

# Zum Krümmungsradius in der DIN ISO 9613-2 – eine Analyse mit dem Schallwetter

Karl-Wilhelm Hirsch, Christian Kleinhenrich

Cervus Consult, consult@cervus.de

## Einleitung

Bei der anstehenden Überarbeitung der DIN ISO 9613 gibt es Bestrebungen, die in dieser wichtigen Norm für die Ausbreitungsrechnung von Gewerbe- und Industrieräuschen bisher vorgegebene Konstante für den Krümmungsradius (5000 m) abstandsabhängig zu formulieren. Ziel ist es, die Immissionsprognosen mit dieser Norm ‚genauer‘ zu machen.

Der Krümmungsradius spielt im Kernverfahren der DIN ISO 9613-2 keine offensichtliche Rolle. Erst bei Dämpfungsbeiträgen durch Wald oder durch Bebauung beispielsweise wird er explizit wirksam. Nun soll er auch bei der Berechnung der Schirmgeometrie Eingang finden. Damit werden Kreisstrahlen möglicherweise mit abstandsabhängigen Krümmungsradien in das Kernverfahren der DIN ISO 9613-2 eingeführt.

Der Beitrag stellt eine statistische Analyse des Krümmungsradius auf der Basis des Schallwetters [4] vor. Diese Analyse erlaubt belastbare Aussagen zu dieser Abstandsabhängigkeit. Dabei wird für alle schallausbreitungsgünstigen Stunden eines Jahres eine Kreisstrahlennäherung aus einem physikalischen Modell für geschichtete Atmosphären berechnet.

Die Analyse kann eine Grundlage für die Einführung einer normgerechten Formulierung einer Abstandsfunktion für den Krümmungsradius sein. Es bleibt aber zu diskutieren, ob durch die Einführung dieser Abstandsabhängigkeit die Prognosen im Sinne des Immissionsschutzes tatsächlich um so viel ‚genauer‘ werden, um den steigenden Rechenaufwand zu rechtfertigen.

## Strahlen bei gegebener Profilprognose

Statistische Auswertungen mit dem Schallwetter basieren auf stundenspezifischen Profilprognosen, die über einen längeren Zeitraum kontinuierlich für einen Ort vorliegen. Profilprognosen geben in Abhängigkeit von der Höhe jeweils den horizontalen Wind mit Geschwindigkeit und Richtung, die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit an.

Unter der Annahme einer geschichteten Atmosphäre (die Profile sind ortsinvariant) ist die Kenntnis des Wind- und Temperaturprofils hinreichend, um mit Hilfe eines physikalischen Modells die Schar der Strahlen zu berechnen, die von einem vorgegebenen Quellort die Quelle in jedem horizontalen Winkel (Himmelsrichtung) und in jedem vertikalen Winkel (Erhöhung) verlassen. Im Folgenden werden die PIERCEN Differentialgleichungen für die Schallausbreitung in einem bewegten Medium angewendet, um diese Strahlenschar zu berechnen. Dies wird ausführlicher beispielsweise in [1] erläutert.

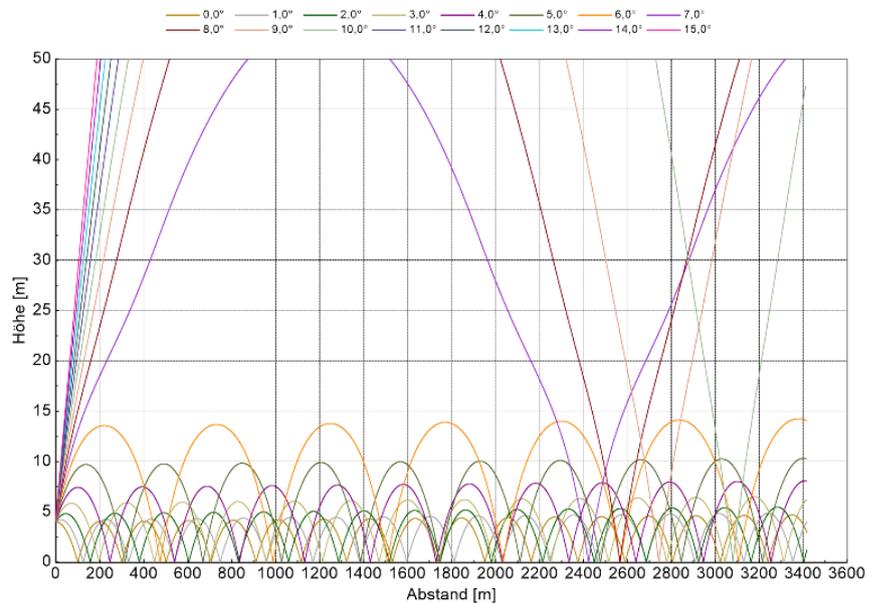


Abbildung 1 Strahlverfolgung bei einer ausgewählten Profilprognose (24.08.2016 00:00 Uhr) Quellhöhe (4,0 m), Himmelsrichtung (270°) und Zeitdauer (10 s)  
Variation der Strahlerhöhung 0° bis 15°

Die Strahlverfolgung bringt in Abhängigkeit von der Quellhöhe, Himmelsrichtung und Erhöhung Schallstrahlen hervor, die verschiedenste Verläufe zeigen. Insbesondere bei Inversionswetterlagen führt die gemeinsame Wirkung von Wind- und Temperaturprofil zu durchaus unerwarteten Ergebnissen, s. [1]. Dennoch legt Abbildung 1 nahe, dass in einem bestimmten horizontalen und vertikalen Winkelbereich für eine gegebene Quellhöhe die Strahlen der Strahlverfolgung durch Kreisstrahlen angenähert werden können.

## Kreisstrahlennäherung

Die Parameter des Ersatz-Kreisstrahls werden über folgendes einfaches Verfahren bestimmt, siehe Abbildung 2: 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 maximale Höhe erreicht, bestimmt. Der Kreis ist durch diese drei Punkte vollständig festgelegt. Sein Radius ist der Krümmungsradius des Kreisstrahls; sein Mittelpunkt liegt stets ‚im Boden‘. 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.

Das vorgestellte Verfahren scheitert natürlich, wenn das Profil in Gegenwindrichtung gerechnet wird oder wenn steile Er-

höhen nach oben oder unten vorgegeben werden. In diesen Fällen erreichen die Strahlen den Erdboden nicht mehr, wenn man von den quellnahen Bodenreflexionen von steil nach unten gerichteten Strahlen absieht.

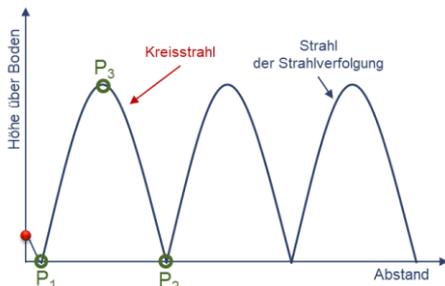


Abbildung 2 Skizze zur Bestimmung des Krümmungsradius der Kreisstrahlennäherung

## Mitwindbedingung

Man kann das positiv formulieren: Immer dann, wenn der Strahl auf seinem Ausbreitungspfad eine Folge von Bodenreflexionen durchlebt, liegt eine ‚Mitwindsituation‘ vor. Als Bodenreflexionen zählen nur die, bei denen der Strahl vorher mindestens die Quellhöhe erreicht oder überschritten hat. Die resultierende Folge dieser Bodenreflexionen ist periodisch, da eine geschichtete Atmosphäre betrachtet wird. Alle Strahlen, die diese Bedingung erfüllen, bilden ein Strahlenbündel, das die Quelle offensichtlich durch ein ‚Mitwindfenster‘ verlassen. Das Mitwindfenster 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.

Anmerkung 1: Bei äußerst komplexen Profilen kann es durchaus mehr als ein Mitwindfenster geben. Diese seltenen Konstellationen werden hier ignoriert, da sie in der statistischen Analyse unten kaum Gewicht haben.

Anmerkung 2: Diese Definition der Mitwindbedingung ist den Definitionen in den einschlägigen Normen überlegen, da sie tatsächlich den Einfluss des Wind- und Temperaturprofils berücksichtigt und nicht allein auf die Bodenwindrichtung oder eine Inversionswetterlage abstellt.

Für jeden Strahl, der das Mitwindfenster passiert, gelingt eine mehr oder weniger gute Annäherungen durch einen Kreisstrahl. Der Krümmungsradius der jeweiligen Kreisstrahlennäherung wird natürlich im Mitwindfenster nicht konstant sein, sondern in Abhängigkeit vom horizontalen und vertikalen Winkel zu bestimmen sein. Es kann sich je nach Profilprognose ein großer Wertebereich des Krümmungsradius ergeben.

## DIN-ISO-9613-kompatible Mitwindbedingung für Kreisstrahlen

In so genannten Kreisstrahlenmodellen wird eine Ausbreitungssituation mit einem einzigen konstanten Krümmungsradius in jede Himmelsrichtung gerechnet, siehe z. B. [6]. Solche Kreisstrahlenmodelle lassen sich deshalb durch eine Engführung der hier diskutierten Modellvorstellung ableiten, beispielsweise durch ein sachgerechte Mittelwertbildung der Krümmungsradien im Mitwindfenster. In diesen Kreisstrahlenmodellen tragen alle Strahlen zur Immission bei, die geometrisch einen gegebenen Immissionsort erreichen. Das können Strahlen ohne Bodenreflexion, einer oder mehreren Bodenreflexionen sein. Je größer der Abstand zwischen Quelle und Empfänger, umso größer ist die Zahl der Strahlen.

Auch das Modell der DIN ISO 9613-2 [2] ist – wenn man so will – ein Kreisstrahlenmodell, das noch einen Schritt weitergeht: Es begrenzt die Strahlenschar auf alle Strahlen, die keine oder höchstens eine Bodenreflexion erleben. Dies steht so nicht in der Norm selbst, sondern folgt indirekt aus den genau drei Bodenfaktoren ( $G_s$ , quellnah,  $G_m$  unter dem Pfad,  $G_r$  empfangernah). Unterstellt man diese Bedingung, ist die Frequenzabhängigkeit des  $A_{ground}$  der Norm qualitativ und quantitativ mit physikalischen Modellen der Bodenreflexion nachzuvollziehen, s. Abbildung 3 und Ausführungen in [3].

Die Aufgabe, die Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius nach den Bedingungen der DIN ISO 9613-2 zu bestimmen, ist nun klar: Für einen gegebenen Empfängerabstand sind die Strahlen aus der Strahlenschar des Mitwindfenster zu finden, die mit keiner oder mit einer Bodenreflexion den Empfänger erreichen.

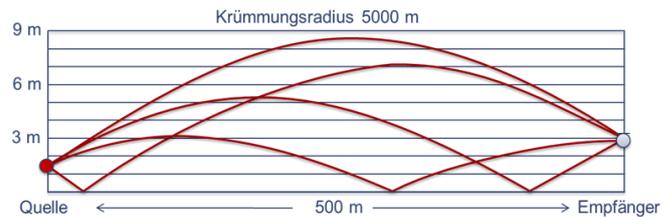


Abbildung 3 Skizze zum Strahlenmodell der DIN ISO 9613-2, nach Hirsch [3]

## Numerische Umsetzung

Die konkrete Berechnung von Schallausbreitungsbedingungen nach der vorgestellten 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 Fläche durch 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.

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.

## Diskretisierung der Berechnungen

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.

Diskretisierung des Mitwindfenster: 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.

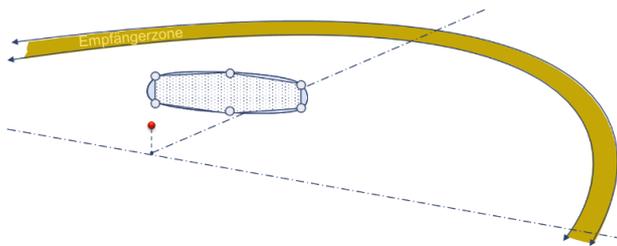


Abbildung 4 Skizze zur Kennzeichnung des Mitwindfensters durch 6 Punkte auf der Einheitskugel

Die Punkte werden durch den horizontalen Winkel  $\varepsilon$  (als Himmelsrichtung) und den vertikalen Winkel  $\eta$  (als Erhöhung) definiert. Bei der numerischen Umsetzung der Diskretisierung wird der horizontale Winkel mit einer Klassenbreite von  $1^\circ$  und der vertikale Winkel mit einer Klassenbreite von  $0,5^\circ$  bestimmt. Diese Klassenbreite begrenzt grundsätzlich die Genauigkeit der Angaben.

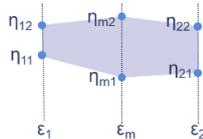


Abbildung 5 Bezeichnung der Winkel zur Kennzeichnung des Mitwindfensters

Angaben zum Krümmungsradius: Für die 6 eingeführten diskreten Begrenzungspunkte des Mitwindfensters wird der Krümmungsradius  $R(\varepsilon, \eta)$  bestimmt. 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.

$$R_m = \frac{1}{8} \left\{ \begin{aligned} &R(\varepsilon_1, \eta_{12}) + R(\varepsilon_1, \eta_{11}) + 2R(\varepsilon_m, \eta_{m2}) + \\ &\dots + 2R(\varepsilon_m, \eta_{m1}) + (\varepsilon_2, \eta_{22}) + R(\varepsilon_2, \eta_{21}) \end{aligned} \right\}$$

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

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.

## 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.

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 [1], verwendet wurde. Die Grundgesamtheit der Daten sind also 8727 zeitlich zusammenhängende stundenspezifische Profilprognosen.

## Qualität der Kreisstrahlennäherung

Die vorgestellten Untersuchungen verlassen sich darauf, dass die Kreisstrahlennäherung eine hinreichend zuverlässige Beschreibung der Schallausbreitung in Mitwindsituationen liefert. Die Analyse der Korrelationskoeffizienten in Abbildung 6 erlaubt eine Aussage dazu.

Die Darstellung der Verteilungen für den Krümmungsradius in den Empfängerzonen, der Breite und der Höhe des Mitwindfensters würden den Rahmen dieses Beitrags sprengen. Mehr dazu findet sich in dem Aufsatz [5].

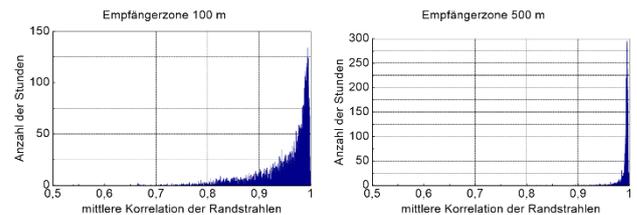


Abbildung 6 Korrelationskoeffizient der Kreisstrahlennäherung im Randbereich des Mitwindfensters in zwei Empfängerzonen, links 100 m, rechts 500 m

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Fläche des Mitwindfensters mit zunehmendem Abstand immer kleiner wird. Dabei zieht sich das Mitwindfenster in der Breite als auch in der Höhe zu. In größeren Abständen kommen also häufig nur sehr wenige Strahlen an. Das heißt nicht, dass der Immissionspegel dort unerwartet klein sein sollte. Das Ergebnis zeigt nur auf, dass Direktschall und Schallbeiträge mit einer einzigen Bodenreflexion einen äußerst begrenzten Winkelbereich haben. Strahlen mit Mehrfachreflexionen werden dort eher die Immission prägen. Das Vier-Strahlenmodell der DIN ISO 9613-2 wird also zunehmend realitätsferner.

## Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius

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

Abbildung 7 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. Die 5000 m der Norm gelten erst bei einem Abstand von 800 m.

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 prägen.

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.

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

$$R(d) = 2200 \text{ m} - 3d + \frac{0,007}{m} d^2 \quad \text{für } d < 1500 \text{ m}$$

$$R(d) = 15000 \text{ m} \quad \text{für } d \geq 1500 \text{ m}$$

## Diskussion der Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius in der DIN ISO 9613-2

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.

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 des Anwendungsbereichs 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 auf die Einführung einer Abstandsabhängigkeit des Krümmungsradius verzichtet werden. Die Abstandsabhängigkeit bringt eine Unsicherheit ein, weil die Abstandsabhängigkeit von der Orographie und den Wetterbedingungen abhängt und die Bestimmung anhand des Einzelfalls mit dem Schallwetter o. Ä. erfolgen müsste.

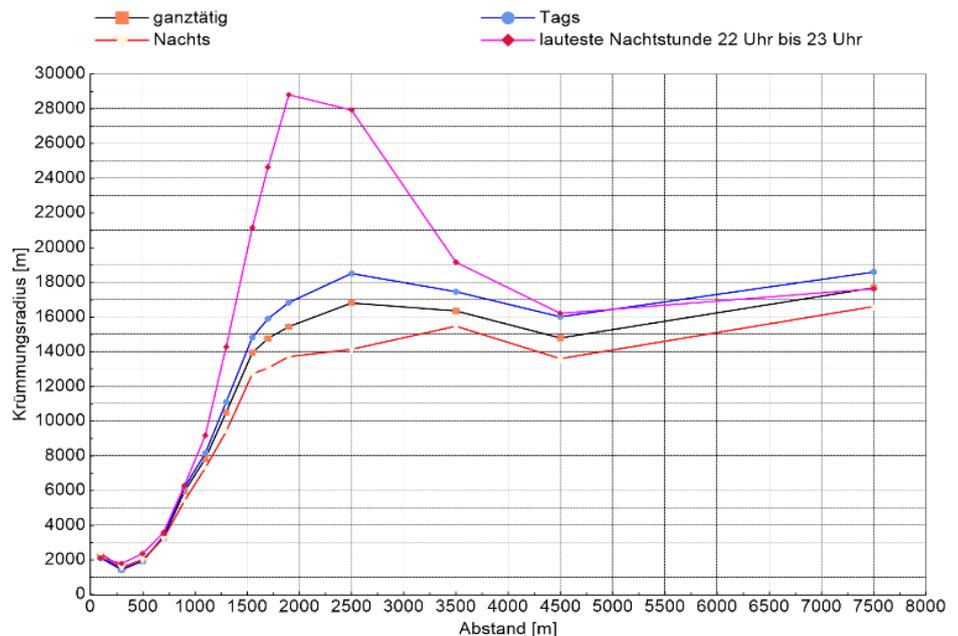


Abbildung 7 Abstandsabhängigkeit des mittleren Krümmungsradius für die Grundgesamtheit (ganztägig) und für häufig benötigten Beurteilungszeiten

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

Es ist wichtig anzumerken, dass alle getroffenen Aussagen nur für die Anwendung der DIN ISO 9613-2 gelten. Das Mitwindfenster bleibt bei Anwendung der Mitwindbedingung des Schallwetters ohne die zusätzlichen Beschränkungen durch die DIN 9613-2 auch in großen Abständen breit und hoch, weil dann auch die Strahlen mit Vielfach-Bodenreflexionen beitragen. Die Erfahrungen mit einem Kreisstrahlenmodell, das auch diese Vielfachreflexionen berücksichtigt, sind äußerst positiv. Es gelingt mit diesen Modellen nicht nur die Prognose von Langzeitpegeln sondern auch die Prognose von Zeitverläufen und Terzspektren bei gegebenem Krümmungsradius, die signifikant besser mit Messergebnissen korrelieren als die entsprechenden Prognosen der DIN ISO 9613-2. Für den Anwendungsfall der DIN ISO 9613-2 sind solch weitentwickelten Modelle allerdings kein Ersatz, weil sie viel zu aufwendig sind, und im Rahmen einer schalltechnischen Untersuchung, z. B. in Genehmigungsverfahren, nicht eingesetzt werden können.

## Verweise

- [1] Hirsch, K.-W.: „Überreichweiten“, Akustik Journal 01 / 19, S. 7 bis 15
- [2] DIN ISO 9613:1999-10, Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien
- [3] Hirsch, K.-W.: „Zur Vorausberechnung von Schießgeräuschen mit der Norm DIN ISO 9613“, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Bd. 8 (2013)3
- [4] Hirsch, K.-W.: „Grundlagen und Anwendungen des Schallwetters“, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, Bd. 9 (2014)6
- [5] „Krumme Hunde, Schallkreise in der Luft“, Aufsatz aus der Reihe „Bella Acustica, De Bello Acustico“, <http://www.kwhirsch.de/dba/20181107%20kwhdaba.11.02%20Krumme%20Hunde.pdf>
- [6] Hirsch, K.-W.; Bertels, W.: Schallschutzmaßnahmen in der Nähe von Schießgeräuschquellen“, Fortschritte der Akustik, DAGA 2012, Darmstadt