

# Zur meteorologischen Korrektur $C_{met}$ in der VDI 4101-Blatt 2: Windkraftanlagen

Berthold M. Vogelsang  
berthold@vogelsang-hannover.de

Karl-Wilhelm Hirsch  
Cervus Consult, consult@cervus.de

Wolfgang Probst  
Wolfgang.Probst@datakustik.com

## Einleitung

Die Richtlinie VDI 4101 [1] beschäftigt sich mit der „Schallausbreitung im Freien unter Berücksichtigung meteorologischer und topographischer Bedingungen“. Ihr Blatt 2 [2] befasst sich mit der Schallausbreitung der Geräusche von Windkraftanlagen. Diese Regelungen sind die Grundlage der Immissionsprognose in Genehmigungsverfahren dieser Anlagen.

Grundsätzlich ist die VDI 4101 Blatt 2 eine Engführung der DIN ISO 9613-2 [3] auf diesen Anlagentyp. Zwei entscheidenden Setzungen unterscheidet die VDI 4101 Blatt 2 von der DIN ISO 9613-2: (1) Der Bodeneffekt wird auf  $A_{gr} = -3$  dB festgelegt. Der Grund für diese Setzung sind die steilen Einfallswinkel, die bei der gegebenen Höhe von Windkraftanlagen und bei typischen Abständen zu maßgeblichen Immissionsorten auftreten. (2) Die meteorologische Korrektur wird auf  $C_{met} = 0$  dB festgelegt. Dadurch wird der Tatsache Rechnung getragen, dass in Quellhöhe weder Windgradient noch Temperaturgradient zu signifikanter Brechung führen, und deshalb die Schallausbreitung eher isotrop anzunehmen ist.

Aus verwaltungsakustischer Sicht überwindet die VDI 4101 Blatt 2 (nach Aussage in der Richtlinie selbst) die im Anwendungsbereich der DIN ISO 9613-2 implizite Beschränkung ihrer Verfahren auf ‚bodennahe Schallquellen‘. Dies ist die Übertragung der Formulierung ‚ground-based noise sources‘ der ISO Norm. was z. B. mit ‚bodengebunden‘ hätte übersetzt werden können. Inwieweit in der deutschen Fassung die Wahl von ‚bodennah‘ eine klärende Festlegung (und deshalb regelsetzend) oder lediglich eine unscharfe Übersetzung ist, spielt bei der Diskussion hier keine Rolle. Es geht vielmehr um die Berechnung der meteorologischen Dämpfung selbst, die auch bei Anwendung der DIN ISO 9613-2 auf Windkraftanlagen zu einem  $C_{met} = 0$  dB in maßgeblichen Abständen führt.

Der Beitrag zeigt, dass sich grundsätzlich auch für Windkraftanlagen ein  $C_{met}$  ergibt, das zwar signifikant kleiner ist, als das bei bodennahen Quellen, dennoch aber zu einer von null verschiedenen meteorologischen Korrektur führt. Die Diskussion führt zu einem Vorschlag zur Anpassung der VDI 4101 Blatt 2.

## Das $C_{met}$ der DIN ISO 9613-2

Die meteorologische Korrektur  $C_{met}$  berechnet aus dem Mittelungspegel unter günstigen Schallausbreitungsbedingungen  $L_{AT}(DW)$  nach DIN ISO 9613-2 den Langzeit-Mittelungspegel  $L_{AT}(LT)$ , der Grundlage von Beurteilungen in der Verwaltungsakustik ist.

Das  $C_{met}$  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“

wird, berechnet. In [4] wird beschrieben, wie diese Analyse nach eindeutigen Regeln durchgeführt werden kann.

$$C_{met} = 0 \text{ dB wenn } d_p \leq 10(h_s + h_r) \quad \text{Gl. 21}$$

$$C_{met} = C_0 \left[ 1 - 10(h_s + h_r) / d_p \right] \text{ wenn } d_p > 10(h_s + h_r) \quad \text{Gl. 22}$$

mit

$h_s$	Höhe der Quelle	$h_r$	Höhe des Aufpunktes
$d_p$	Abstand zwischen Quelle und Aufpunkt, projiziert auf die horizontale Bodenebene	$C_0$	Faktor in Dezibel, der die örtliche Wetterstatistik berücksichtigt
$h_s$	Höhe der Quelle	$h_r$	Höhe des Aufpunktes
$d_p$	Abstand zwischen Quelle und Aufpunkt, projiziert auf die horizontale Bodenebene	$C_0$	Faktor in Dezibel, der die örtliche Wetterstatistik berücksichtigt

Nimmt man die Nabenhöhe einer Windkraftanlage als Höhe der Quelle mit 100 m an, ergibt sich im Abstandsbereich kleiner als  $1000 \text{ m} + 10 h_r$  ein  $C_{met} = 0$  dB nach Gleichung 21 der DIN ISO 9613-2. Auch über diesen Abstand hinaus ist, ergibt sich ein  $C_{met}$ , das im Hinblick auf die Unsicherheit des gesamten Verfahrens vernachlässigt werden kann. In Fachkreisen wird gelegentlich angezweifelt, ob die Gleichungen 21 und 22 für Quellen in solchen Höhen tatsächlich angewendet werden sollten. Zumindest scheint plausibel, dass bei der Formulierung der Norm diese Anwendung nicht im Mittelpunkt stand.

Zur Berechnung des  $C_{met}$  sagt die DIN ISO 9613-2: „Die Auswirkungen der Witterungsbedingungen sind klein für kurze Abstände sowie für längere Abstände bei größeren Höhen von Quelle und Aufpunkt. Wie in Bild 10 dargestellt, tragen Gleichung (21) und Gleichung (22) diesen Faktoren in etwa Rechnung.“ Dies ist eine eher phänomenologische Beschreibung. In Verbindung mit dem ‚kann‘, das im Text des gesamten Kapitel 8 zur meteorologischen Korrektur der Norm verwendet wird, beschreiben die Aussagen dort eine aber nicht unbedingt die einzige Vorgehensweise.

Die folgende Diskussion über das Brechungspotential der Atmosphäre wird zeigen, dass Langzeit-Wetterstatistiken eher unterstützen als widerlegen, auch wenn sich eine andere Formel für die Berechnung des  $C_{met}$  ergibt.

## Das Brechungspotential der Atmosphäre

Die Bestimmung des  $C_0$  basiert grundsätzlich auf der Langzeit-Windrose des Bodenwinds, weil typisch bodennahe Quellen in der DIN ISO 9613-2 betrachtet werden und diese Windrose von Wetterdiensten in der Regel ohne Weiteres zur Verfügung gestellt 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 in nullter Näherung, weil der Bodenwind selbst ein indirektes Maß für das Brechungspotential der Atmosphäre ist. Denn der Bodenwind ist wegen der Reibung der Luftströmung am Boden kleiner als in größeren Höhen. In der Regel ist also der Bodenwind mit einem Gradienten der (horizontalen) Windgeschwindigkeit verbunden, der tatsächlich die Brechung bewirkt.

#### Anmerkung

Wenn hier von ‚Gradienten‘ gesprochen wird, ist die Änderung mit der Höhe der Temperatur bzw. der Änderung des Betrags der Komponente der horizontalen Windgeschwindigkeit in Richtung des Bodenwindes gemeint. Die vektoriellen Eigenschaften dieser Gradienten spielen hier keine Rolle.

Auch die Temperatur ändert sich mit der Höhe. Ihr Gradient ist eine weitere Ursache für Brechung. Die Bedeutung des Temperaturgradienten für die Brechung nimmt zu, wenn Schwachwindlagen vorherrschen. Er wird bestimmend in Höhen über 200 m hinaus.

Der Wind nimmt mit der Höhe nicht linear zu, was zu einem konstanten Windgradienten führen würde. Der Übergang vom Bodenwind zum Höhenwind erfolgt im Mittel entlang eines logarithmischen Profils. Der Windgradient selbst ist also höhenabhängig: Er ist im Mittel in Bodennähe größer als in größeren Höhen, s. Abbildung 7.

Eine Schallquelle in größeren Höhen findet deshalb ein signifikant geringeres Brechungspotential der Atmosphäre vor. Die meteorologische Korrektur muss also von der Quellhöhe abhängen. Genau diese Abhängigkeit berücksichtigt Gleichung 22 der DIN ISO 9613-2. Die textlichen Aussagen in der Norm zur Höhenabhängigkeit werden durch die Diskussion des Brechungspotential unterstützt und phänomenologisch begründet.

## Der Schallgeschwindigkeitsgradient

Aber auch Windgradient und Temperaturgradient sind nur ein indirektes Maß für das Brechungspotential der Atmosphäre. Das direkte Maß für das Brechungspotential der Atmosphäre ist der lokale Schallgeschwindigkeitsgradient in Richtung der Schallausbreitung. Dieser Gradient beschreibt die Krümmung eines Schallstrahls in einem Schallfeld. Er sagt also direkt etwas darüber aus, ob sich am Ort der Quelle in der betrachteten Schallausbreitungsrichtung, die Strahlen eher nach unten in Richtung des Bodens (schallausbreitungsgünstig), oder eher nach oben (schallausbreitungungünstig) oder eher gerade (neutral) verlaufen.

Der Schallgeschwindigkeitsgradient  $c'$  in Ausbreitungsrichtung in Höhe der Quelle  $h_s$  lässt sich bei gegebenen Profilen der Temperatur  $T(h)$  und Horizontalwindes in Ausbreitungsrichtung  $u(h)$  in hinreichender Näherung nach Gl. 1 berechnen, vgl. ISO 1996 [5].

$$c'(h_s) = \left. \frac{\partial c}{\partial h} \right|_{h_s} = 10 \frac{m}{s\sqrt{K}} \frac{1}{\sqrt{T(h_s)}} \left. \frac{\partial T}{\partial h} \right|_{h_s} + \left. \frac{\partial u}{\partial h} \right|_{h_s} \quad \text{Gl. 1}$$

Mit Hilfe der Näherung für die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur in Gl. 2 lässt sich der lokale Krümmungsradius  $R$  in Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit  $c$  und ihrem Gradienten mit Gl. 3 berechnen. Der Krümmungsradius ist ein gebräuchliches Maß für das Brechungspotential bei der Betrachtung der Schallausbreitung im Freien.

$$c(h) = 20,05 \sqrt{T(h)} \frac{m}{s\sqrt{K}} \quad \text{Gl. 2}$$

$$R(h_s) = \frac{c(h_s)}{c'(h_s)} \quad \text{Gl. 3}$$

Wenn man eine meteorologische Korrektur für hochliegende Quellen wie Windkraftanlagen bestimmen will, liegt es also nahe, die meteorologische Korrektur anhand der Höhenabhängigkeit des Betrags des Schallgeschwindigkeitsgradienten oder des Krümmungsradius zu analysieren.

Das folgende Kapitel stellt eine frei verfügbare Datenbasis vor, in der Langzeit-Mittelwerte der Temperatur- und Windprofile für verschiedene Regionen in Deutschland bereitgestellt werden.

## Meteorologie – Langzeitwetter

### Datenbasis

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

Im Rahmen der Untersuchungen zum Schallwetter [6], das inzwischen ausgiebig bei der Analyse der Schallausbreitung in anderen Zusammenhängen verwendet wird, wurde eine Fülle von Daten von so genannten Profilprognosen gesammelt. Bei den Profilprognosen handelt es sich um stundenspezifische Vorhersagen der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Höhe über Gelände. Solche stundenspezifischen Serien liegen nun teilweise über mehrere Jahre für viele Regionen in Deutschland vor.

Im Aufsatz „Meteorologie der Schallausbreitung - Profilprognosen an der Küste, im Flachland, im Mittelgebirge“ [7] wird diese breite Datenbasis für die Ermittlung der Kenngrößen des Langzeit-Wetters vorgestellt. Dort wird - nach Region und Beurteilungszeit differenziert - die mittleren Höhenprofile der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und des Schallgeschwindigkeitsgradienten zusammen mit der 10-m-Windrose und 150-m-Windrose angegeben.

### Beispiel

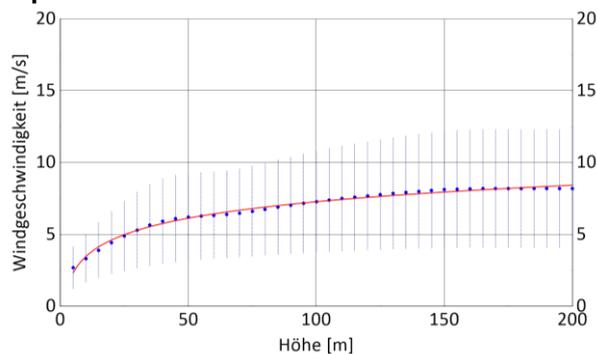


Abbildung 1 Windgeschwindigkeitsprofil Nachts

Aus dieser Datenbasis werden die Ergebnisse für die Region Norddeutsches Flachland exemplarisch vorgestellt und diskutiert. Es wird der ganzjährige Mittelwert für die Beurteilungszeit Nachts (22 bis 6 Uhr) gewählt, weil diese Beurteilungszeit für Windkraftanlagen im Regelfall maßgeblich ist.

In allen Abbildungen sind die blauen Punkte die 5-m-Höhen-Klassenmittelwerte. Die grauen Linien kennzeichnen die Standardabweichung. Die rote Kurve ist die Regression auf eine Gerade bzw. auf ein Polynom.

Abbildung 1 zeigt die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe. Die Zunahme folgt dem bekannten logarithmischen Gesetz.

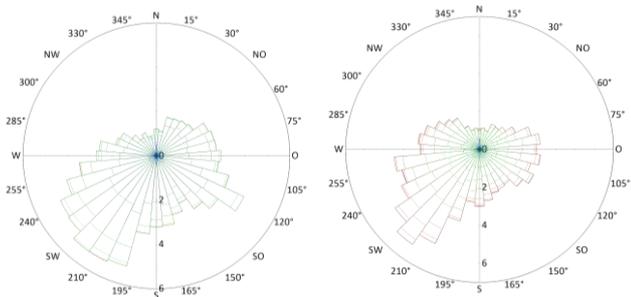


Abbildung 2 Windrose Nachts  
links in 10 m und rechts in 150 m Höhe

Nach Abbildung 2 unterscheiden sich Windrose in 10 m Höhe und 150 m Höhe signifikant. Nicht nur die Windstärken ändern sich, sondern auch die Richtungen. Dazu zeigt Abbildung 3 die so genannte Ekman-Drehung, die die Rechtsdrehung der Windrichtung mit der Höhe infolge der Coriolis-Kraft beschreibt.

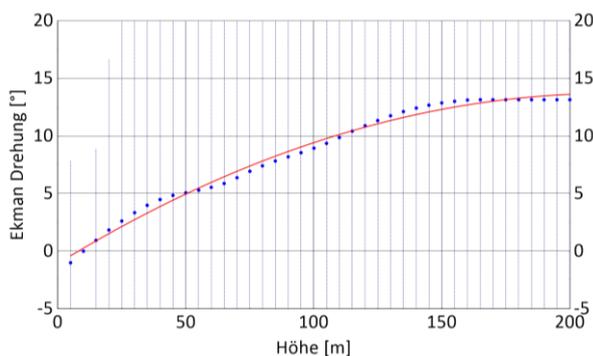


Abbildung 3 Ekman-Drehung der Windrichtung Nachts

Abbildung 4 gibt das Temperaturprofil an. Es ist bemerkenswert, dass von 22 bis 6 Uhr in den Höhen bis ca. 100 m im Mittel eine Zunahme der Temperatur vorherrscht; eine Folge von Inversionswetterlagen in diesen Stunden. Erst oberhalb von ca. 150 m ist eine leichte Abnahme festzustellen. In der Beurteilungszeit Tags ist das nicht der Fall, wie Abbildung 5 nachweist. Natürlich ist es tagsüber wärmer, aber in dieser Tageszeit fällt die Temperatur um ca.  $0,5^\circ$  pro hundert Meter, was den Erwartungen entspricht.

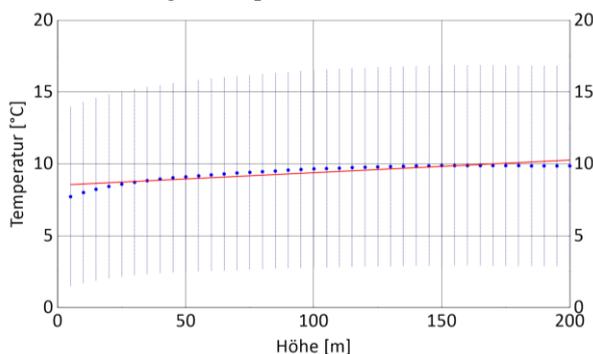


Abbildung 4 Temperaturprofil Nachts

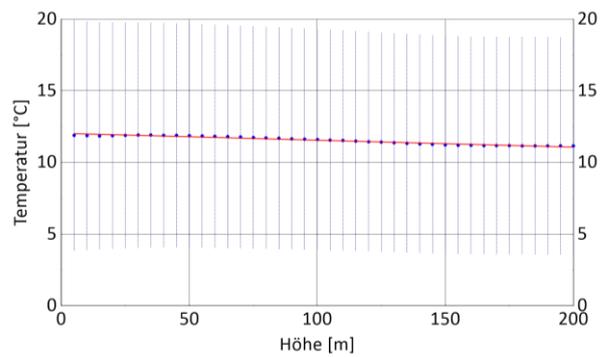


Abbildung 5 Temperaturprofil Tags

Auch die Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit ist Nachts ausgeprägt, siehe Abbildung 6.

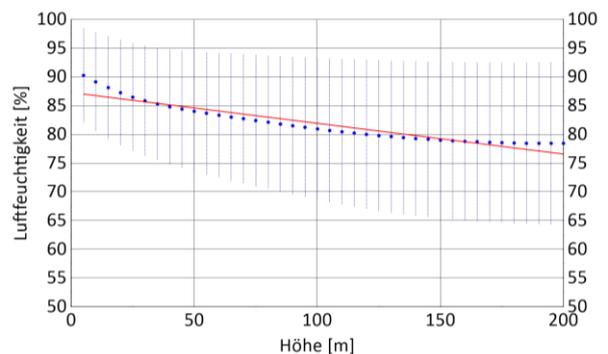


Abbildung 6 Luftfeuchtigkeitsprofil Nachts

Abbildung 7 zeigt den aus den Vorgaben ermittelten Schallgeschwindigkeitsgradienten in Abhängigkeit von der Höhe, also das Brechungspotential der Atmosphäre. Die Funktionen  $g(h)$  sind Näherungen.

- $g(h) = 0,178/s \exp(-0,01/m \text{ h})$
- $g(h) = 0,187/s \exp(-0,02/m \text{ h})$
- $g(h) = 0,196/s \exp(-0,03/m \text{ h})$
- $g(h) = 0,206/s \exp(-0,04/m \text{ h})$
- $g(h) = 0,217/s \exp(-0,05/m \text{ h})$
- $g(h) = 0,228/s \exp(-0,06/m \text{ h})$

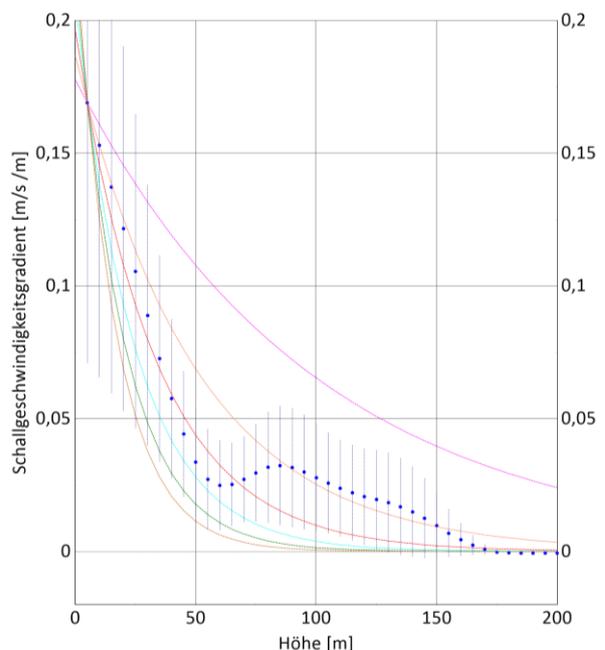


Abbildung 7 Betrag des Schallgeschwindigkeitsgradienten Nachts

## Das $C_{met}$ hochliegender Quelle

Das Profil zeigt grob eine exponentielle Abnahme des Gradienten von  $0,2/s$  ( $R \approx 1700$  m) in Bodennähe auf ca.  $0/s$  ( $R \approx \infty$ ) in 180 m Höhe. Für größere Höhen wird er negativ. In ungefähr dieser Höhe überwiegt im Mittel der Einfluss die weiter fortschreitende Abkühlung der Atmosphäre gegenüber dem immer kleiner werdenden Windgradienten bei der Bildung des Schallgeschwindigkeitsgradienten. In diesen Höhen ist das Regime also stets schallausbreitungsungünstig.

Neben den Mittelwerten sind in Abbildung 7 Exponentialfunktionen  $g(h)$  eingetragen, die das Profil grob annähern. Diese Näherung ist im Folgenden Grundlage für die Berechnung eines  $C_{met}$  für hochliegende Quellen.

Hier wird vorgeschlagen, die Berechnung des  $C_{met}$  auf das tatsächlich für die meteorologische Korrektur ursächliche Brechungspotential abzustützen, also auf die Höhenabhängigkeit des Schallgeschwindigkeitsgradienten bzw. des Krümmungsradius. Aus Abbildung 7 wird dazu die Näherung  $g(h)$  mit dem Exponenten  $-0,03/m$  verwendet. Dies ist der repräsentative Wert über alle Regionen und Beurteilungszeiten. Es ist zwar eine grobe Näherung, ist aber im Sinne der Verwendung in einem technischen Regelwerk sachgerecht.

Dann ergibt sich in Verbindung mit Gl. 3 und der Annahme einer höhenunabhängigen Schallgeschwindigkeit bei  $10^\circ\text{C}$  von ca.  $337$  m/s die Gl. 4.

$$R(h_s) = \frac{337 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,19 \frac{1}{\text{s}} e^{-0,03 \frac{\text{m}}{\text{s}} h_s}} \quad \text{Gl. 4}$$

Gl. 7 könnte in einem ersten Ansatz die Gleichung 21 der DIN ISO 9613-2 ersetzen. Dort tritt der Krümmungsradius  $R$  an die Stelle der mittleren Höhe  $h_m$  die Summe der beiden Höhen der Norm, denn dort ist das Brechungspotential als repräsentativ für die Schallausbreitung anzusehen. Der Vorfaktor von  $0,05$  passt das neue  $C_{met}$  an das der Norm für die Höhensumme von  $10$  m an.

$$h_m = (h_s + h_r) / 2 \quad \text{Gl. 5}$$

$$C_{met} = 0 \text{ dB} \quad \text{falls} \quad 0,05 \frac{R(h_m)}{d_p} > 1 \quad \text{Gl. 6}$$

$$C_{met} = C_0 \left( 1 - 0,05 \frac{R(h_m)}{d_p} \right) \quad \text{falls} \quad 0,05 \frac{R(h_m)}{d_p} \leq 1 \quad \text{Gl. 7}$$

In diesem Vorschlag tritt die Abbildung 8 an die Stelle von Bild 10 der Norm. Dort sind auch als rote Kurven in verschiedener Strichelung die entsprechenden Kurven aus der Norm eingezeichnet. Die Formähnlichkeit der Kurven bleibt erhalten.

## Diskussion

Ziel dieses Beitrags ist die Entwicklung einer sachgerechten und begründbaren Erweiterung der Berechnung einer meteorologischen Korrektur für hochliegende Quellen und damit auch für Windkraftanlagen. In [8] wird unter Nutzung der Gl. 4 eine andere Lösung auf der Basis einer Strahlenakustik erarbeitet, der ebenfalls zu dem Schluss kommt, dass das  $C_{met}$  für größere  $h_s$  in der DIN ISO 9613-2 unterschätzt wird. Abbildung 9 vergleicht die Ansätze. Erläuterung siehe [8].

Auch für Quellhöhen von  $100$  m (ab ca.  $400$  m) und von  $120$  m (ab ca.  $600$  m) liefert Gl. 7 von null verschiedene  $C_{met}$ . Gl. 7 trägt nicht nur „den Faktoren in etwa Rechnung“, wie

die DIN 9613-2 formuliert, sondern erhebt den Anspruch, zumindest problembezogene Kenngrößen zu berücksichtigen.

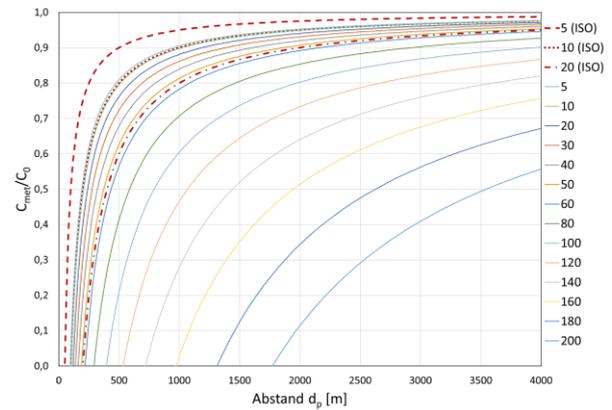


Abbildung 8 Meteorologische Korrektur bei gegebenem  $C_0$  Parameter in der Legende:  $h_s + h_r$  in Meter

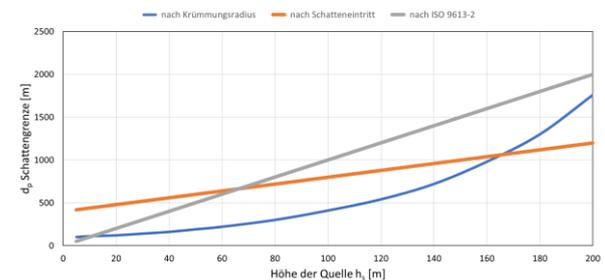


Abbildung 9 Abstandsabhängigen Einsatz des  $C_{met}$  in Abhängigkeit von der Quellhöhe, nach [8] ergänzt

Den Autoren ist bewusst, dass eine normative Änderung für die Regelfälle der Anwendung der DIN ISO 9613-2 kaum Erfolgsaussichten hat. Im Hinblick auf die Überwindung der Setzung  $C_{met} \equiv 0$  dB in der VDI 4101 Blatt 2, das wegen fehlender Kenntnisse bzw. wegen des Zweifels an der Anwendbarkeit der Norm auf solch hohe Quellen wie Windkraftanlagen auf die ‚sichere Seite‘ geführt wurde, können die Vorschläge zumindest für deren Anwendungsbereich begründet diskutiert und gegebenenfalls angepasst werden. Dies führt in einigen Ausbreitungssituationen bei Windkraftanlagen zu einem von Null verschiedenen Ergebnis für  $C_{met}$ .

## Verweise

- [1] VDI 4101: „Schallausbreitung im Freien unter Berücksichtigung meteorologischer und topographischer Bedingungen - Blatt 1: Phänomene und Verfahren
- [2] VDI 4101: „Schallausbreitung im Freien unter Berücksichtigung meteorologischer und topographischer Bedingungen - Blatt 2: Windkraftanlagen
- [3] DIN ISO 9613-2:1999-10, „Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien“
- [4] Hirsch, K.-W.; Vogelsang, B. M.: "C<sub>met</sub> - Der Weg zu einem präzisen Ergebnis", Lärmbekämpfung, Zeitschrift für Akustik, Schallschutz und Schwingungstechnik. Heft 4, 2021
- [5] ISO 1996-2:2017, "Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise"
- [6] Hirsch, K.-W.: "Grundlagen und Anwendungen des Schallwetters" Lärmbekämpfung, Zeitschrift für Akustik, Schallschutz und Schwingungstechnik. Heft 6, 2014
- [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.
- [8] Probst, W.: „Zur Revision der ISO 9613-2 unter Einbeziehung der Schallprognose für Windräder“, DAGA 2022, Stuttgart