pegeloffset von $-9,4$ dB(A) zu einem deutlichen Anstieg des relativen Anteils des Oktavbands 500 Hz von 29,72 % auf 47,10 %, während sich die Kompensationsbänder um etwa 90 % verringern. Damit steigt der relative Anteil dieses Bands auf nahezu die Hälfte des gesamten Pegels, was im Vergleich zum 63 Hz Oktavband zu deutlich höheren Immissionen führt.

Tabelle 11: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren der +2,0 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 63 Hz, 500 Hz und des Referenzbands von Versuch II
 Quelle: Eigene Darstellung

Versuch II: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren der +2,0 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 63 Hz, 500 Hz und des Referenzbands			
Oktavbänder [Hz]	Referenzspektrum Relativer Anteil [%]	Oktavbands 63 Hz Relativer Anteil [%]	Oktavbands 500 Hz Relativer Anteil [%]
63	0,80	1,27	0,80
125	3,49	3,49	3,49
250	15,24	15,24	15,24
500	29,72	29,71	47,10
1000	31,12	31,11	31,12
2000	16,33	15,96	1,87
4000	3,18	3,11	0,37
8000	0,11	0,11	0,01

Die Analyse zeigt, dass nicht allein die Erhöhung tieffrequenter Oktavbänder bei gleichem Summenschallleistungspegel die höchsten Immissionen verursacht, sondern vielmehr das Verhältnis der relativen Anteile der einzelnen Oktavbänder zueinander entscheidend ist. Durch die notwendige Reduzierung der hochfrequenten Kompensationsbänder bei der Erhöhung des 500 Hz Oktavbands verändert sich dieses Verhältnis deutlich. Somit ist die Annahme, dass ausschließlich die Verstärkung tiefer Frequenzen in einem Oktavspektrum höhere Immissionen bewirkt, nicht treffend.

Eine Überholung der Isophone ist beim Vergleich der Immissionen des Referenzspektrums und der Zielspektren nicht festgestellt worden. Einer Erhöhung einzelner tieffrequenter Oktavbänder und der damit verbundenen Kompensation für ein gleichbleibenden Summenschalleistungspegel, sorgen nicht für eine Überholung der Isophonen.

10.3 Versuch III – Änderung einzelner Oktavbänder im hochfrequenten Bereich

Um die Verhältnisse der einzelnen Oktavbänder und die damit verbundene Schallausbreitung genauer zu untersuchen, wird das Szenario aus Versuch II in Versuch III umgekehrt. Die Zielspektren (Ziels.) werden auf den Oktavbändern 1000 Hz bis 8000 Hz systematisch um +2,0 dB(A) erhöht. Als Kompensation dienen die Oktavbänder 63 Hz, 125 Hz und 250 Hz. Das Referenzspektrum (Refs.) bleibt identische zu Versuch II mit einem konstanten Summenschallleistungspegel von 105,0 dB(A). Das Referenzspektrum, die Zielspektren und die Kompensationen werden in Tabelle 12 dargestellt. Eine ausführliche Rechnung ist im Anhang C zu finden. Zur besseren Veranschaulichung wurden die veränderten Oktavbänder blau und die Oktavbänder für die Kompensation orange markiert.

Tabelle 12: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffsets von Versuch III

Quelle: Eigene Darstellung

Versuch III: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffset in dB(A)										
Oktavbänder [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L_{Σ}	x
Refs.	84,0	90,4	96,8	99,7	99,9	97,1	90,0	75,4	105,0	
Ziels.										
+2 dB(A) 1000 Hz	72,3	78,7	85,1	99,7	101,9	97,1	90,0	75,4	105,0	-11,7
+2 dB(A) 2000 Hz	81,1	87,5	93,9	99,7	99,9	99,1	90,0	75,4	105,0	-2,9
+2 dB(A) 4000 Hz	83,6	90,0	96,4	99,7	99,9	97,1	92,0	75,4	105,0	-0,4
+2 dB(A) 8000 Hz	84,0	90,4	96,8	99,7	99,9	97,1	90,0	77,4	105,0	-0,0

10.3.1 Hypothese

Mit den Werten aus Tabelle 11 ist zu erwarten, dass bei einer Erhöhung von +2,0 dB(A) auf den Oktavbänder 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz geringere Immissionen auftreten als beim Referenzspektrum. In Anbetracht der hohen Kompensation von -11 dB(A) bei der Erhöhung von Oktavband 1000 Hz um +2,0 dB(A), sollten bei diesem Szenario die geringsten Immissionen auftreten. Daraufhin folgen höhere Immissionen für die um +2,0 dB(A) erhöhten Oktavbänder 2000 Hz und 4000 Hz. Für die Erhöhung des Oktavbands 8000 Hz um +2,0 dB(A) könnte aufgrund des Pegeloffsets von -0,0 dB(A) und der unveränderten Kompensationsbänder angenommen werden, dass sich dieses Spektrum weiter als das Referenzband ausbreitet.

10.3.2 Ergebnisse

In den Abbildungen 15 und 16 sind die Ergebnisse der Modellierung von Versuch III dargestellt. Wie erwartet, sind die Immissionen der um +2,0 dB(A) erhöhten Oktavbänder 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz geringer als die des Referenzspektrums. Das Oktavband 8000 Hz welches um +2,0 dB(A) erhöht wurde, zeigt nahezu identische Immissionen, wenn nicht sogar etwas niedrigere Immissionen als das Referenzband. Die Immissionen für das Referenzspektrum sind am höchsten und nehmen mit der Belegung absteigender Oktavbänder von 8000 Hz bis 1000 Hz um +2,0 dB(A) ab. Das geänderte Oktavband 1000 Hz hat die niedrigsten Immissionen.

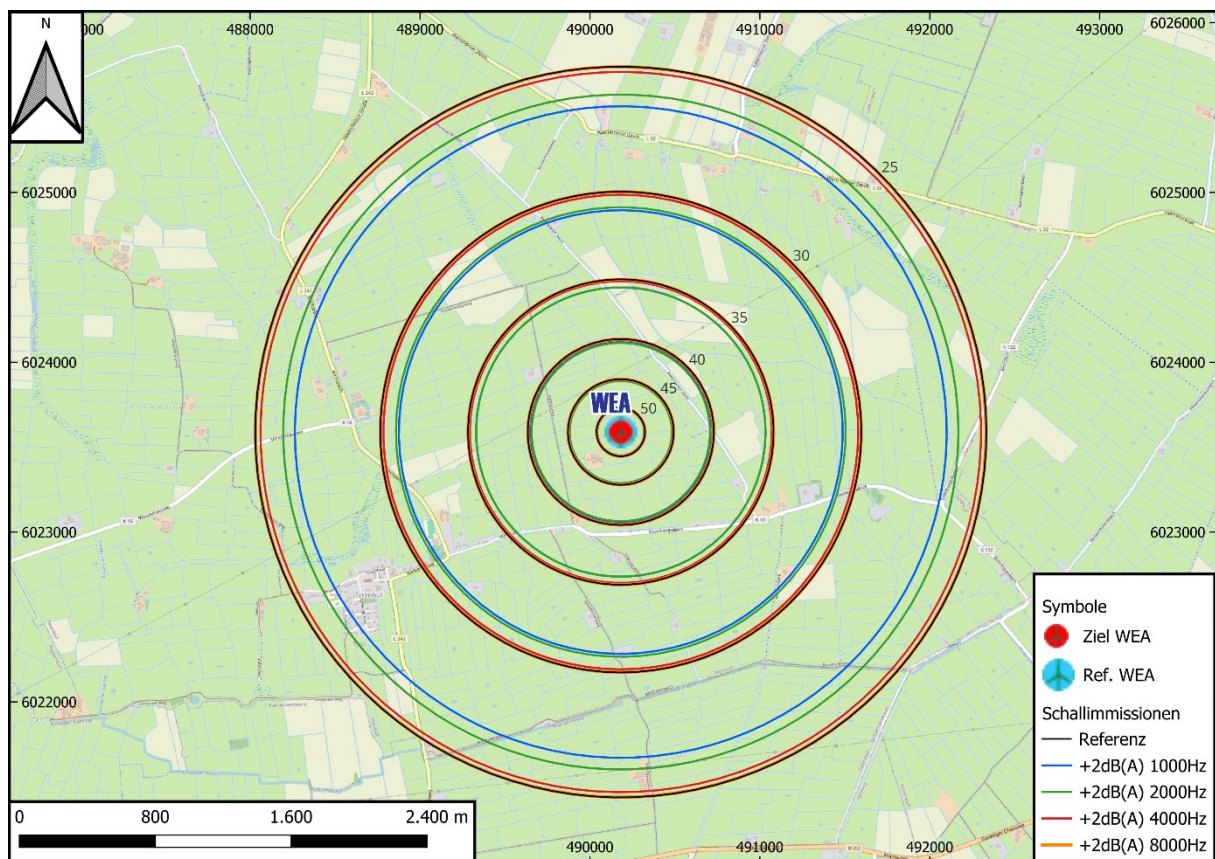


Abbildung 15: Visuelle Ergebnisse der Modellierung von Versuch III
Quelle: Eigene Darstellung

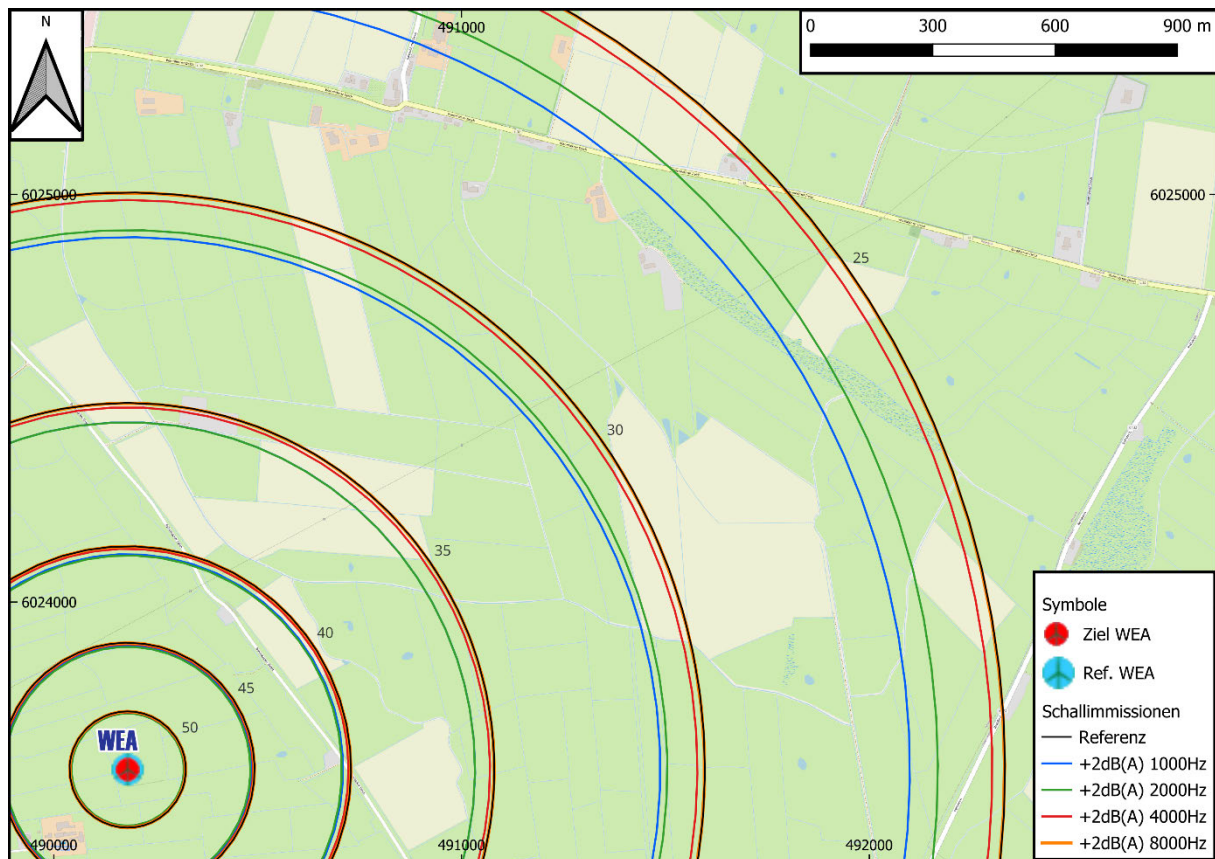


Abbildung 16: Visuelle Ergebnisse der Modellierung von Versuch III vergrößert
Quelle: Eigene Darstellung

10.3.3 Bewertung

In Versuch III lässt sich ein ähnliches Verhalten wie in Versuch II beobachten und bestätigt damit, dass bei gleichem Summenschallleistungspegel nicht rein die Belegung der tieferen Oktavbänder für eine weitere Schallausbreitung sorgen, sondern vielmehr das Verhältnis der relativen Anteile der einzelnen Oktavbänder zueinander entscheidend ist. Die Hypothese stimmt somit nur teilweise. Alle Spektren weisen niedrigere Immissionen als das Referenzspektrum auf. Um die Ergebnisse der Modellierung nachvollziehen, sind in Tabelle 13 die relativen Anteile der Oktavbänder an der Summenschallleistung der +2,0 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 1000 Hz, 8000 Hz und des Referenzbands dargestellt. Eine ausführliche Berechnung der relativen Anteile ist in Anhang C zu finden.

Bei der Erhöhung des 1000 Hz Oktavbands um +2,0 dB(A) und einem Pegeloffset von $-11,7$ dB(A) steigt der relative Anteil dieses Oktavbands deutlich von 31,12 % auf 49,33 %. Damit erreicht das 1000 Hz Oktavband nahezu die Hälfte der gesamten Summenschallleistung und dominiert somit das Frequenzspektrum. Im Vergleich zum Referenzspektrum verringern sich die relativen Anteile der tieffrequenten Kompensationsbänder deutlich. Damit ist die Schallausbreitung für dieses Szenario am geringsten. Dagegen führt die Erhöhung des 8000 Hz Oktavbands um +2,0 dB(A) bei einem Pegeloffset von $-0,0$ dB(A) zu einer minimalen Veränderung des relativen Anteils des Oktavbands 8000 Hz von

0,11 dB(A) zu 0,17 dB(A). Diese minimale Änderung bewirkt, dass sich die dominanten relativen Anteile der Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz um $-0,02$ dB(A) reduzieren. Das sorgt dafür, dass sich der Schall vom $+2,0$ dB(A) erhöhten Oktavband 8000 Hz minimal weniger ausbreiten als das Referenzband.

Tabelle 13: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren der $+2,0$ dB(A) Erhöhung des Oktavbands 1000 Hz, 8000 Hz und des Referenzbands von Versuch III
Quelle: Eigene Darstellung

Versuch III: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren der $+2,0$ dB(A) Erhöhung des Oktavbands 1000 Hz, 8000 Hz und des Referenzbands			
Oktavbänder [Hz]	Referenzspektrum Relativer Anteil [%]	Oktavbands 1000 Hz Relativer Anteil [%]	Oktavbands 8000 Hz Relativer Anteil [%]
63	0,80	0,05	0,80
125	3,49	0,24	3,49
250	15,24	1,03	15,23
500	29,72	29,72	29,70
1000	31,12	49,33	31,10
2000	16,33	16,33	16,32
4000	3,18	3,18	3,18
8000	0,11	0,11	0,17

Die tieffrequenten Oktavbänder (63 Hz, 125 Hz und 250 Hz) sowie die hochfrequenten Oktavbänder (2000 Hz, 4000 Hz und 8000 Hz) ergeben vergleichsweise einen viel kleinere Pegeloffset als die mittleren Oktavbänder von 500 Hz und 1000 Hz. Bei der Erhöhung der mittleren Oktavbänder ist der Pegeloffset deutlich höher (vgl. Tabelle 11). Durch den hohen Pegeloffset der Kompensationen der mittleren Oktavbänder, ändert sich das Verhältnis der relativen Anteile im Oktavspektren und sorgt für ein umgekehrtes Verhalten der Immissionen als in Versuch I angenommen.

Eine Überholung der Isophone ist beim Vergleich der Immissionen des Referenzspektrums und der Zielspektren nicht festgestellt worden. Einer Erhöhung einzelner hochfrequenter Oktavbänder und der damit verbundenen Kompensation für ein gleichbleibenden Summenschalleistungspegel, sorgen wie in Versuch II nicht für eine Überholung der Isophonen.

10.4 Versuch IV – Kompensation der Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz

Die vorangegangenen Modellierungen, der Erhöhung einzelner Oktavbänder bei identischen Summenschallleistungspegel, haben nicht zu einer Überholung der Isophonen geführt. Mit der Erkenntnis, dass die Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz bei der A-Bewertung den größten Einfluss auf die Summenschallleistung haben, wird das Szenario des Praxisbeispiels genauer untersucht. In Versuch IV werden die Bänder 500 Hz und 1000 Hz für die Kompensation genutzt und die Oktavbänder 250 Hz und 2000 Hz systematisch von +0,3 dB(A) bis +2,0 dB(A) erhöhen. Die Zielspektren und das Referenzspektrum bleiben konstant auf einen Summenschallleistungspegel von 105 dB(A). Ziel ist es, zu prüfen, ob eine breitere Belegung des Oktavspektrums zu einer Überholung der Isophone führt.

Wichtig ist zu erwähnen, dass WindPRO für die Eingabe der Schallleistungspegel nur eine Dezimalstelle zulässt. Alle berechneten Kompensationen und Summenschallleistungspegel werden auf die erste Dezimalstelle gerundet. Dadurch ist eine gewisse Ungenauigkeit in der Modellierung vorhanden und könnte zu einer Fehlerfortpflanzung in den Ergebnissen führen. Die Werte für das Referenzspektrum, die Zielspektren und die verwendeten Kompensationen werden in Tabelle 12 dargestellt. Eine ausführliche Rechnung ist im Anhang D zu finden. Zur besseren Veranschaulichung wurden die veränderten Oktavbänder blau und die Oktavbänder für die Kompensation orange markiert.

Tabelle 14: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffset von Versuch IV
Quelle: Eigene Darstellung

Versuch IV: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffset in dB(A)										
Oktavbänder [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L_{Σ}	x
Refs.	84,0	90,4	96,8	99,7	99,9	97,1	90,0	75,4	105,0	
Ziels.										
+0,3	84,0	90,4	97,1	99,5	99,7	97,4	90,0	75,4	104,9	-0,2
+0,4	84,0	90,4	97,2	99,5	99,7	97,5	90,0	75,4	105,0	-0,2
+0,5	84,0	90,4	97,3	99,4	99,6	97,6	90,0	75,4	105,0	-0,3
+0,6	84,0	90,4	97,4	99,3	99,5	97,7	90,0	75,4	104,9	-0,4
+0,7	84,0	90,4	97,5	99,3	99,5	97,8	90,0	75,4	105,0	-0,4
+0,8	84,0	90,4	97,6	99,2	99,4	97,9	90,0	75,4	105,0	-0,5
+0,9	84,0	90,4	97,7	99,1	99,3	98,0	90,0	75,4	104,9	-0,6
+1,0	84,0	90,4	97,8	99,1	99,3	98,1	90,0	75,4	105,0	-0,6
+1,1	84,0	90,4	97,9	99,0	99,2	98,2	90,0	75,4	105,0	-0,7
+1,2	84,0	90,4	98,0	98,9	99,1	98,3	90,0	75,4	105,0	-0,8
+1,3	84,0	90,4	98,1	98,8	99,0	98,4	90,0	75,4	105,0	-0,9
+1,4	84,0	90,4	98,2	98,7	98,9	98,5	90,0	75,4	104,9	-1,0
+1,5	84,0	90,4	98,3	98,6	98,8	98,6	90,0	75,4	104,9	-1,1
+1,6	84,0	90,4	98,4	98,6	98,8	98,7	90,0	75,4	105,0	-1,1
+1,7	84,0	90,4	98,5	98,5	98,7	98,8	90,0	75,4	105,0	-1,2
+1,8	84,0	90,4	98,6	98,3	98,5	98,9	90,0	75,4	105,0	-1,4
+1,9	84,0	90,4	98,7	98,2	98,4	99,0	90,0	75,4	105,0	-1,5
+2,0	84,0	90,4	98,8	98,1	98,3	99,1	90,0	75,4	105,0	-1,6

10.4.1 Hypothese

In Anbetracht der Tabelle 12 ist zu erwarten, dass aufgrund einer breiteren Belegung durch die Kompensation auf den Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz, welche die höchste Schallleistung im Oktavspektrum tragen und dem systematischen Erhöhen des tieferen Oktavbands 250 Hz und dem höheren Oktavband 2000 Hz, zwischen Zielspektrum und Referenzspektrum eine Überholung der Isophonen stattfinden kann. Für einige Zielspektren wurde ein Summenschallleistungspegel von 104,9 dB(A) berechnet. Diese Ungenauigkeit entsteht durch das Runden der Pegeloffsets (x) auf die erste Dezimalstelle.

10.4.2 Ergebnisse

In Abbildung 17 bis 20 sind die Orte der Überholung aus der Modellierung von Versuch IV dargestellt. Die Orte der Überholung für die Oktavspektren, konnten durch das Erstellen eines Vergleichslayers in WindPRO ermittelt werden (vgl. Kapitel 8.2). Für die Schallausbreitung des Referenzspektrums wurden die Isophonen von 55 dB(A) bis 25 dB(A) angegeben. Auf die Darstellung der einzelnen Isophonen für jedes Oktavspektrum wurde aufgrund der Übersichtlichkeit verzichtet. In jeder Abbildung werden vier bis fünf Ergebnisse von Vergleichslayern der systematisch veränderten Oktavspektren angezeigt.

In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Vergleichslayer von +0,3 dB(A) bis +0,6 dB(A) Erhöhung dargestellt. Beim Vergleich der Zielspektren und dem Referenzspektrum konnte bei allen Zielspektren mindestens ein Ort der Überholung mit dem Referenzspektrum festgestellt werden. Die Überholung bei +0,3 dB(A) und +0,6 dB(A) Erhöhung findet nach der 25 dB(A) Isophone des Referenzspektrum statt. Der Vergleichslayer für eine Erhöhung von +0,5 dB(A) zeigt eine Überholung vor der 25 Isophone, bei etwa 26 dB(A). Überraschend ist das Ergebnis des Vergleichslayers von +0,4 dB(A). In der Modellierung konnte eine doppelte Überholung der Isophonen festgestellt werden. Der Vergleichslayer von +0,4 dB(A) zeigt die erste Überholung genau beim dem 50 dB(A) Isophone und die zweite Überholung etwas nach der 30 dB(A) Isophone des Referenzspektrums.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Vergleichslayer von +0,7 dB(A) bis +1,0 dB(A) Erhöhung dargestellt. Der Vergleich der Zielspektren mit dem Referenzspektrum zeigt bei allen Vergleichslayern einen Ort der Überholung. Die Vergleichslayer aller vier Zielspektren weisen eine Überholung zwischen den Isophonen 30 dB(A) und 25 dB(A) auf. Die späteste Überholung ist bei der Erhöhung um +0,9 dB(A) kurz vor der 25 dB(A) Isophone zu erkennen. Daraufhin folgt die Überholung bei der Erhöhung um +0,8 dB(A), bei ca. 26 dB(A) und dann die Überholung bei der Erhöhung um +0,7 dB(A), bei etwa 28 dB(A). Die früheste Überholung findet bei der Erhöhung um +1,0 dB(A) statt, bei ca. 28 dB(A).

In Abbildung 19 sind die Ergebnisse der Vergleichslayer von +1,1 dB(A) bis +1,5 dB(A) Erhöhung dargestellt. Die Vergleichslayer zeigen für alle Zielspektren einen Ort der Überholung mit dem

Referenzspektrum zwischen der 30 dB(A) Isophone und der 25 dB(A) Isophone, bei ungefähr 26 dB(A) bis 27 dB(A). Der Vergleichsayer des Zielspektrums mit einer Erhöhung von +1,5 dB(A) zeigt den spätesten Ort der Überholung bei etwa 26 dB(A). Danach folgen die Überholungen der Erhöhung um +1,4 dB(A), +1,3 dB(A), +1,2 dB(A) und als früheste Überholung die Erhöhung des Zielspektrums um +1,5 dB(A), bei ca. 27 dB(A).

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse der Vergleichsayer von +1,6 dB(A) bis +2,0 dB(A) Erhöhung dargestellt. Die Vergleichsayer zeigen für alle Zielspektren einen Ort der Überholung mit dem Referenzspektrum zwischen der 30 dB(A) Isophone und der 25 dB(A) Isophone, bei ungefähr 26 dB(A) bis 28 dB(A). Der Vergleichsayer des Zielspektrums mit einer Erhöhung von +1,8 dB(A) zeigt den spätesten Ort der Überholung bei etwa 26 dB(A). Einen etwas früheren Ort der Überholung zeigt der Vergleichsayer der Erhöhung um +1,9 dB(A) und dann der Vergleichsayer der Erhöhung um +2,0 dB(A). Die Orte der Überholung für die Erhöhungen der Zielspektren um +1,6 dB(A) und +1,7 dB(A) sind nahezu identisch und liegen bei etwa 28 dB(A), wobei aber eine minimale spätere Überholung der Isophonen bei der Erhöhung um +1,7 dB(A) zu erkennen ist.

Alle Überholungen, abgesehen von dem Zielspektrum mit der doppelten Überholung (+0,4 dB(A)) und den Zielspektren mit einem Ort der Überholung außerhalb der 25 dB(A) Isophone (+0,3 dB(A), +0,6 dB(A)), finden zwischen den Isophonen 25 dB(A) und 30 dB(A) statt.

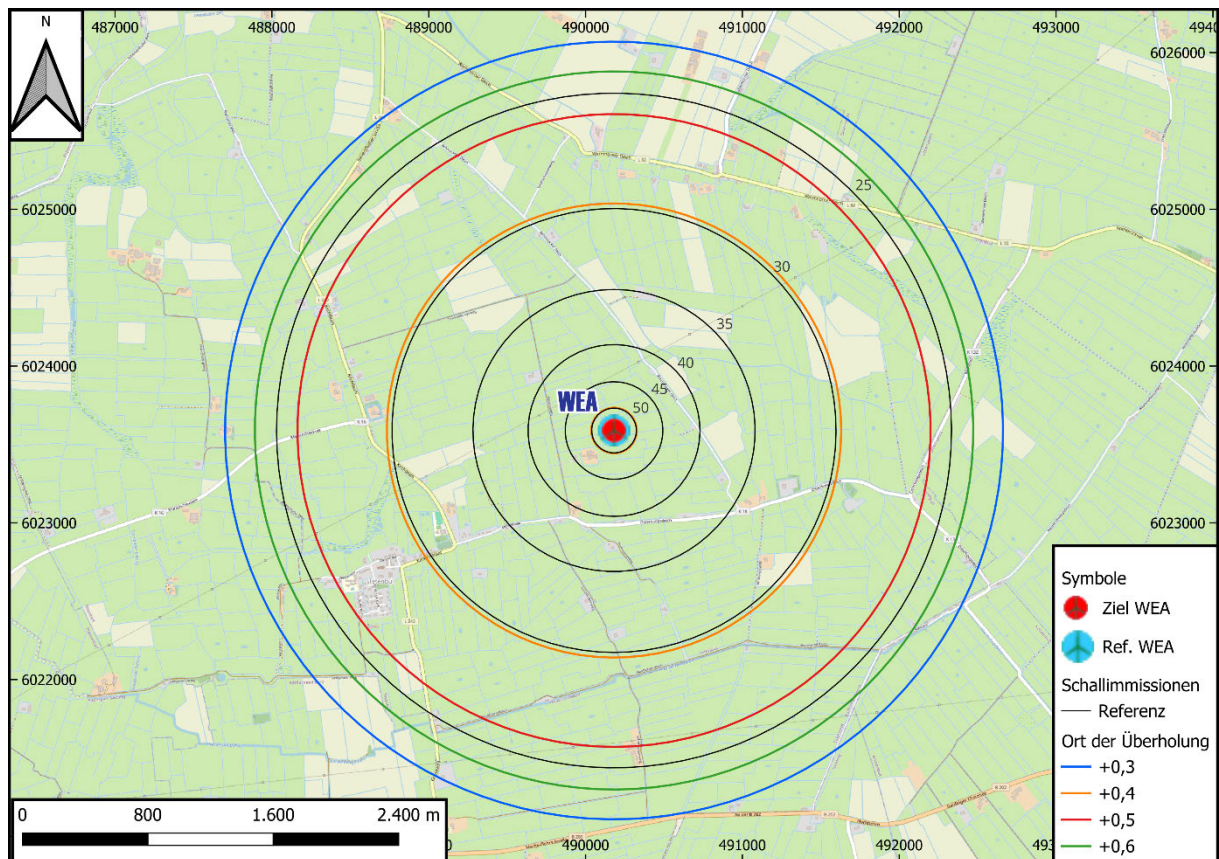


Abbildung 17: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch IV (+0,3 bis +0,6)
Quelle: Eigene Darstellung

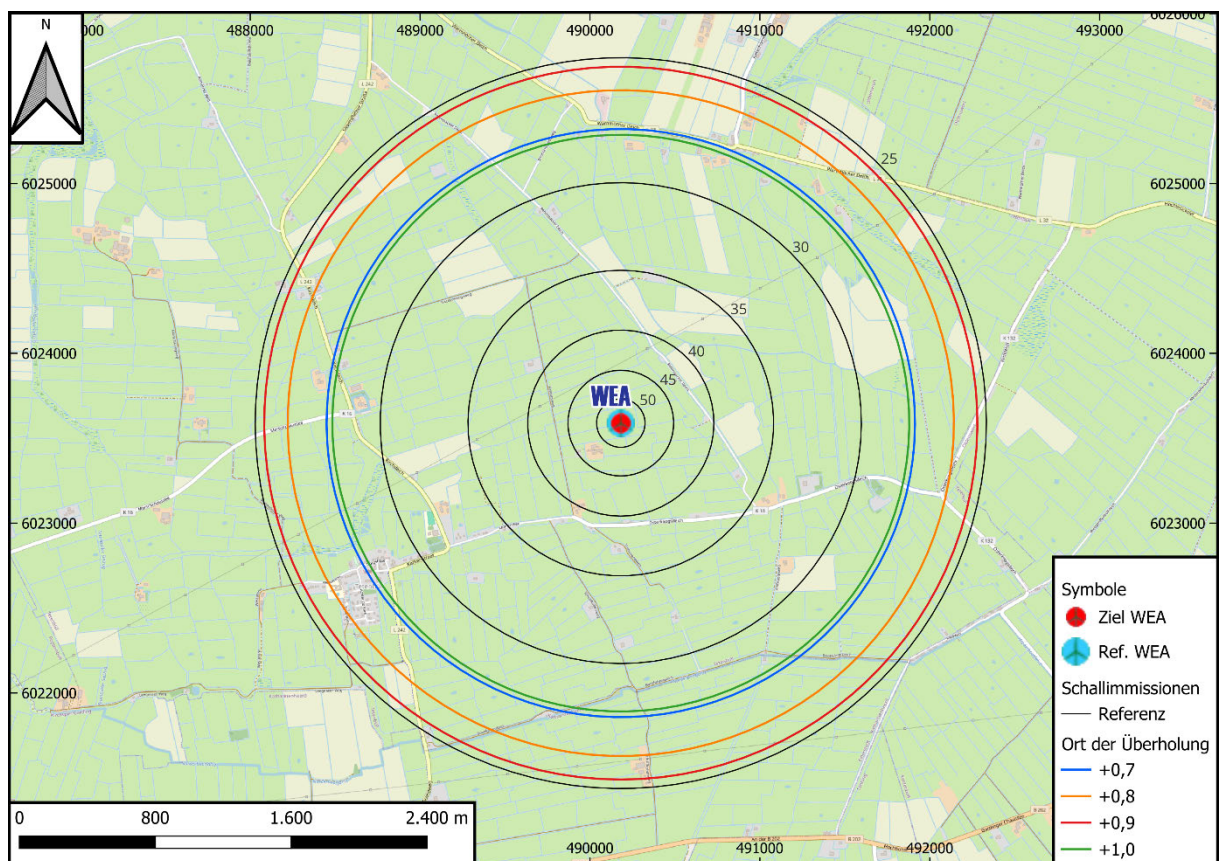


Abbildung 18: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch IV (+0,7 bis +1,0)
Quelle: Eigene Darstellung

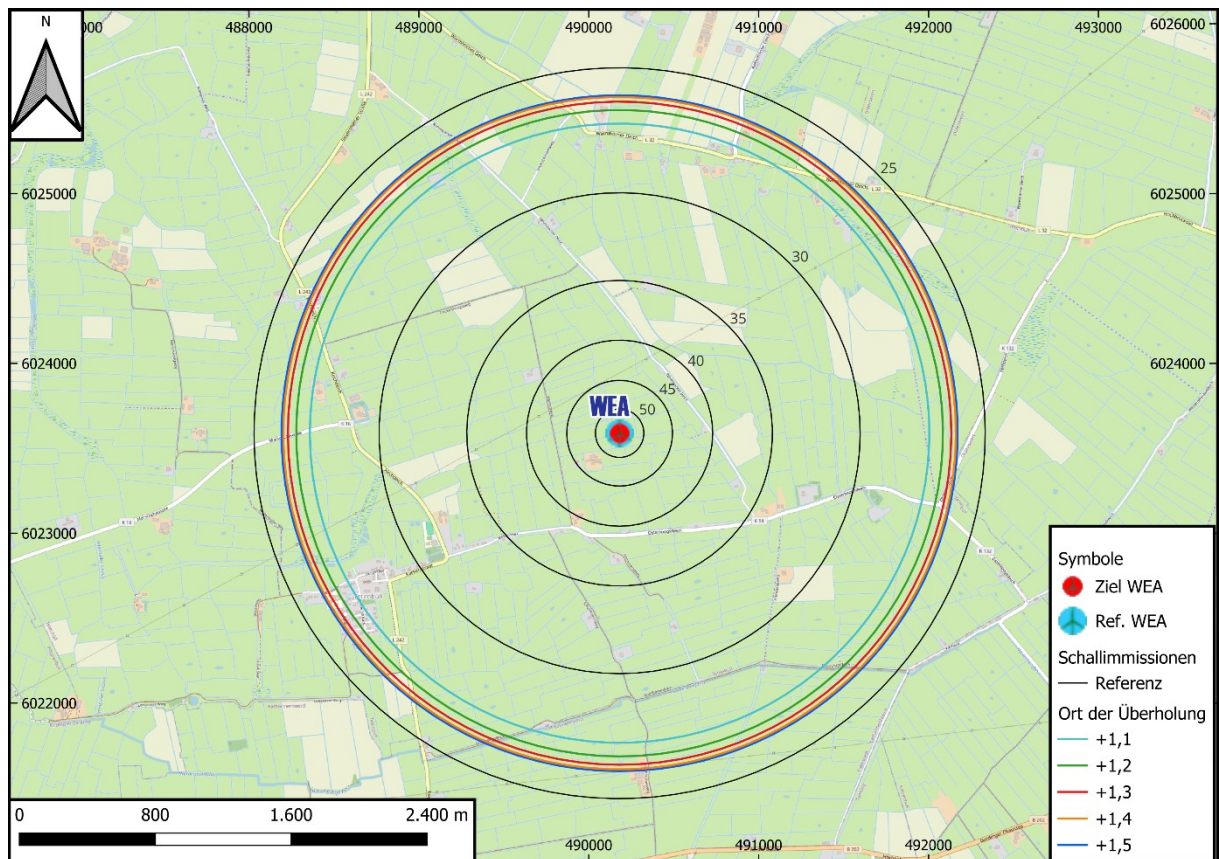


Abbildung 19: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch IV (+1,0 bis +1,5)
Quelle: Eigene Darstellung

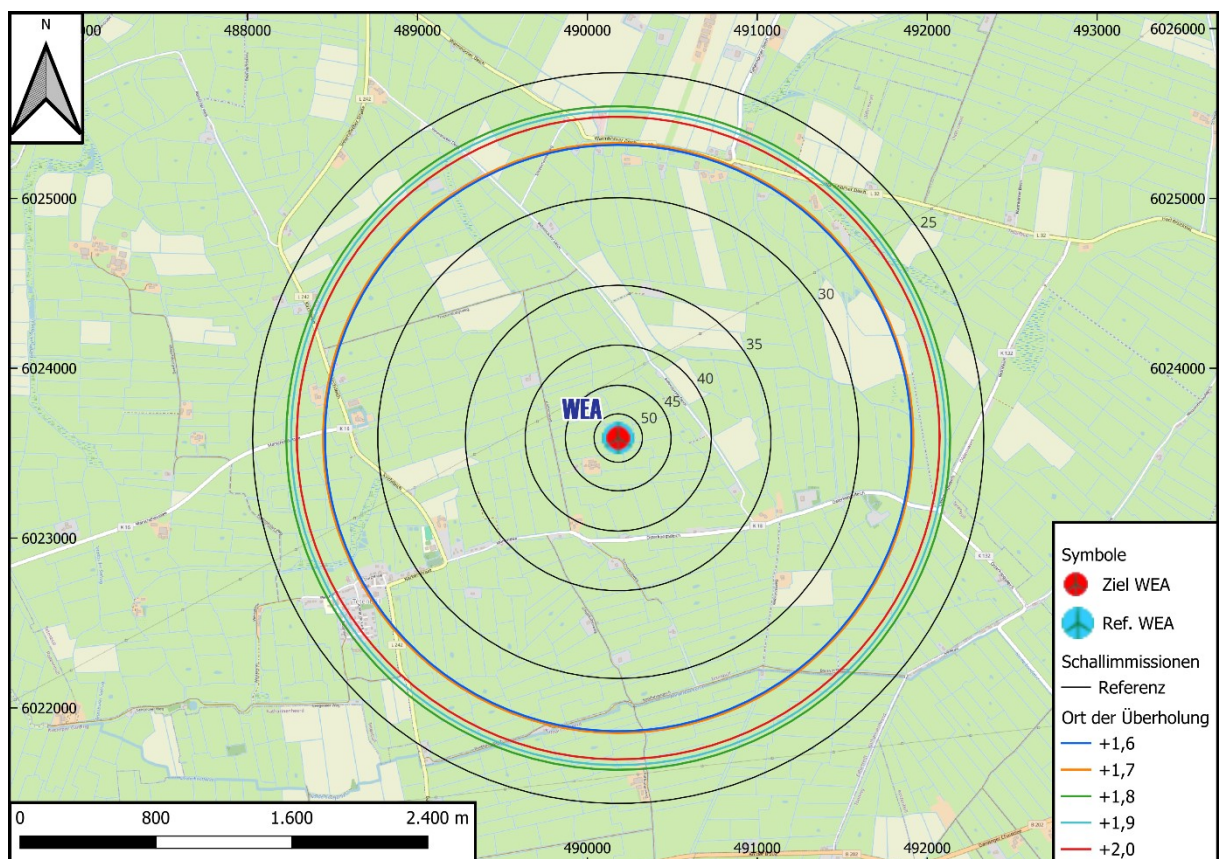


Abbildung 20: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch IV (+1,5 bis +2,0)
Quelle: Eigene Darstellung

10.4.3 Bewertung

Durch die Reduktion der stark belegten Oktavbänder bei 500 Hz und 1000 Hz sowie die gleichzeitige Erhöhung der schwächer belegten Oktavbänder bei 250 Hz und 2000 Hz im tief- und hochfrequenten Bereich kommt es zu einer Überholung der Isophonen, obwohl der Summenschallleistungspegel unverändert bleibt. Bei der genannten Anpassung der Oktavbänder findet eine Überholung von Zielspektrum und Referenzspektrum in der Regel zwischen den Isophonen 30 dB(A) und 25 dB(A) statt. Es ist also anzunehmen, dass eine Überholung der Isophone nur stattfinden kann, wenn die Zielspektren im Vergleich zu den Referenzspektren eine breitere Verteilung der der Schalleistungen auf den Oktavbänder aufweisen. Dazu sind in Tabelle 15 beispielhaft die relativen Anteile an der Summenschallleistung der Zielspektren bei der Erhöhung um +0,8 dB(A), +1,1 dB(A), +2,0 dB(A) und des Referenzbands dargestellt. Eine ausführliche Rechnung der relativen Anteile ist im Anhang D zu finden. Es ist zu erkennen, dass sich die relativen Anteile der 500 Hz und 1000 Hz Oktavbänder immer niedriger werden und die relativen Anteile der 250 Hz und 2000 Hz Oktavbänder im Vergleich zum Referenzspektrum steigen. Auch fällt auf, dass die Überholung auch stattfinden kann, wenn die Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz schwächer belegt sind als die Oktavbänder 250 Hz und 2000 Hz.

Tabelle 15: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +0,8 dB(A), +1,1 dB(A), +2,0 dB(A) und des Referenzbands von Versuch IV

Quelle: Eigene Darstellung

Versuch IV: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +0,8 dB(A), +1,1 dB(A), +2,0 dB(A) und des Referenzbands				
Oktavbander [Hz]	Referenzspektrum Relativer Anteil [%]	+0,8 dB(A) Relativer Anteil [%]	+1,1 dB(A) Relativer Anteil [%]	+2,0 dB(A) Relativer Anteil [%]
63	0,80	0,80	0,80	0,80
125	3,49	3,50	3,49	3,50
250	15,24	18,37	19,63	24,23
500	29,72	26,55	25,28	20,62
1000	31,12	27,80	26,48	21,59
2000	16,33	19,68	21,03	25,96
4000	3,18	3,19	3,18	3,19
8000	0,11	0,11	0,11	0,11

Wie in den Ergebnissen beschrieben, gibt es für die geänderten Zielspektren +0,3 dB(A), +0,4 dB(A) und +0,6 dB(A) besondere Auffälligkeiten. Die Zielspektren +0,3 dB(A) und +0,6 dB(A) zeigen einen Ort der Überholung außerhalb der 25 dB(A) Isophone (vgl. Abbildung 17). Das Zielspektrum +0,4 dB(A) zeigt als einzige Spektrum zwei Orte der Überholung (vgl. Abbildung 17).

10.4.4 Bewertung - Doppelte Überholung

Um die Ursachen für diese doppelte Überholung genauer zu untersuchen, werden die Ergebnisse des Zielspektrums +0,4 dB(A) im Detail betrachtet. Dabei werden insbesondere der Summenschallleistungspegel auf die dritte Dezimalstelle genau sowie die Differenz zum Summenschallleistungspegel des Referenzspektrums ausgewertet. Ergänzend werden die relativen Anteile der einzelnen Oktavbänder analysiert, um die Veränderungen in der spektralen Zusammensetzung darzustellen. Die Tabelle 16 zeigt beispielhaft den Summenschallleistungspegel des Spektrums +0,4 dB(A) im Vergleich zum Referenzspektrum sowie die berechneten Differenzen und die zugehörigen relativen Anteile der Oktavbänder. Eine ausführliche Rechnung der relativen Anteile ist im Anhang E zu finden.

Tabelle 16: Vergleich des Summenschallleistungspegels und der relativen Anteile des Spektrums +0,4 dB(A) mit dem Referenzspektrum von Versuch IV

Quelle: Eigene Darstellung

Versuch IV: Vergleich des Summenschallleistungspegels und der relativen Anteile des Spektrums +0,4 dB(A) mit dem Referenzspektrum					
Oktavbänder [Hz]	L_W – Referenz [dB(A)]	L_W – +0,4 [dB(A)]	Differenz [ΔL_W]	Referenzspektrum Relativer Anteil [%]	+0,4 Relativer Anteil [%]
63	84	84	0	0,80	0,80
125	90,4	90,4	0	3,49	3,48
250	96,8	97,2	0,4	15,24	16,66
500	99,7	99,5	-0,2	29,72	28,29
1000	99,9	99,7	-0,2	31,12	29,63
2000	97,1	97,5	0,4	16,33	17,85
4000	90	90	0	3,18	3,17
8000	75,4	75,4	0	0,11	0,11
L_Σ [dB(A)]	104,970	104,983	0,013	/	/

Auffällig ist, dass beim Zielspektrum +0,4 dB(A) mit doppelter Überholung der Summenschallleistungspegel mit 104,983 dB(A) geringfügig höher als beim Referenzspektrum (104,970 dB(A)) liegt. Die Differenz beträgt +0,013 dB(A). Gleichzeitig verändert sich die Verteilung der relativen Anteile der Oktavbänder nur leicht. Die 500 Hz und 1000 Hz Oktavbänder zeigen mit 28,29 % bzw. 29,63 % etwas niedrigere Werte als im Referenzspektrum (29,72 % bzw. 31,12 %), bleiben jedoch die dominanten Frequenzbereiche des Spektrums. Die 250 Hz und 2000 Hz Oktavbänder sind dagegen leicht angehoben, von 15,24 % auf 16,66 % bzw. von 16,33 % auf 17,85 %, ohne dabei die mittleren Oktavbänder zu übertreffen. Dieses Verhältnis zwischen den mittleren und benachbarten Oktavbändern scheint entscheidend dafür zu sein, dass eine doppelte Überholung auftritt. Die mittleren Oktavbänder (500 Hz und 1000 Hz) müssen weiterhin einen hohen relativen Anteil am Gesamtspektrum aufweisen. Gleichzeitig dürfen die tieferen und höheren Oktavbänder (250 Hz und 2000 Hz) nicht zu

stark zunehmen, da sonst der frequenzabhängige Einfluss auf die Schallausbreitung überwiegt. Es muss also ein Verhältnis der relativen Anteile bestehen, bei dem die Abweichungen zum Referenzspektrum zwar vorhanden, aber nicht zu groß sind.

Darüber hinaus deutet die Auswertung darauf hin, dass auch der Summenschallleistungspegel eine Rolle für das Auftreten einer doppelten Überholung spielen könnte. Liegt dieser über dem Pegel des Referenzspektrums (auch wenn nur minimal), scheint sich das auf die Schallausbreitung auszuwirken, wodurch zwei Orte der Überholung entstehen können. Diese Beobachtungen legen nahe, dass eine doppelte Überholung nur dann auftritt, wenn mehrere Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

- der Summenschallleistungspegel liegt leicht über dem des Referenzspektrums
- die Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz behalten ihren dominanten Anteil
- und die angrenzenden Oktavbänder 250 Hz und 2000 Hz sind leicht, aber nicht überproportional erhöht

Wie in den folgenden Versuchen gezeigt wird, können bereits minimale Änderungen der Schallleistungspegel oder der Kompensation dieses Verhältnis stören. Dieses Verhalten wird anhand der Zielspektren +0,6 dB(A), +0,9 dB(A) und +1,5 dB(A) näher untersucht. Tabelle 17 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für die Zielspektren +0,6 dB(A), +0,9 dB(A) und +1,5 dB(A) mit jeweils zwei unterschiedlichen Kompensationswerten.

Tabelle 17: Ergebnisse für die Zielspektren +0,6 dB(A), +0,9 dB(A) und +1,5 dB(A) mit jeweils zwei unterschiedlichen Kompensationswerten von Versuch IV
Quelle Eigene Darstellung

Versuch IV: Ergebnisse für die Zielspektren +0,6 dB(A), +0,9 dB(A) und +1,5 dB(A) mit jeweils zwei unterschiedlichen Kompensationswerten				
Zielspektrum	Kompensation gerundet [dB(A)]	Kompensation [dB(A)]	L_{Σ} [dB(A)]	Differenz zum Refs. [dB(A)]
+ 0,6	-0,4	-0,35	104,940	-0,029
+0,6 / Komp. -0,3	-0,3		104,996	0,027
+ 0,9	-0,6	-0,55	104,944	-0,025
+0,9 / Komp. -0,5	-0,5		104,998	0,028
+ 1,5	-1,1	-1,05	104,944	-0,026
+1,5 / Komp. -1,0	- 1,0		104,992	0,022
Refs.	/	/	104,970	/

Die Abbildungen 22 bis 24 zeigen die visuellen Ergebnisse der unterschiedlichen Kompensationswerte. Die rosa Orte der Überholung zeigen die Ergebnisse der aufgerundeten Kompensationen (vgl. Tabelle 14). Die roten Orte der Überholung zeigen die Ergebnisse für die abgerundeten Kompensationen.

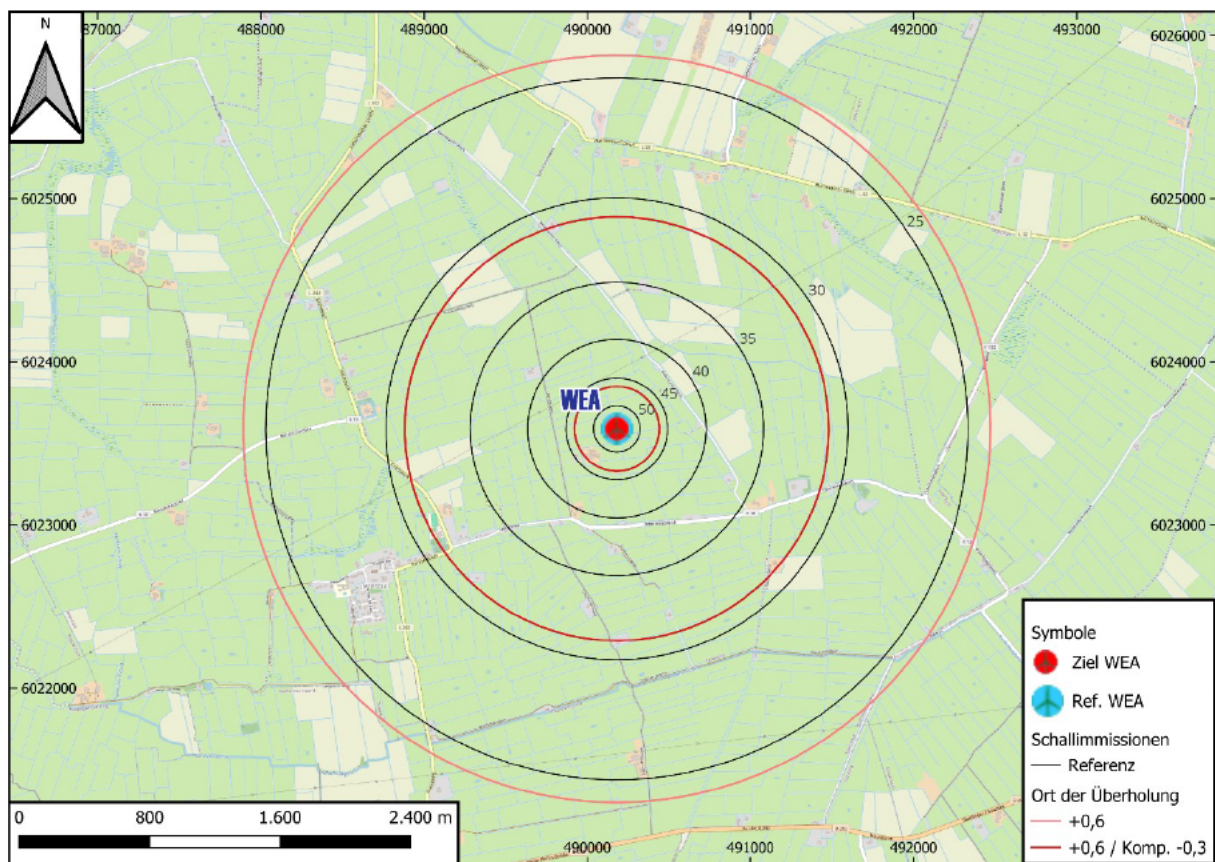


Abbildung 21: Visuelle Ergebnisse der unterschiedlichen Kompensationswerte von Zielspektrum +0,6 dB(A)
Quelle: Eigene Darstellung

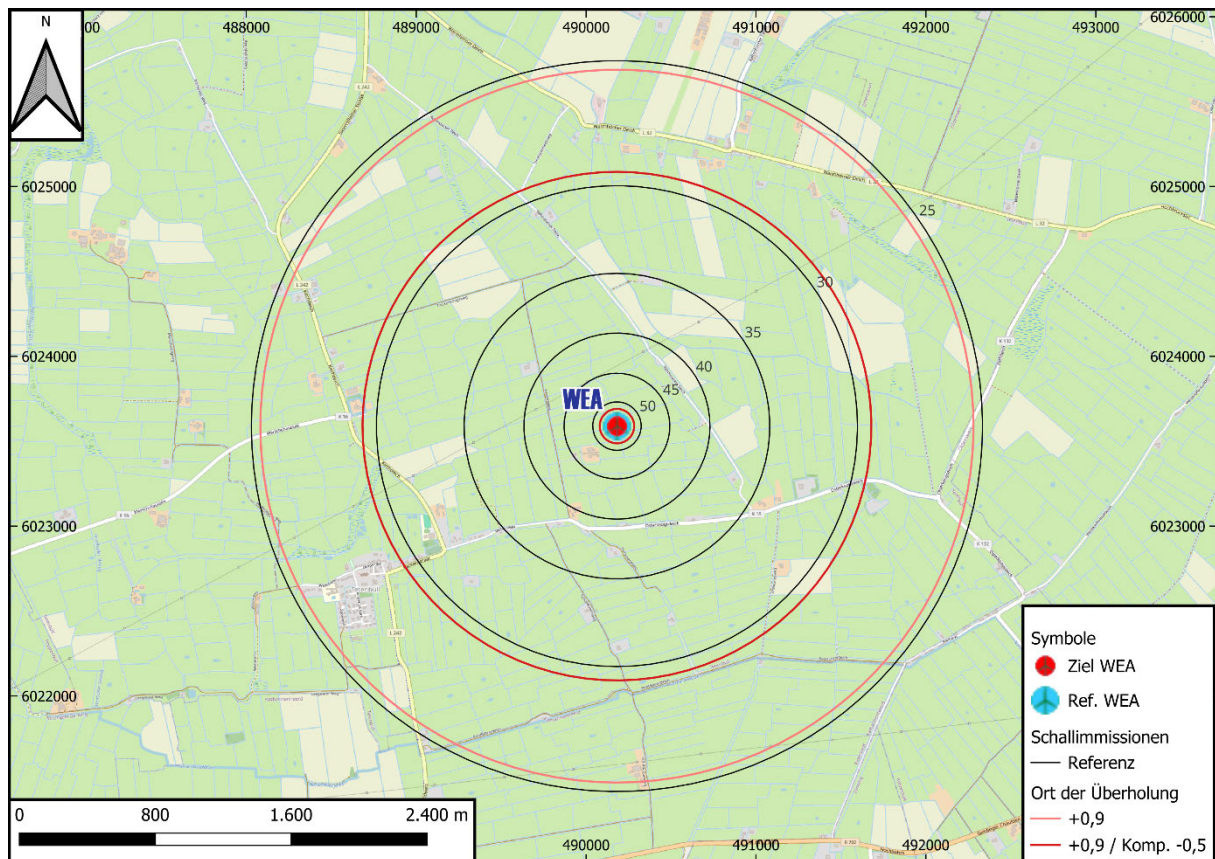


Abbildung 22: Visuelle Ergebnisse der unterschiedlichen Kompensationswerte von Zielspektrum +0,9 dB(A)
Quelle: Eigene Darstellung

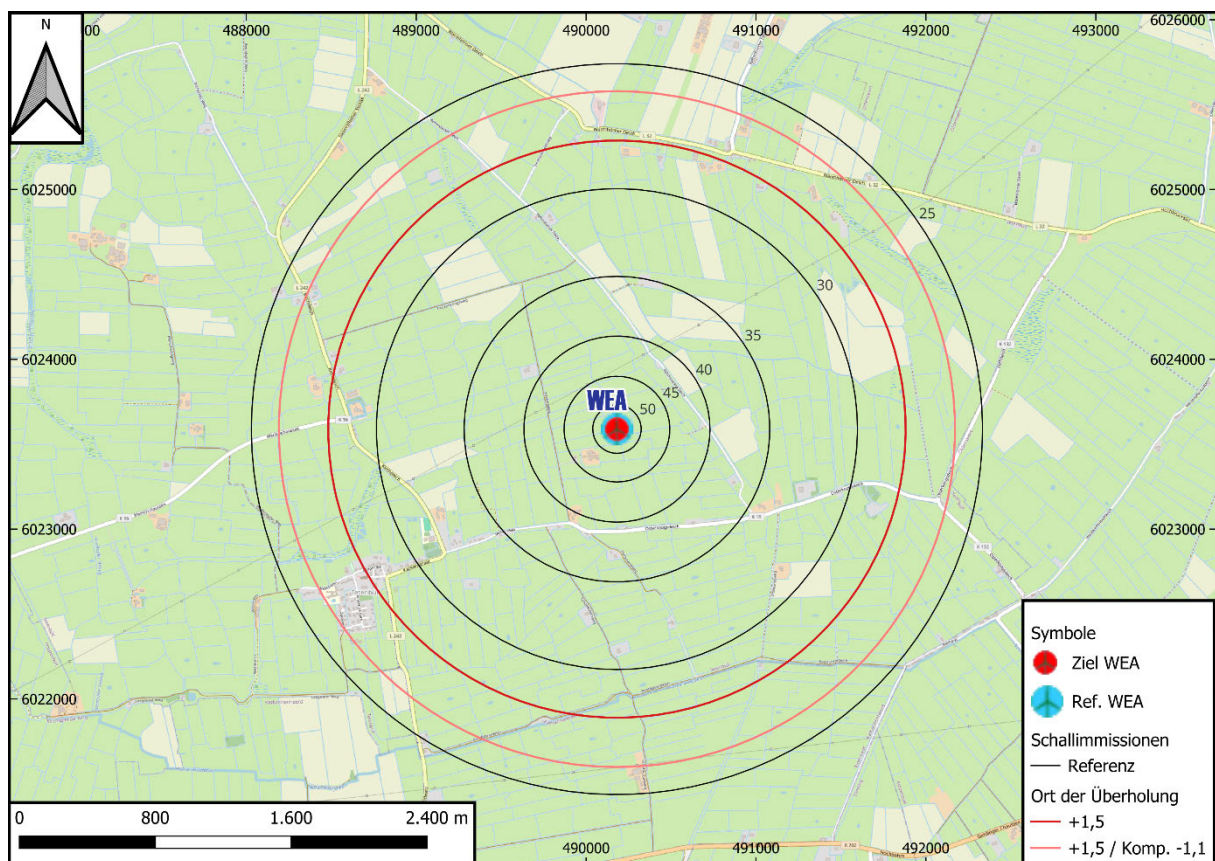


Abbildung 23: Visuelle Ergebnisse der unterschiedlichen Kompensationswerte von Zielspektrum +1,5 dB(A)
Quelle: Eigene Darstellung

Die Tabelle 17 verdeutlicht, dass bereits eine Rundungsabweichung von nur 0,1 dB(A) in der Kompensation den Summenschallleistungspegel um etwa 0,05 dB(A) bis 0,06 dB(A) verändert. Trotz dieser geringen Differenzen führt sie insbesondere bei den Spektren +0,6 dB(A) und +0,9 dB(A) zu einem deutlich unterschiedlichen Ausbreitungsverhalten. Bei diesen geringen Pegelerhöhungen tritt eine doppelte Überholung auf, wenn der Summenschallleistungspegel durch die Rundung leicht erhöht wird (z. B. Kompensation gerundet $-0,3$ dB(A) bzw. $-0,5$ dB(A)). Wird hingegen stärker kompensiert ($-0,4$ dB(A) bzw. $-0,6$ dB(A)), bleibt der Summenschallleistungspegel etwas niedriger und es tritt nur eine einzelne Überholung auf. Dieser Effekt ist in Abbildung 21 für das Zielspektrum +0,6 dB(A) sowie in Abbildung 22 für +0,9 dB(A) deutlich zu erkennen und bestätigt, dass es sich um ein systematisches Verhalten handelt, das auf Rundungsabweichungen in der Kompensation zurückzuführen ist.

Beim Zielspektrum +1,5 dB(A) zeigt sich dagegen, dass trotz eines vergleichbaren Rundungsfehlers (Kompensation $-1,0$ bzw. $-1,1$ dB(A)) keine doppelte Überholung auftritt. Die größere Pegelerhöhung überwiegt hier die kleinen Rundungsdifferenzen, sodass keine doppelte Überholung stattfindet. (vgl. Abbildung 23). Die in Tabelle 18 dargestellten relativen Anteile bestätigen dieses Verhalten. Eine ausführliche Rechnung der relativen Anteile ist im Anhang E zu finden.

Tabelle 18: Relative Anteile der Oktavbänder an der Summenschalleistung der Erhöhung um +1,5 dB(A) mit einer Kompensation von -1,0 dB(A) und -1,1 dB(A) und des Referenzbands von Versuch IV

Quelle: Eigene Darstellung

Versuch IV: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +1,5 dB(A) mit einer Kompensation von -1,0 dB(A) und -1,1 dB(A) und des Referenzbands			
Oktavbänder [Hz]	Referenzspektrum Relativer Anteil [%]	+1,5 / Komp. $-1,1$ Relativer Anteil [%]	+1,5 / Komp. $-1,0$ Relativer Anteil [%]
63	0,80	0,80	0,80
125	3,49	3,51	3,47
250	15,24	21,66	21,42
500	29,72	23,21	23,49
1000	31,12	24,30	24,59
2000	16,33	23,21	22,95
4000	3,18	3,20	3,17
8000	0,11	0,11	0,11

Bei beiden Varianten, also +1,5 / Komp. $-1,1$ und +1,5 / Komp. $-1,0$, liegen die relativen Anteile der Oktavbänder 250 Hz bis 2000 Hz in einem sehr ähnlichen Bereich zwischen etwa 21 % und 25 %. Durch diese nahezu gleichmäßige Verteilung der Schalleistungsanteile entsteht ein ausgeglichenes Spektrum, bei dem kein Frequenzbereich dominant hervortritt. Der ausgleichende Effekt der Kompensation und Pegelerhöhung verhindert somit eine doppelte Überholung, da weder eine spektrale Verschiebung noch ein deutliche Pegeldominanz vorliegt, der eine zweite Überlagerung der Isophonen begünstigen könnte.

Diese Ergebnisse stützen die zuvor getroffenen Annahmen aus der Betrachtung des Zielspektrums +0,4 dB(A). Eine doppelte Überholung kann nur dann auftreten, wenn mehrere Bedingungen

gleichzeitig erfüllt sind. Zum einen muss der Summenschallleistungspegel leicht über dem Referenzwert liegen (z. B. 104,983 dB(A) gegenüber 104,970 dB(A) beim Referenzspektrum), zum anderen dürfen sich die relativen Anteile der Oktavbänder nur geringfügig vom Referenzspektrum unterscheiden. Die mittleren Oktavbänder (500 Hz und 1000 Hz) müssen weiterhin dominieren, während die angrenzenden Oktavbänder (250 Hz und 2000 Hz) leicht, aber nicht überproportional erhöht sein dürfen.

10.4.5 Bewertung – Ort der Überholung nach der 25 dB(A) Isophone

Wie bereits in Kapitel 10.4 beschrieben, treten Überholungen der Isophonen bei einer breiteren Verteilung der Schalleistungsanteile über die Oktavbänder auf. Dieses Verhalten zeigt sich auch bei den Zielspektren +0,3 dB(A) und +0,6 dB(A), die in Abbildung 17 durch höhere Immissionen außerhalb der 25 dB(A) Isophone auffallen. Um dieses Verhalten zu untersuchen, werden in Tabelle 19 die relativen Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +0,3 dB(A) und +0,6 dB(A) im Vergleich zum Referenzspektrum dargestellt. Eine ausführliche Rechnung der relativen Anteile ist im Anhang F zu finden.

Tabelle 19: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +0,3 dB(A) und +0,6 dB(A) im Vergleich zum Referenzspektrum von Versuch IV

Quelle: Eigene Darstellung

Versuch IV: Relative Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +0,3 dB(A) und +0,6 dB(A) im Vergleich zum Referenzspektrum			
Oktavbänder [Hz]	Referenzspektrum Relativer Anteil [%]	+0,3 Relativer Anteil [%]	+0,6 Relativer Anteil [%]
63	0,80	0,80	0,81
125	3,49	3,51	3,52
250	15,24	16,41	17,62
500	29,72	28,52	27,29
1000	31,12	29,86	28,57
2000	16,33	17,58	18,88
4000	3,18	3,20	3,21
8000	0,11	0,11	0,11
L_{Σ} [dB(A)]	104,970	104,949	104,940

Die in Tabelle 19 dargestellten Werte zeigen, dass die relativen Anteile der mittleren Oktavbänder bei 500 Hz und 1000 Hz im Vergleich zum Referenzspektrum leicht abgenommen haben. Während diese im Referenzspektrum noch 29,72 % bzw. 31,12 % betragen, liegen sie bei den Zielspektren +0,3 dB(A) bei 28,52 % und 29,86 % sowie bei +0,6 dB(A) bei 27,29 % und 28,57 %. Im Gegenzug steigen die Anteile der angrenzenden Oktavbänder 250 Hz und 2000 Hz von 15,24 % bzw. 16,33 % im Referenzspektrum auf 16,41 % und 17,58 % (+0,3 dB(A)) bzw. 17,62 % und 18,88 % (+0,6 dB(A)).

Im Gegensatz zur doppelten Überholung liegt der Summenschallleistungspegel der Zielspektren +0,3 dB(A) mit 104,949 dB(A) und +0,6 dB(A) mit 104,940 dB(A) geringfügig unterhalb des Referenzwertes von 104,970 dB(A). Während bei der doppelten Überholung (+0,4 dB(A)) ein leicht erhöhter Summenschallleistungspegel eine verstärkte Ausbreitung im Nah- und Mittelbereich fördert, führt hier der etwas niedrigere Summenschallleistungspegel dazu, dass die Überholung erst in größerer Entfernung auftritt, also außerhalb der 25 dB(A) Isophone. Dieses Verhalten bestätigt, dass sowohl die spektrale Belegung als auch der Summenschallleistungspegel maßgeblich bestimmen, wo und in welcher Form Überholungen auftreten. Eine leicht erhöhter Summenschallleistungspegel bei ähnlicher spektraler Zusammensetzung (wie bei +0,4 dB(A)) kann eine doppelte Überholung auslösen, während eine geringfügig reduzierter Summenschallleistungspegel bei nahezu gleicher Verteilung (wie bei +0,3 dB(A)) den Ort der Überholung nach außen verschiebt (vgl. Tabelle 14 & Abbildung 17).

Somit lässt sich festhalten, dass die Wechselwirkung zwischen der Verteilung der Schalleistungsanteile in den Oktavbändern von 250 Hz bis 2000 Hz und der Summenschallleistungspegel entscheidend für die Lage und Ausprägung der Isophonen ist. Schon geringe Änderungen im Summenschallleistungspegel können, bei nahezu gleicher spektraler Zusammensetzung, deutlich unterschiedliche Ausbreitungsergebnisse hervorrufen.

Damit eine Überholung entstehen kann, muss im Vergleich zum Referenzspektrum eine Verschiebung der Schalleistungsanteile stattfinden. Die tieferen und höheren Oktavbänder bei 250 Hz und 2000 Hz müssen höhere Anteile aufweisen, während die mittleren Oktavbänder bei 500 Hz und 1000 Hz im Verhältnis abgeschwächt sein müssen. Auf diese Weise verändert sich die spektrale Zusammensetzung so, dass die dominierenden Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz an Bedeutung verlieren und die Schallleistung insgesamt breiter verteilt wird. Dieses Verhältnis sorgt für eine Überholung der Isophonen.

10.5 Versuch V – Früheres Auftreten einer Überholung

In den bisherigen Untersuchungen von Versuch IV traten die Überholungen der Isophonen überwiegend im Bereich zwischen 30 dB(A) und 25 dB(A) auf. Ziel der folgenden Modellierung ist es daher, zu überprüfen, ob eine Anpassung der spektralen Zusammensetzung der Schalleistungspegel dazu führen kann, dass eine Überholung bereit früher eintreffen kann. Zu diesem Zweck wurden die Oktavbänder 125 Hz und 4000 Hz gezielt erhöht, während die Kompensationsbänder 500 Hz und 1000 Hz weiterhin für den Kompensation der Summenschalleistungspegel herangezogen wurden. Auf diese Weise sollte eine breitere spektrale Verteilung erzeugt werden, ohne die Dominanz der Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz vollständig aufzuheben. Um die in Versuch IV beobachteten Rundungsabweichungen und die damit verbundenen Anomalien zu vermeiden, wurden ausschließlich Zielspektren berücksichtigt, deren berechnete Kompensationswerte möglichst nahe an einer vollen Nachkommastelle liegen. Dadurch können die Pegelwerte in WindPRO ohne nennenswerte Rundungsfehler eingegeben werden, was eine konsistente Bewertung der Ergebnisse ermöglicht. Die vollständigen Berechnungsschritte zur Ermittlung der Kompensationswerte sind im Anhang G dokumentiert. Für die weitere Betrachtung wurden die fünf Zielspektren +0,8 dB(A), +1,5 dB(A), +2,1 dB(A), +2,6 dB(A) und +3,0 dB(A) ausgewählt. Diese Spektren weisen nahezu identische Summenschalleistungspegel wie das Referenzspektrum auf und dienen damit als Grundlage, um den Einfluss der spektralen Verschiebung auf das Ausbreitungsverhalten isoliert zu untersuchen. Die Werte für das Referenzspektrum, die Zielspektren und die verwendeten Kompensationen werden in Tabelle 20 dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung wurden die veränderten Oktavbänder blau und die Oktavbänder für die Kompensation orange markiert.

Tabelle 20: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffset in dB(A) von Versuch V

Quelle Eigene Darstellung

Versuch V: Referenzspektrum, Zielspektren und Pegeloffset in dB(A)										
Oktavbänder [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L_{Σ}	x
Refs.	84,0	90,4	96,8	99,7	99,9	97,1	90,0	75,4	105,0	
Ziels.										
+0,8	84,0	91,2	96,8	99,6	99,8	97,1	90,8	75,4	104,968	-0,1
+1,5	84,0	91,9	96,8	99,5	99,7	97,1	91,5	75,4	104,970	-0,2
+2,1	84,0	92,5	96,8	99,4	99,6	97,1	92,1	75,4	104,974	-0,3
+2,6	84,0	93,0	96,8	99,3	99,5	97,1	92,6	75,4	104,975	-0,4
+3,0	84,0	93,4	96,8	99,2	99,4	97,1	93,0	75,4	104,971	-0,5

10.5.1 Hypothese

Die in Tabelle 20 dargestellten Zielspektren weisen im Vergleich zu Versuch IV eine noch breitere Verteilung der Schallleistungspegel über die Oktavbänder auf. Durch die gezielte Erhöhung der tief- und hochfrequenten Oktavbänder bei 125 Hz und 4000 Hz sowie die gleichzeitige Kompensation der mittleren Oktavbänder bei 500 Hz und 1000 Hz wird die spektrale Streuung weiter verstärkt. Diese Hypothese beruht auf der Annahme, dass die zusätzlichen Energieverteilung auf den Oktavbänder 125 Hz und 4000 Hz die Schallausbreitung im Nahbereich und Fernbereich begünstigen (vgl. Kapitel 9), wodurch die Überholungen der Isophonen früher stattfinden als zwischen den Isophonen 30 dB(A) und 25 dB(A) in Versuch IV.

10.5.2 Ergebnisse

In Abbildung 24 und 25 sind die Orte der Überholung der Modellierung von Versuch V dargestellt. Die Orte der Überholung, zwischen Ziel- und Referenzspektrum, konnten durch das Erstellen eines Vergleichslayers in WindPRO ermittelt werden (vgl. Kapitel 8.2). Wie erwartet, finden die Überholungen im Vergleich zu Versuch IV früher statt. Anstelle der Überholungen zwischen der 30 dB(A) und 25 dB(A) Isophonen, treten die Orte der Überholung zwischen den Isophonen 35 dB(A) und 30 dB(A) auf. Dabei ist zu erkennen, dass die visuellen Ergebnisse für die Zielspektren +1,5 und +3,0 sowie +2,1 und +2,6 fast identische sind. Den frühesten Ort der Überholung zeigen die Zielspektren +2,1 und +2,6, darauf folgen die Zielspektren +1,5 und +3,0 und die späteste Überholung ist für das Zielspektrum +0,8 zu erkennen (Abbildung 25).

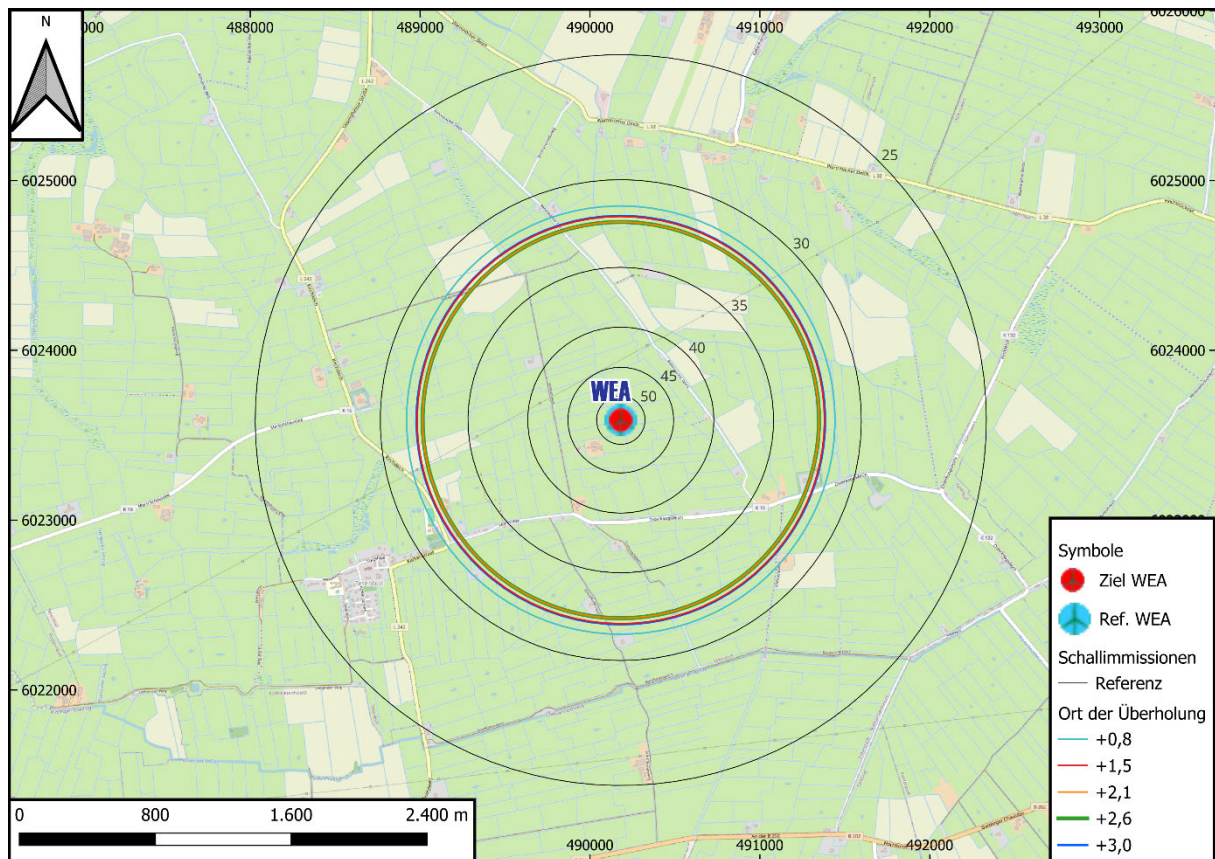


Abbildung 24: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch V
Quelle: Eigene Darstellung

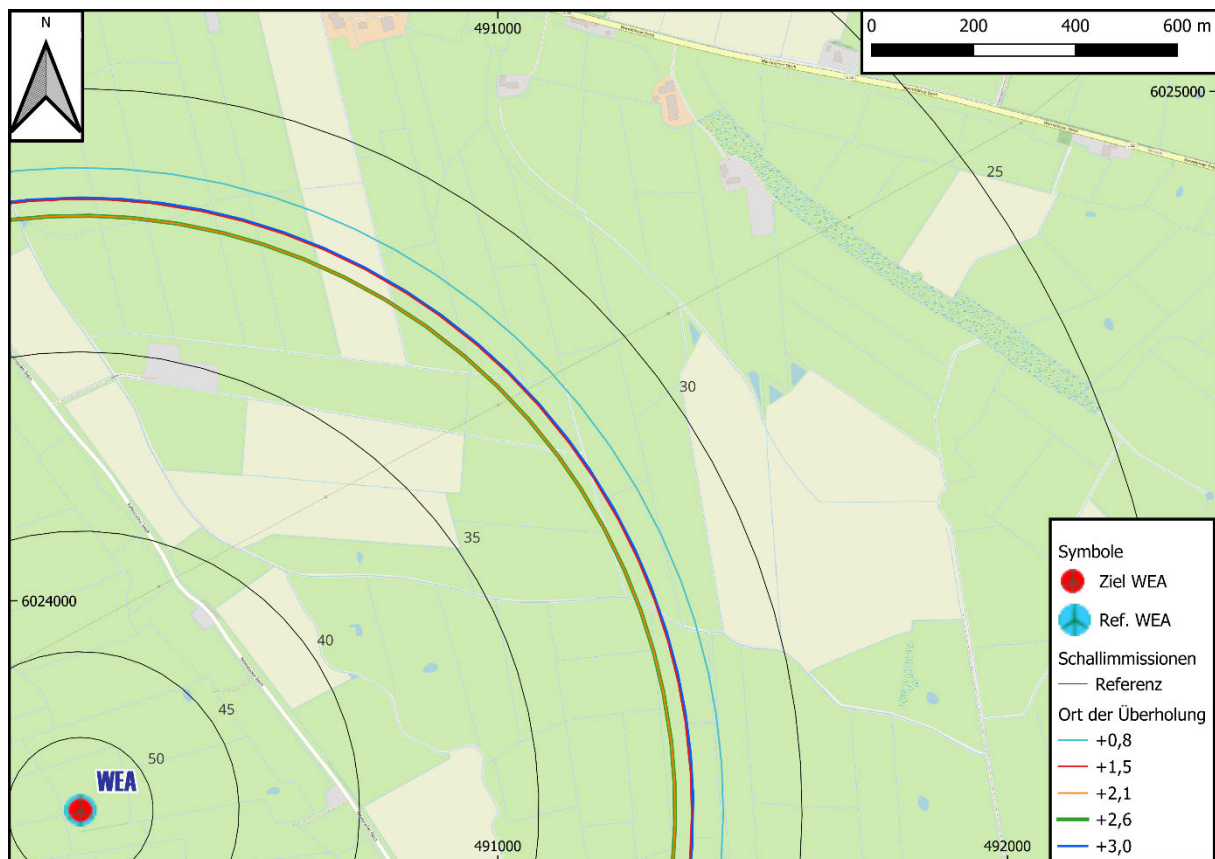


Abbildung 25: Visuelle Ergebnisse von den Vergleichslayern der Modellierung von Versuch V vergrößert
Quelle: Eigene Darstellung

10.5.3 Bewertung

Die visuellen Ergebnisse von Versuch V bestätigen die aufgestellte Hypothese. Durch die gezielte Erhöhung der Oktavbänder bei 125 Hz und 4000 Hz und die gleichzeitige Kompensation der mittleren Frequenzen (500 Hz und 1000 Hz) konnte eine frühere Überholung der Isophonen erzielt werden. Wie in Abbildung 24 und 25 dargestellt, verschieben sich die Orte der Überholung im Vergleich zu Versuch IV deutlich in Richtung der 35 dB(A) Isophone. Die Überholungen treten somit bereits bei höheren Isophonen auf und bestätigen, dass die verstärkte Energieverteilung in den tief- und hochfrequenten Oktavbänder zu einer früheren Überholung der Isophonen führt.

Um die Ergebnisse besser einzuordnen, werden in Tabelle 21 die relativen Anteile der Oktavbänder aus Versuch IV und Versuch V gegenübergestellt. Dadurch wird deutlich, wie sich die spektrale Zusammensetzung und die Schalleistungsanteile in den einzelnen Oktavbändern verändert haben. Während in Versuch IV (Zielspektrum +1,5 dB(A) mit Erhöhung der Oktavbänder 250 Hz und 2000 Hz) eine weitgehend gleichmäßige Verteilung der relativen Anteile im Bereich von 250 Hz bis 2000 Hz vorliegt, zeigt das Zielspektrum aus Versuch V (Erhöhung der Oktavbänder 125 Hz und 4000 Hz um +1,5 dB(A)) eine deutlich breitere und ungleichmäßigere Verteilung der Schalleistung. Eine ausführliche Rechnung der relativen Anteile ist im Anhang G zu finden.

Tabelle 21: Relativen Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +1,5 dB(A) auf den Oktavbänder 250 Hz & 2000 Hz sowie 125 Hz & 4000 Hz im Vergleich zum Referenzspektrum von Versuch V

Quelle: Eigene Darstellung

Versuch V: Relativen Anteile der Oktavbänder für die Zielspektren +1,5 dB(A) auf den Oktavbänder 250 Hz & 2000 Hz sowie 125 Hz & 4000 Hz im Vergleich zum Referenzspektrum			
Oktavbänder [Hz]	Referenzspektrum Relativer Anteil [%]	+1,5 / 250 & 2000 Relativer Anteil [%]	+1,5 / 125 & 4000 Relativer Anteil [%]
63	0,80	0,80	0,80
125	3,49	3,51	4,93
250	15,24	21,66	15,24
500	29,72	23,21	28,38
1000	31,12	24,30	29,71
2000	16,33	23,21	16,33
4000	3,18	3,20	4,50
8000	0,11	0,11	0,11
L_{Σ} [dB(A)]	104,970	104,944	104,970

Im Zielspektrum +1,5 dB(A) mit einer Erhöhung der Oktavbänder bei 125 Hz und 4000 Hz zeigt sich im Vergleich zu Versuch IV eine geringere Kompensation der mittleren Oktavbänder. Je weiter die Oktavbänder am tief- und hochfrequenten Bereich des Oktavspektrum gezielt erhöht werden, desto weniger Einfluss haben sie auf den Rest des Spektrums. Dadurch sind die mittleren Oktavbänder bei 500 Hz und 1000 Hz im Vergleich zur +1,5 dB(A) Erhöhung auf den Oktavbändern 250 Hz und 2000 Hz aus Versuch IV deutlich weniger reduziert und liegen nur leicht unter den relativen Anteilen

des Referenzspektrum. Gleichzeitig bleiben die Oktavbänder 250 Hz und 2000 Hz identisch zum Referenzspektrum, während sich die Anteile der Oktavbänder 125 Hz und 4000 Hz um mehr als 1 % erhöhen. Diese Kombination aus einer leichten Abschwächung der mittleren Oktavbänder (500 Hz und 1000 Hz) und der verstärkten Belegung der tief- und hochfrequenten Oktavbänder (125 Hz und 4000 Hz) führt zu einer insgesamt breiteren spektralen Verteilung der Schalleistung.

Diese Verschiebung der Schallleistungsverteilung bewirkt eine verstärkte Dominanz der tiefen und hohen Frequenzen im Zielspektrum der Erhöhung um +1,5 dB(A) auf den Oktavbänder 125 Hz und 4000 Hz. Der erhöhte Anteil bei 125 Hz führt zu einer größeren Schallausbreitung im Fernfeld, während der höhere Anteil bei 4000 Hz die Schallausbreitung im Nahbereich verstärkt. Durch diese Kombination aus erhöhter Randfrequenzbelegung und leicht abgeschwächten mittleren Bändern verschiebt sich das Spektrum in Richtung einer breiteren energetischen Verteilung, wodurch die Überholung der Isophonen früher auftritt.

Die nahezu identischen Summenschallleistungspegel der Zielspektren gegenüber dem Referenzspektrum belegen, dass die beobachteten Unterschiede ausschließlich auf die geänderte spektrale Zusammensetzung zurückzuführen sind. Die frühere Überholung ist somit nicht das Ergebnis eines höheren Summenschallleistungspegels, sondern das Resultat einer gezielten Umverteilung der Schallenergie über die Oktavbänder.

Damit zeigt Versuch V, dass je weiter die Oktavbänder am tief- und hochfrequenten Bereich des Oktavspektrum bei gleichbleibenden Summenschallleistungspegel mit passender Kompensation erhöht werden, desto weiter verschiebt sich der Ort der Überholung in Richtung der Emissionsquelle. Dieses Erkenntnis unterstreicht den Einfluss der spektralen Zusammensetzung auf das Ausbreitungsverhalten und ergänzt die bisherigen Beobachtungen aus Versuch IV um eine weitere Facette des frequenzabhängigen Immissionsverhaltens.

11 Zusammenfassung und Fazit

Im letzten Kapitel dieser Ausarbeitung werden die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Modellierungen und Berechnungen zusammengefasst und im Hinblick auf die zu Beginn formulierte Forschungsfrage bewertet. Dafür wird zunächst der Zusammenhang zwischen der Zielsetzung der Arbeit und den im Praxisbeispiel gewonnenen Erkenntnissen hergestellt. Daraufhin werden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Versuchen I bis V dargestellt und diskutiert. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der Forschungsfrage sowie ein Ausblick auf mögliche weiterführende Untersuchungen.

11.1 Fragestellung

Der Ausgangspunkt dieser Arbeit war das in mehreren Projekten beobachtete Phänomen der überholenden Isophonen, das wiederholt bei der Auswertung von Schallimmissionsprognosen von Windparks auftrat. Dabei zeigt sich, dass bei den Berechnungen von rückzubauenden WEA und neu zu errichtenden WEA („Repowering“) in WindPRO teilweise eine Überholung der Isophonen auftrat, obwohl der Summenschallleistungspegel, der neu zu errichtenden WEA geringer war. Dieses Verhalten deutete darauf hin, dass nicht allein der Summenschallleistungspegel, sondern die spektrale Zusammensetzung der Schallemissionen das Ausbreitungsverhalten maßgeblich beeinflusst (Kapitel 8). Um diesen Zusammenhang systematisch zu untersuchen, wurde das Phänomen in den anschließenden Modellierungen unter konstanten Rahmenbedingungen betrachtet. Alle äußeren Parameter wie Umgebungsbedingungen, Anlagendaten und der Summenschallleistungspegel wurden über alle Versuche hinweg konstant gehalten, sodass allein der Einfluss der spektralen Zusammensetzung des Schalls isoliert untersucht werden konnte.

Ziel der Arbeit war es daher, den Einfluss der frequenzabhängigen Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien zu untersuchen und zu bewerten, inwiefern die spektrale Zusammensetzung der Schallemissionen Ursache für das Auftreten überholender Isophonen ist.

11.2 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die durchgeführten Modellierungen in den Versuchen I bis V ermöglichen eine systematische Annäherung an die Ursache der überholenden Isophonen und verdeutlichen den Einfluss einzelner Oktavbänder auf die Schallausbreitung.

Versuch I untersuchte die Belegung tief-, mittel- und hochfrequenzlastiger Oktavspektren. Ziel war es, das grundsätzliche Verhalten der Schallausbreitung bei Veränderungen einzelner Frequenzbereiche zu beobachten. Dabei zeigte sich, dass Erhöhungen in den tieffrequenten Oktavbändern (63 Hz und 125 Hz) die Schallausbreitung verstärken, während Erhöhungen in den hochfrequenten Bereichen (4000 Hz und

8000 Hz) die Schallausbreitung reduzieren. Tieffrequenzlastige Oktavspektren werden damit schwächer gedämpft und breiten sich am weitesten aus.

Auf dieser Grundlage wurde in Versuch II eine systematische Erhöhung der tieffrequenten Oktavbänder 63 Hz bis 500 Hz um +2,0 dB(A) vorgenommen. Damit der Summenschallleistungspegel konstant bleibt, wurde eine Kompensation auf den hochfrequenten Oktavbänder 2000 Hz bis 8000 Hz durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass eine Erhöhung der tiefen Frequenzen zwar zu einer stärkeren Ausbreitung führt, der Effekt jedoch stark vom Verhältnis zu den übrigen Oktavbändern abhängt. Insbesondere das Verhältnis zwischen tiefen, mittleren und hohen Frequenzen bestimmt, wie sich der Schall ausbreitet. Nicht allein der tieffrequente Anteil ist ausschlaggebend, sondern die gesamte spektrale Zusammensetzung und das daraus resultierende Verhältnis zwischen den Oktavbändern. Eine Überholung der Isophonen konnte in diesem Versuch nicht beobachtet werden, wodurch deutlich wird, dass eine reine Verstärkung tiefer Oktavbänder nicht ausreicht, um eine Überholung der Isophone hervorzurufen.

Versuch III ergänzte diese Erkenntnisse, indem die hochfrequenten Oktavbänder 1000 Hz bis 8000 Hz systematisch um +2,0 dB(A) erhöht und die tieffrequenten Oktavbänder 63 Hz bis 250 Hz zur Kompensation dienen. Dabei zeigte sich, dass für die Belegung der mittleren Frequenzen 500 Hz und 1000 Hz die entsprechenden Kompensationsbänder stark reduziert werden mussten, um den Summenschallleistungspegel konstant zu halten. Dadurch verschob sich die Verteilung der relativen Anteile im gesamten Spektrum deutlich stärker als angenommen. Das Verhältnis der Frequenzanteile zueinander wurde damit zu einem entscheidenden Einflussfaktor für die Ausbreitung. Das Ergebnis bestätigt, dass die Ausbreitung des Schalls nicht primär von der Belegung einzelner Oktavbänder abhängt, sondern vom Verhältnis der relativen Anteile der Oktavbänder zueinander. Damit wird deutlich, dass nicht allein tieffrequente Anteile die Schallausbreitung dominieren, sondern dass die Verteilung der gesamten Schallleistung über das Spektrum entscheidend ist. Eine Überholung konnte auch in diesem Versuch nicht festgestellt werden, womit sich die Ergebnisse von Versuch II bestätigen.

Versuch IV stellte den nächsten Schritt in der Untersuchung dar und kombinierte erstmals eine gezielte Erhöhung mehrerer Oktavbänder. Dabei wurden die Oktavbänder 250 Hz und 2000 Hz systematisch um denselben Pegelwert angehoben, während die dominanten mittleren Oktavbänder 500 Hz und 1000 Hz zur Kompensation abgesenkt wurden. Diese Anpassung führte zu einer breiteren Verteilung der Schallleistung über das Oktavspektrum, wodurch sich die mittleren Oktavbänder leicht abschwächten und die benachbarten Bereiche stärker belegt wurden. Das Ergebnis zeigte erstmals das Auftreten einer Überholung der Isophonen zwischen der 30 dB(A) und der 25 dB(A) Isophone. Diese Beobachtung belegt, dass eine breitere spektrale Verteilung der Schallleistung, bei konstantem Summenschallleistungspegel, maßgeblich zur Überholung beiträgt. Die Kombination aus Erhöhung der tieferen und höheren Oktavbänder und einer gezielten Kompensation der mittleren Frequenzen führte zu einer Verschiebung der relativen Anteile im Oktavspektrum und zur Veränderung der

Schallausbreitung. Darüber hinaus konnte bei einzelnen Zielspektren eine doppelte Überholung oder eine vergleichsweise spätere Überholung beobachtet werden. Bereits minimale Unterschiede der spektralen Zusammensetzung durch Rundungsfehler in den Kompensationswerten können deutliche Unterschiede im Ausbreitungsverhalten hervorrufen. Das Modellierungsergebnis ist stark anfällig für Rundungsfehler aufgrund einer Dezimalstelle der Eingabepegel.

Der abschließende Versuch V untersucht, ob eine Überholung der Isophonen durch eine noch breitere Verteilung der Schallleistungspegel auf die Oktavbänder früher auftreten kann. Dazu wurden die tieferen und höheren Oktavbänder bei 125 Hz und 4000 Hz erhöht, während die Kompensationsbänder bei 500 Hz und 1000 Hz beibehalten wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Überholungen nun bereits zwischen den Isophonen 35 dB(A) und 30 dB(A) auftreten und damit deutlich früher erfolgen als in Versuch IV.

11.3 Fazit und Ausblick

Die durchgeführten Modellierungen zeigen eindeutig, dass eine Überholung der Isophonen allein durch die spektrale Zusammensetzung des Oktavspektrums stattfinden kann. Die Ergebnisse belegen, dass durch gezielte Änderungen der Oktavbänder, insbesondere durch eine Erhöhung der tief- und hochfrequenten Oktavbänder bei gleichzeitiger Kompensation der dominanten mittleren Oktavbänder, die Schallausbreitung so beeinflusst werden kann, dass eine Überholung der Isophonen gegenüber dem Referenzspektrum auftritt. Damit wurde die zentrale Fragestellung dieser Arbeit bestätigt:

Eine Überholung der Isophonen ist rein durch die Veränderung der spektralen Zusammensetzung möglich.

Überträgt man diese Erkenntnisse auf das „Repowering“ von Projekten in der Praxis, lässt sich das Referenzspektrum als die rückzubauende Anlage und das Zielspektrum als die neu zu errichtende Anlage interpretieren. Ein geringerer Summenschallleistungspegel einer neuen WEA führt dabei nicht zwangsläufig zu niedrigeren Immissionen. Entscheidend ist vielmehr, wie sich die Schallleistung über die einzelnen Oktavbänder verteilt. Die spektrale Zusammensetzung bestimmt maßgeblich, wie weit sich der Schall ausbreitet und wie hoch die Pegel an relevanten Immissionsorten tatsächlich ausfallen. Erst durch die Betrachtung des gesamten Frequenzspektrums lässt sich das Ausbreitungsverhalten zuverlässig beurteilen.

Für weiterführende Untersuchungen ergeben sich mehrere interessante Ansätze. Besonders relevant wäre es, das Phänomen der überholenden Isophonen mit realen Oktavspektren unterschiedlicher Anlagentypen zu überprüfen, um die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zu validieren. Ebenso wäre zu untersuchen, wie sich das Verhalten verändert, wenn neben der spektralen Zusammensetzung auch der Summenschallleistungspegel selbst variiert wird. Dies könnte Aufschluss darüber geben, unter welchen Bedingungen und bei welchen Pegeldifferenzen eine Überholung der Isophonen weiterhin auftritt. Darüber hinaus wäre es von Interesse, die Modellierungen mit anderen Ausbreitungsmodellen,

wie dem Nord2000, durchzuführen. Eine Berechnung mit Terz- oder noch feineren Frequenzbändern sowie abweichenden atmosphärischen Randbedingungen könnte zeigen, ob das beobachtete Verhalten modellübergreifend reproduzierbar ist und somit ein allgemeingültiges physikalisches Phänomen darstellt.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesrepublik Deutschland. Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. Art. 20a. 23. Mai 1949 (BGBl. I S. 1), zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 19.12.2022 (BGBl. I S. 2478).
- [2] Bundesrepublik Deutschland. Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). 15. März 1974 (BGBl. I S. 721), zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 10.08.2021 (BGBl. I S. 3490).
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) – Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (§ 48 BImSchG). GMBI 1998 S. 503, zuletzt geändert durch GMBI 2017 S. 207.
- [4] Umweltbundesamt. Grundlagen der Akustik [Online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt; 11.06.2018; Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/laerm/verbraucherservice-laerm/grundlagen-der-akustik> [letzter Zugriff: 27.08.2025].
- [5] Sinambari GR, Sentpali S. Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen, Anwendungsbeispiele und Übungen. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2020.
- [6] Lerch R, Sessler GM, Wolf D. Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag; 2009.
- [7] DIN EN 61672-1:2014-07. Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013); Deutsche Fassung EN 61672-1:2013. Berlin: Beuth Verlag; 2014.
- [8] Bundesrepublik Deutschland. Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV). 14.03.1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 13.07.2021 (BGBl. I S. 2970).
- [9] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN ISO 9613-2:1999-10 – Akustik: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996). Berlin: Beuth Verlag; 1999.
- [10] Hau E. Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 5. Aufl. Berlin: Springer Vieweg; 2014. Kapitel 15.2.2, S. 653–657.
- [11] Baumgart J. Von der Strömung zum Druck – Schall von Windenergieanlagen: Entstehung, Ausbreitung, Wirkung auf den Menschen und Beurteilung. Akustik Journal. 2020.
- [12] Bowler D, Leventhall G, Hrsg. Wind Turbine Noise. Brentwood (UK): Multi-Science Publishing. Ltd.; 2011
- [13] Mellert S, Rokita D, Ueberle F. Schallimmissionsmessungen an Windenergieanlagen mit einer akustischen Kamera zum Aufbau einer Geräuschdatenbank. In: DAGA 2019 – 45. Jahrestagung für Akustik; 2019 Mar 18–21; Rostock, Deutschland. Berlin: DEGA; 2019. S. 58–61.

- [14] DIN/VDI-NALS. Dokumentation zur Schallausbreitung – Interimsverfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen von Windkraftanlagen. Fassung 2015-05.1. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.; 2015.
- [15] Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI). LAI-Hinweise (Interimsverfahren): Schallimmissionsschutz bei Windkraftanlagen. Revision 5. Berlin: LAI; 2019 Mar.
- [16] DataKustik GmbH. CadnaA – Stand der Technik beim Immissionsschutz. [Online]. Pinneberg: DataKustik GmbH; 2025; Verfügbar unter: <https://www.datakustik.com/de/produkte/cadnaa/cadnaa> [letzter Zugriff: 25.09.2025].
- [17] SoundPLAN GmbH. SoundPLAN – Lärmsimulationssoftware. [Online]. Backnang: SoundPLAN GmbH; 2025; Verfügbar unter: <https://www.soundplan.eu/de/> [letzter Zugriff: 25.09.2025].
- [18] EMD International A/S. windPRO – Software für Wind- und Solarenergieprojekte [Online]. Aalborg: EMD International A/S; 2025; Verfügbar unter: <https://www.emd-international.com/software/windpro> [letzter Zugriff: 17.09.2025].
- [19] EMD International A/S. Handbuch BASIS [Online]. EMD Online Help; 14.03.2024; Verfügbar unter: https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Handbuch_BASIS [letzter Zugriff: 17.09.2025].
- [20] EMD International A/S. Handbuch DECIBEL [Online]. EMD Online Help; 24.07.2025; Verfügbar unter: https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Handbuch_DECIBEL [letzter Zugriff: 22.09.2025]
- [21] EMD International A/S. Hauptseite (DE) [Online]. EMD Online Help; 24.07.2025; Verfügbar unter: [https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Hauptseite_\(DE\)](https://help.emd.dk/mediawiki/index.php/Hauptseite_(DE)) [letzter Zugriff: 17.09.2025]

Anhang A: Rechnungen zum Praxisbeispiel

Relative Anteile der Oktavbänder am Summenschallleistungspegel für WEA I n & WEA II n			
F [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Anteil [%]
63	89,1	$8,128 \cdot 10^8$	1,87
125	98,7	$7,413 \cdot 10^9$	17,02
250	99,0	$7,943 \cdot 10^9$	18,24
500	99,1	$8,128 \cdot 10^9$	18,66
1000	100,1	$1,023 \cdot 10^{10}$	23,49
2000	98,8	$7,586 \cdot 10^9$	17,42
4000	91,3	$1,349 \cdot 10^9$	3,10
8000	79,6	$9,120 \cdot 10^7$	0,21

Relative Anteile der Oktavbänder am Summenschallleistungspegel für WEA I			
F [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Anteil [%]
63	86,2	$4,169 \cdot 10^8$	0,83
125	93,1	$2,042 \cdot 10^9$	4,07
250	99,4	$8,710 \cdot 10^9$	17,38
500	101,8	$1,514 \cdot 10^{10}$	30,21
1000	102,1	$1,622 \cdot 10^{10}$	32,37
2000	98,0	$6,310 \cdot 10^9$	12,59
4000	91,0	$1,259 \cdot 10^9$	2,51
8000	72,0	$1,585 \cdot 10^7$	0,03

Relative Anteile der Oktavbänder am Summenschallleistungspegel für WEA II			
F [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Anteil [%]
63	87,7	$5,888 \cdot 10^8$	1,35%
125	95,2	$3,311 \cdot 10^9$	7,57%
250	99,8	$9,550 \cdot 10^9$	21,82%
500	101,5	$1,413 \cdot 10^{10}$	32,27%
1000	100,4	$1,096 \cdot 10^{10}$	25,05%
2000	96,3	$4,266 \cdot 10^9$	9,75%
4000	89,4	$8,710 \cdot 10^8$	1,99%
8000	79,6	$9,120 \cdot 10^7$	0,21%

Anhang B: Berechnungen zu Versuch II

Schallleistungen des Referenzbands von Versuch II		
F [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$

Versuch II: Berechnung von K

$$5,129 \cdot 10^9 + 1,000 \cdot 10^9 + 3,467 \cdot 10^7 = 6,163 \cdot 10^9$$

Berechnung des Pegeloffsets (x) von Versuch II				
Zielspektrum	Z	K	Δ_z	x
+2dB(A) 63Hz	$2,512 \cdot 10^8$	$6,163 \cdot 10^9$	2	-0,10
+2dB(A) 125Hz	$1,096 \cdot 10^9$	$6,163 \cdot 10^9$	2	-0,48
+2dB(A) 250H	$4,786 \cdot 10^9$	$6,163 \cdot 10^9$	2	-2,63
+2dB(A) 500 Hz	$9,333 \cdot 10^9$	$6,163 \cdot 10^9$	2	-9,42

Relative Anteile der Oktavbänder für das Referenzband von Versuch II			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,49
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$	15,24
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,72
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$	31,12
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$	16,33
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,18
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum der +2 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 63 Hz von Versuch II			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	86,0	$3,981 \cdot 10^8$	1,27
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,49
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$	15,24
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,71
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$	31,11
2000	97,0	$5,012 \cdot 10^9$	15,96
4000	89,9	$9,772 \cdot 10^8$	3,11
8000	75,3	$3,388 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum der +2 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 500 Hz von Versuch II			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,49
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$	15,24
500	101,7	$1,479 \cdot 10^{10}$	47,10
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$	31,12
2000	87,7	$5,888 \cdot 10^8$	1,87
4000	80,6	$1,148 \cdot 10^8$	0,37
8000	66,0	$3,981 \cdot 10^6$	0,01

Anhang C: Berechnungen zu Versuch III

Schallleistungen des Referenzbands von Versuch III		
F [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$

Versuch III: Berechnung von K

$$2,512 \cdot 10^8 + 1,096 \cdot 10^9 + 4,786 \cdot 10^9 = 6,134 \cdot 10^9$$

Berechnung des Pegeloffsets (x) von Versuch III				
Zielspektrum	Z	K	Δ_z	x
+2dB(A) 1000Hz	$9,772 \cdot 10^9$	$6,134 \cdot 10^9$	2	-11,66
+2dB(A) 2000Hz	$5,129 \cdot 10^9$	$6,134 \cdot 10^9$	2	-2,92
+2dB(A) 4000Hz	$1,000 \cdot 10^9$	$6,134 \cdot 10^9$	2	-0,44
+2dB(A) 8000Hz	$3,467 \cdot 10^7$	$6,134 \cdot 10^9$	2	-0,01

Relative Anteile der Oktavbänder für das Referenzband von Versuch III			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,49
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$	15,24
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,72
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$	31,12
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$	16,33
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,18
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum der +2 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 1000 Hz von Versuch III			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	72,3	$1,698 \cdot 10^7$	0,05
125	78,7	$7,413 \cdot 10^7$	0,24
250	85,1	$3,236 \cdot 10^8$	1,03
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,72
1000	101,9	$1,549 \cdot 10^{10}$	49,33
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$	16,33
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,18
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum der +2 dB(A) Erhöhung des Oktavbands 8000 Hz von Versuch III			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,49
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$	15,23
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,70
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$	31,10
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$	16,32
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,18
8000	77,4	$5,495 \cdot 10^7$	0,17

Anhang D: Berechnungen zu Versuch IV

Schallleistungen des Referenzbands von Versuch IV		
F [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$

Berechnung von Z:

$$4,786 \cdot 10^9 + 5,129 \cdot 10^9 = 9,915 \cdot 10^9$$

Berechnung von K:

$$9,333 \cdot 10^9 + 9,772 \cdot 10^9 = 1,910 \cdot 10^{10}$$

Berechnung des Pegeloffsets (x) von Versuch II & III					
Zielspektrum	Z	K	Δ_z	x	x gerundet
+0,3	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	0,3	-0,16	-0,2
+0,4	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	0,4	-0,22	-0,2
+0,5	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	0,5	-0,28	-0,3
+0,6	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	0,6	-0,35	-0,4
+0,7	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	0,7	-0,41	-0,4
+0,8	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	0,8	-0,48	-0,5
+0,9	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	0,9	-0,55	-0,6
+1,0	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,0	-0,63	-0,6
+1,1	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,1	-0,70	-0,7
+1,2	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,2	-0,78	-0,8
+1,3	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,3	-0,87	-0,9
+1,4	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,4	-0,96	-1,0
+1,5	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,5	-1,05	-1,1
+1,6	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,6	-1,14	-1,1
+1,7	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,7	-1,24	-1,2
+1,8	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,8	-1,35	-1,4
+1,9	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,9	-1,46	-1,5
+2,0	$9,915 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	2,0	-1,57	-1,6

Relative Anteile der Oktavbänder für das Referenzband von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,49
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$	15,24
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,72
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$	31,12
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$	16,33
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,18
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +0,8 dB(A) von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,50
250	97,6	$5,754 \cdot 10^9$	18,37
500	99,2	$8,318 \cdot 10^9$	26,55
1000	99,4	$8,710 \cdot 10^9$	27,80
2000	97,9	$6,166 \cdot 10^9$	19,68
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,19
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +1,1 dB(A) von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,49
250	97,9	$6,166 \cdot 10^9$	19,63
500	99,0	$7,943 \cdot 10^9$	25,28
1000	99,2	$8,318 \cdot 10^9$	26,48
2000	98,2	$6,607 \cdot 10^9$	21,03
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,18
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +2,0 dB(A) von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,50
250	98,8	$7,586 \cdot 10^9$	24,23
500	98,1	$6,457 \cdot 10^9$	20,62
1000	98,3	$6,761 \cdot 10^9$	21,59
2000	99,1	$8,128 \cdot 10^9$	25,96
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,19
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Anhang E: Berechnungen für die doppelte Überholung

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +0,4 dB(A) von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,48
250	97,2	$5,248 \cdot 10^9$	16,66
500	99,5	$8,913 \cdot 10^9$	28,29
1000	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,63
2000	97,5	$5,623 \cdot 10^9$	17,85
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,17
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +1,5 dB(A) mit der Kompensation von –1,1 dB(A) von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,51
250	98,3	$6,761 \cdot 10^9$	21,66
500	98,6	$7,244 \cdot 10^9$	23,21
1000	98,8	$7,586 \cdot 10^9$	24,30
2000	98,6	$7,244 \cdot 10^9$	23,21
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,20
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +1,5 dB(A) mit der Kompensation von –1,0 dB(A) von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,47
250	98,3	$6,761 \cdot 10^9$	21,42
500	98,7	$7,413 \cdot 10^9$	23,49
1000	98,9	$7,762 \cdot 10^9$	24,59
2000	98,6	$7,244 \cdot 10^9$	22,95
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,17
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Anhang F: Berechnungen für den Ort der Überholung nach der 25 dB(A) Isophone

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +0,3 dB(A) von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,51
250	97,1	$5,129 \cdot 10^9$	16,41
500	99,5	$8,913 \cdot 10^9$	28,52
1000	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,86
2000	97,4	$5,495 \cdot 10^9$	17,58
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,20
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +0,6 dB(A) von Versuch IV			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,81
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,52
250	97,4	$5,495 \cdot 10^9$	17,62
500	99,3	$8,511 \cdot 10^9$	27,29
1000	99,5	$8,913 \cdot 10^9$	28,57
2000	97,7	$5,888 \cdot 10^9$	18,88
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,21
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Anhang G: Berechnungen zu Versuch V

Schallleistungen des Referenzbands von Versuch V		
F [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$

Berechnung von Z:

$$1,096 \cdot 10^9 + 1,000 \cdot 10^9 = 2,096 \cdot 10^9$$

Berechnung von K:

$$9,333 \cdot 10^9 + 9,772 \cdot 10^9 = 1,910 \cdot 10^{10}$$

Berechnung des Pegeloffsets (x) von Versuch V					
Zielspektrum	Z	K	Δ_z	x	x gerundet
+0,8	$2,096 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	0,8	-0,10	-0,1
+1,5	$2,096 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	1,5	-0,20	-0,2
+2,1	$2,096 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	2,1	-0,31	-0,3
+2,6	$2,096 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	2,6	-0,41	-0,4
+3,0	$2,096 \cdot 10^9$	$1,910 \cdot 10^{10}$	3,0	-0,50	-0,5

Relative Anteile der Oktavbänder für das Referenzband von Versuch V			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,49
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$	15,24
500	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,72
1000	99,9	$9,772 \cdot 10^9$	31,12
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$	16,33
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,18
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +1,5 dB(A) auf den Oktavbänder 250 Hz & 2000 Hz von Versuch V			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	90,4	$1,096 \cdot 10^9$	3,51
250	98,3	$6,761 \cdot 10^9$	21,66
500	98,6	$7,244 \cdot 10^9$	23,21
1000	98,8	$7,586 \cdot 10^9$	24,30
2000	98,6	$7,244 \cdot 10^9$	23,21
4000	90,0	$1,000 \cdot 10^9$	3,20
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11

Relative Anteile der Oktavbänder für das Zielspektrum +1,5 dB(A) auf den Oktavbänder 125 Hz & 4000 Hz von Versuch V			
Oktavbänder [Hz]	L_i [dB(A)]	$P_i = P_0 \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}$ [W]	Relativer Anteil [%]
63	84,0	$2,512 \cdot 10^8$	0,80
125	91,9	$1,549 \cdot 10^9$	4,93
250	96,8	$4,786 \cdot 10^9$	15,24
500	99,5	$8,913 \cdot 10^9$	28,38
1000	99,7	$9,333 \cdot 10^9$	29,71
2000	97,1	$5,129 \cdot 10^9$	16,33
4000	91,5	$1,413 \cdot 10^9$	4,50
8000	75,4	$3,467 \cdot 10^7$	0,11