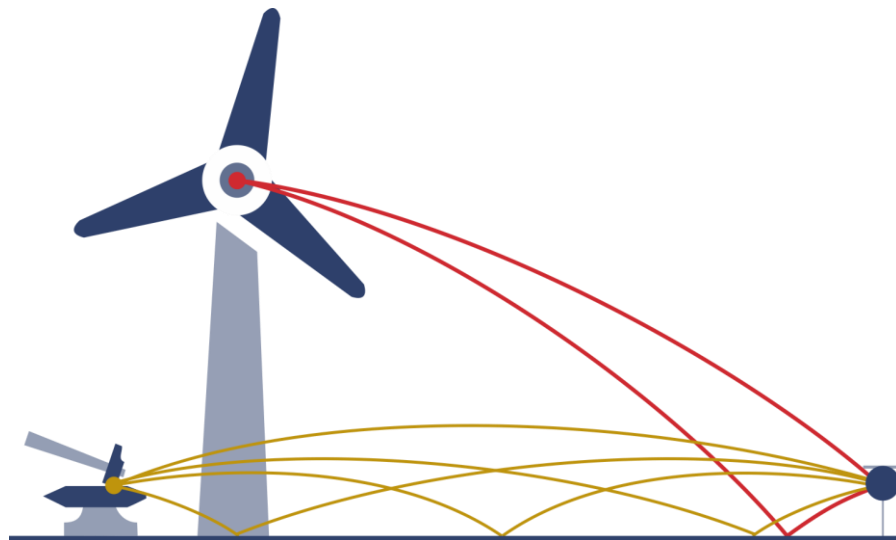


# 7

## Hochliegende Quellen

Eine einfache Herausforderung in  
technischen Schallausbreitungsmodellen



Kennung: kwhdba.22.00

Datum: 20.09.2021

Status: Entwurf

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Hochliegende Quellen .....	4
2.1	Definition .....	4
2.2	Unterscheidung zwischen beiden Szenarien .....	4
2.3	Zur DIN ISO 9613-2 .....	6
2.3.1	Das 4-Strahlen-Modell .....	6
2.3.2	Der Einfallswinkel.....	6
2.3.3	Grenzbereiche.....	8
2.3.4	Windenergieanlagen.....	8
3	Aspekte steiler Ausbreitungsszenarien .....	9
3.1	Einführung in die der Bodenreflexion auf Immissionspegel .....	9
3.2	Bodenreflexion in steilen Ausbreitungsszenarien.....	10
3.3	Meteorologie – Langzeitwetter .....	12
3.3.1	Datenbasis .....	12
3.3.2	Der relevante Krümmungsradius .....	13
4	Ansatz für das $A_{gr}$ bei hochliegenden Quellen .....	16
4.1	Vorschlag .....	16
4.2	Begründung und Ableitung.....	16
5	Das $C_{met}$ bei hochliegenden Quellen .....	22
5.1	Vorschlag .....	22
5.2	Begründung und Ableitung.....	23
5.2.1	Die meteorologische Korrektur.....	23
5.2.2	Brechungspotential der Atmosphäre .....	23
5.2.3	Eigenschaften des Vorschlags.....	24
5.2.4	Konsistenz mit Analysen des Schallwetters: Windenergieanlage.....	25
6	Maßgebliche Windrose bei hochliegenden Quellen .....	26
7	Verweise .....	30
8	Über „Bella Acustica – De Bello Acustico“ .....	31

## 1 Einleitung

„Hochliegende Quellen“ sind heute fast schon ein Synonym für Windenergieanlagen, wenn man sich in den Kreisen der Verwaltungsakustik bewegt. Der Titel hätte also schlicht auch „Windenergieanlagen“ heißen können. Aber diese Engführung wäre schlicht falsch, nicht weil die hier diskutierten Phänomene auf diese Anlagen nicht grundsätzlich zuträfen, sondern weil eine Windenergieanlage eine äußerst komplexe Geräuschquelle ist, für die die Punktschallquelle eine massive und vermutlich zu weit gehende Ersatzschallquelle darstellt. Hier geht es tatsächlich um eine hochliegende Punktschallquelle.

Der Untertitel soll verblüffen, reizen und zum Lesen dieses Aufsatzes anregen. Dem Problem hochliegende Quelle wird Einfachheit attestiert. Und das zurecht. Denn im Vergleich zu bodennahen Geräuschquellen fehlt der massive Einfluss der brechenden Atmosphäre und die Wirkung von Vielfachreflexionen am Boden. Die Schallausbreitungsrechnung für hochliegende Punktschallquellen ist deshalb mit weniger Unsicherheiten verbunden als bei bodennahen Quellen.

Dass hochliegende Quellen im Rahmen der Verwaltungsakustik schwierig sind, liegt daran, dass sie nicht in die Rechenmethoden der einschlägigen Normen passen. Die DIN ISO 9613-2 [1] gilt nicht für diese Quellen. Und jede Extrapolation eines Ingenieur-Modells über seinen vorgegeben Gültigkeitsbereich führt zu einer besonderen Nachweis- und Begründungspflicht, weil man den Grund für die Beschränkung des Gültigkeitsbereich durch den Normensetzers entkräften muss.

Dieser Aufsatz stellt sich in gewisser Weise dieser Aufgabe. Er macht konkrete Vorschläge, wie im Rahmen und der Sprache des Rechenschemas der Normen, die Besonderheiten von hochliegenden Quellen berücksichtigt werden können. Dies führt zu einer sachgerechten Setzung der G-Faktoren bei der Bodenreflexion und zu einer Erweiterung des Konzepts für die Berechnung bei der Bestimmung der meteorologischen Korrektur.

In Deutschland stellt die VDI 4101 Blatt 2 [2] für Windenergieanlagen - also im Sinne dieses Aufsatzes eine typische, aber nicht alleinstellende Ausprägung einer hochliegenden Quelle - bereits ein pauschales Verfahren für die Verwaltungsakustik zur Verfügung. Dieses Verfahren macht genau das, was hier auch angestrebt wird: Die VDI 4101 formuliert in der Sprache der DIN ISO 9613-2 die Besonderheiten bei der Ausbreitungsrechnung der Windenergieanlagen. Dabei wird das  $A_{gr} \equiv -3$  dB und das  $C_{met} \equiv 0$  dB als unabdingbar gesetzt. Dieser Aufsatz wird zeigen, dass bei näherer Analyse diese Setzungen modifiziert werden sollten.

## 2 Hochliegende Quellen

### 2.1 Definition

Es liegt nahe, die Definition des Hochliegend einer Quelle an ihrer Höhe über Boden festzumachen. Also beispielsweise ‚Quellhöhe größer als 30 m‘. Eine solche Festlegung ist zwar einfach, aber nicht zielführend. Sie greift nicht den richtigen Parameter heraus, um das Hochliegend vom Tiefliegend (Bodennähe) einer Quelle zu unterscheiden.

Es ist sachgerechter, von ‚flacher‘ und von ‚steiler‘ Schallausbreitung zu sprechen. Der Aufsatz sollte also eher ‚Steile Schallausbreitung‘ heißen. Die Definition ‚hochliegende Quelle‘ lautet deshalb zunächst in dieser Terminologie

- a. Eine Quelle ist in einem steilen Ausbreitungsszenario, wenn nur eine einzige Bodenreflexion den Empfänger unter steilem Einfallswinkel erreicht. (Abbildung 1)
- b. Eine Quelle ist in einem flachen Ausbreitungsszenario, wenn viele Bodenreflexionen den Empfänger unter flachen Einfallswinkeln erreichen. (Abbildung 2)



Abbildung 1 steiles Ausbreitungsszenario



Abbildung 2 flaches Ausbreitungsszenario

In der Definition können die Begriffe Quelle und Empfänger vertauscht werden. Quelle und Empfänger werden hier als reziproke Elemente eines Schallausbreitungsszenario betrachtet.

#### *Anmerkung*

*Streng physikalisch ist das nicht richtig, weil in einem bewegten Medium die Reziprozität aufgehoben ist, [3].*

### 2.2 Unterscheidung zwischen beiden Szenarien

Aus der Definition folgt die Frage, wie man bestimmt, ob eine konkrete Ausbreitungssituation flach oder steil ist. Es ist klar, dass wenn man gradlinige Schallwege annimmt, alle Szenarien nur gerade einen Weg mit Bodenreflexion ausbilden. Man benötigt eine brechende Atmosphäre, die zu gekrümmten Wegen führt, um mehr Wege möglich zu machen. Nur dann bleibt es bei einem Szenario nicht bei zwei Schallwegen, es werden mehrere möglich. In einem flachen Szenario gibt es also neben dem Direktschall Wege mit einer Bodenreflexion und gegebenenfalls Schallwege mit mehreren Bodenreflexionen.

Offensichtlich bestimmt der Einfallswinkel das Geschehen. Der Einfallswinkel hängt von der Brechung in der Atmosphäre ab, die im einfachsten Fall einer konstanten Krümmung über den Krümmungsradius beschrieben werden kann. Es wird unten noch erforderlich sein, eine Bestimmung des Krümmungsradius über die Höhe der Quelle anzugeben. Bei gegebenem Krümmungsradius kann man mit Hilfe eines Kreisstrahlenmodell für jedes Ausbreitungsszenario im Einzelfall bestimmen, ob es sich um ein flaches oder steiles Szenario handelt. In dem hier diskutierten Kontext eines technischen Modells der Schallausbreitung für die Verwaltungsakustik wird eine denkbar einfache Bedingung eingeführt, die aus den Erfahrungen mit dem Kreisstrahlenmodell sachgerecht ist.

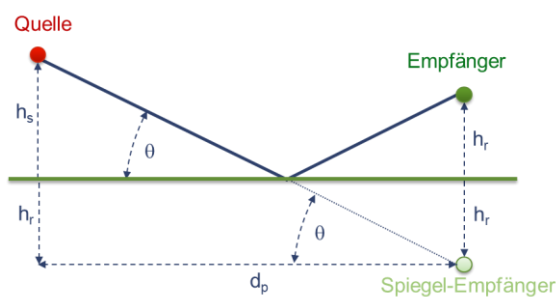


Abbildung 3 Skizze zum Einfallswinkel

Falls bei geraden Strahlen, der Einfallswinkel größer ist als  $1^\circ$ , handelt es sich um ein steiles Ausbreitungsszenario, sonst um ein flaches Szenario.

In dem Ersatzszenario mit geraden Strahlen lässt sich der Einfallswinkel  $\theta$  direkt aus der Geometrie der Schallausbreitung ableiten,

siehe Abbildung 3. Es ergibt sich die Bestimmungsgleichung Gl. 1.

$$\tan(\theta) = \frac{h_s + h_r}{d_p} \tag{Gl. 1}$$

Für die Setzung von  $\theta \equiv 1^\circ$  ergibt sich dann ein Nomogramm, aus dem man bei gegebener Quell- und Empfängerhöhe und bei gegebenem Abstand ablesen kann, ob das Ausbreitungsszenario flach oder steil ist.

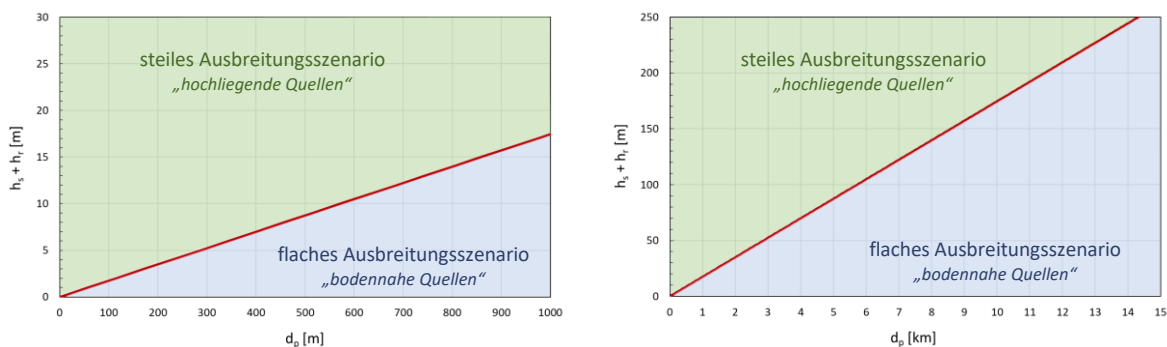


Abbildung 4 Unterscheidung zwischen steilem und flachem Ausbreitungsszenario  
 Kriterium: Einfallswinkel  $\theta = 1^\circ$   
 links: Bereich bis 1000 m Abstand, rechts: Bereich bis 15 km

## 2.3 Zur DIN ISO 9613-2

### 2.3.1 Das 4-Strahlen-Modell

Im Anwendungsbereich der DIN ISO 9613-2 wird vermerkt, dass das dort beschriebene Schema für ‚bodennahe‘ Quellen gilt. Es gibt allerdings keinen konkreten Hinweis darauf, dass sie nicht für hochliegende Quellen anzuwenden ist.

*Anmerkung*

*Die Norm schließt lediglich aus, dass sie für Fluglärm oder Sprengungen usw. angewendet wird.*

Die Norm setzt also in der hier eingeführten Notation ein flaches Szenario voraus, in dem mehr als ein Schallweg mit Bodenreflexion vorkommen muss. Dies ist offensichtlich so, wenn man auf das Bild aus der Norm in Abbildung 5 schaut.

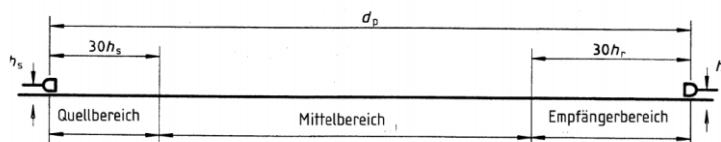


Bild 1: Drei verschiedene Bereiche für die Bestimmung der Bodendämpfung

Abbildung 5 Skizze zur Bodenreflexion in der Norm DIN ISO 9613-2

Die DIN ISO 9613-2 geht also von einem flachen Szenario aus. Ihr Schema unterscheidet zwischen einer quellenahen Bodenreflexion ( $A_s$ ), einer Bodenreflexion auf dem Ausbreitungsweg ( $A_m$ ) und einer empfangernahen Bodenreflexion ( $A_r$ ). Für jeden dieser drei Bereiche ist ein spezifischer  $G$  als Bodenfaktor vorzugeben.

In [4] wird dies näher ausgeführt. Dort werden auch Oktavspektren herangezogen, um diese Schlussfolgerung zu belegen.

### 2.3.2 Der Einfallswinkel

In der DIN ISO 9613-2 taucht der Einfallswinkel in Tabelle 3, die die Formeln zur Berechnung der Bodendämpfungsbeiträge angibt, auf: Dort wird eine Bedingung für die Verwendung des Faktors ‚ $q$ ‘, der maßgeblich für den Beitrag der Reflexion des Mittelbereichs  $A_m$  ist, angegeben.

$$q = 0, \text{ wenn } d_p \leq 30(h_s + h_r)$$

$$q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p}, \text{ wenn } d_p > 30(h_s + h_r)$$

Angaben in Tabelle 3 der DIN ISO 9613-2 zur Fallunterscheidung beim Faktor  $q$

Diese Bedingung lässt sich mit Hilfe von Gl. 1 als eine Vorgabe für den Einfallswinkel interpretieren.

$$\theta_{\text{eff}} = \arctan\left(\frac{1}{30}\right) = \arctan\left(\frac{(h_s + h_r)}{d_p}\right) \approx 1,9^\circ$$

Gl. 2

### Anmerkung 1

Dies ist sicherlich eine ungewöhnliche Auslegung der Bedingung. Nach Aussagen in der Norm testet die Bedingung ab, ob es nach Bild 1 der Norm, s. o., überhaupt einen Mittelbereich gibt, DIN ISO 9613-2, 7.3.1 c).

### Anmerkung 2

Es gibt für den quellnahen und empfängernahen Bereich keine Setzung von  $G$ , die die entsprechende Bodendämpfung gezielt ausschaltet, um auf ein steiles Szenario umschalten zu können. Lediglich die Bodendämpfung des Mittelbereich lässt sich für alle Oktaven außer der 63-Hz-Oktave ausschalten, wenn man  $G_m = 1$  annimmt.

Man kann im Kreismodell leicht zeigen, dass das  $\theta_{\text{eff}}$  dem Einfallswinkel bei einem realen Szenario in einer brechenden Atmosphäre entsprechen muss. Denn es geht in die Berechnung der lokalen Reflexion ein. Der Einfallswinkel in einem Ersatzszenario mit geraden Strahlen ist typisch ungefähr halb so groß. Neben den Berechnungen mit Hilfe des Kreisstrahlenmodells liefert diese Ableitung ebenfalls einen Hinweis darauf, dass das  $1^\circ$ -Kriterium zur Unterscheidung zwischen einem flachen und steilen Ausbreitungsszenario im Ansatz sachgerecht ist.

### Anmerkung

Abbildung 6 stellt das  $q$  in Abhängigkeit vom Abstand  $d_p$  für verschiedene  $h_s + h_r$  dar. Diese Abbildung möge die Serie von Bild 2 der DIN ISO 9613-2 ergänzen.

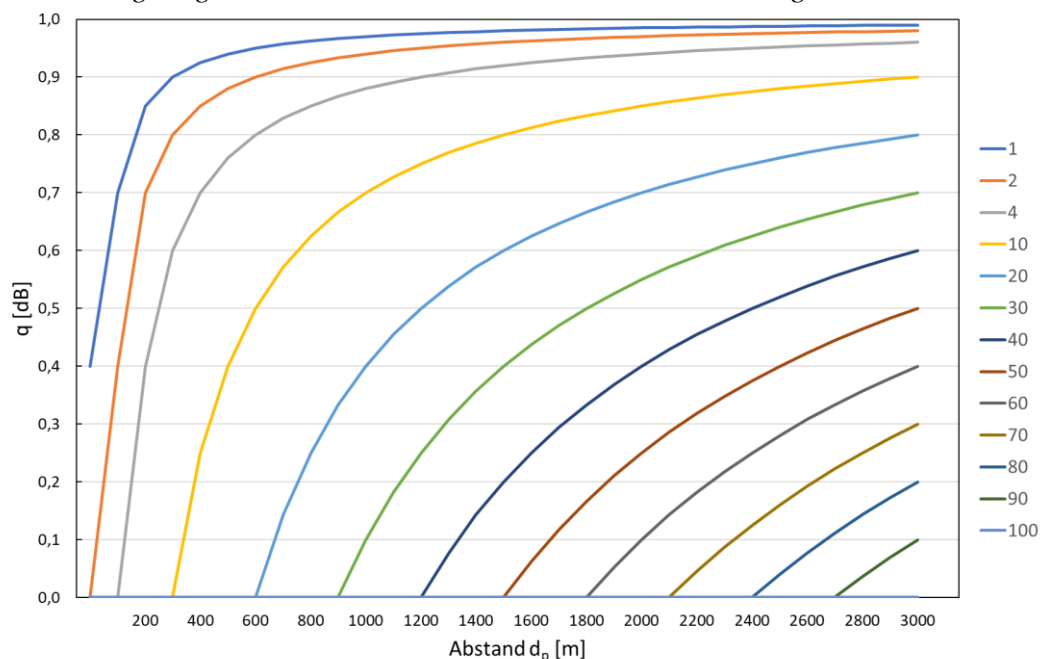


Abbildung 6 Das  $q$  nach Tabelle 3 der DIN ISO 9613-2  
Parameter  $h_r + h_s$

### 2.3.3 Grenzbereiche

Folgt man dem obigen Ansatz, werden aus Szenarien, für die man die DIN ISO 9613-2 in der Regel anwendet, unvermutet steile Ausbreitungsszenarien, für die man die Ergebnisse der DIN ISO 9613-2 anzweifeln könnte. Aus Abbildung 4 entnimmt man beispielsweise, dass ein Szenario mit Quelle und Empfänger in jeweils 1 m Höhe bei einem Abstand von 100 m ein flaches Szenario ist. Vergrößert man die Höhen auf jeweils 2 m und höher, werden daraus steile Szenarien vor, für die die Norm nicht mehr anwendbar sein sollte.

Dies lässt sich direkt zeigen: Wenn man schallharten Boden annimmt, also für alle  $G = 1$  setzt, ändert sich der Immissionspegel nach DIN ISO 9613-2 mit der Höhe nicht. Es ergibt sich ein konstantes  $A_{gr} = -3$  dB. Das ist nicht sachgerecht. Denn mit zunehmender Höhe wird der Beitrag der Bodenreflexion immer unbedeutender, weil sein Laufweg im Vergleich zu dem des Direktschalls immer größer wird. Der Immissionspegel wird für große Höhen von der DIN ISO 9613-2 also um 3 dB überschätzt. Die Aussage der Norm in ihrem Anwendungsbereich, dass die Quellen ‚bodennah‘ sein müssen, schließt Szenarien, die zu diesem Fehler führen, nicht unbedingt aus.

### 2.3.4 Windenergieanlagen

Aus Abbildung 4 entnimmt man ebenfalls, dass das typische Szenario für eine Windenergieanlage allein schon wegen der Quellhöhe in den lärmakustisch relevanten Abständen ein steiles Ausbreitungsszenario darstellt und damit die DIN ISO 9613-2 nicht anwendbar sein wird.

Es stellt sich die Frage, ob man das Schema der Norm über ihre Stellgrößen so konfigurieren kann, dass ihr Schema dennoch hinreichend zuverlässige Immissionspegel liefert. Die VDI 4101 Blatt 2 hat diese Frage mit Ja beantwortet und das  $A_{gr} \equiv -3$  dB und das  $C_{met} \equiv 0$  dB gesetzt.

In diesem Aufsatz werden diese Setzungen mit Hilfe eines physikalischen Ausbreitungsmodells überprüft. Es ergibt sich ein davon abweichender Vorschlag.



### 3 Aspekte steiler Ausbreitungsszenarien

#### 3.1 Einfluss der Bodenreflexion auf Immissionspegel

Die Bedeutung der Bodenreflexion bei flachen Einfallswinkeln wird zunächst anhand des Vergleichs einer Messung mit einer Rechnung vorgestellt.

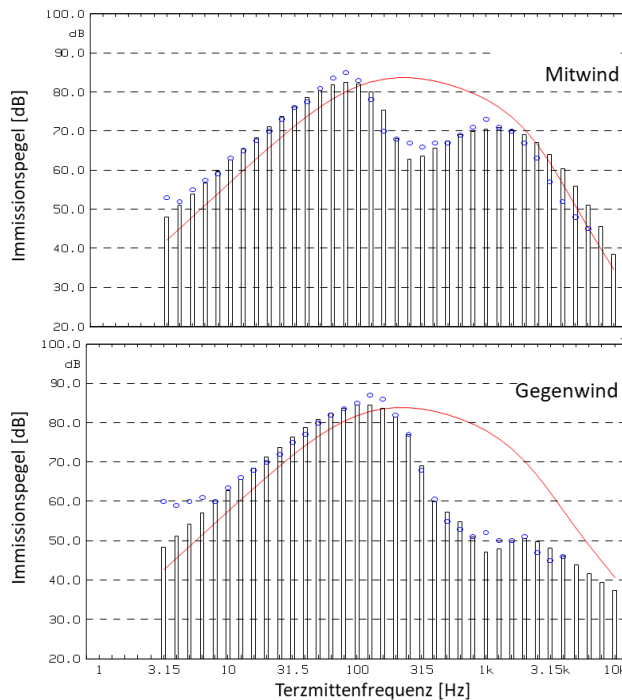


Abbildung 7 Wirkung des Einfallswinkels bei Grasboden  
 Vergleich von Theorie und Messung  
 $h_s = 0,5 \text{ m}$ ,  $h_r = 1,3 \text{ m}$ ,  $d_p = 250 \text{ m}$ , Sprengung  
 50 g TNT

Unterschied ist der Einfallswinkel. In Mitwindrichtung wird der Schall durch den Windgradienten nach unten gebrochen und kommt mit einem etwas steileren Einfallswinkel über den Reflexionspunkt zum Empfänger. In Gegenwindrichtung ist der Einfallswinkel nahezu  $0^\circ$  (streifend).

Durch die frequenzabhängige Phasendrehung wird bei streifendem Schalleinfall das Signal so verzögert, dass ab einer Frequenz von 100 Hz der Schalldruck mehr und mehr ausgelöscht wird, während sich die Schnelle einer Verdopplung nähert. Im Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz zeigen sowohl die Mitwind- als auch die Gegenwindrichtung Schalldruckverdopplung.

Bei dem steileren Schalleinfall unter Mitwindrichtung kann man bereits den sich entwickelnden Bodendip bei ca. 315 Hz erkennen, der bei einem steileren Schalleinfall sich wieder so entwickelt, dass bei 800 Hz wieder ein Bereich mit Schalldruckverdopplung ausbilden würde.

Abbildung 7 zeigt dazu zwei Terzspektren einer Sprengung in Bodennähe. Das obere Terzspektrum wurde in Mitwindrichtung, das untere in Gegenwindrichtung von derselben Sprengung gleichzeitig aufgenommen.

Die Messwerte sind als blaue Kreise dargestellt. Die rote Linie stellt die spektrale Energiedichte durch den jeweiligen Messpunkt dar. Die Balken kennzeichnen den prognostizierten resultierenden Schalldruckpegel.

Der Prognose liegt in beiden Richtungen derselbe Parameter der komplexen Bodenimpedanz zugrunde. Der einzige

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass beide Mikrophone von der gleichen akustischen Energie ‚durchflossen‘ werden. Nur eine kleine Änderung der Brechungseigenschaften durch eine Böe beispielweise kann die Pegel massiv ändern, zumal wenn man sich auf A-wertete Pegel fokussiert. Der Boden absorbiert kaum Energie, sonst könnte der Schalldruckpegel bei 1 kHz nicht 20 dB in Gegenwindrichtung kleiner sein. Dies gelingt nur, wenn das Signal mit nahezu gleicher Signalstärke nur mit Phasenumkehr die Bodenreflexion durchläuft.

Bei steilen Einfallswinkeln sind die Verhältnisse klar und stabil. Geringfügige Änderungen des Gradienten haben kaum Einfluss auf die Pegel. Die Leistung des Schemas der DIN ISO 9613-2 besteht darin, für alle ähnlichen flachen Ausbreitungsszenario eine Mitwind-Pegelprognose abzugeben. Berechnungen bei steilen Einfallswinkeln sind vergleichsweise einfach, aber in der Norm nicht enthalten.

### 3.2 Bodenreflexion in steilen Ausbreitungsszenarien

Bei steilen Ausbreitungsszenarien ist nur eine Bodenreflexion im Spiel. Die physikalische Aufgabenstellung ist überschaubar.

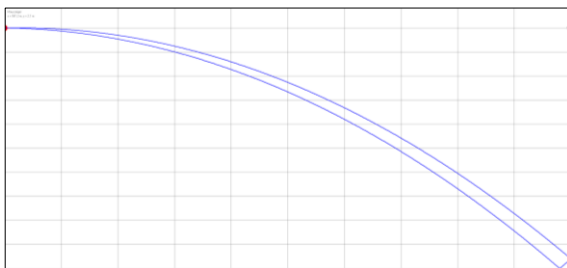


Abbildung 8 steiles Ausbreitungsszenario  
 $h_s = 100 \text{ m}$ ,  $h_r = 4 \text{ m}$ ,  $d_p = 1000 \text{ m}$

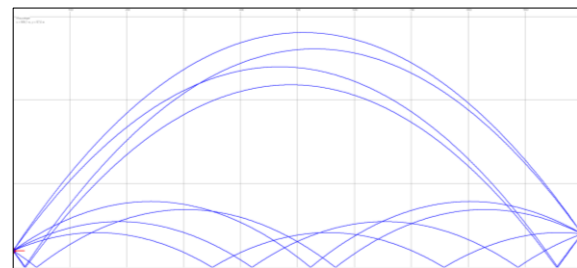


Abbildung 9 flaches Ausbreitungsszenario  
 $h_s = 2 \text{ m}$ ,  $h_r = 4 \text{ m}$ ,  $d_p = 1000 \text{ m}$

Abbildung 8 stellt ein steiles Szenario ( $h_s = 100 \text{ m}$ ) einem flachen Szenario ( $h_s = 2 \text{ m}$ ) in Abbildung 9 gegenüber. Der Abstand ( $d_p = 1000 \text{ m}$ ) und die Empfängerhöhe ( $h_r = 4 \text{ m}$ ) sind jeweils gleich.

Die Abbildungen wurden mit einem Programm erstellt, das das so genannte SchaMa Modell umsetzt, [5]. Dieses Modell ist ein so genanntes Kreisstrahlenmodell, das die Brechung der Atmosphäre durch einen überall konstanten Krümmungsradius abbildet. Jeder Strahl wird grundsätzlich einzeln betrachtet. Entlang jedes einzelnen Strahls wird die Ausbreitungsdämpfung, die Luftabsorption und die Bodenreflexion(en) bestimmt. Dabei erfolgt die Signalberechnung in einem schmalbandigen Frequenz-Raum (Fourier-Raum). Das Signal im Empfänger wird durch die komplexe Summe aller Signale der einzelnen Strahlen gebildet. Aus diesem überlagerten Empfangssignal werden alle akustischen Kenngrößen berechnet.

In [5] wird das Zeitsignal eines Schusses vorgestellt, das mit einem ersten Ansatz des Modells berechnet wurde. Inzwischen ist dieses Modell für viele Anwendungen eingesetzt worden und häufig durch den Vergleich mit Messungen validiert worden. Da es über die Schmalbandspektren auch Zeitsignale für die Validierung bereitgestellt, ist es im Hinblick auf die hier gestellte Aufgabe sowohl für flache als auch steile Ausbreitungsszenarien hinreichend zuverlässig.

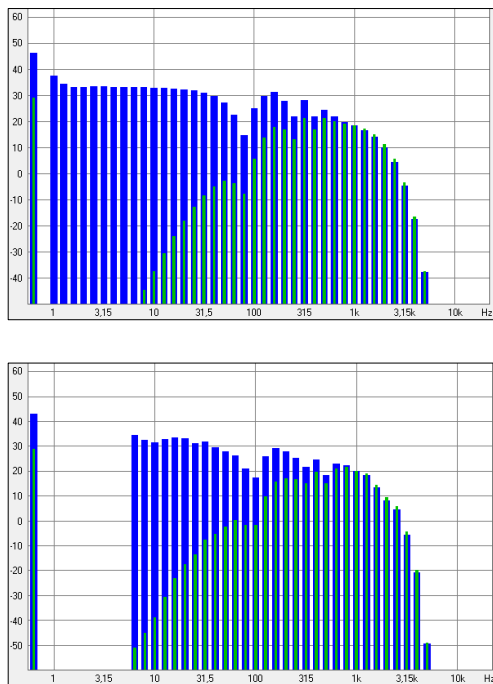


Abbildung 10  
Vergleich der Z-bewerteten (blau) und A-bewerteten (grün) Terzspektren  
oben: Kreisstrahlenmodell  
unten: Harmonoise (P2P-DLL Version 2.02)

Dazu zeigt Abbildung 10 einen Vergleich für ein Ausbreitungsszenario eines rosa Rauschens von 1 Hz bis 10 kHz mit einer Leistung von 1 W:  $L_{WA} = 120,3$  dB (290 K, 1013 hPa) in einer Quellhöhe von 130 m und einem Abstand von 2000 m zu einem Empfänger in 4 m Höhe bei einem Krümmungsradius von 5000 m. Die A-bewerteten Immissionspegel unterscheiden sich um 0,3 dB,  $L_{A,Kreisstrahlenmodell} = 29,2$  dB,  $L_{A,Harmonoise} = 28,9$  dB.

#### Anmerkung

Die Quelle dieser Unterschiede liegt in den nicht direkt kompatiblen Eingangsparametern der Modelle. Harmonoise verwendet Klassierungen der Windprofile und der Böden, während das Kreisstrahlenmodell den Krümmungsradius direkt und den Strömungswiderstand des Bodens verwendet. Die Unterschiede sind also unvermeidbar; Zeigen aber gleichzeitig die Unsicherheit der Modellierung auf.

Man muss sich nicht auf Kreisstrahlenmodelle zurückziehen. Man kann leicht zeigen, dass Strahlenverfolgungsalgorithmen durch geschichtete Atmosphären die gleichen Ergebnisse für diesen einfachen Fall liefern.

Die Bodenreflexion bzw. die Folge von Bodenreflexionen in flachen Szenarien wird durch das Modell der Kugelwellenreflexion an Böden mit komplexen Impedanzen berechnet.

#### Anmerkung

Der Ansatz mit ebenen Wellen liefert definitiv falsche Ergebnisse! Es entsteht nicht – wie bei ebenen Wellen – eine Kammfilterstruktur in den Bodendips mit konstanten Frequenzdifferenzen in der Folge der Bodendips.

Für eine einzige Bodenreflexion unterscheidet sich der Ansatz also nicht vom Harmonoise Modell, das ursprünglich als verbessertes Ersatz-Modell für die ISO 9613 von der EU entwickelt worden war, [6].

Als Bodenmodell wird das Delaney Bazley Impedanz-Modell verwendet. Dieses Modell benötigt ausschließlich den Strömungswiderstand des Erdbodens als einzigen Parameter. In der Literatur finden sich zahlreiche Tabellen zur Angabe des Strömungswiderstands für viele Ausprägungen von Erdböden.

Wenn man also Immissionspegel in steilen Ausbreitungsszenarien prognostizieren möchte, kann man eigentlich direkt ein physikalisches Modell anwenden. Dagegen sprechen aber die Regeln der Verwaltungsakustik. Die TA Lärm kennt kein ‚physikalisches Modell‘ sondern ausschließlich die DIN ISO 9613-2 als Werkzeug zur Prognose von Immissionspegeln von Industrieräuschen.

Es ist also unabdingbar, die DIN ISO 9613-2 so zu ertüchtigen, dass sie auch steile Szenarien mit der geforderten Genauigkeitsklasse 2 beherrscht.

Die Kapitel 4 und 5 beschäftigen sich deshalb mit den Ersatzverfahren zur Bestimmung der Bodendämpfung  $A_{gr}$  bei nicht bodennahen Quellen und mit einer Erweiterung des Berechnungsverfahrens für das  $C_{met}$ , das ebenfalls nur für flache Ausbreitungsszenarien in der DIN ISO 9613-2 formuliert ist.

### **3.3 Meteorologie – Langzeitwetter**

#### **3.3.1 Datenbasis**

Bei der Schallausbreitung im Freien geht es meist um Langzeit-Pegelprognosen. In den entscheidenden Rechtsverordnungen in der Verwaltungsakustik - also dann, wenn es um Genehmigungen, Auflagen, erhebliche Belästigungen in der Nachbarschaft und Überwachungsmessungen geht – wird bei der Berechnung der relevanten Langzeit-Mittelungspegel auch das Langzeit-Wetter herangezogen. Das gilt auch für die DIN ISO 9613-2.

Im Aufsatz „Meteorologie der Schallausbreitung - Profilprognosen an der Küste, im Flachland, im Mittelgebirge“ [7] wird eine breite Datenbasis für die Ermittlung der Kenngrößen des Langzeit-Wetters vorgestellt. Dort werden für die drei angesprochenen Regionen mittlere Höhenprofile der Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung (Ekman-Spirale), Schallgeschwindigkeitsgradient, und 10-m-Windrose und 150-m-Windrose angegeben.

Zitat, Wikipedia, abgerufen am 18.09.2021

*„Die Ekman-Schicht (nach Vagn Walfrid Ekman) ist der Hauptteil einer atmosphärischen Grenzschicht. Sie beginnt an der Obergrenze der nach Ludwig Prandtl benannten Prandtl-Schicht in etwa 100 m Höhe und reicht bis etwa 1000 m Höhe, die Obergrenze der atmosphärischen Grenzschicht....*

*Die Ekman-Schicht ist auf der Nordhalbkugel durch Winddrehung nach rechts und nur noch geringe Windzunahme gekennzeichnet. Trägt man die in den einzelnen Höhenstufen der Ekman-Schicht gemessenen Winde nach Richtung und Geschwindigkeit auf, so beschreibt die Spitze der Windpfeile eine Ekman-Spirale.“*

Die Grundgesamtheit der Daten umfasst in jedem der die Regionen repräsentierenden Prognoseorte mehr als zwei Jahre. Damit sind die Anforderungen in der DIN ISO 9613-2 für das Attribut ‚Langzeit‘ sicher erfüllt.

Die Datenbasis schlüsselt die Höhenprofile für die Beurteilungszeiten Tags, Nachts, Ganztags und Stunde von 22 bis 23 Uhr auf. Für das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr liegt ebenfalls eine Analyse für Ganztags vor.

### 3.3.2 Der relevante Krümmungsradius

Bei der Entwicklung eines Ansatzes für ‚hochliegende Quellen‘ im Schema der DIN ISO 9613-2 wird der Höhenabhängigkeit des mittleren Krümmungsradius eine wichtige Rolle spielen, da diese Kenngröße entscheidend die Schallausbreitung bestimmt und darüber mitentscheidet, ob ein Ausbreitungsszenario flach oder steil ist.

Der Krümmungsradius  $R$  in der Höhe  $h$  kann aus dem Schallgeschwindigkeitsgradienten  $g(h)$  und der Schallgeschwindigkeit  $c$  über Gl. 3 bestimmt werden.

$$R(h) = \frac{c}{g(h)} \quad \text{Gl. 3}$$

Es liegt also nahe das Höhenprofil des Krümmungsradius aus dem Höhenprofil des Schallgeschwindigkeitsgradienten zu berechnen.

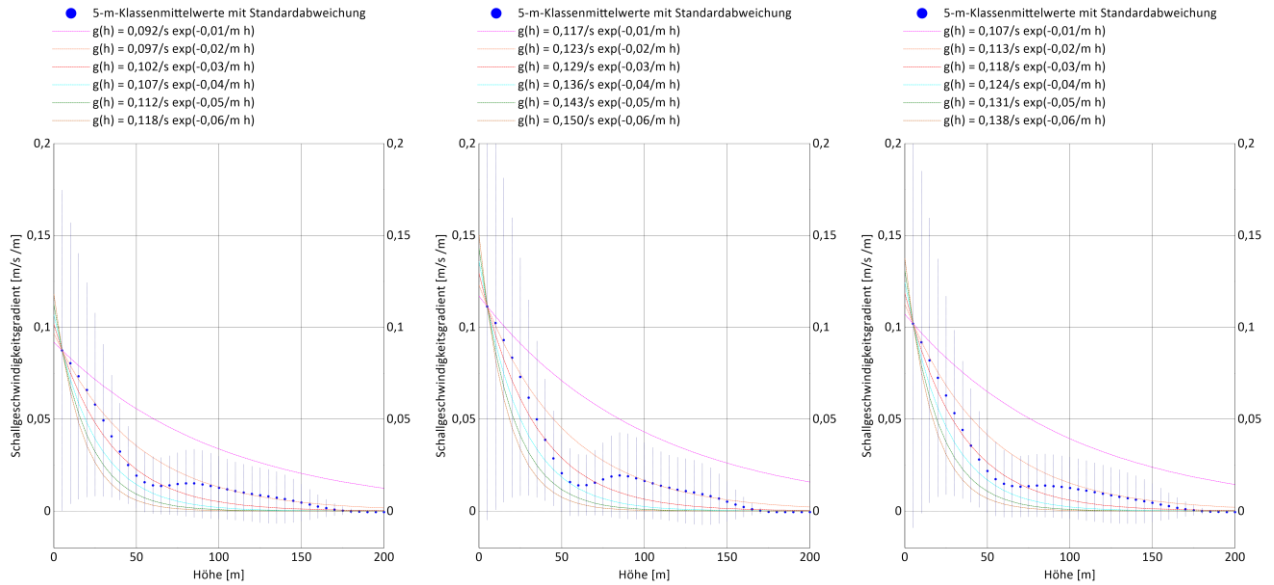


Abbildung 11 Höhenprofil des Schallgeschwindigkeitsgradienten nach [7]  
ganzjährig – ganztags

links: Ostseeküste, mittig: norddeutsches Flachland, rechts: Mittelgebirge

Abbildung 11 stellt dieses Höhenprofil für die drei Regionen vor. Datengrundlage ist die Grundgesamtheit aller vorhandenen Werte in den Orten. In den drei Graphen sind jeweils Exponentialfunktionen eingetragen, die das Profil grob aber sachgerecht interpolieren. Aus den drei Graphen wird die Funktion in Gl. 4 für die unten folgenden Analysen ausgewählt.

$$g(h) = \frac{0,12}{s} e^{-0,03/m h} \tag{Gl. 4}$$

Aus Gl. 3 und Gl. 4 ergibt sich Höhenprofil des Krümmungsradius, das in Abbildung 12 dargestellt ist.

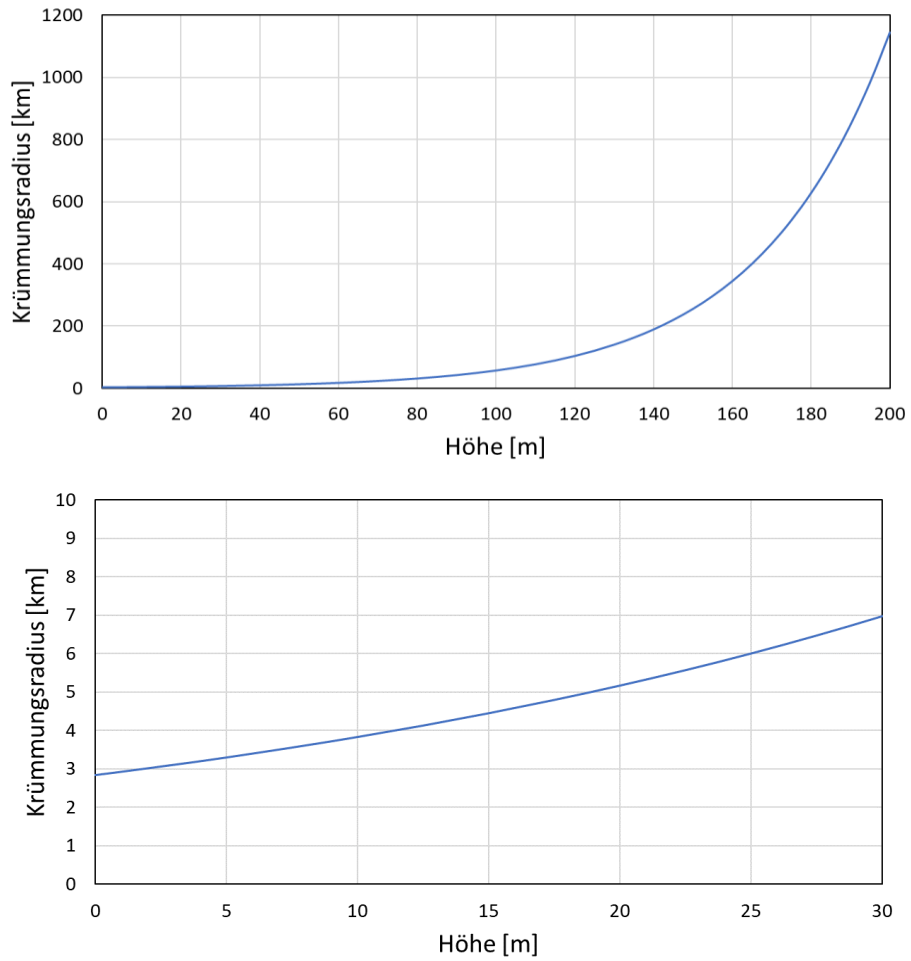


Abbildung 12 Höhenprofil des Krümmungsradius  
oben bis zu einer Höhe von 200 m  
unten Ausschnitt bis zu einer Höhe von 30 m

## 4 Ansatz für das $A_{gr}$ bei hochliegenden Quellen

### 4.1 Vorschlag

Sowohl für die Fortschreibung der DIN ISO 9613-2 als auch für die VDI 4101 Blatt 2 wird folgender Ansatz vorgeschlagen.

#### **DIN ISO 9613-2 (Ergänzung in Tabelle 3):**

Für alle Quellen mit einer Quellhöhe  $h_s > 30$  m gilt grundsätzlich

$$G_s = 1, G_m = 1, G_r = 0,2.$$

#### **VDI 4101 Blatt 2 (Ersetzung $A_{gr} = -3$ dB)**

Die Bodendämpfung wird nach Maßgabe der entsprechenden Regeln der DIN ISO 9613-2 berechnet. Es gilt grundsätzlich  $G_s = 1, G_m = 1, G_r = 0,2$ .

### 4.2 Begründung und Ableitung

In den ersten Kapiteln dieses Aufsatzes wurde die Grundlage dafür gelegt, den Ansatz oben abzuleiten. Es wurde gezeigt, dass der Begriff ‚hochliegende Quellen‘ zumindest irreführend ist. Es geht hier um die Erweiterung von Normen und Richtlinien, die in ihrem Gerüst, Schema und Begriffsbildung in der Verwaltungsakustik eingeführt sind. Im Rahmen der Regelsetzung würde es keine Akzeptanz finden, teilweise neue Sichtweisen verwenden. Deshalb ist der Vorschlag oben ‚normenkonform‘ formuliert.

Darüber hinaus ist auch die Genauigkeitsklasse zu beachten. Es geht also im Grundsatz nicht um das Zehntel Dezibel, sondern um eine Prognose des Langzeitpegels mit einer akzeptierten Unsicherheit. Der Vorschlag folgt diesem Konzept. Die Berechnung der Bodendämpfung wird nicht geändert. Es werden lediglich systembekannt Parameter so gesetzt, dass das Ergebnis im Hinblick auf die Genauigkeitsanforderung sachgerecht ist.

Ein weiterer Aspekt ist die Qualitätssicherung. Der Ansatz muss eindeutig sein und bei der Umsetzung in Softwareerzeugnisse anerkannt ‚richtige‘ Ergebnisse mit hoher Präzision anbieten. Dies leistet der Ansatz.

Hier werden ‚hochliegende Quelle‘ allein durch ihre Quellhöhe festgelegt: Quellen in über 30 m sind ‚hochliegend‘, alle anderen sind ‚bodennah‘ im Sinne der DIN ISO 9613-2.



Bleibt man im Bild einer hochliegenden Quelle (und ignoriert die übrigen Ausprägungen eines steiler Ausbreitungsszenarien), liegt die ‚eine‘ Bodenreflexion empfängernah. Die dazu passende Kenngröße ist der G-Faktor dort. Die beiden anderen sind aus dem Spiel und werden konstant auf 1 gesetzt.

Der Faktor  $G_r$  ist dann so zu wählen, dass mit ihm die Pegelprognose mit der erweiterten DIN ISO 9613-2 gleich den Pegelprognosen von Schallausbreitungsmodellen ist, die für diese Ausbreitungssituation nativ anwendbar sind. In Kapitel 3.2 wurden solche Modelle kurz vorgestellt. Aus praktischen Gründen wird hier das Kreisstrahlenmodell verwendet.

Im Folgenden werden dazu Ausbreitungssituationen mit Quellhöhen von 5 m und von 10 m bis 190 m in 20-m-Schritten bei einer konstanten Empfängerhöhe von 4 m untersucht. Als Quellsignal dient ein rosa Rauschen von 1 Hz bis 10 kHz mit einer Leistung von 1 W ( $\approx 120,3$  dB bei den gewählten Umgebungsbedingungen).

Tabelle 1 stellt die Ergebnisse zusammen. In Spalte 1 wird der Abstand  $d_p$ , in Spalte 2 die Höhe des Empfängers  $h_r$  und in Spalte 3 die Quellhöhe  $h_s$  der Ausbreitungssituation angegeben. Der für die Quelle relevante Krümmungsradius wird nach Kapitel 3.3.2 berechnet und in Spalte 4 angegeben. Die Spalten 5 und 6 enthalten die Ergebnisse des Kreisstrahlenmodells. Spalte 5 gibt die Anzahl der beteiligten Strahlen an. Für steile Szenarien dürfen dies nur 2 sein (Schallweg des Direktschalls und der einen Bodenreflexion). Sind es mehr Strahlen, handelt es sich um ein flaches Szenario, für das die DIN ISO 9613-2 direkt gilt.

#### *Anmerkung*

*Die Quellhöhe von 5 m führt bei den gewählten Abständen stets zu einem flachen Szenario.*

Die Spalte 6 enthält den Immissionspegel des Kreisstrahlenmodells:  $L_{A,mit}$  ist der Pegel mit Berücksichtigung der Bodenreflexion,  $L_{A,ohne}$  ist der Pegel ohne den Beitrag der Bodenreflexion, also allein der Pegel des Direktschalls.

In Spalte 7 wird der Bereich angegeben, in dem das  $G_r$  liegen kann, um mit dem Schema der DIN ISO 9613-2 das Ergebnis des Kreisstrahlenmodells auf ein Zehntel Dezibel genau zu reproduzieren. Die Angabe des Bereichs von  $G_{r,min}$  bis  $G_{r,max}$  ist hilfreich bei der Einschätzung der Empfindlichkeit, mit der der G-Faktor den Immissionspegel letztlich beeinflusst. In der Spalte 8 wird schließlich der Mittelwert des Bereichs als  $G_{r,avg}$  angegeben.

1	2	3	4	5	6		7		8
Ab-stand	Em- pfän- ger- höhe	Quell- höhe	Krüm- mungs- radius	Anzahl der Strah- len	Immissions- pegel des Kreisstrahlen- modells		Wertebereich der optimal angepassten Boden- dämpfung bei $G_s = 1$ und $G_m = 1$		Mittelwert der optimal angepassten Boden- dämpfung bei $G_s = 1$ und $G_m = 1$
$d_p$	$h_r$	$h_s$	R		$L_{A,mit}$	$L_{A,ohne}$	$G_{r,min}$	$G_{r,max}$	$G_{r,avg}$
m	m	m	m	[1]	dB	dB	[1]	[1]	[1]
500	4	5	3292	4	48,8	46,3	flaches Ausbreitungsszenario		
		10	3825	2	47,5	46,3	0,02	0,07	0,05
		30	6969	2	47,4	46,3	0,07	0,12	0,10
		50	12698	2	47,2	46,2	0,17	0,22	0,20
		70	23137	2	47,0	46,2	0,25	0,30	0,28
		90	42159	2	47,0	46,1	0,21	0,26	0,24
		110	76819	2	46,9	46,0	0,22	0,27	0,25
		130	139974	2	46,8	45,9	0,22	0,27	0,25
		150	255049	2	46,8	45,8	0,15	0,20	0,18
		170	464729	2	46,7	45,7	0,13	0,18	0,16
190	846791	2	46,6	45,5	0,10	0,15	0,13		

1000	4	5	3292	10	38,6	37,7	flaches Ausbreitungsszenario		
		10	3825	6	40,5	37,7	flaches Ausbreitungsszenario		
		30	6969	2	38,7	37,7	0,13	0,18	0,16
		50	12698	2	38,7	37,7	0,13	0,17	0,15
		70	23137	2	38,7	37,7	0,12	0,16	0,14
		90	42159	2	38,6	37,7	0,16	0,21	0,19
		110	76819	2	38,5	37,6	0,20	0,25	0,23
		130	139974	2	38,5	37,6	0,19	0,23	0,21
		150	255049	2	38,4	37,6	0,22	0,27	0,25
		170	464729	2	38,4	37,5	0,20	0,25	0,23
190	846791	2	38,4	37,5	0,18	0,22	0,20		

1500	4	5	3292	14	35,3	32,1	flaches Ausbreitungsszenario		
		10	3825	10	35,3	32,1	flaches Ausbreitungsszenario		
		30	6969	2	33,0	32,2	0,21	0,25	0,23
		50	12698	2	33,1	33,1	0,15	0,19	0,17
		70	23137	2	33,2	32,2	0,10	0,14	0,12
		90	42159	2	33,2	32,2	0,09	0,13	0,11
		110	76819	2	33,2	32,1	0,09	0,13	0,11
		130	139974	2	33,1	32,1	0,13	0,17	0,15
		150	255049	2	33,0	32,1	0,17	0,21	0,19
		170	464729	2	33,0	32,1	0,16	0,20	0,18
190	846791	2	32,9	32,1	0,20	0,24	0,22		

2000	4	5	3292	20	31,5	27,8	flaches Ausbreitungsszenario		
------	---	---	------	----	------	------	------------------------------	--	--

1	2	3	4	5	6		7		8
Ab-stand	Em-pfänger-höhe	Quell-höhe	Krüm-mungs-radius	Anzahl der Strah-len	Immissions-pegel des Kreisstrahlen-modells		Wertebereich der optimal angepassten Boden-dämpfung bei $G_s = 1$ und $G_m = 1$		Mittelwert der optimal angepassten Boden-dämpfung bei $G_s = 1$ und $G_m = 1$
$d_p$	$h_r$	$h_s$	R		$L_{A,mit}$	$L_{A,ohne}$	$G_{r,min}$	$G_{r,max}$	$G_{r,avg}$
m	m	m	m	[1]	dB	dB	[1]	[1]	[1]
		10	3825	14	31,5	27,8	flaches Ausbreitungsszenario		
		30	6969	6	30,3	28,0			0,00
		50	12698	2	29,9	28,0	0,15	0,19	0,17
		70	23137	2	29,0	28,0	0,10	0,14	0,12
		90	42159	2	29,1	28,0	0,05	0,09	0,07
		110	76819	2	29,1	28,0	0,05	0,09	0,07
		130	139974	2	29,0	28,0	0,09	0,13	0,11
		150	255049	2	28,9	28,0	0,13	0,17	0,15
		170	464729	2	28,9	28,0	0,13	0,17	0,15
		190	846791	2	28,8	27,9	0,17	0,21	0,19
2500	4	5	3292	26	28,6	24,3	flaches Ausbreitungsszenario		
		10	3825	16	28,6	24,4	flaches Ausbreitungsszenario		
		30	6969	6	27,4	24,6			0,00
		50	12698	2	25,5	24,6	0,16	0,19	0,18
		70	23137	2	25,5	24,6	0,15	0,19	0,17
		90	42159	2	25,7	24,6	0,06	0,09	0,08
		110	76819	2	25,7	24,6	0,06	0,09	0,08
		130	139974	2	25,7	24,6	0,06	0,09	0,08
		150	255049	2	25,6	24,6	0,10	0,13	0,12
		170	464729	2	25,6	24,6	0,09	0,13	0,11
190	846791	2	25,5	24,6	0,13	0,17	0,15		
3000	4	5	3292	32	26,3	21,2	flaches Ausbreitungsszenario		
		10	3825	20	26,2	21,4	flaches Ausbreitungsszenario		
		30	6969	6	24,9	21,7	flaches Ausbreitungsszenario		
		50	12698	2	22,7	21,8	0,14	0,17	0,16
		70	23137	2	22,6	21,8	0,17	0,20	0,19
		90	42159	2	22,7	21,8	0,13	0,16	0,15
		110	76819	2	22,9	21,8	0,04	0,07	0,06
		130	139974	2	22,9	21,8	0,04	0,07	0,06
		150	255049	2	22,8	21,8	0,08	0,11	0,10
		170	464729	2	22,8	21,8	0,08	0,11	0,10
190	846791	2	22,7	21,8	0,12	0,15	0,14		

Tabelle 1 Bestimmung des mittleren Boden-Faktors  $G_{r,avg}$  für verschiedene Quellhöhen und Abstände

Quellsignal: rosa Rauschen von 1 Hz bis 10 kHz mit einer Leistung von 1 W ( $\approx 120,3$  dB bei den gewählten Umgebungsbedingungen)

$h_s$ [m]	5	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	Mittelwert
	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$	$G_{r,avg}$
$d_p$ [m]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
500		0,22	0,27	0,25	0,28	0,24	0,19	0,13	0,12	0,04	0,02	0,17
1000			0,21	0,21	0,25	0,24	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15	0,20
1500			0,08	0,12	0,17	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17
2000			0,14	0,17	0,17	0,21	0,21	0,21	0,15	0,15	0,14	0,17
2500			0,23	0,22	0,22	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,11	0,17
3000				0,20	0,19	0,19	0,14	0,14	0,14	0,10	0,10	0,15

Tabelle 2 Mittleren optimal angepasster Boden-Faktor  $G_{r,avg}$  für verschiedene Quellhöhen und Abstände

In Tabelle 2 wird das Ergebnis der Optimierung noch einmal zusammengefasst dargestellt.

Eine Einschätzung der Frage, inwieweit der optimierte G-Faktor vom Abstand und von der Quellhöhe abhängt, erlauben Abbildung 13 und Abbildung 14.

Eine jeweils klare Abhängigkeit weder vom Abstand noch von der Quellhöhe ist nicht zu erkennen; Allenfalls die Tendenz, dass das  $G_r$  mit zunehmendem Abstand von 0,2 auf 0,15 sinkt.

In Anbetracht der Schwankungsbreite in beiden Abbildungen wird auf die Angabe eines G-Faktor mit zwei Stellen hinter dem Komma verzichtet und das optimale  $G_r$  hochliegender Quelle im Vorschlag mit 0,2 angegeben.

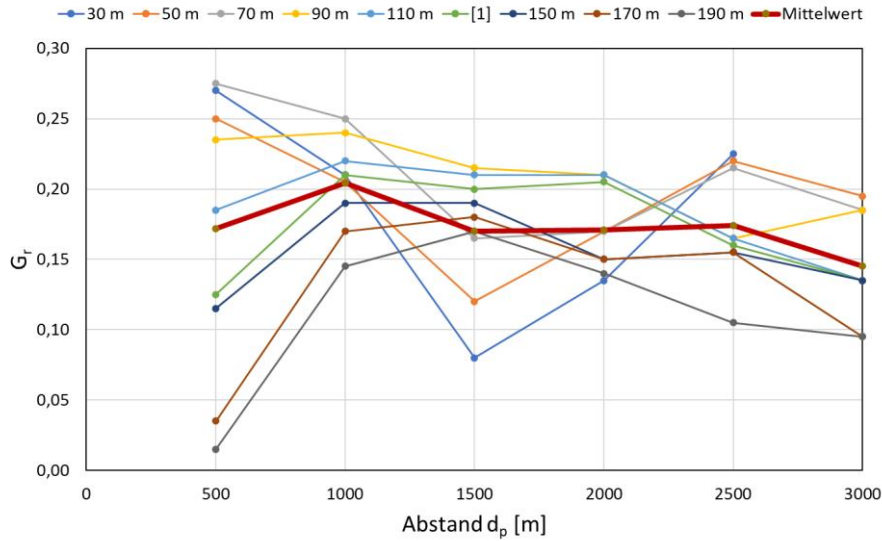


Abbildung 13 Abhängigkeit des optimal angepassten  $G_r$  hochliegender Quellen vom Abstand  $d_p$  zwischen Quelle und Empfänger in 4 m Höhe bei verschiedenen Quellhöhen rote Linie: Mittelwert über alle Quellhöhen

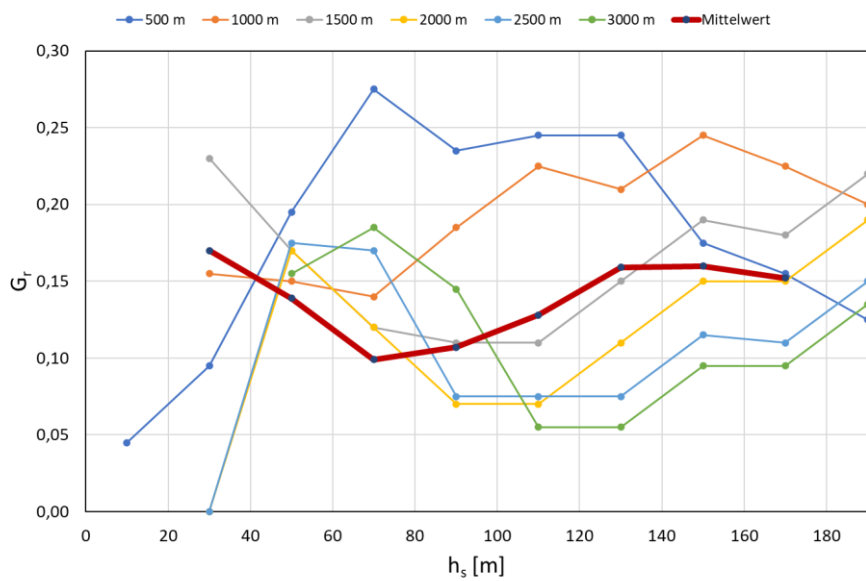


Abbildung 14 Abhängigkeit des optimal angepassten  $G_r$  hochliegender Quellen von der Quellhöhe bei verschiedenen Abständen  $d_p$  zwischen Quelle und Empfänger in 4 m Höhe rote Linie: Mittelwert über alle Abstände

## 5 Das $C_{met}$ bei hochliegenden Quellen

### 5.1 Vorschlag

#### DIN ISO 9613-2 und VDI 4101 gleichlautend

$$C_{met} = 0 \text{ dB} \quad \text{wenn } d_p < 10(h_s + h_r) \quad \text{und } C(h_s) < 0 \quad \text{Gleichung 21n}$$

$$C_{met} = C_0 \left[ 1 - 10(h_s + h_r) / d_p \right] \quad \text{wenn } d_p > 10(h_s + h_r) \quad \text{und } h_s \leq 30 \text{ m} \quad \text{Gleichung 22n}$$

$$C_{met} = C_0 C_h(h_s) \quad \text{wenn } h_s > 30 \text{ m} \quad \text{Gleichung 23n}$$

$$C_h = \frac{e^{-\frac{0,03}{\text{m}} h_s}}{e^{-\frac{0,03}{\text{m}} 30 \text{ m}}} \quad \text{Gleichung 24n}$$

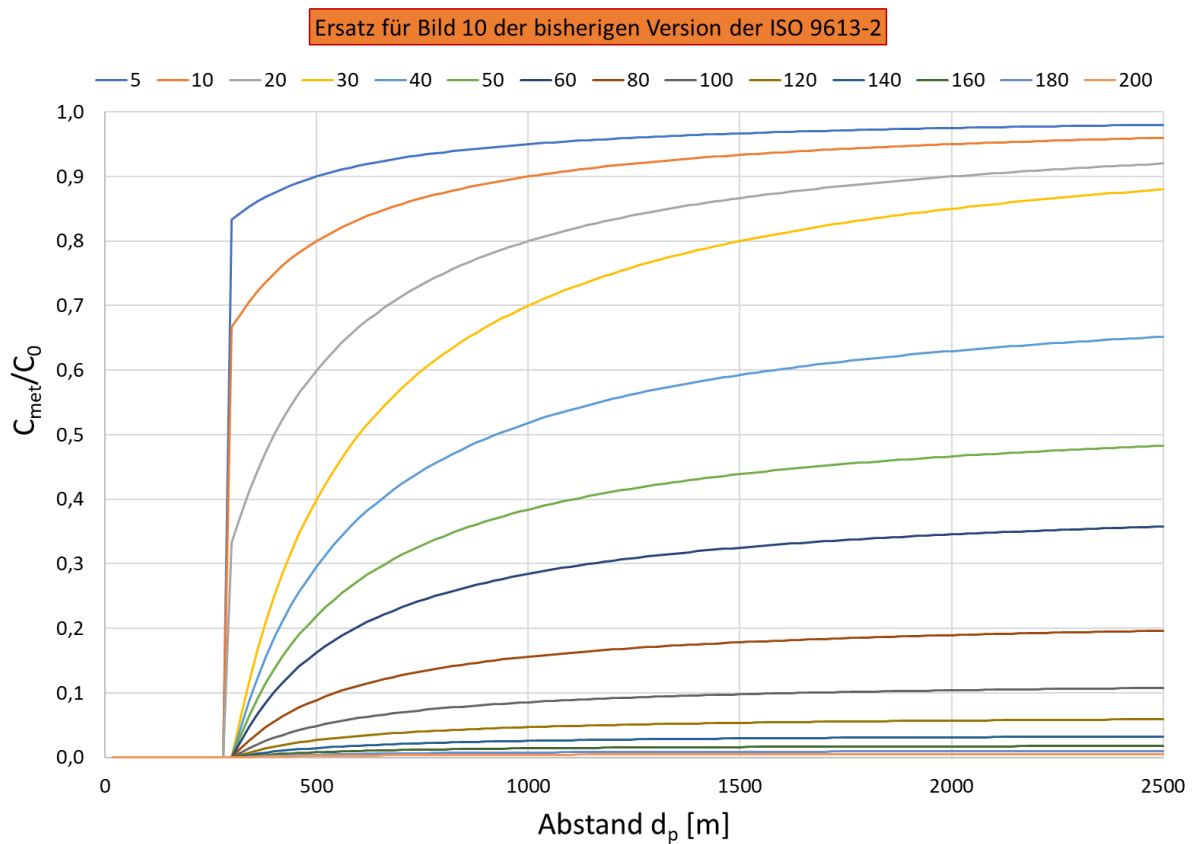


Abbildung 15  $C_{met}/C_0$  unter Berücksichtigung des Vorschlags für Höhen von 5 m bis 200 m

## 5.2 Begründung und Ableitung

### 5.2.1 Die meteorologische Korrektur

Die meteorologische Korrektur  $C_{\text{met}}$  berechnet aus dem Mittelungspegel unter günstigen Schallausbreitungsbedingungen  $L_{\text{AT}}(\text{DW})$  nach DIN ISO 9613 den Langzeit-Mittelungspegel  $L_{\text{AT}}(\text{LT})$ , der im Regelwerk der TA Lärm letztlich mit ihren Richtwerten zu vergleichen ist.

Das  $C_{\text{met}}$  wird abstands- und höhenabhängig nach Gleichung 21 bzw. 22 der Norm mit Hilfe eines  $C_0$ , das aus einer „*elementaren Analyse der örtlichen Wetterstatistik geschätzt*“ (*Ausdruck in der Norm*) bestimmt wird, berechnet. In [8] bzw. [9] wird beschrieben, wie diese Analyse nach eindeutigen Regeln durchgeführt werden kann.

### 5.2.2 Brechungspotential der Atmosphäre

Die Bestimmung des  $C_0$  basiert grundsätzlich auf der Langzeit-Windrose des Bodenwinds, weil bodennahen Quellen in der DIN ISO 9613-2 betrachtet werden und diese Windrose von Wetterdienstes in der Regel ohne Weiteres zur Verfügung werden können.

Über diese Windrose wird der Anteil der Mitwindsituationen, der Querwindsituationen und der Gegenwindsituationen über den Zeitraum ‚Langzeit‘ geschätzt und entsprechend der zur Windrose relativen Ausbreitungsrichtung von Quelle zum Empfänger korrigiert.

Dieses Konzept funktioniert, weil der Bodenwind selbst ein Maß für das Brechungspotential der Atmosphäre ist. Und in der Tat ist mit dem Bodenwind wegen der Reibung der Luftströmung am Boden in aller Regel auch ein Gradient der Windgeschwindigkeit verbunden, der tatsächlich die Brechung bewirkt (Ähnliches gilt für Temperaturgradienten, die dieselbe Wirkung nur richtungsunabhängig haben).

Der Windgradient selbst ist aber höhenabhängig, siehe Abbildung 11]. Eine Quelle in größeren Höhen findet deshalb ein signifikant geringeres Brechungspotential der Atmosphäre vor. Damit sinkt der Einfluss der Brechung auf die Schallausbreitung mit zunehmender Höhe. Eine meteorologische Korrektur ist also mit der Höhe immer weniger erforderlich.

Das direkte Maß für das Brechungspotential der Atmosphäre ist der Schallgeschwindigkeitsgradient, der beides berücksichtigt: Die Brechung durch Windgradienten und durch Temperaturgradienten.

Das Höhenprofil typischer Langzeit-Schallgeschwindigkeitsgradienten wurde bereits in Kapitel 3.3.2 eingeführt und in Abbildung 7 dokumentiert. Mit Gl. 4 wurde dort eine Funktion

angegeben, die zu den Krümmungsradien führt, die in Kapitel 4.2 zur Herleitung des G-Faktors für hochliegende Quellen dienen.

Die in dem Vorschlag oben eingeführte Funktion  $C_h(h)$  ist gerade dieser Gradient, der so normiert wird, dass er bei 30 m eine 1 ergibt.  $C_h(h)$  reduziert deshalb die Wirkung des  $C_0$  proportional zum Brechungspotential. Abbildung 15 zeigt, dass sich diese Reduktion konsistent in das Konzept der DIN ISO 96213-2 einfügt.

### 5.2.3 Eigenschaften des Vorschlags

- Das neue Ansatz führt eine Funktion  $C_h(h_s)$  ein, die das höhenabhängige Brechungspotential der Atmosphäre berücksichtigt.
- Die Werte für  $C_{met}$  bei Quellhöhen von  $h_s < 30$  m ändern sich nicht.
- Wie aus Bild 10 neu (Abbildung 15) zu entnehmen ist, führt das Verfahren zu konsistenten Kurven von  $C_{met}/C_0$
- Das Verfahren ist zumindest stetig für den Übergang zwischen ‚bodennahen‘ ( $h_s < 30$  m) und ‚hochliegenden‘ ( $h_s > 30$  m) Quellen
- Die Funktion  $C_h$  ist denkbar einfach.
- Das Verfahren ist qualitätssicherbar, weil es keine zusätzlichen Eingaben oder Entscheidungen erfordert.



### 5.2.4 Konsistenz mit Analysen des Schallwetters: Windenergieanlage

Das Verfahren liefert für eine WEA mit 100 m Nabenhöhe ein  $C_{met}$  bei Abständen kleiner 1600 m, das ca. ein Fünftel (vgl. Linie für  $h_s = 100$  in Bild 10 neu) so groß ist, wie das  $C_{met}$  einer bodennahen Quelle. Es bleiben also bei z. B. bei einem  $C_{met}$  von 4 dB gerade 0,8 dB übrig. Dies stimmt mit der Aussage in Hirsch/Vogelsang DAGA 2015 „Meteorologische Korrekturen - Ermittlung auf der Grundlage einer Pegelstatistik“ [10] überein. Die Aussage dort wurde über eine Pegelstatistik über das Konzept des Schallwetters abgeleitet.

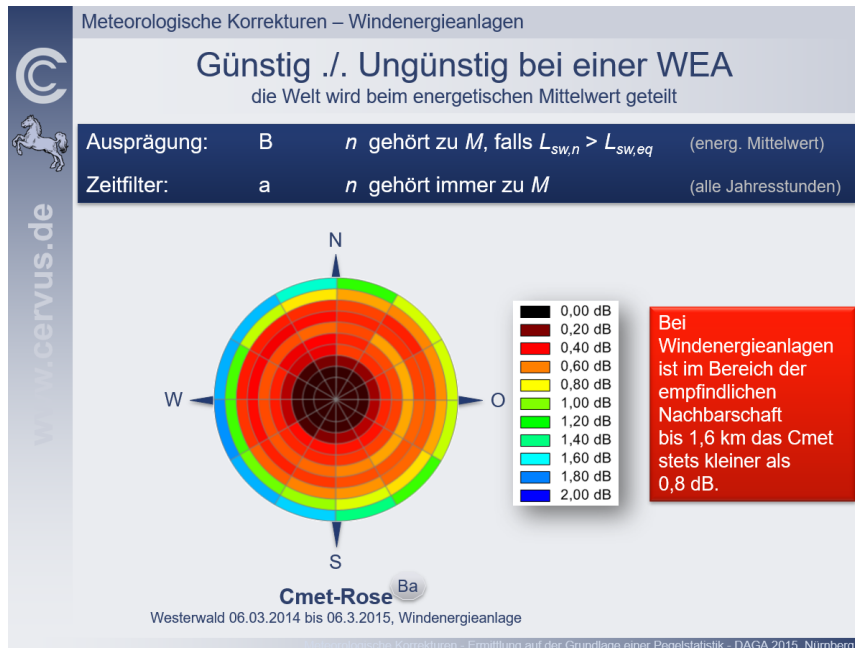


Abbildung 16 Aussage zum  $C_{met}$  von Windenergieanlagen aus der Präsentation auf der DAGA zu [10]

## 6 Maßgebliche Windrose bei hochliegenden Quellen

Bei einer Schallausbreitungsprognose liegen häufig Stärkewindrose oder lediglich Windrosen für den Bodenwind vor. Es ist bekannt, dass sich mit der Höhe die Windrichtung ändern muss, Stichwort Ekman-Spirale, siehe Kapitel 3.3.1. Mit der Höhe nimmt auch die Windgeschwindigkeit zu.

Es stellen sich deshalb zwei Fragen:

1. Soll man bei der Bestimmung der maßgeblichen Windrose des  $C_{\text{met}}$  bei hochliegenden Quellen diese Drehung berücksichtigen und wenn ja, wie?
2. Lässt sich die Windgeschwindigkeit in einer beliebigen Höhe auf der Basis der Stärkewindrose des Bodenwindes für eine Schallimmissionsprognose hinreichend zuverlässig schätzen?

Zu beiden Fragen liefern Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 Hinweise für eine auf eine ganzjährig über den ganzen Tag bezogene Schätzung. Für eine Betrachtung nach Beurteilungszeiten und Jahreszeiten siehe [7].

Zu Frage 1:

Ab einer Quellhöhe von 100 m ist eine Drehung der Windrose um  $5^\circ$  nach rechts eine sachgerechte Korrektur. Die Auswirkung dieser Drehung auf das  $C_{\text{met}}$  ist aber vernachlässigbar, da die meteorologische Korrektur selbst für solche Quellen sehr gering ist.

Zu Frage 2:

Ist die hochliegende Quelle eine Windenergieanlage, ist ihre Quellstärke selbst auch von der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe abhängig. Falls keine Daten für die konkrete Anlage vorliegen, lässt sich mit den in den Abbildungen angegebenen Interpolationsfunktionen eine Schätzung berechnen.

Diese Schätzung wird von der Region und von der Beurteilungszeit abhängen. Zusätzlich wird die großflächige Bodenbeschaffenheit um die Anlage herum einen Einfluss haben, da die Zunahme der Windgeschwindigkeit nach meteorologischen Modellen von der Rauigkeit des Bodens abhängt. Weitergehende Betrachtungen findet man beispielsweise in dem Bericht zum Harmonoise-Modell [6] oder in der einschlägigen Literatur.

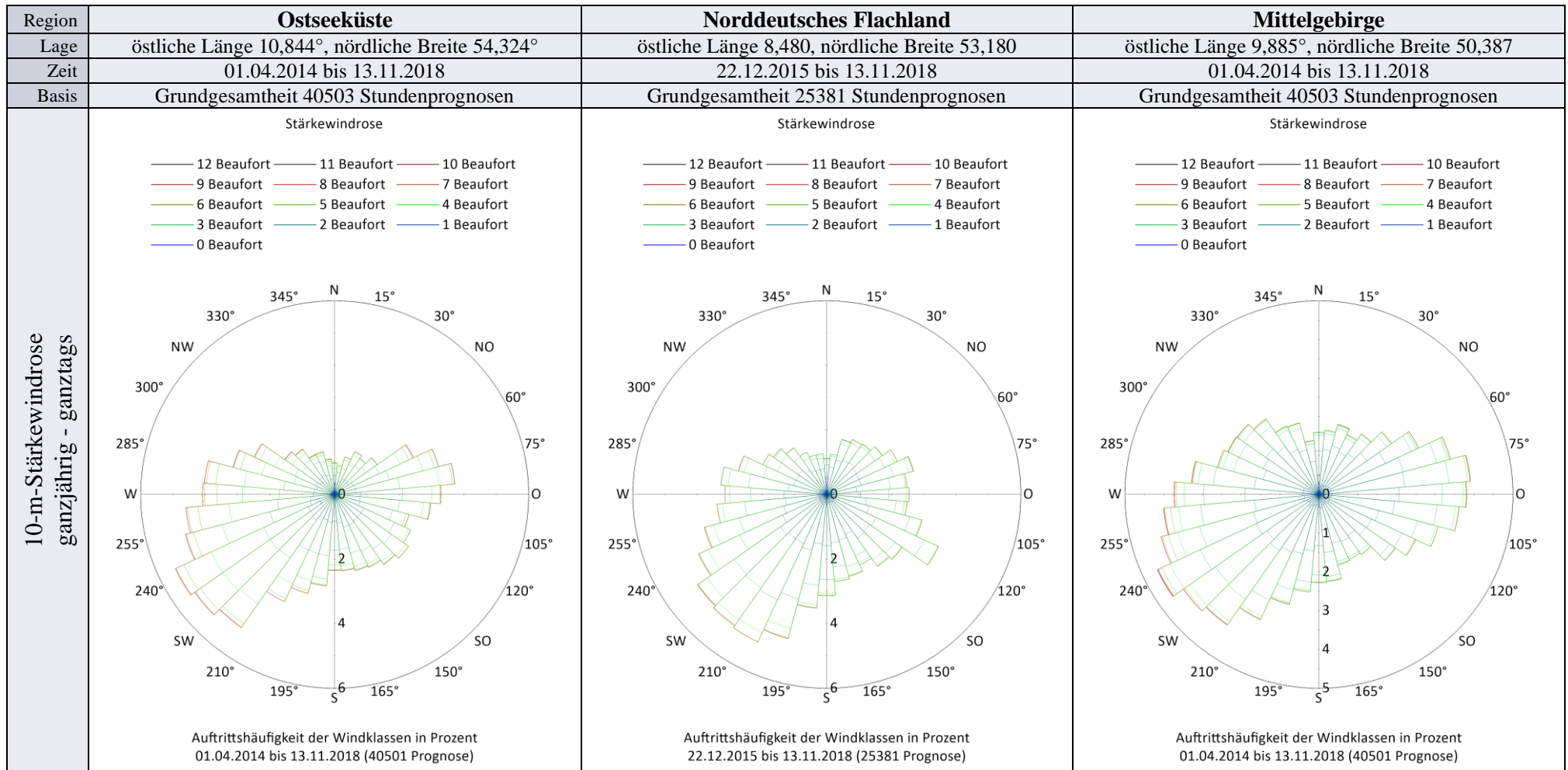


Abbildung 17 Ganzjährig über alle Stunden gemittelte Stärkewindrosen in 10 m Höhe (Bodenwind) für drei Regionen nach [7]

Region	Ostseeküste	Norddeutsches Flachland	Mittelgebirge
Lage	östliche Länge 10,844°, nördliche Breite 54,324°	östliche Länge 8,480, nördliche Breite 53,180	östliche Länge 9,885°, nördliche Breite 50,387
Zeit	01.04.2014 bis 13.11.2018	22.12.2015 bis 13.11.2018	01.04.2014 bis 13.11.2018
Basis	Grundgesamtheit 40503 Stundenprognosen	Grundgesamtheit 25381 Stundenprognosen	Grundgesamtheit 40503 Stundenprognosen
150-m-Stärkewindrose ganzjährig - ganztags	<p>Stärkewindrose</p> <p>— 12 Beaufort — 11 Beaufort — 10 Beaufort            — 9 Beaufort — 8 Beaufort — 7 Beaufort            — 6 Beaufort — 5 Beaufort — 4 Beaufort            — 3 Beaufort — 2 Beaufort — 1 Beaufort            — 0 Beaufort</p> <p>Auftrittshäufigkeit der Windklassen in Prozent 01.04.2014 bis 13.11.2018 (40501 Prognose)</p>	<p>Stärkewindrose</p> <p>— 12 Beaufort — 11 Beaufort — 10 Beaufort            — 9 Beaufort — 8 Beaufort — 7 Beaufort            — 6 Beaufort — 5 Beaufort — 4 Beaufort            — 3 Beaufort — 2 Beaufort — 1 Beaufort            — 0 Beaufort</p> <p>Auftrittshäufigkeit der Windklassen in Prozent 22.12.2015 bis 13.11.2018 (25381 Prognose)</p>	<p>Stärkewindrose</p> <p>— 12 Beaufort — 11 Beaufort — 10 Beaufort            — 9 Beaufort — 8 Beaufort — 7 Beaufort            — 6 Beaufort — 5 Beaufort — 4 Beaufort            — 3 Beaufort — 2 Beaufort — 1 Beaufort            — 0 Beaufort</p> <p>Auftrittshäufigkeit der Windklassen in Prozent 01.04.2014 bis 13.11.2018 (40501 Prognose)</p>

Abbildung 18 Ganzjährig über alle Stunden gemittelte Stärkewindrosen in 150 m Höhe (Bodenwind) für drei Regionen nach [7]

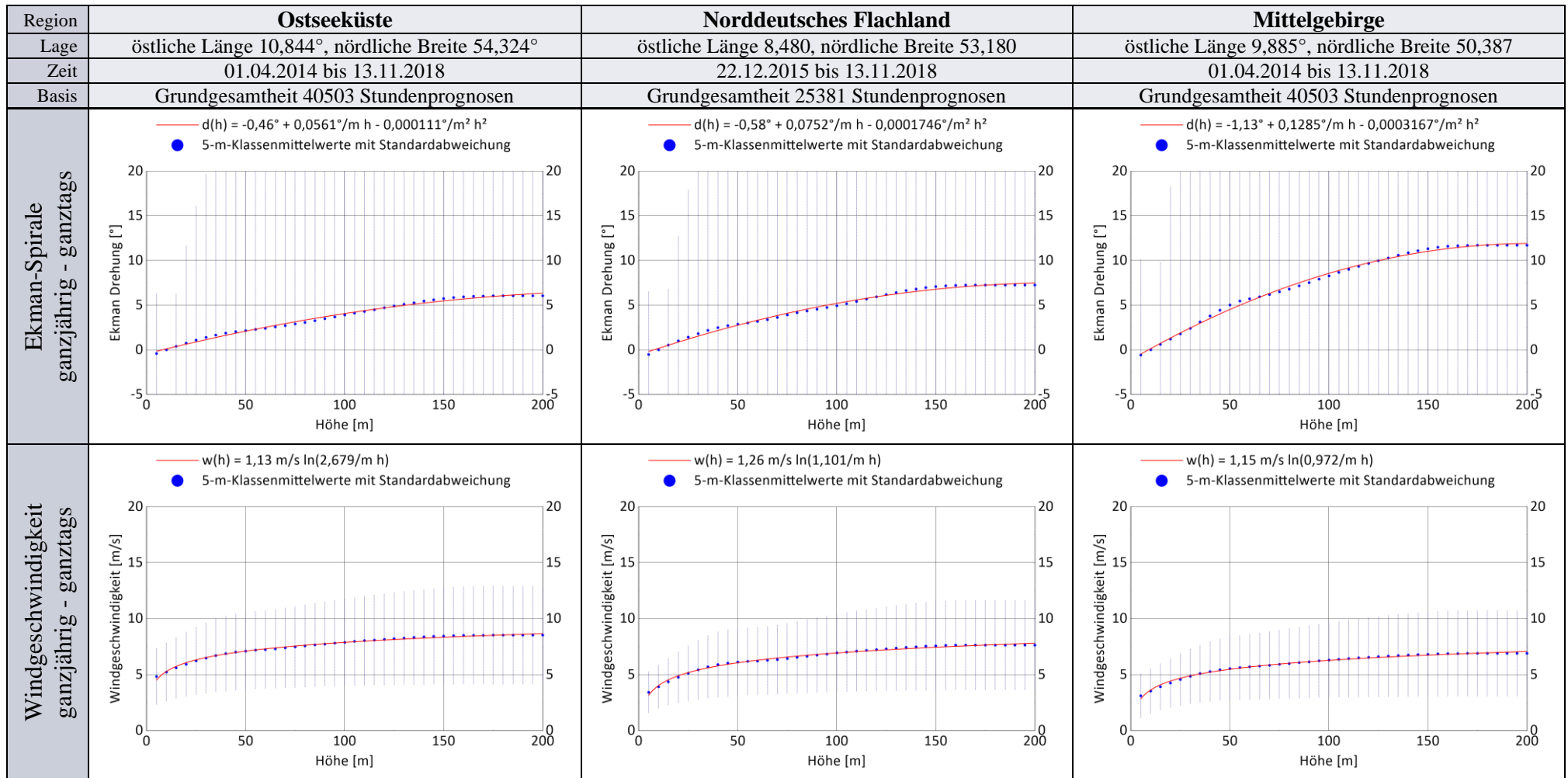


Abbildung 19 Ganzjährig über alle Stunden gemittelte Höhenabhängigkeiten der Winddrehung re. Bodenwind (Ekman-Spirale) und der Windgeschwindigkeit für drei Regionen nach [7]

## 7 Verweise

- [1] DIN ISO 9613-2:1999-10, Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien
- [2] VDI 4101 Blatt 2: Schallausbreitung im Freien unter Berücksichtigung meteorologischer und topographischer Bedingungen - Blatt 2: Windkraftanlagen
- [3] Hirsch, K.-W.; Herbertz, J.: "Zur Reziprozität in der akustischen Leitungstheorie", Fortschritte der Akustik DAGA 1986; DPG GmbH Bad Honnef 1986, S. 405-408
- [4] Hirsch, K.-W.: „Zur Vorausberechnung von Schießgeräuschen mit der Norm DIN ISO 6313 - Eine systematische Methodenkritik“, Lärmbekämpfung 8(2013)3, S. 108-117
- [5] Hirsch, K.-W.; Bertels, W.: „Schallschutzmaßnahmen in der Nähe von Schießgeräuschquellen“, Fortschritte der Akustik, DAGA'2012, DEGA e.V., Darmstadt
- [6] Nota, R.; Barelds, R.; van Maerke, D.: “Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20
- [7] Hirsch, K.-W.: „Bella Acustica – De Bello Acustico“, Meteorologie der Schallausbreitung - Profilprognosen an der Küste, im Flachland, im Mittelgebirge, dba 21, [www.kwhirsch.de](http://www.kwhirsch.de).
- [8] Hirsch, K.-W.; Vogelsang, B. M.: " $C_{met}$  - Der Weg zu einem präzisen Ergebnis", Lärmbekämpfung, Zeitschrift für Akustik, Schallschutz und Schwingungstechnik. Heft 4, 2021
- [9] Hirsch, K.-W.: „Bella Acustica – De Bello Acustico“,  $C_{met}$  – Die meteorologische Korrektur der DIN ISO 9613“, dba 14, [www.kwhirsch.de](http://www.kwhirsch.de).
- [10] Hirsch, K.-W.; Vogelsang, B. M.: "Meteorologische Korrekturen – Ermittlung auf der Grundlage einer Pegelstatistik", Fortschritte der Akustik, DAGA'2015, DEGA e.V., Nürnberg

## 8 Über „Bella Acustica – De Bello Acustico“



**Eine Sammlung von Aufsätzen  
zu ausgewählten Themen der Akustik  
aus der ganz persönlichen Sicht des Autors**

	<b>Prolog</b> Die Schöne und der Krieg	kwhdba.00.02 2018-10-31	E
	<b>Dezibels</b> Warum sich Akustiker in der Wüste am wohlsten fühlen	kwhdba.01.01 2018-10-07	E
	<b>Bewertungen</b> Wie die Ohren hören sollten	kwhdba.02.01 2016-11-09	E
	<b>Zeit begreifen</b> Zeitbegriffe	kwhdba.03.00 2016-11-12	F
	<b>Rote Rosen</b> Prognosen mit dem Schallwetter	kwhdba.04.00 2016-11-12	I
	<b>Pegelsalat</b> Zur systematischen Kennzeichnung von Schallpegeln	kwhdba.05.00 2016-11-12	F
	<b>Vom Harten und Weichen</b> Bodenreflexionen im Freien	kwhdba.06.00 2016-11-12	I
	<b>Atmosphärische Störungen</b> Über Messungen im Freien	kwhdba.07.00 2016-11-21	F
	<b>Projectile Sound</b> To Whom It May Concern	kwhdba.08.01 2018-08-22	E
	<b>Überreichweiten</b> Über Zonen abnormaler Hörbarkeit	kwhdba.09.1 2018-09-17	E
	<b>Götzenverehrung</b> DIN ISO 9613	kwhdba.10.01 2018-10-06	K
	<b>Krumme Hunde</b> Schallkreise in der Luft	kwhdba.11.02 2018-11-09	E
	<b>Kanonische Karten</b> Über klare Kanten in der Lärmakustik	kwhdba.12.0 2019-03-15	I

	<b>Jericho</b> Über Trompeten, Mauern und Schallstrahlungsdruck	kwhdba.13.0 2019-05-13	E				
	<b>Cmet</b> Die meteorologische Korrektur der DIN ISO 9613-2	kwhdba.14.0 2020-04-19	E				
	<b>Schießlärm</b> Immissionsschutz auf Schießplätzen für Verwaltungsakustiker	kwhdba.15.0 2020-04-17	E				
	<b>Rasterdecken</b> Massiver baulicher Schallschutz auf Schießständen	kwhdba.16.0 2020-04-17	E				
	<b>Glossiert</b> Akustik mit Humor	kwhdba.17.0 2020-06-10	E				
	<b>Richtigkeit</b> Qualitätssicherung mit der DIN 45687	kwhdba.18.0 2021-02-03	E				
	<b>Einwirkungsbereich</b> Bedeutung und Nutzung des Konzepts in der TA Lärm	kwhdba.19.0 2021-04-19	E				
	<b>Klima</b> Faktencheck der Temperaturveränderung in Würselen, NRW	kwhdba.20.0 2021-05-19	E				
	<b>Meteorologie der Schallausbreitung</b> Profilprognosen an der Küste, im Flachland, im Mittelgebirge	kwhdba.21.0 2021-09-14	E				
	<b>Hochliegende Quellen</b> Eine einfache Herausforderung in Schallausbreitungsmodellen	kwhdba.22.0 2021-09-14					
<b>Stand</b>	<b>I</b> Idee	erste Skizze	---	<b>E</b>	Entwurf	kurz vor druckreif	web
	<b>F</b> Fragmente	erste Abschnitte oder Kapitel	---	<b>D</b>	Druck	Druckversion	web
	<b>K</b> Konzept	Konzept ohne Sprachprüfung	web				

## Impressum

Autor  
Urheberrecht  
Zitierhinweis  
Verfügbarkeit  
Kontakt



Karl-Wilhelm Hirsch  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>  
Hirsch, K.-W.: „Bella Acustica – De Bello Acustica“, [Titel], [Kennung]  
[www.kwhirsch.de](http://www.kwhirsch.de)  
[post@kwhirsch.de](mailto:post@kwhirsch.de)