

Schallausbreitungsmodelle mit konstanten Krümmungsradius und Ray-Tracing Modelle – Ein Vergleich bei bekannter, realer Atmosphäre

Till Kühner¹, Werner Bertels², Karl-Wilhelm Hirsch¹

¹Cervus Consult, Willich, consult@cervus.de

²Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition der Bundeswehr, WTD 91, Meppen, wernerbertels@bwb.org

Einführung

Schallausbreitungsmodelle berücksichtigen den brechenden und dämpfenden Einfluss der Atmosphäre in unterschiedlicher Weise. In technischen Modellen, z.B. im Immissionsschutz, werden konstante Krümmungsradien für vorgegebene Ausbreitungsbedingungen angenommen (z. B. ISO 9613-2) oder wetterabhängige Krümmungsradien aus bodennahen Wetterbeobachtungen abgeleitet (z. B. ISO 1996 [4]). Andere Modelle unterstellen Schallgeschwindigkeitsprofile, die sich klassiert aus meteorologischen Modellen ergeben (z. B. Harmonoise). Weitergehende Ray-Tracing-Modelle berücksichtigen beliebig geschichtete Atmosphären, um über lokale Strahlverfolgungsalgorithmen die Brechung und Luftabsorption in besserer Näherung nachzubilden. Die Zuverlässigkeit der Ray-Tracing-Modelle hängt dabei direkt von der Unsicherheit der Kenntnis der realen atmosphärischen Schichtung ab. Alle Modelle berücksichtigen die Luftabsorption nach Maßgabe der Luftfeuchte in Bodennähe.

Bei Entfernungen deutlich kleiner als 500 m bleibt der Schall in Bodennähe. Bei größeren Entfernungen oder besonderer Topografie oder besonderer Ausbreitungssituation mit großen Unterschieden der Höhen von Quelle und Empfangsort erreichen die Strahlen größere Höhen. Deshalb werden Windgeschwindigkeits-, Windrichtungs-, Temperatur- und Luftfeuchteprofile dort immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Profilprognosen

Für die Untersuchungen wurden besondere Profilprognosen der MeteoMedia genutzt, die im kleinzelligen Bereich (4 km x 4 km) stundenspezifische Vorhersagen dieser Profile liefert.[2] Es wird ermittelt, in welchen Schallausbreitungssituationen Modelle mit konstantem Krümmungsradius hinreichend zuverlässig den Strahlenverlauf nachbilden und wann Ray-Tracing-Modelle signifikant bessere Prognosen der Brechung und der Luftabsorption liefern.

Für die folgenden Darstellungen wird als Beispieldatensatz der 7.2.2014, 21-22 Uhr genutzt.[1][2]

Höhe [m]	w [m/s]	WR[°]
10	6,1	232
30	8,2	234
60	9,5	234
90	10,7	235
130	11,9	236
180	13,0	237

Höhe [m]	T [°C]	rel. LF [%]
2	2,1	87,8
30	2,2	85,6
95	2,1	84,1
185	1,8	82,3

Tabelle 1 u. 2 Profilprognose für 7.2.2014, 21 bis 22 Uhr

Strahlenverläufe mit variabler Krümmung

Für den Verlauf von Strahlen in einer geschichteten Atmosphäre mit horizontalem Wind läßt sich eine modifizierte Form von Snells-Brechungsgesetz nutzen [2]:

$$\frac{c}{\sqrt{\cos^2 \alpha - \left(\frac{u}{c}\right)^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha - \left(\frac{u}{c}\right)^2 \sin^2 \alpha}} + u = \text{const.} \quad (1)$$

α ist der Elevationswinkel des Strahls, also der Winkel zwischen Strahl und Boden, c die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe, $u = w \cos \theta - 180^\circ$ die Windgeschwindigkeit relativ zum Strahl, w die horizontale Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe.

Mit (1) können Strahlenverläufe im Ray-Tracing-Verfahren in beliebigen Profilen numerisch mit guter Genauigkeit bestimmt werden.

Kreisstrahlenmodelle

ISO 1996-2 [4] schlägt vor, den Verlauf von Strahlen durch die Atmosphäre mit konstantem Radius zu beschreiben, also mit Kreisstrahlen, deren Radius mit

$$R = \frac{c}{\frac{\text{const } \partial T}{\sqrt{T} \partial z} + \frac{\partial u}{\partial z}} \quad (2)$$

bestimmt wird, wobei die Differentiale für Temperatur und Windgeschwindigkeit durch Differenzbildung der Werte bei 10 m und 0,5 m gebildet wird. Für die Beispieldaten ergibt sich damit für Mitwind ein Radius mit 550 m.

Die Annahme eines Krümmungsradius von 550 m führt dazu, dass bei größeren Entfernungen keine Direktstrahlen möglich sind, sondern nur Mehrfachreflexionen am Boden von der Quelle zum Empfänger führen.

Als Alternative wird in [2] der Krümmungsradius bei der Höhe = Abstand / 50 gewählt, im Beispiel erhält man für einen Abstand mit 2000 m einen Krümmungsradius von 7850 m.

In Abbildung 3 werden die mit (1) berechneten Strahlenverläufe mit variabler Krümmung zum Vergleich mit den Kreisstrahlen bei 2000 m Abstand, 2 m Quellen- und Empfängerhöhe dargestellt. Der Direktstrahl und die beiden Strahlen die direkt vor der Quelle bzw. dem Empfänger reflektiert werden, verlaufen bei beiden Methoden sehr ähnlich. Beim bodennäheren Strahl mit einer Reflexion auf halbem Weg sieht man schon deutlich die unterschiedlichen Krümmungen. Strahlen mit mehr Reflexionen werden der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

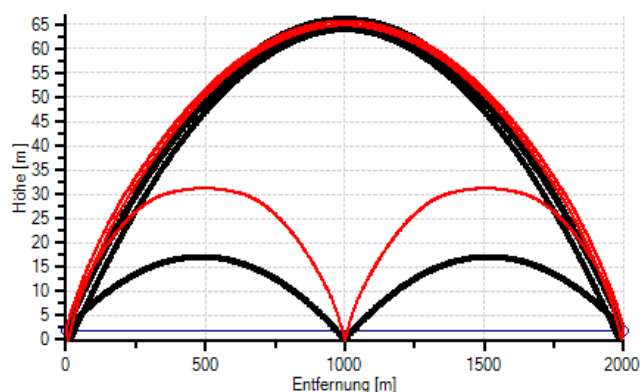


Abbildung 1 Strahlenverläufe mit bis zu einer Bodenreflexion mit variabler Beugung (rot) und mit konstantem Radius (schwarz)

Größere Abstände

Bei einem Abstand von 6000 m erhält man mit (3) einen Krümmungsradius 12051 m. Die entsprechenden Strahlenverläufe sind in Abb. 2 dargestellt.

Bei der Berechnung mit variabler Krümmung entsprechend (1), die das meteorologische Profil bei allen Höhen berücksichtigt, gibt es im gewählten Beispiel bei 6000 m Abstand keinen Direktstrahl mehr.

Das liegt daran, dass in der Umsetzung für Höhen oberhalb 200 m entsprechend VDI 3782 [6] eine konstante Windgeschwindigkeit angenommen wird. Dadurch werden Strahlen, die diese Höhe überschritten haben, nicht mehr nach unten gebeugt.

In Abb. 2 ist zur Veranschaulichung zusätzlich der niedrigste Strahl dargestellt, der nicht mehr zum Boden zurück kommt.

Das Kreisstrahlenmodell prognostiziert in diesem Bereich also einen Direktstrahl mit einer maximalen Höhe über 250 m, während in einem Profil entsprechend VDI 3782 aus dieser Höhe keine Strahlen mehr zum Boden zurück gebeugt werden.

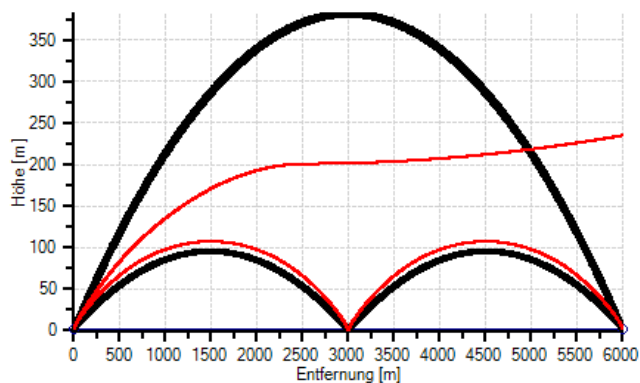


Abbildung 2 Strahlenverläufe mit bis zu einer Bodenreflexion mit variabler Beugung (rot) und mit konstantem Radius (schwarz)

Logarithmisches Profil und Extrapolation

Nutzt man die beiden unteren Wind- und Temperaturdaten, kann man die Parameter für ein logarithmisches Windprofil bestimmen, wie es unter anderem in den Grundlagen für Harmonoise verwendet wurde [5]. Im Beispiel ergibt sich mit einer angenommenen Rauigkeitslänge von 0,5 m die Monin-Obukhov Länge $L = -907$ m, Schubspannungsgeschwindigkeit 0,8 m/s und $T^* = 0,18$ K. Damit liegt das Beispiel in Stabilitätsklasse 3.

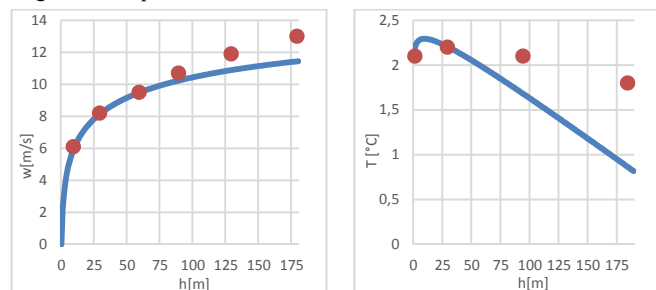


Abb. 3 u. 4 Profilprognose für 7.2.2014, 21 bis 22 Uhr und angepasstes logarithmisches Profil

In Abb. 3 und 4 sieht man, dass das logarithmische Profil nur für die unteren Prognosehöhen gut passt, und sich vermutlich wenig eignet, um die Windgeschwindigkeiten in größeren Höhen zu extrapolieren.

VDI 3783-8 [7] bietet weitergehende Methoden, ermöglicht die Berechnung der Höhe der Grenzschicht, in diesem Fall 800 m, und einen Verlauf des Windprofils, der den Übergang von Prandtl zu Ekman-Schicht berücksichtigen soll.

In Abb. 5 sind zum Vergleich Strahlenverläufe für das logarithmische Profil und für das Profil aus den Meteomedia-Daten mit Extrapolation entsprechend VDI 3783-3 ab 180 m Höhe. Im Gegensatz zur Extrapolation nach VDI 3782 gibt es mit beiden Profilen bei 6000 m Abstand einen Direktstrahl, der qualitative Unterschiede in den Strahlenverläufen ist dennoch deutlich zu sehen.

Interpretation des meteorologischen Profils

Auch bei der Anwendung der VDI 3783-8 gibt es Interpretationsprobleme. In Abb. 3 sieht man eine gute Übereinstimmung zwischen Prognosedaten und logarithmischem Profil bis 60 m, was für

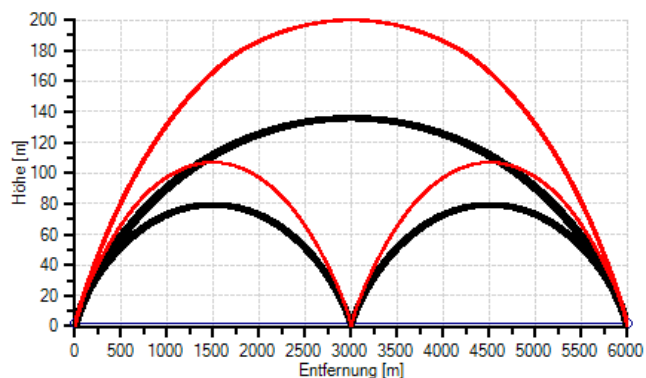


Abbildung 5 Strahlenverläufe für Meteomedia-Profil mit Extrapolation nach VDI 3783-8 (rot) und logarithmisches Profil (schwarz)

eine Höhe der Prandtl-Schicht bei 60 m spricht. (27) in VDI 3783-8 [7] kann auch so interpretiert werden, dass $-L/15 = 60$ m die Höhe der Prandtl-Schicht gibt. Auf Seite 11 der gleichen Norm wird allerdings die Prandtl-Schicht als die Höhe gegeben, bei der die Windgeschwindigkeit 80% des geostrophischen Wertes ist, was in diesem Fall bei 180 m wäre.

Zudem sollte an der Winddrehung die Prandtl-Schicht erkennbar sein. Dass dies nicht (offensichtlich) möglich ist, gilt nicht nur für das gewählte Beispiel.

Luftfeuchte

Während im oben gewählten Beispiel die Änderung der relativen Luftfeuchte mit der Höhe keine relevante Rolle spielt, fällt z.B. in der Prognose für den 2.2.2014, 5-6 Uhr, die rel. Luftfeuchte von 99% am Boden auf 64% bei 185 m Höhe. Bei der Luftabsorption [8] bei 125 Hz ergibt sich damit ein Unterschied von 1 dB zwischen Strahlen in Bodennähe, und solchen die großer Höhe laufen.

Darüber hinaus kann bei so starker Änderung der Feuchte der Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit die Beugung relevant beeinflussen.

Zusammenfassung

Mit Hilfe des modifizierten Snellschen Brechungsgesetz (1) lassen sich Strahlenverläufe in den von Meteomedia gelieferten Profilprognosen durchführen.

Mit zunehmender Höhe wird das Verständnis der Meteorologie zunehmend wichtig. Die Diskussion über Strahlverläufe in großer Höhe betrifft neben Quellen in großer Entfernung auch hohe Quellen wie Windkraftanlagen und Flugzeuge, und hochgelegene Immissionspunkte wie z.B. Bebauung am Hang.

Literatur

- [1] Meteomedia, Produkt Profilprognosen, N50.696 E7.99
- [2] HIRSCH, K.-W.: „Schallwetter“, DAGA 2014
- [3] OSTASHEV, V. E. ET AL.: „On the Refraction Law for a Sound Ray in a Moving Medium“, acta acustica ACUSTICA, Vol. 87 (2001) 303 – 306
- [4] ISO 1996-1:2003-08, „Determination of environmental noise levels“, 7.2 Formeln (3) bis (6)
- [5] DEFRANCE, JÉRÔME ET AL.: „Outdoor Sound Propagation Reference Model Developed in the European Harmonoise Project“, ACTA ACUSTICA u. w. ACUSTICA, Vol. 93 (2007) 213 – 227, Kapitel 4.4
- [6] VDI 3782-1, „Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle“, 7.1
- [7] VDI 3783-8, „Umweltmeteorologie - Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle“, 3.3
- [8] ISO 9613-2 „Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien“