

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	2
Résumé	3
1 Einleitung	4
2 Aktueller Stand der Technik in der Strassenlärmrechnung	5
3 Meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung über grosse Distanzen	7
3.1 Auswirkungen von Temperatur und Luftfeuchte auf die Luftdämpfung	7
3.2 Auswirkungen von Windgeschwindigkeitsgradienten auf die Schallausbreitung	7
3.3 Auswirkungen von Temperaturgradienten auf die Schallausbreitung	8
3.4 Konsequenzen gekrümmter Schallausbreitung	9
3.5 Effektive Schallgeschwindigkeit	9
3.6 Mediumsinhomogenitäten (Turbulenzen)	10
3.6.1 Auswirkungen von Mediumsinhomogenitäten (Turbulenzen) auf die Schallausbreitung	10
3.6.2 Beschreibung von atmosphärischen Mediumsinhomogenitäten	10
3.6.3 Realisierung einer Brechungsindexverteilung	10
3.7 Verfügbare Meteodaten	11
3.7.1 Automatisches Messstellennetz, Klimadaten	11
3.7.2 Schätzung der Windgeschwindigkeitsprofile und Temperaturprofile über ebenem Gelände	11
3.7.3 Diagnostische Meteomodelle	12
4 Modelle zur Berechnung der Schallausbreitung unter Einbezug von Meteeffekten	13
4.1 Empirische Modelle	13
4.2 Analytische Lösungen der Schallstrahlenverläufe	13
4.3 ray tracing	14
4.4 Fast-Field Program	14
4.5 Parabolic Equation	14
4.6 Finite Elemente	15
4.7 Boundary Elemente	15
4.8 Methode der Finiten Differenzen	16
4.8.1 Finite Differenzen im Frequenzbereich	16
4.8.2 Finite Differenzen im Zeitbereich	17
5 Implementiertes ray tracing Modell SonRoad-M	18
5.1 Übersicht	18
5.2 Berechnung meteorologischer Einflüsse mittels ray tracing	18
5.3 Meteeffekt bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen	19
5.3.1 Übersicht	19
5.3.2 Algorithmus in SonRoad-M	20
5.4 Meteeffekt bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen	23
5.5 Begrenzung des Meteeffektes	25
5.6 Diskussion	25

5.7	Unberücksichtigte Effekte	26
6	Referenzmessungen	28
6.1	Messung Allmend Thun 27. Juni 2002	28
6.1.1	Beschreibung Messung	28
6.1.2	Diskussion	28
6.2	Messung Allmend Thun 31. Oktober 2002	33
6.2.1	Beschreibung Messung	33
6.2.2	Diskussion	33
6.3	Messung Rafz 9. Juni 2004	39
6.3.1	Beschreibung der Messung	39
6.3.2	Diskussion	39
6.4	Messung Meppen (Harmonoise)	43
6.4.1	Beschreibung der Messung	43
6.4.2	Diskussion	43
7	Validierung des neuen Modells SonRoad-M	51
7.1	Lautsprechermessungen Thun 27. Juni 2002	51
7.2	Lautsprechermessungen Thun 31. Oktober 2002	54
7.3	Lautsprechermessungen Rafz 9. Juni 2004	55
7.4	Messung Meppen (Harmonoise)	58
7.5	Zusammenfassung der Validierungsergebnisse	61
8	Abgrenzung des Einsatzbereichs gegenüber SonRoad	62
8.1	Größenordnungen von Meteeffekten	62
8.1.1	Häufigkeit verschiedener Meteosituationen im Jahresmittel	62
8.1.2	Windgeschwindigkeits- und Temperaturgradienten für die verschiedenen Meteo- situationen	63
8.1.3	Bedeutung für die Schallausbreitung	64
8.1.4	SonRoad-Option "förderliche Ausbreitung" bei der Hinderniswirkung	71
8.2	Gültigkeitsbereich von SonRoad	71
9	Ausblick	73
A	Finite Differenzen im Zeitbereich	74
A.1	Verwendete Symbole	74
A.2	Theorie	74
A.3	Randbedingung für den Boden	77
A.4	Randbedingung für absorbierende Flächen	78
A.5	Achsialsymmetrische Näherung	78
A.6	Berücksichtigung variabler effektiver Schallgeschwindigkeit	79
A.7	Implementierung als Referenzmodell	79
A.7.1	Validierung der Implementierung für ein Hindernis	79
A.7.2	Validierung der Implementierung für inhomogene Atmosphäre 1	80
A.7.3	Validierung der Implementierung für inhomogene Atmosphäre 2	81
A.7.4	Validierung der Implementierung für verlustbehaftete Reflexion	81
A.7.5	Validierung der Implementierung für Bodenreflexionen	82

Zusammenfassung

Für grössere Quellen-Empfängerabstände können wetterbedingte Einflüsse auf die Schallausbreitung nennenswerte Ausmasse annehmen. Bisher eingesetzte Strassenlärmrechnungsmodelle wie StL-86 ignorierten Meteeffekte gänzlich oder berücksichtigten sie nur auf einfache Weise (SonRoad).

Aufbauend auf einer Zusammenstellung möglicher Rechenverfahren zur Nachbildung der Wetterabhängigkeit der Schallausbreitung wurde ein ray-tracing Verfahren entwickelt, das die Krümmung der Ausbreitung als Folge inhomogener Atmosphäre (insbesondere Windgeschwindigkeits- und Temperaturgradienten) modelliert. Der auf geometrischer Akustik basierende Algorithmus wurde um eine empirische Korrektur ergänzt, die eine Abschätzung der Schallausbreitung in geometrische Schattenzonen hinein erlaubt. Zur Ermittlung dieser Korrektur wurde ein wellentheoretisch exaktes numerisches Verfahren entwickelt, das die exemplarische Berechnung von Referenzsituationen erlaubt.

Das in der Folge SonRoad-M genannte Rechenverfahren wurde anhand von eigenen, sowie in der Literatur dokumentierten Messungen zufriedenstellend validiert. Für verschiedene Prototypsituationen und typische Meteostatistiken wurden die Meteeffekte im Jahresmittel bestimmt. Daraus lassen sich einfache Faustregeln zur Abschätzung der Bedeutung von Meteeffekten in konkreten Situationen ableiten. Tagsüber können im Fall ohne Hinderniswirkung relevante Metekorrekturen bereits ab Distanzen von 50 bis 100 m auftreten (Abschwächung gegenüber neutraler Atmosphäre), nachts zeigen sich mit Hinderniswirkung deutliche Korrekturen ab etwa 100 m (Verstärkung gegenüber neutraler Atmosphäre).

Abstract

In case of larger distances between source and receiver sound propagation is significantly influenced by weather conditions. Road traffic noise models used so far (like StL-86) ignored weather effects completely or took them into account only in a very simplified way (SonRoad).

Based on an overview of computational methods for sound propagation considering weather effects a ray tracing algorithm (called SonRoad-M) was developed to account for curved propagation as a consequence of inhomogeneous atmosphere (due to wind speed and temperature gradients). The algorithm that is based on geometrical acoustics was enhanced by an empirical correction to account for sound propagation into shadow zones. The correction was calibrated with a numerical model based on wave theory (finite differences in the time domain).

SonRoad-M was successfully validated with own measurements and measurements reported in literature. For different prototype situations and weather statistics the relevance of weather on sound propagation attenuations was investigated. From these findings simple rules-of-thumb can be derived to estimate the importance of weather effects. During daytime significant weather effects can be expected at distances above 50 to 100 m in cases without shielding (attenuation compared to neutral conditions). During the night and in case of shielding clear weather effects show up for distances above 100 m (amplification compared to neutral conditions).

Résumé

Pour de grandes distances entre source et récepteur, le climat peut avoir une influence sur la propagation d'onde en changeant certaines valeurs acoustiques intrinsèques. Les modèles de calcul du bruit de circulation employés jusqu'ici, comme StL-86, ignoraient totalement ces effets dus à la météo, ou n'en tenaient compte que de manière simplifiée (SonRoad).

Construit sur la base des méthodes existantes de calcul de l'influence météorologique sur la propagation d'onde, un procédé par ray-tracing (SonRoad-M) a été élaboré, qui modélise la courbure de la propagation suite à une atmosphère inhomogène (en particulier les gradients de vitesse du vent et ceux de température). L'algorithme basé sur l'acoustique géométrique est ensuite complété d'une correction empirique permettant d'estimer la propagation d'onde à l'intérieur des zones d'ombre. Pour cela, une méthode numérique en théorie d'onde (par différences finies dans l'espace temps) a été développée, qui permet le calcul sur exemple de situations de référence.

SonRoad-M a été validé de manière satisfaisante par des mesures expérimentales propres ou prises de la littérature. Les effets dus à la météo ont été déterminés en moyenne annuelle pour différentes situations types et de statistiques météorologiques correspondantes. De là, des règles simples ont été édictées pour quantifier les effets dus à la météo dans des situations concrètes. Des corrections météo sont à faire en journée, sans l'influence d'obstacles, déjà à partir de distances de 50 à 100 m (diminuant vis-à-vis d'une atmosphère neutre). Des corrections importantes sont à faire de nuit, avec l'influence d'obstacles, à partir de 100 m environ (s'accroissant vis-à-vis d'une atmosphère neutre).

1 Einleitung

Zunehmende Strassenlärmemissionen führen dazu, dass zuverlässige akustische Immissionsprognosen für immer grössere Abstände nötig werden. Mit wachsenden Quellen-Empfängerabständen nehmen die Variationen der Ausbreitungsdämpfung als Folge von meteorologischen Einflüssen stark zu. Die Wettereinflüsse auf die Schallausbreitung wurden bisher bei Strassenlärmprognosen weitgehend ignoriert. Dies wurde jeweils mit der gegenseitigen Kompensation der Effekte im Jahresmittel legitimiert. Tatsächlich basiert eine typische Strassenlärmbeurteilung auf dem jahresdurchschnittlichen energieäquivalenten Dauerschallpegel, getrennt für den Tag und die Nacht. Bereits die Aufteilung nach Tag und Nacht führt aber zu einer Asymmetrie der Wetterbedingungen. Auf Grund der Temperaturschichtung sind tags tendenziell hinderliche, nachts tendenziell förderliche Ausbreitungsbedingungen anzutreffen. Im unebenen Gelände ist überdies von einer ungleichförmigen Windverteilung auszugehen, sodass insgesamt bei näherer Betrachtung die Hoffnung nach Ausmittlung der Meteeffekte unberechtigt erscheint.

Mit der heute zur Verfügung stehenden Rechenleistung rücken Verfahren in den Bereich des Machbaren, die zumindest angenähert Wettereffekte auf die Schallausbreitung berücksichtigen können. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden verschiedene Rechenverfahren untersucht und schliesslich das Modell SonRoad-M entwickelt. SonRoad-M basiert auf dem neuen Schweizerischen Strassenlärmmodell SonRoad, ist aber zusätzlich um einen ray tracing Algorithmus zur Bestimmung einer Meteokorrektur ergänzt. Damit steht eine Rechenvorschrift zur Verfügung mit welcher in kritischen Fällen, d.h. bei Quellen-Empfängerabständen typisch grösser 100 m die meteorologischen Einflüsse auf die Schallausbreitung abgebildet werden können.

Im Kapitel 2 wird eine kurze Übersicht über den aktuellen Stand der Technik in der Strassenlärberechnung gegeben. Kapitel 3 fasst die grundlegenden Mechanismen des Wettereinflusses auf die Schallausbreitung zusammen, Kapitel 4 beschreibt die grundsätzlichen Möglichkeiten zu deren rechnerischen Modellierung. Im zentralen Kapitel 5 wird die Rechenvorschrift SonRoad-M dargestellt. In Kapitel 6 werden Testmessungen präsentiert, die in Kapitel 7 im Sinne einer Validierung mit SonRoad-M Berechnungen verglichen werden. Kapitel 8 dokumentiert Überlegungen zur Abgrenzung von SonRoad-M gegenüber SonRoad. Im Anhang A wird ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Schallfeldern beschrieben, das im Rahmen des Projektes SonRoad-M implementiert wurde und als Referenzmodell zur Parameteroptimierung von SonRoad-M gedient hat.

Der Forschungsauftrag wurde durch die VSS EK2.09 (Präsident M. Weber) begleitet.

2 Aktueller Stand der Technik in der Strassenlärmrechnung

Weltweit existiert eine Vielzahl von Strassenverkehrslärberechnungsverfahren¹. Dabei ist hinsichtlich der Ausbreitalgorithmen zu unterscheiden zwischen Referenzmodellen, die auf einer numerischen Lösung der Wellengleichung basieren und Engineeringmodellen, die sich auf mehr oder weniger empirisches Formelwerk stützen.

Klassische Ansätze für Referenzmodelle sind Finite Elemente- und Randelementemethoden. Dabei muss im Falle der Finiten Elemente das ganze betrachtete Situationsvolumen, im Falle des Randelementeverfahrens die das Situationsvolumen umschliessende Hüllfläche in kleine Elemente diskretisiert werden. *Klein* muss sich an der Wellenlänge messen, typisch wird von Elementabmessungen in der Grössenordnung von 1/6 ... 1/10 der Wellenlänge ausgegangen. Bei Annahme einer oberen Grenzfrequenz von 4 kHz, entsprechend einer Wellenlänge von 10 cm, führt die Diskretisierung von typischen Situationen in 1...2 cm grosse Einheiten auf astronomischen Elementezahlen, die sich auch in absehbarer Zukunft mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung kaum beherrschen lassen. Unter gewissen Vereinfachungen, wie der Annahme von rein fortschreitenden Wellen über ebenem Untergrund, kann die Parabolische Gleichung angesetzt werden. Dabei reduziert sich der Rechenaufwand ganz wesentlich, da eine schrittweise Lösung möglich wird und demzufolge mit viel kleineren Gleichungssystemen gearbeitet werden kann. Neben der Parabolischen Gleichung stellt die Vorstellung der Schallausbreitung entlang von allenfalls gekrümmten Strahlen eine interessante Möglichkeit zur Berechnung der Schallausbreitung dar (*ray tracing*²). Das ray tracing Konzept ist ein Ansatz der geometrischen Akustik, d.h. Wellenphänomene wie Beugung müssen durch separate Erweiterungen miteinbezogen werden.

Die Referenzmodelle werden praktisch ausschliesslich an wissenschaftlichen Institutionen eingesetzt, während dem die Engineeringmodelle die Werkzeuge für grossräumige Lärmbelastungsberechnungen darstellen. In der EU gibt es mit dem Harmonoise-Projekt³ klare Tendenzen einer Vereinheitlichung der Strassenlärmrechnungsmodelle. Es kann davon ausgegangen werden, dass mittelfristig ein EU-Strassenlärmmodell auf dem Tisch liegt. Die grosse Schwierigkeit besteht dabei nicht in der Akzeptanz, dass die Physik überall die gleiche ist, sondern im Umstand, dass auf den physikalischen Berechnungen Beurteilungen basieren, die ihrerseits von Land zu Land sehr unterschiedlich sind. In der Übergangszeit bis zum Inkrafttreten des EU-Einheitsmodells wird jenen Ländern, die über kein eigenes Strassenlärmmodell verfügen, empfohlen, das Französische Modell *XP S 31-133* (siehe unten) zu verwenden. Neben diesem französischen Modell sind aus heutiger Sicht vor allem die jüngst entwickelten Modelle *TNM* aus den USA und *Nord2000* aus Skandinavien von besonderem Interesse.

Im Jahre 2004 wurde in der Schweiz das neue Strassenlärmmodell *SonRoad* publiziert^{4, 5, 6}. *SonRoad* ist ein Engineeringmodell, das Meteeffekte weitgehend ignoriert. Lediglich bei der Berechnung der Hinderniswirkung kann eine Unterscheidung zwischen neutralen und förderlichen Ausbreitungsbedingungen (z.B. nachts) vorgenommen werden. Durch das Fehlen von Meteelementen reduziert sich der Anwendungsbereich von *SonRoad* auf kürzere Abstände.

SonRoad setzt sich aus einem Quellenmodell und einem Ausbreitungsmodell zusammen. Das Quellenmodell beschreibt die ins Freifeld abgestrahlte akustische Leistung eines Fahrzeuges in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps (Personen- oder Lastwagen), der gefahrenen Geschwindigkeit, der Steigung und des Belags. Die Vorbeifahrt der Fahrzeuge wird in diskrete Punktquellen aufgelöst. Von jeder dieser Punkt-

¹Campbell Steele, A critical review of some traffic noise prediction models, Applied Acoustics, vol. 62, p.271-287 (2001)

²D. Heimann, G. Gross, Coupled simulation of meteorological parameters and sound level in a narrow valley, Applied Acoustics, vol. 56, p.73-100 (1999)

³UIC-Projekt "Harmonised, Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise", 2002-2004

⁴K. Heutschi, *SonRoad*. Berechnungsmodell für Strassenlärm. Schriftenreihe Umwelt, Nr. 366, BUWAL, 2004

⁵K. Heutschi, *SonRoad*: New Swiss Road Traffic Noise Model, Acta Acustica - Acustica, vol. 90, p. 548-554 (2004)

⁶K. Heutschi, *SonRoad*: Neues Schweizer Strassenlärmmodell, Z. für Lärmbekämpfung, no. 6, 174-179 (2005)

quellen wird dann mittels des Ausbreitungsmodells die Ausbreitungsdämpfung zum Immissionspunkt berechnet. Die Ausbreitungsrechnung erfolgt in einem Vertikalschnitt zwischen Quelle und Empfänger. Die Ausbreitungseffekte werden im Wesentlichen nach ISO 9613⁷ berechnet. Von der Norm abgewichen wird beim Bodeneffekt, d.h. bei der Berücksichtigung der Interferenzerscheinungen zwischen Direkt-schall und der am Boden reflektierten Komponente. Dazu wird eine numerische Näherungslösung für die wellentheoretische Behandlung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain eingesetzt. Die Verallgemeinerung auf inhomogenen und unebenen Boden geschieht mittels einer semiempirischen Erweiterung basierend auf dem Fresnelzonenkonzept.

⁷ISO Norm 9613: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors

3 Meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung über grosse Distanzen

3.1 Auswirkungen von Temperatur und Luftfeuchte auf die Luftdämpfung

Die Schallausbreitung erfährt in der Luft eine Abschwächung, die vom Zustand der Luft (Temperatur und Feuchte), der Frequenz und dem Laufweg abhängt¹. Strassenverkehrslärm weist einen A-bewerteten spektralen Schwerpunkt zwischen 500 und 1000 Hz auf. In diesem Frequenzbereich ist die Abhängigkeit der Luftdämpfung von der Temperatur und Feuchte relativ gering, so dass in der Regel ohne wesentliche Fehler mit einer mittleren Temperatur und einer mittleren Feuchte gearbeitet werden kann. Bei speziellen Temperatur-Feuchtekombinationen können allerdings im Einzelfall grössere Variationen in der Luftdämpfung auftreten.

Im folgenden wird anhand der in Abschnitt 6.4.1 beschriebenen Situation in Meppen die Abhängigkeit der Luftdämpfung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit veranschaulicht. Während dieser Messung schwankte die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40% und 100%, die Temperatur zwischen 5 und 25 °C. Abbildung 3.1 zeigt den Bereich, in welchem sich unter diesen Bedingungen die Luftdämpfung für einen 300 m entfernten Messpunkt bewegt. Es ist ersichtlich, dass bei Frequenzen über 1 kHz bei tiefen Temperaturen die Luftfeuchtigkeit einen sehr grossen Einfluss hat. Um Fehler zu vermeiden, sollte deshalb zumindest die Luftfeuchtigkeit auf der mittleren Höhe des Direktschallpfades gemessen werden. Gerade bei porösen Böden (Ackerland) kann die Luftfeuchtigkeit mit der Höhe stark variieren.

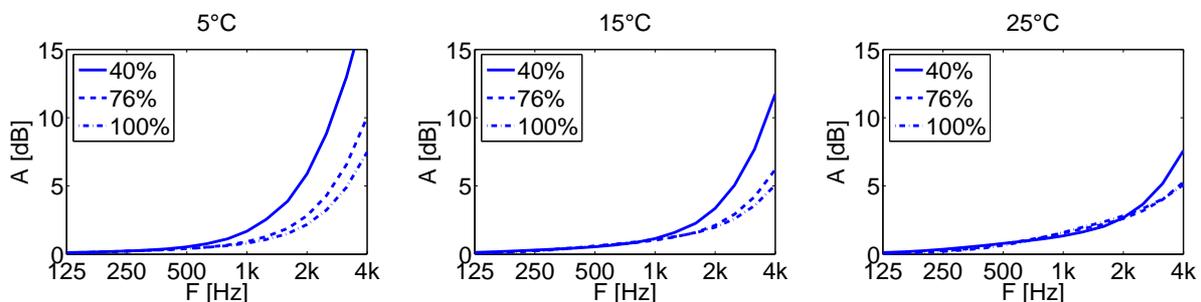


Abbildung 3.1: Die spektrale Luftdämpfung für eine Distanz von 300 m für relative Luftfeuchtigkeiten von 40%, 76% und 100% und Temperaturen von 5, 15 und 25 °C. Unter der Annahme eines Verkehrslärm-Quellenspektrums führt der Anstieg der Luftfeuchtigkeit von 40% auf 100% bei einer Temperatur von 5 °C (Bild links) zu einem Anstieg des A-bewerteten Pegels um 1.7 dB(A). Die Pegel des Luftdämpfungs-Spektrums verhalten sich proportional zur Ausbreitungsdistanz; d.h. bei einer Distanz von 150 m halbieren sich die angegebenen Dämpfungen.

3.2 Auswirkungen von Windgeschwindigkeitsgradienten auf die Schallausbreitung

Beim Vorhandensein von lokalen Druckdifferenzen in der Atmosphäre finden Ausgleichsvorgänge in Form von Wind statt. Die Windgeschwindigkeit weist in Bodennähe immer einen ausgeprägten Gradienten mit der Höhe auf, da auf Grund von Reibung die Luftbewegung am Boden gebremst wird.

¹ISO Norm 9613-1: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors

Bei der Schallausbreitung in einem bewegten Medium sind die beiden Grössen Schallgeschwindigkeit und Mediums-(=Wind)-geschwindigkeit zu berücksichtigen. Dabei lässt sich die Wellenfront (geometrischer Ort gleicher Phase der Welle) zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ aus der Front zum Zeitpunkt t durch Vektoraddition der beiden Geschwindigkeiten konstruieren. Die Richtung der Schallgeschwindigkeit steht immer senkrecht auf der Front. Mit dieser Konstruktion ist es möglich, die Schallausbreitung in einem bewegten Medium zu bestimmen und z.B. numerisch zu lösen.

Der wesentliche Einfluss des Winds auf die Schallausbreitung kommt durch den Windgeschwindigkeitsgradienten zustande. In Mitwindrichtung breitet sich der Schall in grösserer Höhe schneller aus als in Bodennähe. Dies führt zu einer Krümmung der Schallstrahlen gegen den Boden hin. In Gegenwindrichtung verhält es sich umgekehrt, die Schallstrahlen werden vom Boden weggebogen (siehe Abbildung 3.2).

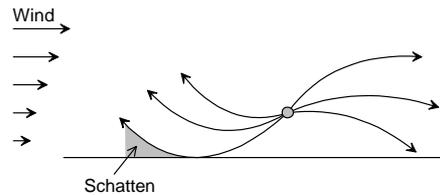


Abbildung 3.2: Krümmung der Schallstrahlen durch einen Windgradienten mit der sich ausbildenden Schattenzone.

3.3 Auswirkungen von Temperaturgradienten auf die Schallausbreitung

Die Luftmasse der Atmosphäre bewirkt auf Meereshöhe einen mittleren Druck von 1013 hPa. Mit zunehmender Höhe über Boden nimmt der Luftdruck in den untersten Schichten um rund 12 Pa pro Meter ab. Ein gedachtes, sich in der Atmosphäre nach oben bewegendes Luftpaket kühlt sich als Folge dieser Druckabnahme um etwa 1° pro 100 m ab. Eine vertikale Temperaturverteilung mit diesem Gradienten wird als adiabatische Schichtung bezeichnet.

Die adiabatische Schichtung entspricht dem Grundzustand der Atmosphäre ohne zusätzliche äussere Einflüsse. Durch die Sonneneinstrahlung werden jedoch thermische Prozesse in Gang gesetzt, die die Temperaturschichtung der untersten Luftmassen wesentlich beeinflussen. Die wichtigste Interaktion der untersten Luftschichten erfolgt an der Erdoberfläche. Für die Erdoberfläche lässt sich eine zu 0 aufgehende Energiebilanz formulieren, da die Oberfläche keine Masse aufweist und damit keine Energie speichern kann.

Bei einer deutlich positiven Strahlungsbilanz, d.h. einem massivem Überschuss an auf die Erdoberfläche auftreffender Strahlung (typ. im Sommer um die Mittagszeit bei klarem Himmel) wird der Boden und die unterste Luftschicht aufgeheizt. Es bilden sich aufsteigende Luftblasen die höher gelegene Luftschichten erwärmen (Konvektion). Die Luft zeichnet sich als Folge dieser Konvektion auch bei Windstille durch einen turbulenten Zustand aus. Durch die fortdauernde Erwärmung des Bodens bildet sich ein starker Temperaturgradient in dem Sinne aus, dass die Temperatur mit zunehmender Höhe abnimmt. Diese Temperaturabnahme ist stärker als die adiabatische Temperaturabnahme von $1^\circ/100$ m. Die Aufwärtsbewegung von Luftpaketen erfährt damit eine Verstärkung, da die durch den Druckabfall gekühlten Luftblasen immer noch wärmer sind als die Umgebung. Im umgekehrten Fall des Absinkens erfolgt ebenfalls eine Beschleunigung, da die Luftpakete trotz adiabatischer Erwärmung jeweils kälter sind als die Umgebung. Entsprechend dieser Verstärkung einer einsetzenden Bewegung wird diese Temperaturschichtung als labil bezeichnet. Die Ausbildung einer labilen Schichtung ist nur schwach von der Windgeschwindigkeit abhängig, da die mechanische Durchmischung durch den Wind im Vergleich zum Luftdurchmischungsprozess durch Konvektion vernachlässigt werden kann.

Bei einer deutlich negativen Strahlungsbilanz wie sie in einer wolkenarmen Nacht auf Grund des fehlenden Eintrags auftritt, kühlt sich der Boden durch die Ausstrahlung ab und mit ihm die

unterste Luftschicht. Es bildet sich ein Temperaturgradient aus in dem Sinne, dass die Temperatur mit zunehmender Höhe nur noch schwach abnimmt (kleiner als $1^\circ/100\text{ m}$) oder sogar zunimmt (Inversion). Ein sich vertikal bewegendes Luftpaket wird in diesem Fall gebremst und in seine Ausgangslage zurückgedrängt. Diese Temperaturschichtung wird als stabil bezeichnet, da sich ohne Wind praktisch keine Luftdurchmischung entwickelt. Die Ausbildung einer stabilen Schichtung setzt keinen oder nur geringen Wind voraus.

Da die Schallgeschwindigkeit proportional zur Wurzel der absoluten Temperatur ist, führt ein Temperaturgradient zu einer Krümmung der Schallstrahlen (Abbildung 3.3). Vereinfacht gesagt führt tagsüber sonniges Wetter zu einer Strahlenkrümmung vom Boden weg, nachts führt die Inversionslage zu einer Krümmung zum Boden hin.

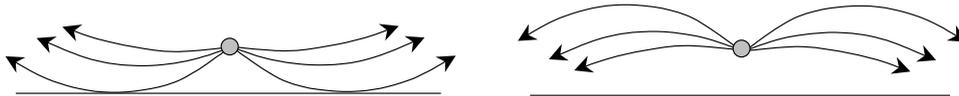


Abbildung 3.3: Krümmung der Schallstrahlen durch einen Temperaturgradienten. Links labile Schichtung (typisch tags), rechts: stabile Schichtung (typisch nachts).

3.4 Konsequenzen gekrümmter Schallausbreitung

Die Krümmung der Schallstrahlen vom Boden weg führt zur Ausbildung von Schattenzonen. Geometrisch gesehen gelangt kein Schall mehr in diese Bereiche. Beugungs- und Streueffekte führen allerdings gleichwohl zu einem minimalen Schallenergetransport in diese Gebiete. In der Praxis ergeben sich in Schattenzonen Pegelreduktionen von 20 dB und mehr.

Die Bedeutung einer Krümmung der Schallstrahlen zum Boden hin hängt von der Situation ab. Bei freier Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger verändert sich im Vergleich zur neutralen Ausbreitung lediglich der Bodeneffekt durch eine Veränderung der Bodenreflexionswinkel und der Laufzeiten. In ganz extremen Fällen werden auch Mehrfachreflexionen am Boden möglich, was zu einer entsprechenden Pegelerhöhung führen kann. Der spektakulärste Effekt ergibt sich allerdings, wenn die Sichtverbindung durch ein Hindernis unterbrochen ist. In diesen Fällen kann die Krümmung zum Boden hin dazu führen, dass das Hindernis überstiegen wird und seine abschirmende Wirkung weitgehend verliert. Dadurch erklärt sich die Alltagserfahrung, dass mitunter nachts auch sehr weit entfernte Schallquellen gehört werden können, die tagsüber nicht wahrzunehmen sind.

3.5 Effektive Schallgeschwindigkeit

Die Berechnung der Schallausbreitung in einem sich bewegenden Medium ist deutlich schwieriger als wenn das Medium in Ruhe ist. Mit dem Konzept der *effektiven Schallgeschwindigkeit* lässt sich der Fall des bewegten Mediums angenähert auf den Fall des unbewegten Mediums mit einer modifizierten Schallausbreitungsgeschwindigkeit c_{eff} abbilden. Der Wert von c_{eff} ergibt sich als Summe der Schallgeschwindigkeit und der Projektion der Mediumsgeschwindigkeit (Wind) auf die betrachtete Ausbreitungsrichtung. Wie oben ausgeführt, ist im bewegten Medium die Wellenfront zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ aus der Front zum Zeitpunkt t zu bestimmen, indem in jedem Frontpunkt die vektorielle Addition zwischen dem Mediumsgeschwindigkeitsvektor und dem senkrecht auf die Front zu konstruierenden Schallgeschwindigkeitsvektor zu bilden ist. Das Konzept der *effektiven Schallgeschwindigkeit* geht dagegen von einer arithmetischen Addition der Beträge aus. In vielen Fällen - insbesondere bei bodennahen Quellen- und Empfängerpositionen verläuft die Schallausbreitung unter kleinen Elevationswinkeln. Da somit die beiden Vektoren der Schall- und der Mediumsgeschwindigkeit nahezu parallel verlaufen entspricht die arithmetische Addition der Beträge einer sehr guten Approximation.

Einem typischen Profil der effektiven Schallgeschwindigkeit in Bodennähe wird oft eine logarithmische Höhenabhängigkeit zu Grunde gelegt (Gl. 3.1).

$$c_{\text{eff}} = c_0 + b \ln \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right) \quad (3.1)$$

mit

c_0 : Schallgeschwindigkeit am Boden [m/s]

b : Freier Parameter mit typischen Werten zwischen $-1 \dots +1$ [m/s]

z_0 : Rauigkeitslänge mit typischen Werten von 0.001 m für glatte Flächen wie Wasser und 0.1 m für Grasland.

3.6 Mediumsinhomogenitäten (Turbulenzen)

3.6.1 Auswirkungen von Mediumsinhomogenitäten (Turbulenzen) auf die Schallausbreitung

Mediumsinhomogenitäten führen zu einer teilweisen Dekorrelation unterschiedlicher Schallpfade und zum anderen zur lokalen Streuung. Die Dekorrelation hat zur Folge, dass das Bodeneffekt-Interferenzmuster an Schärfe verliert, d.h. die Auslöschungen erfolgen nicht mehr vollständig und die Verstärkungen entsprechen nicht mehr einer Schalldruck- sondern mehr und mehr einer Leistungsaddition. Die Streuung an den Mediumsinhomogenitäten sind im Normalfall vernachlässigbar. Für geometrische Schattenzonen sind sie jedoch bei höheren Frequenzen der wichtigste Energietransport-Mechanismus.

3.6.2 Beschreibung von atmosphärischen Mediumsinhomogenitäten

Die Beschreibung von atmosphärischen Mediumsinhomogenitäten erfolgt üblicherweise durch Spezifikation des akustischen Brechungsindex $n = c_0/c_{\text{eff}}$, d.h. Angabe des Verhältnisses einer Referenzschallgeschwindigkeit bezogen auf die lokale Schallgeschwindigkeit. Der Brechungsindex lässt sich additiv in einen Mittelwert $\bar{n} = 1$ und einen Fluktuationsterm μ aufschlüsseln: $n = \bar{n} + \mu$. Der Fluktuationsterm μ steht in Beziehung mit turbulenten Temperatur- sowie mit turbulenten Windgeschwindigkeitsfluktuationen. Der Fluktuationsterm ist eine Funktion des Ortes und der Zeit. Mit dem Konzept der gefrorenen Turbulenz wird angenommen, dass sich während der Ausbreitung einer Wellenfront μ nicht ändert, d.h. dass lediglich die Ortsabhängigkeit zu betrachten ist.

Die Beschreibung eines Feldes mit einer stochastischen Eigenschaft kann z.B. mittels einer Korrelationsfunktion erfolgen. Atmosphärische Turbulenz wird meist als homogen und isotrop angenommen. Dies bedeutet, dass eine Spezifikation durch die Autokorrelationsfunktion $C(s)$ der Form (3.2) möglich ist.

$$C(s) = E(\mu(\vec{r} + \vec{s})\mu(\vec{r})) \quad (3.2)$$

mit

\vec{r} : Vektor auf einen beliebigen Feldpunkt

s : Betrag des beliebigen Vektors \vec{s}

$E()$: Erwartungswert, d.h. Mittelwert über alle \vec{r}, \vec{s} Paarungen

Basierend auf Arbeiten von Daigle et al.² wird meist eine Gauss-förmige Autokorrelationsfunktion $C(s)$ gemäss Gl. 3.3 angenommen.

$$C(s) = \mu_0^2 e^{-s^2/L^2} \quad (3.3)$$

Typische Werte für die Parameter in Gl. 3.3 sind: $\mu_0^2 = 10^{-5}$ und $L = 1.0$ m.

3.6.3 Realisierung einer Brechungsindexverteilung

Für konkrete Schallausbreitungssimulationen müssen im Simulationsbereich Brechungsindexfelder $\mu(\vec{r})$ erzeugt werden, die eine geforderte Autokorrelationsfunktion $C(s)$ aufweisen. Die konkrete Realisie-

²G. A. Daigle et al., Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves near a hard boundary, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 64, p.622-630 (1978)

zung ist relativ rechenaufwändig und kann z.B. nach Gilbert³, Chevret⁴ oder Salomons⁵ erfolgen. Mit Salomons lässt sich ein zweidimensionales Brechungsindexfeld $\mu(\vec{r})$ gemäss Gl. 3.4 darstellen.

$$\mu(\vec{r}) = \sqrt{4\pi\Delta k} \sum_n \cos(k_n \cdot \vec{r} + \alpha_n) \sqrt{F(k_n)k_n} \quad (3.4)$$

mit

$$\vec{k}_n = (k_n \cos \theta_n, k_n \sin \theta_n)$$

$$k_n = n\Delta k \text{ für } n = 1, 2, \dots, N$$

θ_n : zufälliger Winkel zwischen 0 und 2π

α_n : zufälliger Winkel zwischen 0 und 2π

$$F(k_n) = \mu_0^2 \frac{L^2}{4\pi} e^{-\frac{\kappa_n^2 L^2}{4}}$$

In der Auswertung von Gl. 3.4 sind typische Werte $\Delta k = 0.01$ und $N = 2000$. Da für eine Ausbreitungssimulation mit dem Konzept der eingefrorenen Turbulenz jeweils eine zufällige Brechungsindexverteilung angenommen wird, sind die Berechnungen mehrmals zu wiederholen und energetisch auszumitteln.

3.7 Verfügbare Meteodaten

3.7.1 Automatisches Messstellennetz, Klimadaten

Die Meteo Schweiz betreibt ein umfangreiches automatisches Messstellennetz. An diesen Standorten werden die wesentlichen meteorologischen Daten wie Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und Gesamtbewölkung erhoben. Periodisch werden Klimadaten mit mehrjährigen Mittelwerten und Statistiken veröffentlicht. Währendem in einer konkreten Situation anhand der nächstgelegenen Meteo Schweiz Messstelle eine Abschätzung der Strahlungsbilanzen möglich ist, können auf Grund der relativ grossen lokalen Unterschiede die Winddaten nicht ohne weiteres übertragen werden.

3.7.2 Schätzung der Windgeschwindigkeitsprofile und Temperaturprofile über ebenem Gelände

Windgeschwindigkeitsprofile

Auf den untersten 100 m der atmosphärischen Grenzschicht lässt sich für den Fall der Strömung über ebenem rauhen Boden das Vertikalprofil der mittleren Windgeschwindigkeit $\bar{u}(z)$ mittels des sogenannten Wandgesetzes abschätzen⁶.

$$\frac{\bar{u}(z)}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) \quad (3.5)$$

mit

z : Höhe über Boden [m]

u^* : Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]

κ : von Karmann Konstante ≈ 0.4

z_0 : Rauigkeitslänge [m]

d_0 : Versatzhöhe [m]

Für glatte Oberflächen wie z.B. Wasser liegen typische Werte bei $z_0 = 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ und $d_0 = 0$. Bei mässig rauhen Oberflächen wie z.B. Grasland oder Ackergebiete sind $z_0 = 5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-1}$ und $d_0 = 0$. Bei gröberen Strukturen der Höhe h werden $z_0 = 0.1 \dots 5 \cdot 0.5$ und $d_0 \approx 0.75h$. Die einzige verbleibende Unbekannte in Gl. 3.5 ist u^* . Dieser Wert kann mit Kenntnis der Windgeschwindigkeit auf einer beliebigen Höhe bestimmt werden.

³K. E. Gilbert et al., Calculation of turbulence effects in an upward-refracting atmosphere, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 87, p.2428-2437 (1990)

⁴P. Chevret et al., A numerical model for sound propagation through a turbulent atmosphere near the ground, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 100, p.3587-3599 (1996)

⁵E. M. Salomons, Computational Atmospheric Acoustics, Kluwer, 2001

⁶VDI-Richtlinie 3782, Blatt 12: Umweltmeteorologie, Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht (1999)

Temperaturprofile

Temperaturprofile in der Ebene lassen sich mittels Ähnlichkeitstheorien wie z.B. nach Monin-Obukhov⁷, abschätzen. Dazu wird im Wesentlichen die Strahlungsbilanz an der Oberfläche und die Windgeschwindigkeit benötigt. Die Strahlungsbilanz lässt sich näherungsweise aus der Sonnenhöhe und dem Wolkenbedeckungsgrad gewinnen⁸.

3.7.3 Diagnostische Meteomodelle

Im allgemeinen, unebenen Gelände sind obige Abschätzungen nicht mehr ohne weiteres zulässig. Insbesondere die Windfelder werden wesentlich durch die Topographie oder hohe künstliche Bebauung beeinflusst. In diesen Fällen sind diagnostische Meteomodelle einzusetzen, die die Strömung im Beisein von Strukturen berechnen. Die Gebäude- und Hindernisumströmung kann mit einem Windfeldmodell nach VDI 3783-10⁹ berechnet werden. Das Regelwerk beinhaltet empirische Beschreibungen der wichtigsten Umströmungsphänomene (Wirbel, etc.). In einem iterativen Prozess wird dann über das ganze Simulationsgebiet ein Optimierungsalgorithmus für eine Minimierung der Divergenz, d.h. Quellenfreiheit bzgl. der Masse durchgeführt (für ein beliebiges Luftvolumenelement gilt im stationären Zustand, dass die einfließende Luftmasse gleich der ausfließenden Luftmasse ist).

⁷Roland B. Stull, An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1994)

⁸VDI 3789, Blatt 2, Umweltmeteorologie, Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Oberflächen, Berechnung der kurz- und langwelligen Strahlung, 1994

⁹VDI 3783, Blatt 10, Umweltmeteorologie, Diagnostische mikroskalige Windfeldmodelle, 2001

4 Modelle zur Berechnung der Schallausbreitung unter Einbezug von Meteeffekten

4.1 Empirische Modelle

Der Wettereinfluss ist in Fällen mit unterbrochener Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger besonders ausgeprägt. Im Mitwindfall oder bei einer Inversionslage kann sich die Hinderniswirkung deutlich reduzieren. Neuere Formeln zur Berechnung der Hinderniswirkung, wie z.B. ISO 9613-2, beinhalten deshalb einen empirischen Meteor Korrekturfaktor um diesem Umstand Rechnung zu tragen. Dabei fällt die berechnete Hinderniswirkung $D_z(f)$ etwas geringer aus als dies bei geradliniger Ausbreitung zu erwarten wäre (Gl. 4.1).

$$D_z(f) = 10 \log \left(3 + \frac{40}{\lambda} C_3 z K_{\text{met}} \right) \geq 0 \quad (4.1)$$

mit

f	Frequenz [Hz]
C_3	= 1 für die Beugung am Einfachhindernis, bzw. = $\frac{1 + (\frac{5\lambda}{e})^2}{\frac{1}{3} + (\frac{5\lambda}{e})^2}$ für die Beugung am Doppelhindernis
λ	Wellenlänge [m]
z	Pfadlängendifferenz um das Hindernis herum und durch das Hindernis hindurch [m]
e	Im Falle von Doppel-bzw. Mehrfachbeugung: Distanz zwischen der ersten und letzten relevanten Hinderniskante [m]
K_{met}	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Reduktion der Hinderniswirkung im Falle von gegen den Boden gekrümmter Ausbreitung. Bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen ist $K_{\text{met}} = e^{-\left(\frac{1}{2000}\right) \sqrt{\frac{d_{ss} d_{sr} d}{2z}}}$, bei neutralen Bedingungen ist $K_{\text{met}} = 1.0$
d_{ss}	Distanz Quelle - erste Hinderniskante [m]
d_{sr}	Distanz zweite Hinderniskante - Empfänger [m]
d	Abstand Quelle - Empfänger [m]

4.2 Analytische Lösungen der Schallstrahlenverläufe

Unter der Annahme von linearen Höhenprofilen der Schallausbreitungsgeschwindigkeit, d.h. konstanten Gradienten, lässt sich die Krümmung der Schallstrahlen analytisch beschreiben und bestimmen. Es resultieren Kreisbahnen, anhand derer die modifizierten Hinderniswirkungen und die veränderten Bodenreflexionen berechnet werden können¹.

Der Radius der Kreisbahn des Schallstrahls lässt sich basierend auf Abbildung 4.1 wie folgt ermitteln.

Der Punkt M wird als Zentrum des gesuchten Kreises mit Radius R angenommen. Der ausgehende Schallstrahl bilde zur Horizontalen einen Winkel θ . In der Höhe z betrage die Schallausbreitungsgeschwindigkeit $c(z)$. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit auf der Höhe $z + 1$ lässt sich schreiben als $c(z) + \frac{dc}{dz}$. Aus dem Strahlensatz folgt:

$$\frac{R + \frac{1}{\cos(\theta)}}{R} = \frac{c(z) + \frac{dc}{dz}}{c(z)} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{c(z)}{\cos(\theta) \frac{dc}{dz}} \quad (4.2)$$

Aus dem Snellius-Brechungsgesetz folgt, dass der Quotient $\frac{c}{\cos(\theta)}$ konstant ist. Damit ergibt sich ein konstanter Radius R für die Schallstrahlkreisbahn, wobei der Wert vom Gradienten der

¹A. L'Esperance et al., Heuristic Model for Outdoor Sound Propagation Based on an Extension of the Geometrical Ray Theory in the Case of a Linear Sound Speed Profile, Applied Acoustics, vol. 37, p. 111-139 (1992)

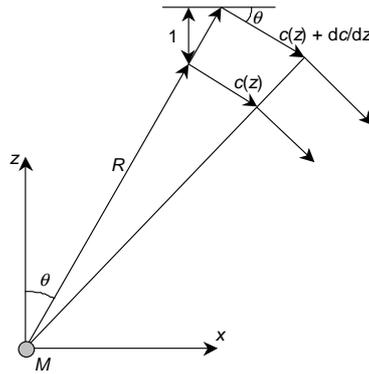


Abbildung 4.1: Situation zur Berechnung des Krümmungsradius bei konstantem Gradienten der Schallausbreitungsgeschwindigkeit.

Schallausbreitungsgeschwindigkeit mit der Höhe $\frac{dc}{dz}$ und vom Abschusswinkel θ abhängt. Für vertikal nach oben abgestrahlten Schall geht der Radius gegen unendlich. Die kleinsten Radien ergeben sich bei horizontaler Abstrahlung.

Typische Werte für den Gradienten der Schallausbreitungsgeschwindigkeit mit der Höhe liegen in der Größenordnung von $\pm 0.05 \text{ [s}^{-1}\text{]}$. Damit ergeben sich Krümmungsradien im Bereich von einigen Kilometern. Es ist allerdings zu beachten, dass in der Realität die Annahme eines konstanten Gradienten der Schallausbreitungsgeschwindigkeit mit der Höhe eine sehr grobe Vereinfachung darstellt. Tatsächlich nehmen sowohl die Temperaturgradienten als auch die Windgeschwindigkeitsgradienten mit zunehmender Höhe über Boden ab.

4.3 ray tracing

Die Kurve im Raum, die während der Ausbreitung ein fester Punkt auf einer Wellenfront beschreibt, wird Schallstrahl (ray) genannt. Es existieren numerische Verfahren zur Konstruktion solcher Schallstrahlen (ray tracing). Dabei können variable Mediums- und Schallgeschwindigkeiten berücksichtigt werden². Aus den Bildern der Schallstrahlen kann z.B. durch Auswertung der Strahlendichte auf die Pegelverhältnisse an einem interessierenden Immissionspunkt geschlossen werden (Abbildung 4.2).

4.4 Fast-Field Program

Fast-Field Program Modelle sind numerische Verfahren zur Berechnung der von einer Punktquelle erzeugten Schallfelder in geschichteten Atmosphären³. Dabei können beliebige vertikale Schallgeschwindigkeitsprofile vorgegeben werden. Eine wesentliche Einschränkung ergibt sich aus dem Umstand, dass nur ebener homogener Boden simuliert werden kann.

Fast-Field Programme basieren auf einer Fouriertransformation der Wellengleichung in einen horizontalen Wellenzahlbereich. Im Wellenzahlbereich wird die transformierte Wellengleichung numerisch gelöst und dann mittels inverser Fouriertransformation wieder in den Originalbereich zurücktransformiert.

4.5 Parabolic Equation

In vielen Fällen der Schallausbreitung im Freien reduziert sich das Schallfeld auf eine in nur eine Richtung fortschreitende Welle. Unter der Voraussetzung, dass keine Reflexionen und Rückstreuungen zu betrachten sind und dass die Ausbreitung flach erfolgt, d.h. die Elevationswinkel klein sind, kann die Technik der Parabolischen Gleichung angewendet werden⁴.

²Robert J. Thompson, Ray-acoustic intensity in a moving medium. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 55, n. 4, p.729-737 (1974)

³R. Raspet et al., A fast-field program for sound propagation in a layered atmosphere above an impedance ground, J. Acoustical Society of America, vol. 77, p.345-352 (1985)

⁴K. E. Gilbert, M. J. White, Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere, J. of the Acoustical Society of America, vol. 85, p.630-637 (1989)

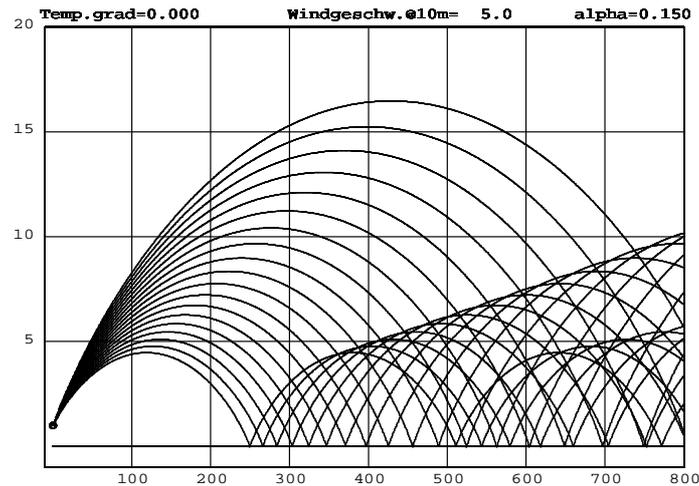


Abbildung 4.2: Beispiel einer ray tracing Simulation für Mitwind von 5 m/s in 10 m Höhe. Die Abszisse entspricht der Koordinate in Ausbreitungsrichtung, die Ordinate steht für die Höhe über Boden (man beachte die unterschiedliche Skalierung). Die von der Quelle (links) ausgehenden Strahlen werden zum Boden hin gekrümmt und können damit z.B. Hindernisse übersteigen. An ausgezeichneten Punkten schneiden sich Schallstrahlen. In diesen sogenannten Kaustiken ist die Energiedichte unendlich hoch, d.h. dort kann keine Aussage über den erwarteten Pegel gemacht werden.

Die parabolische Gleichung stellt eine approximierte Form der Wellengleichung (Helmholtzgleichung in Zylinderkoordinaten) dar. Für die numerische Lösung wird das Schallfeld diskretisiert. Dazu wird ein zweidimensionales, axialsymmetrisches Koordinatensystem angesetzt. Die Diskretisierung in vertikaler Richtung muss mit der üblichen Bedingung einer Auflösung $< 1/10$ der kürzesten Wellenlänge erfolgen, wogegen die horizontale Auflösung wesentlich grober gemacht werden kann. Die approximierten Wellengleichung wird dann schrittweise durch Lösen eines Gleichungssystems gelöst. Dabei wird ausgehend von der Vertikalverteilung des Schalldrucks im Abstand r auf die Vertikalverteilung des Schalldrucks im Abstand $r + \Delta r$ geschlossen. Da in einem Schritt jeweils nur vertikale Schalldruckverteilungen berechnet werden müssen, sind die zu lösenden Gleichungssysteme relativ klein. Die Schallgeschwindigkeit kann bei diesem Verfahren sowohl höhen- als auch distanzabhängig sein. Eine Schwierigkeit stellt unebener Boden dar. Insbesondere scharfe Hindernisse wie Lärmschirme können nur approximativ in das Verfahren eingebaut werden.

4.6 Finite Elemente

Finite Elemente (FE) Methoden sind klassische Ansätze zur numerischen Lösung der Wellengleichung. In der Regel arbeiten Finite Elemente Algorithmen im Frequenzbereich und benötigen dazu eine Diskretisierung der Geometrie mit einer Maschenweite in der Größenordnung von $1/6$ bis $1/10$ der kürzesten Wellenlänge. FE-Verfahren bestimmen Schallfelder durch Lösung eines Gleichungssystems mit einer Anzahl Unbekannten in der Größenordnung der Anzahl Gitterpunkte. Der Rechenaufwand wird damit für grössere Geometrien bzw. höhere Frequenzen schnell zu gross, sodass diese Verfahren für die Simulation der Schallausbreitung im Freien nicht geeignet sind.

4.7 Boundary Elemente

Boundary Elemente (BE) Methoden sind Verwandte der Finiten Elemente-Verfahren. Der entscheidende Unterschied besteht darin, dass beim BE-Verfahren nicht das ganze Volumen des zu simulierenden Bereichs diskretisiert werden muss, sondern lediglich die umhüllende Oberfläche. Daraus ergibt sich jedoch der entscheidende Nachteil, dass nur homogene Medien modelliert werden können. Aus diesem Grund sind BE-Methoden für die Simulation der Ausbreitungsvorgänge im Freien grundsätzlich nicht geeignet.

4.8 Methode der Finiten Differenzen

Die Finite Differenzen Methode ist ein verbreitetes Verfahren zur Lösung partieller Differentialgleichungen. Dabei wird eine räumlich genügend feine Diskretisierung des interessierenden Bereichs ($< \lambda/10$) vorgenommen. Die das System beschreibenden Differentialgleichungen werden durch lineare Gleichungen für eine Feldgrösse in den Gitterpunkten approximiert. Dabei übersetzen sich Ableitungen in Differenzen. Abhängig von den zu Grunde gelegten Differentialgleichungen können Finite Differenzen Methoden im Frequenz- bzw. im Zeitbereich formuliert werden.

4.8.1 Finite Differenzen im Frequenzbereich

Für eine Formulierung im Frequenzbereich wird im Allgemeinen von der Helmholtzgleichung ausgegangen⁵. Das aufzustellende Gleichungssystem verwendet als Unbekannte die Amplituden und Phasen der interessierenden Schallfeldgrösse (typ. Schalldruck) in jedem Gitterpunkt. Die Gleichungen finden sich durch Anwendung der Helmholtzgleichung im Raum und der Randbedingungen auf dem Rand. Es wird angenommen, dass die Information über die Randbedingungen in Form von akustischen Impedanzen als Verhältnis von Schalldruck zur Normalkomponente der Schallschnelle vorliegen. Da Schalldruck und Schallschnelle über eine Differentialgleichung miteinander verknüpft sind, kann die eine Variable eliminiert und damit die Randbedingung nur in der interessierenden Schallfeldgrösse formuliert werden:

In komplexer Schreibweise sind Schalldruck und Schallschnelle

$$\underline{p} = \check{p}e^{j\omega t} \quad (4.3)$$

$$\underline{v} = \check{v}e^{j\omega t} \quad (4.4)$$

wobei \check{p} und \check{v} komplexe Amplitudenfunktionen darstellen. Die Impedanz Z ist

$$Z = \frac{\check{p}}{\check{v}} \quad (4.5)$$

Mit dem Newton'schen Gesetz gilt für eine Raumrichtung

$$\frac{\partial \check{p}}{\partial x} e^{j\omega t} = -\rho_0 j\omega \check{v} e^{j\omega t} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \check{p}}{\partial x} = -\rho_0 j\omega \frac{\check{p}}{Z} \quad (4.7)$$

Die Kreisfrequenz ω kann in der Wellenzahl k ausgedrückt werden:

$$\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda} = kc \quad (4.8)$$

Durch Einsetzen von (4.8) in (4.7) erhält man schliesslich

$$\frac{\partial \check{p}}{\partial x} = -\rho_0 c jk \frac{\check{p}}{Z} \quad (4.9)$$

(4.9) stellt eine Randbedingung nur noch mit der Grösse Schalldruck dar. Damit kann schliesslich das Gleichungssystem mit den n -komplexen (Amplitude und Phase) Unbekannten gelöst werden. Dies führt im Allgemeinen auf die Inversion einer $n \times n$ Matrix. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Gittermaschenweite feiner als etwa $1/6 \dots 1/10$ der Wellenlänge gewählt werden muss, wird klar, dass die Methode nur auf kleine Volumina bzw. nur für tiefe Frequenzen anwendbar ist.

⁵Alfredson R.J., A Note on the Use of the Ffinite Difference Method for Predicting Steady State Sound Fields. Acustica 28 (1973) pp 296 - 301

4.8.2 Finite Differenzen im Zeitbereich

Es ist möglich, das Finite Differenzen Verfahren für Schallfeldberechnungen auch direkt im Zeitbereich zu formulieren und dabei die Impulsantwort zu gewinnen^{6,7}. Der Vorteil im Vergleich zur Berechnung im Frequenzbereich liegt zum einen in der Zeitschritt-weisen Berechnung ohne Lösen eines grossen Gleichungssystems, zum anderen im Umstand, dass mit der Impulsantwort die ganze Systeminformation vorliegt. Eine Schwierigkeit bei der Rechnung im Zeitbereich stellt die Formulierung der Randbedingungen dar. Diese liegen typisch als Impedanzen im Frequenzbereich vor. Eine exakte Überführung in den Zeitbereich ist sehr aufwändig, da dies in jedem Randpunkt eine rechenintensive Faltungsoption mit dem ganzen vergangenen Zeitverlauf erfordert. Oft wird deshalb mit geeigneten Näherungen gearbeitet⁸.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein Finite Differenzen Verfahren im Zeitbereich (FDTD) als Referenzrechenverfahren implementiert. Im Anhang A wird die Methode ausführlich dargestellt. Als numerisch interessante Alternative zu FDTD bietet sich die Transmission Line Matrix Methode (TLM) an⁹.

⁶D. Botteldooren, Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 98, p.3302-3308 (1995)

⁷S. Sakamoto, H. Tachibana, Numerical study on sound propagation from depressed/semi-underground roads, Proceedings inter-noise 2001

⁸B. Van den Nieuwenhof, J.-P. Coyette, Treatment of frequency-dependent admittance boundary conditions in transient acoustic finite/infinite-element models, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 110, p.1743-1751 (2001)

⁹J. Hofmann, K. Heutschi, Simulation of outdoor sound propagation with a transmission line matrix method, Applied Acoustics (2006)

5 Implementiertes ray tracing Modell SonRoad-M

5.1 Übersicht

Der Meteeffekt wird als Pegeldifferenz zwischen einer Berechnung mit und ohne Meteeinfluss verstanden. Dabei steht ein positiver Meteeffekt für förderliche, ein negativer Meteeffekt für hinderliche Ausbreitungsbedingungen. In SonRoad-M kommt ein spezielles ray tracing Verfahren zum Einsatz, welches nicht auf einer statistischen Auswertung zufällig gesendeter Schallstrahlen beruht, sondern gezielt nach relevanten Schallstrahlen sucht. Die Simulation verwendet dabei folgende Daten:

- Quellen- und Empfängerposition.
- Geländeprofil zwischen Quelle und Empfänger.
- Globales Temperaturprofil (bez. Höhe über Boden).
- Globales Windprofil (bez. Höhe über Boden). Dabei wird die Windkomponente quer zur Schallausbreitungsrichtung nicht berücksichtigt.

5.2 Berechnung meteorologischer Einflüsse mittels ray tracing

Ray tracing Algorithmen sind gut dazu geeignet, um die Refraktion, d.h. die Krümmungen von Schallstrahlen unter Meteeinfluss auch für komplexe Situationen zu berechnen (siehe Abschnitt 3.2, 3.3 und 4.3). Der Rechenaufwand ist dabei aber beachtlich, da ray tracing ein iteratives Verfahren ist. Normalerweise wird diese Iteration mit einem festen Zeitschritt durchgeführt. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurde eine Variante entwickelt, welche statt dessen ein festes horizontales Raster einsetzt. Beim Einsatz können horizontale Raster von 1 m ohne signifikanten Verlust an Genauigkeit eingesetzt werden. Wenn zusätzlich die Meteogradienten als effektive Schallgeschwindigkeiten (siehe Abschnitt 3.5) tabelliert werden, so werden zur Berechnung eines Iterationsschrittes auch unter Berücksichtigung des Terrains nur noch fünf Fließkommaoperationen benötigt. Im folgenden Abschnitt wird diese Methode für die Schallausbreitung über flachem Boden mit beliebigem vertikalem effektiven Schallgeschwindigkeitsprofil hergeleitet.

Der Einheitsvektor \vec{n} normal zur Wellenfront lässt sich gut zur Beschreibung der Refraktion einsetzen. Seine vertikale Komponente n_z wird nach Pierce¹ direkt vom lokalen, temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeitsgradienten $\partial c/\partial z$ beeinflusst:

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} = -\frac{\partial c(z)}{\partial z} \quad (5.1)$$

Unter der Annahme vorwiegend horizontaler Schallausbreitung kann die Refraktion aufgrund eines vertikalen Windgradienten mit dem Konzept der effektiven Schallgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 3.5) berücksichtigt werden:

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} \approx -\frac{\partial c_{\text{eff}}(z)}{\partial z} \quad (5.2)$$

So wird die lokale effektive Schallgeschwindigkeit c_{eff} bei einer Mitwindsituation als Summe, bei einer Gegenwindsituation als Differenz der lokalen Schallgeschwindigkeit und der horizontalen Windgeschwindigkeit berechnet.

Die Ausbreitung eines Schallstrahlpartikels am Ort \vec{p} zur Zeit t kann iterativ mit Zeitschritt Δt berechnet werden:

$$\vec{p}_{(t+\Delta t)} = \vec{p}_{(t)} + \Delta t \cdot c_{\text{eff}}(p_{z(t)}) \cdot \vec{n}_{(t)} \quad (5.3)$$

¹A. D. Pierce, Acoustics an introduction to its physical principals and applications, Acoustical Society of America, Woodbury (1989) 371-423

Der Einheitsvektor $\vec{n}(t)$ normal zur Schallwellenfront zur Zeit t kann dabei mit Gl. (5.2) aufdatiert werden. Mit der Einführung eines konstanten, horizontalen Rasters Δx kann der Weg des Schallstrahls mit der vertikalen Komponente p_z von \vec{p} vollständig beschrieben werden:

$$\vec{p}_{[i]} = \begin{pmatrix} i \cdot \Delta x \\ p_{z[i]} \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

i bezeichnet dabei den Iterationsschritt. Für die Berechnung der Refraktion wird die Höhendifferenz des Schallstrahls zweier benachbarten Iterationen betrachtet:

$$\Delta p_{z[i]} = p_{z[i]} - p_{z[i-1]} \quad (5.5)$$

Diese Grösse kann unter Verwendung der Vertikalkomponente von \vec{n} iterativ berechnet werden:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} + \left. \frac{\partial n_z}{\partial t} \right|_{z=p_{z[i]}} \cdot \Delta t \cdot \sqrt{\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2} \quad (5.6)$$

Der variable Zeitschritt Δt muss dabei über die effektive Schallgeschwindigkeit ausgedrückt werden:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} + \left. \frac{\partial n_z}{\partial t} \right|_{z=p_{z[i]}} \cdot \frac{\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2}{c_{\text{eff}}(p_{z[i]})} \quad (5.7)$$

Schliesslich kann $\partial n_z / \partial t$ durch Gl. (5.2) ausgedrückt werden:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} - \left. \frac{\partial c_{\text{eff}}(z)}{\partial z} \right|_{z=p_{z[i]}} \cdot \frac{\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2}{c_{\text{eff}}(p_{z[i]})} \quad (5.8)$$

Dabei kann der in der Gleichung (5.8) enthaltene relative effektive Schallgeschwindigkeitsgradient K zur Steigerung der Rechengeschwindigkeit tabelliert werden. Mit dieser tabellierten Grösse K erhält man folgende Gleichung:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} - K_{(p_{z[i]})} \cdot \left(\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2 \right) \quad (5.9)$$

Um die Schallausbreitung bei einem gegebenem Topografieprofil $G_{[i]}$ berechnen zu können, ist nur eine kleine Anpassung erforderlich:

$$\Delta p_{z[i+1]} = \Delta p_{z[i]} - K_{(p_{z[i]} - G_{[i]})} \cdot \left(\Delta x^2 + \Delta p_{z[i]}^2 \right) \quad (5.10)$$

Der ray tracing Algorithmus gemäss Gleichung 5.10 wird sowohl für hinderliche als auch für förderliche Ausbreitungsbedingungen eingesetzt. Abgesehen von diesem Algorithmus handelt es sich um zwei gänzlich verschiedene Verfahren, welche deshalb in den folgenden Abschnitten getrennt beschrieben werden. Die Entscheidung förderliche/hinderliche Ausbreitung ist bei der Zulassung komplexerer Meteorprofile nicht trivial, z.B. wenn die Schallausbreitung direkt über dem Boden förderlich, darüber aber hinderlich ist. Deshalb wird zuerst stets hinderliche Ausbreitung angenommen. Ergibt sich daraus ein Widerspruch, so wird das Verfahren zur Bestimmung unter förderlichen Ausbreitungsbedingungen durchgeführt.

5.3 Meteeffekt bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen

5.3.1 Übersicht

Bei stark labilen Temperaturschichtungen und/oder bei starkem Gegenwind werden die Schallstrahlen nach oben gekrümmt. Dies kann dazu führen, dass bei direkter Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger kein Strahl den Empfänger erreicht. Tatsächlich verschwindet der Schalldruck in solchen Schattenzonen aber nicht vollständig, sondern erfährt lediglich eine deutliche Abschwächung. Durch Beugungs- und Streueffekte gelangt weiterhin Schallenergie in diesen Bereich. Während die Beugungseffekte vor allem bei tiefen Frequenzen wirksam sind, sind die Streueffekte für die hohen Frequenzen von Bedeutung. In der Literatur sind verschiedene Lösungen vorgeschlagen worden, um in diesen ray tracing-Schattenzonen gleichwohl eine Pegelaussage zu ermöglichen.

McBride² hat ausführliche numerische Simulationen zum Streuprozess an sogenannten *turbules* durchgeführt und die Konsequenzen für die Schallenergie in Schattenzonen untersucht. In Vergleichen mit Messungen konnte eine gute Übereinstimmung nachgewiesen werden.

Es besteht kein prinzipieller Unterschied zwischen der Schattenzone, die sich auf Grund aufwärts gekrümmter Schallausbreitung ergibt und der Schattenzone hinter einem entsprechenden Hindernis bei gerader Schallausbreitung. Für den Fall eines konstanten Schallgeschwindigkeitsgradienten bilden sich kreisförmige Schallstrahlen aus. In der Analogie führt dieser Umstand auf die Hinderniswirkung an zylindrischen Strukturen. Pierce³ und Berry⁴ geben für diesen Fall eine analytische Lösung des Schallfeldes in der geometrischen Schattenzone an. Die numerische Auswertung ist relativ aufwändig und zeigt im Übergang der Schattenzone eine Unstetigkeit.

Heimann⁵ schlägt generell für Schattenzonen (bei Hindernissen oder aufwärts gekrümmten Strahlen) einen zufälligen Ablenkprozess der Strahlen vor. Die von der Frequenz, die der Strahl repräsentiert, abhängige Ablenkefunktion wurde anhand von publizierten Testfällen⁶ kalibriert.

Im *Comprehensive Model for Sound Propagation - Nord2000*⁷ wird vorgeschlagen, das Problem analog zur Schallfeldberechnung hinter einem Hindernis zu lösen. Im Vergleich zur ungestörten Ausbreitung wird ein Bodeneffekt und eine Hinderniswirkung dazugerechnet. Dazu wird der Strahl s konstruiert, der durch den Boden hindurchführend den Empfänger trifft. Der Bodeneffekt wird bestimmt, indem eine Bodenreflexion unter dem Einfallswinkel θ und mit einem Quellen-Empfängerabstand entsprechend der Länge des Strahls s angenommen wird. Die Hinderniswirkung wird mittels eines Ersatzhindernisses berechnet, wobei dessen Höhe und Position entsprechend dem Punkt der maximalen Eindringtiefe des Strahls s in den Boden bestimmt wird. Eine wesentliche Eigenschaft dieses Ansatzes ist der stetige Übergang in die Schattenzone. Bei der Berechnung des Meteoeflusses mit Nord200 ist jedoch nachteilhaft, dass trotz des komplexen und aufwändigen Algorithmus nur Situationen konstante Wind- und Temperaturgradienten eingesetzt werden können. Der dadurch notwendige Linearisierungsschritt kann Ausbreitungsrechnungen stark verfälschen.

5.3.2 Algorithmus in SonRoad-M

Da die oben beschriebenen Methoden für den Einsatz in SonRoad-M entweder zu rechenintensiv oder aber zu wenig robust sind, wurde an der Empa ein alternatives Modell entwickelt⁸. Dazu wurden mit FDTD, dem in Abschnitt 4.8 beschriebenen numerischen Verfahren, eine Vielzahl solcher Schallschatten-Situationen simuliert. Die oben beschriebenen Streueffekte wurden dabei in einem aufwändigen Verfahren berücksichtigt. Anhand dieser Simulationen wurde ein empirisches ray tracing-Modell entwickelt, welches sich sowohl bezüglich der Genauigkeit als auch der Rechenintensivität für den Einsatz in SonRoad-M eignet. Die Simulationen wurden zur Modellbildung gegenüber Messungen bevorzugt, da meteorologische Situation während einer Messung aufgrund der Dynamik und des chaotischen Verhaltens der bodennahen Atmosphäre nur punktuell bestimmt werden kann.

In SonRoad-M wird im Geländeschnitt zwischen Quelle und Empfangspunkt der in Abschnitt 5.2 beschriebene ray tracing-Algorithmus eingesetzt und so der Meteoefluss auf die Ausbreitung charakterisiert. Dabei wird in einem iterativen Verfahren derjenige Schallstrahl gesucht, welcher dem Empfangspunkt möglichst nahe kommt. Wird ein Strahl gefunden, welcher den Empfangspunkt berührt (damit liegt der Empfangspunkt nicht in einem Schallschatten), so wird der Meteoefluss auf null gesetzt.

Empfangspunkte im Schallschatten werden gemäss Abb. 5.1 mit zwei Parametern charakterisiert. Mit der empirischen Gleichung 5.11 und den durch Vergleich mit den numerischen Simulationen gefundenen

²Walton E. McBride et al., Scattering of sound by atmospheric turbulence: Predictions in a refractive shadow zone, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, p.1336-1340 (1992)

³A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to its Physical Principles and Applications* (McGraw-Hill, New York, 1981)

⁴Alain Berry, G. A. Daigle, Controlled experiments of the diffraction of sound by a curved surface, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, p.2047-2058 (1988)

⁵D. Heimann, G. Gross, Coupled simulation of meteorological parameters and sound level in a narrow valley, *Applied Acoustics*, vol. 56, p.73-100 (1999)

⁶K. Attenborough et al., Benchmark cases for outdoor sound propagation models, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, p.173-191 (1995)

⁷B. Ploving, J. Kragh, *Comprehensive Model for Sound Propagation - Including Atmospheric Refraction*, DELTA Acoustics & Vibration, Report AV 2004/99 (1999)

⁸J. Hofmann, K. Heutschi, An Engineering Model for Sound Pressure in Shadow Zones Based on Numerical Simulations, *Acta Acustica - Acustica* 91 (2005) 661-670

Koeffizienten A_0 und A_1 aus der Tabelle 5.1 wird der spektrale Meteeffekt D_{met} bestimmt.

$$D_{\text{met}} = A_0 + A_1 \cdot \frac{d_R}{l_R} \quad (5.11)$$

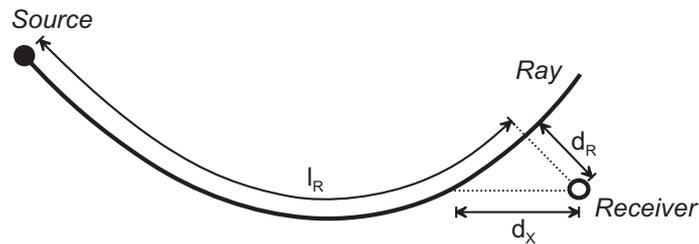


Abbildung 5.1: Die zur Charakterisierung einer Schattzone verwendeten Parameter d_R und l_R .

Frequency [Hz]	A_0 [dB]	A_1 [dB]
50	-0.4	-35.2
63	-0.3	-44.6
80	-0.2	-57.6
100	0.0	-72.1
125	0.7	-91.8
160	1.7	-112.4
200	2.8	-123.1
250	4.3	-119.9
315	5.1	-101.6
400	3.3	-65.9
500	-1.1	-31.6
630	-3.8	-53.4
800	-3.2	-120.0
1000	-2.1	-157.4
1250	-1.1	-188.8
1600	0.2	-264.5
2000	-0.8	-215.5

Tabelle 5.1: Die zur Berechnung des Meteeffekts im Schallschatten benötigten Koeffizienten.

Ist bei einer Ausbreitungssituation die Sichtverbindung unterbrochen, muss der Algorithmus erweitert werden, da sonst in für diese Situationen auch unter neutralen Ausbreitungsbedingungen ein Meteeffekt ausgewiesen wird. Um dies zu verhindern, werden die Parameter d_R und l_R stets auch für geradlinige Schallausbreitung bestimmt (siehe Abb. 5.2). Kann auf diese Weise mit Gl. 5.11 eine Dämpfung berechnet werden, wird diese vom eigentlichen Meteeffekt abgezogen.

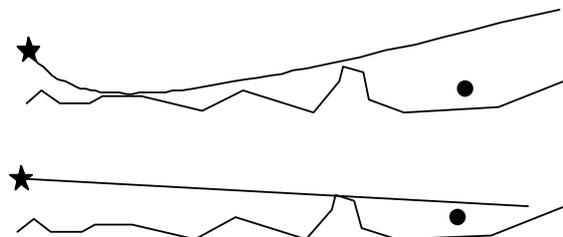


Abbildung 5.2: Suche des relevanten Schallstrahls zur Berechnung des Meteeffektes unter hinderlichen Ausbreitungsbedingungen. Der gefundene Strahl berührt, abhängig von der Meteosituation, oft den Boden nicht. Unten ist die Referenzsituation mit geradliniger Schallausbreitung dargestellt.

Die zur Modellbildung eingesetzten numerischen Simulationen zeigen im Bereich der Schallschattengrenze bei mittleren Frequenzen Pegelerhöhungen im Vergleich zur neutralen Ausbreitungsbedingung.

Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass eine Schallwelle bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen von der Schallschattenzone aus in das darüberliegende Gebiet gelangt. Dies führt zu lokalen Verdichtungen im Schallfeld. Da der Bereich einer solchen Verdichtung auf wenige Meter beschränkt und aufgrund der turbulenten Natur der Atmosphäre auch nicht stabil ist, ist die Berücksichtigung positiver Meteeffekte bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen in der Praxis meist nicht sinnvoll. Positive Meteeffekte dieser Art werden deshalb bei SonRoad-M im Spektrum auf Null gesetzt (siehe auch Abbildung 5.3).

Der Meteeffekt wird an der Schallschattengrenze linear ausgeblendet, um Unstetigkeiten im Modell zu verhindern. Dazu werden die Pegel D_{met} des mit Gleichung 5.11 berechneten Spektrums für Situationen mit $d_R/l_R < 0.05$ mit Faktor K_{fade} gewichtet:

$$K_{\text{fade}} = 20 \frac{d_R}{l_R} \quad (5.12)$$

Abbildung 5.3 zeigt den Meteeffekt für verschiedene Werte für d_R/l_R . Dabei liegt der kleinste Wert mit $d_R/l_R < 0.05$ innerhalb des Ausblendungs-Bereichs ($K_{\text{fade}} = 0.5$). Das resultierende Spektrum muss danach noch wie oben beschrieben limitiert werden, da zwischen ca. 200 Hz und 400 Hz positive Meteeffekte auftreten.

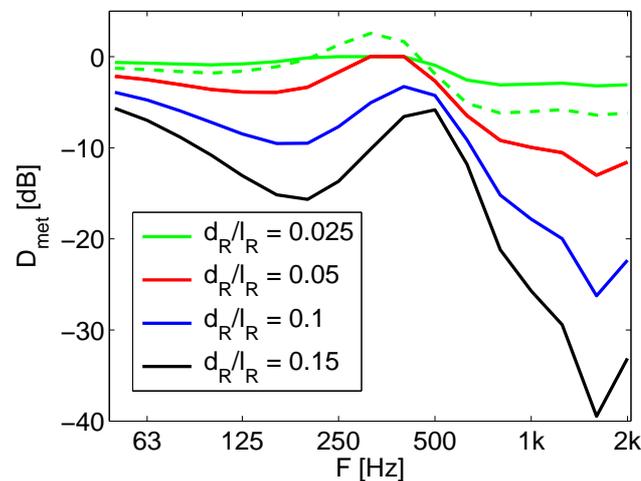


Abbildung 5.3: Die spektralen Meteeffekte D_{met} des Modells für unterschiedliche Werte für d_R/l_R . Die gestrichelte Linie zeigt das für $d_R/l_R = 0.025$ berechnete Spektrum gemäss Gleichung 5.11, welches aber aufgrund der Nähe zur Schallschattengrenze noch begrenzt und mit einem Faktor gewichtet werden muss. Erläuterungen siehe Text.

5.4 Meteeffekt bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen

Bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen wird als Meteeffekt ausschliesslich die Reduktion der Hinderniswirkung aufgrund gekrümmter Ausbreitungswege berechnet. Existieren Hindernisse, welche unter neutralen Ausbreitungsbedingungen die Sichtverbindung unterbrechen, so wird der Schallpfad in der vertikalen Ebene vom Quell- zum Empfangspunkt mit ray tracing analysiert (siehe Abschnitt 5.2). Dabei wird für jede Pfadstrecke (unter neutralen Ausbreitungsbedingungen) der aufgrund des Meteeinflusses gekrümmte Schallstrahl mit gleichem Start- und Endpunkt gesucht. So wird ein gekrümmter Pfad erhalten, welcher nach einer winkeltreuen Streckung (Abbildung 5.4 bis 5.6) als Schallpfad ohne gekrümmte Ausbreitungswege interpretiert werden kann, welcher aber eine äquivalente Situation beschreibt wie die originale Situation mit Meteeinfluss. Für beide Pfade lässt sich mit dem SonRoad-Basismodell (ohne Meteomodul) eine spektrale Hinderniswirkung berechnen; deren Pegeldifferenz ist der gesuchte Meteeffekt.

Das Verfahren wurde mit wellentheoretischen Simulationen (Finite Differenzen im Zeitbereich, siehe Abschnitt 4.8) für Ausbreitungen bis 200 m überprüft. Dabei traten kleinere Differenzen auf, die u.a. darauf zurückzuführen sind, dass ein Pfad als Linie keine Breite besitzt und somit beliebig nahe am Boden verlaufen kann, wo die Refraktion besonders stark ist. Als Optimierung des ray tracing Verfahrens wird deshalb die Refraktion etwas abgeschwächt. Dazu wird im Refraktionsalgorithmus nicht der eigentliche relative effektive Schallgeschwindigkeitsgradient $K_{(h)}$ (siehe Gl. 5.9), sondern die Grösse $K_{(h)}^*$ eingesetzt:

$$K_{(h)}^* = 0.8 \cdot K_{(h+0.8)} \quad (5.13)$$

Hinderniskanten können sich aufgrund der Pfadstreckung so verschieben, dass sie die Sichtverbindung nicht länger unterbrechen. Dies entspricht der Situation, bei der aufgrund der gekrümmten Schallwege ein Hindernis überstiegen wird.

Wird bei einer förderlichen Ausbreitungssituation die Sichtverbindung nicht unterbrochen, so wird der Geländeschnitt (inklusive Hinderniskanten) nach dem Ort abgesucht, welcher bei einer Berechnung der Hinderniswirkung nach Maekawa die grösste Hinderniswirkung ergeben würde (Ort mit grösster Pfadlängendifferenz Z , wobei alle $Z < 0$ sind). Danach wird das oben beschriebene Verfahren mit dem gefundenen Ort als einzelne Hinderniskante aufgerufen. Auf diese Weise lässt sich der Meteeffekt jeder förderlichen Ausbreitungssituation als Pegeldifferenz zweier (ein- oder mehrfacher) Hinderniswirkungen berechnen.

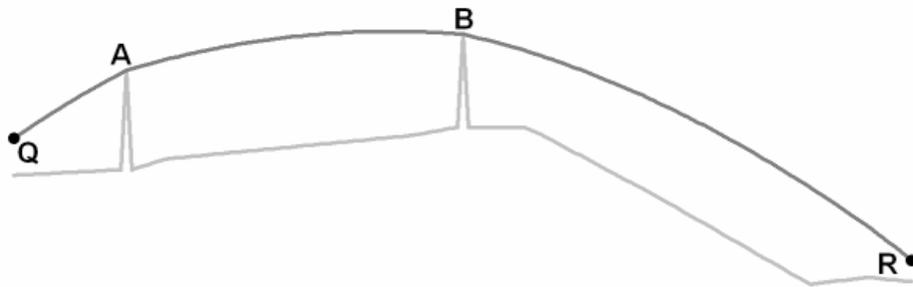


Abbildung 5.4: Mit einem iterativen ray tracing Verfahren wird der gekrümmte Direktschall-Pfad von der Quelle ausgehend gefunden. Die Abbildung zeigt grau das Gelände inklusive zweier Hinderniskanten im Profil, Q bezeichnet den Quellpunkt, R den Messpunkt, A und B die Schnittpunkte der beiden Hinderniskanten.

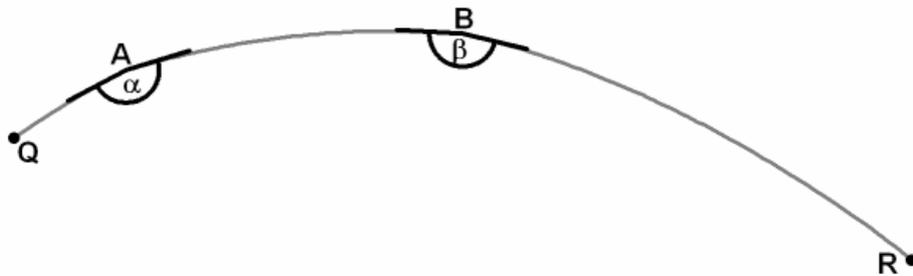


Abbildung 5.5: Die Analyse des gekrümmten Direktschall-Pfades umfasst die Längen der Pfadabschnitte sowie die Winkel zwischen den Tangenten an den ein- und ausfallenden Schallstrahlen auf den Hinderniskanten.

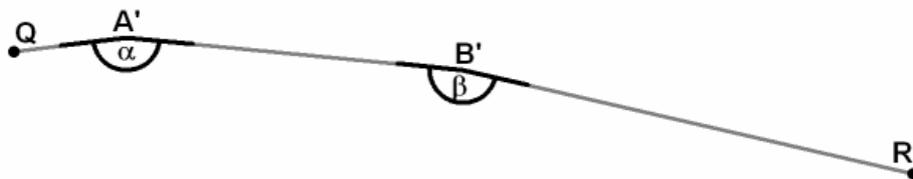


Abbildung 5.6: Die Beugungssituation an den Hinderniskanten wird durch eine winkel- und längentreue Streckung nicht wesentlich beeinflusst. Daher entspricht die Hinderniswirkung der transformierten Situation unter neutralen Ausbreitungsbedingungen der Hinderniswirkung der originalen Situation unter den ursprünglichen förderlichen Ausbreitungsbedingungen. Die Abbildung zeigt den transformierte Pfad der Situation in Abbildung 5.5.

5.5 Begrenzung des Meteeffektes

Um Extremwerte in speziellen Situationen zu vermeiden, werden sowohl positive (verstärkende) als auch negative Meteeffekte begrenzt. Dazu wird bereits das fein aufgelösten Pegelspektrum (vor dem zusammenfassen in Terzbänder) für jede Frequenz zwischen -20 dB und $+15$ dB begrenzt.

Zusätzlich werden bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen die Resultate der Berechnung mit gekrümmten Schallstrahlen und der Referenzberechnung getrennt spektral begrenzt, so dass folgende Bedingung erfüllt ist (mit der Frequenz f und dem Parameter $D_{min} = -20$ dB).

$$D_{met} > \begin{cases} D_{min} - 3dB & \text{für } D_{min} > -0.1 \cdot f \\ -0.1 \cdot f - 3dB & \text{für } D_{min} \leq -0.1 \cdot f \end{cases}$$

5.6 Diskussion

Mit dem für förderliche Ausbreitungssituationen eingesetzten Algorithmus (Abschnitt 5.4) berechnet sich der Meteeffekt als Differenz zweier Hinderniswirkungen. Die Berechnung dieser Hinderniswirkungen erfolgt entsprechend dem SonRoad-Basismodell gemäss ISO 9613-2. Zum Vergleich wurde dieses Verfahren zur Bestimmung des Meteeffektes einer Variante gegenübergestellt, welche zur Berechnung der Hinderniswirkung eine analytische Lösung von Pierce⁹ verwendet. Diese beschreibt präzise die Situation ohne Boden, mit einer perfekten Halbebene als Hindernis. Die Lösung kann auch zur Berechnung des Meteeffektes für Situationen mit mehrfacher Hinderniswirkung verwendet werden, da sich dabei der Meteeffekt für jede Hinderniskante gesondert berechnen lässt. In Abbildung 5.7 werden beide Berechnungsvarianten beispielhaft für die in Abschnitt 6.4.1 beschriebene Situation in Meppen miteinander verglichen. Bei diesen förderlichen Situationen ohne Hinderniswirkung weist der mit SonRoad-M berechnete Meteeffekt einen besonderen spektralen Verlauf auf, welcher sowohl für tiefe als auch für hohe Frequenzen gegen 0 dB geht (siehe Abbildung 5.7). Der Meteeffekt beim analytischen Lösungsansatz ist vor allem bei grösseren Distanzen ausgeprägter. Dies ist nicht überraschend, weist doch die analytische Lösung für die Halbebene höhere Dämpfungen aus in Situationen, welche die Sichtverbindung nur knapp unterbrechen. Zusätzlich treten im mit dem analytischen Lösungsansatz berechneten Spektrum ausgeprägte Interferenzmuster auf. Diese können als Interferenzen des Direktschalls mit der auf der (gemäss des Ansatzes unendlich langen) Hinderniskante liegenden Sekundärquelle interpretiert werden. Sie sind somit in unserem Fall unerwünscht, da bei einer Mitwindsituation ohne reales Hindernis keine Lokalisierung von Sekundärquellen erfolgen kann. Somit erweist sich der in SonRoad-M verwendete, einfachere Ansatz auch als plausibler.

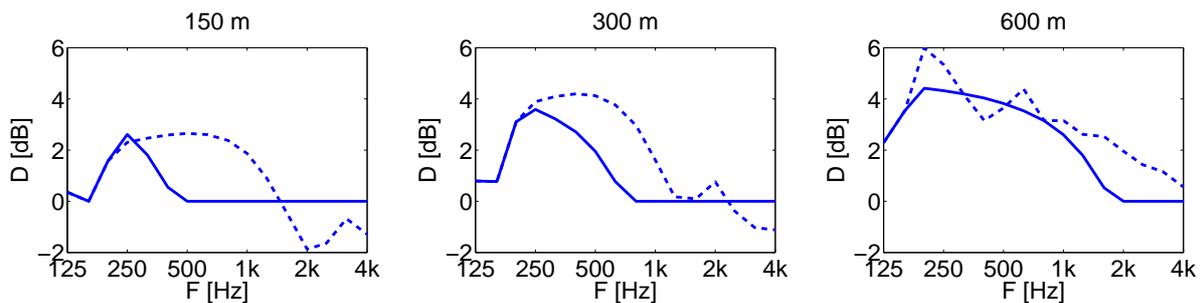


Abbildung 5.7: Mit SonRoad-M berechneter Meteeffekt für die Situation in Meppen bei 3 m/s Mitwind in 10 m Höhe (siehe Abschnitt 6.4.1). Angegeben sind die spektralen Pegeldifferenzen bezüglich neutraler Ausbreitung für die 4 m hohen und 150, 300 resp. 600 m entfernten Messpunkte. Die gestrichelte Linie zeigt den Meteeffekt für eine Variante des Modells, bei welchem die äquivalente Hinderniswirkung gemäss dem analytischen Ansatz nach Pierce berechnet wird, wobei im Spektrum Interferenzmuster sichtbar werden (siehe Text).

Besonders bei Situationen im Schallschatten wird die Ausbreitung durch die Wind- und Temperaturgradienten im ersten Meter über Boden entscheidend beeinflusst. Um dies zu verdeutlichen, wurde für die Situation in Meppen eine Mitwindsituation für verschiedene Bodenrauigkeiten berechnet. Dabei

⁹A. D. Pierce, Acoustics an introduction to its physical principals and applications, Acoustical Society of America, Woodbury (1989)

wurde das logarithmische Windprofil $v(z)$ so gewählt, dass die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe stets gleich blieb:

$$v(z) = v_m \cdot \frac{\ln(z/z_0 + 1)}{\ln(z_m/z_0 + 1)} \quad (5.14)$$

v_m bezeichnet dabei die auf der Messhöhe z_m gemessene Windgeschwindigkeit, z_0 die Rauigkeitslänge des logarithmischen Wandgesetzes. Für Grasland und Ackerflächen bewegt sich dieser Wert von z_0 zwischen 0.005 m und 0.1 m¹⁰. Diese beiden Eckwerte wurden für die Berechnung verwendet. Abbildung 5.8 zeigt die resultierenden Meteeffekte. Mit abnehmender Rauigkeitslänge werden die Ausbreitungsbedingungen dabei stärker hinderlich. Betrachtet man die beiden recht ähnlichen Windprofile, so sind die grossen Pegelunterschiede bemerkenswert. Die Bestimmung der korrekten Rauigkeitslänge kann sich somit in der Praxis als problematisch erweisen. Bei Mitwindsituationen ist dieser Einfluss grundsätzlich kleiner, da sich dort die zur Charakterisierung der Situation relevanten Schallstrahlen in grösserer Höhe befinden.

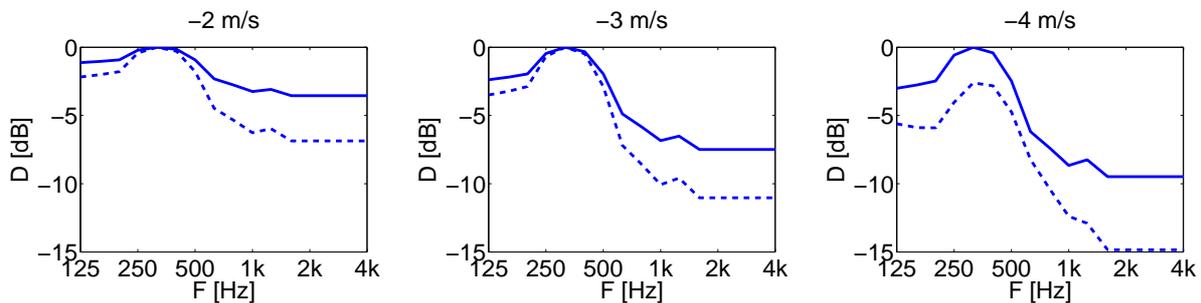


Abbildung 5.8: Mit SonRoad-M berechneter Meteeffekt für die Situation in Meppen bei 2, 3 und 4 m/s Gegenwind in 10 m Höhe (siehe Abschnitt 6.4.1). Angegeben sind die spektralen Pegeldifferenzen bezüglich neutraler Ausbreitung für den 4 m hohen und 150 m entfernten Messpunkt. Die ausgezogene Kurve zeigt den Meteeffekt bei geringer Bodenrauigkeit mit $z_0 = 0.005$ m, die gestrichelte Kurve den Meteeffekt mit $z_0 = 0.1$ m, dem für die restlichen Berechnungen verwendete Wert.

SonRoad-M wurde bewusst so definiert, dass bei hinderlicher Ausbreitung für Frequenzen über 2 kHz ein tendentiell moderater Meteeffekt ausgewiesen wird. Der Grund dafür ist, dass bei diesen Situationen der an Luft-Inhomogenitäten ("Luftblasen" mit unterschiedlicher Temperatur) gestreute Schall den Pegel bestimmt. Diese Luft-Inhomogenitäten wurden bei den Simulationen zur Abstimmung des SonRoad-M-Meteomodells berücksichtigt (siehe Anhang A.7.2), sie sind jedoch von vielen nur schwer messbaren Parametern abhängig. Der simulierte Meteeffekt wurde ausserdem zu hohen Frequenzen hin approximiert, da aufgrund der verfügbaren Rechenleistung keine Frequenzen über 2.5 kHz simuliert werden konnten.

5.7 Unberücksichtigte Effekte

Ergänzend sollen Effekte aufgeführt werden, welche in speziellen Ausbreitungssituationen bedeutend sein können, jedoch in SonRoad-M nicht berücksichtigt werden.

In SonRoad werden die Phasenbeziehungen zwischen Direktschall und Bodenreflexionen stets für neutrale Ausbreitungsbedingungen berücksichtigt. Dass sich sowohl hinderliche als auch förderliche Ausbreitungsbedingungen unterschiedlich auf die Laufzeit des Direktschalls und die Laufzeiten der Bodenreflexionen auswirken, wird stets vernachlässigt. Somit werden unter anderem Frequenzverschiebungen der Minima und Maxima des Bodeneffektspektrums vernachlässigt. Eine korrekte Berücksichtigung dieser Phänomene wäre sehr aufwändig und erscheint wenig sinnvoll, wenn nicht gleichzeitig Gelände und Hindernisse zu einem sehr hohen Detaillierungsgrad berücksichtigt werden. Entschärfend ist der Umstand, dass der A-Pegel relativ unempfindlich auf kleine Frequenzverschiebungen des Bodeneffekteinbruchs reagiert.

¹⁰VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12, "Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht"

Bei förderlichen Situationen mit Schallpfaden welche sich über längere Distanzen in unmittelbarer Bodennähe ausbreiten, kann es aufgrund der Krümmung der Schallstrahlen zu Mehrfach-Bodenreflexionen kommen. Dieses Phänomen kann insbesondere bei der Schallausbreitung über Wasseroberflächen beobachtet werden und führt in grosser Distanz zu signifikant höheren Pegeln.

6 Referenzmessungen

6.1 Messung Allmend Thun 27. Juni 2002

6.1.1 Beschreibung Messung

Am 27. Juni 2002 wurden auf der Thuner Allmend Schallausbreitungsexperimente im Distanzbereich zwischen 100 und 400 m mit einem Lautsprecher als Anregung durchgeführt. Die Höhe des Lautsprechers über Boden betrug 1.0 m, die Mikrophone waren 102 m, 199 m und 376 m entfernt bei Höhen von 1.5 m und 4.0 m. Der Boden war im relevanten Ausbreitungsgebiet eben und mit Ausnahme von kleinen asphaltierten Zonen mit ca. 30 cm hohem Gras bestanden. Der Azimutwinkel (bzgl. Nord) der Ausbreitungsrichtung vom Lautsprecher zu den Mikrophonen betrug 100° .

Für die Messungen wurde das selbst entwickelte Korrelationsmessverfahren FRAKMLS eingesetzt. Dabei wird ein besonderes Rauschsignal (Maximalfolge) gemäss einem speziellen 1/0-Muster ein- und ausgeschaltet. Durch Vergleich der am Mikrophon empfangenen Signalleistung mit dem Sendemuster kann eine Störgeräuschschätzung und -kompensation vorgenommen werden, sodass auch mit geringen Signalpegeln immer noch zuverlässige Aussagen möglich sind.

Während der Zeitspanne der akustischen Messungen wurden an einem Punkt mit einem Ultraschallanemometer (USA-1) zeitlich hochaufgelöste (0.5 Sekunden) Messungen der Windgeschwindigkeit und der Temperatur durchgeführt. Die Messsonde wurde im Bereich der Schallausbreitungsstrecke 4 m über Boden eingerichtet.

6.1.2 Diskussion

Wind, Temperatur und Stabilität

Während der Messung war der Himmel nahezu wolkenlos. Auf Grund des Sonnenstandes ist für die Messzeit von 9.30 bis 11.30 Uhr hinsichtlich der Strahlungsbilanz von einer mässigen bis starken Einstrahlung auszugehen. Die Abbildung 6.1 zeigt die gemessenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen sowie die aus den Ultraschallanemometerdaten abgeleitete Monin-Obukhov Länge L als Mass für die Stabilität der untersten Luftschicht. Die Windgeschwindigkeit lag zuerst unter 1 m/s, bei einer leichten Zunahme gegen Mittag. Bis um 10.15 Uhr war die Temperaturschichtung stark labil (L negativ und sehr klein). Mit Zunahme des Windes verschob sich in der zweiten Vormittagshälfte die Temperaturschichtung gegen einen nur noch labilen Zustand. Insgesamt kann für die ganze Messperiode von hinderlichen Ausbreitungsbedingungen ausgegangen werden. Die Temperatur auf 4 m über Boden lag zu Beginn der Messung um 9.30 Uhr bei 20.4 und gegen Ende der Messung um 11.30 Uhr bei 23.2 Grad. Unter den gegebenen Umständen ist davon auszugehen, dass bei einer Quellenhöhe von 1.0 m ein 4.0 m hoher Empfangspunkt ab einem Abstand von ca. 130 m in der geometrischen Schattenzone liegt.

Auswertung der Pegel

Die Abbildungen 6.2 bis 6.5 zeigen die gemessenen Frequenzgänge des Boden/Meteo-Effekts. Die Pegel an den Empfangspunkten wurden dazu um die geometrische Verdünnung und die Luftabsorption korrigiert. Ein Wert von X dB bedeutet, dass im Vergleich zur ungestörten Schallausbreitung im Freifeld der Pegel am Empfangspunkt um X dB höher liegt.

Die gemessenen Frequenzgänge des Boden/Meteo-Effekts wurden in einem weiteren Schritt mit einer Berechnung der Bodenreflexion nach SonRoad verglichen. Anhand des Vergleichs wurde der Strömungswiderstand der Ausbreitungssituation zu 200 Rayls abgeschätzt. Die Abbildungen 6.6 bis 6.9 zeigen den gemittelten gemessenen Boden/Meteo-Effekt und die Berechnung nach SonRoad unter Berücksichtigung des Kohärenzverlustes. Für den 102 (h=4 m) Punkt liegt die Messung systematisch um 2 bis 5 dB tiefer als die Rechnung. Oberhalb von 2.5 kHz liegt die Messung höher als die Rechnung. Die Rechnung prognostiziert hier einen Interferenzeinbruch, der sich in der Messung nicht zeigt. Dies könnte auf kleine Unebenheiten des Bodens zurückzuführen sein. Beim 199 (h=4 m) Punkt liegt die Messung systematisch um 8 bis 10 dB tiefer als die Rechnung. Dieser Punkt liegt bereits im geometrischen Schatten. Die Abschwächung in der Schattenzone zeigt sich als weitgehend unabhängig von der Frequenz. Dies deutet auf den Mechanismus hin, dass tiefe Frequenzen durch Beugung

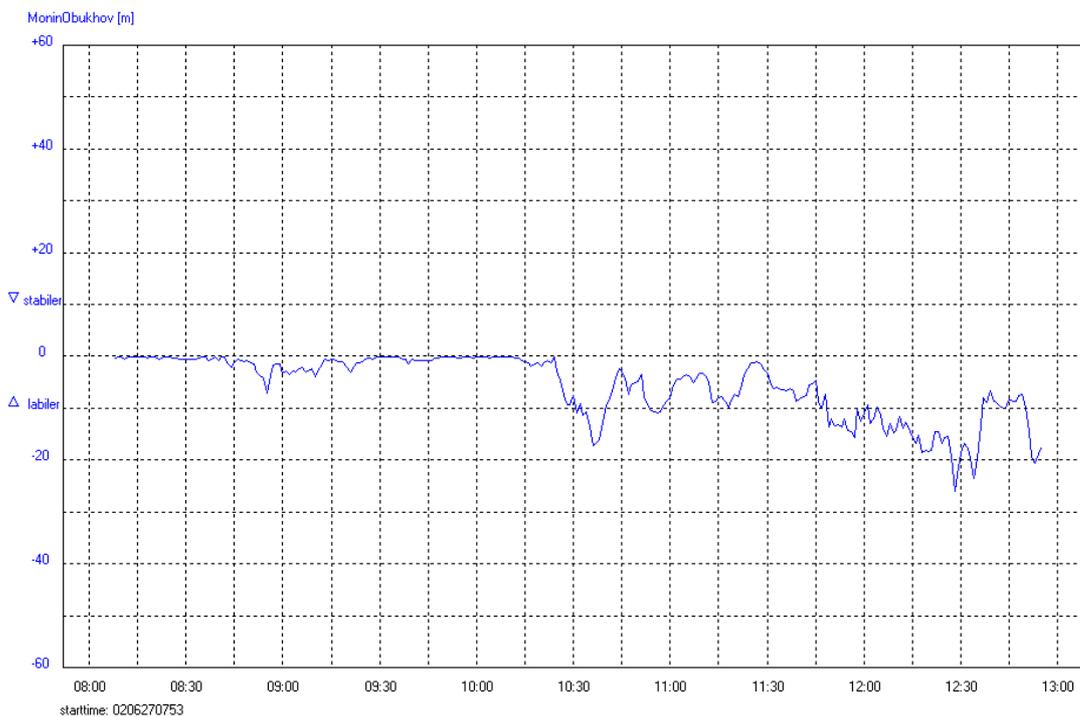
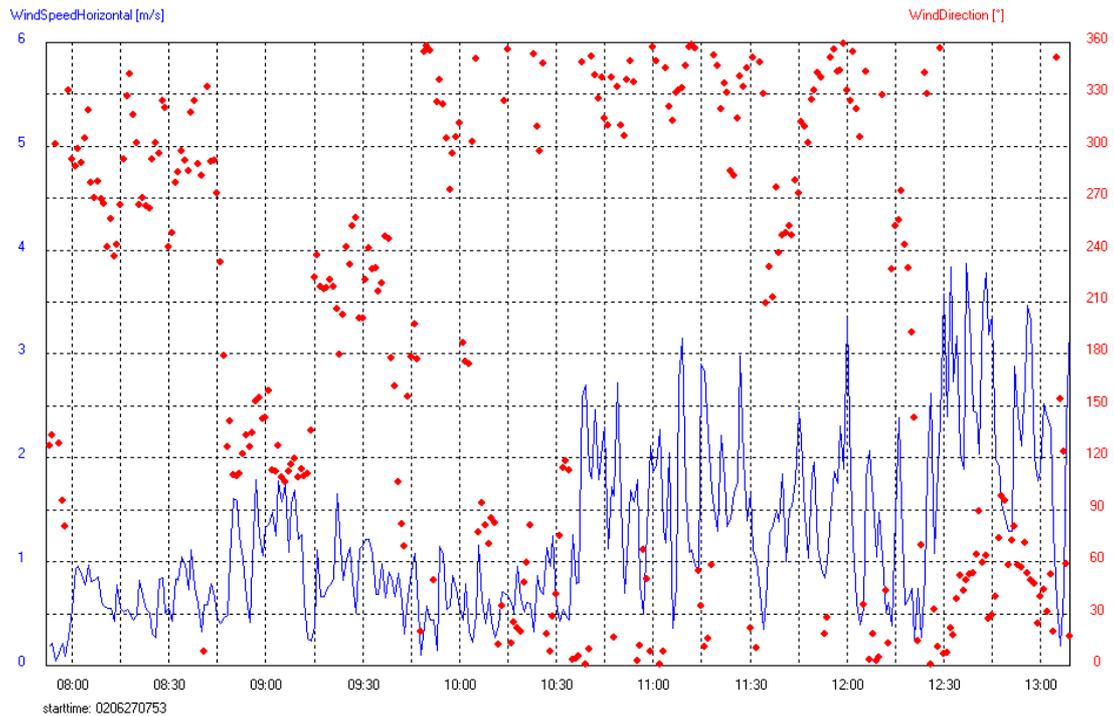


Abbildung 6.1: Gemessene Windgeschwindigkeiten (ausgezogene Linie oberes Diagramm) und -richtungen (Punkte oberes Diagramm), sowie Monin-Obukhov-Längen L am 27. Juni 2002 auf der Thuner Allmend.

den Weg in die Schattenzone finden, währenddem die hohen Frequenzen durch Streueffekte in die Schattenzone gelangen. Beim 376 ($h=1.5$ m) Punkt fallen bei 200 Hz Messung und Rechnung praktisch zusammen. Bei 630 Hz zeigt die Messung einen ausgeprägten Einbruch, der rund 12 dB tiefer als die Rechnung liegt. Gegen hohe Frequenzen verringert sich der Unterschied Rechnung zu Messung auf

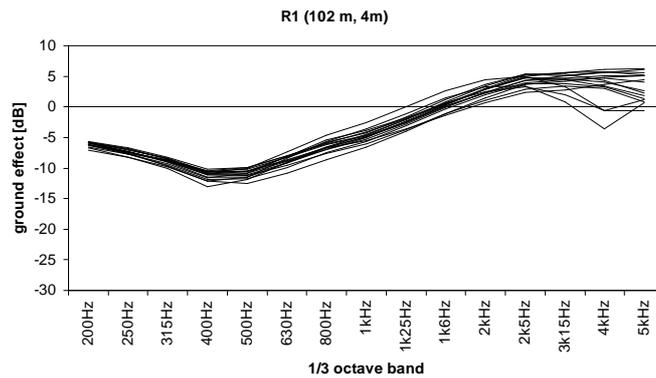


Abbildung 6.2: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 102 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R1. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

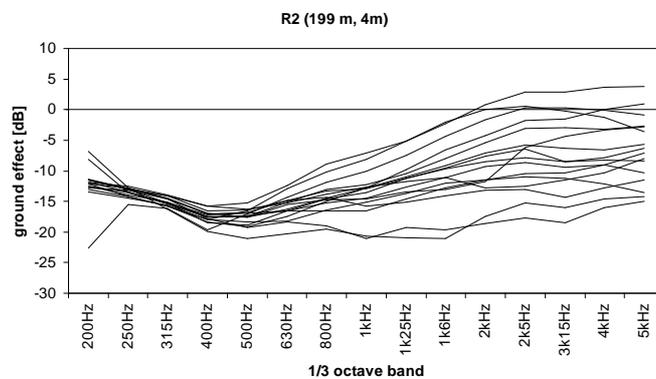


Abbildung 6.3: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 199 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R2. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

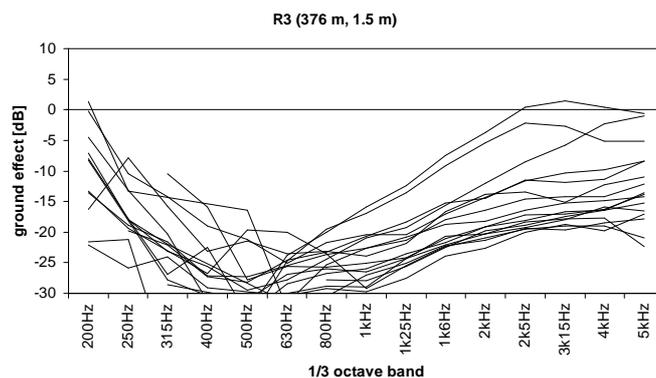


Abbildung 6.4: Frequenzgänge des Boden/Meteo-Effekts für den 376 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt R3. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

rund 8 dB. Der 376 (h=4 m) Punkt zeigt bei 200 Hz einen Messpegel, der nahe an der Rechnung liegt. Für höhere Frequenzen liegt die Messung wiederum systematisch um 8 bis 10 dB tiefer als die Rechnung.

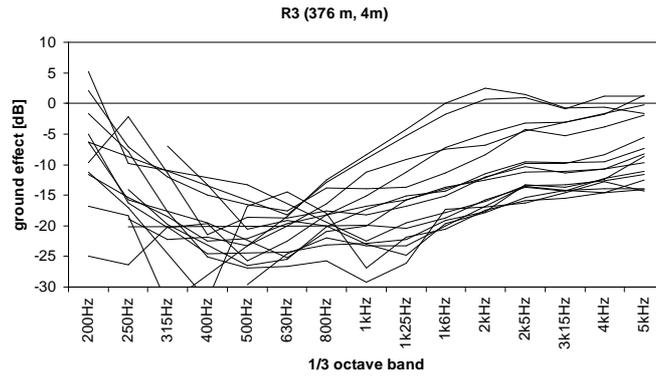


Abbildung 6.5: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 376 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R3. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

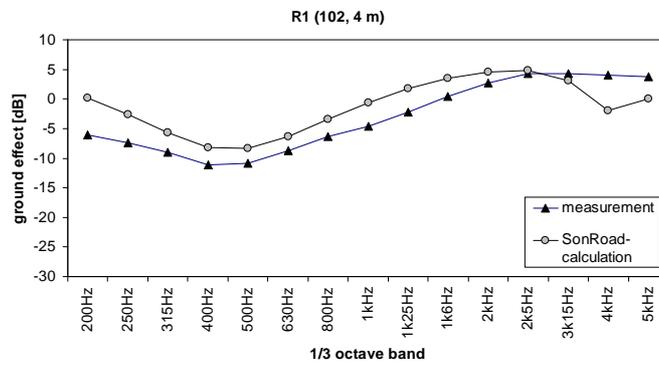


Abbildung 6.6: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 102 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R1 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

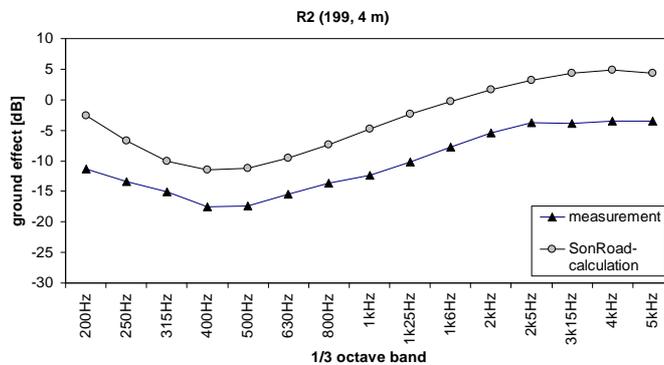


Abbildung 6.7: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 199 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R2 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

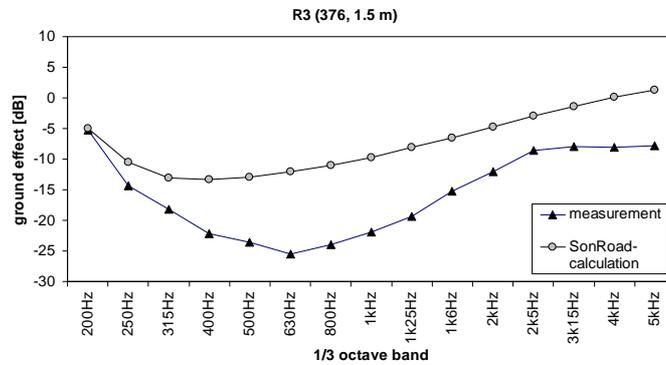


Abbildung 6.8: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 376 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt R3 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

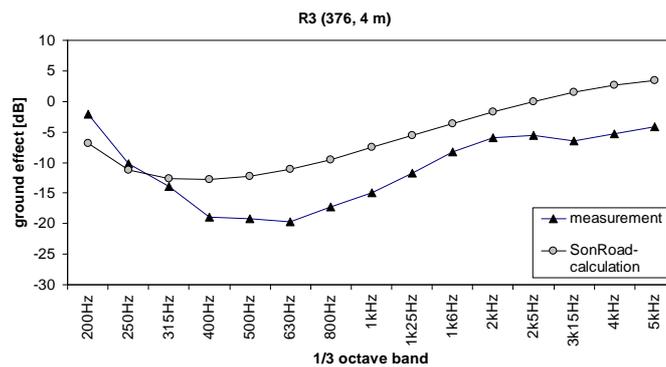


Abbildung 6.9: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 376 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R3 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

6.2 Messung Allmend Thun 31. Oktober 2002

6.2.1 Beschreibung Messung

Am 31. Oktober 2002 wurden auf der Thuner Allmend die oben beschriebenen Schallausbreitungsexperimente im Distanzbereich zwischen 100 und 400 m mit einem Lautsprecher als Anregung wiederholt. Die Höhe des Lautsprechers über Boden betrug wiederum 1.0 m, die Mikrofone waren 102 m, 199 m und 376 m entfernt bei Höhen von 1.5 m und 4.0 m. Der Boden war im relevanten Ausbreitungsgebiet eben und mit Ausnahme von kleinen asphaltierten Zonen mit ca. 15 cm hohem Gras bestanden.

Während der Zeitspanne der akustischen Messungen wurden an einem Punkt mit einem Ultraschallanemometer (USA-1) zeitlich hochaufgelöste (0.5 Sekunden) Messungen der Windgeschwindigkeit und der Temperatur durchgeführt. Die Messsonde wurde im Bereich der Schallausbreitungsstrecke 4 m über Boden eingerichtet.

6.2.2 Diskussion

Temperatur, Wind und Stabilitätsklasse

Nach dem Sonnenaufgang kurz vor 8 Uhr war es während der ganzen Messdauer von 8 bis 11.30 Uhr bei etwas Schleierbewölkung weitgehend sonnig. Das Gras war als Folge des nächtlichen Taus bis etwa 10 Uhr feucht. Auf Grund des relativ niedrigen Sonnenstands ist von einer schwachen bis mässigen Einstrahlung auszugehen. Die Abbildung 6.10 zeigt die gemessenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen sowie die aus den Ultraschallanemometerdaten abgeleitete Monin-Obukhov Länge L als Mass für die Stabilität der untersten Luftschicht. Den ganzen Vormittag über herrschte leichter Wind zwischen 1 und 2 m/s aus wechselnder Richtung. Zwischen 8 und 9 Uhr ist auf Grund der ermittelten Monin-Obukhov-Länge zeitweise von einer Inversion auszugehen. Zwischen 9 und 10.30 Uhr war die Temperaturschichtung neutral bis schwach labil. Ab 10.45 Uhr hat sich dann eine stark labile Schichtung eingestellt.

Auswertung der Pegel

Die Abbildungen 6.11 bis 6.15 zeigen die gemessenen Frequenzgänge des Boden/Meteo-Effekts. Die Pegel an den Empfangspunkten wurden dazu um die geometrische Verdünnung und die Luftabsorption korrigiert. Ein Wert von X dB bedeutet, dass im Vergleich zur ungestörten Schallausbreitung im Freifeld der Pegel am Empfangspunkt um X dB höher liegt.

Die gemessenen Frequenzgänge des Boden/Meteo-Effekts wurden in einem weiteren Schritt mit einer Berechnung der Bodenreflexion nach SonRoad verglichen. Anhand des Vergleichs wurde der Strömungswiderstand der Ausbreitungssituation zu 200 Rayls abgeschätzt. Die Abbildungen 6.16 bis 6.20 zeigen den gemittelten gemessenen Boden/Meteo-Effekt und die Berechnung nach SonRoad unter Berücksichtigung des Kohärenzverlustes. Im Vergleich zur Messung vom 27. Juni lagen die Pegel generell signifikant höher. Dies entspricht tendenziell der Erwartung, da am 31. Oktober eher neutrale bzw. die Ausbreitung begünstigende Bedingungen herrschten, währenddem der 27. Juni klar hinderliche Bedingungen aufwies. An den Punkten R1 und R2 zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung nach SonRoad. Am Punkt R3 dagegen liegen die Messwerte deutlich über den Berechnungen. Überschlammässige ray tracing simulationen zeigen, dass im für R3 relevanten Abstandsbereich von 376 m bei förderlichen Bedingungen tatsächlich mehr als nur zwei Strahlen (Direktschall und Bodenreflexion) von der Quelle zum Empfänger führen. Für den tiefer gelegenen Punkt R3 ($h=1.5$ m) liefert die Simulation rund 10 Strahlen, währenddem für den höheren Punkt R3 ($h=4$ m) nur 6 Strahlen treffen. Dieser Sachverhalt korrespondiert mit den Messungen, indem gegen hohe Frequenzen der Pegelunterschied Messung-Berechnung für den 1.5 m Punkt höher ausfällt als für den 4 m Punkt.

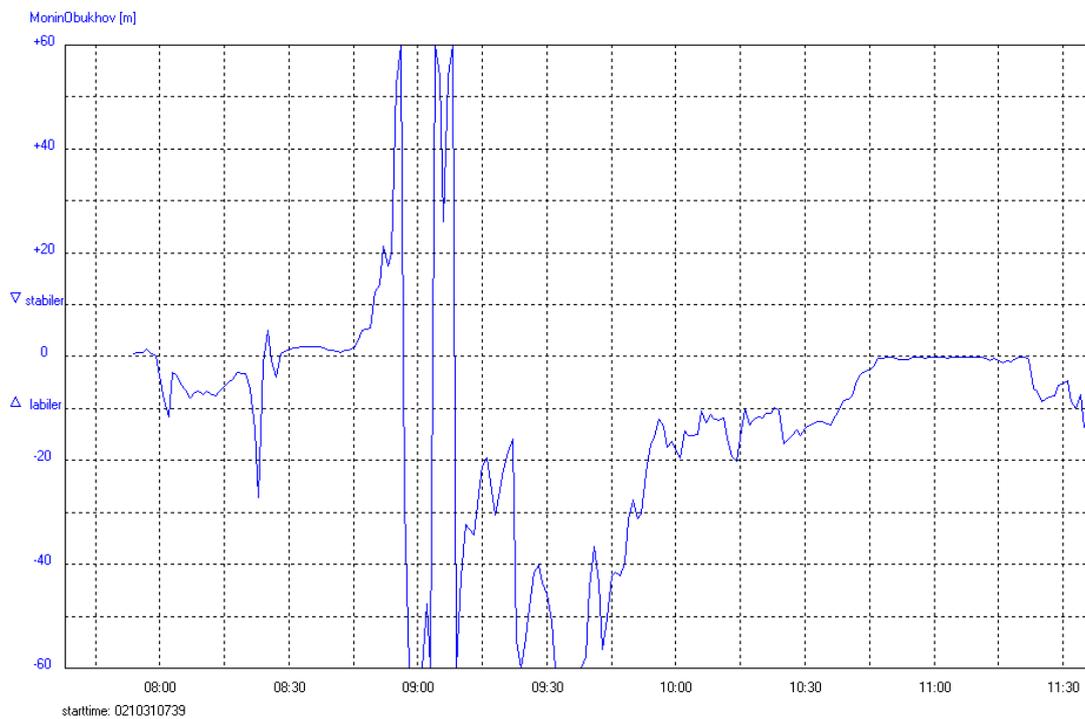
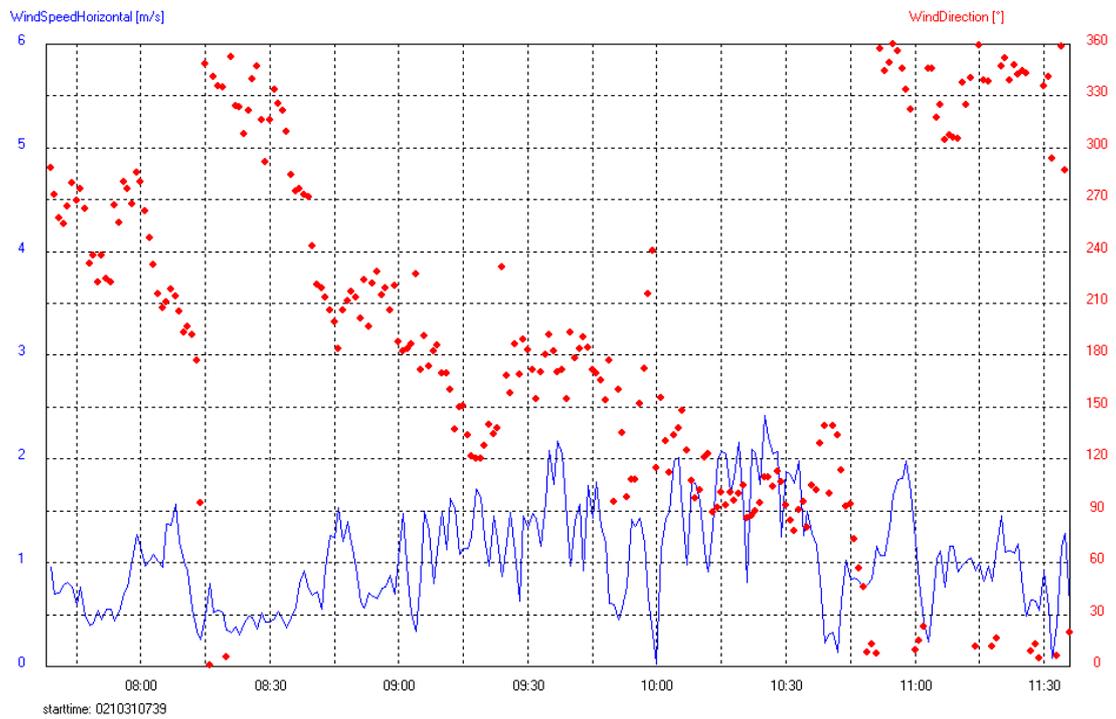


Abbildung 6.10: Gemessene Windgeschwindigkeiten (ausgezogene Linie oberes Diagramm) und -richtungen (Punkte oberes Diagramm), sowie Monin-Obukhov-Längen L am 31. Oktober 2002 auf der Thuner Allmend.

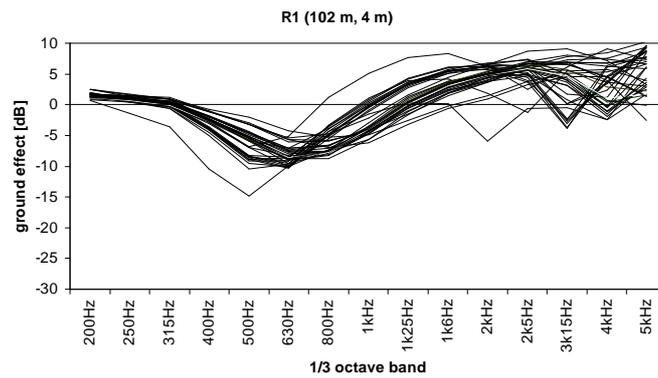


Abbildung 6.11: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 102 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R1. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

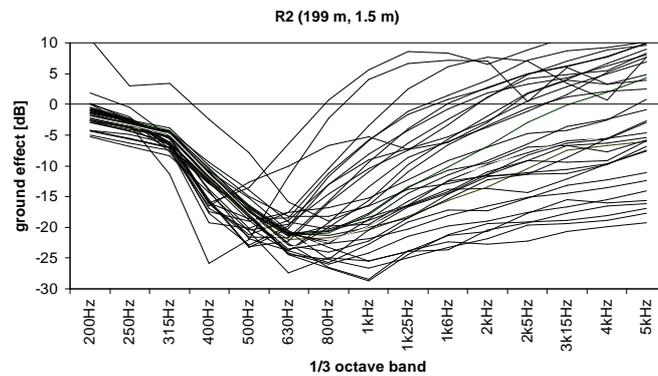


Abbildung 6.12: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 199 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt R2. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

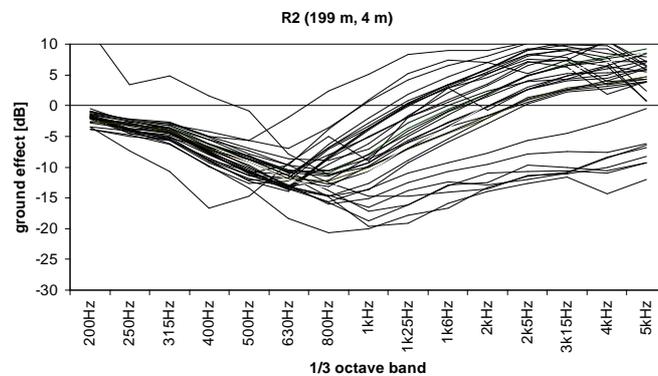


Abbildung 6.13: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 199 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R2. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

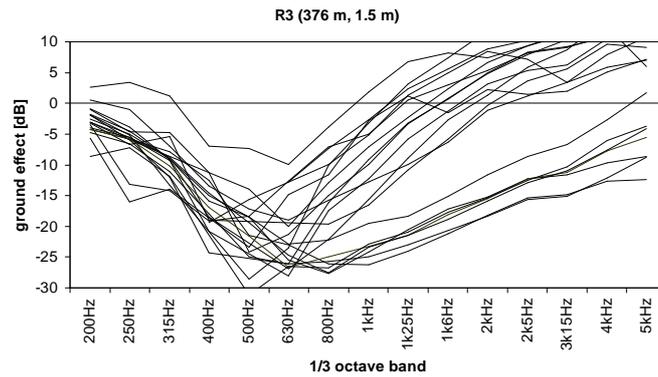


Abbildung 6.14: Frequenzgänge des Boden/Meteo-Effekts für den 376 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt R3. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

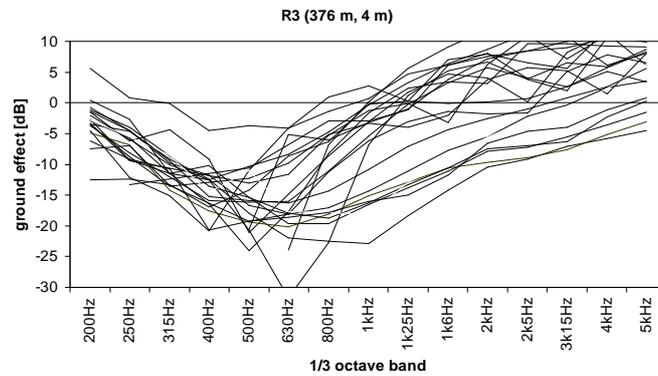


Abbildung 6.15: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 376 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R3. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

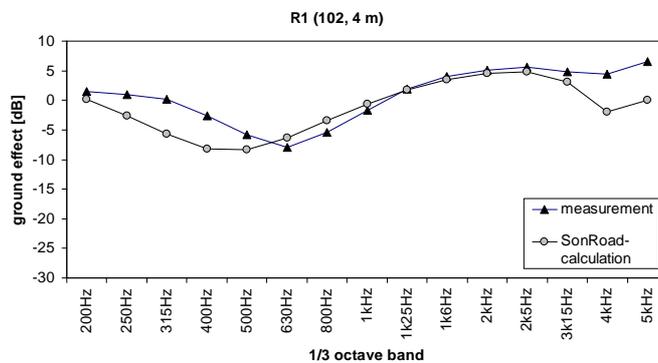


Abbildung 6.16: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 102 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R1 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

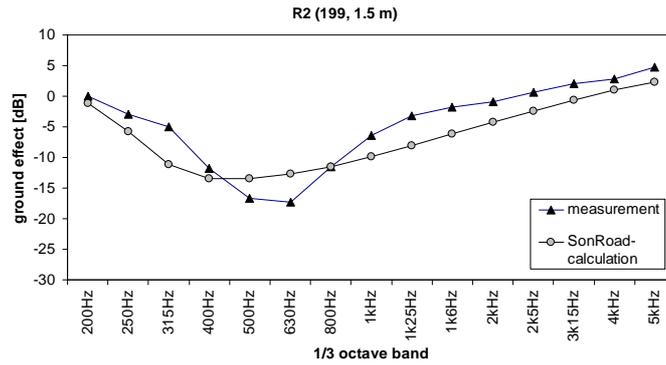


Abbildung 6.17: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 199 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt R2 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

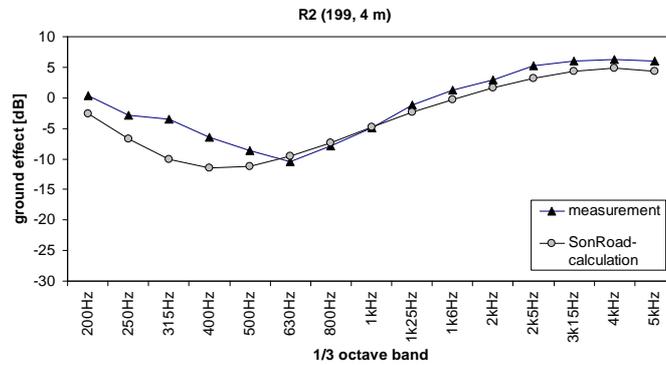


Abbildung 6.18: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 199 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R2 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

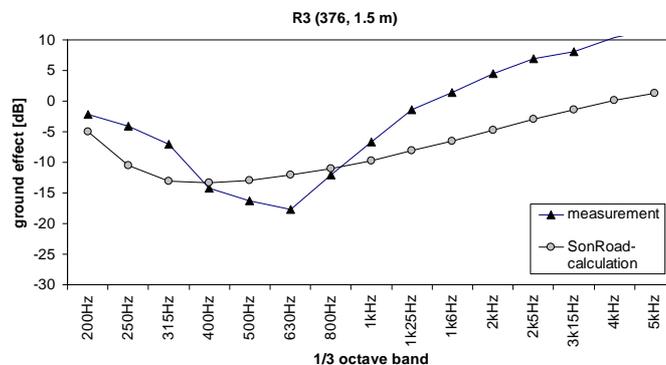


Abbildung 6.19: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 376 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt R3 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

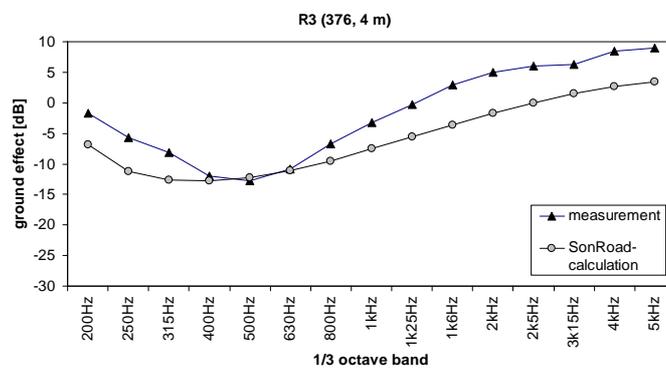


Abbildung 6.20: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 376 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt R3 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 200$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

6.3 Messung Rafz 9. Juni 2004

6.3.1 Beschreibung der Messung

Am Nachmittag des 9. Juni 2004 wurden auf einem Feld bei Rafz Ausbreitungsmessungen zwischen einem Lautsprecher und vier Mikrofonen durchgeführt. Die Quelle war 1.0 m über Boden, die Mikrophone M1 bis M4 in Abständen von 183 und 365 m auf Höhen 1.5 und 4.0 m.

6.3.2 Diskussion

Wind, Temperatur und Stabilität

Während den Messungen herrschten relativ konstante Bedingungen. Der Himmel war leicht bewölkt, die Temperatur lag bei 29°, die Feuchte bei 35%, der Wind blies mit etwa 1.8 m/s entgegen der Ausbreitungsrichtung. Diese Meteobedingungen entsprechen hinderlichen Ausbreitungsverhältnissen. Während der Messung wurde mit einem Ultraschallanemometer 10 mal pro Sekunde der dreidimensionale Windvektor und die Temperatur erfasst. Daraus wurden nach einem Rezept von Heimann¹ die beiden charakteristischen Größen zur Beschreibung der Atmosphäre Reibungsgeschwindigkeit $u^* = 0.16$ und Potenzielle Temperatur $\Theta^* = -1.26$ bestimmt.

Auswertung der Pegel

Die Abbildungen 6.21 bis 6.24 zeigen die gemessenen Frequenzgänge des Boden/Meteo-Effekts. Die Pegel an den Empfangspunkten wurden dazu um die geometrische Verdünnung und die Luftabsorption korrigiert. Ein Wert von X dB bedeutet, dass im Vergleich zur ungestörten Schallausbreitung im Freifeld der Pegel am Empfangspunkt um X dB höher liegt.

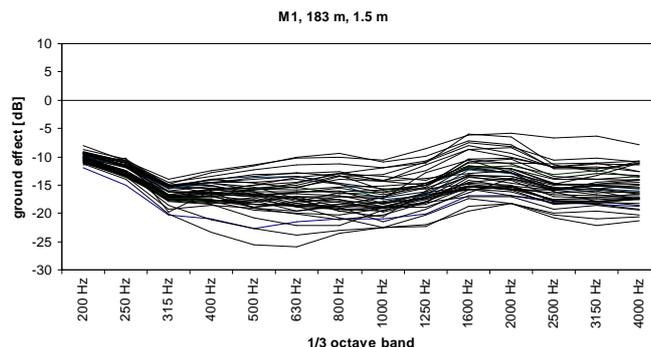


Abbildung 6.21: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 183 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt M1. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

Die gemessenen Frequenzgänge des Boden/Meteo-Effekts wurden in einem weiteren Schritt mit einer Berechnung der Bodenreflexion nach SonRoad verglichen. Anhand der Bodenbeschaffenheit wurde der Strömungswiderstand der Ausbreitungssituation zu 300 Rayls abgeschätzt. Die Abbildungen 6.25 bis 6.28 zeigen den gemittelten gemessenen Boden/Meteo-Effekt und die Berechnung nach SonRoad unter Berücksichtigung des Kohärenzverlustes. Mit Ausnahme von M2 liegen die gemessenen Boden/Meteo-Effektwerte systematisch unter den mit SonRoad vorausgesagten Pegeln. Dies korrespondiert mit den meteorologisch festgestellten hinderlichen Ausbreitungsbedingungen.

¹D. Heimann, Summary of boundary-layer meteorology and atmospheric mesoscale effects relevant to sound propagation outdoors, Technical report to WP2,3,4, Harmonoise, 2001

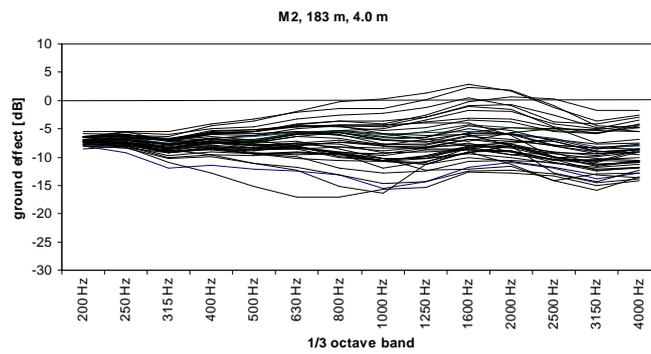


Abbildung 6.22: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 183 m entfernten und 4.0 m hohen Messpunkt M2. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

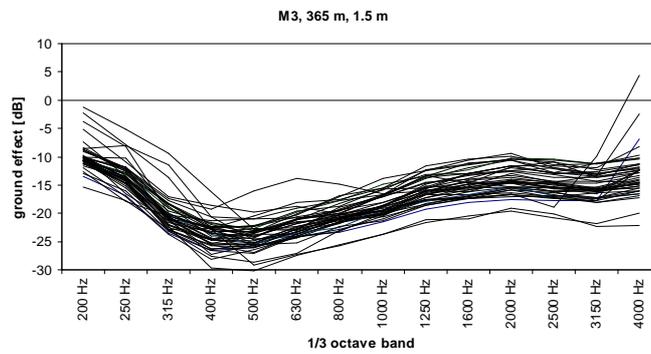


Abbildung 6.23: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 365 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt M3. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

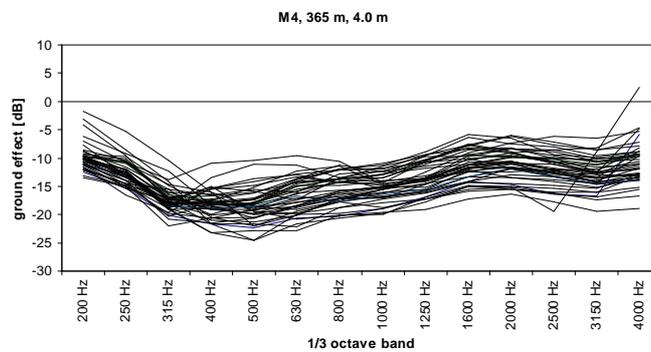


Abbildung 6.24: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 365 m entfernten und 4.0 m hohen Messpunkt M4. Jede Messung entspricht einer Mittelung über 32 Sekunden.

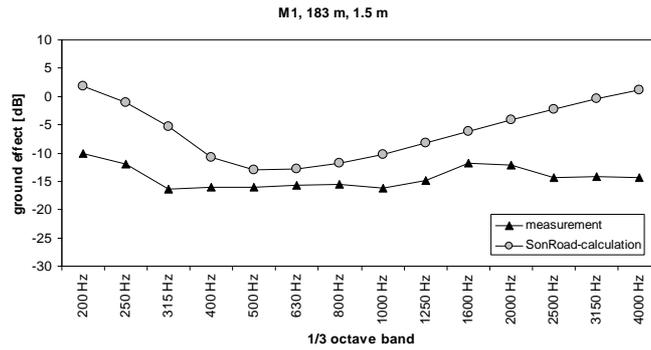


Abbildung 6.25: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 183 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt M1 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 300$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

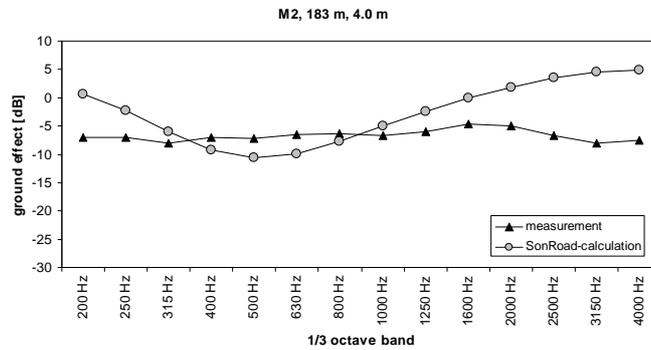


Abbildung 6.26: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 183 m entfernten und 4.0 m hohen Messpunkt M2 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 300$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

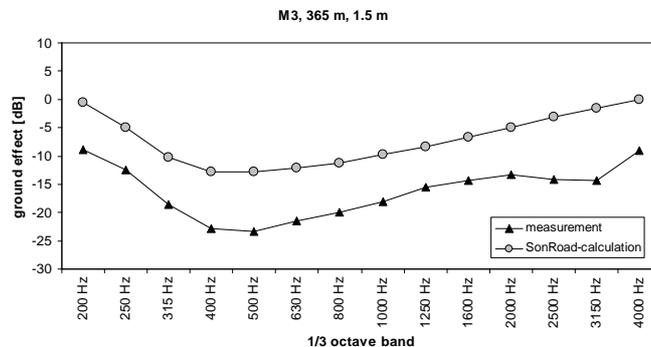


Abbildung 6.27: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 365 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt M3 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 300$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

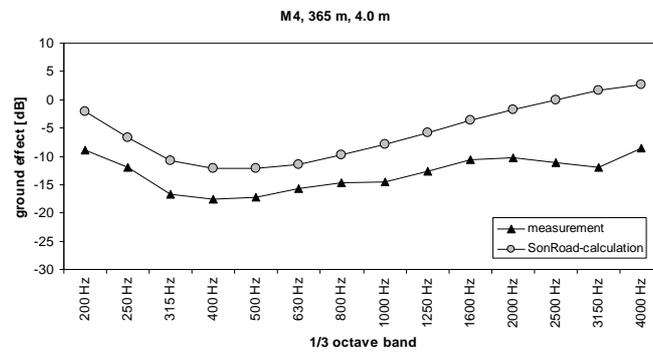


Abbildung 6.28: Frequenzgang des Boden/Meteo-Effekts für den 365 m entfernten und 4.0 m hohen Messpunkt M4 im Vergleich zur Berechnung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain bei einem Strömungswiderstand $\sigma = 300$ Rayl mit Korrektur für den Kohärenzverlust gemäss SonRoad ohne Meteokorrektur.

6.4 Messung Meppen (Harmonoise)

6.4.1 Beschreibung der Messung

Vom 9. bis zum 29. Mai 2003 wurden im Rahmen des Harmonoise-Projekts² bei Stuppenberg in Meppen (Niedersachsen) Lautsprecher-Langzeitmessungen im Distanzbereich bis zu 1200 m durchgeführt. Ausführende Partei der Messung war die deBAKOM³.

Der verwendete Lautsprecher wurde zur Messung 0.4 m über Boden platziert (Abb. 6.30). Die Mikrophone waren 25, 150, 300, 600 und 1200 m von der Quelle entfernt; sie befanden sich alle 4 m über dem Boden. An jedem Mikrofonmast wurde auf 10 m Höhe eine Meteostation platziert (Abb. 6.29). Quelle und Mikrophone befanden sich dabei genau auf einer Linie. Der Boden war im gesamten relevanten Ausbreitungsgebiet bis auf ± 0.5 m eben und von einem grossen Kornfeld bedeckt. Aufgrund dieser schnell wachsenden Vegetation ist nicht auszuschliessen, dass sich die akustischen Bodeneigenschaften während der Messung merklich veränderten.



Abbildung 6.29: Die Messpunkte 150 m (rechts im Bild), 300 und 600 m von der Quelle entfernt. Mikrofon und Meteostation sind jeweils am selben Mast befestigt.

Zur Auswertung der Audiodaten wurde ein nicht näher spezifiziertes Pattern-Matching Verfahren zur Separation des Lautsprecher Signals von den Umgebungsgeräuschen eingesetzt. Aus diesem Verfahren resultiert neben einem bereinigten Quellenpegel auch ein bereinigtes Quellen-Terzbandspektrum. Dabei wurde für die Mittelung ein Zeitintervall von 30 Minuten gewählt.

Bei jedem Messpunkt wurde auf 10 m Höhe neben der Temperatur auch der Wind in allen drei Dimensionen gemessen und daraus die charakteristischen Parameter für eine Meteoprofil-Bestimmung gemäss dem meteorologischen Grenzschichtmodell⁴ abgeleitet und in die Harmonoise-Datenbank aufgenommen.

6.4.2 Diskussion

Quellenspektrum

Zusätzlich zu der in Abschnitt 6.4.1 beschriebenen Messung wurde versucht, mit einem quellennahen Mikrofon das Quellenspektrum zu bestimmen. Diese Messung wurde jedoch bei dieser Auswertung aufgrund störender Bodenreflexionen verworfen. Stattdessen wurde der Messpunkt in 25 m Entfernung als Referenz verwendet. Somit werden die ausgewiesenen A-Pegel als Pegeldifferenz zu diesem Messpunkt angegeben. Bei den spektralen Darstellungen (Abb. 6.40-6.43) wurde ein anderer Weg beschritten, da

²UIC-Projekt "Harmonised, Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise", 2002-2004

³deBAKOM GmbH, D-51519 Odenthal

⁴D. Heimann, Summary of boundary-layer meteorology and atmospheric mesoscale effects relevant to sound propagation outdoors, Harmonoise Technical Report 2001

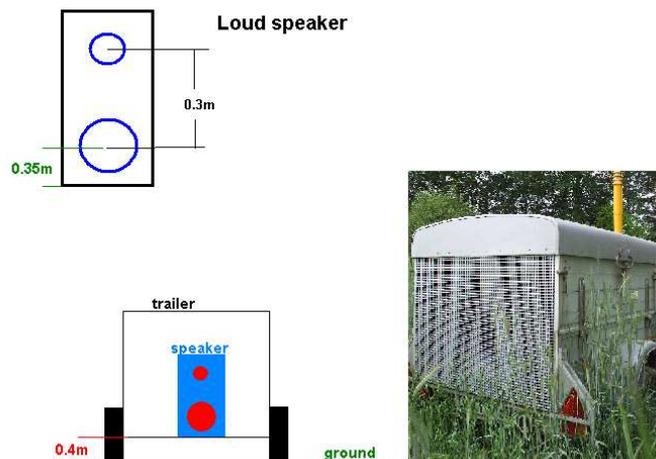


Abbildung 6.30: Abmessung und Positionierung der zur Messung verwendeten Quelle. Aufgrund der zweiwegigen Ausführung des Lautsprechers werden Frequenzen unterhalb 1.6 kHz vorwiegend auf einer Höhe von 0.75 m, höhere Frequenzen jedoch auf einer Höhe von 1.05 m abgestrahlt. Das Bild rechts zeigt den für eine Langzeitmessung erforderliche Schutz des Lautsprechers.

sich die Interpretation der Differenz zweier Ausbreitungs-Spektren oft als schwierig erweist. Deshalb wurde mit SonRoad für jeden Empfangspunkt eine Simulation unter neutralen Ausbreitungsbedingungen durchgeführt. So konnte für jedes Messintervall die Differenz des simulierten und des gemessenen Spektrums für den 25 m entfernten Messpunkt als spektrale Pegelkorrektur für alle weiter entfernten Messpunkte eingesetzt werden. Dies ermöglicht den direkten Vergleich aller Messungen mit der (simulierten) neutralen Ausbreitungssituation. Für die Simulationen wurde dabei willkürlich eine Quelle mit einem linearen Schalldruckpegel in jedem Terzband von 100 dB in 1 m Abstand angenommen. Voraussetzung dieses Verfahrens ist, dass der Meteoэффекt für den Referenzpunkt vernachlässigbar klein ist.

Störgeräuschunterdrückung

In Abb. 6.31 wird an zwei Messpunkten der direkt gemessene, unkorrigierte A-Pegel mit dem bereinigten A-Pegel verglichen. Auffallend dabei ist, dass auch relevante positive Korrekturen auftreten, und dass für den quellennahen Messpunkt die Korrekturen bei Pegel über 60 dBA tendenziell grösser sind als unterhalb 60 dBA. Beim 300 m entfernten Messpunkt werden vereinzelt bereinigte Quellenpegel angegeben, welche mehr als 15 dB unter dem Gesamtpegel lagen. Dass die Angabe eines Quellenpegels unter solch misslichen Bedingungen noch möglich ist, lässt sich nur dadurch erklären, dass sehr laute aber nur kurzzeitige Einzelereignisse innerhalb des halbstündigen Messintervalls den hohen Gesamtpegel verursachen (z.B. aufgrund der Nähe des Messorts zu einem Truppenübungsplatz), welche bei der Bereinigung vollständig ausgeblendet werden können.

Homogenität des Windes

Bei dem weitläufigen ebenen Gelände stellt sich die Frage, wie stark die Meteodaten der verschiedenen Meteostationen (alle in 10 m Höhe) voneinander abweichen können. Dazu wurde der Wind in Ausbreitungsrichtung der verschiedenen Meteostationen verglichen (siehe Abb. 6.32). In wenigen Fällen wurden Abweichungen grösser als 1 m/s (im 30 Minuten Mittel) gefunden. Insgesamt zeigte sich, dass für generelle Betrachtungen bei einem solchen Gelände eine Meteostation ausreicht. Deshalb wurden für die weiteren Betrachtungen die Windmessungen der 300 m entfernten Meteostation verwendet.

Abhängigkeit der gemessenen Pegel vom Wind

In den Abbildungen 6.33 bis 6.36 sind die gemessenen A-Pegel, bezogen auf den quellennahen Referenzmesspunkt, über die in 10 m Höhe in Ausbreitungsrichtung gemessene Windstärke aufgetragen. Am Tag und in der Nacht gemessene Werte werden dabei getrennt dargestellt. Bei allen Messpunkten ausser dem am weitesten entfernten zeigt sich dabei ein sehr ähnliches Bild:

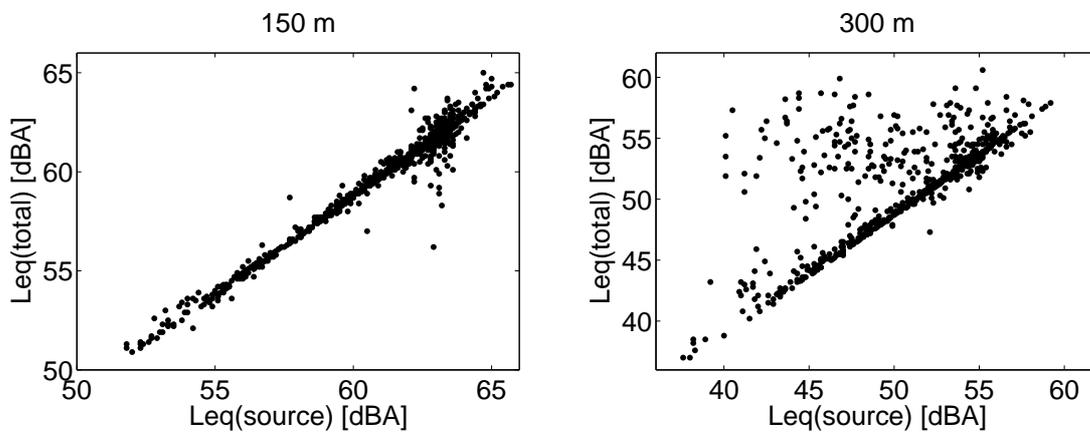


Abbildung 6.31: Vergleich aller 30 Minuten- Leq Werte vor ($Leq(total)$) und nach ($Leq(source)$) der Störgeräusch-Bereinigung; links für den von der Quelle 150 m entfernten, rechts für den 300 m entfernten Messpunkt.

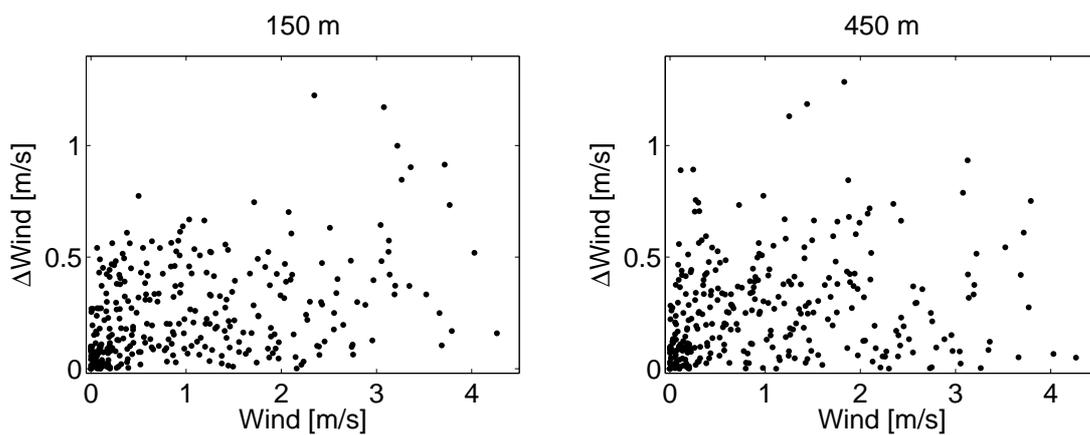


Abbildung 6.32: Unterschiede in der Projektion des Windes in Ausbreitungsrichtung benachbarter Messstationen. Der Wind ist in 10 m Höhe gemessen und in einem 30 Minuten-Intervall gemittelt. Links sind die Abweichungen aller Messungen zwischen dem 300 m und dem 150 m entfernten Messpunkt, rechts die zwischen dem 600 m und dem 150 m entfernten Messpunkt eingetragen. Die x-Achse zeigt jeweils die Projektion des Windes in Ausbreitungsrichtung.

- Die Sensitivität des Pegels bezüglich des Windes ("Steigung") ist bei Gegenwind wesentlich grösser als bei Mitwind.
- In der Nacht nach können Temperaturinversionen mit stark förderliche Ausbreitungsbedingungen nur bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten auftreten.
- Je grösser die Ausbreitungsdistanz, desto deutlicher übertreffen in der Nacht die maximalen Pegel bei Windstille die maximalen Pegel bei Mitwind.

Es ist auffallend, dass in der Nacht die bei Windstille gemessenen förderlichen Ausbreitungssituationen sogar weitaus stärker sind als die bei stärkstem Mitwind gemessenen. Dieses Phänomen ist vor allem bei den 300 m und 600 m entfernten Messpunkten stark ausgeprägt. Aus Abbildung 6.33 bis 6.35 kann interpretiert werden, dass bereits ein Wind von 1 m/s eine Temperaturinversion zerstören kann. Dies kann sogar bei einer Mitwindsituation zu einer Reduktion des A-Pegels um mehrere dB führen (5 dB bei einer Distanz von 600 m, Abbildung 6.35).

Bemerkenswert ist auch, dass bei zunehmender Distanz die Güte der Korrelation in der Nacht gegenüber im Gegensatz zum Tag nicht abnimmt. Der Grund dafür könnte eine tagsüber schlechtere Störgeräuschkorrektur sein (siehe Abschnitt 6.4.2). Erst in 1200 m Entfernung schwindet die Korrelation auch in der Nacht (Abb. 6.36). Die nächtlichen Messungen scheinen deshalb wesentlich vertrauenswürdiger als die tagsüber gemessenen.

In Abb. 6.37-6.39 wurde die obige Auswertung wiederholt, jedoch wurden statt dem A-Pegel die Pegel einzelner Terzbänder aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass sich bei den Terzbändern mit Mittenfrequenzen zwischen 630 Hz und 2 kHz stets ein ähnliches Bild wie beim A-Pegel zeigt. Bei tieferen Frequenzen hingegen zeigt sich ein chaotisches Bild, welches sich nicht leicht interpretieren lässt. So zeigen die Werte des 150 m entfernten Messpunkts (Abb. 6.37) bei 250 Hz eine umgekehrte Abhängigkeit auf. Ob es sich dabei um Interferenzphänomene (Bodeneffekt) handelt, ist bei dieser Datenbasis nur schwer zu sagen.

Um dieses Phänomen näher zu untersuchen wurden die gemessenen Spektren mit Simulationen mit SonRoad (unter neutralen Ausbreitungsbedingungen) gemäss Abschnitt 6.4.2 verglichen. Die Resultate sind in Abbildung 6.40-6.42 dargestellt.

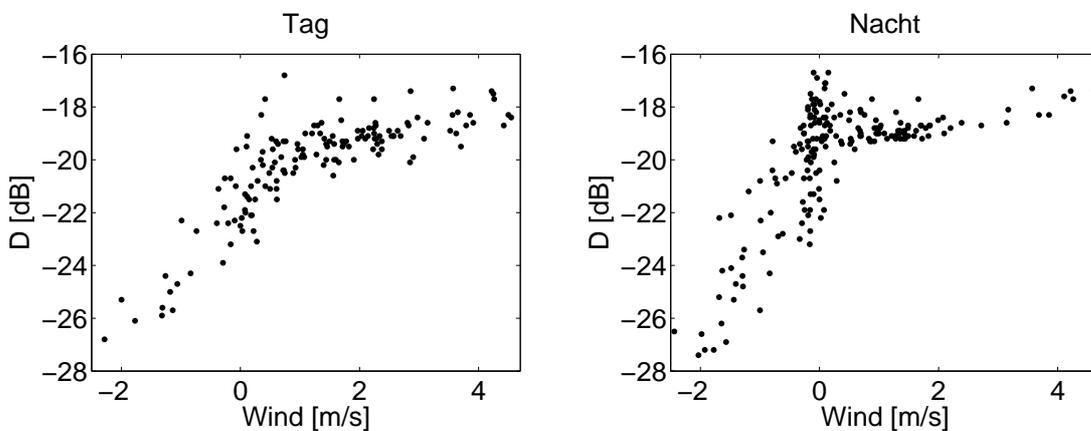


Abbildung 6.33: Die am 150 m entfernten Messpunkt gemessenen, A-bewerteten und auf den Referenz-Messpunkt bezogenen 30 Minuten-Leq Pegel, aufgetragen über den Wind in Ausbreitungsrichtung (siehe Abschnitt 6.4.2). Links sind die Werte zwischen 6:00 und 18:00, rechts die restlichen Werte aufgetragen.

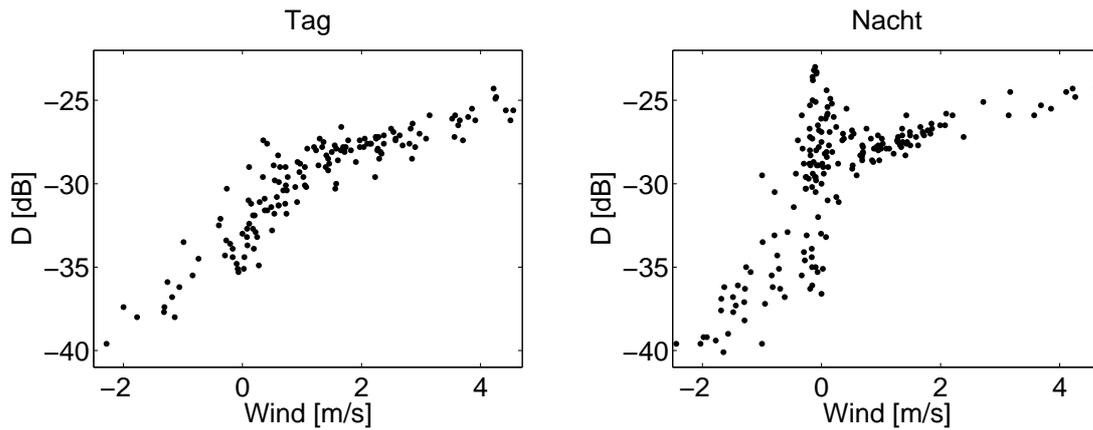


Abbildung 6.34: Die am 300 m entfernten Messpunkt gemessenen, A-bewerteten und auf den Referenz-Messpunkt bezogenen 30 Minuten-Leq Pegel, aufgetragen über den Wind in Ausbreitungsrichtung (siehe Abschnitt 6.4.2). Links sind die Werte zwischen 6:00 und 18:00, rechts die restlichen Werte aufgetragen.

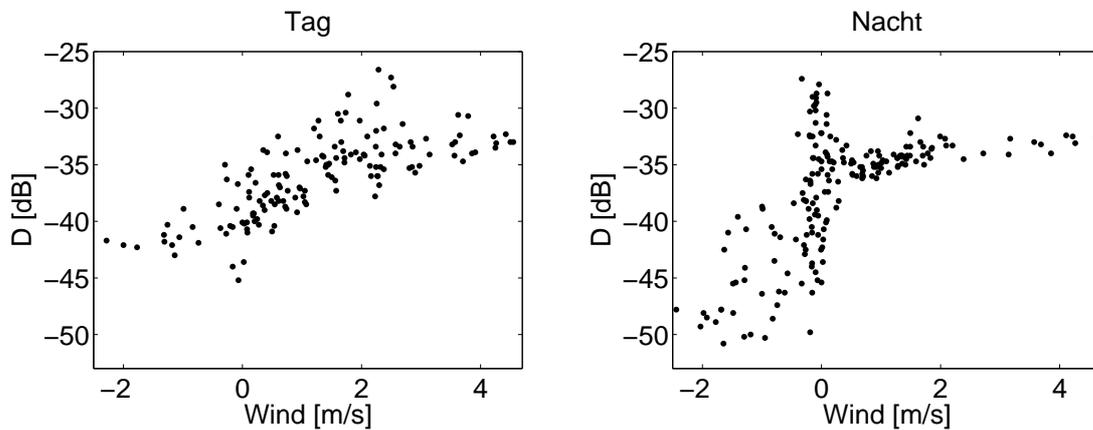


Abbildung 6.35: Die am 600 m entfernten Messpunkt gemessenen, A-bewerteten und auf den Referenz-Messpunkt bezogenen 30 Minuten-Leq Pegel, aufgetragen über den Wind in Ausbreitungsrichtung (siehe Abschnitt 6.4.2). Links sind die Werte zwischen 6:00 und 18:00, rechts die restlichen Werte aufgetragen.

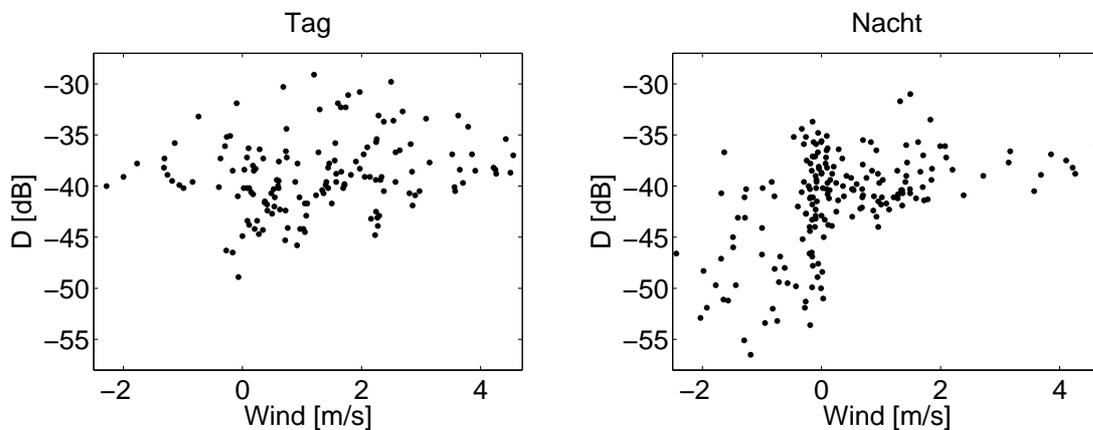


Abbildung 6.36: Die am 1200 m entfernten Messpunkt gemessenen, A-bewerteten und auf den Referenz-Messpunkt bezogenen 30 Minuten-Leq Pegel, aufgetragen über den Wind in Ausbreitungsrichtung (siehe Abschnitt 6.4.2). Links sind die Werte zwischen 6:00 und 18:00, rechts die restlichen Werte aufgetragen.

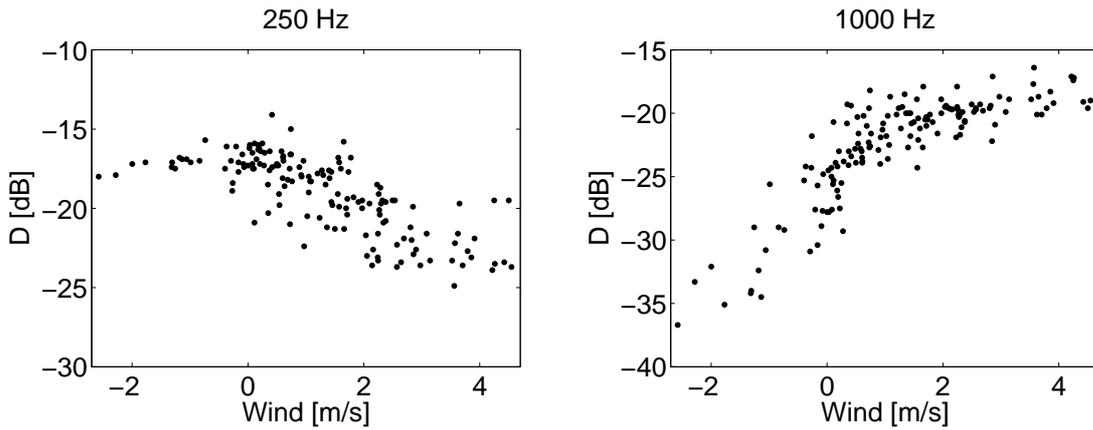


Abbildung 6.37: Die am 150 m entfernten Messpunkt gemessenen 30 Minuten-Leq Pegel zweier Terzbänder; aufgetragen über den Wind in Ausbreitungsrichtung (siehe Abschnitt 6.4.2). Links die Werte des 250 Hz Terzbandes, rechts die Werte des 1000 Hz Terzbandes.

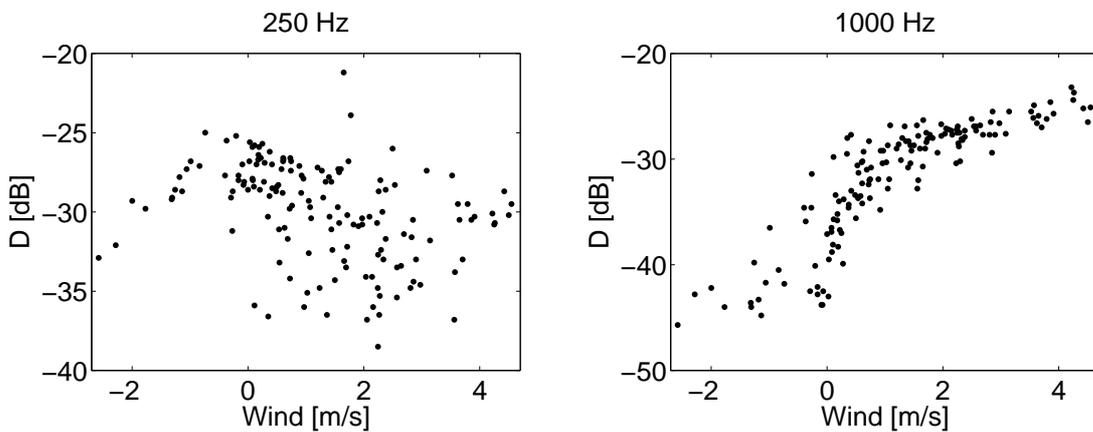


Abbildung 6.38: Die am 300 m entfernten Messpunkt gemessenen 30 Minuten-Leq Pegel zweier Terzbänder; aufgetragen über den Wind in Ausbreitungsrichtung (siehe Abschnitt 6.4.2). Links die Werte des 250 Hz Terzbandes, rechts die Werte des 1000 Hz Terzbandes.

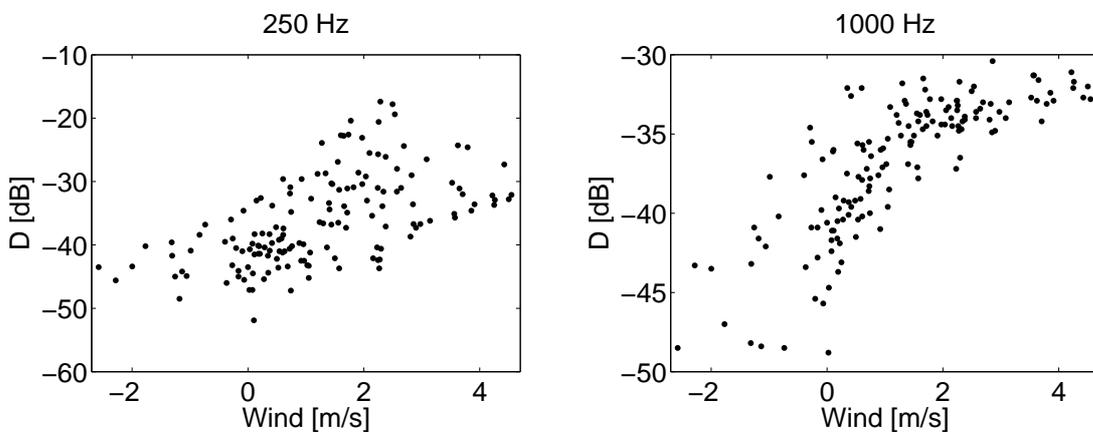


Abbildung 6.39: Die am 600 m entfernten Messpunkt gemessenen 30 Minuten-Leq Pegel zweier Terzbänder; aufgetragen über den Wind in Ausbreitungsrichtung (siehe Abschnitt 6.4.2). Links die Werte des 250 Hz Terzbandes, rechts die Werte des 1000 Hz Terzbandes.

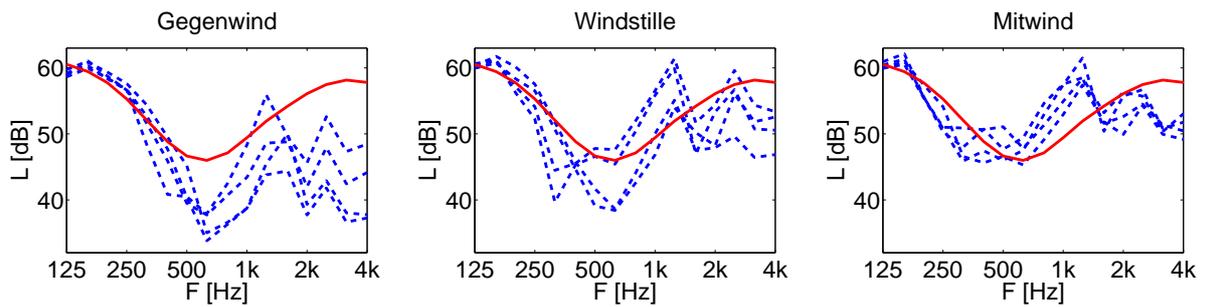


Abbildung 6.40: Am 150 m entfernten Messpunkt gemessene, normierte (siehe 6.4.2) typische Immisions-Spektren, verglichen mit einer SonRoad-Simulation (rote Linie) unter neutralen Ausbreitungsbedingungen. Links sind Gegenwindwind-Situationen, in der Mitte Situationen bei Windstille und rechts Mitwind-Situationen dargestellt.

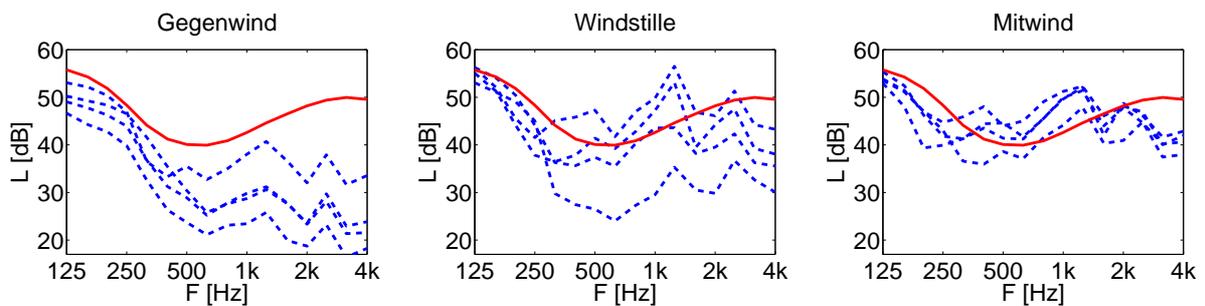


Abbildung 6.41: Am 300 m entfernten Messpunkt gemessene, normierte (siehe 6.4.2) typische Immisions-Spektren, verglichen mit einer SonRoad-Simulation (rote Linie) unter neutralen Ausbreitungsbedingungen. Links sind Gegenwindwind-Situationen, in der Mitte Situationen bei Windstille und rechts Mitwind-Situationen dargestellt.

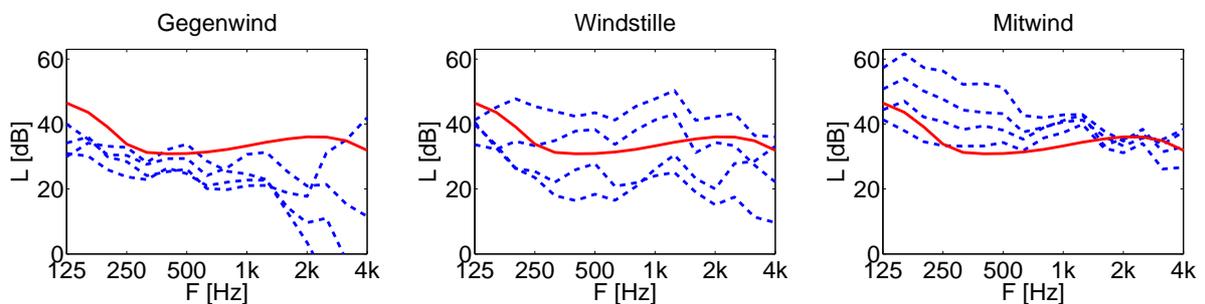


Abbildung 6.42: Am 600 m entfernten Messpunkt gemessene, normierte (siehe 6.4.2) typische Immisions-Spektren, verglichen mit einer SonRoad-Simulation (rote Linie) unter neutralen Ausbreitungsbedingungen. Links sind Gegenwindwind-Situationen, in der Mitte Situationen bei Windstille und rechts Mitwind-Situationen dargestellt.

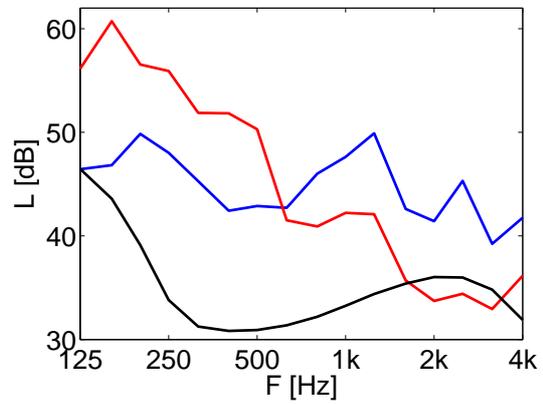


Abbildung 6.43: Vergleich der gemessenen Immisions-Spektren zweier stark förderlichen Ausbreitungssituationen am 600 m entfernten Messpunkt: Rot eine Mitwindsituation; blau eine stark förderliche Situation bei Windstille. Auffallend ist der unterschiedliche spektrale Verlauf (siehe auch Abb. 6.42). Zum Vergleich ist schwarz die SonRoad-Simulation unter neutralen Ausbreitungsbedingungen eingetragen.

7 Validierung des neuen Modells SonRoad-M

Die Validierung des neuen Modells SonRoad-M erfolgte anhand der Referenzmessungen aus Kapitel 6.

Zur exakten Nachbildung einer Messungen mit einem Berechnungsmodell müssen Temperatur und Windvektor während der Ausbreitung an jedem Punkt bekannt sein, damit die für die Krümmung des Schalls verantwortlichen Gradienten bestimmen werden können. Dies ist in der Praxis nicht möglich. Es bietet sich jedoch gerade bei flachem Gelände an, die Kenngrößen der Atmosphäre in der Horizontalen als konstant zu betrachten, so dass sich die Ausbreitungssituation über Vertikalprofile definieren lässt. Dann kann zur Bestimmung des Temperatur- und Windprofils anhand einer Messung dieser Größen auf nur einer Höhe die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie (siehe Abschnitt 3.7.2) eingesetzt werden, welche auch im Harmonoise-Projekt Verwendung findet¹. Dazu müssen als zusätzliche Eingabegrößen neben des Wolkenbedeckungsgrades vor allem die Nettostrahlung der Strahlungsbilanz bekannt sein. Dazu kann die VDI-Norm 3789² verwendet werden. Dabei wird durch Angabe der Jahres- und Tageszeit, der geographischen Höhe und Breite sowie der Höhe über Meer die globale Situation definiert. Nach der Angabe des Wolkenbedeckungsgrades und der Albedo (Licht-Reflexionsgrad des Bodens) kann die Nettostrahlung Q^* in $W \cdot m^{-2}$ bestimmt werden.

Im folgenden werden für mehrere Messungen die Resultate mit SonRoad-M Berechnungen verglichen. Dabei wurden die nach dem obigen Verfahren bestimmten Meteoprofile direkt in tabellierter Form eingesetzt, da eine Umwandlung der Profile in eine analytisch beschreibbare Form in SonRoad-M mit seinem ray tracing-Ansatz nicht notwendig ist.

7.1 Lautsprechermessungen Thun 27. Juni 2002

Aus dem geschätzten Bewölkungsgrad und der geographischen Breite wurde eine Nettostrahlung Q^* von $330 W \cdot m^{-2}$ bestimmt. Zudem wurde in 4 m Höhe ein Wind mit einem Winkel von 80° (Querwind/Mitwind) zur Ausbreitungsrichtung und einer Stärke von $0.7 m \cdot s^{-1}$ angenommen. Aus diesen Daten wurden gemäss der Ähnlichkeitstheorie Temperatur- und Windprofil bestimmt. Dabei wird stets auch implizit der Einfluss des Windes auf den Temperaturgradienten berücksichtigt. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde dabei für beide Situationen auf 76%, der Strömungswiderstand des Bodens auf $200 kPa \cdot s \cdot m^{-2}$ gesetzt. Für diese Situationen wurden Berechnungen mit SonRoad-M und zum Vergleich mit dem Harmonoise-Engineering-Modell erstellt, welches innerhalb des gleichnamigen EU-Projekts entstanden ist³.

Die Messpunkte R1, R2 und R3 waren 102 m, 199 m resp. 376 m von der Quelle entfernt und befanden sich alle 4 m über Boden. Direkt unter R3, 1.5 m über Boden, befand sich der Messpunkt R3-1.5m.

Auffallend sind die an den nahen Messpunkten R1 und R2 (siehe Abbildung 7.1 und 7.2) gemessenen tiefen Pegel bei tiefen Frequenzen. Bei Messpunkt R1 weist sowohl SonRoad-M als auch Harmonoise einen vernachlässigbaren Meteoefekt aus, ein fehlerhaft berechneter Meteoefekt kommt somit als Ursache kaum in Frage. Vielmehr ist die Richtcharakteristik des verwendeten Lautsprechers für diese Unstimmigkeit verantwortlich. Der Bereich des Bodens, der für eine vollständige Reflexion bestrahlt werden muss, wird mit abnehmender Frequenz immer grösser. Bei streifendem Schalleinfall kann sich dieser Bereich unterhalb einer bestimmten Frequenz bis hinter den Lautsprecher erstrecken. Dies führt zu einer reduzierten Bodenreflexion und somit zu tieferen gemessenen Pegel. Bei sehr weit entfernten Messpunkten verschiebt sich der für die Bodenreflexion wichtige Bereich. Dadurch wird die Situation entschärft. Bei Messpunkt R3 liegt der gemessene Pegel allerdings bei 200 Hz sogar über dem berechneten Wert. Bei verschiedenen Berechnungen mit SonRoad-M hat sich gezeigt, dass auf ebenem Terrain bei geringer Quellenhöhe auch kleine Unebenheiten im Terrain einen relevanten Einfluss auf die

¹Harmonoise Doc.number: HAR28TR-041109-TNO11.doc

²VDI 3789 Blatt 2: Umweltmeteorologie - Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen - Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung

³UIC-Projekt "Harmonised, Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise", 2002-2004

Ausbreitung haben können. Bei den durchgeführten Berechnungen wurde ein perfekt ebenes Gelände angenommen. Es ist denkbar, dass hier der Grund für die Abweichungen in den Berechnungen liegt.

Für die entfernten Messpunkte R3 und R3-1.5m (siehe Abbildung 7.3 und 7.4) wurde mit SonRoad-M eine recht gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung erzielt. Das Harmonoise-Modell hingegen weist für diese Situationen für Frequenzen über 500 Hz einen viel zu grossen Meteeffekt aus.

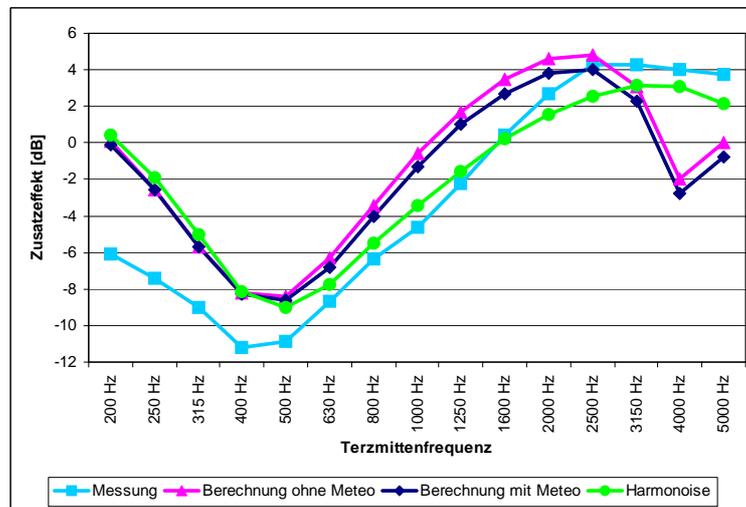


Abbildung 7.1: Frequenzgang des Boden/Meteoeffekts für den 102 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt (R1). Neben der Messung sind Berechnungen mit SonRoad-M und Harmonoise unter Berücksichtigung des Meteeinflusses ('Berechnung mit Meteo' resp. 'Harmonoise') sowie mit SonRoad-M für neutrale Ausbreitungsbedingungen ('Berechnung ohne Meteo') dargestellt.

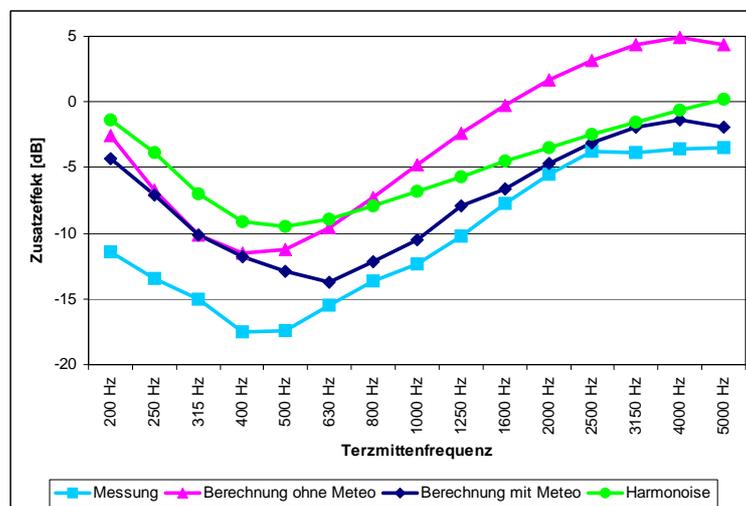


Abbildung 7.2: Frequenzgang des Boden/Meteoeffekts für den 199 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt (R2). Neben der Messung sind Berechnungen mit SonRoad-M und Harmonoise unter Berücksichtigung des Meteeinflusses ('Berechnung mit Meteo' resp. 'Harmonoise') sowie mit SonRoad-M für neutrale Ausbreitungsbedingungen ('Berechnung ohne Meteo') dargestellt.

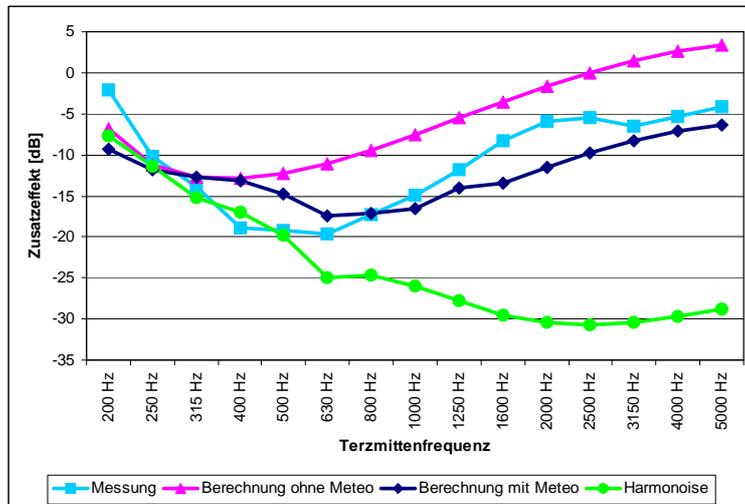


Abbildung 7.3: Frequenzgang des Boden/Meteoeffekts für den 376 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt (R3). Neben der Messung sind Berechnungen mit SonRoad-M und Harmonoise unter Berücksichtigung des Meteoeinflusses ('Berechnung mit Meteo' resp. 'Harmonoise') sowie mit SonRoad-M für neutrale Ausbreitungsbedingungen ('Berechnung ohne Meteo') dargestellt.

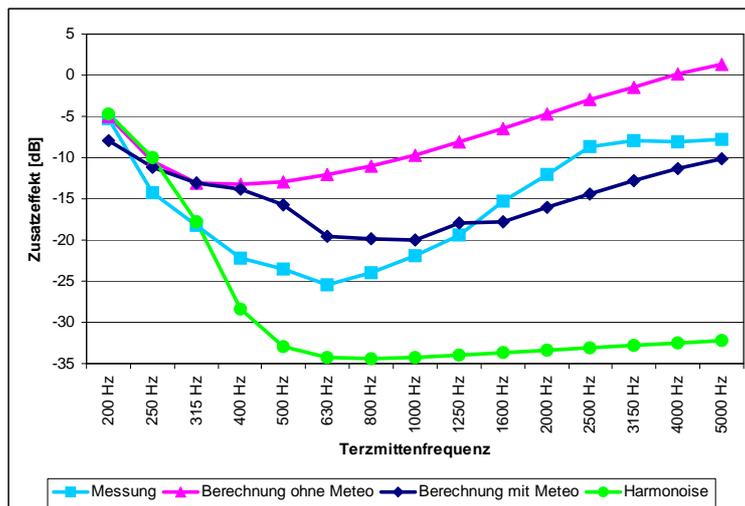


Abbildung 7.4: Frequenzgang des Boden/Meteoeffekts für den 376 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt (R3-1.5m). Neben der Messung sind Berechnungen mit SonRoad-M und Harmonoise unter Berücksichtigung des Meteoeinflusses ('Berechnung mit Meteo' resp. 'Harmonoise') sowie mit SonRoad-M für neutrale Ausbreitungsbedingungen ('Berechnung ohne Meteo') dargestellt.

7.2 Lautsprechermessungen Thun 31. Oktober 2002

Vergleicht man die Aufzeichnungen der Windgeschwindigkeiten und die daraus abgeleiteten Monin-Obukhov-Längen zwischen den beiden Messtagen in Abbildung 6.1 und 6.10, so fällt als wesentlicher Unterschied die Temperaturinversion zwischen 8 und 9 Uhr der Messung vom 31. Oktober auf. Die stark förderlichen Ausbreitungsbedingungen während dieser Periode haben einen grossen Einfluss auf die gemittelten Bodeneffekte (Abbildung 6.16 bis 6.20). Eine genaue Charakterisierung dieser Inversionslage ist deshalb für die Berechnung entscheidend. Dazu ist allerdings eine umfassende Datenbasis erforderlich. Bei einer Temperaturinversion ist aufgrund der Stabilität und der geringen Turbulenz der vertikale Austausch der bodennahen Atmosphäre stark reduziert. Dies führt dazu, dass sich Zustände auf unterschiedlichen Höhen nahezu unabhängig voneinander entwickeln können. Zudem ist das Aufbrechen einer Inversion ein komplexer dynamischer Prozess, welcher durch viele zusätzliche Faktoren beeinflusst wird. Dadurch werden Grundannahmen der Ähnlichkeitstheorie der Grenzschicht-Meteorologie⁴ verletzt, wodurch eine Bestimmung der Wind- und Temperaturprofile anhand der Monin-Obukhov-Länge mit grossen Unsicherheiten verbunden ist. Dies gilt ebenso für die Bestimmung des Temperaturprofils durch eine Schätzung der Strahlungsbilanz über den Bewölkungsgrad.

Abbildung 6.11 bis 6.15 zeigen die Bodeneffektspektren der Einzelmessungen vom 31. Oktober. Diese Messungen, welche implizit auch den Meteeffekt beinhalten, zeigen für höhere Frequenzen Schwankungen von bis zu 30 dB. Es lassen sich, am deutlichsten erkennbar in Abbildung 6.13 und 6.14, für die Bodeneffektspektren zwei voneinander getrennte Klassen ausmachen. Die hinderlichen Ausbreitungssituationen mit SonRoad-M können dabei ähnlich gut wie die vergleichbaren Situationen der Messung vom Juni nachgebildet werden. Die extrem förderlichen Situationen jedoch, welche für die grossen Schwankungen verantwortlich sind, lassen sich mit typischen Inversions-Meteoprofilen nicht zufriedenstellend nachbilden. Inwiefern an diesem Phänomen Mehrfachreflexionen und/oder ausgeprägte vertikale Luftfeuchtigkeitsprofile beteiligt sind (Siehe Abschnitt 5.7 und 5.6), kann bei der gegebenen Datenbasis nicht beantwortet werden.

⁴Roland B. Stull, An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1994)

7.3 Lautsprechermessungen Rafz 9. Juni 2004

Die Beschreibung der Wettersituation der Lautsprechermessungen in Rafz basiert auf der Spezifikation der Rauigkeitslänge u^* und θ^* . Für die rechnerische Nachbildung mit SonRoad-M wurde mit einem an der Empa entwickelten, auf der Monin-Obukhov'schen Ähnlichkeitstheorie basierenden Meteovorprozessor⁵ ein Windgeschwindigkeits- und Temperaturprofil erzeugt, das die gemessenen Werte u^* und θ^* reproduzierte. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde auf 76%, der Strömungswiderstand des Bodens auf $300 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ gesetzt. Für diese Situationen wurden Berechnungen mit SonRoad-M und zum Vergleich mit dem Harmonoise-Engineering-Modell erstellt und mit den Messungen verglichen.

Auffallend sind die an den nahen Messpunkten M1 und M2 (siehe Abbildung 7.5 und 7.6) gemessenen tiefen Pegel bei tiefen Frequenzen. Da die gleiche Quelle wie in Abschnitt 7.1 verwendet wurde (ein stark richtender Hornlautsprecher), ist die dort gegebene Erklärung auf diese Situation übertragbar. Ansonsten sind die Messungen mit SonRoad-M gut reproduzierbar. Dies gilt auch für die 365 m entfernten Messpunkte (siehe Abbildung 7.7 und 7.8). Dabei leisten die berechneten Meteeffekte einen wichtigen Beitrag. Im Gegensatz dazu weist das Harmonoise-Modell wie bereits in Abschnitt 7.1 oberhalb 630 Hz deutlich zu tiefe Pegel aus.

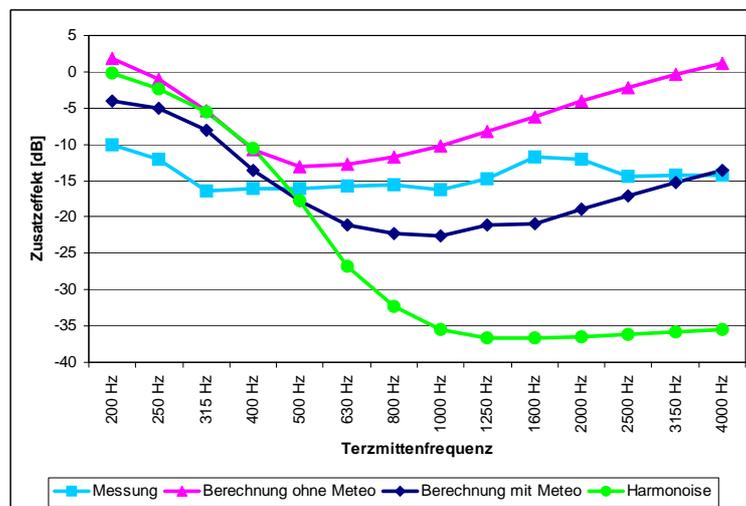


Abbildung 7.5: Frequenzgang des Boden/Meteoeffekts für den 183 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt (M1). Neben der Messung sind Berechnungen mit SonRoad-M und Harmonoise unter Berücksichtigung des Meteeinflusses ('Berechnung mit Meteo' resp. 'Harmonoise') sowie mit SonRoad-M für neutrale Ausbreitungsbedingungen ('Berechnung ohne Meteo') dargestellt.

⁵Parametersetzung: $Q^* = 550 \text{ W/m}^2$, $a = 0.1$, $\alpha = 1.0$, $N = 25\%$, $h_r = 0.1 \text{ m}$, $Height = 4.0 \text{ m}$, $v = 1.8 \text{ m/s}$, $T = 15^\circ$, $H = 35\%$

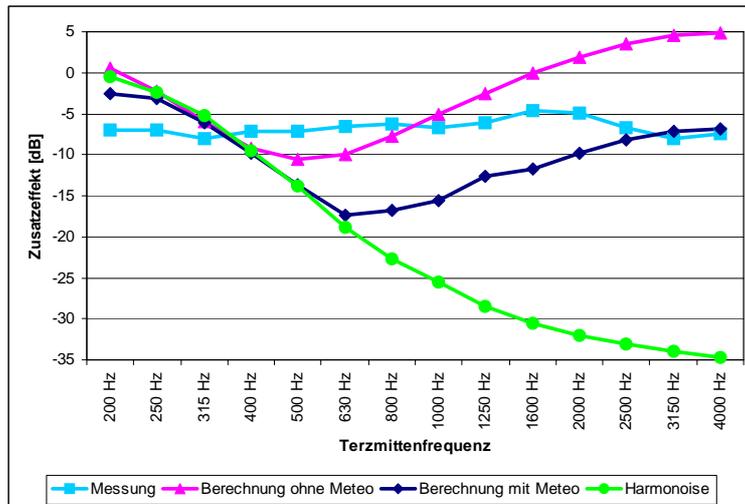


Abbildung 7.6: Frequenzgang des Boden/Meteoeffekts für den 183 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt (M2). Neben der Messung sind Berechnungen mit SonRoad-M und Harmonoise unter Berücksichtigung des Meteoeinflusses ('Berechnung mit Meteo' resp. 'Harmonoise') sowie mit SonRoad-M für neutrale Ausbreitungsbedingungen ('Berechnung ohne Meteo') dargestellt.

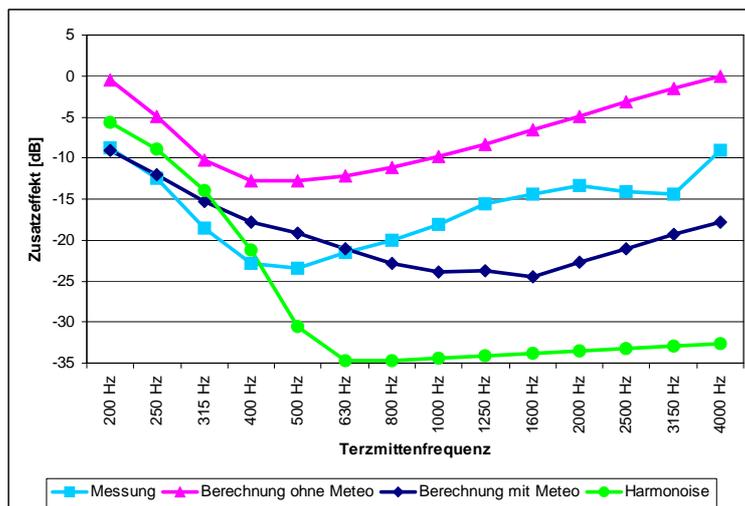


Abbildung 7.7: Frequenzgang des Boden/Meteoeffekts für den 365 m entfernten und 1.5 m hohen Messpunkt (M3). Neben der Messung sind Berechnungen mit SonRoad-M und Harmonoise unter Berücksichtigung des Meteoeinflusses ('Berechnung mit Meteo' resp. 'Harmonoise') sowie mit SonRoad-M für neutrale Ausbreitungsbedingungen ('Berechnung ohne Meteo') dargestellt.

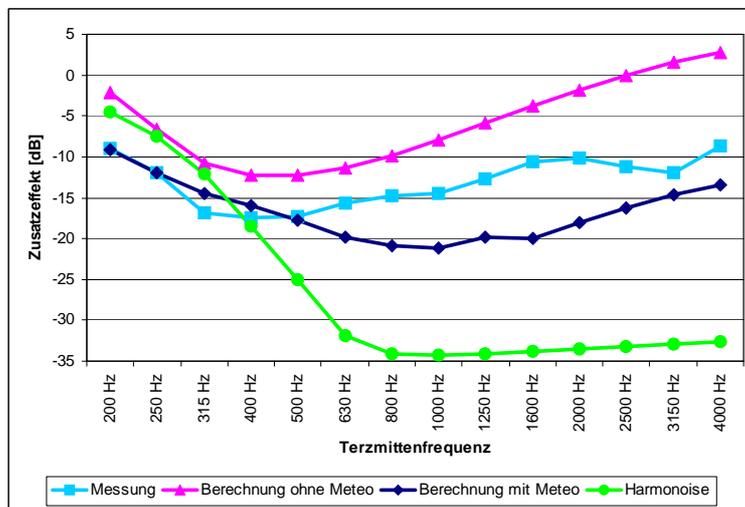


Abbildung 7.8: Frequenzgang des Boden/Meteoeffekts für den 365 m entfernten und 4 m hohen Messpunkt (M4). Neben der Messung sind Berechnungen mit SonRoad-M und Harmonoise unter Berücksichtigung des Meteoeinflusses ('Berechnung mit Meteo' resp. 'Harmonoise') sowie mit SonRoad-M für neutrale Ausbreitungsbedingungen ('Berechnung ohne Meteo') dargestellt.

7.4 Messung Meppen (Harmonoise)

Im folgenden Abschnitt werden die im Rahmen des Harmonoise-Projekts in Meppen durchgeführten Lautsprecher-Messungen mit SonRoad-M Berechnungen verglichen. Die Meteodaten wurden dabei der Harmonoise-Datenbank entnommen. Diese enthält u.A. die Parametr für eine Bestimmung der Temperatur- und Windprofile gemäss dem meteorologischen Grenzschichtmodell⁶, allerdings ist die Güte der dazu notwendigen Korrelationsgrössen der Messung in Meppen für dieses Verfahren nicht ausreichend. Die Bestimmung des Temperaturprofils erwies sich als besonders problematisch, da alternative Verfahren die Kenntnis des Bewölkungsgrad erfordern. Dieser wurde jedoch von den automatischen Messstationen nicht erfasst. Auf die Beschreibung der Temperaturgradienten wurde deshalb verzichtet; als Folge davon wurden Situationen bei Windstille vom Vergleich ausgeschlossen. Zur Ableitung des Windgradienten (Windgeschwindigkeit $v(z)$ bez. der Höhe z über Boden) wurde ein logarithmischer Ansatz gewählt:

$$v(z) = v_m \cdot \frac{\ln(z/z_0 + 1)}{\ln(z_m/z_0 + 1)} \quad (7.1)$$

v_m bezeichnet dabei die auf der Messhöhe $z_m = 10$ m gemessene Windgeschwindigkeit, z_0 die Rauigkeitslänge des logarithmischen Wandgesetzes. Entsprechend der VDI-Richtlinie 3783⁷ wurde für z_0 ein Wert von 0.1 m gewählt.

Während der Messung schwankte die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40% und 100%, die Temperatur zwischen 5 und 25 °C, diese Werte wurden während der gesamten Messzeit kontinuierlich erfasst und für jede Luftdämpfungs-Berechnung einzeln berücksichtigt.

Abbildung 7.9 bis 7.12 zeigen Vergleiche zwischen den Messungen und SonRoad-M Berechnungen repräsentativer Mit- und Gegenwindsituationen. Wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben, wurde bei der Berechnung willkürlich für jedes Terzband ein Quellenpegel von 100 dB in 1 m Entfernung angenommen und die Messungen anhand des quellennahen Messpunktes angepasst.

Im Vergleich weisen SonRoad-M Berechnungen von Meppen bei Gegenwind generell etwas zu kleine Pegel aus. Die Abhängigkeit des Meteeffektes von der Windstärke (d.h. des Anteils entgegen der Ausbreitungsrichtung) hingegen stimmen zwischen Berechnung und Messung beim 150 m entfernten Messpunkt und für Frequenzen unter 300 Hz beim 300 m entfernten Messpunkt sehr gut überein. Beim weiter entfernten Messpunkt müssen jedoch die extrem kleinen Pegel beachtet werden, welche die in Abschnitt 6.4.2 beschriebene Nebengeräuschunterdrückung möglicherweise überfordern. Es ist erkenntlich, dass SonRoad-M die Eigenschaft, dass bei tiefen Frequenzen grosse Meteeffekte erst beim 300 m entfernten Messpunkt auftreten, gut abbildet.

Die in Abbildung 7.10 und 7.12 gezeigten Mitwindsituationen weisen, sowohl für die Messung als auch für die Berechnung trotz unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten ähnliche Ausbreitungseigenschaften auf, wie dies im Fall ohne Hinderniswirkung immer dann zu erwarten ist, wenn keine Mehrfachreflexionen auftreten (siehe Abschnitt 5.7). Im SonRoad-M Modell ist dabei in der Mitwindsituation der maximale (kleine) Meteeffekt schon bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 1 m/s erreicht.

Vergleicht man Meteodaten und Immissionspegel, so lässt sich sagen, dass die Messungen besonders am Tag starke zufällige Schwankungen aufweisen. Die Vegetation (ein Kornfeld), welche sich während der Messperiode stark verändert und somit zu Veränderungen der Bodeneigenschaften geführt hat, könnte u.A. für diese Schwankungen verantwortlich gemacht werden. Trotzdem lässt sich sagen, dass die berechneten Meteeffekte die Messungen gut abbilden.

⁶D. Heimann, Summary of boundary-layer meteorology and atmospheric mesoscale effects relevant to sound propagation outdoors, Harmonoise Technical Report 2001

⁷VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12, "Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht"

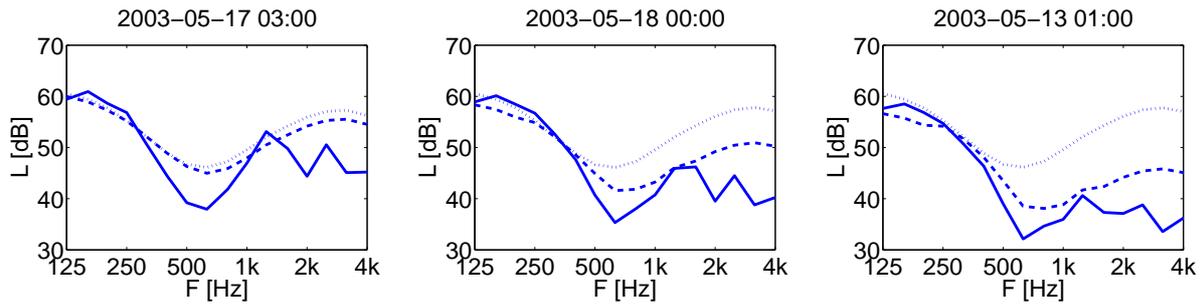


Abbildung 7.9: Vergleich der Messungen in Meppen (ausgezogene Linien) mit SonRoad-M Berechnungen. Die gestrichelten Linie zeigen die berechneten Immissionspektren mit, die gepunkteten Linien ohne Berücksichtigung der Refraktion (Krümmung der Schallstrahlen aufgrund der Meteoprofile). Dargestellt sind die Immissions-Spektren des 4 m hohen und 150 m entfernten Messpunktes für repräsentative Spektren mit 1, 2, resp. 3 m/s Gegendwind (v.l.n.r.). Zur Modellierung des Bodens wurde ein Strömungswiderstand von 300 Rayl eingesetzt.

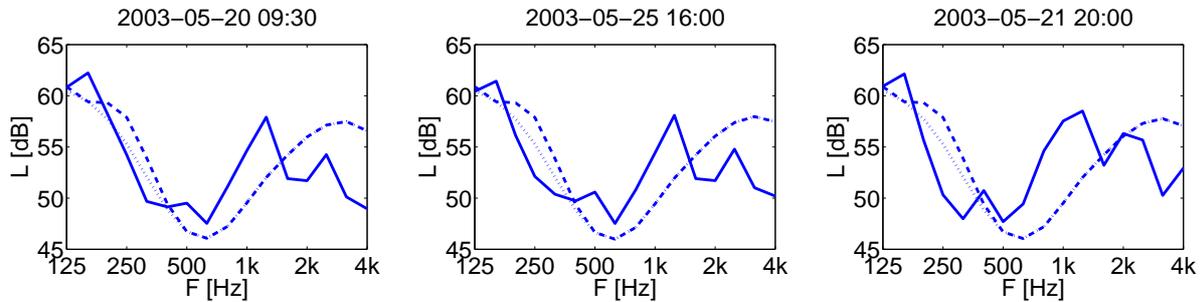


Abbildung 7.10: Vergleich der Messungen in Meppen (ausgezogene Linien) mit SonRoad-M Berechnungen. Die gestrichelten Linie zeigen die berechneten Immissionspektren mit, die gepunkteten Linien ohne Berücksichtigung der Krümmung der Schallstrahlen. Dargestellt sind die Immissions-Spektren des 4 m hohen und 150 m entfernten Messpunktes für repräsentative Spektren mit 2.5, 3.5, resp. 4.5 m/s Mitwind (v.l.n.r.). Zur Modellierung des Bodens wurde ein Strömungswiderstand von 300 Rayl eingesetzt.

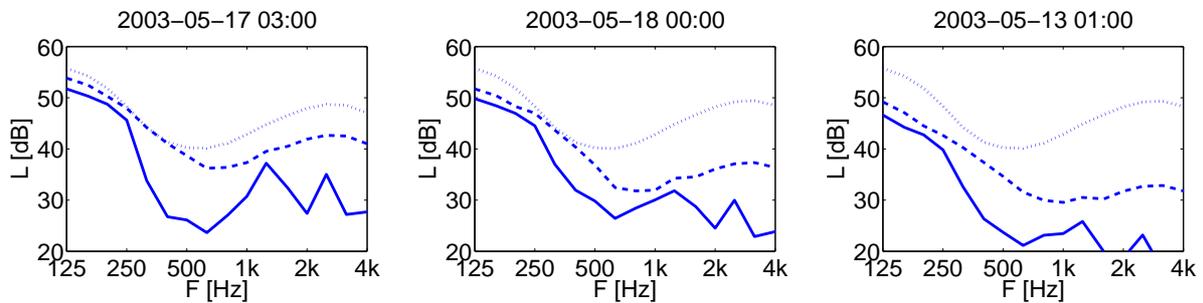


Abbildung 7.11: Vergleich der Messungen in Meppen (ausgezogene Linien) mit SonRoad-M Berechnungen. Die gestrichelten Linie zeigen die berechneten Immissionspektren mit, die gepunkteten Linien ohne Berücksichtigung der Krümmung der Schallstrahlen. Dargestellt sind die Immissions-Spektren des 4 m hohen und 300 m entfernten Messpunktes für repräsentative Spektren mit 1, 2, resp. 3 m/s Gegendwind (v.l.n.r.). Zur Modellierung des Bodens wurde ein Strömungswiderstand von 300 Rayl eingesetzt.

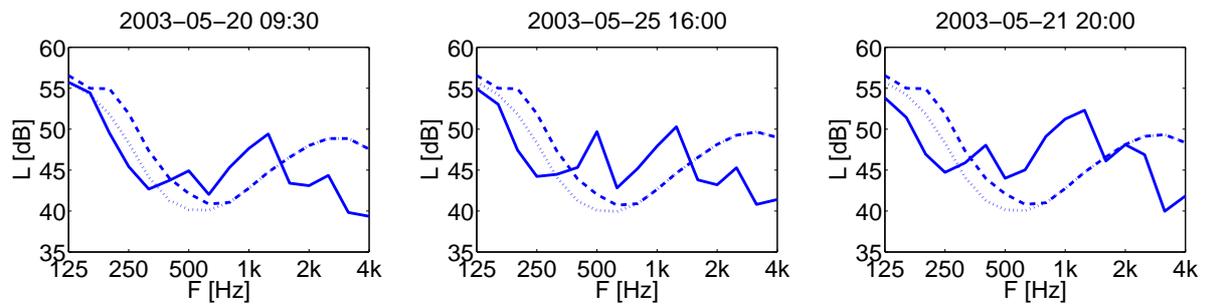


Abbildung 7.12: Vergleich der Messungen in Meppen (ausgezogene Linien) mit SonRoad-M Berechnungen. Die gestrichelten Linie zeigen die berechneten Immissionspektren mit, die gepunkteten Linien ohne Berücksichtigung der Krümmung der Schallstrahlen. Dargestellt sind die Immissions-Spektren des 4 m hohen und 300 m entfernten Messpunktes für repräsentative Spektren mit 2.5, 3.5, resp. 4.5 m/s Mitwind (v.l.n.r.). Zur Modellierung des Bodens wurde ein Strömungswiderstand von 300 Rayl eingesetzt.

7.5 Zusammenfassung der Validierungsergebnisse

Der Vergleich der SonRoad-M Berechnungen mit Messungen zeigt, dass das Modell die relevanten meteorologischen Auswirkungen auf die Schallausbreitung zufriedenstellend abbilden kann. Insbesondere wird auch die Frequenzabhängigkeit der Meteokorrektur korrekt ermittelt. Der Vergleich mit dem Engineering-Modell aus dem Harmonoise-Projekt zeigt für SonRoad-M klar eine bessere Übereinstimmung mit den Messungen. Eine Schwierigkeit stellt die Beschaffung geeigneter meteorologischer Daten dar. Während für die labile Schichtung (typisch tagsüber bei Sonnenschein) Ähnlichkeitstheorien zur Abschätzung der Vertikalprofile zur Verfügung stehen, ist die Unsicherheit im stabilen Fall (nachts bei klarem Himmel und Windstille) wesentlich grösser. Dieser Umstand wird etwas entschärft durch die Tatsache, dass im Fall ohne Hindernisse der Meteeinfluss tags grösser ist als in der Nacht.

8 Abgrenzung des Einsatzbereichs gegenüber SonRoad

Mit SonRoad-M steht ein Modell zur Verfügung, das Wettereinflüsse auf die Schallausbreitung berücksichtigen kann. Diese Wettereinflüsse spielen allerdings erst bei grösseren Abständen und besonderen Ausbreitungsgeometrien eine Rolle. In der Mehrzahl der Fälle kann der Meteeffekt vernachlässigt werden, d.h. eine SonRoad Berechnung (SonRoad-M ohne Meteo) ist ausreichend. In der Folge soll diese Trennlinie genauer untersucht werden. Dazu werden die mit SonRoad-M ermittelten Meteeffekte in verschiedenen Situationen ausgewertet. Im Hinblick auf LSV-relevante Aussagen werden nur Jahresmittelwerte betrachtet, d.h. extreme Wetterverhältnisse, wie sie an einzelnen Stunden oder Tagen auftreten können, bleiben unberücksichtigt.

8.1 Grössenordnungen von Meteeffekten

8.1.1 Häufigkeit verschiedener Meteosituationen im Jahresmittel

Für die Evaluation der Meteosituationen standen von 37 automatischen Messstationen¹ der Meteo Schweiz Informationen zur Stabilität und zur Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe zur Verfügung. Die Einteilung in Stabilitätsklassen folgte dem Modell nach Polster². Die insgesamt sieben Stabilitätsklassen wurden in die drei Kategorien labil (Klassen A,B), neutral (C,D,E) und stabil (F,G) zusammengefasst.

Vereinfachend wird hier angenommen, dass für Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s die Temperaturschichtungen bzw. die Stabilitätsklassen für die Schallausbreitung dominieren, währenddem für Windgeschwindigkeiten über 2 m/s der Wind der Haupteinflussfaktor ist.

Tagsüber führt die Temperaturschichtung tendenziell zu hinderlichen Ausbreitungsbedingungen. Es werden folgende Fälle betrachtet:

M1 Gegenwind unter 2 m/s, labile Schichtung (Stabilitätsklassen A und B)

M2 Querwind unter 2 m/s, neutrale Schichtung (Stabilitätsklassen C,D und E)

M4 Mitwind über 2 m/s

M5 Gegenwind über 2 m/s

M6 Querwind über 2 m/s

Die Inversionslagen nachts dagegen entsprechen tendenziell förderlichen Ausbreitungsbedingungen. Es werden folgende Fälle untersucht:

M2 Querwind unter 2 m/s, neutrale Schichtung (Stabilitätsklassen C,D und E)

M3 Mitwind unter 2 m/s, stabile Schichtung (Stabilitätsklassen F und G)

M4 Mitwind über 2 m/s

M5 Gegenwind über 2 m/s

M6 Querwind über 2 m/s

¹Ulrichen, Visp, Sion, Scuol, Samedan, Piotta, Magadino, Lugano, Basel, Rünenberg, Delemont, La Chaux-de-Fonds, Güttingen, Kloten, Schaffhausen, Schmerikon, St. Gallen, Tänikon, Uetliberg, Bern, Cham, Grenchen, Wynau, Payerne, Biere, Geneve, Vaduz, Glarus, Altdorf, Luzern, Interlaken, Adelboden, Aigle, Chur, Davos, Hinterrhein, Disentis

²G. Polster, Erfahrungen mit Strahlungs-, Temperaturgradient- und Windmessungen als Bestimmungsgrössen der Diffusionskategorien, Meteorologische Rundschau, vol. 22, Heft 6 (1969)

Während die Temperaturschichtung die Schallausbreitung jeweils in alle Richtungen in gleicher Weise beeinflusst, ist im Falle des Windes je nach Orientierung der Quelle und des Empfängers entweder Mit-, Quer- oder Gegenwind möglich. Aus den Meteostatistiken liegen pro Station die beiden am häufigsten auftretenden Windrichtungen vor. Im Sinne einer worst case Betrachtung wird für den Fall Tag die häufigste Windrichtung als Gegenwind und die zweithäufigste Windrichtung als Mitwind interpretiert, nachts werden die beiden Richtungen vertauscht. Mit diesem Ansatz wird typischen Talsituationen mit zwei vorherrschenden, um 180° gedrehten Windrichtungen Rechnung getragen.

Die Abbildung 8.1 zeigt die über alle 37 Stationen gemittelten Auftretenshäufigkeiten der verschiedenen Meteosituationen sowie die Standardabweichungen. Aus diesen Werten wurde schliesslich je eine milde worst case Häufigkeitsverteilung tags und nachts generiert. Für den Fall *tags* (Tabelle 8.1) wurden die Häufigkeiten M1 und M5 ausgehend von den Mittelwerten um eine Standardabweichung erhöht, die Häufigkeit M4 dagegen um eine Standardabweichung erniedrigt. Für den Fall *nachts* (Tabelle 8.1) wurden die Häufigkeiten M3 und M4 ausgehend von den Mittelwerten um eine Standardabweichung erhöht, die Häufigkeit M5 dagegen um eine Standardabweichung erniedrigt. Die Häufigkeit von M2 wurde jeweils so angepasst, dass die Häufigkeitssumme 100% ergab.

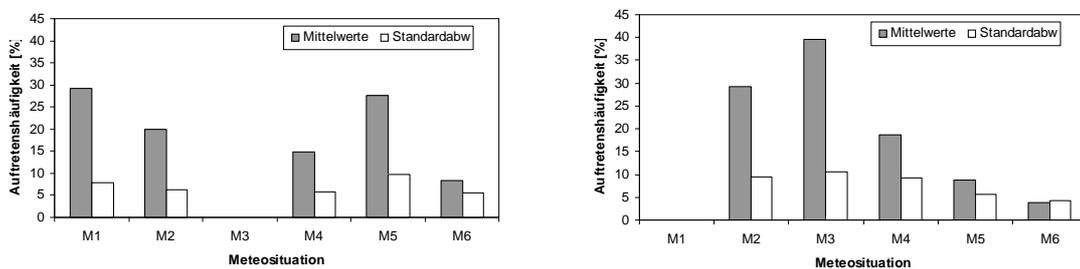


Abbildung 8.1: Mittlere Auftretenshäufigkeiten und Standardabweichungen der verschiedenen Meteosituationen an den 37 untersuchten Standorten in Prozent. Links: tags, rechts: nachts.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Auftretenshäufigkeit in Prozent	37	8	0	9	38	8

Tabelle 8.1: Im Sinne eines milden worst case angenommene Auftretenshäufigkeiten der verschiedenen Meteosituationen tags. Insgesamt werden während 75 % der Zeit hinderliche Ausbreitungsbedingungen angenommen (M1, M5).

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Auftretenshäufigkeit in Prozent	0	9	51	28	3	9

Tabelle 8.2: Im Sinne eines milden worst case angenommene Auftretenshäufigkeiten der verschiedenen Meteosituationen nachts. Insgesamt werden während 79 % der Zeit förderliche Ausbreitungsbedingungen angenommen (M3, M4).

8.1.2 Windgeschwindigkeits- und Temperaturgradienten für die verschiedenen Meteosituationen

Für die sechs verschiedenen Ausbreitungsbedingungen wurden folgende Meteoparameter angenommen:

M1 Gegenwind unter 2 m/s, labile Schichtung (Stabilitätsklassen A und B) → Strahlungsbilanz = 450 W/m², v = 1 m/s

M2 Querwind unter 2 m/s, neutrale Schichtung (Stabilitätsklassen C,D und E) → Strahlungsbilanz = 50 W/m², v = 1 m/s

M3 Mitwind unter 2 m/s, stabile Schichtung (Stabilitätsklassen F und G) → Temp.gradient 0-2m = 2°, $v = 1$ m/s

M4 Mitwind über 2 m/s → Strahlungsbilanz = 50 W/m², $v = 4$ m/s

M5 Gegenwind über 2 m/s → Strahlungsbilanz = 50 W/m², $v = 4$ m/s

M6 Querwind über 2 m/s → Strahlungsbilanz = 50 W/m², $v = 4$ m/s

Mittels eines Meteorvorprozessors wurden aus diesen Daten Vertikalprofile der effektiven Schallgeschwindigkeit bestimmt. Die Profile sind in der Abbildung 8.2 gezeigt. Sie lassen sich durch die in Tabelle 8.3 angegebenen Formeln annähern.

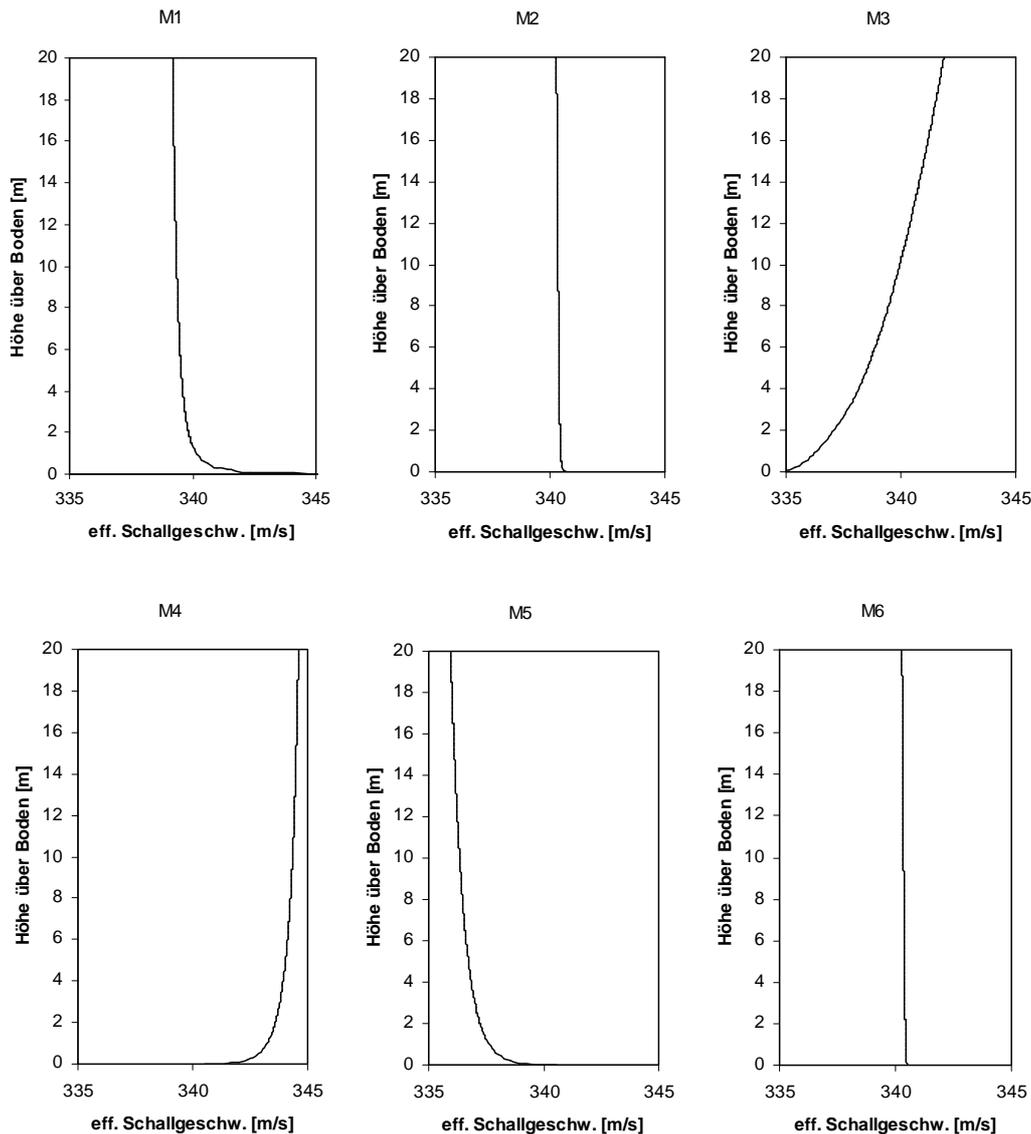


Abbildung 8.2: Verwendete Profile der effektiven Schallgeschwindigkeit M1 bis M6.

8.1.3 Bedeutung für die Schallausbreitung

Mit den in Abbildung 8.2 gezeigten Schallgeschwindigkeitsprofilen wurden verschiedene Ausbreitungssituationen durchgerechnet und zwar einmal ohne Berücksichtigung des Meteeffekts (SonRoad) und einmal mit Meteeffekt (SonRoad-M). Die Abbildung 8.3 zeigt die entsprechenden ray tracing Bilder.

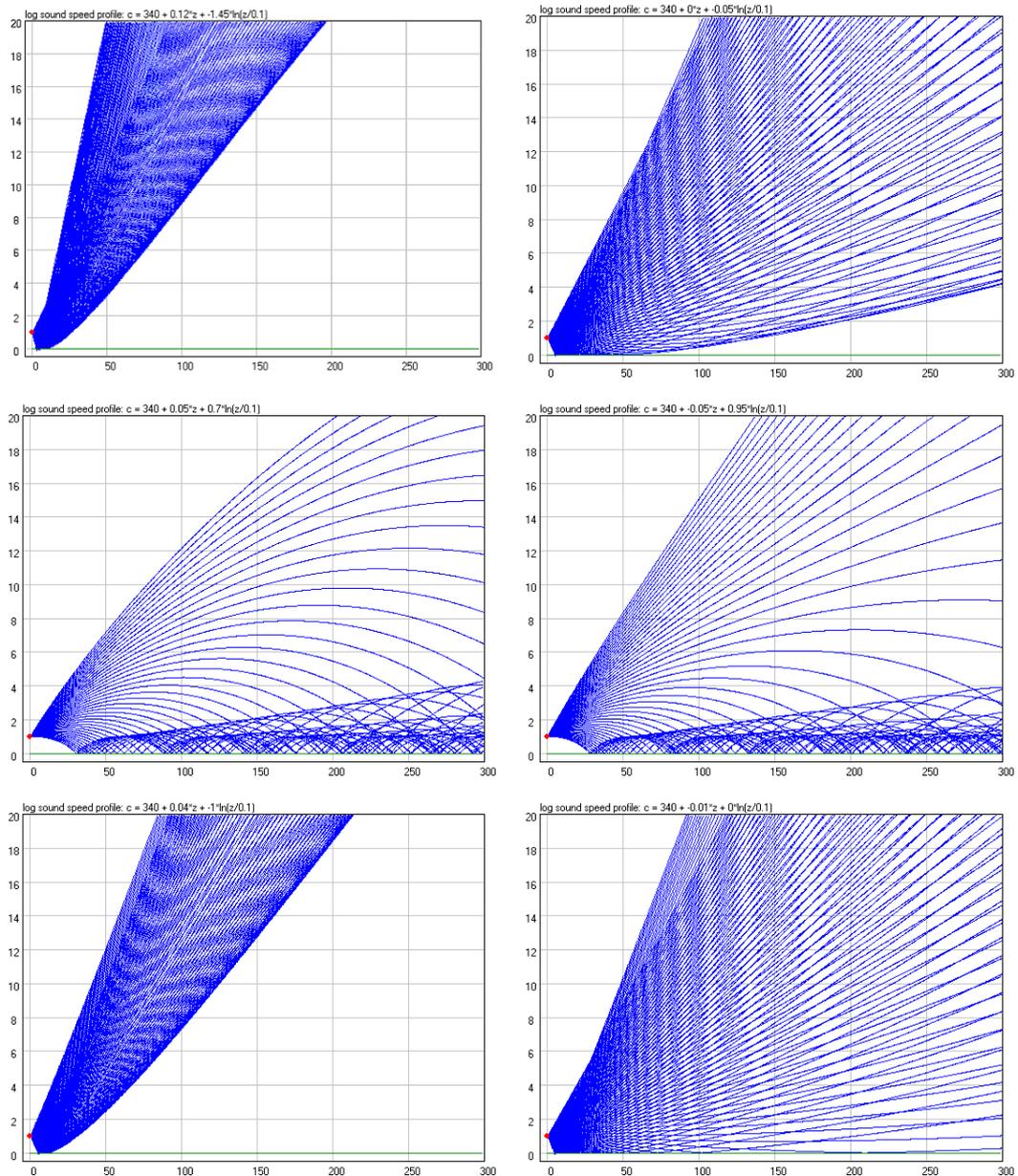


Abbildung 8.3: Ray tracing Simulationen für die verwendeten Profile der effektiven Schallgeschwindigkeit, zeilenweise M1 und M2, M3 und M4, M5 und M6 von oben nach unten.

Mittels der Auftretenshäufigkeiten aus den Tabellen 8.1 und 8.2 wurde schliesslich eine Art Jahresmittelwert bestimmt. Aus den Unterschieden *mit Meteo* und *ohne Meteo* wird die Bedeutung für Immissionsprognosen ersichtlich.

Es wurden folgende Geometrien untersucht:

- Fall 1** Strasse mit angrenzender ebener Grasfläche (Strömungswiderstand: 300 Rayl), Empfänger in 4 und 10 m Höhe in den Abständen 20, 50, 100, 200, 500 und 1000 m.
- Fall 2** Strasse mit angrenzender ebener Grasfläche (Strömungswiderstand: 300 Rayl), 4 m hohes Hindernis in 10 m Abstand von der Quelle, Empfänger in 4 und 10 m Höhe in den Abständen 20, 50, 100, 200, 500 und 1000 m.
- Fall 3** Strasse mit angrenzender ebener Grasfläche (Strömungswiderstand: 300 Rayl), 4 m hohes Hindernis in 50 m Abstand von der Quelle, Empfänger in 4 und 10 m Höhe in den Abständen 20, 50, 100, 200, 500 und 1000 m.

Ausbreitungssituation	Vertikalprofil der eff. Schallgeschwindigkeit	Maximalwert von z [m]
M1	$c_{\text{eff}}(z) = -1.70 \cdot \ln(1 + 10z) + 0.19z$	8.8
M2	$c_{\text{eff}}(z) = -0.05 \cdot \ln(1 + 10z) - 0.01z$	-
M3	$c_{\text{eff}}(z) = 0.65 \cdot \ln(1 + 10z) + 0.13z$	-
M4	$c_{\text{eff}}(z) = 0.95 \cdot \ln(1 + 10z) - 0.05z$	18.9
M5	$c_{\text{eff}}(z) = -1.00 \cdot \ln(1 + 10z) + 0.04z$	24.9
M6	$c_{\text{eff}}(z) = 0.00 \cdot \ln(1 + 10z) - 0.01z$	-

Tabelle 8.3: Durch einen lin-log Ansatz dargestellte Profile der effektiven Schallgeschwindigkeit in Funktion der Höhe z in Meter. Werte für z über dem Maximalwert werden durch den Maximalwert ersetzt. Dadurch wird verhindert, dass sich die Charakteristik (förderlich resp. hinderlich) eines Profils umkehrt.

Zusätzlich wurden folgende Situationen mit variabler Distanz resp. Hindernishöhe untersucht, um die Abhängigkeit des Meteeffekts im Jahresmittel von diesen Parametern zu untersuchen:

Fall H1 Strasse mit angrenzender ebener Grasfläche (Strömungswiderstand: 300 Rayl), Empfänger in 4 m Höhe in Abständen zwischen 20 und 1000 m.

Fall H2 Strasse mit angrenzender ebener Grasfläche (Strömungswiderstand: 300 Rayl), 4 m hohes Hindernis in 10 m Abstand von der Quelle, Empfänger in 4 m Höhe in Abständen zwischen 20 und 1000 m.

Fall H3 Strasse mit angrenzender ebener Grasfläche (Strömungswiderstand: 300 Rayl), 4 m hohes Hindernis in 50 m Abstand von der Quelle, Empfänger in 4 m Höhe in einem Abstand von 500 m.

Für alle Situationen wurde der Quellpunkt, entsprechend der Quellenhöhe in SonRoad, 0.45 m über Boden platziert.

Abbildung 8.4 zeigt die Meteeinflüsse, welche im Jahresmittel für die Situation ohne Hindernis zu erwarten sind. In der Nacht ist der Effekt stets positiv. Es ist eine Zunahme bis zu einer Distanz von 600 m sichtbar, danach bleibt der Effekt konstant bei ca 3.5 dB. Bemerkenswert ist die Situation bei Tag. Schon bei einer Distanz von 100 m wird ein Meteeffekt von ca. -5.5 dB erreicht. Zwischen 100 m und 300 m ändert sich dieser Wert kaum um danach langsam auf -5 dB anzusteigen.

Abbildung 8.5 zeigt die Meteeffekte nicht im Jahresmittel, sondern aufgeschlüsselt nach Meteosituationen. Da die hinderliche Situationen M1 und M5 bei Tag 75 % ausmachen, sind sie für kurze Distanzen dominierend und für den starken Abfall des Meteeffekts im Jahresmittel bei kurzen Distanzen verantwortlich. Bei grösseren Distanzen wird jedoch der Beitrag der Situationen M1 und M5 bei der energetischen Summation zur Jahresmittelung so klein, dass auch die am Tag weniger häufigen Situationen relevant werden. Die restlichen am Tag relevanten Meteosituationen M2, M3 und M4 werden ungefähr gleich gewichtet. Deshalb beginnt bei grösseren Distanzen die Meteosituation M4 mit dem stärksten positiven Meteeffekt zu dominieren. Dies ist u.a. daraus ersichtlich dass M4 die einzige am Tag relevante Situation mit zunehmendem Meteeffekt bei zunehmender Distanz ist.

Die Interpretation des Meteeffekts ohne Hindernis im Jahresmittel in der Nacht (Abb. 8.4) gestaltet sich wesentlich einfacher. Die beiden Situationen M3 und M4, welche in der Nacht 79 % ausmachen, besitzen Meteeffekte mit fast identischem Verlauf für die Situation ohne Hindernis. Da diese zudem die beiden einzigen förderlichen Situationen sind, dominieren sie den Meteeffekt im Jahresmittel über alle Distanzen.

Abbildung 8.6 zeigt die Meteeinflüsse im Jahresmittel, welche für die Situation mit einem 4 m hohen, 10 m von der Quelle entfernten Hindernis zu erwarten sind. Im Vergleich zur Situation ohne Hindernis sind die kleinen Meteeffekte am Tag auffallend. Dies liegt darin begründet, dass sich aufgrund des Hindernisses der Direktschall in grösserer Höhe ausbreitet und somit geringeren Temperatur- und Windgradienten ausgesetzt ist. Ganz anders zeigt sich die Situation in der Nacht. Bei einer Distanz von 100 m beträgt der Meteeffekt bereits 5 dB. Bei dieser Distanz wird im Fall ohne Hindernis noch gar kein Meteeffekt ausgewiesen. Hier zeigt sich eine starke Reduktion der Hinderniswirkung aufgrund gekrümmter Ausbreitung. Abbildung 8.7 zeigt die Meteeffekte aufgeschlüsselt nach Meteosituationen. Auffallend sind hier die stark unterschiedliche Meteeffekte der Meteosituationen M3 und M4, denn diese ergeben ohne Hinderniswirkung einen beinahe identischen Meteeffekt. Berücksichtigt man jedoch die genauen Verläufe der Meteoprofile (siehe Abb. 8.2), so sind diese Ergebnisse nicht überraschend, denn

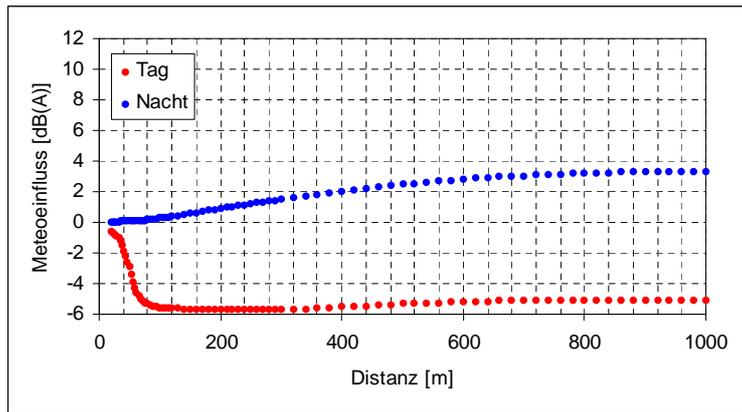


Abbildung 8.4: Auswirkung des Meteeffektes auf das Jahresmittel für den Tag und die Nacht 4 m über flachem Grund bei einer Quellenhöhe von 0.45 m in Abhängigkeit der horizontalen Distanz zur Quelle. Situation ohne Hindernis.

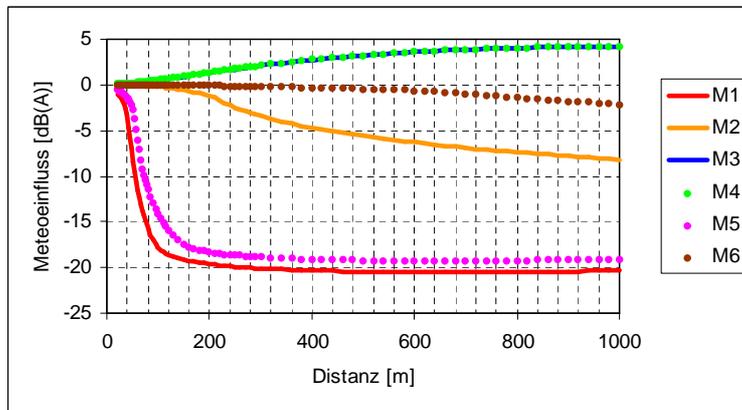


Abbildung 8.5: Auswirkung des Meteeffektes auf das Jahresmittel für die in Tabelle 8.3 beschriebenen Meteoprofile 4 m über flachem Grund bei einer Quellenhöhe von 0.45 m in Abhängigkeit der horizontalen Distanz zur Quelle. Situation ohne Hindernis.

bei Meteoprofil M4 klingt der Gradient der effektiven Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe viel schneller ab als bei M3.

Abbildung 8.8 zeigt den Meteeinfluss im Jahresmittel in Abhängigkeit der Höhe eines Hindernisses 50 m vom Quellpunkt entfernt. Der horizontale Abstand vom Empfangspunkt zur Quelle beträgt 500 m. Bemerkenswert ist, dass der nächtliche Meteeffekt bei zunehmender Hindernishöhe nach einem sanftem Maximum bei 5 m nur sehr langsam abnimmt. Abbildung 8.9 zeigt wiederum die Meteeffekte aufgeschlüsselt nach Meteosituationen.

Die Tabellen 8.4 und 8.5 zeigen den Meteeinfluss im Jahresmittel für die restlichen in Abschnitt 8.1.3 beschriebenen Geometrien. Alle Werte aus Tabelle 8.4 können auch den Abbildungen 8.4, 8.6 und 8.8 entnommen werden. Tabelle 8.5 zeigt den Meteeinfluss für die gleichen Geometrien, jedoch mit einer Empfängerhöhe von 10 m anstelle von 4 m.

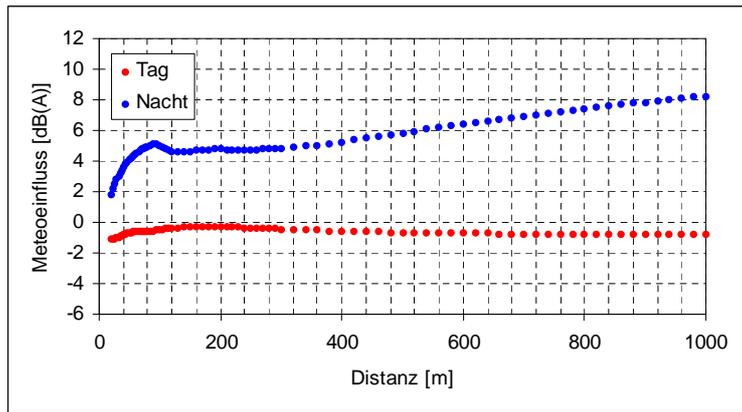


Abbildung 8.6: Auswirkung des Meteeffektes auf das Jahresmittel für den Tag und die Nacht 4 m über flachem Grund bei einer Quellenhöhe von 0.45 m in Abhängigkeit der horizontalen Distanz zur Quelle. Situation mit einem 4 m hohen Hindernis, 10 m vom Quellpunkt entfernt.

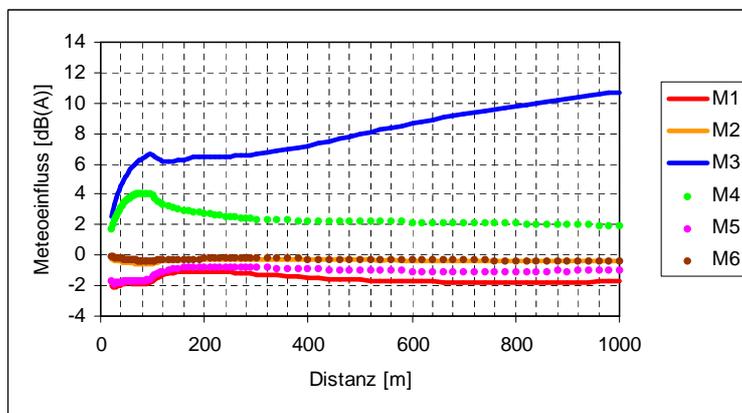


Abbildung 8.7: Auswirkung des Meteeffektes auf das Jahresmittel für die in Tabelle 8.3 beschriebenen Meteoprofile 4 m über flachem Grund bei einer Quellenhöhe von 0.45 m in Abhängigkeit der horizontalen Distanz zur Quelle. Situation mit einem 4 m hohen Hindernis, 10 m vom Quellpunkt entfernt.

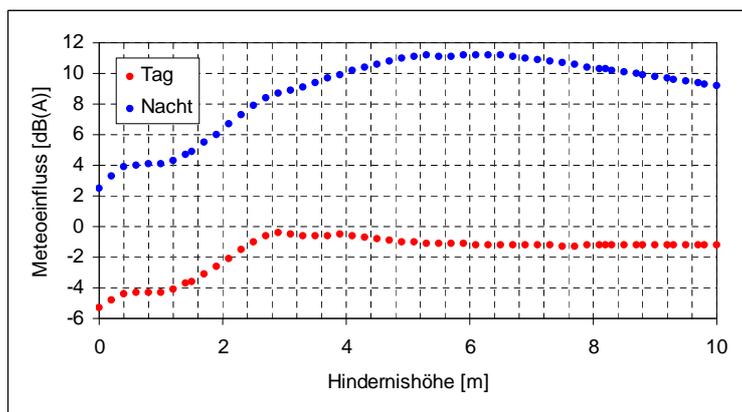


Abbildung 8.8: Auswirkung des Meteeffektes auf das Jahresmittel für den Tag und die Nacht 4 m über flachem Grund bei einer Quellenhöhe von 0.45 m in Abhängigkeit der Höhe eines Hindernisses 50 m vom Quellpunkt entfernt. Der horizontale Abstand vom Empfangspunkt zur Quelle beträgt 500 m.

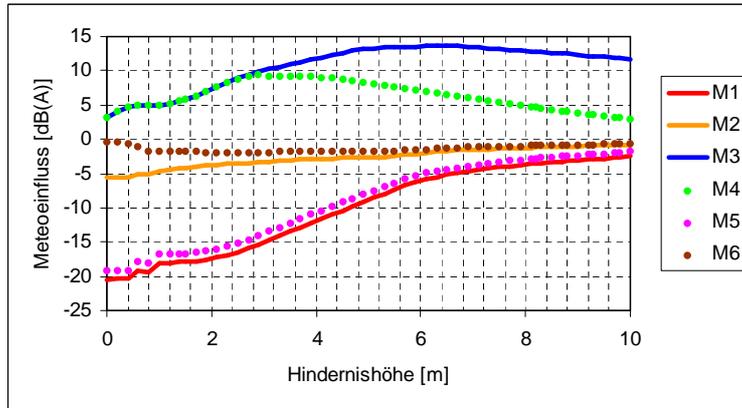


Abbildung 8.9: Auswirkung des Meteoeffektes auf das Jahresmittel für die in Tabelle 8.3 beschriebenen Meteoprofile 4 m über flachem Grund bei einer Quellenhöhe von 0.45 m in Abhängigkeit der Höhe eines Hindernisses 50 m vom Quellpunkt entfernt. Der horizontale Abstand vom Empfangspunkt zur Quelle beträgt 500 m.

D_{rec} [m]	D_{screen} [m]	H_{screen} [m]	L_{day} [dB(A)]	L_{night} [dB(A)]
20	-	-	-0.56	0.04
50	-	-	-2.92	0.08
100	-	-	-5.56	0.26
200	-	-	-5.67	0.90
500	-	-	-5.35	2.47
1000	-	-	-5.13	3.35
20	10	4	-1.09	1.84
50	10	4	-0.67	4.08
100	10	4	-0.50	5.02
200	10	4	-0.31	4.76
500	10	4	-0.67	5.84
1000	10	4	-0.76	8.23
100	50	4	-3.14	5.00
200	50	4	-1.97	7.71
500	50	4	-0.54	10.04
1000	50	4	-0.73	10.26

Tabelle 8.4: Auswirkung des Meteoeffektes auf das Jahresmittel bei Prototypsituationen 4 m über flachem Grund und einer Quellenhöhe von 0.45 m für den Tag (L_{day}) und die Nacht (L_{night}). D_{rec} und D_{screen} bezeichnen die horizontale Distanzen zwischen Quelle und Empfangspunkt bzw. zwischen Quelle und der Hinderniskante. H_{screen} bezeichnet die Höhe der Hinderniskante.

D_{rec} [m]	D_{screen} [m]	H_{screen} [m]	L_{day} [dB(A)]	L_{night} [dB(A)]
20	-	-	-0.28	0.03
50	-	-	-0.85	0.07
100	-	-	-3.21	0.10
200	-	-	-5.60	0.27
500	-	-	-6.11	0.83
1000	-	-	-5.94	2.00
20	10	4	-0.29	0.05
50	10	4	-1.66	2.66
100	10	4	-0.86	4.40
200	10	4	-0.81	5.78
500	10	4	-0.58	5.87
1000	10	4	-0.95	7.79
100	50	4	-3.29	0.28
200	50	4	-3.44	5.93
500	50	4	-1.80	8.79
1000	50	4	-1.29	9.45

Tabelle 8.5: Auswirkung des Meteoeffektes auf das Jahresmittel bei Prototypsituationen 10 m über flachem Grund und einer Quellenhöhe von 0.45 m für den Tag (L_{day}) und die Nacht (L_{night}). D_{rec} und D_{screen} bezeichnen die horizontale Distanzen zwischen Quelle und Empfangspunkt bzw. zwischen Quelle und der Hinderniskante. H_{screen} bezeichnet die Höhe der Hinderniskante.

8.1.4 SonRoad-Option "förderliche Ausbreitung" bei der Hinderniswirkung

Die Berechnung der Hinderniswirkung für die einzelnen Schallpfade erfolgt bei SonRoad gemäss ISO 9613-2. Dabei kann neben einer neutralen auch eine förderliche Ausbreitungsbedingung gewählt werden, was zur Folge hat, dass eine alternative Hindernisformel zum Einsatz kommt. Bei SonRoad-M wird stets die neutrale Ausbreitungsbedingung eingesetzt, da mit dem ray tracing der Meteoerfluss ansonsten doppelt berücksichtigt werden würde. So bezieht sich auch der in Abschnitt 8.1.3 ausgewiesene Meteoerfluss stets auf eine SonRoad-Berechnung unter neutralen Ausbreitungsbedingungen. Damit stellt sich aber die Frage, ob nicht in der Praxis zur Berücksichtigung des nächtlichen Meteoerflusses im Jahresmittel bei abgeschirmter Quelle eine SonRoad-Berechnung (ohne -M, also ohne ray tracing) unter förderlichen Ausbreitungsbedingungen gemäss ISO 9613-2 ausreicht.

Zur Beantwortung dieser Frage werden in Abb. 8.10 und 8.11 die nächtlichen Meteoerflüsse im Jahresmittel der Prototypsituationen mit abgeschirmter Quelle aus Abschnitt 8.1.3 mit der Pegeldifferenz zwischen SonRoad-Berechnung unter förderlichen und neutralen Ausbreitungsbedingungen verglichen. Bei der Prototypsituation mit quellennahem Hindernis (Abbildung 8.10) stimmt bei Distanzen über 500 m der mit SonRoad-M berechnete Meteoerfluss mit dem Einfluss der Option "förderliche Ausbreitungsbedingung" gemäss ISO 9613-2 gut überein. Bei kleineren Distanzen werden mit der Korrektur gemäss ISO zu kleine Pegel ausgewiesen. Der grösste Unterschied (über 2 dB) entsteht dabei bei einer Distanz von ca. 110 m. Abbildung 8.11 zeigt die Resultate der Situation mit einem variablen, 50 m entfernten Hindernis. Es ist ersichtlich, dass eine Erhöhung des Hindernisses die Unterschiede nicht zum verschwinden bringt. Die Unterschiede betragen in vielen Fällen über 3 dB, bei Hindernishöhen, welche die Sichtverbindung nicht unterbrechen, sogar bis zu 4 dB. Es wird deutlich, dass mit der Korrektur gemäss ISO 9613-2 die Fehler, welche bei einer Vernachlässigung der Reduktion der Hinderniswirkungen entstehen, verkleinert werden. Genauere Berechnung ergeben jedoch je nach Fall Meteoerflüsse, welche deutlich darüber hinausgehen.

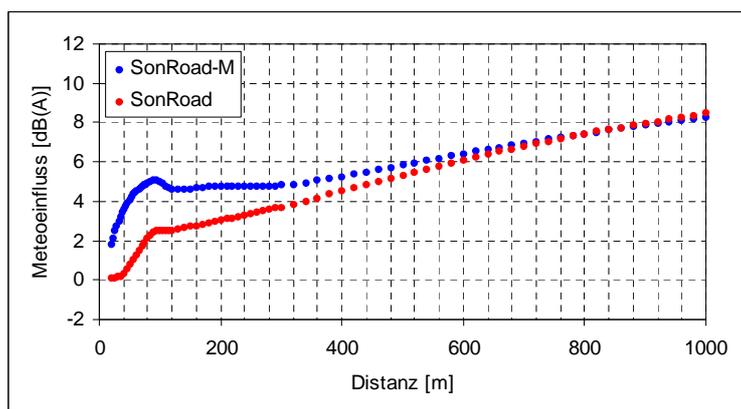


Abbildung 8.10: Vergleich des mittleren nächtlichen Meteoerflusses nach SonRoad-M (siehe auch Abb. 8.6) und nach SonRoad mit der Option „förderlich“. Pegeldifferenzen bei einem Empfangspunkt 4 m über flachem Grund bei einer Quellenhöhe von 0.45 m in Abhängigkeit der horizontalen Distanz zur Quelle. Situation mit einem 4 m hohen Hindernis, 10 m vom Quellpunkt entfernt.

8.2 Gültigkeitsbereich von SonRoad

Aus der Analyse der drei Prototypsituationen in Abschnitt 8.1.3 können für die Gültigkeit des SonRoad Modells (ohne ray tracing) folgende Richtwerte angegeben werden:

- Am Tag ohne Hinderniswirkung nur bis zu einer Distanz von 50 m.
- Am Tag vergrössert sich dieser Bereich, wenn eine Hinderniswirkung vorhanden ist.
- In der Nacht ohne Hinderniswirkung bis 300 m.
- In der Nacht verkleinert sich dieser Bereich, wenn eine Hinderniswirkung vorhanden ist.

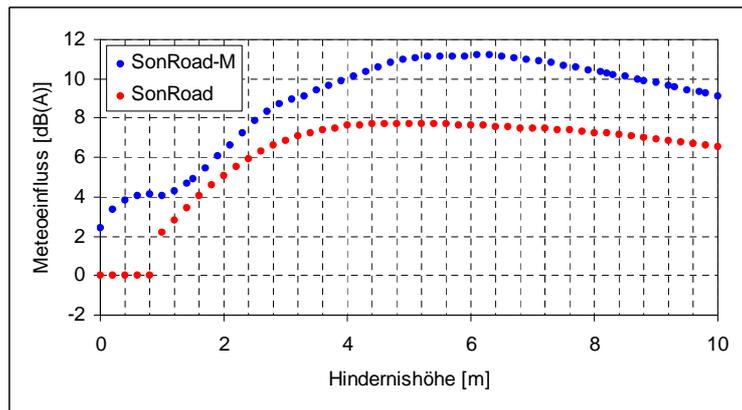


Abbildung 8.11: Vergleich des mittleren nächtlichen Meteoeffektes nach SonRoad-M (siehe auch Abb. 8.8) und nach SonRoad mit der Option „förderlich“. Pegeldifferenzen bei einem Empfangspunkt 4 m über flachem Grund bei einer Quellenhöhe von 0.45 m in Abhängigkeit der Höhe eines Hindernisses 50 m vom Quellpunkt entfernt. Der horizontale Abstand vom Empfangspunkt zur Quelle beträgt 500 m.

Der Einsatz der alternativen Hindernisformel für förderliche Ausbreitungsbedingungen gemäss ISO 9613-2 für die Nacht führt zu keiner wesentlichen Vergrößerung des Gültigkeitsbereiches, da dieser einfache Ansatz gerade für kleinere Distanzen unter 200 m ungenügend ist (siehe Abschnitt 8.1.4).

9 Ausblick

Das vorgestellte Strassenlärberechnungsmodell SonRoad-M wurde im Rahmen einer Prototyp-Implementierung von der Empa als Computerprogramm für den Eigengebrauch realisiert. Es soll künftig für Prognosen in wettersensitiven Situationen angewendet werden können. Voraussetzung dazu sind, nebst Gelände- und Geometrieangaben, Wetterdaten in genügend hoher Auflösung. Die MeteoSchweiz betreibt schweizweit ein Netz von über 60 automatischen Wetterstationen (ANETZ¹), die sowohl Winddaten als auch Angaben zur Strahlung liefern. Anhand dieser Daten können Windgeschwindigkeits- und Temperaturprofile abgeschätzt werden. Wenn keine geeigneten MeteoSchweiz-Daten zur Verfügung stehen, kann unter Umständen auf privat oder von kantonalen Stellen erhobene Daten zurückgegriffen werden. Im Zuge des immer weiter ausgebauten Umweltmonitorings werden oft gleichzeitig auch Wetterdaten erhoben.

Mit der Entwicklung von diagnostischen Meteomodellen wird künftig die rechnerische Modellierung von Wind- und Temperaturfeldern im komplexen Terrain möglich. Diese Ergebnisse lassen sich dann als Eingabegrößen für SonRoad-M verwenden.

¹<http://www.meteoschweiz.ch/web/de/services/datenportal/messnetze.html>

A Finite Differenzen im Zeitbereich

A.1 Verwendete Symbole

c	Schallgeschwindigkeit
f	Frequenz
i, j, k	Ortsindizes
κ	Adiabatenexponent, für Luft = 1.4
l	Zeitindex
p	Schalldruck
P_0	Ruhedruck
ρ	Dichte der Luft
σ	Strömungswiderstand
t	Zeit
v	Schallschnelle
x, y, z	Ortskoordinaten
$Z(\omega)$	Impedanz als Verhältnis von p zu v
ω	Kreisfrequenz = $2\pi f$

A.2 Theorie

Bei der Methode der Finiten Differenzen im Zeitbereich wird das Schallfeld durch die Gleichungen (A.1) und (A.2) beschrieben.

$$\text{grad}(p) = -\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa P_0 \text{div}(\vec{v}) \quad (\text{A.2})$$

In kartesischen Koordinaten lauten diese Beziehungen:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial v_x}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\rho_0 \frac{\partial v_y}{\partial t} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} \quad (\text{A.5})$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa P_0 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (\text{A.6})$$

Das interessierende Gebiet wird mit einem gleichmässigen Gitter überzogen. Der Schalldruck wird an den Gitterpositionen $\langle i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z \rangle$ ausgewertet, wobei i, j, k ganzzahlige Indizes und $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ die Diskretisierungen in den drei Koordinatenrichtungen bezeichnen. Die Schallschnellekomponenten werden richtungsabhängig an den Gitterpositionen $\langle (i \pm 0.5)\Delta x, j\Delta y, k\Delta z \rangle$ für die x -Richtung, $\langle i\Delta x, (j \pm 0.5)\Delta y, k\Delta z \rangle$ für die y -Richtung und $\langle i\Delta x, j\Delta y, (k \pm 0.5)\Delta z \rangle$ für die z -Richtung ausgewertet. Die Abbildung A.1 zeigt das Gitter für den zweidimensionalen Fall.

Die Schallfeldgleichungen werden durch Finite Differenzen approximiert womit nebst der räumlichen auch eine zeitliche Diskretisierung eingeführt wird. Die Schallschnelle wird zu den Zeitpunkten $t = (l + 0.5)\Delta t$, der Schalldruck zu den Zeitpunkten $t = l\Delta t$ ausgewertet. Damit ergibt sich folgendes Formelset:

$$v_x^{[l+0.5]}(i + 0.5, j, k) = v_x^{[l-0.5]}(i + 0.5, j, k) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta x} \left(p^{[l]}(i + 1, j, k) - p^{[l]}(i, j, k) \right) \quad (\text{A.7})$$

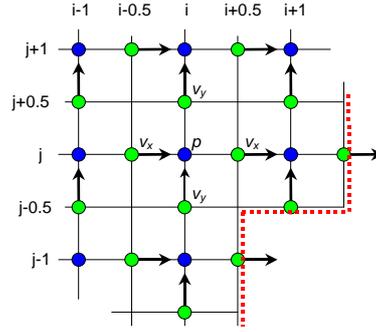


Abbildung A.1: Im 2-dimensionalen Fall das den Simulationsbereich überziehende Gitter für die Finite Differenzen Methode im Zeitbereich. Der Schalldruck wird in den Gitterpunkten $\langle i\Delta x, j\Delta y \rangle$, die Schallschnelle in x-Richtung in den Gitterpunkten $\langle (i \pm 0.5)\Delta x, j\Delta y \rangle$ und die Schallschnelle in y-Richtung in den Gitterpunkten $\langle i\Delta x, (j \pm 0.5)\Delta y \rangle$ bestimmt. Die gestrichelte Linie markiert den Gebietsrand, auf dem Randbedingungen definiert werden.

$$v_y^{[l+0.5]}(i, j + 0.5, k) = v_y^{[l-0.5]}(i, j + 0.5, k) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta y} \left(p^{[l]}(i, j + 1, k) - p^{[l]}(i, j, k) \right) \quad (\text{A.8})$$

$$v_z^{[l+0.5]}(i, j, k + 0.5) = v_z^{[l-0.5]}(i, j, k + 0.5) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta z} \left(p^{[l]}(i, j, k + 1) - p^{[l]}(i, j, k) \right) \quad (\text{A.9})$$

$$\begin{aligned} p^{[l+1]}(i, j, k) = & p^{[l]}(i, j, k) - \frac{\rho_0 c^2 \Delta t}{\Delta x} \left(v_x^{[l+0.5]}(i + 0.5, j, k) - v_x^{[l+0.5]}(i - 0.5, j, k) \right) \\ & - \frac{\rho_0 c^2 \Delta t}{\Delta y} \left(v_y^{[l+0.5]}(i, j + 0.5, k) - v_y^{[l+0.5]}(i, j - 0.5, k) \right) \\ & - \frac{\rho_0 c^2 \Delta t}{\Delta z} \left(v_z^{[l+0.5]}(i, j, k + 0.5) - v_z^{[l+0.5]}(i, j, k - 0.5) \right) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Für die Punkte auf dem Rand des Simulationsbereichs werden Randbedingungen vorgegeben. Ohne wesentliche Einschränkung kann vorausgesetzt werden, dass der Rand durch Gitterpunkte verläuft, in welchen die Schallschnelle bestimmt wird. Es wird eine lokal reagierende Bedingung angenommen, d.h. die Randbedingung sagt etwas über das Verhältnis des Schalldrucks zur Normalkomponenten der Schallschnelle auf dem Randpunkt aus. Dies entspricht einer Impedanz, die in der Regel frequenzabhängig ist. Die exakte Formulierung im Zeitbereich ergibt sich durch eine Faltungsoperation mit dem in den Zeitbereich transformierten Impedanz-Frequenzverlauf¹.

Wenn die Frequenzabhängigkeit eingeschränkt wird, vereinfacht sich die Formulierung der Randbedingung wesentlich. Es wird hier vorausgesetzt, dass sich die Impedanz im Frequenzbereich durch Gl. A.11 darstellen lassen.

$$Z(\omega) = a_{-1} \frac{1}{j\omega} + a_0 + a_1 j\omega \quad (\text{A.11})$$

mit

a_{-1}, a_0, a_1 : positive reelle Zahlen.

Im Frequenzbereich lässt sich für die Fouriertransformierte des Schalldrucks schreiben:

$$P(\omega) = Z(\omega)V(\omega) = V(\omega)a_{-1} \frac{1}{j\omega} + V(\omega)a_0 + V(\omega)a_1 j\omega \quad (\text{A.12})$$

¹Benoit Van den Nieuwenhof, Jean-Pierre Coyette, Treatment of frequency-dependent admittance boundary conditions in transient acoustic finite-infinite-element models, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 111, p.1743-1751 (2001)

mit

$P(\omega)$: Fouriertransformierte des Schalldruckzeitverlaufs

$V(\omega)$: Fouriertransformierte des Zeitverlaufs der Schallschnellenormalkomponenten

Die Gl. A.12 übersetzt sich in den Zeitbereich zu:

$$p(t) = \int_{-\infty}^t a_{-1}v_n(\tau)d\tau + a_0v_n(t) + a_1 \frac{dv_n(t)}{dt} \quad (\text{A.13})$$

Wie bereits erwähnt, wird vorausgesetzt, dass die Randbedingung in einem Schnelle-Gitterpunkt zu formulieren ist. Das bedeutet, dass für Randpunkte von obigem Formelset die Gleichungen (Gl. A.7 bis A.9) zur Aufdatierung der Schnelle zu ersetzen sind. Exemplarisch wird hier die Rechnung für die Schnellekomponente in x-Richtung durchgeführt, wobei angenommen wird, dass der Rand durch den Gitterpunkt $\langle (i + 0.5)\Delta x, j\Delta y, k\Delta z \rangle$ läuft und der Simulationsbereich bei kleineren x-Koordinaten liegt.

Wie für jeden Raumpunkt muss auch für den Randpunkt $\langle (i + 0.5)\Delta x, j\Delta y, k\Delta z \rangle$ Gl. A.14 gelten.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial v_x}{\partial t} \quad (\text{A.14})$$

Im Unterschied zu obiger symmetrischer Approximation (A.7) wird hier eine einseitige Näherung für (A.14) mit Finiten Differenzen angesetzt:

$$v_x^{[l+0.5]}(i + 0.5, j, k) = v_x^{[l-0.5]}(i + 0.5, j, k) - \frac{2\Delta t}{\rho_0\Delta x} \left(p^{[l]}(i + 0.5, j, k) - p^{[l]}(i, j, k) \right) \quad (\text{A.15})$$

In Gl. A.15 ist der Schalldruck am Gitterpunkt $\langle (i + 0.5)\Delta x, j\Delta y, k\Delta z \rangle$ unbekannt. Mit Kenntnis der Randbedingung (A.13) lässt sich dieser unbekannte Schalldruck aber durch die Schnelle ausdrücken:

$$p^{[l]}(i + 0.5, j, k) = a_{-1}\Delta t \left(\sum_{m=-\infty}^l v_x^{[m-0.5]}(i + 0.5, j, k) \right) + a_0v_x^{[l]}(i + 0.5, j, k) + a_1 \frac{v_x^{[l+0.5]}(i + 0.5, j, k) - v_x^{[l-0.5]}(i + 0.5, j, k)}{\Delta t} \quad (\text{A.16})$$

In Gl. A.16 tritt ein Term mit der Schnelle zum Zeitpunkt l auf. Da die Schnellen sonst nur zu Zeitpunkten $\cdot + 0.5$ ausgewertet werden, wird dieser Wert als Mittelwert der zeitlichen Nachbarpunkte approximiert zu:

$$v_x^{[l]} = \frac{v_x^{[l+0.5]} + v_x^{[l-0.5]}}{2} \quad (\text{A.17})$$

Schliesslich lässt sich Gl. A.15 durch Einsetzen von (A.16) und (A.17) nach der gesuchten Grösse $v_x^{[l+0.5]}(i + 0.5, j, k)$ auflösen. Damit wird Gleichung A.18 für das Aufdatieren der Schnelle am Randpunkt (Simulationsbereich liegt bei tieferen x-Koordinaten als das Randstück) als Ersatz von (A.7) gefunden.

$$v_x^{[l+0.5]}(i + 0.5, j, k) = v_x^{[l-0.5]}(i + 0.5, j, k) \frac{\rho_0\Delta x - a_0\Delta t + 2a_1}{\rho_0\Delta x + a_0\Delta t + 2a_1} + p^{[l]}(i, j, k) \frac{2\Delta t}{\rho_0\Delta x + a_0\Delta t + 2a_1} - \sum_{m=-\infty}^l v_x^{[m-0.5]}(i + 0.5, j, k) \frac{2a_{-1}(\Delta t)^2}{\rho_0\Delta x + a_0\Delta t + 2a_1} \quad (\text{A.18})$$

Die unendliche Summe in Gl. A.18 erfordert pro Schnellevariable das Mitführen eines zusätzlichen Registers, in welchem die Beiträge über die Zeit aufaddiert werden.

Wenn der Simulationsbereich vom Randpunkt aus gesehen zu höheren x-Werten verläuft, findet sich in analoger Weise als Gleichung für das Aufdatieren der Schnelle am Randpunkt Gl. A.19.

$$v_x^{[l+0.5]}(i+0.5, j, k) = v_x^{[l-0.5]}(i+0.5, j, k) \frac{\rho_0 \Delta x - a_0 \Delta t + 2a_1}{\rho_0 \Delta x + a_0 \Delta t + 2a_1} - p^{[l]}(i+1, j, k) \frac{2\Delta t}{\rho_0 \Delta x + a_0 \Delta t + 2a_1} - \sum_{m=-\infty}^l v_x^{[m-0.5]}(i+0.5, j, k) \frac{2a_{-1}(\Delta t)^2}{\rho_0 \Delta x + a_0 \Delta t + 2a_1} \quad (\text{A.19})$$

Die Gleichungen für die zwei anderen Koordinatenrichtungen ergeben sich direkt durch Anpassung des Index.

Als Anfangsbedingung zur Ermittlung der Impulsantwort kann z.B. eine sanfte, kontinuierliche Schalldruckverteilung am gewünschten Quellenort gemäss A.20 vorgegeben werden. Es muss sichergestellt werden, dass kein örtliches und zeitliches Aliasing auftritt.

$$p^{[0]}(i, j, k) = e^{-((0.3(i-i_S))^2 + (0.3(j-j_S))^2 + (0.3(k-k_S))^2)} \quad (\text{A.20})$$

mit

i_S, j_S, k_S : Indizes des Quellen-Gitterpunktes.

Das Set der Differenzgleichungen stellt schliesslich eine Rechenvorschrift für die Bestimmung der *neuen* Schallschnelle- und Schalldruckwerte aus den *alten* Werten dar womit ein schrittweises Aufdatieren der Schallfeldgrössen möglich wird. Durch wechselweises Auswerten der Gleichungen für die Schallschnelle und dann für den Schalldruck wird die Impulsantwort an jedem Gitterpunkt gefunden. Mit der Impulsantwort steht die ganze Systeminformation zur Verfügung. Mittels einer Fourier-Transformation kann daraus z.B. der Frequenzgang nach Amplitude und Phase berechnet werden.

A.3 Randbedingung für den Boden

Zur Beschreibung der Impedanz verschiedener Böden existieren verschiedene Modelle. Oft wird das empirisch gefundene Ein-Parameter-Modell von Delany u. Bazley² verwendet. Dabei wird zur Charakterisierung des Bodens der Strömungswiderstand σ (sigma) verwendet, woraus sich mit Gl. A.21 für jede Frequenz f die auf ρc normierte Impedanz $Z(f)$ bestimmen lässt. Man beachte, dass das Vorzeichen des Imaginärteils der Impedanz in Gl. A.21 von der Konvention der Zeitabhängigkeit in der komplexen Darstellung abhängt³. Für die Uebersetzung in den Zeitbereich ist hier für diesen Schwingungsterm $e^{j\omega t}$ anzusetzen, sodass der Imaginärteil in Gl. A.21 ein negatives Vorzeichen erhält.

$$Z(f) = 1 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.75} - j11.9 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.73} \quad (\text{A.21})$$

mit

$Z(f)$	auf ρc normierte Impedanz
f	Frequenz [Hz]
σ	Strömungswiderstand [Rayl].

Die Tabelle A.1 gibt für verschiedene Bodentypen den zugehörigen Strömungswiderstand an.

Die Beschreibung der Bodenimpedanz (A.21) mittels eines Ansatzes gemäss Gl. A.11 gelingt nur relativ grob. Aus diesem Grund wurde hier eine optimale Parametersuche nicht direkt anhand der Impedanzapproximation durchgeführt, sondern bezüglich der Auswirkungen auf den Bodeneffekt. Dabei ergeben sich die in Tabelle A.2 gezeigten Parameter. Die Nachbildung von Bodenimpedanzen lässt sich weiter verfeinern, wenn ein Potenzansatz zweiter Ordnung gemäss Gl. A.22 verwendet wird⁴.

$$Z(\omega) = a_{-2} \frac{1}{(j\omega)^2} + a_{-1} \frac{1}{j\omega} + a_0 + a_1 j\omega + a_2 (j\omega)^2 \quad (\text{A.22})$$

²M. E. Delany, E. N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics vol. 3, 105-116 (1970)

³G. A. Daigle et al. Some comments on the literature of propagation near boundaries of finite acoustical impedance, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 66, p.918-919 (1979)

⁴K. Heutschi, M. Horvath, J. Hofmann, Simulation of Ground Impedance in Finite Difference Time Domain Calculations of Outdoor Sound Propagation, Acta Acustica - Acustica, vol. 91, 35-40 (2005)

Bodentyp	Strömungswiderstand σ [Rayl]
Asphalt, Wasser	20'000
harter Erdboden	5'000
lockerer Erdboden, Kies	500
Rasen	300
Weidland	150
Hartschnee	40

Tabelle A.1: Strömungswiderstände für verschiedene Bodentypen.

mit

$a_{-2}, a_{-1}, a_0, a_1, a_2$: reelle Zahlen.

Strömungswiderstand σ	a_{-1}	a_0	a_1
∞	0.0	99999.9	0.0
20'000	834011	37.7	0.0
5'000	264011	20.7	0.0
1'000	64560	11.4	0.0
500	35076	9.09	0.0
300	22370	7.73	0.0
200	15630	6.82	0.0
150	12120	6.25	0.0
100	8462	5.53	0.0
40	3840	4.16	0.0

Tabelle A.2: Optimale Parameterwerte a_{-1}, a_0, a_1 für die Nachbildung der Bodenimpedanz für verschiedene Werte des Strömungswiderstandes.

A.4 Randbedingung für absorbierende Flächen

Die Charakterisierung von allgemein absorbierenden Flächen geschieht in der Regel mittels eines statistischen Absorptionskoeffizienten α als Funktion der Frequenz. Mit Ausnahme von schmalbandigen Resonanzabsorbern lassen sich solche Frequenzabhängigkeiten in der Regel gut durch einen Impedanzansatz der Form A.11 nachbilden und damit relativ einfach in die Finite Differenzen Simulation übersetzen.

A.5 Achsialsymmetrische Näherung

Die Simulation des von einer kohärenten Linienquelle ausgehenden Schallfeldes erfordert eine zweidimensionale Rechnung, wobei die Koordinate parallel zur Linienquelle weggelassen werden kann. Oft sollen jedoch Punktquellen simuliert werden. Dies erfordert grundsätzlich eine dreidimensionale Betrachtung mit der damit verbundenen massiven Erhöhung des Rechenaufwandes und Speicherbedarfs. Unter der Voraussetzung der rein fortschreitenden Welle, d.h. es werden keine Reflexionen betrachtet, lässt sich durch eine achsialsymmetrische Näherung das Punktquellenverhalten mit lediglich zwei Dimensionen simulieren. Achsialsymmetrische Näherung bedeutet, dass sich in der Koordinaten des Azimutwinkels ϕ nichts ändert (Rotationssymmetrie), d.h. dass sämtliche Ableitungen nach ϕ verschwinden. Die resultierenden Gleichungen ergeben sich durch Formulierung der beiden grundlegenden Schallfeldgleichungen A.1 und A.2 in Zylinderkoordinaten und Weglassen der $\frac{\partial}{\partial \phi}$ Terme. Aus Gl. A.1 ergeben sich:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\rho_0 \frac{\partial v_r}{\partial t} \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 \frac{\partial v_z}{\partial t} \quad (\text{A.24})$$

Aus Gl. A.2 wird

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa P_0 \left(\frac{1}{r} v_r + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (\text{A.25})$$

In obigen Gleichungen bezeichnet r jene Koordinate, die von der Quelle aus radial nach aussen zeigt. Im Vergleich zu den Gleichungen im 2-dimensionalen kartesischen Koordinatensystem unterscheiden sich die Gleichungen in der achsialsymmetrischen Näherung formal lediglich durch den ersten Term in der Klammer auf der rechten Seite der Gl. A.25. Es ist ohne weiteres möglich, diesen Term in das oben beschriebene Aufdatierungsschema einzubauen. Etwas Vorsicht bedarf lediglich der Gitterpunkt im Zentrum der Quelle, da dort $\frac{1}{r} \rightarrow \infty$ geht. Aus Symmetriegründen muss in diesem Punkt die radiale Schnelle $v_r = 0$ sein. Für die Aufdatierung des Schalldrucks wird der Beitrag dieses Punktes ignoriert.

A.6 Berücksichtigung variabler effektiver Schallgeschwindigkeit

Mit den oben gezeigten Schallfeldgleichungen ist es möglich, eine beliebige lokal unterschiedliche Schallgeschwindigkeit zuzulassen. Das Konzept der effektiven Schallgeschwindigkeit verschmilzt die für die Ausbreitung relevanten Meteogrößen Temperatur und Windgeschwindigkeit in einer Grösse c_{eff} . Über die Beziehung

$$\rho = \frac{\kappa P_0}{c^2} \quad (\text{A.26})$$

wird die effektive Schallgeschwindigkeit c_{eff} in eine effektive Dichte ρ_{eff} überführt. Wenn die effektive Schallgeschwindigkeit auf der Referenzhöhe 0 und auf der Höhe h gegeben ist findet sich die Dichte in der Höhe h gemäss Gl. A.27.

$$\rho_{\text{eff}}(h) = 1.186 \frac{c_{\text{eff}}^2(0)}{c_{\text{eff}}^2(h)} \quad (\text{A.27})$$

In den Gleichungen zur Aufdatierung des Schalldrucks tauchen Dichte und Schallgeschwindigkeit als Produkt ρc^2 auf. Aus obiger Beziehung wird ersichtlich, dass sich die möglichen Änderungen von Dichte und Schallgeschwindigkeit gerade wegkompensieren. Die Aufdatierung des Schalldrucks aus den angrenzenden Schnellen ist *unabhängig* von der effektiven Schallgeschwindigkeit und damit von den Wettereinflüssen. In der Gleichung zum Aufdatieren der Schallschnelle dagegen erscheint nur der Dichteparameter. Anhand der Gl. A.27 wird aus der gegebenen effektiven Schallgeschwindigkeit die gesuchte einzusetzende effektive Dichte ermittelt.

A.7 Implementierung als Referenzmodell

A.7.1 Validierung der Implementierung für ein Hindernis

Die Korrektheit des implementierten FDTD-Modells wurde in einem ersten Schritt anhand von analytischen (Näherungs-)Lösungen zur Hinderniswirkung einer Halbebene geprüft. Dazu wurde eine Punktquelle (achsialsymmetrischer Ansatz) bei $x = 0.0, y = 0.0$, ein Hindernis bei $x = 9.0$ mit der Oberkante bei $y = 4.0$ sowie drei Empfänger bei $x = 20.0, y = 2.0$, $x = 20.0, y = 4.0$ und $x = 20.0, y = 6.0$ angenommen (sämtliche Koordinaten in Meter). Es wurde explizit keine Bodenreflexion berücksichtigt. Die analytischen Lösungen des Schalldrucks hinter dem Hindernis basieren auf einer Herleitung von MacDonald⁵, Pierce⁶ und Menounou⁷. Die FDTD-Simulation wurde mit einer örtlichen Diskretisierung von 0.02 m und mit einem Zeitschritt von 0.2 ms durchgeführt. Die in den Tabellen A.3 bis A.5 aufgeführten Resultate zeigen bei tiefen und mittleren Frequenzen eine gute Übereinstimmung der FDTD-Simulation mit den analytischen Lösungen (Abweichungen in der Grössenordnung der Unsicherheit der analytischen Näherungslösungen selbst). Bei 2 kHz (Wellenlänge = 0.17 m) liefert die FDTD keinen zuverlässigen Wert mehr, da offensichtlich die örtliche Diskretisierung zu grob ist.

⁵T. Kawai, K. Fujimoto, Noise Propagation around a Thin Half-Plane, *Acustica*, vol. 38, p.313-323 (1977).

⁶Allan D. Pierce, *Acoustics*, published by the Acoustical Society of America (1991).

⁷Penelope Menounou, A Correction to Maekawa's Curve for the Insertion Loss Behind Noise Barriers, Noise-Con 2000, Newport Beach, California (2000)

	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
Pierce	12.1	12.7	13.4	14.1	14.9	15.7	16.6	17.5
MacDonald	9.7	10.5	11.2	12.0	12.8	13.7	14.6	15.5
Menounou	10.2	10.9	11.6	12.4	13.2	14.1	15.1	16.0
FDTD	10.0	10.7	11.5	12.3	13.1	14.0	14.9	15.9

	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
Pierce	18.4	19.3	20.3	21.3	22.2	23.3	24.3	25.3
MacDonald	17.4	18.4	19.4	20.4	21.4	22.4	23.4	
Menounou	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0
FDTD	16.9	17.9	18.9	20.0	21.0	21.9	22.8	23.5

Tabelle A.3: Hinderniswirkung in Abhängigkeit der Terzband-Mittenfrequenz am Empfangspunkt 1 bei $x = 20.0, y = 2.0$ berechnet nach Pierce, MacDonald, Menounou und mit der FDTD-Simulation.

	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
Pierce	10.4	10.9	11.4	12.0	12.6	13.3	14.1	14.8
MacDonald	8.3	8.9	9.5	10.2	10.9	11.6	12.4	13.2
Menounou	8.8	9.3	9.8	10.4	11.1	11.8	12.6	13.4
FDTD	8.7	9.2	9.9	10.5	11.2	12.0	12.7	13.6

	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
Pierce	15.6	16.5	17.4	18.3	19.2	20.2	21.1	22.1
MacDonald	14.1	15.0	15.9	16.8	17.8	18.7	19.7	20.7
Menounou	14.3	15.2	16.2	17.2	18.2	19.2	20.2	21.2
FDTD	14.5	15.4	16.3	17.3	18.3	19.2	20.1	20.8

Tabelle A.4: Hinderniswirkung in Abhängigkeit der Terzband-Mittenfrequenz am Empfangspunkt 2 bei $x = 20.0, y = 4.0$ berechnet nach Pierce, MacDonald, Menounou und mit der FDTD-Simulation.

	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
Pierce	8.5	8.8	9.2	9.6	10.0	10.5	11.0	11.5
MacDonald	6.8	7.2	7.7	8.1	8.6	9.1	9.7	10.3
Menounou	7.4	7.7	8.0	8.4	8.8	9.2	9.7	10.2
FDTD	7.2	7.6	8.0	8.4	8.9	9.5	10.0	10.6

	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
Pierce	12.1	12.8	13.5	14.2	15.0	15.8	16.6	17.5
MacDonald	10.9	11.6	12.4	13.1	13.9	14.8	15.7	16.6
Menounou	10.9	11.5	12.3	13.1	14.0	14.9	15.8	16.8
FDTD	11.3	12.0	12.7	13.5	14.3	15.1	15.9	16.5

Tabelle A.5: Hinderniswirkung in Abhängigkeit der Terzband-Mittenfrequenz am Empfangspunkt 3 bei $x = 20.0, y = 6.0$ berechnet nach Pierce, MacDonald, Menounou und mit der FDTD-Simulation.

A.7.2 Validierung der Implementierung für inhomogene Atmosphäre 1

Als Validierung des Finite Differenzen Modells wurde die eigene Implementierung mit Ergebnissen von Berechnungen mit der Parabolischen Gleichung aus Salomons verglichen. Dazu wurde sowohl die Quelle als auch der Empfänger 2.0 m über hartem Boden angenommen. Der Quellen-Empfängerabstand betrug 30 bzw. 100 m. Für die effektive Schallgeschwindigkeit wurde eine Höhenabhängigkeit gemäss Gl. 3.1 angesetzt, wobei für den Parameter b die Werte +1 (Krümmung gegen den Boden hin), 0 (neutral, d.h. keine Höhenabhängigkeit) und -1 (Krümmung vom Boden weg) angesetzt wurden. Die Abbildungen A.2 und A.3 zeigen die exzellente Übereinstimmung der beiden Berechnungsmodelle.

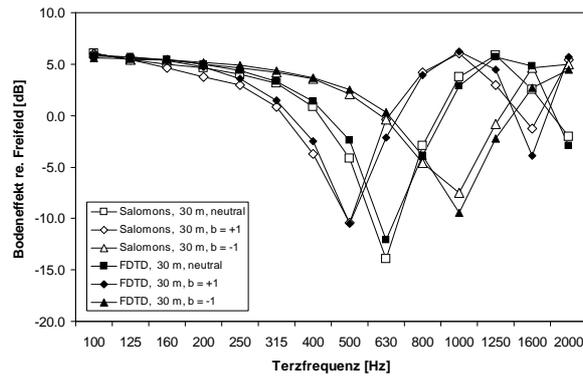


Abbildung A.2: Vergleich des mit der Parabolischen Gleichung bzw. dem Finiten Differenzen Ansatz berechneten Bodeneffekts für eine 2 m hohe Punktquelle und einen 2 m hohen und 30 m entfernten Empfänger über hartem Boden. Die angenommenen Ausbreitungsbedingungen sind neutral, Brechung aufwärts ($b = -1$) und Brechung abwärts ($b = +1$).

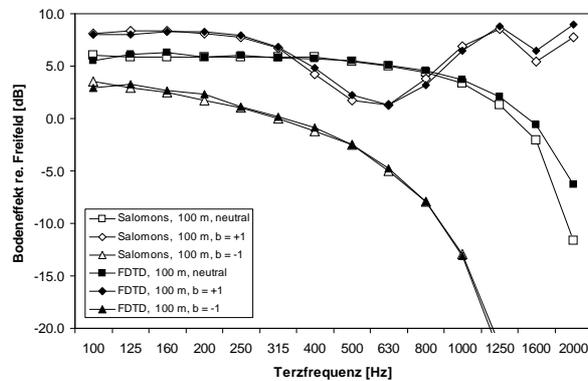


Abbildung A.3: Vergleich des mit der Parabolischen Gleichung bzw. dem Finiten Differenzen Ansatz berechneten Bodeneffekts für eine 2 m hohe Punktquelle und einen 2 m hohen und 100 m entfernten Empfänger über hartem Boden. Die angenommenen Ausbreitungsbedingungen sind neutral, Brechung aufwärts ($b = -1$) und Brechung abwärts ($b = +1$).

A.7.3 Validierung der Implementierung für inhomogene Atmosphäre 2

Hier Vergleich FDTD mit analytischer Lösung gemäss Pierce in Schattenzonen für lineare Gradienten (Jan).

A.7.4 Validierung der Implementierung für verlustbehaftete Reflexion

Mit dem Finite Differenzen Modell können Reflexionen an teilweise absorbierenden Materialien nachgebildet werden. Wie oben ausgeführt, können allerdings nur Impedanzen der Form (A.28) nachgebildet werden.

$$Z(\omega) = a_{-1} \frac{1}{j\omega} + a_0 + a_1 j\omega \quad (\text{A.28})$$

mit

a_{-1}, a_0, a_1 : positive reelle Zahlen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Daten zur Beschreibung des Absorbers im Hallraum gewonnene statistische Absorptionskoeffizienten α_S sind. Zum Auffinden einer Impedanz, die die jeweiligen α_S -Werte erzeugt, wurde ein eigenes Optimierungsprogramm entwickelt. Dabei wird vereinfacht die Hallraummessung nachgebildet. Ausgehend von ebenen Wellen wird für verschiedene Einfallswinkel ϕ

zwischen 0 und 90° der Absorptionskoeffizient $\alpha(\phi)$ bestimmt. Aus diesen Werten ergibt sich schliesslich unter Berücksichtigung des Gewichtsfaktors $\cos(\phi)$ der Mittelwert α_S . Die Impedanz-Parameter a_{-1}, a_0, a_1 werden solange variiert, bis eine optimale Übereinstimmung vorliegt.

Zur Überprüfung der korrekten Implementierung wurde die Stärke einer Reflexion unter 45° für verschiedene Impedanzen untersucht. Als Quelle wurde eine Linienquelle im schrägen Abstand von 14 m vom Reflexionspunkt angenommen. Die Tabellen A.6 bis A.8 zeigen für drei verschiedene Absorber die Oktavbandpegel am Empfangspunkt bezogen auf die Reflexion an einer harten Fläche. Die theoretisch erwarteten und mit den FDTD Simulationen berechneten Werte zeigen eine gute Übereinstimmung.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz
gegebene α_S des Absorbers	0.1	0.2	0.5	0.8	0.8
theoretisch erwartete Abschwächungen [dB]	0.5	1.0	3.0	7.0	7.0
mit FDTD berechnete Abschwächungen [dB]	0.3	0.8	2.5	6.8	7.0

Tabelle A.6: Verlustbehaftete Reflexion mit der FDTD-Simulation.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz
gegebene α_S des Absorbers	0.0	0.0	0.1	0.3	0.8
theoretisch erwartete Abschwächungen [dB]	0.0	0.0	0.5	1.5	7.0
mit FDTD berechnete Abschwächungen [dB]	0.0	0.1	0.3	1.7	5.1

Tabelle A.7: Verlustbehaftete Reflexion mit der FDTD-Simulation.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz
gegebene α_S des Absorbers	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
theoretisch erwartete Abschwächungen [dB]	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
mit FDTD berechnete Abschwächungen [dB]	2.8	3.0	3.1	3.1	3.1

Tabelle A.8: Verlustbehaftete Reflexion mit der FDTD-Simulation.

A.7.5 Validierung der Implementierung für Bodenreflexionen

Zur Validierung der zuverlässigen Nachbildung von Bodenreflexionen wurden FDTD Simulationen mit analytischen Lösungen einer Punktquelle über ebenem homogenem Boden⁸ verglichen. Dazu wurde ein ebener homogener Boden mit einem Strömungswiderstand von 300 Rayl angenommen. Die Quelle war 1 m, der Empfänger 2 m über Boden. Die Abbildung A.4 zeigt den Bodeneffekt, d.h. die Pegelveränderung mit Boden im Vergleich zum Direktschall alleine. Bereits für die Impedanzapproximation erster Ordnung ist die Übereinstimmung befriedigend. Für die Approximation 2. Ordnung ist die Übereinstimmung sehr gut.

⁸C. I. Chessel, Propagation of noise along a finite impedance boundary. J. Acoustical Society of America, vol. 62, p.825-834 (1977)

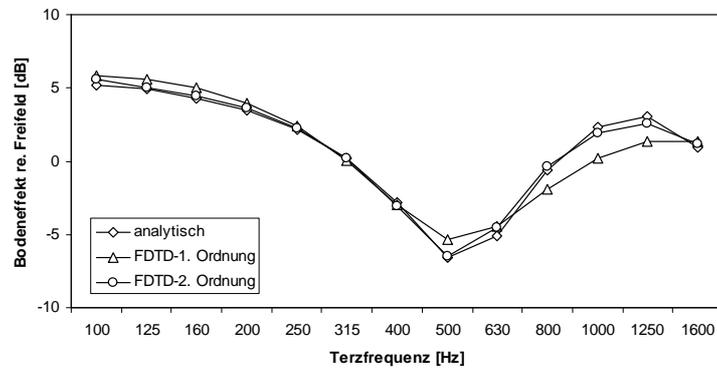


Abbildung A.4: Exemplarischer Vergleich der analytischen Lösung für den Bodeneffekt mit FDTD Simulationen. Gezeigt sind die beiden FDTD-Impedanzapproximationen 1. und 2. Ordnung. Die Quelle war 1.0 m, der Empfänger 2.0 m über ebenem homogenem Boden mit einem Strömungswiderstand von 300 Rayl. Der Quellen-Empfänger Abstand betrug 20 m.