

# Grundlagen und Anwendungen des Schallwetters

Karl-Wilhelm Hirsch, Willich

**Zusammenfassung** Wettervorhersagen werden aus komplexen Wettermodellen abgeleitet, die die Vorgänge in der Atmosphäre abbilden und unter ständiger Korrektur durch Messwerte aus einem dichten Messnetz zuverlässig vorausberechnen. Wetterberichte kondensieren diese Ergebnisse in einfache Aussagen, die viele Anwendungen im täglichen Leben finden. Das Schallwetter verbindet die Wettervorhersage mit der Schallausbreitungsrechnung. Es nutzt dabei die meteorologischen Wettermodelle, um aus sog. Profilprognosen für die Wind- und Temperaturprofile mit einem qualifizierten Schallausbreitungsmodell die Geräuschimmissionen vorherzusagen. Die Vorhersage des Schallwetters erfolgt mit einem Vorlauf von 48 Stunden auf einer stündlichen Basis. Verständliche Darstellungsformen für dieses Schallwetter werden intuitiv entwickelt, die auch im Rahmen eines Wetterberichts das Schallwetter anbieten. Aus den Zeitreihen des Schallwetters lassen sich weitgehende Aussagen über Pegelverteilungen ableiten, die neue Möglichkeiten und Anwendungen des Schallwetters in vielen Bereichen der Lärmakustik anbieten.

## Sound weather – methods and applications

**Summary** Weather forecasts are derived from highly sophisticated weather models reliably describing the condition of the atmosphere and its development under continuous correction through measured values from a dense monitoring network. Weather reports condense these results in simple statements that have many applications in daily life. The so-called sound weather combines the weather forecast with the sound propagation calculation. It takes advantage of the meteorological weather models to provide profile forecasts for wind and temperature and use these profiles with qualified sound propagation models to predict the favorableness of the noise propagation. The sound weather forecast is done with a lead time of 48 hours on an hourly basis. From long-term time series of the sound weather, various information about level distributions can be derived providing new features and applications of the sound weather in many areas of outdoor acoustics and noise assessment.

## Einführung

Wetterberichte zählen zu den am häufigsten gehörten Nachrichtensendungen. Man schaut auf Satellitenbilder, Isobaren und Strömungsfilm und erfährt etwas über das Wetter von morgen und die Entwicklung für die nächsten Tage. Ein Wetterbericht ist eine offensichtlich gelungene und attraktive Mischung zwischen Unterhaltung und Information.

Themen aus der „zweiten Reihe“ kommen in der Nachrichtensendung zum Zug, wenn sie Besonderheiten zeigen: Welche Pollen fliegen wo wie stark, wie hoch sind die Ozonwerte, wie hoch liegt der Schnee, wie viel wird es regnen, wie lange wird die Sonne scheinen, wie warm ist das Wasser in den Seen und im Meer. Diese Fachthemen sind in professioneller Auflösung kostenpflichtige Angebote der Wetterdienste, die von verschiedenen Kunden mit unterschiedlichen Anwendungen und für unterschiedliche Zwecke genutzt werden.

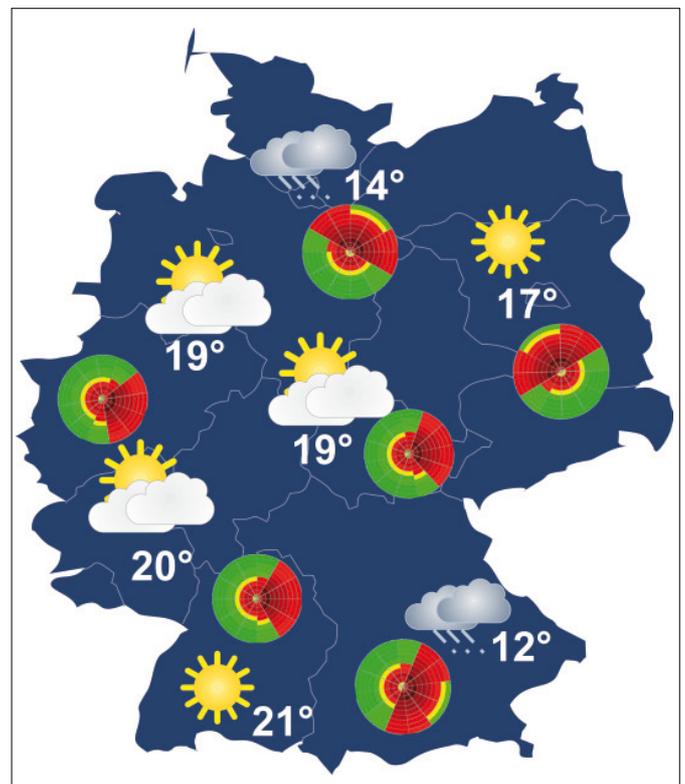
Wie laut es morgen wird, gehört noch nicht zum Standardangebot der Wetterdienste. Eine solche Vorhersage ist das sog. „Schall-

wetter“ – eine Vorausberechnung der Eigenschaften der Schallausbreitungsbedingungen auf der Basis vorausgesagter atmosphärischer Bedingungen.

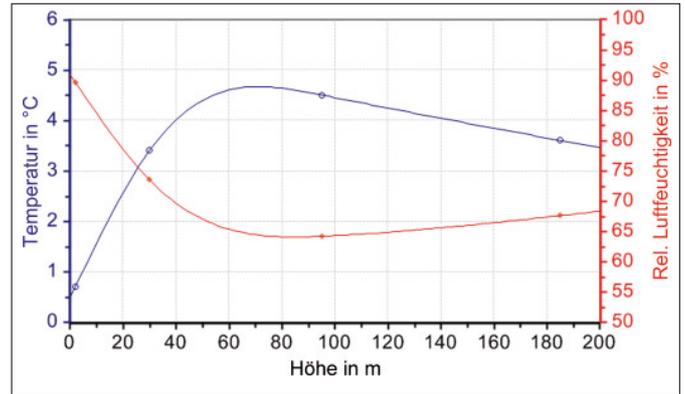
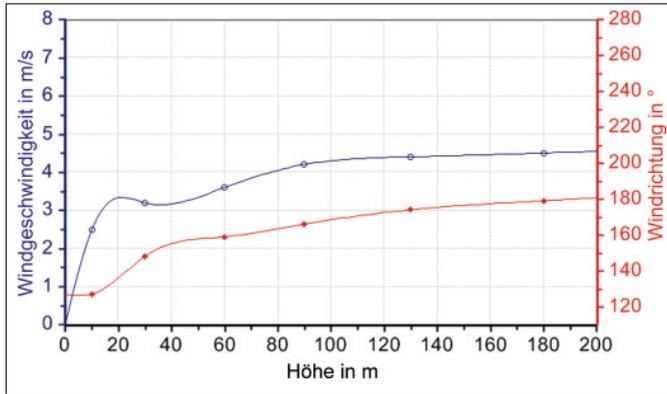
Die Idee des Schallwetters verbindet die Aspekte eines anschaulichen Wetterberichts mit den Ergebnissen einer anspruchsvollen Schallausbreitungsrechnung in einem bewegten Medium. Entsprechend groß ist die Spanne der Anwendungen des Schallwetters: Sie reicht von der kompakten Darstellung einer sog. Lärmrose, z. B. in **Bild 1**, bis hin zu komplexen tageszeitspezifischen Langzeit-Pegelstatistiken. Das Schallwetter kann Anwender finden aus dem Bereich des Lärm- und Beschwerdemanagements, der Lärmforschung, bei Immissionsmessungen und auch in Genehmigungsverfahren. Und überall dort, wo es wichtig sein kann zu wissen, ob in welcher Richtung morgen eine günstige oder ungünstige Schallausbreitung vorliegen wird oder um wie viel Uhr eine Inversionswetterlage aufbricht und nicht mehr zu Überreichweiten führt.

## Voraussetzungen

Prognosen des Schallwetters sind nicht trivial, wenn sie winkelabhängig bis zu einer Entfernung von 5 000 m hinreichend aussagekräftig sein sollen. Nur bei geringen Entfernungen lassen sich die Schallausbreitungsbedingungen aus Beobachtungen des



**Bild 1** Wetterkarte mit Lärmrosen.



**Bild 2** Darstellung einer stundenspezifischen Profilprognose gegenüber der Höhe; links: Windgeschwindigkeit blau und Windrichtung rot, rechts: Temperatur blau, relative Luftfeuchtigkeit rot

Bodenwetters abschätzen. Bei größeren Entfernungen prägen immer mehr die Profile der Windstärke, der Windrichtung, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit die Schallausbreitung. Das Schallwetter ist also richtungs- und entfernungsabhängig. Für die Berechnung des Schallwetters müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Vorhersagen für das Wind-, Temperatur und Feuchteprofile müssen verfügbar sein.
2. Es muss ein Schallausbreitungsmodell verwendet werden, das den Einfluss der Profile bei der Brechung und bei der Luftabsorption berücksichtigen kann.

Im Folgenden werden diese beiden Voraussetzungen diskutiert und Lösungen dafür beschrieben. Danach werden das Schallwetter und seine Darstellung als Lärmrosen vorgestellt und an Beispielen diskutiert. Bereits verfügbare statistische Analysen von Pegelverteilungen und abgeleitete Aussagen über das  $C_{met}$  der Norm DIN ISO 9613-2 [1] ergänzen die Beispiele. Eine Diskussion der Anwendung des Schallwetters beschließt den Beitrag.

## Profilprognosen

### Schallausbreitung im Freien

Die Schallausbreitung im Freien ist die Schallausbreitung durch ein isotropes, in der Dichte exponentiell abnehmend geschichtetes<sup>1)</sup> bewegtes Medium, das einseitig unten durch eine in ihrer lokalen Höhe veränderliche Fläche mit einer inhomogenen Impedanzverteilung begrenzt wird. Die Bewegung des Mediums kann durch ein Vektorfeld (Windfeld) angegeben werden, dessen lokale Divergenz den horizontalen und vertikalen Wind beschreibt und dessen Rotation die Turbulenz kennzeichnet. Temperatur und Feuchte sind dagegen skalare Felder. Der Erdboden als untere Mediumgrenze wird seine Eigenschaften durch Regen, Schnee und Temperatur ändern.

Für die Höhenabhängigkeiten der Eigenschaften lassen sich Tendenzen angeben. Der horizontale Wind nimmt mit der

Höhe unter Drehung zu, der vertikale ab; die Temperatur nimmt ab, ebenfalls die Feuchte. Die Phänomene und ihr Zusammenhang mit dem Zustand der Atmosphäre und ihren Änderungen sind grundsätzlich bekannt. Lokale Änderungen der Bewegung genauso wie Temperaturänderungen führen zur Brechung; Luftfeuchtigkeit und Temperatur bestimmen die lokale Luftabsorption. Niederschläge bzw. die Auftrocknung ändern die Impedanz des Bodens.

Diese Darstellung macht etwas deutlich: Es wird nicht gelingen, alle Eigenschaften der Atmosphäre und ihre zeitliche Änderung, die die Schallausbreitung beeinflussen, mit solch einer geringen Unsicherheit zu prognostizieren, dass sich ein Schallausbreitungsmodell mit entsprechendem Potenzial lohnen würde – unterstellt, dies wäre physikalisch möglich.

Daraus im Lärmschutz aber die Konsequenz zu ziehen, bei der Schallausbreitungsrechnung völlig auf Wetterprognosen zu verzichten, sich ausschließlich auf eine Prognose bei schallausbreitungsgünstiger Situation zurückzuziehen und als weitreichendes Zugeständnis über einen griffweise gewählten Parameter auf die „neutrale“ Wettersituationen umzurechnen, ist eine deutliche Unterschätzung der meteorologischen und akustischen Möglichkeiten.

### Meteorologische Herausforderung

Zunächst ist es eine meteorologische Herausforderung, die Möglichkeiten moderner Wettermodelle daraufhin zu prüfen, welche akustisch relevanten Parameter mit welcher örtlichen und zeitlichen Auflösung und mit welchem Vorlauf prognostiziert werden können. Dabei liegt der Fokus auf den in der Meteorologie als „bodennah“ zu bezeichnenden Wind- und Temperaturfeldern bis 200 m Höhe.

Die MeteoGroup Deutschland<sup>2)</sup> hat sich dieser Herausforderung gestellt und ein speziell auf das Schallwetter ausgerichtetes Produkt, die sog. Profilprognose, entwickelt. Die als Datenquelle für die Profilprognose infrage kommenden Wettermodelle sind auf Großrechnern implementiert und rechnen kontinuierlich das Wettergeschehen, ständig korrigiert durch Messwerte aus dem dichten Netz der Messstationen. Diese Modelle sind grundsätzlich zellenorientiert in 3D; die Prognoseparameter sind innerhalb dieser Zelle konstant. Die Herausforderung einer Profilprognose besteht darin, aus diesen Zellenwerten eine sachgerecht dichte Wertefolge mit ansteigender Höhe jedes Parameters in „Bodennähe“ abzuleiten. In diesen Wettermodellen stehen der horizontale Wind (Geschwindigkeit und Richtung), die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit zur Verfügung.

<sup>1)</sup> Der Ausdruck „geschichtet“ im Zusammenhang mit der Atmosphäre wird immer dann verwendet, wenn die Eigenschaft keine Lageabhängigkeit aufweist und nur höhenabhängig ist.

<sup>2)</sup> Die MeteoGroup Deutschland ist nach ISO 9001 zertifiziert und Mitglied im Qualitätskreis Wetterberatung der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e. V. (DMG). Bekannte Produkte: Wetter der ARD, Unwetterzentrale.de, Wetter24.de WeatherPro App. Kontaktdaten zur MeteoGroup GmbH Deutschland sind in den Verweisen [2] und [3] enthalten.

Modellgrundlage des Windprofils ist das UKMO MeteoGroup Deutschland Modell, exklusiv betrieben durch UK-MetOffice (www.metoffice.gov.uk) für die MeteoGroup. Das Wettermodell besitzt eine horizontale Auflösung von 4 km x 4 km. Modellgrundlage des Temperatur- und Feuchteprofils ist das „Weather Research and Forecasting Model“ (WRF-Modell), betrieben durch die Meteo-Group selbst. Der Quellcode ist frei verfügbar (www.wrf-model.org). Das Wettermodell hat eine horizontale Auflösung von 10 km x 10 km und 30 vertikale Höhenstufen. Die Profilprognosen werden mit der Software ARWPost ermittelt und für den geforderten Standort stundenspezifisch interpoliert.

### Zur Unsicherheit der Profilprognosen

Die Unsicherheit von Wetterberichten ist qualitativ Allgemein- gut und im Volksmund sprichwörtlich. Für Profilprognosen wäre die Unsicherheit allerdings quantifizierbar, da es sich um konkrete Zahlenwerte handelt. Zurzeit ist dies aber eine Herausforderung, der sich der Autor im Rahmen dieses Beitrags nicht stellen kann. Die Profilprognose ist ein neues Produkt und die Profile nach- zumessen zweifellos eine noch anstehende Aufgabe. Dabei ist Fol- gendes zu bedenken: Die Profilprognosen werden aus Zellenwer- ten abgeleitet, sie sind also repräsentativ für die gesamte Zelle und zudem Stundenmittelwerte. Insbesondere die noch messtech- nisch aufwandsarm erreichbaren bodennahen Werte werden durch lokale Einflüsse der Vegetation, der Bebauung usw. beein- flusst und sind nicht unbedingt aussagekräftig für die allgemeine Profilsicherheit. Darüber hinaus ist die Schallausbreitung von den Änderungen der Werte, ihren Gradienten, abhängig. Un- sicherheiten in den Prognosewerten wirken sich also nur oder be- sonders über das Differential des Profils aus (ausgenommen Luft- feuchtigkeit).

Es bleibt aber festzustellen, dass die Profile aus in sich stringent und physikalisch widerspruchsfrei formulierten Wettermodellen nach dem Stand der Technik der Meteorologie stammen. Im Rah- men der Schallausbreitungsrechnung und damit des Schallwetters ist hinzunehmen, dass nach diesem Stand der Technik eine valide detailliertere Beschreibung der akustisch relevanten Parameter der Atmosphäre zurzeit nicht zur Verfügung steht.

Es wurden oben – möglicherweise für den Leser und sicher aber für den Autor selbst heilsam einschüchternd – die Phänomene, Einflüsse und Randbedingungen der Schallausbreitung im Freien beschrieben. Diese Beschreibung ist deshalb wichtig, um den Fortschritt durch das Vorliegen der Profilprognosen und die daraus erwachsenden Möglichkeiten einordnen zu können. Es liegt auf der Hand, dass aus den ortsspezifischen (Interpolation aus Zellenwerten) und stundenspezifischen Profilprognosen auch „nur“ orts- und stundenspezifische Schallwetterprognosen in der Zelle (in alle Richtungen) erstellt werden können. Es ist aber auch klar, dass alle anderen Phänomene und Einflüsse über Annahmen und Mittelungen in die Schallprognose einbezogen werden müssen.

## Schallwetterprognose

### Berechnungsgrundlagen

#### Schallausbreitungsmodell

Ein wesentlicher Baustein der Schallwetterprognose ist das ver- wendete Schallausbreitungsmodell. Die grundsätzlichen Anforde- rungen an dieses Modell folgen aus der Profilprognose selbst und aus der Aufgabe, für die Nachbarschaft einer Schallquelle oder eines Empfängers flächig also in alle Himmelsrichtungen und bis

zu typischen Abständen der Zellauflösung der Profilprognose – die Schallausbreitung zu prognostizieren.

Technische Modelle wie beispielsweise das Modell der DIN ISO 9613-2, die als Zielgröße einen Langzeitmittelungspegel prognostizieren, fallen sofort heraus. Für das Schallwetter eignen sich aber grundsätzlich das Modell HARMONOISE [4] oder das Mo- dell SchaMa [5], die beide auf konkrete Wettersituationen einge- stellt werden können<sup>3)</sup>.

Grundsätzlich können auch sog. physikalische Modelle (Schall- wellenmodelle im Gegensatz zu Schallstrahlenmodelle<sup>4)</sup>) einge- setzt werden, die sich dadurch auszeichnen, dass sie die durch das Wetter bestimmten Schallausbreitungsphänomene im Detail ab- bilden können. Der entscheidende Grund für die Verwendung eines Strahlenmodells für das Schallwetter ist die Erwartung, dass ein solches Modell relativ „antwortschnell“ Prognosen berechnen kann. Dies ist entscheidend, um die hohe Anzahl von Punkt-zu- Punkt-Rechnungen, die bei der Berechnung des Schallwetters bis zu Entfernungen von 5 000 m anfallen, in angemessener Zeit durchführen zu können.

Das Schallwetter wird hier auf der Basis eines „Konstant-Radius- Modells“ vorgestellt. Bei diesem „Kreisstrahlenmodell“ bestimmt eine Schar von Kreisbögen, die jeweils Quelle und Empfänger geo- metrisch mit gegebenem Krümmungsradius verbinden, die Punkt- zu-Punkt-Schallausbreitung. Die Anzahl der geometrischen Lö- sungen und damit die Anzahl der Kreisstrahlen nehmen mit größer werdendem Abstand zu. Mit zunehmendem Abstand er- reichen die Strahlen auch größere Höhen. Deshalb gewinnen die Eigenschaften der Atmosphäre in größeren Höhen an Einfluss, während der Einfluss von bodennahen Strahlen schwindet, da diese eine zunehmende Anzahl von Bodenreflexionen erfahren und dadurch gedämpft werden [6]. Der Krümmungsradius der wesentlichen Strahlen ist also abhängig vom Abstand zwischen Quelle und Empfänger (**Bild 3**).

Der Krümmungsradius  $R$  für den Abstand  $d$  der Schallausbrei- tungssituation der Lärmrose wird durch die lokalen Gradienten der interpolierten Profile bei einer Höhe  $h_p$  nach Gl. (1) bestimmt.

$$R = \frac{c(h_p)}{\frac{\text{const.}}{\sqrt{T(h_p)}} \frac{\partial T}{\partial h} \Big|_{h_p} + \frac{\partial u}{\partial h} \Big|_{h_p}} \quad \text{Gl. 1}$$

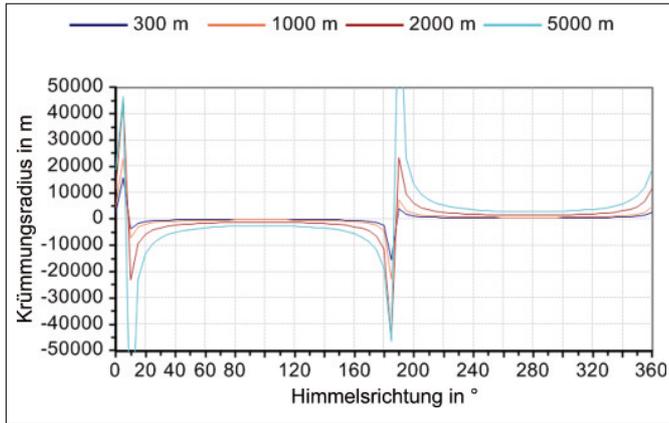
mit

$$c(h) = 20,05 \sqrt{T(h)} \frac{m}{s \sqrt{K}}$$

$$\text{const.} = 10 \frac{m}{s \sqrt{K}}$$

<sup>3)</sup> Vergleiche zwischen der ISO 9613-2 oder ähnlichen Modellen mit z. B. HARMONOISE ignorieren häufig den Unterschied zwischen den Zielgrößen der Modelle. HARMONOISE lässt sich nicht auf „schallausbreitungsgünstig“ und „Lang- zeitpegel“ stellen, und schon gar nicht dadurch, dass man unterstellt, ein Krümmungs- radius von 5 000 m sei ein Indiz für „schallausbreitungsgünstig“. Die Qualität eines Modells zeichnet sich dadurch aus, dass es neben der Pegelrichtigkeit auch die Varianz der Pegel für verschiedene Ausbreitungsrichtungen sachgerecht vorhersagt. Dies ist für HARMONOISE und SchaMa der Fall.

<sup>4)</sup> Strahlenmodelle stellen grundsätzlich „Hochfrequenzlösungen“ dar; Vergleichs- untersuchungen belegen, dass „Strahlenlösungen“ unterhalb von ca. 50 Hz fragwür- dige Ergebnisse liefern und ab ca. 50 Hz beherrschbare, ab ca. 100 Hz aber sicher nicht mehr signifikante Unsicherheiten im Vergleich zu „Wellenlösungen“ aufweisen.



**Bild 3** Krümmungsradius in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung für verschiedene Abstände.

Dabei ist  $c$  die Schallgeschwindigkeit,  $T$  die absolute Temperatur und  $u$  die horizontale Windgeschwindigkeitskomponente in Schallausbreitungsrichtung.

Gl. (2) definiert die Höhe  $h_p$  in Abhängigkeit vom Abstand. Dies ist ein empirischer Ansatz. Er berücksichtigt, dass die mittlere Höhe eines Schallstrahls über dem Boden zunimmt, wenn der Abstand zwischen Quelle und Empfänger zunimmt. Es ergibt sich  $h_p = 10$  m für einen Abstand von 500 m. Die Bestimmung des Krümmungsradius ist dann mit dem Ansatz in der DIN ISO 1996 [7] vergleichbar.

$$h_p = \frac{100 \text{ m}}{(d/5000 \text{ m})} \quad \text{Gl. 2}$$

Kreisstrahlenmodelle haben noch eine entscheidende Schwäche: Sie lassen geometrisch zu, dass Schallstrahlen Höhen erreichen, in denen der Ansatz eines konstanten Krümmungsradius falsche Ergebnisse liefert. Es ist eine grundsätzliche Eigenschaft der Atmosphäre, dass der Windgradient mit zunehmender Höhe an Einfluss verliert, der Temperaturgradient aber stets erhalten bleibt:

**Tabelle 1** Werte für den Krümmungsradius  $R_j$ .

$ j $	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
IRI	m	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30	40	50	70	90	$\infty$

**Tabelle 2** Kenngrößen der Pegelverteilung.

$L_{p,Z,P01}$	$L_{p,Z,P05}$	$L_{p,Z,P10}$	$L_{p,Z,P20}$	$L_{p,Z,P50}$	$L_{p,Z,P70}$	$L_{p,Z,P90}$	$L_{p,Z,P95}$	$L_{p,Z,P99}$	$L_{p,Z,eq}$
---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--------------

Eingangsgröße	Median	Untere Grenze	Obere Grenze
Quellgeräusch	Rosa Terzband-Rauschen 100 Hz bis 8 kHz, 1 W	Keine Variation	
Quellhöhe	4 m	3,8 m	4,2 m
Empfängerhöhe	4 m	3,8 m	4,2 m
Abstand	$d_i$ (Gl. (3))	$0,95 d_i$	$1,05 d_i$
Boden	400 kPa s/m <sup>2</sup>	200 kPa s/m <sup>2</sup>	600 kPa s/m <sup>2</sup>
Relative Luftfeuchtigkeit	70 %	50 %	90 %
Krümmungsradius	$R_j$ (Tabelle 1)	$R_{j-1}$	$R_{j+1}$

**Tabelle 3** Klassierung der Datenbank der Schallausbreitungsrechnung.

Die Temperatur nimmt in den in Betracht zu ziehenden Höhen immer weiter ab. Deshalb werden Strahlen, die höhere Höhen erreichen, grundsätzlich nach oben gebrochen und erreichen den Boden nicht mehr<sup>5)</sup>.

Bei dem für das Schallwetter verwendete Modell ist eine sog. Umkehrschicht bei einer Höhe von 100 m eingeführt: Überschreitet der Umkehrpunkt der Kreisstrahlen diese Höhe, werden sie bei der Schallausbreitungsrechnung vernachlässigt.

In [9] wird das Kreisstrahlenmodell mit den Strahlenverläufen von einem Ray-Tracing-Modell in realer Atmosphäre unter Verwendung derselben Profilprognosen wie hier verglichen. Dort werden auch die Auswirkungen einer Anpassung der Profilprognosen an die logarithmischen Profile von HARMONOISE diskutiert.

Bei der Bewertung des Schallausbreitungsmodells für das hier vorgestellte Schallwetter ist stets zu beachten, dass das Schallwetter Differenzpegel verwendet und deshalb Modellschwächen in der nullten Näherung keine signifikante Rolle spielen können.

### Mittelungsverfahren für die Vorhersage des Schallwetters

Das Schallwetter sollte eine mittlere abstands- und winkelabhängige Vorhersage unter den Bedingungen der Profilprognosen ermitteln. Es ist also nicht sachgerecht, Stundenprognosen aus einem einzigen Satz vorgegebener Modell-Eingangsparametern zu berechnen. Es sind Mittelungen erforderlich, um eine gewisse Allgemeingültigkeit des Schallwetters zu erreichen.

Als Grundlage dieser Mittelungen eignet sich das im Entwurf der VDI 4101 angegebene Verfahren der Klassierung der Eingangsgrößen. Aus der Variation der Eingangsgrößen innerhalb ihrer Klassen bzw. Unsicherheiten, folgt dann eine Pegelverteilung aus der die gewünschte Kenngröße als Mittelungspegel gewählt wird (vgl. [10]). In Anlehnung daran wird bei dem weiter unten vorgestellten Schallwetter bei der Mittelung wie folgt verfahren: Es wird eine Datenbank angelegt, in der für die Krümmungsradien  $R_j$  nach **Tabelle 1** ( $-20 \leq j \leq 20$  mit entsprechender Vorzeichenumkehr des

<sup>5)</sup>Nach VDI 3782 Blatt 1 [8] ist oberhalb einer Höhe von 200 m eine konstante Windgeschwindigkeit anzunehmen.

Krümmungsradius:  $R_j = -R_j$ ) und für die Abstände  $d_i$  nach Gl. (3) die Kenngrößen nach **Tabelle 2** abgelegt werden, die sich für die in **Tabelle 3** angegebenen Variationsbereiche von Pegelverteilungen der Schallausbreitungssituation  $ij$  ergeben. Die Pegelverteilung entsteht durch 1000-fache Variation der Eingangsgrößen nach Tabelle 3.

$$d_i = i \cdot 100 \text{ m} \quad 1 \leq i \leq 50 \quad (3)$$

Bei den Lärmrosen wird auf den  $L_{p,z,eq}$  zurückgegriffen. Bei der Bildung des Schallwetters wird der benötigte Wert durch Interpolation bzw. gewichtete Mittelung aus den in der Datenbank abgelegten Werten für  $R$  und  $d$  gebildet.

Die Angabe absoluter Pegel ist nur in Sonderfällen für die Betrachtung spezifischer Quellen sinnvoll. Aussagekräftig sind relative Angaben: Die Angabe also, um wie viel es lauter oder leiser im Vergleich zu einem Bezugswetter ist. Als Bezugswetter wird hier in jedem Abstand der Wert der Klasse  $i = 0$ , also die Ausbreitung bei unendlich großem Krümmungsradius betrachtet. **Bild 4** zeigt einen typischen Zusammenhang zwischen dem Differenzpegel und dem Abstand von der Quelle.

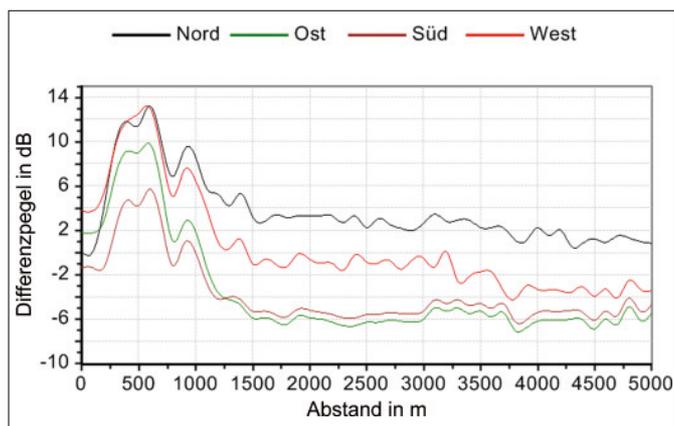
### Spezifisches Schallwetter

Aus der Vorstellung der Berechnungsgrundlagen wird deutlich, dass das Schallwetter von Randbedingungen abhängt, die bei einer spezifischen Anwendung spezifisch eingestellt werden sollten. Das oben gewählte breitbandige rosa Rauschen mit Z-bewerteten Kenngrößen bestimmt die Schallausbreitungsbedingungen in Verbindung mit Quell- und Empfängerhöhe streng genommen nur für diese Bedingungen. Das so bestimmte Schallwetter ist nicht repräsentativ beispielsweise für die i. d. R. A-bewerteten Verkehrsgerausche, weil es den Einfluss tiefer Frequenzen zu hoch bewertet. Es ist auch nicht repräsentativ für höhere (Windkraftanlagen) oder bodennahe Quellen, weil dann die Bodenreflexion einen anderen Einfluss auf den Immissionspegel hat. Bei der Interpretation der weiter unten diskutierten Beispiele ist dies besonders im Nahbereich zu berücksichtigen. Durch Anpassung der Randbedingungen ist es natürlich möglich, das Schallwetter für andere Quellsignale zugehörige typische Quellhöhen anzupassen.

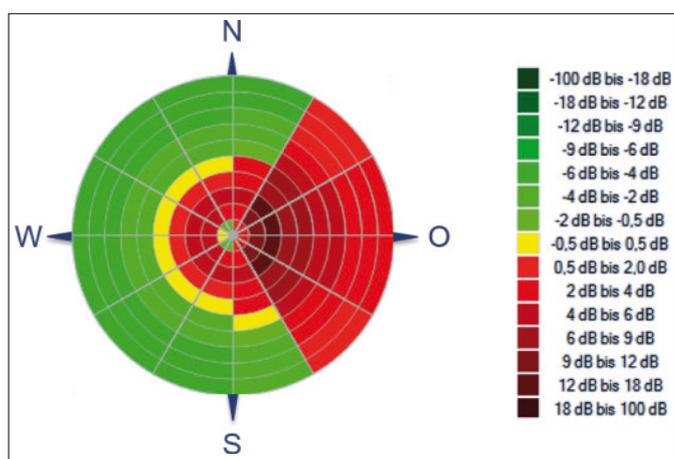
### Darstellung der Schallwetters – Lärmrosen

Die Erfahrung lehrt, dass die akzeptierte Darbietung verbraucherbezogener Informationen eine gewisse „Einfachheit“ mit intuitiver „Selbsterklärung“ voraussetzt. Je nach Adressat mag bereits die Verwendung weniger Farbmuster ausreichen, um z. B. den relativen Schallleistungspegel von Maschinen in ihrer Gerätegruppe zu kennzeichnen. In diesem Sinne sind auch Umgebungslärmkarten eher plakative Darstellungen von Lärmimmissionen. Für das Schallwetter eignet sich die Darstellung der Ausbreitungprognose durch eine „Lärmrose“ – in Anlehnung an die Darstellung der Windverteilung durch eine Stärkewindrose: Lärmrosen geben in einem Polardiagramm die für ihren Gültigkeitszeitraum zu erwartende relative Lärmbelastung (eigentlich Geräuschbelastung) winkel- und abstandsabhängig an. Dabei können quell- (mit der Schallquelle im Mittelpunkt des Diagramms) und empfängerbezogene (mit einem Immissionsort im Mittelpunkt) Lärmrosen unterschieden werden. Letztere eignet sich besonders dann, wenn mehrere Schallquellen auf einen Immissionsort einwirken. Im Folgenden werden nur quellbezogene Lärmrosen betrachtet.

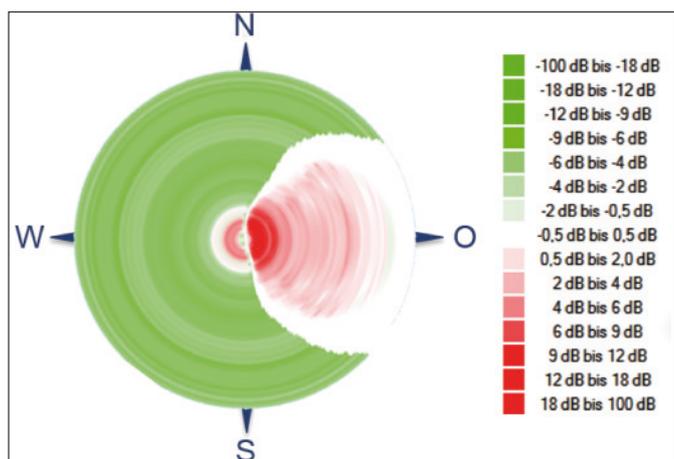
Eine sachgerechte Lärmrose für diese Zwecke reicht bis zu einem Abstand von 2 000 m mit einer Abstandsklassierung von 200 m und einer Winkelklassierung von 30°. Die Spannweite der Prog-



**Bild 4** Differenzpegel in Abhängigkeit vom Abstand von der Quelle für vier Himmelsrichtungen.

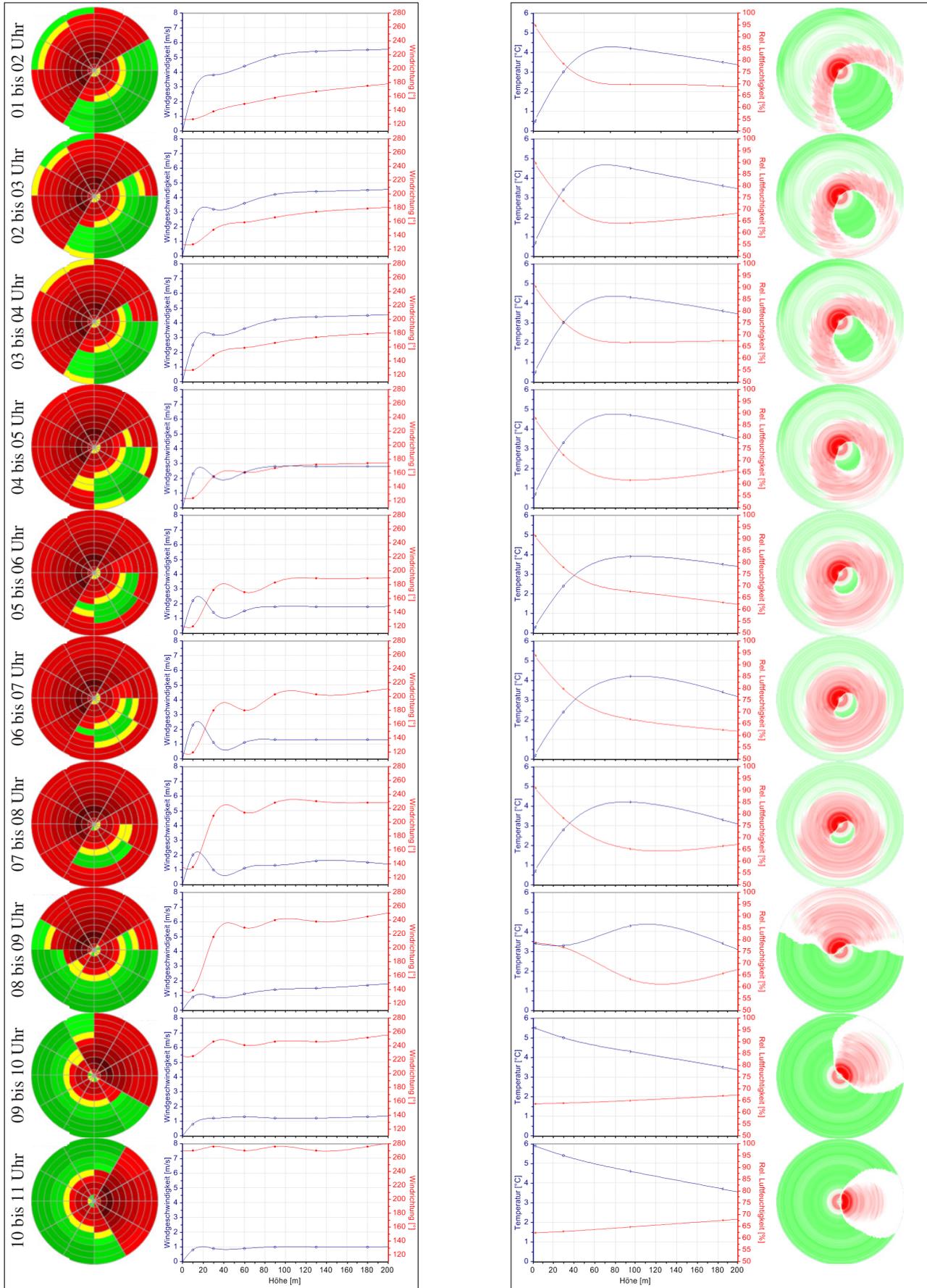


**Bild 5** Lärmrose mit einer Abstandsklassierung von 200 bis 2 000 m, einer Winkelklassierung von 30° und einer Pegelklassierung, wie rechts dargestellt.

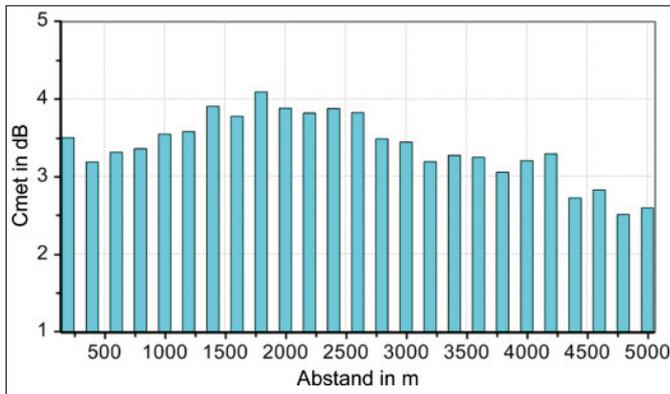


**Bild 6** Lärmrose mit einer Abstandsklassierung von 50 bis 5 000 m, einer Winkelklassierung von 1° und einer Pegelklassierung, wie rechts dargestellt.

nosepegeldifferenz ist mit - 20 dB bis + 20 dB zu erwarten. Entsprechend wird eine Farbskala zugeordnet: die positiven Differenzen also das „Lauter-Sein“ im Vergleich zur neutralen Situation – werden durch die Tiefe des Rot, die negativen Differenzen, das „Leiser-



**Bild 7** Schallwetter über 10 Stunden, linke Spalte Lärmrosen nach Bild 5, rechts nach Bild 6, in der Mitte die zugehörige Profilprognose; jede Bildzeile entspricht einer Stunde von 1 bis 10 Uhr.

Bild 8 C<sub>met</sub> nach Süden.

sein“, durch die Tiefe des Grün gekennzeichnet. Die gelbe Farbe weist auf nicht nennenswerte Differenzpegel hin. **Bild 5** zeigt eine solche Lärmrose. Diese Lärmrosen werden auch in Bild 1 verwendet, um plakativ die zu erwartende Schallausbreitung im Rahmen einer Wetterkarte anzuzeigen.

**Bild 6** hingegen zeigt eine hochaufgelöste Lärmrose bis zu einem Abstand von 5 000 m. Im Vergleich zu der Lärmrose mit wenigen Klassen ist eine tiefer gehende Analyse möglich. Die Diskussion wird das verdeutlichen.

### Interpretation von Lärmrosen

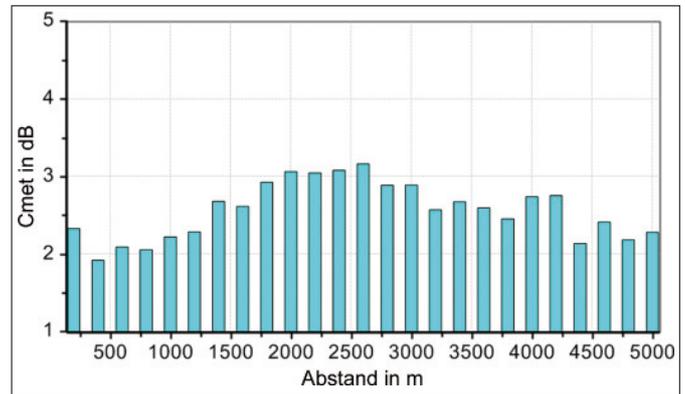
**Bild 7** zeigt exemplarisch die Lärmrosen und die Profilprognosen für eine reale Situation in einem Ort im Westerwald für den 4. März 2014 in der Zeit von 1 Uhr nachts bis 11 Uhr morgens zeilenweise von oben nach unten. In der Mitte jeder Stundenzeile werden die Profilprognosen für den Wind links und Temperatur und Luftfeuchtigkeit rechts wie in Bild 2 dargestellt. Die Profilprognosen werden links durch die klassierte Lärmrose bis 2 000 m und rechts durch die feiner aufgelöste Lärmrose bis 5 000 m eingrahmt. Das in Bild 7 dargestellte Beispiel eignet sich, um die Darstellung des Schallwetters durch Lärmrosen zu erläutern.

Zwischen 1 und 2 Uhr nachts herrscht eine bodennahe Inversion bis in ca. 50 m Höhe. Sie macht sich im Schallwetter aber zu diesem Zeitpunkt nicht dominant bemerkbar, weil noch der Wind das Geschehen zumindest in den Abständen bis 2 km bestimmt. Allerdings lässt sich aus der Lärmrose bis 5 km erkennen, dass für große Entfernungen die Inversion nicht hoch genug reicht, um die Schallausbreitung auch bei 4 bis 5 km zu bestimmen. Dort bricht die nicht invertierte Temperaturschichtung in Verbindung mit einem verschwindenden Windgradienten die Schallstrahlen nach oben. Dieser Effekt ist während der gesamten Stunden wirksam.

Der Wind schläft in den nächsten Stunden ein; zumindest wird sein Gradient ab einer Höhe von ca. 10 m signifikant kleiner: Es bildet sich nun auch akustisch eine Inversionswetterlage heraus, die lediglich durch die kalte Luftströmung in äußerster Bodennähe gestört wird.

Zwischen 8 Uhr und 9 Uhr beginnt sich die Inversionswetterlage aufzulösen. Zunächst gibt es keine Inversion mehr in Bodennähe, sondern nur noch in mittleren Höhen. Danach löst sich auch diese Inversion auf. Es bildet sich eine nahezu klassische Mitwindsituation für Westwind aus, obwohl die Windgeschwindigkeit in allen Höhen im Bereich von 1 m/s angegeben ist.

Das Beispiel zeigt insgesamt, dass sich die Immissionspegel von einer Geräuschquelle im Lauf einer Nacht und eines Morgens lokal um mehr als 20 dB ändern können. Das ist weder überraschend noch neu. Es wird aber deutlich, wie das geschehen kann und warum es geschieht. Die Pegeländerungen sind nicht allein rich-

Bild 9 C<sub>met</sub> nach Norden.

tungsabhängig, sondern auch abstandsabhängig. Es gehört also mehr dazu als eine Windmessung am Boden, um eine „Mitwindsituation“ oder „Temperaturinversion“ auszumachen.

### Meteorologische Korrektur C<sub>met</sub>

Die Bestimmung des C<sub>met</sub> dient hier lediglich als Beispiel, um auch andere Darstellungen und Analysen aus dem Schallwetter aufzuzeigen. Der C<sub>met</sub> der DIN ISO 9613-2 [1] korrigiert als Abschlag einen Prognosepegel für die ausbreitungsgünstige Situation auf einen Pegel bei neutraler Ausbreitungssituation. Die Berechnung des C<sub>met</sub> erfolgt durch einen behördlich vorgegebenen Koeffizienten c<sub>0</sub>.

Aus dem Verlauf des Schallwetters, z. B. über ein Jahr, kann man einen Wert ermitteln, der eine zum C<sub>met</sub> vergleichbare Aussage trifft. Ohne nähere Begründung wird hier eingeführt, dass sich der Mittelwert einer schallausbreitungsgünstigen Situation als energetischer Mittelwert aller Stundenpegel angeben lässt, die größer sind als das 80er-Perzentil der gesamten Pegelverteilung. Dann ist C<sub>met</sub> hier die Differenz zwischen diesem Mittelwert und dem der gesamten Pegelverteilung. Dann ergibt sich eine winkel- und abstandsabhängige Verteilung dieses Mittelwerts der Differenz, der hier auch C<sub>met</sub> genannt wird.

Es lässt sich feststellen, dass die Abstandsabhängigkeit in **Bild 8** für die Ausbreitung nach Süden qualitativ und quantitativ mit den entsprechenden Angaben in DIN ISO 9613-2 offensichtlich übereinstimmen. Dies gilt aber für die Ausbreitung in Richtung Norden in **Bild 9** gerade nicht.

Es muss und soll an dieser Stelle dem Leser überlassen bleiben, zu interpretieren. Das Schallwetter ist unter manchen Aspekten nicht abgeklärt. Dies liegt weniger an den Konzepten zur Berechnung des Schallwetters, die auf gesicherten Grundlagen stehen, sondern vielmehr daran, dass bisher Profilprognosen so nicht zur Verfügung standen, also – wenn man so will – Erfahrung bei der Verbindung meteorologischer Wettermodelle mit Kurzzeitprognosen der Schallausbreitung im Freien bisher nicht vorliegen.

### Anwendungen des Schallwetters

#### Lärmforschung

Die Beurteilung von Lärm basiert i. Allg. auf Dosis-Wirkungsbeziehungen, also auf einer Beziehung zwischen einer Kenngröße der Geräuschbelastung und einer Kenngröße der Belästigungsreaktion. Bei der Auswahl der Kenngrößen werden häufig diejenigen ausgewählt, die nach einer zielgerichteten statistischen Analyse einer sozialwissenschaftlichen Untersuchung die höchste Korrelation ergeben. Das Ergebnis ist in den meisten Fällen, dass irgendeine Art eines Mit-

telungspegels die Geräuschbelastung im Sinne einer Dosis-Wirkungsbeziehung am besten beschreibt. Es ist bekannt, dass so bestimmte Dosis-Wirkungsbeziehungen ungefähr ein Drittel des Zusammenhangs zwischen Geräuschbelastung und Belästigungsreaktion erklären können. Der verbleibende Erklärungsbedarf wird dem Einfluss von nicht akustischen Moderatoren zugeschrieben.

Die Wahl eines Mittelungspegels als Kenngröße der Geräuschbelastung ist aber nicht etwa das Maß der Wahl, weil es anderen im Sinne der Korrelation zur Belästigungsreaktion überlegen ist, sondern eher, weil keine anderen Kenngrößen zur Verfügung stehen. Eigentlich berücksichtigt bereits die Art der Erhebung der Dosis-Wirkungsbeziehung diesen Mangel: Es wird gefragt: „Wie stark sind Sie durch Fluglärm belästigt?“ Und nicht etwa: „Wie stark waren Sie gestern durch Fluglärm belästigt?“ Es ist klar, dass die Antworten auf die zweite Frage zumindest eine tagespezifische Kenngröße der Geräuschbelastung erfordern würde. In einem Feldversuch mit vielen Befragungen ist es kaum möglich, einen solchen Pegel zu ermitteln, weil er gemessen werden müsste. Denn die gängigen Prognoseverfahren für Geräuschbelastungen erlauben keine tagesspezifische Prognose.

Es liegt auf der Hand, dass hier das Schallwetter einen Fortschritt bringen kann, ließe sich doch ein Mittelungspegel durch die Werte einer Lärmrose stundenspezifisch im ganzen Erhebungsgebiet einer Befragung korrigieren. Zumindest wäre es eine interessante Anwendung für das Schallwetter, im Rahmen einer grundsätzlichen Studie zu untersuchen, ob die Belästigungsreaktion tatsächlich eine mittlere Belästigung darstellt oder ob Menschen nicht doch auf einen Tagespegel reagieren.

### **Beschwerdemanagement**

Beschwerden sind i. d. R. ein zuverlässiger Hinweis auf tatsächliche, häufig quellenbezogene Belästigungen durch Lärm. Die Überwindung der Schwelle von der passiven Duldung des Lärms zur aktiven Beschwerde benötigt meist einen aktuellen Anlass, eine besonders „laute“ Stunde, eine besondere, für den Beschwerdeführer laute Betriebsituation. In der Regel ist die Überwachungsbehörde oder der Betreiber nicht in der Lage, einzuschätzen, ob nicht gerade eine besondere Schallausbreitungssituation gerade zu diesem „Laut“ und damit zu der Beschwerde geführt hat. Eine häufig hilfreiche Antwort (Sachlichkeit, Kooperation und gute Nachbarschaft seien vorausgesetzt) ist ein Hinweis auf einen Ausnahmefall. Falls das „Laut“ durch die besondere Wetterlage, z. B. eine weit in den Tag reichende Inversion, verursacht wurde, lässt sich das durch das Schallwetter nachweisen und plausibel vermitteln. Mit einer statistischen Analyse des Langzeit-Schallwetters kann man die Häufigkeit ermitteln und sachlich fundiert argumentieren.

### **Öffentlichkeitsarbeit**

Immer mehr Betreiber von lärmrelevanten Anlagen haben erkannt, dass Öffentlichkeitsarbeit ein wichtiges Element der Lärmbekämpfung sein kann. Durch sachliche Informationen über den Betrieb der Anlage wird in der Nachbarschaft Verständnis erzeugt und Akzeptanz gefördert und gleichzeitig das aktive Beschwerdepotenzial abgebaut. Die Öffentlichkeitsarbeit dokumentiert, dass Betreiber und gegebenenfalls die Überwachungsbehörde sich der Lärmbelastung bewusst sind und sich darum kümmern. Man kann zeigen, dass dadurch häufig mehr erreicht werden kann als durch aktionistische Schallschutzmaßnahmen.

Das lokale Schallwetter mit der Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Anlagengeräuschs kann ein Werkzeug einer solchen Öffentlichkeitsarbeit sein. Es ist weitgehend selbsterklärend und lässt sich aufwandsarm anbieten.

### **Genehmigungsverfahren**

Die Prognose der Zusatzbelastung durch den Betrieb einer Anlage erfolgt im Regelfall unter Anwendung der DIN ISO 9613-2. Die Prognosen gelten zunächst für „schallausbreitungsgünstige“ Randbedingungen und müssen für die Beurteilung nach TA Lärm [11] auf einen Langzeitmittelungspegel umgerechnet werden. Dazu dient in der Norm die Bestimmung der meteorologischen Korrektur  $C_{met}$ . Es ist den Behörden vorbehalten, den Koeffizienten  $c_0$  festzulegen, der dieses  $C_{met}$  über eine Formel bestimmt. Die Festlegung des  $c_0$  erfolgt häufig griffweise nach pauschalen Erfahrungswerten und berücksichtigt nicht die lokalen Gegebenheiten. In Genehmigungsverfahren kann durch das Schallwetter bzw. seine statistische Analyse über einen längeren Zeitraum eine Objektivierung dieser Festlegung erfolgen.

### **Lärmmanagement**

Bei einigen Anlagen lassen sich besonders lärmbelastende Betriebsituationen zeitlich steuern. Dann ist das Lärmmanagement eine organisatorische Maßnahme, zu der in Konsequenz von § 5 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes jeder genehmigungsbedürftige Betrieb aufgefordert ist, die Lärmbelastung in der Nachbarschaft nach dem Stand der Technik im Sinne der Vorsorge so gering wie möglich zu halten. Das Schallwetter kann für diese Steuerung die hinreichende Auswahl der Betriebszeiten für diese lärmbelastenden Situationen erlauben.

### **Immissionsmessungen**

Bei Immissionsmessungen kann das Schallwetter eine wertvolle Hilfe sein. Es identifiziert Mitwindlagen und Inversionen mit hinreichendem Vorlauf, um zielgerichtete Messungen am nächsten Tag durchzuführen oder abzusagen. Dies hat eine besondere Bedeutung bei gesteuerten Messungen – z. B. nach VDI 3745-1 [11] – bei denen der Betrieb der Anlage auf die Bedürfnisse der Messung abgestellt werden muss und während der Messung ihren produktiven Betrieb nicht durchführen kann. Das Schallwetter ergänzt auch die akustische Messung begleitende Wind- und Temperaturmessung und kann zur Dokumentation der Schallausbreitungssituation während der Messung dienen. Bei der Auswertung kann das Schallwetter Hinweise bei der Interpretation der Ergebnisse liefern.

### **Schallprognoseverfahren CNOSSOS**

Bei den Schallprognoseverfahren, die im Rahmen der Umgebungslärmrichtlinie harmonisiert eingesetzt werden, wird zwar nicht das tägliche oder gar stündliche Schallwetter eine Rolle spielen. Eine belegbare lokale oder regionale Schallwetterstatistik mit einer Pegelverteilung auf der Basis der Wind- und Temperaturprofile ist aber eine zuverlässigere Grundlage für die Ermittlung der Anteile von Mitwind- und Querwind- und Gegenwindsituationen als eine Langzeit-Bodenwindrose, und sie ist genauso aufwandsarm zu ermitteln wie eine Windrose.

### **Luftschadstoffe**

Es liegt auf der Hand, dass die Profilprognosen auch aussagekräftige Vorhersagen für die Ausbreitung von Schadstoffen und Gerüchen in der Luft ermöglichen. Die inzwischen verfügbaren Zeitreihen der Prognosen für den Wind- und die Temperaturschichtung zeigen nicht nur, dass häufig Profile realisiert werden, die so nicht in der Klassierung der TA Luft [13] abzubilden sind. Die Angabe einer Höhenschichtung und z. B. der zeitliche Verlauf und die Auflösung einer Inversionswetterlage haben eine ähnliche Bedeutung wie für das Lärmmanagement. Mit den Profilprognosen wird es möglich, die Schadstoffausbreitung und die Schallausbreitung auf der Grundlage des gleichen Wetters berechnen zu können.

### Marketing

Diejenigen Seiten im Internet, die sich mit Wetter beschäftigen, sind unüberschaubar: Seiten mit professionellen Angeboten, aber auch unzählige private Seiten, die ihr lokales Wetter dokumentieren, eigene Wetterstationen passioniert betreiben und sich an Wetterprognosen heranwagen. Das Interesse am Wetter und all seinen Facetten hat eine Komponente, die man letztlich „anwendungsarm“ nennen könnte. Das Schallwetter hat das Potenzial, eine sol-

che Komponente zu werden. Es mag für einige Webseitenbetreiber, die eine Besonderheit für ihren Webauftritt suchen, z. B. einen Ferienort, einen Touristikanbieter oder eine Wetter-App, reizvoll sein, das aktuelle Schallwetter anzubieten. Der Autor räumt an dieser Stelle gerne ein, dass solche Motive auch dazu geführt haben, Darstellungsweisen des Schallwetters zu finden, die eingängig und selbsterklärend sind, um auf seiner eigenen Seite ein Alleinstellungsmerkmal aufweisen zu können. Dies ist inzwischen erreicht.

### Literatur

- [1] DIN ISO 9613-2: Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren. Berlin: Beuth-Verlag 1999.
- [2] Meteogroup GmbH. [www.meteogroup.com](http://www.meteogroup.com), Produkt Profilprognosen.
- [3] Meteogroup GmbH. [www.meteogroup.com/de/de/ueber-uns/presse/presse/article/wetter-gegen-den-laerm-meteogroup-unterstuetzt-cervus-consult-bei-der-ermittlung-des-schallwetter.html](http://www.meteogroup.com/de/de/ueber-uns/presse/presse/article/wetter-gegen-den-laerm-meteogroup-unterstuetzt-cervus-consult-bei-der-ermittlung-des-schallwetter.html)
- [4] Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU – Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise, WP 3: Engineering models, PROGRAMMING THE POINT-TO-POINT PROPAGATION MODEL, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Département Acoustique et Eclairage, Document reference: HAR34TR-041124-CSTB01
- [5] Hirsch, K.-W.; Bertels, W.: Schallschutzmaßnahmen in der Nähe von Schießgeräuschquellen. Fortschritte der Akustik, DAGA 2012 Darmstadt.
- [6] Hirsch, K.-W.: Aspekte eines technischen Schallausbreitungsmodells für große Entfernungen. Fortschritte der Akustik, DAGA 2006 Braunschweig.
- [7] ISO 1996-2: Akustik – Beschreibung, Beurteilung und Messung von Umweltlärm – Teil 2: Bestimmung des Umgebungslärmpegels. Berlin: Beuth 2007.
- [8] VDI 3782 Blatt 1: Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Gauß'sches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngrößen. Berlin: Beuth 2009.
- [9] Kühner, T.; Bertels, W.; Hirsch, K.-W.: Schallausbreitungsmodelle mit konstanten Krümmungsradius und Ray-Tracing Modelle – Ein Vergleich bei bekannter, realer Atmosphäre. Fortschritte der Akustik, DAGA 2014, Oldenburg.
- [10] Hirsch, K.-W.; Vogelsang, B.: Auf der Suche nach einem „best practice model“ für die Schallausbreitung oder wie vergleicht man Schallausbreitungsmodelle. Fortschritte der Akustik, DAGA 2012, Darmstadt.
- [11] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26. August 1998. GMBI. (1998) Nr. 26, S. 503.
- [12] VDI 3745 Blatt 1: Beurteilung von Schießgeräuschimmissionen. Berlin: Beuth-Verlag 1993.
- [13] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002. GMBI (2002) Nr. 25-29, S. 511-605.



Dr. Karl-Wilhelm Hirsch, Cervus Consult GmbH, Willich.