



Die Lärmbelastung wird auch durch Wetterphänomene wie Windrichtung, Schnee und Wolkenbildung beeinflusst. Daher erfolgt über C_{met} eine meteorologische Korrektur der TA Lärm. Foto: PantherMedia / Valery Vvoenny

C_{met}

Der Weg zu einem präzisen Ergebnis

Karl-Wilhelm Hirsch, Berthold M. Vogelsang

ZUSAMMENFASSUNG Die meteorologische Korrektur C_{met} dient in der TA Lärm bzw. DIN ISO 9613-2 dazu, die nach dem Schema der Norm zu ermittelten Langzeitmittelungspegel für Mitwind- auf Langzeitmittelungspegel für alle Ausbreitungssituationen zu überführen. Das C_{met} wird abstands- und höhenabhängig über ein winkelabhängiges C_0 bestimmt. In der Regel geben die Länder das Berechnungsverfahren für das C_0 vor. Dies hat zur Folge, dass die Beurteilung der Geräuschbelastungen und damit die Genehmigungsgrundlagen für die gleiche Anlage in den Bundesländern voneinander abweichen können. Es wird eine Vorgehensweise vorgestellt, die diesen Konflikt so löst, dass länderspezifische Optionen möglich bleiben. Das vorgeschlagene Verfahren ist dennoch voraussetzungs- und ermessensarm. Es ist im Sinne der Qualitätssicherung präzise und reduziert massiv die Unsicherheit bei der Bestimmung von C_{met} und damit der Gesamt-Unsicherheit des Beurteilungspegel.

C_{met} - The way to archive a precise result

ABSTRACT In Germany, noise emissions in the neighborhood of installations for economic activities are predicted and assessed in the framework of the so-called TA Lärm. According to this regulation, the procedures of the standard DIN ISO

9613-2 must be used to predict the sound propagation from each source on the installation to all relevant receiver location in the neighborhood. Basically, the prediction scheme of the ISO 9613-2 holds for so-called downwind conditions. The rules of the TA Lärm, however, relies on long-term average levels that consider the local weather statistics. Therefore, the meteorological correction C_{met} of the DIN ISO 9613-2 needs to be applied to evaluate the relevant noise assessment levels. The ISO 9613-2 gives a clear formula for C_{met} based on a certain constant C_0 that accounts for the local weather. The guidance on how to estimate the C_0 is rather poor. It is found as a note giving a simple example. A second note allows the local authorities to provide the weather condition to be used. In order to clarify the way to calculate the C_0 the states in Germany made up their own rules that must be applied for prediction on their grounds. Consequently, noise assessment may differ from state to state. This article proposes a clear procedure to evaluate C_{met} . Starting from official weather statistics giving by the Deutscher Wetterdienst it defines procedures on how to evaluate and interpolate C_0 . Nevertheless, the procedure allows the states to prescribe specific procedure parameters to fulfill their needs and allows the local authorities to provide the weather condition. But the procedure is 'precise' in the context of quality assurance and will reduce the overall uncertainty of the prediction.

1 Einleitung

Die meteorologische Korrektur C_{met} dient in der TA Lärm bzw. DIN ISO 9613-2 [1] dazu, die nach dem Schema der Norm ermittelten Langzeitmittelungspegel für Mitwind- auf Langzeitmittelungspegel für alle Ausbreitungssituationen zu überführen. Das C_{met} wird abstands- und höhenabhängig über ein winkelhängiges C_0 bestimmt.

In der Regel geben die Länder das Berechnungsverfahren für das C_0 vor. Sie erwarten dann vom Gutachter, dass er die verfahrensrelevanten Wetterdaten einholt, um mit diesen Angaben über das vorgegebene C_0 -Verfahren das C_{met} für die konkrete Ausbreitungssituation zu berechnen.

In diesem Aufsatz wird begründet, dass diese Vorgehensweise nicht TA-Lärm-konform ist, weil die Länder zur Vorgabe des C_0 keine ausreichende Ermächtigungsgrundlage haben.

Nach DIN ISO 9613-2 ist es genau umgekehrt: Die Behörden können das Wetter vorgeben, der Normenanwender wendet sein Verfahren zur Bestimmung des C_0 an. Dies stellten schon *Kurze* und *Schirmacher* [2] in einer grundsätzlichen Betrachtung zum C_{met} vor mehr als 20 Jahren fest.

Die heute geübte Praxis der Länder, das Berechnungsverfahren für das C_0 vorzugeben, hat einen erheblichen Einfluss auf die Unsicherheit der Prognosen und mindert die Qualität der Aussagen. Denn das C_{met} geht additiv in den Beurteilungspegel ein; deshalb wirken sich Unsicherheiten des C_{met} auch direkt auf die Unsicherheit des Langzeitmittelungspegels aus.

Hier geht es nicht um Unsicherheiten bei der Ausbreitungsrechnung nach der DIN ISO 9613-2, sondern um eine Herabsetzung der Präzision (im Sinne der DIN 45687) des Beurteilungspegels durch gutachtliche oder behördliche Entscheidungen. Diese Unsicherheiten kommen aus dem Verfahren zur Bestimmung des C_0 und aus der Festlegung der maßgeblichen Wetterdaten. Die Landesbehörden versuchen, diese Unsicherheiten durch ihre landesspezifischen Empfehlungen zu vermeiden. Es kann ihnen aber grundsätzlich nicht gelingen, solange es keine bundesweite Regelung gibt.

Um die Bedeutung der meteorologischen Korrektur hervorzuheben: Bei der Bestimmung des C_0 nach den Regeln in Nordrhein-Westfalen und in Thüringen können sich die Werte um 2 dB unterscheiden. Daraus folgen gegebenenfalls Beurteilungspegel mit ähnlichen hohen Unterschieden mit allen Konsequenzen auf Genehmigungen.

Im vorliegenden Aufsatz wird keineswegs dafür plädiert, endlich TA-Lärm-konform vorzugehen und jedem Gutachter zu überlassen, wie er aus den behördlichen Wetterangaben das C_0 und das C_{met} bestimmt. Es wird vielmehr vorgeschlagen, dass zuständigkeitshalber die Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), z. B. in einem Leitfaden, bundesweit eine Vorgehensweise der C_0 -Bestimmung empfiehlt und damit die Regelungslücke in der Norm bzw. der TA Lärm schließt.

Der Aufsatz beginnt mit einer Diskussion der ‚ländergemachten‘ Probleme bei der Bestimmung des C_{met} . Danach wird ein Verfahren zur Bestimmung des C_{met} abgeleitet, das qualitätssicherbar ist, der Umsetzung in ein Tabellenkalkulationsprogramm zugänglich ist und doch den Behörden ihre Berechtigung zur Vorgabe des Wetters allerdings mit definierten Kenngrößen lässt.

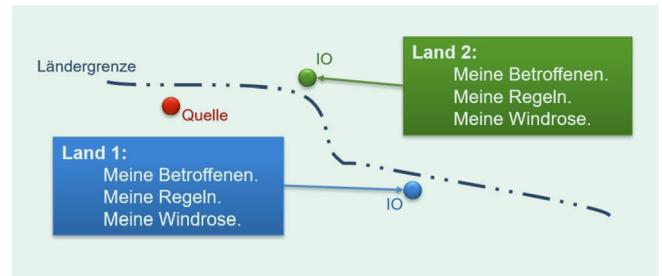


Bild 1 Skizze zur Erläuterung der Probleme an Ländergrenze¹⁾. Foto: Autoren

2 Drei Probleme mit dem C_{met} in der gutachtlichen Praxis

2.1 Für Emissionsort und Immissionsort gelten unterschiedliche Windrosen

Das C_{met} ist fraglos eine Korrektur, die man aus technischem Verständnis der DIN ISO 9613-2 weder der Quelle noch dem Empfänger zuordnen kann, sondern dem Ausbreitungspfad zuordnen muss. Demzufolge wäre es sachgerecht, die Wetterdaten entlang des Ausbreitungspfades oder ersatzweise auf halber Strecke zwischen Emission und Immission als maßgeblich zu betrachten. Dies ist aber praxisfremd. In der Regel sind mehrere Immissionsorte für denselben Emissionsort zu betrachten. Es ist deshalb aus Sicht der Praxis sachgerecht, die Wetterdaten des Emissionsortes zugrunde zu legen.

Die Länderregeln sind in einigen Fällen, vgl. [3], zu komplex, weil sie für jede Richtung Quelle - Empfänger letztlich andere Windrosen (Beurteilungszeit-abhängige Zuordnung der Kalmen zur ‚Mitwindrichtung‘) vorschreiben.

2.2 Emissionsort und Immissionsort liegen nicht im selben Bundesland

Die Vorgaben zur Bestimmung des C_{met} unterscheiden sich in den Ländern. Das führt bei Anlagen, deren Einwirkungsbereich Ländergrenzen überschreiten,¹⁾ zu Rechtsunsicherheiten, denn einige Länder verlangen, dass bei Immissionsorten auf ihrem Gebiet, ihre Regeln und ihre Wettervorgaben verwendet werden (Bild 1).

2.3 Schallausbreitung entlang der Sektorengrenze der Windrose

Es wird häufig übersehen, dass die ‚Maßgeblichkeit‘ eines Immissionsortes auch vom Bestimmungsv erfahren des C_{met} abhängt. Das ist gerade dann der Fall, wenn bei einer Sektor-orientierten Bestimmung der maßgebliche Immissionsort an der Kante eines Sektors gesucht wird. Kleinste Änderungen der Richtung führen dann zu einer anderen Auswahl.

¹⁾ Diese Situation ist keineswegs so selten, wie man vermuten könnte. NRW teilt sich mit Niedersachsen 583 km, mit Hessen 272 km und mit Rheinland-Pfalz 312 km eine Landesgrenze. Dies sind insgesamt fast 1200 km Landesgrenze. Unterstellt man eine Einwirkungsbereich von Geräuschquellen von 1 km, sind Quellen in ungefähr 1200 km² von 34000 km² Gesamtfläche des Landes NRW betroffen. In ungefähr 3 % der Fälle kommt eine solche Situation in NRW vor. Bei kleineren Ländern geschieht das noch häufiger, weil das Verhältnis Länge der Landesgrenze zur Landesfläche größer wird und weil sie beispielsweise keine Staatsgrenzen haben. Die Rechnung ändert sich massiv, wenn man Anlagen mit einem weit größeren Einwirkungsbereich betrachtet. Schießanlagen kommen auf (mindestens) 5 km Einwirkungsbereich. Dann sind es schon 15 % der Fläche.

3 Zur Definition der meteorologische Korrektur C_{met}

Die TA Lärm [4] nutzt zur Bestimmung von Beurteilungspegeln grundsätzlich A-bewertete Langzeitmittelungspegel, die für viele Geräuschquellenarten durch die Anwendung der DIN ISO 9613 zu ermitteln sind. Da das Kernverfahren der Norm auf einer Prognose des Immissionspegels unter schallausbreitungsgünstigen Bedingungen $L_{AT}(DW)$ beruht, ist bei Prognosen im Zusammenhang mit der TA Lärm die Anwendung der meteorologischen Korrektur C_{met} nach Gleichung (6) der Norm unabdingbar, um den Langzeitmittelungspegel $L_{AT}(LT)$ zu erhalten.

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met} \quad (6, \text{DIN ISO 9613-2})$$

In Kapitel 8 der Norm wird im Gleichungspaar Gleichung (21) und (22), vorgegeben, wie in Abhängigkeit von der Quellhöhe h_s , der Empfängerhöhe h_r und dem auf die Bodenebene projizierten Abstand zwischen Quelle und Empfänger d_p das C_{met} über einen Faktor C_0 zu berechnen ist.

$$C_{met} = 0 \text{ dB für } d_p \leq 10(h_s + h_r) \quad (21, \text{DIN ISO 9613-2})^2$$

$$C_{met} = C_0 \left(1 - 10 \frac{(h_s + h_r)}{d_p} \right) \quad \text{für } d_p > 10(h_s + h_r) \quad (22, \text{DIN ISO 9613-2})^3$$

Das C_0 ist laut Norm „ein Faktor, in Dezibel, der von den örtlichen Wetterstatistiken für Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Temperaturgradienten abhängt“.

Zur Bestimmung des C_0 liefert die Norm lediglich in Anmerkung 20 textliche Hinweise: „Ein Wert für C_0 ... kann nach einer elementaren Analyse der örtlichen Wetterstatistik geschätzt werden. Falls sich beispielsweise ergibt, dass ..., für Schallausbreitung günstigen Wetterbedingungen während 50 % des betrachteten Zeitraums vorliegen und die Dämpfung während der übrigen 50 % mindestens 10 dB höher ist, so beträgt C_0 etwa +3 dB, ...“.

Die Norm führt in Anmerkung 21 weiter aus: „Die Witterungsbedingungen für die Bewertung von C_0 können von den örtlichen Behörden festgelegt werden.“

Nach dem Wortlaut der DIN ISO 9613-2 gibt sie also nur ein Beispiel zur Schätzung des C_0 in einer Anmerkung; eine kaum regelsetzende Vorgehensweise. Streng genommen überlässt sie das Problem C_0 dem Anwender der Norm. Im Rahmen einer gutachtlichen Stellungnahme resultiert daraus nach allgemeinem Verständnis die Pflicht für den Anwender, sein dort gewähltes Verfahren zu begründen. Diese Pflicht wird er-

füllt, wenn der Anwender ein Verfahren zitiert oder selbst ein Verfahren beschreibt.

Es ergibt sich also aus der DIN ISO 9613-2 keine ausreichende Grundlage dafür, dass Behörden bei schalltechnischen Gutachten ein Verfahren zur Bestimmung des C_0 oder etwa das C_0 selbst vorgeben können. Die Bestimmung des C_0 ist Aufgabe des Anwenders und fällt unter seine Expertise. Zur gleichen Einschätzung kommen auch Kurze und Schirmmacher in [2].

Es gibt durchaus Ansätze, die Bestimmung des C_0 aus detaillierten Wetterstatistiken auch unter Berücksichtigung von Temperaturgradienten (so wie es die Norm verlangt, s. o.) mit Hilfe von fortschrittlichen Schallausbreitungsmodellen durchzuführen, siehe z. B. [6]. Diese Vorgehensweise ist – wie ausgeführt normenkonform – und im Sonderfall jeder pauschalen Regelung überlegen. Solche aufwendigen Verfahren eignen sich aber nicht für den Regelfall in der gutachtlichen Praxis. Auch aus Sicht der Qualitätssicherung, die Nachvollziehbarkeit und die eindeutige Umsetzung der Verfahren einer Norm verlangt, ist diese „Freiheit“ für den Anwender eine Regelungslücke in der DIN 9613-2, die behoben werden sollte.

4 Eingeführte Schätzung des C_0

In der gutachtlichen Praxis hat sich – zumindest in einigen Bundesländern aufgrund der jeweiligen Erlasslage – durchgesetzt, das C_0 über die Verrechnung einer Gewichtungsfunktion G mit einer Langzeit-Windrose W zu bestimmen. Die Gewichtungsfunktion gibt dabei als ‚dezibelisierter‘ Faktor die windrichtungsabhängige meteorologische Korrektur des $L_{AT}(DW)$ auf den $L_{AT}(LT)$ für d_p gegen unendlich an.

Die Vorgehensweise ist grundsätzlich in [2] vorgestellt, soll hier aber noch einmal stringent abgeleitet werden, auch um einige Missverständnisse in den Empfehlungen auszuräumen.

Die hier diskutierte Gewichtungsfunktion hat die Form (Gleichung (1))

$$G(\varphi) = Q \left(1 - \cos(\varphi - \Theta \sin(\varphi)) \right) \quad (1)^4$$

In Gleichung 1 ist φ der Winkel relativ zur Mitwindrichtung; Q bzw. Θ sind jeweils festzulegende Konstanten. Der ‚Pegel‘ Q kennzeichnet die Pegeldifferenz zwischen Mitwind-Pegel ($\varphi = 0^\circ$) und Gegenwind-Pegel ($\varphi = 180^\circ$). Mit dem Winkel Q lässt sich die Breite des Gegenwind- bzw. Mitwindfenster festlegen. **Bild 2** stellt die Funktion für zwei gebräuchliche Wertepaare $\{Q = 5 \text{ dB}; \Theta = 45^\circ\}$ (Blau) und $\{Q = 7,5 \text{ dB}; \Theta = 22,5^\circ\}$ (Grün) dar.

Die Form der Funktion ist im Ansatz zumindest unglücklich. Es lassen sich keineswegs beliebige Mitwindfenster abbilden. Nur im Bereich ergeben sich überhaupt sinnvolle Verläufe. Dennoch ist der Ansatz in der Praxis hinreichend. Das Wertepaar wird von der Tageszeit (bzw. Beurteilungszeit), von der Jahreszeit aber auch von örtlichen Gegebenheiten abhängen. Dies wird an anderer Stelle zu diskutieren sein (**Bild 3**).

G ist nicht etwa normiert. Berechnet man das $C_0(\eta)$ nach Gleichung 6, siehe unten, ergibt sich bei einer isotropen Windrose für das Wertepaar $\{Q = 5 \text{ dB}; \Theta = 45^\circ\}$ ein winkelunabhängiges C_0 von 2,08 dB bzw. für $\{Q = 7,5 \text{ dB}; \Theta = 22,5^\circ\}$ ein C_0 von 3,49 dB. Die Gewichtungsfunktion bestimmt, welchen Einfluss C_{met} bei der Prognose mit der DIN ISO 9613-2 hat.

²⁾ Das C_{met} gilt nach DIN ISO 9613-2 nur für Quellen, „deren Leistung über die Zeit konstant ist“. Es gilt also nach Norm beispielsweise nicht für impulshaltige Geräuschquellenarten. Die TA Lärm setzt allerdings diese Beschränkung gerade für Schießlärm ausdrücklich außer Kraft.

³⁾ Wie die Unsicherheitsbetrachtung in Tabelle 5 der DIN ISO 9613-2, vgl. [5], sollte die Anmerkung 20 nur bei Situationen ohne Schirmung, Geländeschirmung (Wald und Bebauungsdämpfung) angewendet werden. Erfahrungsgemäß kann das C_{met} in Einzelfällen mit Schirmen massiv höher ausfallen.

⁴⁾ Im Folgenden werden bewusst andere Symbole eingeführt als sie häufig in einschlägigen Schriften eher unklar verwendet werden.

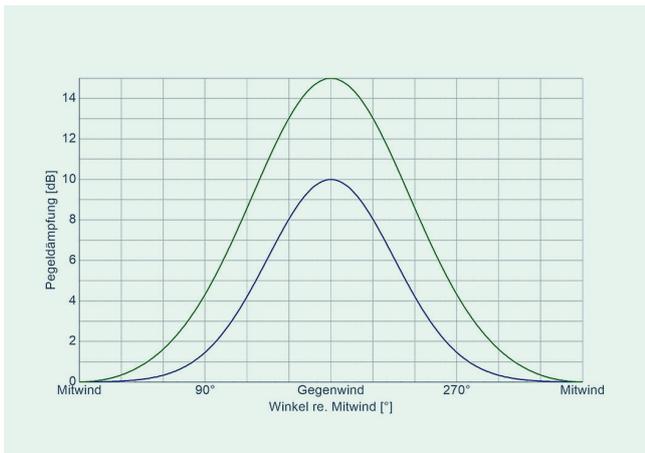


Bild 2 Gewichtungsfunktion der Pegeldämpfung für $\{Q = 5 \text{ dB}; \Theta = 45^\circ\}$ (Blau) und $\{Q = 7.5 \text{ dB}; \Theta = 22.5^\circ\}$ (Grün). Grafik: Autoren

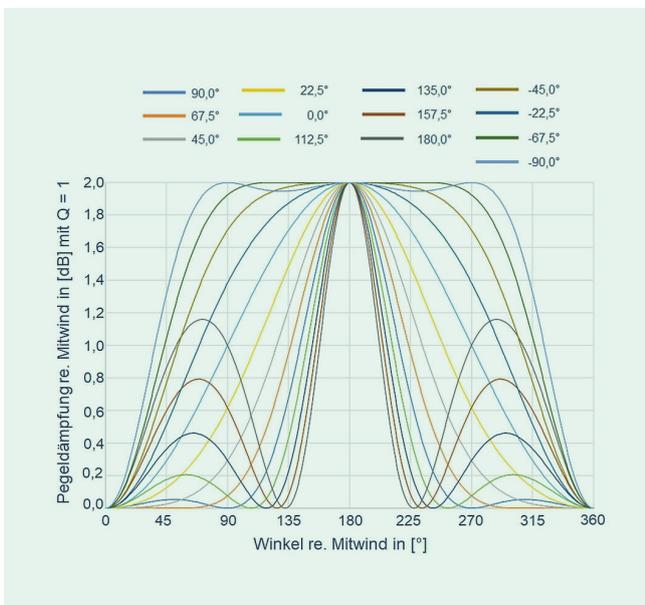


Bild 3 Gewichtungsfunktion der Pegeldämpfung bei $Q = 1 \text{ dB}$ Parameter Θ von -90° bis $+90^\circ$. Grafik: Autoren

5 Langzeit-Windrose

Eine Langzeit-Windrose gibt die relative Häufigkeit (meistens in Prozent) von Kalmen und des Auftretens des Windes aus diskreten Richtungen für den gewählten Zeitraum an. Die diskreten Richtungen folgen einer harmonischen Winkelteilung (90° , 60° , 45° , 30° oder $22,5^\circ$ Sektorbreite) eines Kompasses. Die Richtungen sind als Sektormittewinkel als Himmelsrichtung angegeben. Eine solche Darstellung der ‚Witterungsbedingungen‘ ist für die Zwecke des Schätzverfahrens für C_0 nicht geeignet. Die Windrose muss aufbereitet werden.

1. Kalmen sind schwachwindige Wetterlagen ohne eindeutige Windrichtung. Für das Schätzverfahren gibt es nur zwei Möglichkeiten: weglassen und Windrose neu normieren oder den Anteil der Kalmen auf alle Windrichtungen gleichmäßig zu ver-

teilen. Hier wird der Anteil der Kalmen grundsätzlich gleichmäßig auf alle Richtung verteilt.⁵⁾

2. Die Himmelsrichtung hat eine mathematisch negative Drehrichtung. Zudem ist die Windrichtung die Richtung, aus der der Wind kommt. Es kann deshalb leicht zu Missverständnissen kommen, wenn man Begriffe wie Mitwindrichtung und Schallausbreitungsrichtung von der Quelle zum Immissionsort verwendet, ohne eindeutig festzulegen, ob es sich um Winkel oder Differenzwinkel in der Notation von Himmelsrichtungen oder als mathematische Winkel in einem Kartenkoordinatensystem handelt. Zur besseren Unterscheidung wird für die Einheit der Himmelsrichtung die Notation $[H^\circ]$ eingeführt. Die Himmelsrichtung Nordost wird also beispielsweise als 45^{H° angegeben. Hier wird festgelegt, dass grundsätzlich in einem lokalen rechtwinkligen, rechtshändigen metrischen Koordinatensystem gerechnet wird, bei dem die Abszisse in Ostrichtung, die Ordinate in Nordrichtung zeigt. Damit zeigt auch die z-Achse in Richtung von Geländehöhen und nicht – wie bei der Himmelsrichtung – in den Boden hinein. Die Quelle liegt im Ursprung des Koordinatensystems. Der Immissionsort liegt im Abstand d_p unter dem Winkel h in diesem Koordinatensystem. η wird hier in Grad $[\circ]$ angegeben.

3. Für das Schätzverfahren wird eine stetige Funktion für die Windrichtungshäufigkeit benötigt, vgl. [2], um Sprünge des C_{met} und damit des C_{met} an den Sektorengrenzen der Windrose zu vermeiden. Dies wird in allen Empfehlungen billigend in Kauf genommen, weil die Sprünge in Immissionsortbezogenen Anwendungen der DIN ISO 9613-2 nicht auffällig sind. Streng genommen muss die Unstetigkeit bei der Unsicherheitsbetrachtung für das C_{met} und damit des Prognosepegels eingehen. Bei einer flächigen Darstellung, z. B. Karten von Prognosepegel, sind die Sprünge sichtbar und geben stets Anlass zu Nachfragen.

Hier wird die trigonometrische Interpolation (Fourier-Entwicklung) vorgegeben, weil die Windrose und die von ihr abgeleiteten Funktionen auch das C_0 periodisch sind.⁶⁾

Unter der Voraussetzung, dass der Anteil der Kalmen, S_0 , bereits verteilt wurde, gilt für die Abtastwerte der Windrichtungshäufigkeit beispielsweise für eine 30° Winkelteilung die Zuordnung nach **Tabelle 1**.

Für andere Winkelteilungen lässt sich die Zuordnung sofort angeben. Im Hinblick auf die praktische Anwendung der Interpolation wird hier auf eine allgemeine mathematische Formulierung verzichtet. Sie kann in [2] nachgelesen werden. Matrizen für andere Winkelteilungen findet man im Anhang der DIN EN ISO 17201-2 [8], in der dieses Verfahren zur Beschreibung der Richtcharakteristik einer Quelle angewendet wird. (**Gleichung 2**)

⁵⁾ Die in zumindest einer bekannten Empfehlung niedergelegte Regel, den Anteil der Kalmen dem Sektor zuzuschlagen, in dem der Immissionsort liegt, ist nicht durchzuhalten, weil diese Vorgehensweise von der Sektorbreite abhängt und bei einer Interpolation der Windrose unsinnig wird. Zudem stellt sich die Frage, ob man Häufigkeiten mit mehr als 8 m/s Windgeschwindigkeit nicht weglassen sollte. Bei solchen Sturmlagen sind Windgeräusche stets dominant.

⁶⁾ Dies wird so bereits von Kurze und [2] vorgeschlagen. Die von ihnen diskutierten Probleme mit dieser Methode sind keine mathematischen Probleme, sondern einfach ein Ausdruck für die Unterabtastung der Windrose.

Deshalb gibt Gleichung 2 – ebenfalls für die 30°-Teilung – die Bestimmungsmatrix für die Koeffizienten der Interpolationsglei-

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ c_1 \\ a_1 \\ c_2 \\ a_2 \\ c_3 \\ a_3 \\ c_4 \\ a_4 \\ c_5 \\ a_5 \\ c_6 \end{bmatrix} = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & \sqrt{3} & 1 & 0 & -1 & -\sqrt{3} & -2 & -\sqrt{3} & -1 & 0 & 1 & \sqrt{3} \\ 0 & 1 & \sqrt{3} & 2 & \sqrt{3} & 1 & 0 & -1 & -\sqrt{3} & -2 & -\sqrt{3} & -1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 & -1 & 1 & 2 & 1 & -1 & -2 & -1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 \\ 2 & -1 & -1 & 2 & -1 & -1 & 2 & -1 & -1 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 2 & -\sqrt{3} & 1 & 0 & -1 & \sqrt{3} & -2 & \sqrt{3} & -1 & 0 & 1 & -\sqrt{3} \\ 0 & 1 & -\sqrt{3} & 2 & -\sqrt{3} & 1 & 0 & -1 & \sqrt{3} & -2 & \sqrt{3} & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_0 \\ W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \\ W_6 \\ W_7 \\ W_8 \\ W_9 \\ W_{10} \\ W_{11} \end{bmatrix}$$

Matrizengleichung zur Bestimmung der Cosinus- und Sinus-Koeffizienten der trigonometrischen Interpolation für die 30°-Teilung.

chung an. Für die Windrichtungshäufigkeit gilt dann Gleichung (3).

$$W(\eta) = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i \sin(i \eta) + \sum_{i=1}^6 c_i \cos(i \eta) \quad (3)$$

$W(\eta)$ gibt nun stetig die Häufigkeit in Prozent je Winkeleinheit an, aus der der Wind kommt. Für die Bestimmung von C_0 ist diese Funktion noch nicht optimal. Vielmehr wird die Häufigkeit in Prozent je Winkeleinheit in Abhängigkeit vom Winkel im Kartenkoordinatensystem benötigt, in der Wind weht, also die Luftströmungsrose $A(\eta)$. Dafür gilt Gleichung (4).

$$A(\eta) = W(\eta + 180^\circ) \quad (4)$$

6 Objektivierbares Schätzverfahren des C_0

Zur Vorbereitung der Berechnung des C_0 wird noch die Funktion $F(\varphi)$, die die Gewichtsfunktion in Gleichung (1) als Faktor darstellt, eingeführt (Gleichung (5)).

$$F(\varphi) = 10^{-0,1Q(1 - \cos(\varphi - \Theta \sin(\varphi)))} \quad (5)$$

Dann kann $C_0(\eta)$ als Faltung nach Gleichung (6) berechnet werden.

$$C_0(\eta) = \int_0^{360^\circ} A(\alpha) F(\alpha - \eta) d\alpha \quad (6)$$

(Bild 4)

Mit dem hier vorgestellten Schätzverfahren für C_0 steht ein qualitätssicherbarer Weg zur Verfügung, der lediglich noch von dem Parameterpaar Q, Θ und von der Windrose abhängt. Q, Θ und die Windrose sind als Vorgabe der „Witterungsbedingungen für die Bewertung von C_0 “ im Sinne der Anmerkung 21 der DIN ISO 9613-2 zu interpretieren und

⁷⁾ Der Deutsche Wetterdienst DWD ist eine Anstalt des öffentlichen Rechts im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur. Seit Mai 2020 können diese Statistiken unter der Lizenz „Verordnung zur Festlegung der Nutzungsbestimmungen für die Bereitstellung von Geodaten des Bundes (GeoNutzV)“ unter Beigabe eines Quellenvermerks ohne Einschränkungen weiterverwendet werden. (gdz.bkg.bund.de/)

Tabelle 1 Zuordnung der Häufigkeit S_j in den Himmelsrichtungen zu den Häufigkeiten der Sektoren W_i

$W_0 = W(0^\circ)$	$= S_4 (90^{H^\circ})$	$W_6 = W(180^\circ)$	$= S_{10} (270^{H^\circ})$
$W_1 = W(30^\circ)$	$= S_3 (60^{H^\circ})$	$W_7 = W(210^\circ)$	$= S_9 (240^{H^\circ})$
$W_2 = W(60^\circ)$	$= S_2 (30^{H^\circ})$	$W_8 = W(240^\circ)$	$= S_8 (210^{H^\circ})$
$W_3 = W(90^\circ)$	$= S_1 (0^{H^\circ})$	$W_9 = W(270^\circ)$	$= S_7 (180^{H^\circ})$
$W_4 = W(120^\circ)$	$= S_{12} (330^{H^\circ})$	$W_{10} = W(300^\circ)$	$= S_6 (150^{H^\circ})$
$W_5 = W(150^\circ)$	$= S_{11} (300^{H^\circ})$	$W_{11} = W(330^\circ)$	$= S_5 (120^{H^\circ})$

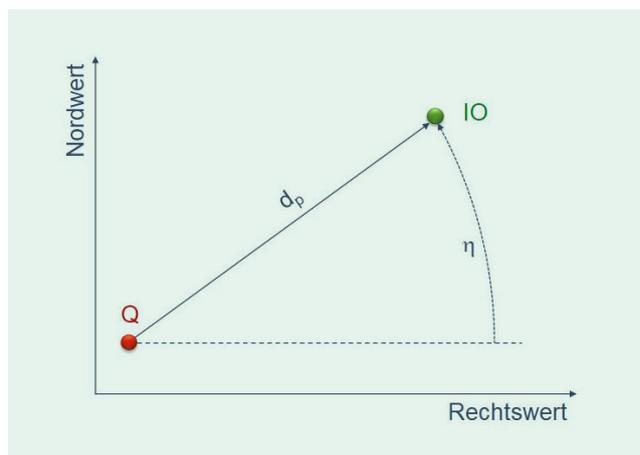


Bild 4 Abbildung 4 Skizze zur Festlegung des Winkels η . Grafik: Autoren

können von lokalen Behörden vorgegeben werden. Das kann auch – und sollte auch, vgl. [6] und [9] – für die Beurteilungszeiten Tags und Nachts unterschiedlich geschehen. Es ist bekannt, dass sich beispielsweise die Breite des Mitwindsektors signifikant für beide Beurteilungszeiten unterscheiden. Ähnliches gilt auch für Quellen, die jahreszeitabhängig betrieben werden.

Das Verfahren selbst aber ist eine gutachtliche Setzung, das ohne ‚behördlichen Segen‘ regelkonform ist.

Windrosen gibt es mit unterschiedlicher zeitlicher, örtlicher Auflösung von verschiedenen Wetterdiensten. Für behördlich relevante Windrosen sind die Daten des Deutschen Wetterdienstes erste Wahl, weil es ‚amtliche‘ Daten sind.⁷⁾

7 Berechnungsbeispiel

Im Folgenden wird ein Beispiel für die Berechnung des C_0 für die in **Tabelle 2** gegebene Langzeit-Windrose angegeben.

Bild 5 macht deutlich, dass die trigonometrische Interpolation $W(\eta)$ zu einer sachgerechten Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Windrose $S(\text{Himmelsrichtung})$ führt. **Bild 6** zeigt die dazu gehörende Luftströmungsrose $A(\eta)$.

Bild 7 zeigt schließlich die C_0 -Rosen $C_0(\eta)$, für die hier diskutierten Gewichtsfunktionen. Die Funktion mit dem Wertepaar $\{Q = 7,5 \text{ dB}; \Theta = 22,5^\circ\}$ führt in jeder Richtung zu signifikant größerem C_0 als $\{Q = 5 \text{ dB}; \Theta = 45^\circ\}$. Die Faltung nach Gleichung 6 führt zu einer glatten C_0 -Rose. Die Gewichtsfunktionen prägen nicht jeweils ein signifikant anderes C_0 -Niveau, sondern erreichen auch bei unterschiedlichen Winkeln ihre größten bzw. kleinsten Werte.

Tabelle 2 Windrose und Ergebnis für das C_0 beim Sektormittlenwinkel nach Gleichung 6 für die Wertepaare $\{Q = 7,5 \text{ dB}; \Theta = 22,5^\circ\}$ und $\{Q = 5 \text{ dB}; \Theta = 45^\circ\}$.

Himmelsrichtung		η	S	$C_{0,7,5/22,5}$	$C_{0,5/45}$
textlich	H°	°	30 %°	dB	dB
Nord	0	90	2,60	2,95	1,46
	30	60	3,00	2,48	1,34
	60	30	6,80	2,30	1,42
Ost	90	0	10,60	2,44	1,60
	120	330	6,70	2,94	1,83
	150	300	5,90	3,75	2,11
Süd	180	270	8,60	4,50	2,47
	210	240	9,60	4,82	2,89
	240	210	14,80	4,66	3,10
West	270	180	17,40	4,25	2,91
	300	150	9,40	3,79	2,41
	330	120	4,60	3,37	1,85

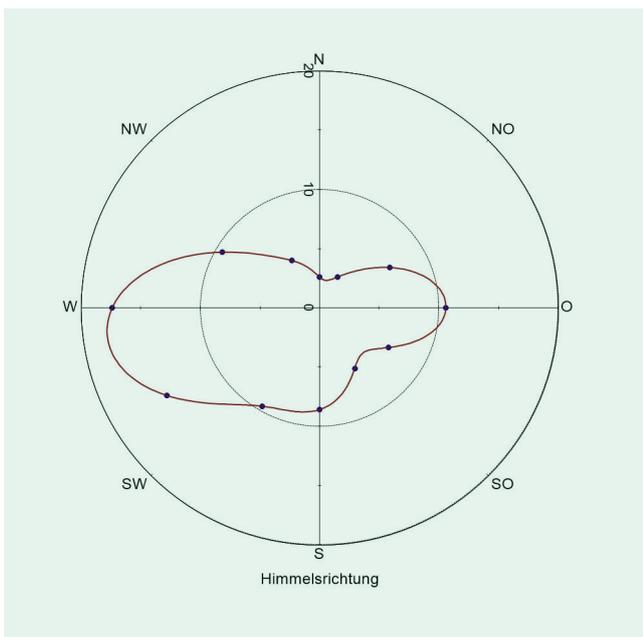


Bild 5 Windrose nach Tabelle 2. Sektorenwerte S als blaue Punkte und $W(\eta)$ als rote Linie. Grafik: Autoren

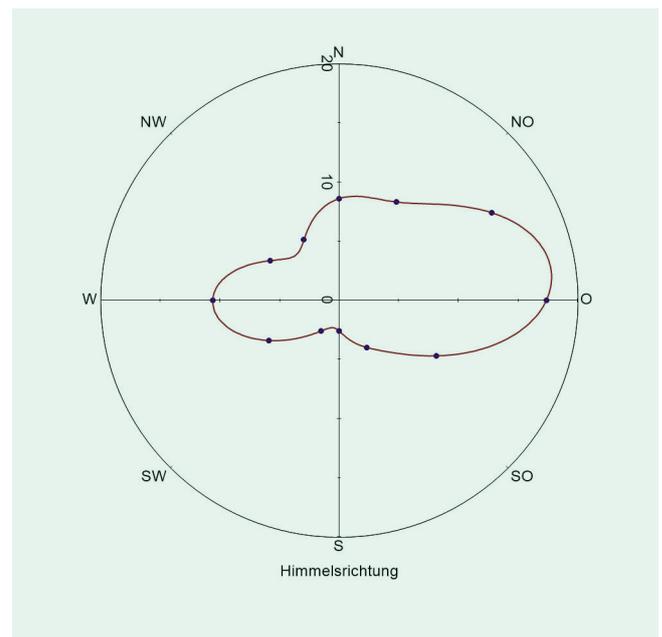


Bild 6 Windrose $A(\eta)$ nach Tabelle 2. Sektorenwerte S als blaue Punkte und $W(\eta)$ als rote Linie. Grafik: Autoren

8 Empfehlungen

Die Länder mögen sich auf ein gemeinsames Verfahren zur Bestimmung des C_0 einigen. Ein solches Verfahren kann beispielsweise als Leitfaden der Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) erarbeitet und herausgegeben werden. Die Praxis zeigt, dass solche Empfehlungen der LAI in vielen vergleichbaren Situationen Klarheit und insbesondere Rechtssicherheit geschaffen haben.

Ein solcher Leitfaden könnte folgende Regelungen enthalten

1. Für den gesamten Einwirkungsbereich einer Quelle (bzw. einer Anlage) gelten stets die Witterungsbedingungen an der Quelle (bzw. Anlage).
2. Als Grundlage zur Berechnung des C_0 wird die Faltung der Windrose nach Gleichung 6 mit einer Gewichtsfunktion nach Gleichung 1 vorgegeben.
3. Die lokalen Behörden kommen der Anmerkung 21 der DIN ISO 9613-2 zur Angabe der Witterungsbedingungen stets nach und werden für jede Beurteilungszeit die Langzeit-Windrose und das Wertepaar $\{Q; \Theta\}$ festlegen.

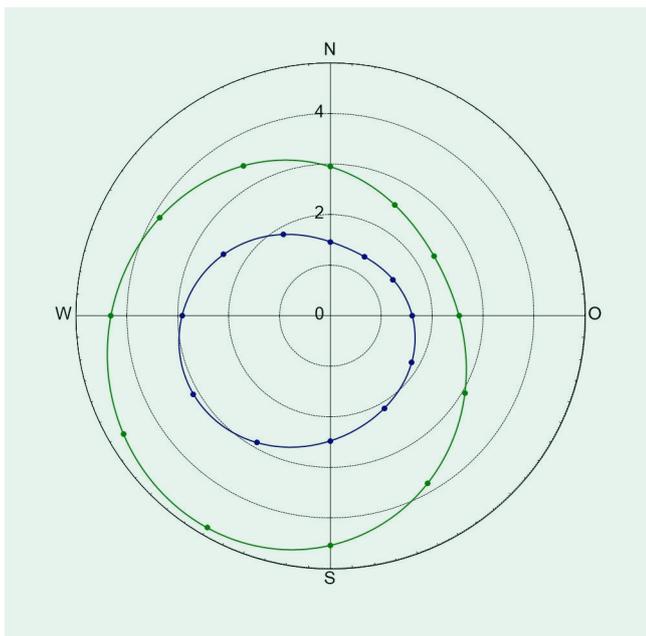


Bild 7 $C_0(\eta)$ nach Gleichung 6 ($Q = 7,5$ dB; $\Theta = 22,5^\circ$) Grün, ($Q = 5$ dB; $\Theta = 45^\circ$) Blau. Sektorenwerte als Punkte und Interpolation als Linie. Grafik: Autoren

4. Die Windrosen sollen mindestens eine Winkelteilung von 45° und höchstens eine Teilung von $22,5^\circ$ aufweisen.
5. Die Kalmen in den Windrosen werden auf alle Richtungen gleichverteilt.
6. Bei der Bestimmung von Zwischenwerte aller Funktionen (Windrose, C_0) wird die trigonometrische Interpolation verwendet.

In einer EXCEL-Datei [10] ist das hier vorgeschlagene Berechnungsverfahren vollständig umgesetzt. (**Bild 8**) ■ X800

Literatur

- [1] DIN ISO 9613-2:1999-10, Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien
- [2] Kurze, U. J.; Schirmmayer, R.: „Meteorologische Korrektur in DIN ISO 9613-2“; Lärmbekämpfung 46(1999)2, S. 45-49
- [3] „Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien: Allgemeine Berechnungsverfahren (ISO 9613:1996) DIN ISO 9613-2“; F.-Chr. Zacharias. Hrsg.: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Weimar. www.thueringen.de/imperia/md/content/tlug/abt1/vreferate/2013/17_2013/grundlagen_schallprognose_iso9613-2.pdf, abgerufen am 14.02.2020
- [4] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) Vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503)
- [5] Hirsch, K.-W.: „Zur Vorausberechnung von Schießgeräuschen mit der Norm DIN ISO 6313 - Eine systematische Methodenkritik“, Lärmbekämpfung 8(2013)3, S. 108-117
- [6] Hirsch, K.-W.: „Meteorologische Korrekturen – Ermittlung auf der Grundlage einer Pegelstatistik“, Fortschritte der Akustik, DAGA 2015, DEGA e. V., Nürnberg
- [7] „TA Lärm 1998 - Empfehlungen des LANUV zu C_{met} “ Hrsg.: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Duisburg, 2012.
- [8] DIN EN ISO 17201-2 „Acoustics - Noise from shooting ranges - Part 2: Estimation of source data – muzzle blast and projectile noise
- [9] Hirsch, K.-W.; Kleinhenrich, C.: „Zum Krümmungsradius in der DIN ISO 9613-2 – Eine Analyse mit dem Schallwetter“, Fortschritte der Akustik, DAGA 2019, DEGA e. V., Rostock
- [10] Cervus Consult: „Taschenrechner zur Bestimmung des c_0 der DIN ISO 9613-2“; portal.kwhirsch.de/index.php/publicdomain/werkzeuge (Download), cmet.cervus.cc (Web-Applikation)

Berechnung des Faktors C_0 nach Kapitel 8 der DIN ISO 9613-2 zur Bestimmung der meteorologischen Korrektur C_{met}

C ₀ -Rechner				
η_0	0 °	Gewichtsfunktion	Q	5 dB
$C_0(\eta_0)$	1,61 dB		Θ	45 °

Windrose					Berechnung von C_0 an den Stützstellen der Windrose					
textlich	j	h	DWD	S	i	η_i	$W(\eta_i)$	$A(\eta_i)$	$G(\varphi)$	$C_0(\eta_i)$
	[1]	*	30 %/°	30 %/°		*	30 %/°	30 %/°	dB	dB
Kalmen										
N	0	umlaufend	1,2		1	0	10,60	17,40	0,00	1,61
	1	0	2,5	2,6	2	30	6,80	14,80	0,04	1,42
	2	30	2,9	3,0	3	60	3,00	9,60	0,33	1,34
	3	60	6,7	6,8	4	90	2,60	8,60	1,46	1,46
O	4	90	10,5	10,6	5	120	4,60	5,90	4,22	1,85
	5	120	6,6	6,7	6	150	9,40	6,70	8,04	2,42
	6	150	5,8	5,9	7	180	17,40	10,60	10,00	2,91
S	7	180	8,5	8,6	8	210	14,80	6,80	8,04	3,11
	8	210	9,5	9,6	9	240	9,60	3,00	4,22	2,90
	9	240	14,7	14,8	10	270	8,60	2,60	1,46	2,48
W	10	270	17,3	17,4	11	300	5,90	4,60	0,33	2,12
	11	300	9,5	9,4	12	330	6,70	9,40	0,04	1,85
	12	330	4,5	4,6	Summe		100,0	100,0		
		Summe [%]	100,0	100,0						

Sinus- und Cosinus Koeffizienten der trigonometrische Interpolation						
	DWD	S	$W(\eta)$	$A(\eta)$	$G(\varphi)$	$C_0(\eta)$
	30 %/°	30 %/°	30 %/°	30 %/°	dB	dB
a_0	8,33333333	8,33333333	8,33333333	3,18406081	2,12251631	
c_1	-3,11941197	-2,58193345	3,11941197	-4,62425118	-0,65106477	
a_1	-2,58193345	2,58193345	0,00000000	0,00000000	-0,52311399	
c_2	-4,01666667	-4,01666667	4,01666667	1,76738912	0,14624879	
a_2	1,09696551	1,09696551	0,00000000	0,00000000	0,07726977	
c_3	-0,11666667	-0,11666667	-0,25000000	-0,37089530	-0,00267529	
a_3	0,25000000	0,25000000	0,11666667	-0,11666667	0,00000000	-0,01533763
c_4	1,46666667	1,46666667	1,46666667	0,04817224	-0,00750345	
a_4	-0,49074773	-0,49074773	0,49074773	0,00000000	-0,00073515	
c_5	-0,30139989	-0,30139989	-0,03058803	0,03058803	-0,00485352	0,00053572
a_5	-0,03058803	-0,03058803	-0,30139989	0,30139989	0,00000000	0,00029894
c_6	-0,18333333	-0,18333333	0,18333333	0,00037783	-0,00005253	

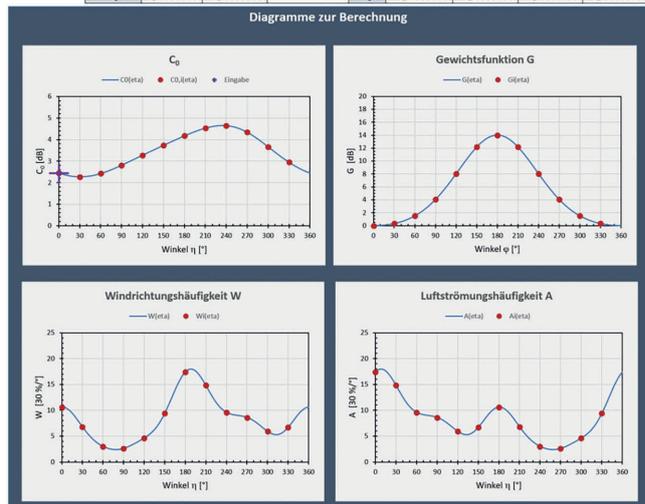


Bild 8 Umsetzung des Bestimmungsverfahrens für das C_0 in einer EXCEL-Tabelle [10]. Grafik: Autoren



Dr.-Ing. Karl-Wilhelm Hirsch
 Würselen
 Cervus Consult GmbH
 Foto: Autor



Dr.-Ing. Berthold M. Vogelsang
 Hannover
 Foto: Autor