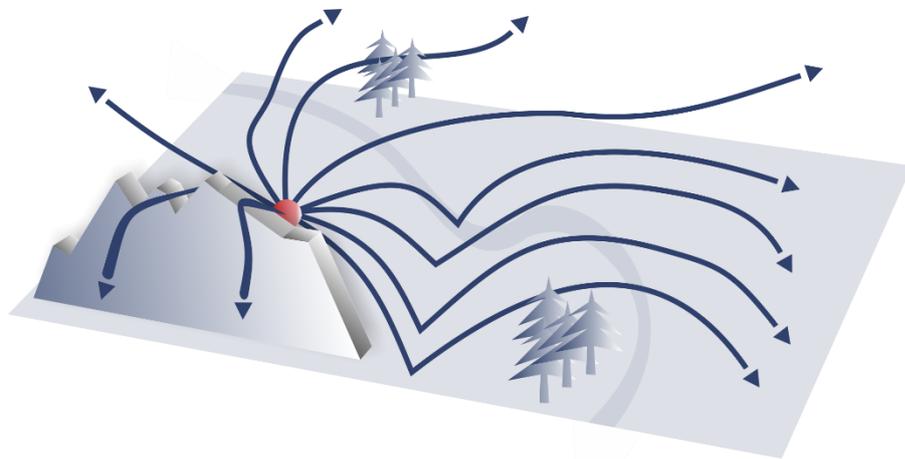


Krumme Hunde

Schallkreise in der Luft



Kennung: kwhdba.11.02

Datum: 02.11.2018

Status: Entwurf

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Einführung	3
1.2	Motivation für diesen Aufsatz	4
1.3	Aufgabenstellung in diesem Aufsatz	5
1.4	Lösungsweg	6
2	Methode zur Bestimmung von Krümmungsradien	7
2.1	Berechnung der Schallausbreitung durch Strahlverfolgung	7
2.1.1	Physikalische Grundlagen	7
2.1.2	Numerische Umsetzung	8
2.2	Kreisstrahl nähierung	12
3	Festlegung einer Mitwindbedingung	14
3.1	Mitwindfenster	14
3.2	DIN-ISO-9613-kompatible Mitwindbedingung für Kreisstrahlen	15
3.3	Diskretisierung – Numerischer Zugang zur Mitwindbedingung	16
3.3.1	Numerische Umsetzung	16
3.3.2	Diskretisierung der Empfängerzonen	17
3.3.3	Diskretisierung des Mitwindfenster	17
3.3.4	Angaben zum Krümmungsradius	18
3.3.5	Festlegung der Quellhöhe.....	19
4	Berechnung der geometrischer Kenngrößen	20
4.1	Die Grundgesamtheit der Daten.....	20
4.2	Mittlerer Krümmungsradius für jede Stunde der Grundgesamtheit	20
4.3	Berechnung der Breite des Mitwindfensters	23
5	Berechnung der Abstandsabhängigkeit	25
5.1	Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius	25
5.2	Abstandsabhängigkeit der Mitwindfensterbreite (Mitwindsektor).....	28
5.3	Abstandsabhängigkeit der Mitwindfensterhöhe	29
6	Zur Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius in der Norm	30
7	Verweise	31
8	Über „Bella Acustica – De Bello Acustico“	32

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die DIN ISO 9613-2 [1] prognostiziert den A-bewerteten Dauerschallpegel für Geräusche des Industrie- und Gewerbelärms. Sie hat im Lärmschutz eine besondere Bedeutung, da die TA Lärm auf sie hinweist und sie als Regelverfahren für die Vorausberechnung von Immissionspegeln einsetzt.

Der Regelfall, den die DIN ISO 9613-2 behandeln kann, setzt bodennahe Quellen und Empfänger voraus. Es dürfen zudem keine Einzeltöne oder Impulse, die Sprengknallen gleichzusetzen sind, von der Quelle ausgehen. Wegen der impliziten Modellannahmen in der DIN ISO 9613-2 ist ebenfalls der Abstand zwischen Quelle und Empfänger in Abhängigkeit von der Höhe der Quelle und des Empfängers begrenzt.

Anmerkung

Die Feststellung im letzten Satz ist durchaus nicht unbestritten. Zu seiner Begründung und zu allgemeinen Aspekten der Unsicherheit der DIN ISO 9613-2 siehe [3]

Häufig übersehen wird eine Feststellung im Anwendungsbereich der Norm, die sich mit der Zielgröße ihres Rechenverfahrens beschäftigt. Die Pegelprognosen gelten als Mittelwert über Schallausbreitungsbedingungen, die ‚schallausbreitungsgünstig‘ sind. Als ‚schallausbreitungsgünstig‘ bezeichnet die Norm Mitwindsituationen und leichte Inversionswetterlagen. Eine textliche Festlegung, die selten hinterfragt, häufig aber in Verbindung mit den Aussagen zur ‚Langzeit‘ zweifelhaft interpretiert wird. Dies kommt in Berichten zum Ausdruck, die ‚validierende Nachmessungen‘ der Prognosen der DIN ISO 9613-2 als Kurzzeitmessungen unter Mitwindbedingungen festlegen und auch so durchführen. Diese Vorgehensweise wird durch Festlegungen in anderen Richtlinien, beispielsweise der VDI 3745 Blatt 1 [4], unterstützt, die zum Beispiel nur 3 Messungen bei unabhängigen Mitwindsituationen verlangen. In der VDI 3745 Blatt werden auch Festlegungen zu dem so genannten Mitwindsektor gemacht, also dem Winkelbereich um die Verbindungslinie zwischen Quelle und Empfänger, in der solche Mitwindbedingungen vorherrschen sollen. Die Gleichsetzung solcher Vorschriften mit der ‚Langzeit‘ in der DIN ISO 9613-2 ist zweifelhaft.

Die DIN ISO 9613-2 (in der aktuellen Fassung bzw. der Fassung, auf die sich die TA Lärm bezieht) verwendet in ihrem Kernverfahren explizit keinen Krümmungsradius. Lediglich im Anhang wird ein Krümmungsradius von 5000 m eingeführt, um den Schalldurchgang durch Bebauung oder Wald abzuschätzen.

Technische Modelle können mit Geraden rechnen. In Wirklichkeit, also in der physikalischen Wirklichkeit sieht es anders aus. Selbst wenn man Strahlen als Konzept eines physikalischen Modells unterstellt, sind sie mit Sicherheit nicht gerade, denn gerade Strahlen verlangen eine sowohl in der Höhe als auch lateral konstante Schallgeschwindigkeit. Allein wegen der unabdingbaren Temperaturabnahme wird eine solche Konstante nie realisiert.

Bei einer geschichteten Atmosphäre wird immer noch eine lateral konstante Schallgeschwindigkeit angenommen. Diese Näherung gilt möglicherweise über trivialer Topographie, über einer ausgedehnten Wasserfläche oder über einer ebenen Wüste oder Steppe oder über einer ebenen Schneefläche. Aber selbst da zeigt eine einfache Beobachtung Böen und Wirbel oder kleinräumige Wirbel, die man Schnee- oder Sandteufel nennt, oder größere Strukturen, die man beispielsweise als Thermikschläuche bezeichnet. Im konturierten Gelände oder innerhalb einer Bebauung oder im Wald potenzieren sich die Herausforderungen. Die Randbedingungen sind immer zu komplex, um sie physikalisch zu erfassen. Das Ausbreitungsmodell selbst, die Differentialgleichung für Schall in einem bewegten Medium ist dagegen fast schon trivial.

Also weder die Geraden der DIN ISO 9613-2 noch die in diesem Aufsatz untersuchten Kreise, die in Ausbreitungsebenen senkrecht zu einer geschichteten Atmosphäre eingesperrt sind, sind ein verlässliches Bild der Wirklichkeit. Tatsächlich sind die Schallstrahlen mehr oder weniger ‚krumme Hunde‘, die sich durch die Atmosphäre schlängeln und an jedem Ort den dreidimensionalen Schallgeschwindigkeitsgradienten folgen, egal, wodurch diese verursacht werden.

Aber immerhin, die Beschreibung der Schallausbreitung durch eine geschichtete Atmosphäre liefert entscheidende Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der vereinfachten technischen Modelle. Es ist Ziel dieses Aufsatzes, die Fortschritte bei der Gewinnung dieser Erkenntnisse zu beschreiben.

1.2 Motivation für diesen Aufsatz

Die DIN ISO 9613 ist zurzeit in der turnusmäßigen Überarbeitung. Bei der Überarbeitung soll ähnlich wie im europäischen CNOSSOS die Geometrie der Schirmung statt durch gerade Strahlen nun durch Kreisstrahlen berechnet werden. Es liegen auch Vorschläge vor, den in der Norm vorgegebenen Krümmungsradius von 5000 m durch eine Abstandsabhängigkeit besser an verschiedene Randbedingungen anpassen zu können. Dazu ist es erforderlich, eine Abstandsfunktion für den Krümmungsradius abzuleiten und einzuführen.

Die meteorologische Korrektur C_{met} in der DIN ISO 9613-2 wird im Regelfall durch die behördliche Vorgabe des c_0 festgelegt. Dabei bildet das c_0 im besten Fall die örtlichen Langzeit-Ausbreitungsbedingungen durch die lokale Langzeit-Stärkewindrose ab. Dies ist insgesamt unbefriedigend, weil weder die Tageszeit (die Beurteilungszeiten ‚Tags‘ und ‚Nacht‘, die ‚lauteste Nachstunde‘ und Tageszeiten mit ‚besonderer Empfindlichkeit‘) noch die Jahreszeiten mit ihrer unterschiedlichen Ausprägung von Inversionswetterlagen und höhenabhängigen Winddrehungen Berücksichtigung finden.

Zudem werden in den Bundesländern unterschiedliche Vorgaben zur Bestimmung des C_{met} angegeben. Eine Harmonisierung der Vorschriften würde einen Beitrag zur Qualitätssicherung bzw. zur Präzision des gesamten Verfahrens leisten. Dazu ist ein Verfahren erforderlich, das die Besonderheiten der Topographie und des Wetters berücksichtigt.

1.3 Aufgabenstellung in diesem Aufsatz

Aus den oben beschriebenen Fragestellungen ergeben sich folgende Aufgaben:

1. Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Krümmungsradien bei einer gegebenen geschichteten Atmosphäre
2. Festlegung einer Mitwindbedingung, die die textlichen Vorgaben der DIN ISO 9613-2 in einem Kreisstrahlenmodell umsetzt
3. Berechnung geometrischer Kenngrößen der Schallausbreitung unter Berücksichtigung der oben abgeleiteten Mitwindbedingung
 - a. Mittlerer Krümmungsradius für jede Stunde der Grundgesamtheit
 - b. Berechnung der Breite des Mitwindfensters
 - c. Berechnung der mittleren Höhe des Mitwindfensters
4. Sachgerechte Mittelungen der geometrischen Kenngrößen unter Beachtung von Beurteilungszeiten und Berechnung der Abstandsabhängigkeit
 - a. Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius
 - b. Abstandsabhängigkeit der Mitwindfensterbreite (Mitwindsektor)
 - c. Abstandsabhängigkeit des Mitwindfensterhöhe

Es ist ausdrücklich nicht Bestandteil dieser Untersuchungen, Aussagen über Immissionspegel oder andere akustische Kenngrößen zu ermitteln. Dies erfolgt an anderer Stelle.

Die Gliederung des vorliegenden Berichts folgt der Aufgabenstellung.

1.4 Lösungsweg

Das Schallwetter, siehe zum Beispiel [5], erlaubt auf der Basis von stundenspezifischen sogenannten Profilprognosen die Berechnung der Schallausbreitung für jede dieser Stunde. Es liegen solche Profilprognosen über ein Jahr vor. Es ist deshalb möglich, statistische Untersuchungen über den mittleren Krümmungsradius und über sonstige geometrische Parameter der Schallausbreitung durchzuführen.

Das Ergebnis sind Verteilungen dieser Parameter. Aus diesen Verteilungen können durch Filterung und Zusammenführung von Kenngrößen der Verteilungen und Aussagen über die Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius und der Bereiche des Windsektors ermittelt werden.

2 Methode zur Bestimmung von Krümmungsradien

2.1 Berechnung der Schallausbreitung durch Strahlverfolgung

2.1.1 Physikalische Grundlagen

Als Eingangsgrößen liegen Profilprognosen für das Wind- und Temperaturfeld vor, also höhenabhängige Werte der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung, der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Die Ermittlung der Profile und ihre Bereitstellung durch einen Wetterdienst wird in [5] erläutert und soll hier nicht wiederholt werden. Abbildung 1 zeigt exemplarisch eine Profilprognose für eine Stunde.

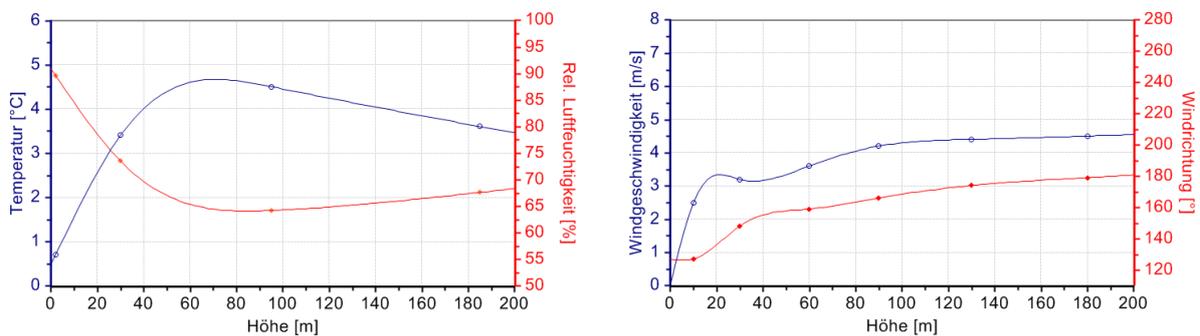


Abbildung 1 Exemplarische Profilprognose für eine Stunde

Eine solche Prognose gilt entsprechend der Auflösung des vom Wetterdienst benutzten Wettermodells für eine Zelle von 4 km x 4 km Aufstandsfläche auf der Erdoberfläche. Zumindest in diesem Bereich ist die Atmosphäre geschichtet, weil es nähere Informationen nicht gibt.

Für das hier behandelte Thema ist ein Strahlenmodell das Modell der Wahl. Es ist eine ‚Hochfrequenz-Lösung‘ für die Beschreibung der Schallausbreitung. Man kann durch einen Vergleich mit wellentheoretischen Modellen nachweisen, dass diese Beschreibung der Schallausbreitung ab ca. 50 Hz hinreichend zuverlässig funktioniert.

Anmerkung

Dieser Vergleich wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens, über das hier nicht berichtet werden darf, zusammen mit Dr. D. Kühner (Modell KUTEX) erfolgreich durchgeführt.

Im Folgenden wird die Strahlverfolgung nach Maßgabe der Formulierung der Wellengleichung für die Schallausbreitung nach PIERCE eingesetzt, um die Strahlen durch die durch die Profile definierte Atmosphäre zu verfolgen, siehe z. B. [6].

2.1.2 Numerische Umsetzung

Diese Methode ist in dem Programm „SoundWeather“ vom Autor umgesetzt. Es liefert zunächst nach Vorgabe der Stunde aus der Grundgesamtheit, siehe Kapitel 4.1, die zugehörige Profilprognose. Nach Auswahl der Quellhöhe, der Himmelsrichtung und des Erhöhungswinkels und der die Numerik steuernden Hilfsgrößen wie Zeitschritt der Integration und Integrationszeit erfolgt die Strahlverfolgung.

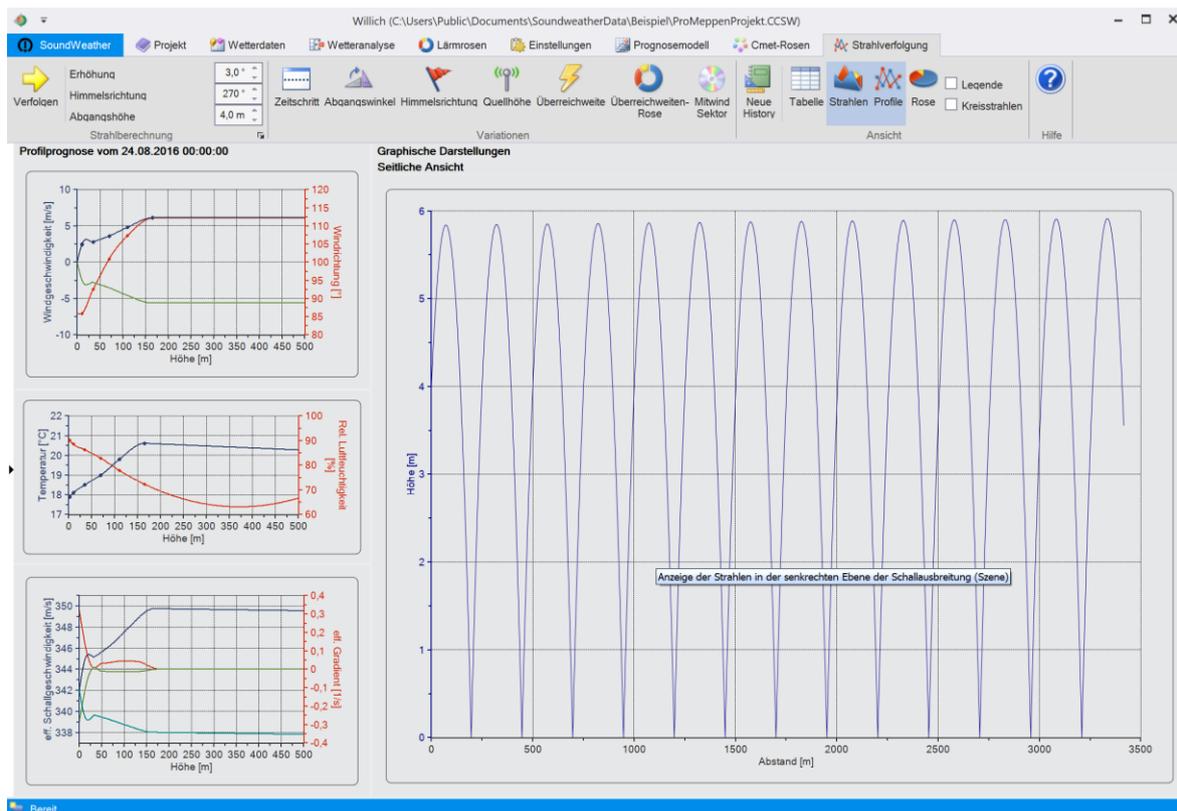


Abbildung 2 Strahlverfolgung bei einer ausgewählten Profilprognose (24.08.2016 00:00 Uhr) für eine gegebene Quellhöhe (4,0 m), Himmelsrichtung (270°), Strahlerhöhung (3,0°) und Zeitdauer (10 s)

Abbildung 2 gibt einen Eindruck von der Bedienoberfläche für die Strahlverfolgung. In der graphischen Darstellung der Strahlen erkennt man für die gewählten Einstellungen eine ‚günstige‘ Schallausbreitungssituation. Der Strahl unter 3° erreicht nach ca. 200 m die erste Bodenreflexion. Die weiteren folgen periodisch.

Das Programm bietet die Möglichkeit, die Eingangsparameter des Strahls zu variieren. Die folgenden Abbildungen zeigen einige ausgewählte Ansichten der Strahlen der Strahlverfolgung.

In Abbildung 3 wird die Himmelsrichtung bei konstanter Strahlerhöhung und Quellhöhe variiert. Zur besseren Analyse der bodennahen Strahlen wird eine entsprechende Ausschnittvergrößerung angeboten.

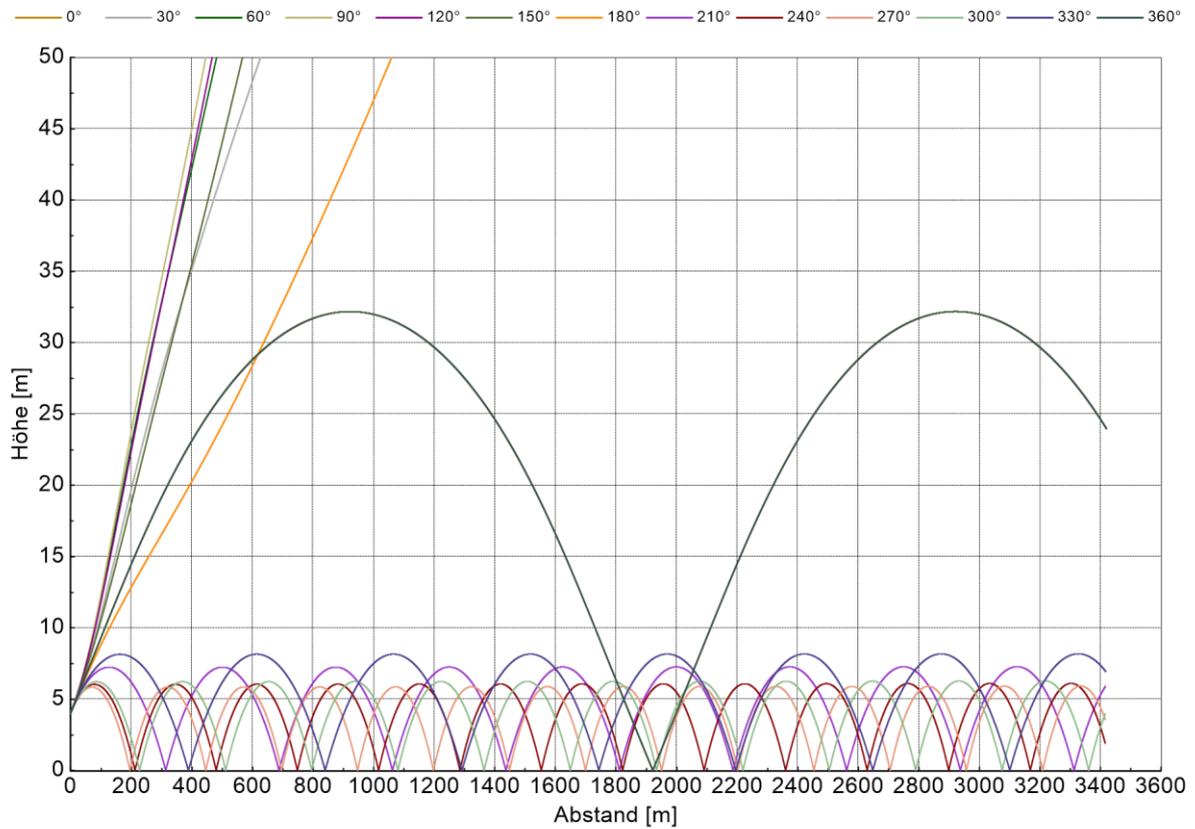
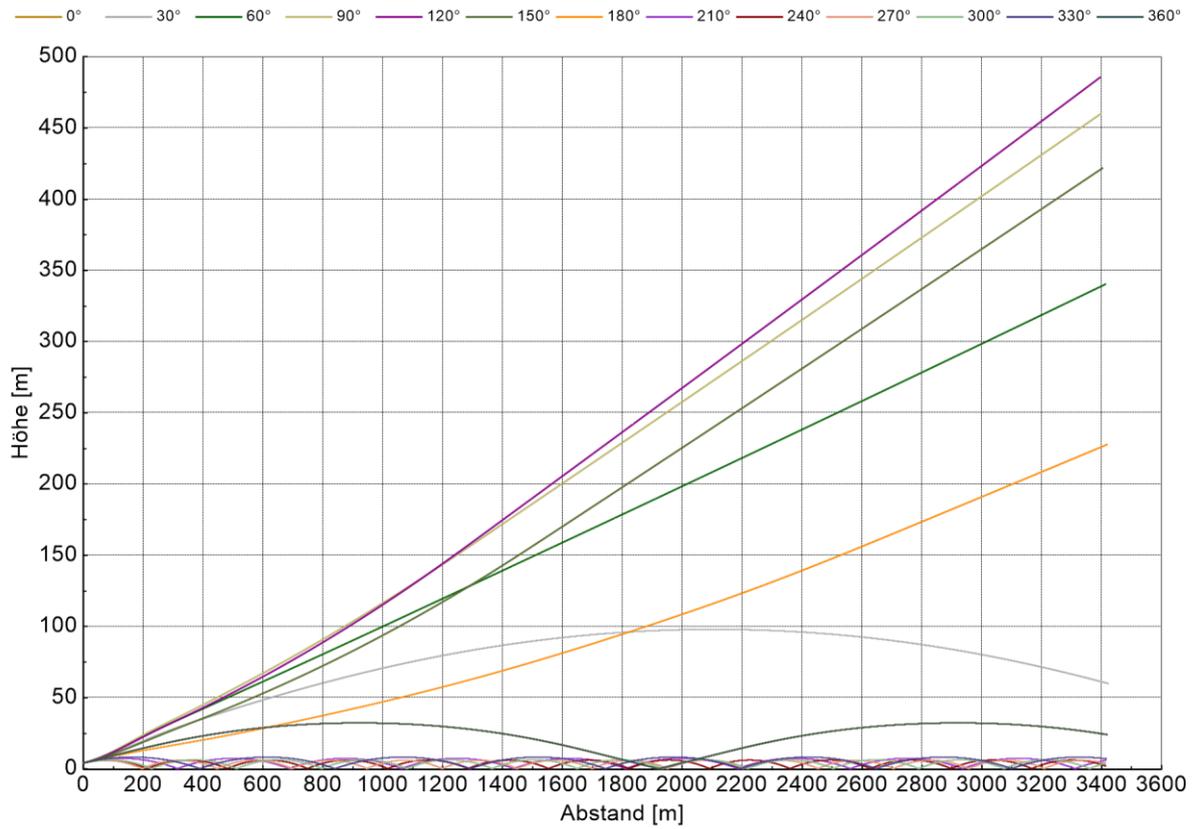


Abbildung 3 Strahlverfolgung bei einer ausgewählten Profilprognose (24.08.2016 00:00 Uhr)
für eine gegebene Quellhöhe (4,0 m), Strahlerhöhung (3,0°) und Zeitdauer (10 s)
Variation der Himmelsrichtung
oben: Vollbild, unten: Ausschnittsvergrößerung für niedrige Höhen

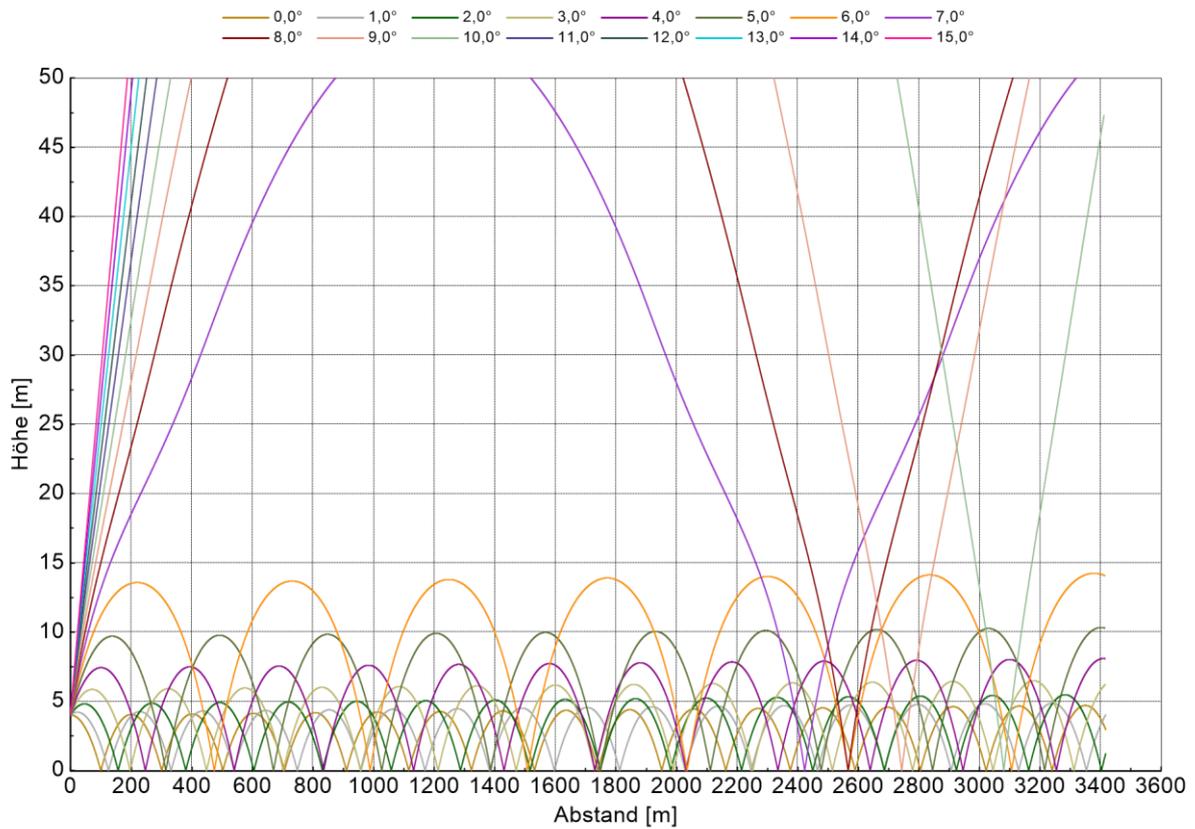
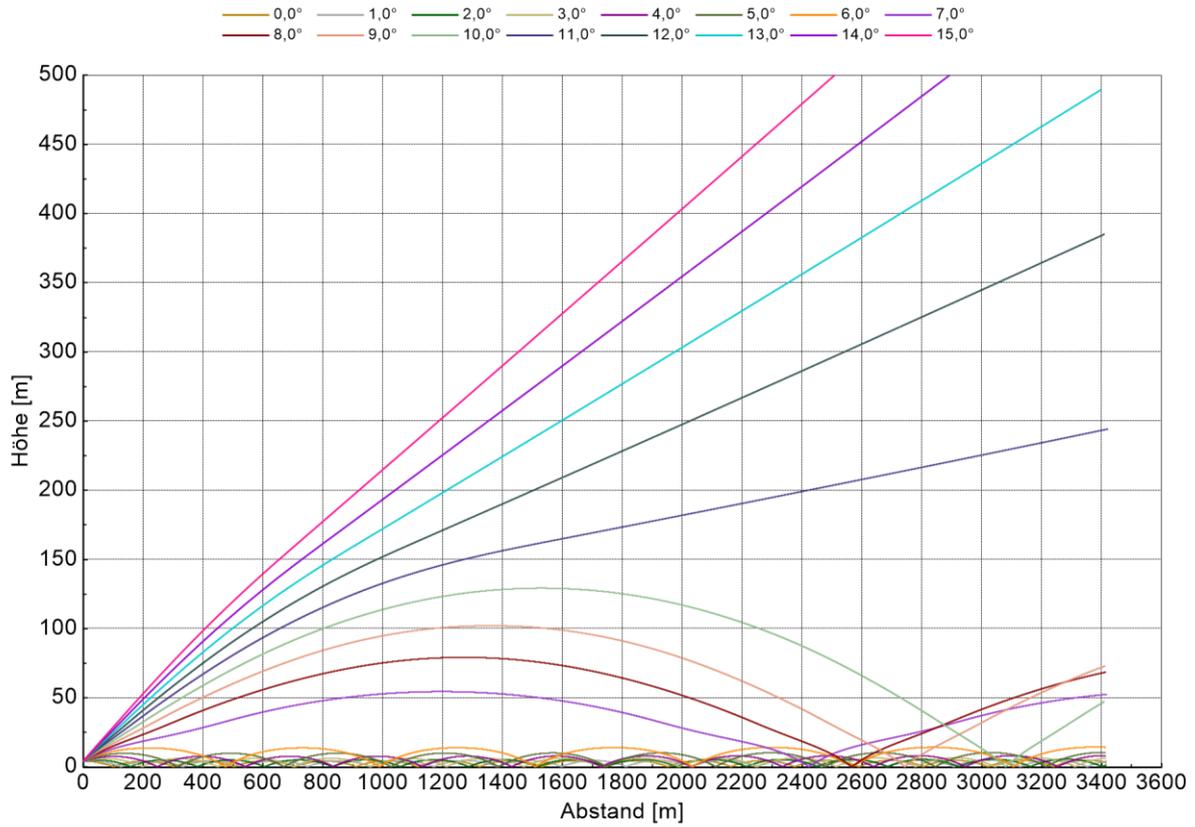


Abbildung 4 Strahlverfolgung bei einer ausgewählten Profilprognose (24.08.2016 00:00 Uhr)
für eine gegebene Quellhöhe (4,0 m), Himmelsrichtung (270°) und Zeitdauer (10 s)
Variation der Strahlerhöhung (positive Erhöhungswinkel)
oben: Vollbild, unten: Ausschnittsvergrößerung für niedrige Höhen

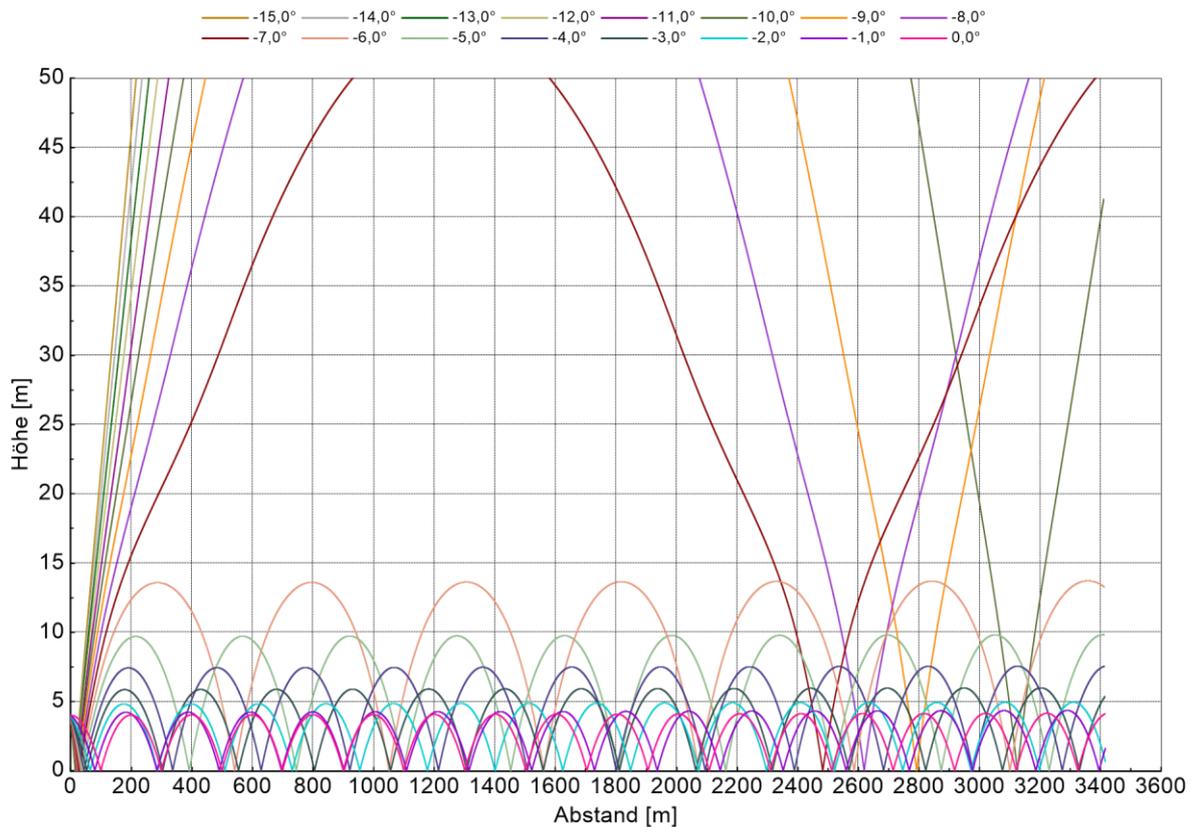


Abbildung 5 Strahlverfolgung bei einer ausgewählten Profilprognose (24.08.2016 00:00 Uhr)
für eine gegebene Quellhöhe (4,0 m), Himmelsrichtung (270°) und Zeitdauer (10 s)
Variation der Strahlerhöhung (negative Erhöhungswinkel)

In Abbildung 4 wird die Strahlerhöhung für positive Winkel variiert. Wiederum wird für bodennahe Strahlen eine entsprechende Ausschnittvergrößerung mitgeliefert. Abbildung 5 ergänzt die Darstellung für negative Erhöhungswinkel. Hier ist bei dem Strahl für -7° deutlich zu erkennen, dass es sich nicht etwa um Kreisstrahlen handelt, sondern dass das Profil strukturiert ist und keine höhenunabhängigen Brechungseigenschaften aufweist.

Abbildung 6 schließlich stellt die Schallausbreitung für unterschiedliche Quellhöhen vor.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die dargestellten Strahlenbündel immer nur für die eingestellten Anfangsbedingungen gelten. Sie kennzeichnen nur einen kleinen Ausschnitt der Strahlen, die von der Quelle natürlich gleichzeitig ausgehen.

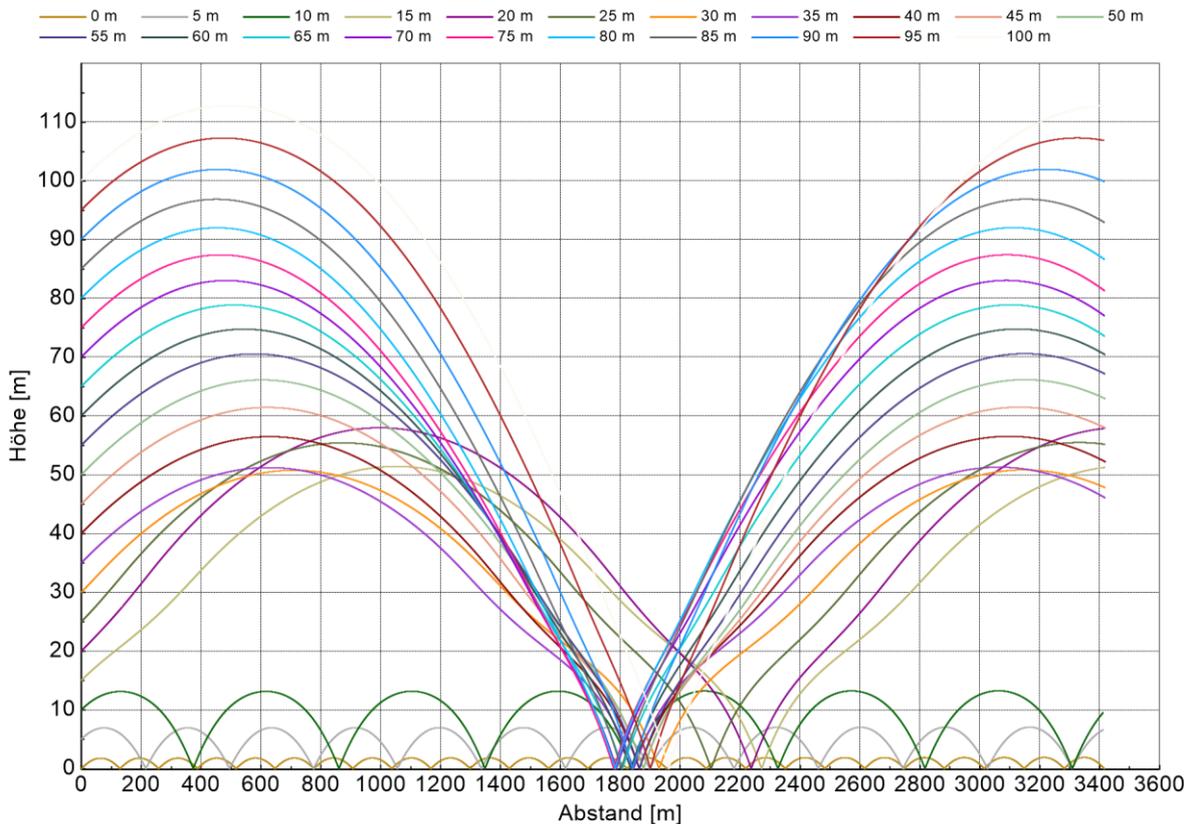


Abbildung 6 Strahlverfolgung bei einer ausgewählten Profilprognose (24.08.2016 00:00 Uhr) für eine gegebene Himmelsrichtung (270°), Strahlerhöhung (3,0°) und Zeitdauer (10 s) Variation der Quellhöhe

2.2 Kreisstrahlnäherung

Die Strahlverfolgung bringt in Abhängigkeit von der Quellhöhe, Himmelsrichtung und der Strahlerhöhung Schallstrahlen hervor, die verschiedenste Verläufe zeigen. Insbesondere bei Inversionswetterlagen, führt die gemeinsame Wirkung von Windprofil und Temperaturprofil zu durchaus unerwarteten Ergebnissen (siehe dbakwh09 „Überreichweiten“). Dennoch legt Abbildung 2 nahe, dass in einem bestimmten horizontalen Winkelbereich, in einem bestimmten vertikalen Winkelbereich für eine gegebene Quellhöhe die Strahlen der Strahlverfolgung durch Kreisstrahlen angenähert werden können.

Und in der Tat, diese Näherung ist in vielen Fällen äußerst erfolgreich.

Der Parameter des Ersatz-Kreisstrahls werden über folgendes einfaches Verfahren bestimmt, siehe Abbildung 7: Zunächst wird der Strahl mit Hilfe des Strahlverfolgungsalgorithmus berechnet. Bei Strahlen mit positiver Krümmung (hier dadurch definiert, dass die Strahlen der Strahlverfolgung den Erdboden mindestens 2-mal erreichen) wird der Kreis durch die beiden ersten aufeinanderfolgenden Reflexionspunkte, P_1 , und P_2 , und durch den Punkt P_3 , in dem der Strahl seine maximalen Höhe erreicht, bestimmt. Der Kreis ist durch diese drei Punkte

vollständig festgelegt. Sein Radius ist der Krümmungsradius des Kreisstrahls; sein Mittelpunkt liegt stets unterhalb des Bodens.

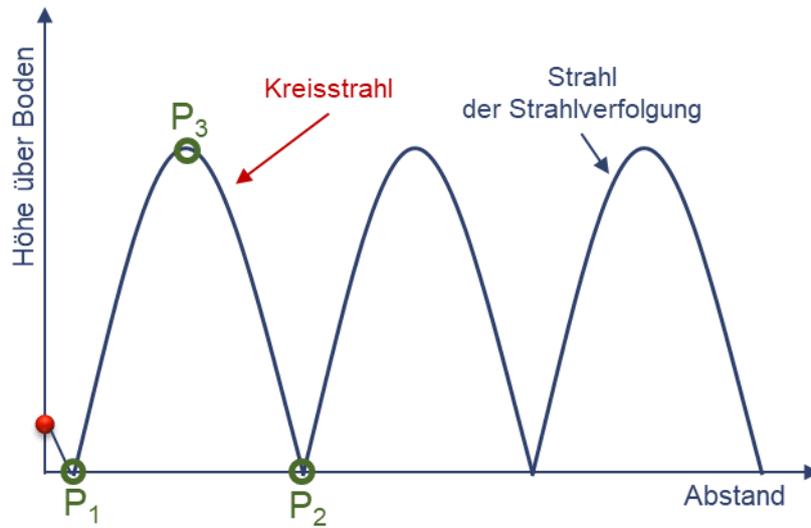


Abbildung 7 Skizze zur Bestimmung des Krümmungsradius der Kreisstrahlnäherung

Da hier eine geschichtete Atmosphäre untersucht wird, ist die Geometrie der Strahlen mit dem Abstand periodisch. Durch eine Korrelationsrechnung über den ersten Bogen kann bestimmt werden, wie gut der Kreisstrahl den Strahl der Strahlverfolgung überall annähert.

3 Festlegung einer Mitwindbedingung

3.1 Mitwindfenster

Grundsätzlich kann man feststellen, dass in den Fällen, in denen es eine Kreisstrahl­näherung nach Kapitel 2.2 gibt, eine ‚Mitwindsituation‘ vorliegt. Die Mitwindsituation kann dann durch den horizontalen und vertikalen Winkelbereich, der zu den Kreisstrahlen gehört und im Folgenden als ‚Mitwindfester‘ bezeichnet wird, gekennzeichnet werden.

Das Mitwindfester ist geometrisch eine Fläche auf der Einheitskugel, durch die alle Strahlen von der Quelle im Mittelpunkt der Kugel gehen, die bei der Strahlverfolgung zu einer periodischen Folge von Bodenreflexionen führen.

Der Krümmungsradius der jeweiligen Kreisstrahl­näherung wird natürlich im Mitwindfenster nicht konstant sein, sondern in Abhängigkeit vom horizontalen Winkel ε und vertikalen Winkel η zu bestimmen sein. Es kann sich je nach Profilprognose ein großer Wertebereich des Krümmungsradius ergeben.

Schaut man allerdings von einem Immissionspunkt auf die Quelle wird nur eine Auswahl aus der Strahlenschar des Mitwindfensters ‚zu sehen‘ sein. Die Auswahl der Strahlen haben zwar alle den gleichen horizontalen Winkel (wegen der Annahme der geschichteten Atmosphäre sind die Strahlen in der Ausbreitungsebene eingesperrt), aber unterschiedliche vertikale Winkel mit den zugehörigen unterschiedlichen Krümmungsradien. Und sie erleben keine (Direktschall), eine oder mehrere Bodenreflexionen, bis sie im Immissionsort ankommen. Es gibt also nicht den einen Mitwindstrahl von der Quelle zum Immissionspunkt.

3.2 DIN-ISO-9613-kompatible Mitwindbedingung für Kreisstrahlen

In Kreisstrahlenmodellen, siehe z. B. [7] wird der Auswahl der Strahlen ein fester Krümmungsradius zugeordnet. Kreisstrahlenmodelle lassen sich deshalb durch eine Engführung der hier diskutierten Modellvorgstellung ableiten. Auch das das Modell der DIN ISO 9613-2 ist – wenn man will – ein Kreisstrahlenmodell, das noch einen Schritt weitergeht: Es begrenzt die Strahlenschar auf alle Strahlen, die keine oder höchstens eine Bodenreflexion erleben.

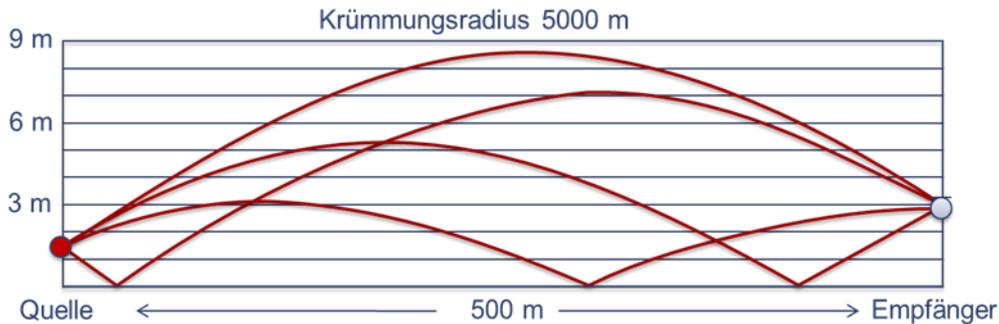


Abbildung 8 Skizze zum Strahlenmodell der DIN ISO 9613-2, nach HIRSCH [3]

Um die Mitwindbedingung der DIN ISO 9613-2 im Schallwetter abzubilden, ist zwar die oben abgeleitete Bedingung (Kreisstrahlen mit einem Mittelpunkt unterhalb der Erdoberfläche, mindestens zwei Bodenreflexionen auf dem gesamten Ausbreitungspfad ins Unendliche und – um es vollständig zu formulieren – einem höchsten Punkt des Strahls, der höher ist als die Quellhöhe) notwendig aber nicht hinreichend, wenn man die Mitwindbedingung für einen Immissionspunkt definieren will. Es kommt noch die Bedingung der DIN ISO 9613-2 hinzu, dass nur die Strahlen mit den Krümmungsradien zu betrachten sind, die keine oder nur eine Bodenreflexion erleben. Diese vollständige Mitwindbedingung liegt im Folgenden zugrunde.

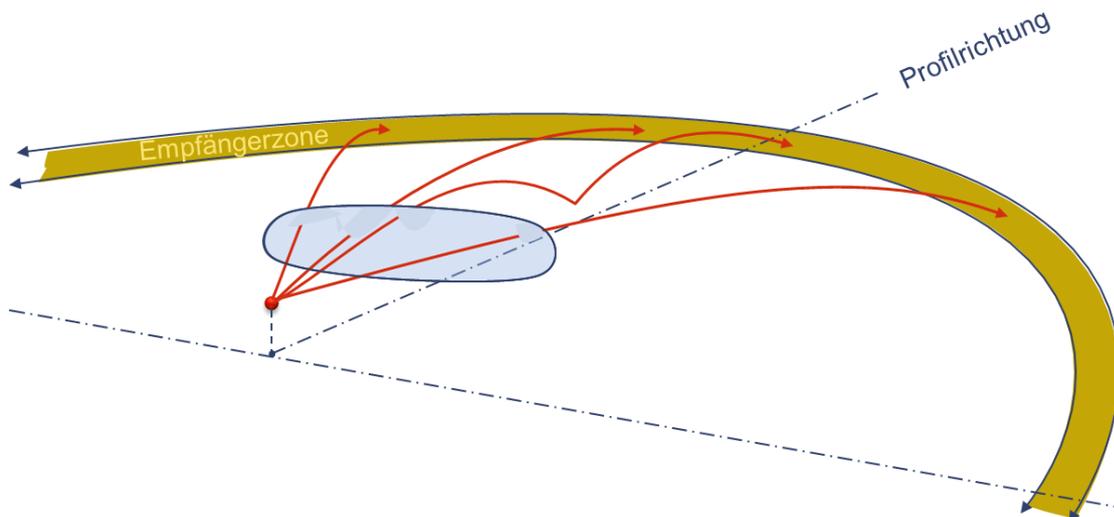


Abbildung 9 Skizze zur Veranschaulichung des Mitwindfensters für eine gegebene Empfängerzone

Weiterhin wird im Folgenden der Immissionspunkt durch eine so genannte Empfängerzone ersetzt. Die Empfängerzone ist ein Ring um die Quelle mit einem bestimmten Anfangs- und Endabstand (innerer bzw. äußerer Radius des Rings). Abbildung 9 skizziert die Vorstellung der Ausbreitungsgeometrie.

Anmerkung

Die Profilrichtung ist die Himmelsrichtung des Bodenwindes (typisch die niedrigste Höhe des Windprofils).

3.3 Diskretisierung – Numerischer Zugang zur Mitwindbedingung

3.3.1 Numerische Umsetzung

Die konkrete Berechnung von Schallausbreitungsbedingungen nach dem vorgestellten Konzept der Mitwindbedingung benötigt Festlegungen zur numerischen Umsetzung. Natürlich wäre es ideal, eine Empfängerzone als unendlich schmalen Ring (Empfängerkreis) zu betrachten und das Mitwindfenster tatsächlich als eine geschlossene Kurve auf der Einheitskugel anzugeben. Dazu wäre eine Berechnung erforderlich, im Rahmen eines Suchalgorithmus die Strahlen ermittelt, die im Empfängerkreis bei einer bestimmten Empfängerhöhe ankommen. Diese Aufgabe hätte einen sehr großen Rechenaufwand zur Folge, der auf einem handelsüblichen Computer kaum abzubilden wäre. Zusätzlich muss auch noch das Mitwindfenster bestimmt werden; d. h. diese Berechnung muss für jede Himmelsrichtung erfolgen.

Anmerkung

Schon bei einem Kreisstrahlenmodell mit dem vorgegebenen, konstanten Krümmungsradius ist diese Aufgabe für jeden Punkt vom Rang einer komplexwertigen Nullstellensuchaufgabe.

Es ist deshalb erforderlich die Berechnung zu diskretisieren und auch die Kenngrößen für das Mitwindfenster, die Empfängerzonen zu klassieren, die Angaben zu den Krümmungsradien im Mitwindfenster zu definieren und die Quellhöhe festzulegen. Dazu werden die im Folgenden niedergelegten Verabredungen getroffen.

3.3.2 Diskretisierung der Empfängerzonen

Die Empfängerzonen schließen dicht aneinander an; sie sind bis 2000 m gerade 200 m breit, ab 2000 m 1000 m breit und werden durch eine letzte Zone von 5000 m bis 1000 m abgeschlossen. Die Empfängerzonen werden in Diagrammen durch ihren mittleren Radius gekennzeichnet.

	1	2	3
1	Name	innerer Radius	äußerer Radius
2		m	m
3	100 m	0	200
4	300 m	200	400
5	500 m	400	600
6	700 m	600	800
7	900 m	800	1000
8	1100 m	1000	1200
9	1300 m	1200	1400
10	1500 m	1400	1600
11	1700 m	1600	1800
12	1900 m	1800	2000
13	2500 m	2000	3000
14	3500 m	3000	4000
15	4500 m	4000	5000
16	7500 m	5000	10000

Tabelle 1 Bezeichnung und Bedeutung der Empfängerzonen

3.3.3 Diskretisierung des Mitwindfester

Das Mitwindfenster ist grundsätzlich eine durch eine stetige Kurve begrenzte Fläche auf der Einheitskugel um die Quelle. Die geometrische Diskretisierung (kennzeichnende Abtastung) des Mitwindfensters erfolgt hier durch 6 Punkte auf der Einheitskugel um die Quelle und die geraden Verbindungen zwischen ihnen.

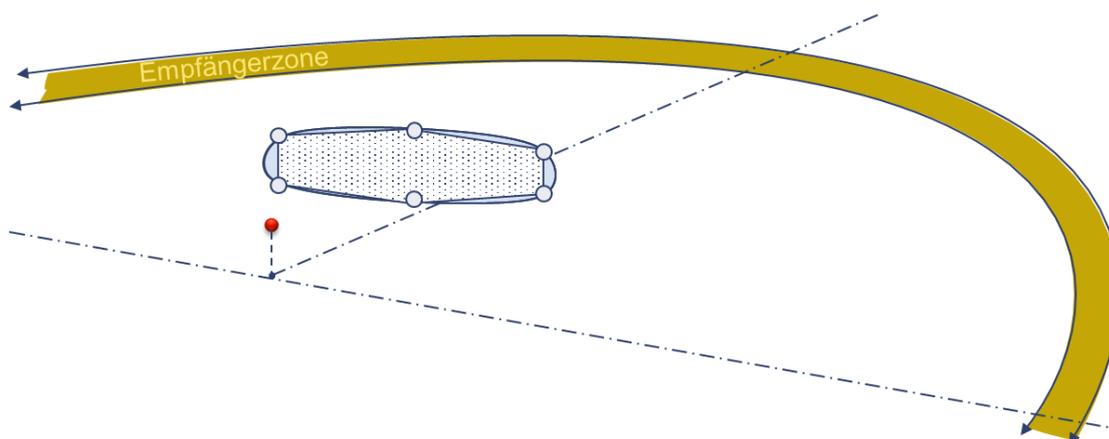


Abbildung 10 Skizze zur Kennzeichnung des Mitwindfensters durch 6 Punkte auf der Einheitskugel

Die Punkte werden durch den horizontalen Winkel ε (als Himmelsrichtung) und den vertikalen Winkel η (die Erhöhung) definiert. Bei der numerischen Umsetzung der Diskretisierung wird der horizontale Winkel mit einer Klassenbreite von 1° und der vertikale Winkel mit einer

Klassenbreite von $0,5^\circ$ bestimmt. Diese Klassenbreite begrenzt die Genauigkeit der Angaben grundsätzlich.

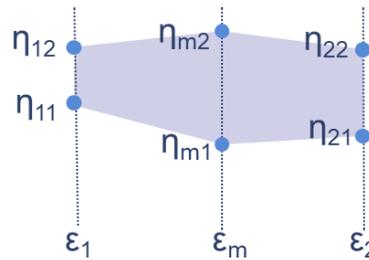


Abbildung 11 Bezeichnung der Winkel zur Kennzeichnung des Mitwindfensters

3.3.4 Angaben zum Krümmungsradius

Für die 6 eingeführten diskreten Begrenzungspunkte des Mitwindfensters wird der Krümmungsradius $R(\epsilon, \eta)$ bestimmt. Es wird angenommen, dass sich die Krümmungsradien innerhalb des Mitwindfensters durch Interpolation im Mittel aus diesen 6 Krümmungsradien ermitteln lassen.

Anmerkung

Diese Interpolationsannahme wird numerisch bei der Berechnung dadurch geprüft, dass die Krümmungsradien hilfsweise auch bei der jeweils mittleren Erhöhung berechnet werden. Die Annahme der Interpolation wird durchweg durch diese Bedingung bestätigt.

Für die angestrebte Schätzung der Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius ist es erforderlich, für das Mitwindfenster einen Einzahlwert für den Krümmungsradius anzugeben. Dieser Einzahlwert R_m wird im Folgenden durch eine gewichtete Mittelwertbildung über die Krümmungsradien an den 6 Begrenzungspunkten des Mitwindfensters ermittelt.

$$R_m = \frac{1}{8} \{ R(\epsilon_1, \eta_{12}) + R(\epsilon_1, \eta_{11}) + 2R(\epsilon_m, \eta_{m2}) + 2R(\epsilon_m, \eta_{m1}) + R(\epsilon_2, \eta_{22}) + R(\epsilon_2, \eta_{21}) \} \quad \text{Gl. 1}$$

Die Erfahrung belegt, dass Mitwindfenster bei typischen Atmosphären in der Mitte eher höher sind als am linken und rechten Rand. Die Krümmungsradien bei ϵ_m werden deshalb in der Regel eine größere Fläche repräsentieren als die Radien an den Rändern. Bei der arithmetischen Mittelung über alle Radien nach Gl. 1 gehen diese Radien deshalb mit doppeltem Gewicht ein.

Das Mitwindfenster wird im Folgenden durch zwei weitere pauschalere Kenngrößen beschrieben: Seine Breite und seine Höhe.

Die Breite $\Delta\epsilon$ des Mitwindfensters, die auch als Mitwindsektor bezeichnet wird, ist definiert als Differenz der Himmelsrichtungen ‚links‘ und ‚rechts‘ des Mitwindfensters, siehe Gl. 2.

$$\Delta\epsilon = \epsilon_2 - \epsilon_1 \quad \text{Gl. 2}$$

Die Breite des Mitwindsektors spielt in technischen Normen durchaus eine Rolle. Angaben dazu sind aber beispielsweise in der VDI 3745 Blatt 1 mit 90° bzw. 120° ($\pm 45^\circ$ bzw. $\pm 60^\circ$ um die Mitwindrichtung) zu finden. In der DIN ISO 9613-2 spielt der Mitwindsektor keine Rolle. Allerdings wird bei der Bestimmung des C_{met} durch die behördliche Vorgabe des c_0 häufig unterstellt, dass es zu einem Mitwindsektor von 90° einen entsprechenden Gegenwindsektor und zwei Querwindsektoren zu je 90° gibt. Eine pauschale Schätzung des c_0 geht dann davon aus, dass im Gegenwindsektor der Pegel um 10 dB und in den beiden Querwindsektoren der Pegel um 5 dB kleiner ist als im Mitwindsektor.

Die Höhe $\Delta\eta$ des Mitwindfensters wird hier durch Gl. 3 als gewichteter Mittelwert der Erhöhungswinkel definiert. Für die Gewichtung gilt die entsprechende Begründung wie bei der Einzahlbildung des Krümmungsradius.

$$\Delta\eta = \frac{1}{4} \{ (\eta_{12} - \eta_{11}) + 2(\eta_{m2} - \eta_{m1}) + (\eta_{22} - \eta_{21}) \} \quad \text{Gl. 3}$$

Die Höhe des Mitwindfensters spielt in keiner technischen Norm eine Rolle. Sie wird hier aus Gründen der Vollständigkeit dennoch untersucht. Die Höhe des Mitwindfensters könnte allerdings bei einer groben Schätzung von Immissionspegel Bedeutung erlangen. Es liegt auf der Hand, dass unterschiedliche Höhen meteorologische Korrekturen begründen können.

3.3.5 Festlegung der Quellhöhe

Die Quellhöhe ist ein entscheidender Parameter für die gesamte Berechnung. Diese Höhe bestimmt den Eintritt aller Strahlen in das bodennahe Profil des Schallgeschwindigkeitsgradienten. Hier wird eine typische Quellhöhe von 4 m für Quellen des Gewerbe- und Industrielärm untersucht.

Anmerkung

Die Empfindlichkeit der Aussagen im Hinblick auf die Quellhöhe ist eine Aufgabe, die später in Angriff genommen werden soll.

4 Berechnung der geometrischer Kenngrößen

4.1 Die Grundgesamtheit der Daten

Die hier diskutierten Untersuchungen und vorgelegten Ergebnisse gelten für einen Ort im Münsterland. Dieser Ort ist im Hinblick auf die Profilprognosen des Schallwetters zumindest annähernd repräsentativ für das norddeutsche Flachland. Eine Übertragung auf Orte in Mittelgebirgslagen oder Orte in Küstennähe oder Orte im Alpenvorland ist nicht sachgerecht. Das Schallwetter zeigt dort andere Charakteristiken.

Anmerkung

Grundsätzlich können diese Auswertungen auch für andere Ort (auch an der Küste, in Mittelgebirgslagen und im Alpenvorland durchgeführt werden. Entsprechende Zeitreihen der Profilprognosen stehen der Cervus Consult zur Verfügung.

Für den gewählten Ort liegen für mehrere Jahre die stundenspezifischen Profilprognosen vor. Dennoch wird hier lediglich ein bestimmter Zeitraum (24.08.2016 bis 22.08.2017) ausgewählt, weil dieser Ort und dieser Zeitraum auch schon anderswo (beispielsweise bei der grundsätzlichen Untersuchung zu Überreichweiten (dbakwh09) verwendet wurde. Darüber hinaus wäre eine Betrachtung der Werte des gesamten zur Verfügung stehenden Beobachtungszeitraums äußerst aufwendig.

Anmerkung

Bereits für den gewählten Zeitraum beträgt die Gesamtrechenzeit zu Ermittlung der Kenngrößen des Mittwindfensters und der Krümmungsradien knapp 2 Wochen auf einem für numerische Rechnungen ausgelegten Computer.

Die Grundgesamtheit der Daten sind 8727 zeitlich zusammenhängende stundenspezifische Profilprognosen dem Zeitraum vom 24.08.2016 bis 22.08.2017 für einen Ort im Münsterland. In diesem Profilprognosen gibt es einige wenige ‚Missing Values‘ im Wind- oder Temperaturprofil (insgesamt ca. 25 Stunden).

Anmerkung

Wie schon anderswo festgestellt, werden die Profilprognosen nicht hinterfragt; sie wurden von Meteomedia bzw. MeteoGroup, einem renommierten Wetterdienst, nach einem dafür speziell entwickelten Algorithmus in den Wettermodellen zur Verfügung gestellt.

4.2 Mittlerer Krümmungsradius für jede Stunde der Grundgesamtheit

Die vorgestellten Untersuchungen verlassen sich darauf, dass die Kreisstrahlennäherung eine hinreichend zuverlässige Beschreibung der Schallausbreitung in Mitwindsituationen liefert. Die Analyse der Korrelationskoeffizienten erlaubt eine Aussage dazu.

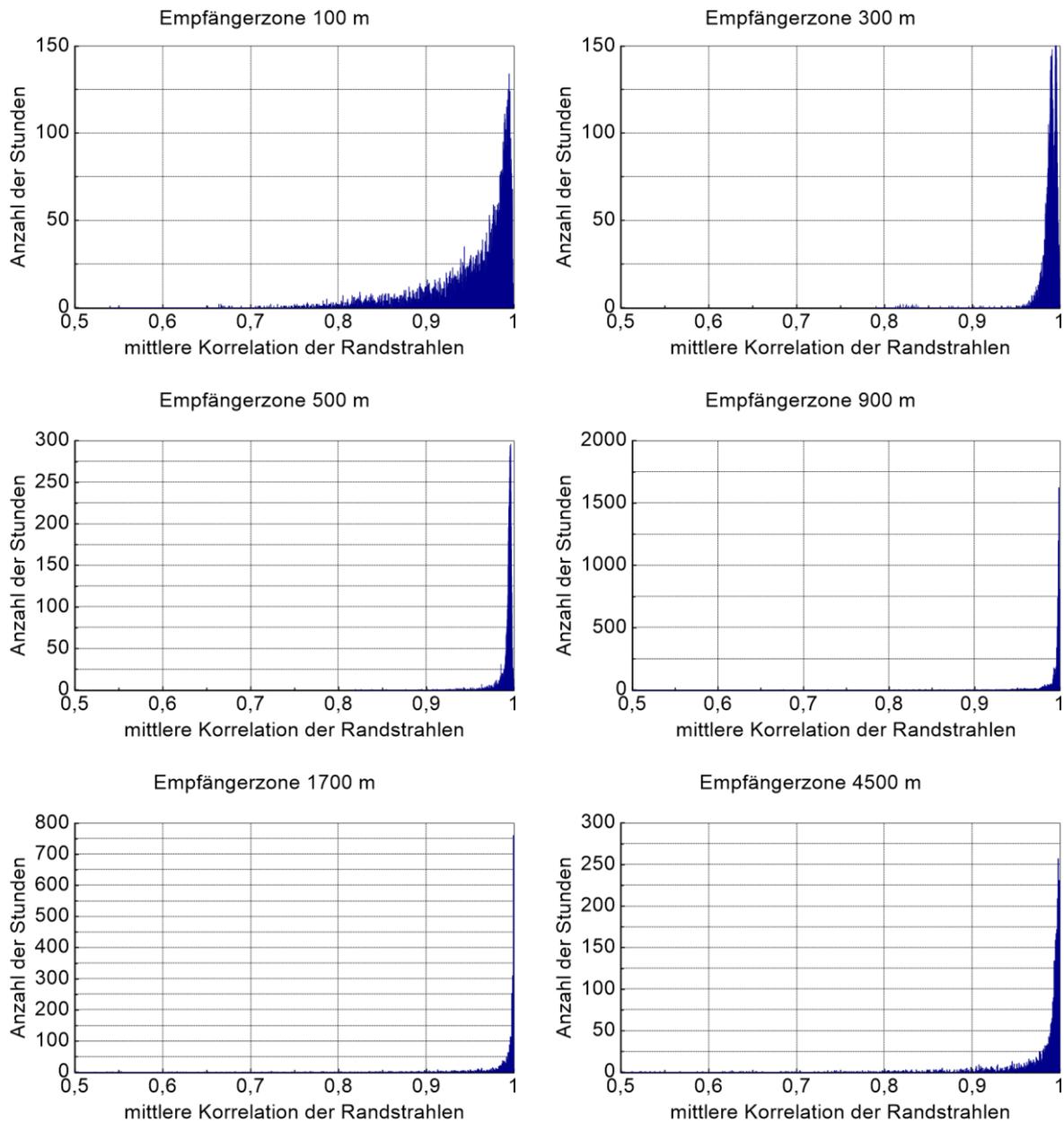


Abbildung 12 Histogramme des Korrelationskoeffizienten der Kreisstrahl­näherung für ausgewählte Empfängerzonen (Grundgesamtheit)

Anmerkung

Die Mitwindbedingung grenzt abstandsabhängig Stunden aus, weil mit den erläuterten Suchkriterien dort kein Mitwindfenster gefunden werden konnte. Es sind Stunden, bei denen in der betrachteten Empfängerzone in alle Richtungen scheinbar eine ungünstige Schallausbreitung vorherrscht. Die Gesamtanzahl der Stunden kann in den Abbildungen deshalb variieren.

Die Diagramme der Abbildung 13 belegen, dass eine Kreisstrahl­näherung für die überwiegende Anzahl der Mitwindsituationen ein exzellenter Ersatz für die Strahlsignatur der Strahlverfolgung ist. Diese Analyse ist ein starker Hinweis dafür, dass Kreisstrahlenmodelle in vielen Fällen zuverlässig Pegelprognosen liefern können.

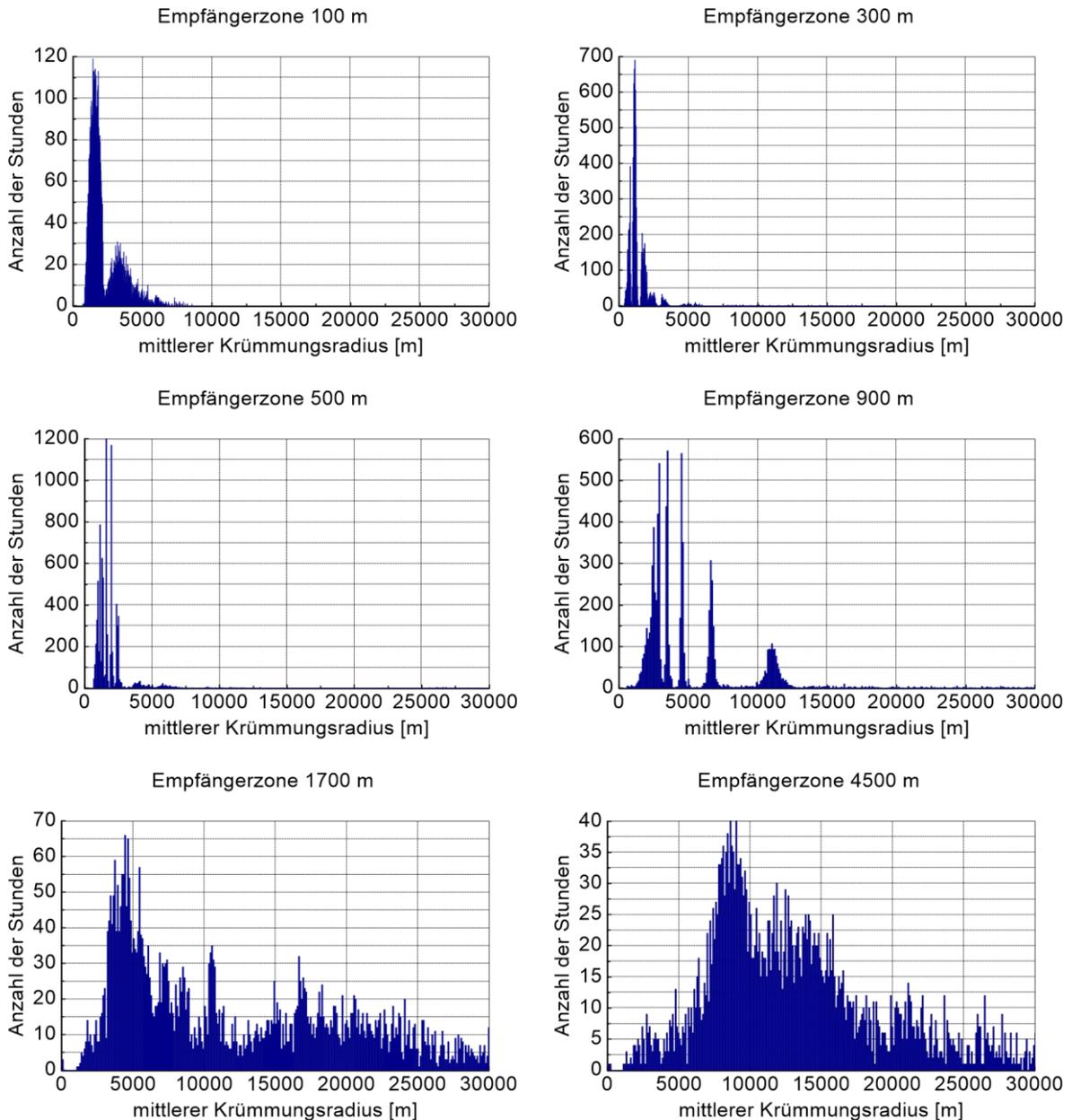


Abbildung 13 Häufigkeitsverteilung der Krümmungsradien der Kreisstrahl­näherung für ausgewählte Empfängerzonen (Grundgesamtheit)

Die Diagramme in Abbildung 13 zeigen zunächst, dass die Verteilung der Krümmungsradien keineswegs einer einhöckrigen Verteilung oder gar einer GAUßschen Verteilung nahekomen. Es gibt Radien, die signifikant häufiger vorkommen als andere. Die Häufungspunkte sind abstandsabhängig. Die Häufungspunkte sind auch der hier angewendeten Mitwindbedingung geschuldet, die entweder keine oder eine Bodenreflexion verlangt, um als schallausbreitungsgünstig zu gelten.

4.3 Berechnung der Breite des Mitwindfensters

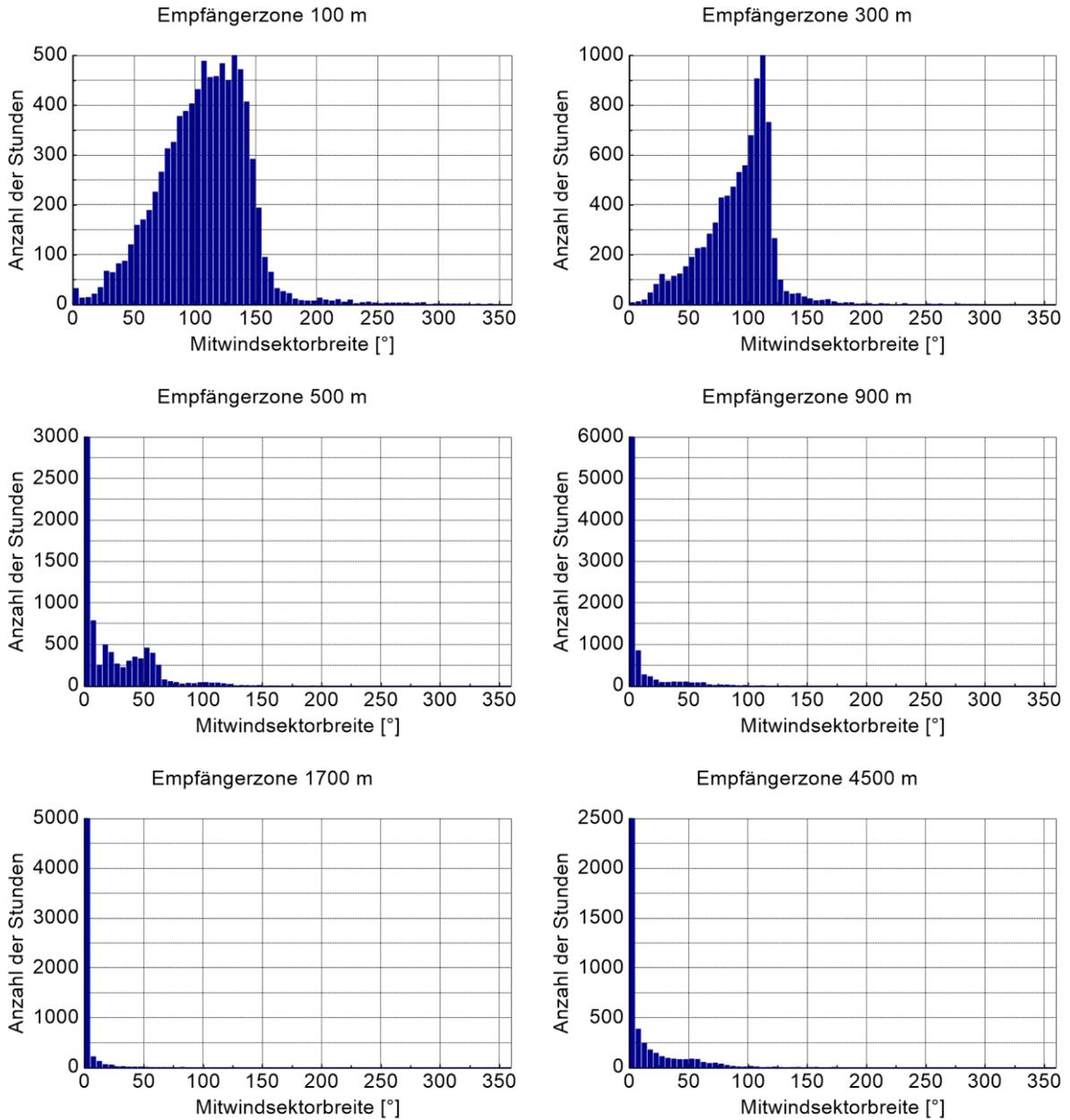


Abbildung 14 Häufigkeitsverteilung der Mitwindsektorbreite für ausgewählte Empfängerzonen (Grundgesamtheit)

Abbildung 14 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Breite des Mitwindsektors. Ab der Empfängerzone 500 m zieht sich der Mitwindsektor signifikant zusammen. Berechnung der mittleren Höhe des Mitwindfensters

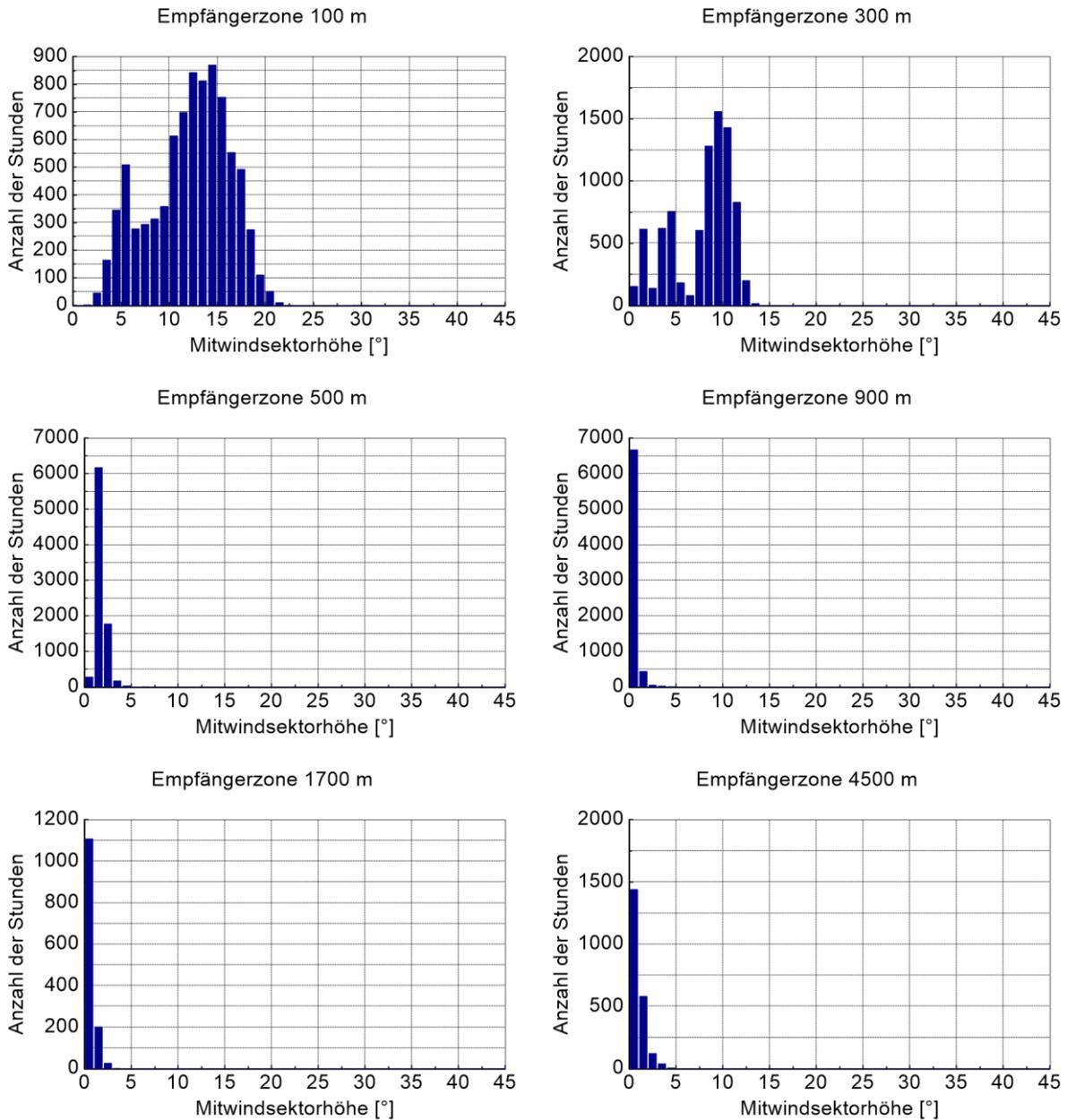


Abbildung 15 Häufigkeitsverteilung der Mitwindsektorhöhe für ausgewählte Empfängerzonen (Grundgesamtheit)

Abbildung 15 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der mittleren Höhe des Mitwindsektors. Auch dieses Maß wird signifikant kleiner mit wachsendem Abstand. Insgesamt lässt sich deshalb sagen, dass die Fläche des Mitwindsektors mit zunehmendem Abstand immer kleiner wird. Es kommen also häufig nur sehr wenige Strahlen dort an. Das heißt nicht, dass der Immissionspegel dort unerwartet klein sein sollte. Das Ergebnis zeigt nur auf, dass Direktschall und Schallbeiträge mit einer Bodenreflexion einen äußerst begrenzten Winkelbereich haben. Strahlen mit Mehrfachreflexionen werden dort eher die Immission prägen

5 Berechnung der Abstandsabhängigkeit

5.1 Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius

Die Ermittlung der Abstandabhängigkeit des Krümmungsradius ist ein wesentliches Ziel dieser Untersuchungen. Da diese Abhängigkeit Einfluss auf schalltechnische Untersuchungen haben kann, wird die Abstandabhängigkeit für verschiedene Beurteilungszeiten berechnet und dargestellt. Die Bezeichnung ‚ganztäglich‘ in den folgenden Abbildungen beinhaltet die Analyse für die Grundgesamtheit.

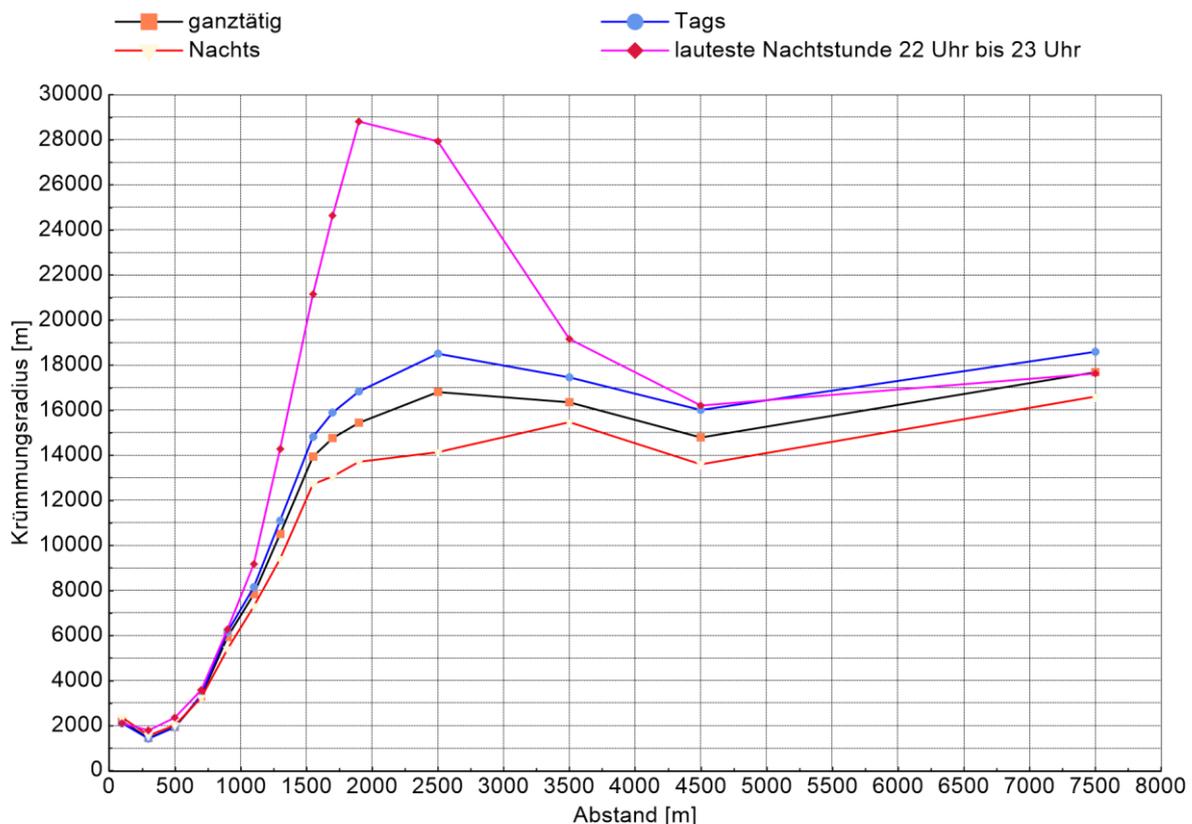


Abbildung 16 Abstandsabhängigkeit des mittleren Krümmungsradius für die Grundgesamtheit (ganztäglich) und häufig benötigten Beurteilungszeiten

Abbildung 16 zeigt die Abstandsabhängigkeit des mittleren Krümmungsradius über alle untersuchten Empfängerzonen. Die Krümmungsradien beginnen in den nahen Zonen im Bereich 2000 m um dann grob proportional zum Abstand anzusteigen und sich danach nahezu konstant bei einem Radius im Bereich 15000 m abstandsunabhängig zu bewegen.

Das gilt für alle Beurteilungszeiten gleichermaßen. Die lauteste Nachtstunde weicht von diesem Verhalten ab ca. 1000 m ab. Man könnte vermuten, dass zu dieser Stunde häufig leichte schwachwindige Inversionswetterlagen das Brechungsverhalten der Atmosphäre prägen.

Abbildung 17 vergrößert den Ausschnitt der Abbildung 16 auf den für die Betrachtung im Hinblick auf das Rechenverfahren der DIN ISO 9613-2 besonders wichtigen Abstandsbereich. Bei ca. 850 m wird der Krümmungsradius von 5000 m erreicht. Eine signifikante Unterscheidung zwischen den Beurteilungszeiten ist bis 1000 m Abstand nicht abzuleiten.

Will man tatsächlich eine technische Lösung für einen abstandsabhängigen Krümmungsradius einführen, scheint im Bereich bis 1000 m (nur bis zu diesem Abstand sollte das Rechenverfahren der DIN ISO 9613-2 ohne Weiteres angewendet werden) eine quadratische Gleichung hinreichend zuverlässig die Abstandsabhängigkeit annähern zu können.

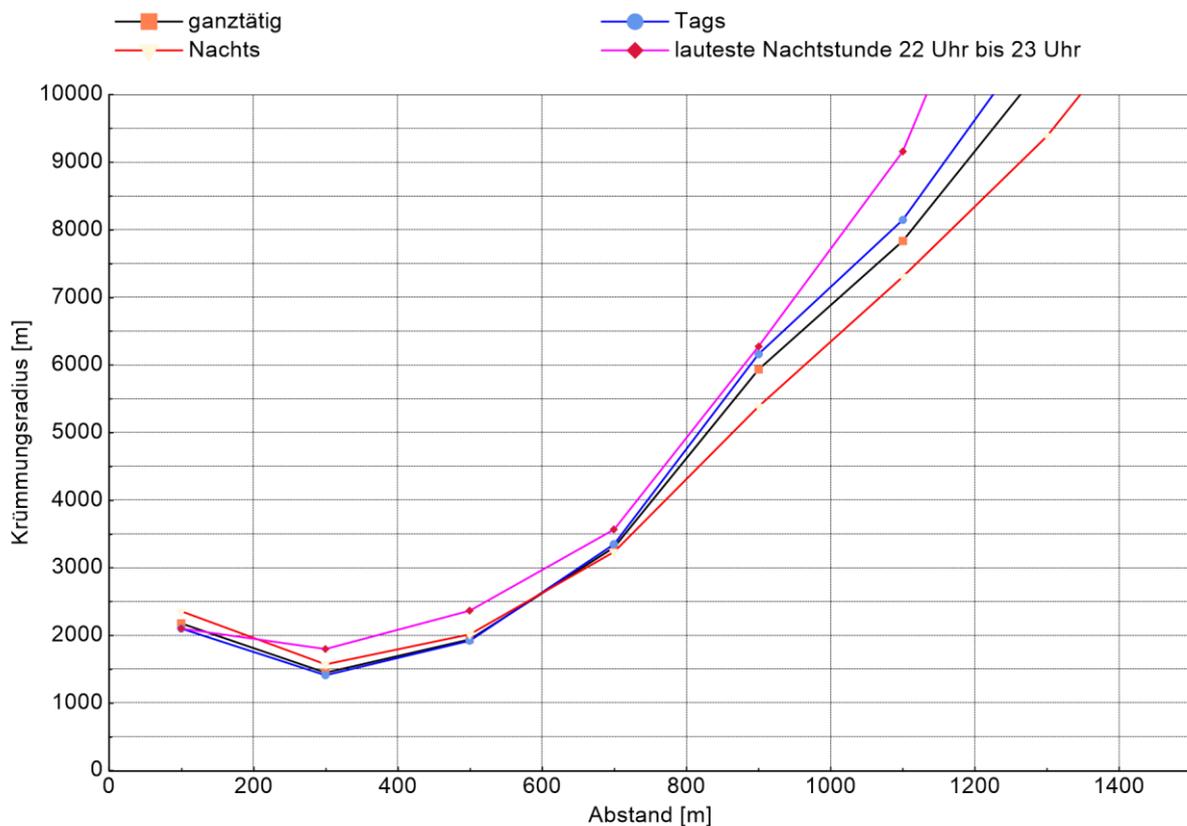


Abbildung 17 Abstandsabhängigkeit des mittleren Krümmungsradius für die Grundgesamtheit (ganztägig) und häufig benötigten Beurteilungszeiten relevanter Ausschnitt für die DIN ISO 9613-2

Folgende Näherung, Gl. 4, erlaubt eine sachgerechte Schätzung des mittleren Krümmungsradius im Abstandsbereich der DIN ISO 9613-2

$$\begin{aligned}
 R(d) &= 2200\text{ m} - 3d + 0,007d^2 && \text{für } d < 1500\text{ m} \\
 R(d) &= 15000\text{ m} && \text{für } d \geq 1500\text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 4}$$

Die Näherung ist grob, aber sie gibt einen praktischen Hinweis dafür, wie eine Abstandsabhängigkeit eingeführt werden könnte. Für den gesamten Wertebereich käme eher eine Sigmoid-Funktion infrage. Physikalisch begründen lässt sich die Vorgehensweise nicht.

	1	2
1	Abstand	Näherung Gl. 4
2	m	m
3	0	2200
4	100	1970
5	200	1880
6	300	1930
7	400	2120
8	500	2450
9	600	2920
10	700	3530
11	800	4280
12	900	5170
13	1000	6200
14	1100	7370
15	1200	8680
16	1300	10130
17	1400	11720
18	1500	13450
19	1600	15000
...	...	15000

Tabelle 2 Tabellarische Dokumentation der Näherung nach Gl. 4 für die Abstandsfunktion des Krümmungsradius in der DIN ISO 9613-2

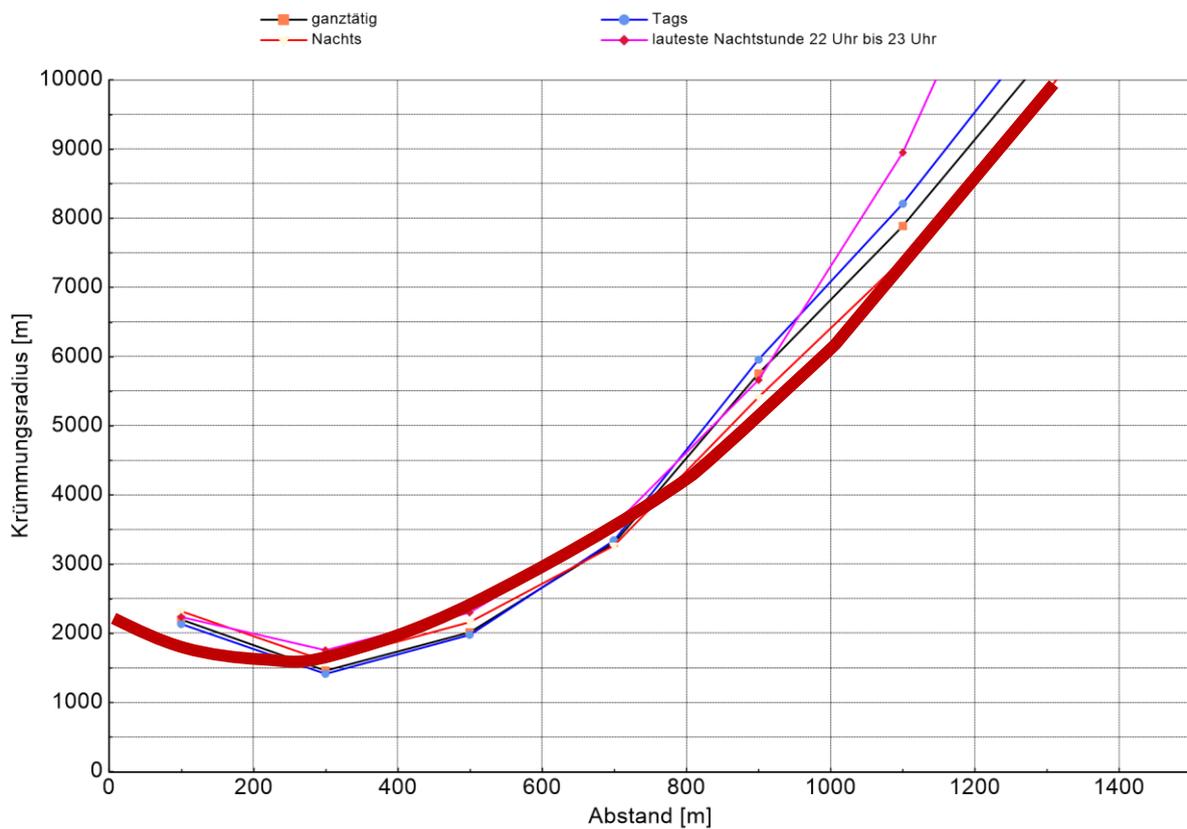


Abbildung 18 Abstandsabhängigkeit des mittleren Krümmungsradius mit (grob) eingetragener Näherung nach Gl. 4 für den relevanten Ausschnitt für die DIN ISO 9613-2

5.2 Abstandsabhängigkeit der Mitwindfensterbreite (Mitwindsektor)

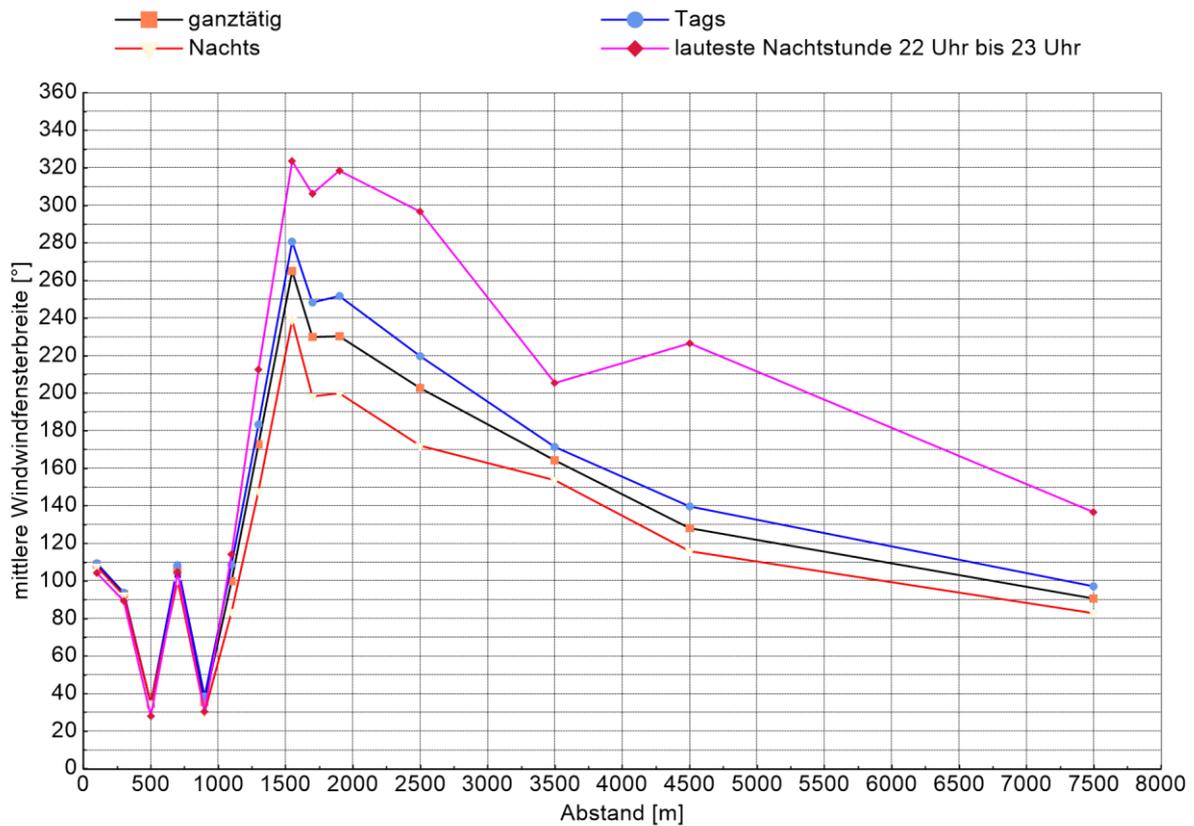


Abbildung 19 Abstandsabhängigkeit der Mitwindfensterbreite für die Grundgesamtheit (ganztägig) und häufig benötigten Beurteilungszeiten

Abbildung 19 zeigt die Abstandsabhängigkeit der Breite des Mitwindsektors. Das Ergebnis kann zurzeit nicht interpretiert werden. Vermutlich führt die restriktive Mitwindbedingung zu den unerwarteten Effekten im Nahbereich. Ein Einfluss der Tageszeit ist im Nahbereich nicht festzustellen.

5.3 Abstandsabhängigkeit der Mitwindfensterhöhe

Abbildung 20 dokumentiert die Abstandsabhängigkeit der Höhe des Mitwindfensters. Sie fällt rapide bereits auf den ersten 500 m auf unter 1° .

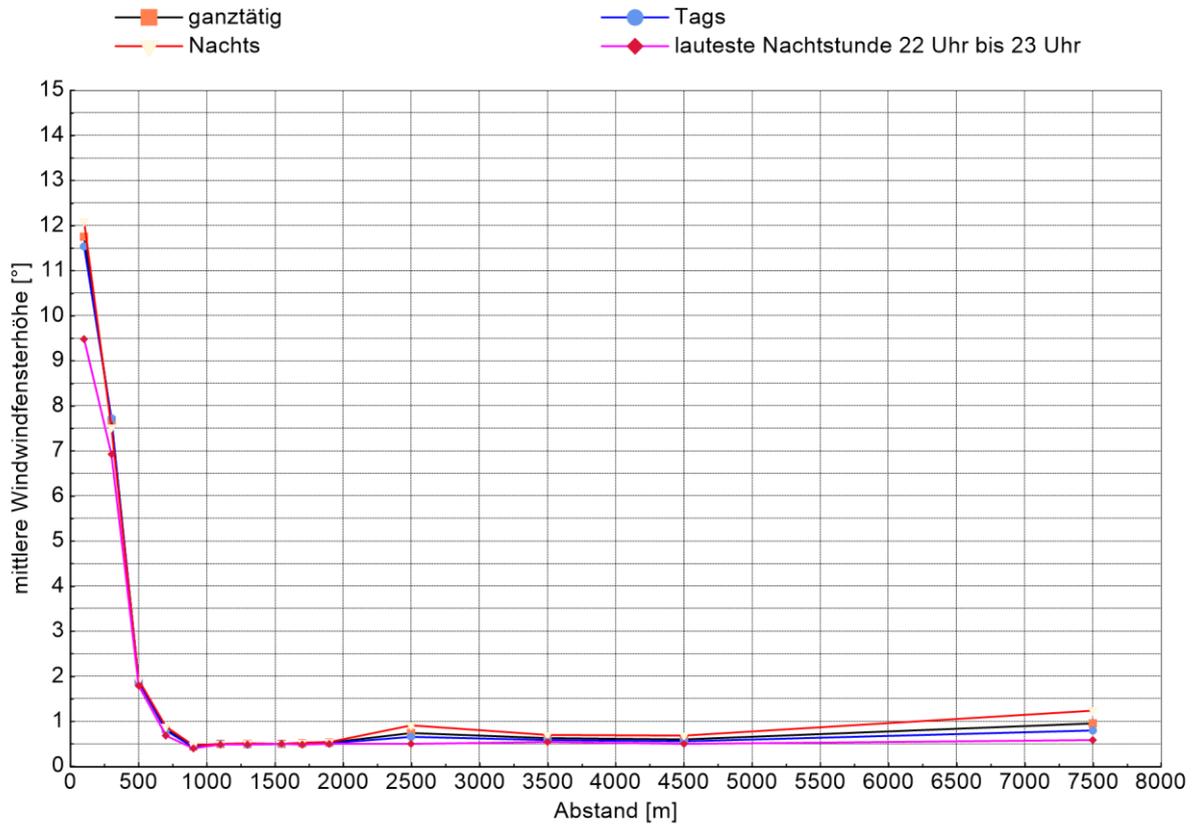


Abbildung 20 Abstandsabhängigkeit der Mitwindfensterhöhe für die Grundgesamtheit (ganztäglich) und häufig benötigten Beurteilungszeiten

6 Zur Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius in der Norm

Die Analyse des mittleren Krümmungsradius für günstige Schallausbreitungsbedingungen in Anlehnung an das Verständnis der DIN ISO 9613-2 für diese Ausbreitungssituationen zeigt eine signifikante Abstandsabhängigkeit. Um sie grob zu charakterisieren: Im Nahbereich bis 300 m ergibt sich ein Krümmungsradius im Bereich 2000 m. Erst für (die Norm) große Abstände ab 800 m ergeben sich 5000 m als sachgerechter Krümmungsradius.

Man kann die oben abgeleitete grobe Näherung nutzen, um eine Abstandsabhängigkeit einzuführen. Die kleineren Krümmungsradien werden bei der Anwendung der DIN ISO 9613-2 im Nahbereich bis 300 m bei der Berechnung der Schirmgeometrie zu ‚leicht‘ geringeren Schirmwirkungen führen. Bei mittleren bis großen Abständen (‚groß‘ im Sinne der Norm) ist ein Radius von 5000 m sachgerecht.

Insgesamt ist allerdings die grundsätzliche Einführung von Kreisstrahlen bei der Schirmrechnung der eigentliche Paradigmenwechsel. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen auf, dass die Kreisstrahlennäherung eine hinreichend zuverlässige Näherung für die bodennahe Schallausbreitung in einer geschichteten Atmosphäre darstellt. Eine Strahlverfolgung mit ‚höherwertigen‘ physikalischen Modellen bringt zwar Erkenntnisfortschritte in besonderen Fällen, für den Regelfall gilt das aber sicher nicht.

Aus Sicht der Qualitätssicherung sollte nach Auffassung des Autors auf die Einführung einer Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius verzichtet werden. Die Abstandsabhängigkeit bringt eine Unsicherheit ein, weil die Abstandsabhängigkeit von der Topographie und den Wetterbedingungen abhängt und die Bestimmung anhand des Einzelfalls mit dem Schallwetter erfolgen könnte.

Zudem würde die Präzision notwendigerweise verringert, weil jede zusätzlich erlaubte Modifikation Einfluss auf das numerische Rechenverfahren hat.

7 Verweise

- [1] DIN ISO 9613:1999-10, Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien
- [2] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm), 26.08.1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503)
- [3] Hirsch, K.-W.: „Zur Vorausberechnung von Schießgeräuschen mit der Norm DIN ISO 9613“, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Bd. 8 (2013)3
- [4] VDI 3745 Blatt 1, Beurteilung von Schießgeräuschimmissionen, Mai 1993
- [5] Hirsch, K.-W.: „Grundlagen und Anwendungen des Schallwetters“, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Bd. 9 (2014)6
- [6] Zangers, J.; Hirsch, K.-W.: „Ray-Tracing in in einem 3-D Wind-Vektor-Feld zur Vorhersage von Schießlärm“, Fortschritte der Akustik, CFA/DAGA 2004, Straßburg
- [7] Hirsch, K.-W.; Bertels, W.: Schallschutzmaßnahmen in der Nähe von Schießgeräuschquellen“, Fortschritte der Akustik, DAGA 2012, Darmstadt

8 Über „Bella Acustica – De Bello Acustico“



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

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

Stand	I	Idee	erste Skizze	---	E	Entwurf	kurz vor druckreif	web
	F	Fragmente	erste Abschnitte oder Kapitel	---	D	Druck	Druckversion	web
	K	Konzept	Konzept ohne Sprachprüfung	web				

Impressum

Autor
Urheberrecht
Zitierhinweis
Verfügbarkeit
Kontakt



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