

# Meteorologische Korrektur in Prognosemodellen für tieffrequente Schallimpulse

Karl-Wilhelm Hirsch

Cervus Consult, consult@cervus.de

## Einleitung

Tieffrequente Schallimpulse, beispielsweise Waffenknalle und Sprengungen, gehören zu den Geräuschquellenarten, die die DIN ISO 9613-2 [4] in ihrem Anwendungsbereich ausdrücklich ausschließt. Für die Lärmprognose in der Nachbarschaft ihrer Schießplätze hat die Bundeswehr deshalb ein eigenes Prognosemodell – die hier so genannte LMR – für diese Knalle entwickelt [3]. Dieses Modell lehnt sich an die DIN ISO 9613 an, führt aber da, wo ihre Verfahren nicht hinreichend zuverlässig sind, Geräuschquellenart-spezifische Ansätze ein. Ein solcher Ansatz ist die meteorologische Korrektur  $D_{met}$ , der das  $C_{met}$  der DIN ISO 9613 ersetzt. Das  $D_{met}$  ist ein empirischer Ansatz für tieffrequente Waffenknalle, der aus der Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung knallspezifisch und unter Berücksichtigung des Abstands eine positive oder negative Korrektur vorgibt. Dieser Ansatz stammt aus dem Jahr 1989 und gründet sich auf die damals zur Verfügung stehenden Pegel- und Wettermessungen [1].

Inzwischen sind erhebliche Fortschritte beim Verständnis des Einflusses des Wetters auf die Schallausbreitung gerade bei größeren Abständen gemacht worden. Das Konzept des so genannten Schallwetters berücksichtigt Wind- und Temperaturprofile, um konkrete Pegelerhöhungen bzw. Pegelerniedrigungen auszurechnen.

Dieser Beitrag vergleicht die Korrektur des Modells der Bundeswehr mit den Ergebnissen des Schallwetters [2]. Es stellt sich heraus, dass der alte Ansatz überraschend zuverlässig ist. Allerdings ergeben sich signifikante Abweichungen, die in einer Fortschreibung des Modells der Bundeswehr berücksichtigt werden sollten.

## Meteorologische Korrekturen in Regelwerke

### DIN ISO 9613-2

Die DIN ISO 9613-2 berechnet zunächst den A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel bei Mitwind,  $L_{AT}(DW)$ . Durch Subtraktion von  $C_{met}$  wird daraus der Langzeitmittelungspegel  $L_{AT}(LT)$ , für den die TA-Lärm das A-bewertete Richtwertsystem vorhält, s. Gleichung 21 und 22 der Norm. Das Verfahren zur Berechnung des  $C_{met}$  (Kapitel 8) hängt von der „elementaren Analyse der örtlichen Wetterstatistik“ ab, nach der der Anteil der günstigen und ungünstigen Ausbreitungsbedingungen über ein  $C_0$  bestimmt wird.

$$G(\varphi) = Q(1 - \cos(\varphi - \Theta \sin(\varphi))) \quad \text{Gl. 1}$$

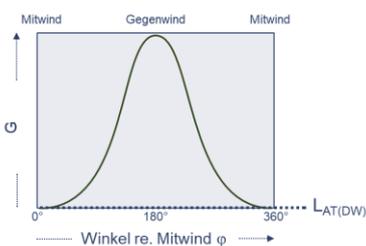


Abbildung 1 Gewichtungsfunktion der Pegeldämpfung

Bei Berechnung des  $C_0$  wird heute in vielen Fällen eine Gewichtungsfunktion der Pegeldämpfung von Mitwind zu Gegenwind  $G(\varphi)$ , Gl. 1, verwendet, häufig mit den Setzungen  $Q = 5$  dB und  $\Theta = 45^\circ$  (z. B. in NRW). Die qualitätssicherbare Bestimmung des  $C_{met}$

wird in [6] beschrieben.

## LMR

Die LMR berechnet zunächst den C-bewerteten Einzelereignispegel bei neutraler Windsituation. Durch Subtraktion des  $D_{met}$  wird daraus der wetterspezifische Ereignispegel, für den die LMR das C-bewertete Richtwertsystem vorhält.

$$D_{met} = -(0,0012 + 0,042 \frac{s}{m} w_k) \cdot K_{met} \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad \text{Gl. 2}$$

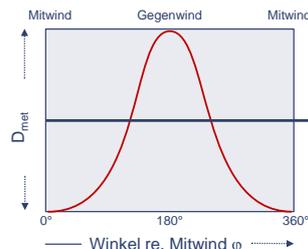


Abbildung 2 Cosinus-Funktion der Windkomponente des  $D_{met}$  der LMR

- mit  $\underline{r}$  als Vektor von Quelle zum Empfänger,
- mit  $w_k = |w| \cos(\underline{w}, \underline{r})$  als Windkomponente
- mit  $K_{met}$  als knallspezifische Konstante, hier = 20 dB für alle Berechnungen

## Vergleich

Das  $C_{met}$  ist eine meteorologische Korrektur für einen Langzeitpegel, die faktisch den Mitwindpegel stets verringert.

Das  $D_{met}$  ist eine meteorologische Korrektur für einen Ereignispegel, die die Prognose bei neutraler Schallausbreitung erhöht, wenn für die Schallausbreitung günstige Wetterbedingungen vorliegen, bzw. erniedrigt, wenn sie ungünstig sind.

## Meteorologische Korrektur des Schallwetters

Beim Schallwetter werden stundenspezifische Vorhersagen der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der Temperatur bis zu Höhen von 200 m benutzt, um mit physikalischen Modellen die Schallausbreitung durch eine geschichtete Atmosphäre zu berechnen. Als physikalisches Modell wird hier das Kreisstrahlenmodell eingesetzt. Es liefert Pegelprognosen in Abhängigkeit von Wind- und Temperaturprofilen.

*Schallwetter = Pegel mit Profil – Pegel bei neutraler Bedingung*

Das Schallwetter als Kenngröße entspricht also gerade dem  $D_{met}$  für ein Ereignis, das während der Stunde  $h$  stattfindet, für die die Profile gelten.

Um ein Langzeitschallwetter zu berechnen, ist der Mittelwert über alle Stunden  $H$  in einem gegebenen Beobachtungszeitraum für die stundenspezifischen Schallwetter zu bilden, Gl. 3.

$$C_{met, \text{Schallwetter}}(\varphi, d) = \frac{1}{H} \sum_1^H C_{met, \text{Schallwetter}, h}(\varphi, d) \quad \text{Gl. 3}$$

## Randbedingungen der Schallwetterrechnung

### Variationen

Für eine Profilprognose wird mit dem Kreisstrahlmodell eine Ausbreitungssituation betrachtet, die auf und in der Nachbarschaft eines Schießplatzes typisch ist. Dabei werden die sie bestimmenden Parameter in vorgegebenen Grenzen variiert, um die Unsicherheiten bei der Parameterwahl zu berücksichtigen. Deshalb werden im Folgenden die Parameter jeweils mit ihren Variationsbereichen angegeben.

## Schallquelle

Die Schallquellen sind in dem hier betrachteten Anwendungsfall Mündungs- und Explosionsknalle, für die die LMR gilt. Diese Knalle lassen sich mit dem WEBERmodell zuverlässig beschreiben. Bei der Rechnung wird ein WEBERRadius von  $7 \text{ m} \pm 10\%$ .

## Geometrie

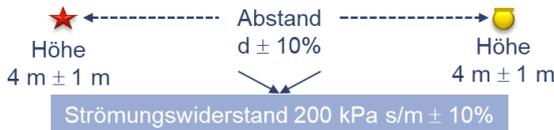


Abbildung 3 Parameter der Geometrie und der Reflexionseigenschaften des Erdbodens

Die geometrischen Parameter und die Bodeneigenschaften (Grasboden) sind Abbildung 3 zu entnehmen.

## Pegelberechnung

Die Pegelberechnung erfolgt über komplexe Schmalbandspektren von 20 Hz bis 4 kHz mit einer Bandbreite von 1 Hz für das WEBERSpektrum für den geforderten Radius

## Abtastung

Bei den folgenden Ergebnissen für das Schallwetter wird der Abstand in 11 Abstandsklassen in 500-m-Schritten bis 5000 m und der Winkel re. Mitwindrichtung in 24 Winkelklassen in  $15^\circ$ -Schritten von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  unterteilt

## Profilprognosen

Bei der Berechnung wird auf hinreichend lange Reihen Profilprognosen in 8 verschiedenen Orten zurückgegriffen, Abbildung 4



Abbildung 4 Karte mit den 8 Reihen von Profilprognosen angegeben ist die Region, der Ort und die Anzahl der jeweils verfügbaren Stunden

## Ergebnisse

### Abstands- und Winkelabhängigkeiten

Die Ergebnisse werden zunächst für die Region Niederrhein vorgestellt und diskutiert. Hier liegt für den Zeitraum 01.04.2014 bis 13.11.2018 eine dichte Folge von stundenspezifischen Profilprognosen vor. Jeder Punkt in der folgenden Abbildung ist der Mittelwert aus 40500 Schallwetterberechnungen, der wiederum aus einer 100-fachen Variation der Ausbreitungssituation ermittelt wurde.

Die Analyse konzentriert sich zunächst auf die Beurteilungszeit Ganztags. Es werden also alle Stunden eines Tages berücksichtigt.

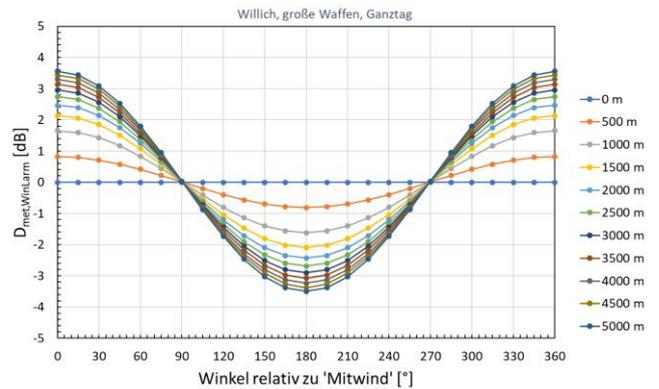


Abbildung 5 Winkelabhängigkeit des  $D_{met}$  der LMR Parameter: Abstand

Abbildung 5 zeigt die Winkel- und Abstandsabhängigkeit der meteorologischen Korrektur  $D_{met}$  (an der Achse der Abbildung als  $D_{met,WinLarm}$  bezeichnet), die nach der LMR berechnet wurde. In allen Abständen ist die Cosinus-Funktion als Einfluss der Windkomponente deutlich zu erkennen. Betrachtet man beim Abstandsbereich den Bereich, den auch die DIN ISO 9613-2 abdeckt, ist die Differenz zwischen Mitwind- und Gegenwindpegel bei 500 m: 2 dB, bei 1000 m: 3 dB und bei 1500 m: 4 dB. Das sind Werte, die auch für das  $C_{met}$  plausibel sind.

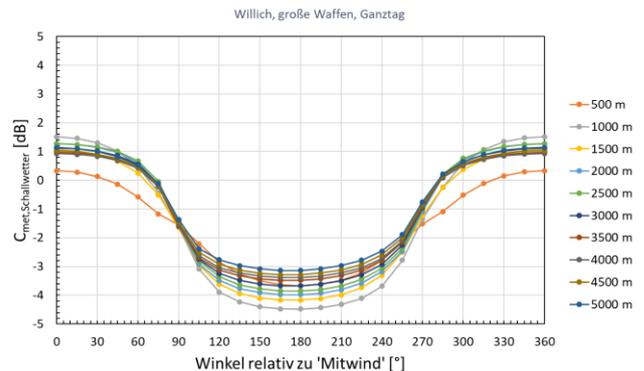
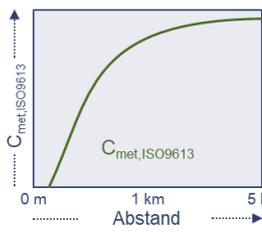


Abbildung 6 Winkelabhängigkeit des  $C_{met}$  des Schallwetters Parameter: Abstand

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse mit dem Schallwetter. Es fällt zunächst auf, dass das  $C_{met,Schallwetter}$  nicht pegelsymmetrisch ist. Die Pegel im Mitwindbereich sind signifikant weniger positiv als die Pegel im Gegenwindbereich negativ. Zudem ist der Bereich, in dem Pegelzuschläge erfolgen, der so genannte Mitwindsektor, nicht  $180^\circ$ , sondern nur noch ca.  $140^\circ$  breit. Der Mitwindsektor ist also schmaler als beim  $D_{met}$ . Das  $C_{met,Schallwetter}$  ist auch nicht symmetrisch um  $180^\circ$ . Betrachtet man die Kurvenschar bei  $90^\circ$  und  $270^\circ$ , ist festzustellen, dass die Kurven bei  $90^\circ$  nahezu zusammenlaufen. Bei  $270^\circ$  ist das nicht der Fall. Dies ist möglicherweise auf die systematische Drehung der Windrichtung mit der Höhe nach rechts (Ekman-Drehung) zurückzuführen.

In Abbildung 6 ist die Abstandsabhängigkeit nicht deutlich zu analysieren. Abbildung 8 arbeitet diesen Aspekt durch die Darstellung der Abstandsabhängigkeit der Pegeldifferenz



zwischen Mitwind und Gegenwind heraus. Die Abstandsabhängigkeit des  $D_{met}$  der LMR ähnelt grundsätzlich der Abstandsabhängigkeit des  $C_{met}$  der DIN ISO 9613-2, die in Abbildung 7 angedeutet ist. Das  $C_{met,Schallwetter}$  folgt dieser Tendenz nur im Abstandsbereich  $< 1000$  m.

Abbildung 7 DIN ISO 9613 Darüber hinaus fällt die Differenz von 6 dB bei 1000 m auf ca. 4 dB bei 5000 m.

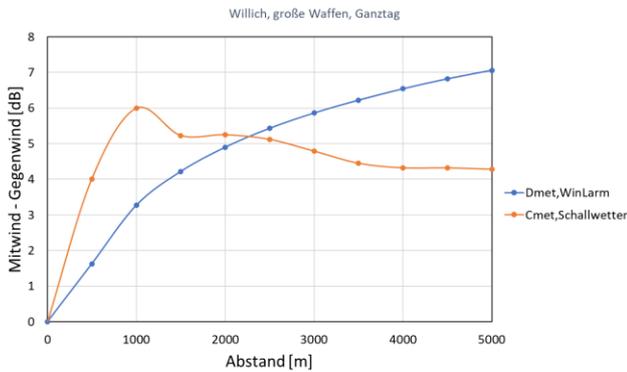


Abbildung 8 Abstandsabhängigkeit der Differenz zwischen dem Mitwindpegel (Pegel bei 0°) und dem Gegenwindpegel (Pegel bei 180°) für  $D_{met,WinLarm}$  und  $C_{met,Schallwetter}$

Ein wesentliches Ergebnis der Berechnung mit dem Schallwetter ist die Aussage, dass sich in Mitwindsituationen der Pegel im Vergleich zur neutralen Ausbreitungssituation nicht so stark erhöht, wie er in Gegenwindsituationen abnimmt. Diese Aussage gilt abstandsunabhängig wie Abbildung 9 belegt.

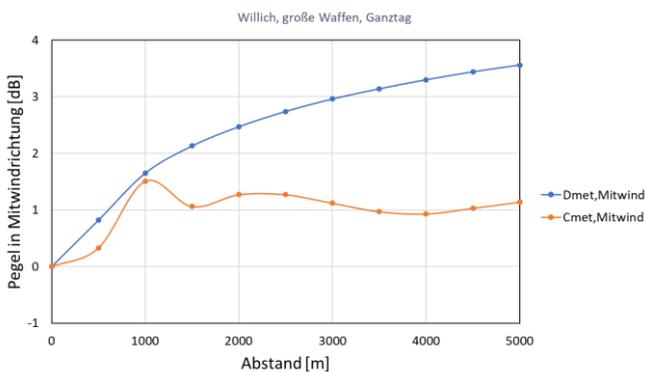


Abbildung 9 Abstandsabhängigkeit der meteorologischen Korrektur  $D_{met,WinLarm}$  und  $C_{met,Schallwetter}$

### Unterschiede in den Beurteilungszeiten

Die folgende Analyse wird aber zeigen, dass diese Aussage tatsächlich nur dann gilt, wenn man die Beurteilungszeit Ganztags betrachtet, also das Schallwetter über alle Stunden des Tages mittelt. Das Bild ändert sich signifikant, wenn man die Beurteilungszeiten Tags (6 Uhr bis 22 Uhr) und Nachts (22 Uhr bis 6 Uhr) getrennt analysiert.

In der Beurteilungszeit Tags ist der Pegel in Mitwindsituationen kaum erhöht. Die Größe der Pegelminderung bei Gegenwindbedingungen bleibt erhalten. In der Beurteilungszeit Nachts sind für Mitwindsituationen Pegelzuschläge von ca. 3 dB erforderlich. Auch die Pegelabschläge bei Gegenwindsituationen werden ca. 2 dB geringer. Dies ist grundsätzlich

auf die in diesem Tagesabschnitt häufiger vorkommenden Inversionswetterlagen zurückzuführen. Dieses Ergebnis stimmt mit den Analysen und Konsequenzen in [7] überein.

Unabhängig davon, welchen Maßstab man zur Bestimmung der Breite des Mitwindsektors wählt, kann man bei Vergleich der Ergebnisse Tag und Nacht feststellen, dass der Mitwindsektor bei Nachts größer ist als bei Tags.

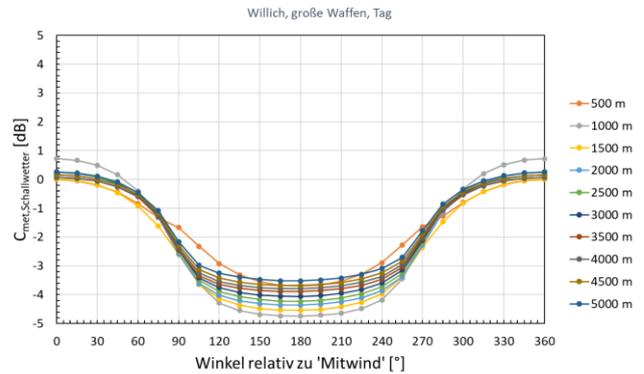


Abbildung 10 Winkelabhängigkeit des  $C_{met,Schallwetter}$  Parameter: Abstand Beurteilungszeit Tags

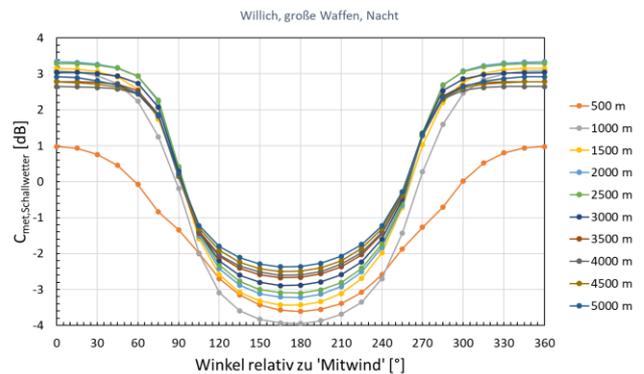


Abbildung 11 Winkelabhängigkeit des  $C_{met,Schallwetter}$  Parameter: Abstand Beurteilungszeit Nachts

### Regionale Unterschiede

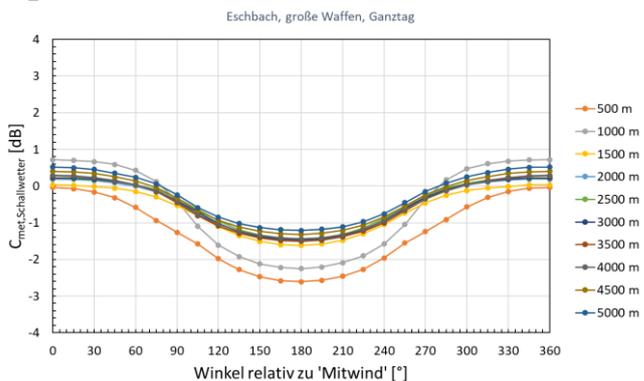


Abbildung 12 Winkelabhängigkeit des  $C_{met,Schallwetter}$  Parameter: Abstand im Oberrhein (Eschbach)

Bisher wurden nur die Ergebnisse für die Profilprognosen in Willich (Niederrhein) betrachtet. Generell zeigt sich in den anderen Regionen das gleiche Bild. Das gilt für die Form Abstands- und Winkelabhängigkeit durchweg. Die Pegeldifferenzen unterscheiden sich um 1 bis 2 dB. Auch die Breite der Mitwindsektoren variiert nicht signifikant.

Das gilt nicht für den Ort Eschbach im Oberrheintal. Dort ist die meteorologische Korrektur signifikant geringer. Die Pegeldifferenz zwischen Mitwind und Gegenwind liegt bei ca. 2,5 dB. Hier – und auch schon bei der Windrose – ist die Windleitung im Rheintal klar zu erkennen. Die Richtungen in bzw. entgegen der Orientierung des Tals bzw. des Rheins sind deutlich bevorzugt.

## Das neue Modell

Die Abbildung des  $C_{met, Schallwetter}$  in ein fortgeschriebenes Modell der meteorologischen Korrektur für Prognosemodelle für tieffrequente Schallimpulse erfordert die Berücksichtigung vielschichtiger Abhängigkeiten. Das Modell muss den regionalen Unterschieden und den Unterschieden in den Beurteilungszeiten Rechnung tragen zu können. Im Hinblick auf die LMR der Bundeswehr wird die Zielgröße des Modells hier als  $D_{met, LMRBw}$  eingeführt. Das  $D_{met, LMRBw}$  ersetzt das  $D_{met}$  in der zur Zeit gültigen LMR.

$$D_{met, LMRBw}(\varphi, d) = C_{met, SW}(0^\circ, d) - Q_\Delta(d) \cdot s(\kappa_p(\varphi, d)) \cdot s(\kappa_m(\varphi, d)) \quad \text{Gl. 4}$$

mit

$$C_{met, SW}(\varphi = 0^\circ, d) = 2(Q_\infty - C_{met, SW00})(s(\psi d) - 0,5) + C_{met, SW00}$$

$$Q_\Delta(d) = 2(s(\mu d) - 0,5)(Q_{\Delta 0} - ad)$$

$$\kappa_p(\varphi, d) = \frac{4\rho}{Q_\Delta(d)} \left( \varphi - 180^\circ + \frac{\Omega}{2} \right)$$

$$\kappa_m(\varphi, d) = \frac{-4\rho}{Q_\Delta(d)} \left( \varphi - 180^\circ - \frac{\Omega}{2} \right)$$

$$s(x) = \frac{e^x}{1 + e^x}$$

Das Modell nutzt ausgiebig Sigmoidfunktionen, um die Übergänge zu beschreiben. In Tabelle 1 wird die numerische Bedeutung der Parameter angegeben.

Nr.	Name	Symbol	Einheit
1	Steilheit des Anstiegs	$\psi$	1/m
2	Pegel bei Abstand $\infty$ m	$Q_\infty$	dB
3	Mitwindpegelminderung bei Abstand 0 m	$C_{met, SW00}$	dB
4	Steilheit des Anstiegs	$\mu$	1/m
5	Steigung des Abfalls	$a$	dB/m
6	Pegelminderung bei Abstand 0 m	$Q_{\Delta 0}$	dB
7	Breite des Gegenwindsektors	$\Omega$	°
8	Steilheit des Übergangs vom Mitwind- zum Gegenwindsektor	$\rho$	dB/°

Tabelle 1 Bedeutung, Symbol und Einheit der Modellparameter

Tabelle 2 gibt den Parametersatz an, der im Mittel für alle Regionen in hinreichender Näherung angenommen werden kann.

Nr.	Parameter	Einheit	Ganztags	Tags	Nachts
1	$\psi$	1/km	1,5	3,0	3,0
2	$Q_\infty$	dB	1,3	0,4	3,0
3	$C_{met, SW00}$	dB	-0,5	-0,5	-0,5
4	$\mu$	1/km	4,0	4,0	4,0
5	$a$	dB/km	0,3	0,3	0,3
6	$Q_{\Delta 0}$	dB	5,5	5,3	7,0
7	$\Omega$	°	190	190	170
8	$\rho$	dB/°	0,060	0,060	0,075

Tabelle 2 Mittlerer Parametersatz für die Regionen

Für das Oberrheintal gilt er nicht. Der Parametersatz wurde händisch an die Ergebnisse angepasst.

Abbildung 13 zeigt das Modell mit dem mittleren Parametersatz nach Tabelle 2 als durchgezogene Linien und die Rechenresultate mit dem Schallwetter als Punkte exemplarisch für die Region Ostseeküste und zentrale Mittelgebirge für die Beurteilungszeit Tags. Die Abweichungen sind durchweg kleiner als 1 dB.

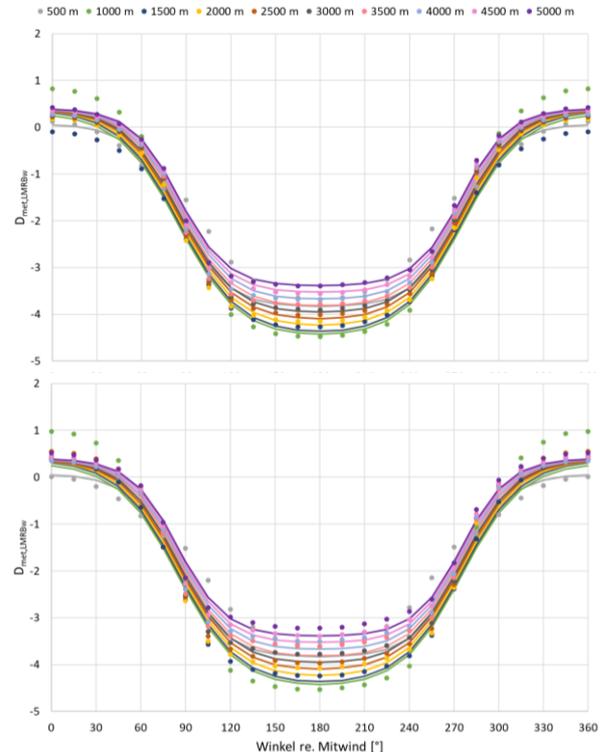


Abbildung 13 Vergleich Modell (Linien) zur Rechnung (Punkte)  
oben: Ostseeküste (Putlos)  
unten: Zentrale Mittelgebirge (Wildflecken)

## Verweise

- [1] Hirsch, K.-W.; Buchta, E.: „Zur Schallausbreitung tieffrequenter Impulsgeräusche über große Entfernungen, Fortschritte der Akustik, DAGA 1989, S. 539
- [2] Hirsch, K.-W.: "Grundlagen und Anwendungen des Schallwetters" Lärmbekämpfung, Zeitschrift für Akustik, Schallschutz und Schwingungstechnik. Heft 6, 2014
- [3] Zentralvorschrift der Bundeswehr A1-2031/2-6000: "Lärmmanagement – Rahmenbedingungen, Grundlagen, und Vorgaben für die Umsetzung auf Schießplätzen der Bundeswehr"
- [4] DIN ISO 9613-2:1999-10, Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien
- [5] Hirsch, K.-W.: „Bella Acustica – De Bello Acustico“, Meteorologie der Schallausbreitung - Profilprognosen an der Küste, im Flachland, im Mittelgebirge, dba 21, [www.kwhirsch.de](http://www.kwhirsch.de).
- [6] 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
- [7] Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie: „Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien: Allgemeine Berechnungsverfahren (ISO 9613:1996) DIN ISO 9613-2“, F.-Chr. Zacharias, [https://www.thueringen.de/imperia/md/content/tlug/abt1/vrefefrate/2013/17\\_2013/grundlagen\\_schallprognose\\_iso9613-2.pdf](https://www.thueringen.de/imperia/md/content/tlug/abt1/vrefefrate/2013/17_2013/grundlagen_schallprognose_iso9613-2.pdf), abgerufen am 14.02.2020