



Dokumentation des *sonX* Ausbreitungsmodells

Programmversion: *sonX* V7.1.8 bzw. *sonARMS* V6.1.8 vom 4. Januar 2026

Anzahl Seiten: 148

Zusammenfassung

sonX ist ein allgemein formuliertes Schallausbreitungsmodell für Punkt-zu-Punkt-Ausbreitungen, das durch die Empa, Abteilung Akustik/Lärmminderung, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU entwickelt und unterhalten wird. Das Ausbreitungsmodell ist in Module für Direktschall, Meteeinflüsse, Reflexionen an künstlichen Objekten sowie Reflexionen an Wald und Fels unterteilt. Es stehen Verknüpfungen für verschiedene Emissionsmodelle, namentlich für Bahn (*sonRAIL*), Strasse (*sonROAD*), Luftverkehr (*sonAIR*) und Schiessen (*sonARMS*) zur Verfügung. Die vorliegende Dokumentation beschreibt die allgemeine Schnittstelle. Im Falle von *sonARMS* wurden die Schiesslärm-Emissionsmodelle direkt mit dem Ausbreitungskern kombiniert. Ausserdem weist das *sonARMS*-Modell verschiedene Speziallösungen auf. Für *sonARMS* wurde deshalb eine ergänzende Dokumentation erstellt. *sonARMS* kann auf der Homepage des BAFU gratis bezogen werden. *sonAIR* steht ebenfalls, integriert in eine ESRI-ArcGIS-Umgebung, zur freien Benutzung zur Verfügung.

Dübendorf, den 6. Januar 2026
Projektleiter/Abteilungsleiter:

Abteilung Akustik / Lärmminderung
Gruppenleiter Umweltakustik:

Dr. J. M. Wunderli

Dr. Reto Pieren

Inhaltsverzeichnis

1	Historie	3
2	Das <i>sonX</i> Ausbreitungsmodell	5
2.1	Struktur des <i>sonX</i> Rechenkerns	5
2.2	Basis-Ausbreitungsmodell	5
2.3	Berücksichtigung von Wettereinflüssen	24
2.4	Reflexionen an künstlichen Objekten wie Gebäuden und Schallschirmen	44
2.5	Wald- und Felsreflexionen	55
2.6	Bestimmung der Modellunsicherheit des <i>sonX</i> Ausbreitungsmodells	71
3	Beschleunigungsmassnahmen	72
3.1	Massnahmen zur Beschleunigung des Ausbreitungsmodells	72
3.2	Massnahmen zur Reduktion der Grösse der Resultatdateien	88
4	Kombination mit dem Eisenbahnlärmmodell <i>sonRAIL</i>	91
4.1	Einleitung	91
4.2	Charakterisierung und Einbindung des Emissionsmodells	91
4.3	Spezifische Erweiterungen und Anpassungen des Ausbreitungsmodells	93
5	Kombination mit Schiesslärmmodell <i>sonARMS</i>	107
5.1	Einleitung	107
5.2	Charakterisierung und Einbindung des Emissionsmodells	107
5.3	Spezifische Erweiterungen und Anpassungen des Ausbreitungsmodells	107
6	Kombination mit dem Fluglärmmodell <i>sonAIR</i>	109
6.1	Einleitung	109
6.2	Konzept zur Integration des <i>sonX</i> -Ausbreitungsmodells	110
6.3	Spezifische Erweiterungen und Anpassungen des Ausbreitungsmodells	113
6.4	Anpassungen an In- und Outputs des Ausbreitungsmodells	116
7	Kombination mit dem Strassenlärmmodell <i>sonROAD18</i>	119
7.1	Einleitung	119
7.2	Quellendefinition	119
7.3	Spezifische Erweiterungen und Anpassungen des Ausbreitungsmodells	119
Anhang		124
A.1	Steuerung des Berechnungsablaufes	124
A.2	Einstellungen des Rechenkerns	125
A.3	Input-Daten	130
A.4	Settingsdateien	134
A.5	Resultate der Ausbreitungsrechnung - Schnittstelle zu Emissionsmodellen	144
A.6	Zur Implementation	146

1 Historie

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU wurde in den Jahren 2007 bis 2009 ein Berechnungsmodell für Eisenbahnlärm mit der Bezeichnung *sonRAIL* entwickelt. Die Arbeiten wurden durch ein interdisziplinäres Projektteam umgesetzt, wobei die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa, Abteilung Akustik/Lärmminderung, für das Schallausbreitungsmodell zuständig war. Im Ausbreitungsmodell wurden verschiedene bereits an der Empa vorhandene Komponenten kombiniert und durch weitere Funktionalitäten erweitert. Namentlich entstammt die Direktschallberechnung dem Projekt *sonRoad* aus 2004 und der Ansatz zur Berücksichtigung des Wetters mittels Strahlverfolgung dem ASTRA Forschungsprojekt 2001/053 mit dem Titel 'Strassenlärm in grossen Abständen'. Die Modellentwicklung und -validierungen zum Zeitpunkt des Projektabschlusses ist in einem Abschlussbericht zusammengefasst, welcher auf der *sonRAIL*-Webseite sonrail.empa.ch bezogen werden kann.

Das im Rahmen von *sonRAIL* entwickelte Ausbreitungsmodell mit der Bezeichnung *sonX* ist in seiner Anwendung nicht auf Eisenbahnlärm beschränkt. Es wurden zwar verschiedene Eisenbahnlärm-spezifische Elemente integriert, die Schnittstelle zwischen Emissions- und Ausbreitungsmodell wurde jedoch so gewählt, dass das Ausbreitungsmodell nur auf den allgemeinsten Fall einer ungerichteten Punktquelle ausgelegt werden musste. Seit dem Abschluss des *sonRAIL*-Projektes wurden weitere Projekte und Arbeiten im Zusammenhang mit *sonRAIL* bzw. *sonX* durchgeführt. Im Projekt *sonRAIL-SpeedUp*, welches durch die Technologieförderung des BAFU unterstützt wurde, wurde der Rechenkern 2011 überarbeitet sowie massiv beschleunigt, der Anwendungsbereich auf Strassenlärm ausgedehnt und das Gesamtmodell zu einem kommerziell verwertbaren Produkt weiterentwickelt, welches durch die Firma n-Sphere, ehemals LCC Consulting, vertrieben wird.

Mit *sonARMS* wurde von der Empa ein Modell für die Berechnung von Schiesslärm entwickelt, welches ebenfalls auf *sonX* aufbaut. Im Gegensatz zu den anderen Anwendungen wurden in *sonARMS* die Emissionsmodelle (Mündungsknall, Geschosknall und Detonation) direkt integriert. Ausserdem weist *sonARMS* eine eigene Benutzeroberfläche auf und es wurde eine separate Laufzeitberechnung einzelner Schallpfade implementiert. *sonARMS* wird seit Sommer 2014 vom BAFU als Standardmodell für die Lärmkartierung von zivilem und militärischem Schiesslärm empfohlen und kann auf der Homepage des BAFU bezogen werden.

Ab 2013 wurde an der Empa ein Fluglärm-Berechnungsmodell mit der Bezeichnung *sonAIR* entwickelt, welches ebenfalls auf dem *sonX*-Rechenkern aufbaut. *sonAIR* wurde in Zusammenarbeit mit n-Sphere in einer ESRI-ArcGIS-Umgebung implementiert und wird voraussichtlich 2024/2025 durch das BAFU für die Berechnung von zivilem und militärischem Fluglärm empfohlen werden. *sonAIR* kann über die Firma n-Sphere bezogen werden.

Die Entwicklung der Modelle der *sonX*-Familie erfolgt durch die Empa, Abteilung Akustik/Lärmminderung. Seit dem Projekt *sonRAIL-SpeedUp* wird die Ausprogrammierung vollständig durch Merz Technik umgesetzt. Philipp Merz ist für Modellimplementation und -unterhalt zuständig, die Empa für die akustischen Modelle und für konzeptionelle Fragen.

Über die Jahre wurden umfangreiche Validierungen des Ausbreitungsmodells und der daraus aufbauenden Gesamtmodelle durchgeführt und es wurden laufend Verbesserungen und Weiterentwicklung, vor allem bei *sonARMS* und *sonAIR* umgesetzt, welche anwendungsspezifisch waren und entsprechend nicht bei allen Ausführungen des Ausbreitungsmodells zur Verfügung standen.

In 2022 wurde eine Initiative gestartet, welche zu einer neuerlichen Vereinheitlichung der Anwendungen für Flug, Strasse und Bahn führte, mit einer allgemein gültigen Schnittstelle für alle drei Anwendungen. Einige Speziallösungen (Tunnels, Bahneinschnitte, Linienquellendiskretisierung), welche nur für einzelne Anwendungen entwickelt wurden, wurden für diesen Zweck deaktiviert. *sonARMS*, welches sich stärker von den anderen Anwendungen unterscheidet, wird weiterhin separat weitergeführt.

In dieser Dokumentation, welche laufend aktualisiert wird, wird der aktuelle Stand des *sonX* Ausbreitungsmodells festgehalten. Nicht mehr aktive Elemente, werden aus Gründen der Nachvollziehbarkeit weiter aufgeführt, aber grau dargestellt. Ergänzend werden Grundlagen zur Verfügung gestellt, welche die Verwendung des Rechenkerns dokumentieren und die Kombination mit verschiedenen Ansätzen zur Quellenbeschreibung aufzeigen. Auf die konkreten Umsetzungen für Eisenbahn, Strassen- und Schiesslärm wird soweit eingegangen als dies nicht schon in anderen öffentlich zugänglichen Dokumenten erfolgt ist.

2 Das *sonX* Ausbreitungsmodell

Im vorliegenden Kapitel werden die Algorithmen des *sonX* Schallausbreitungsmodells vorgestellt. Die Gliederung in Unterkapitel orientiert sich dabei am modularen Aufbau des Rechenkerns.

2.1 Struktur des *sonX* Rechenkerns

Der *sonX* Rechenkern ist als reines Ausbreitungsmodell konzipiert, das für eine gegebene Punktquelle und einen Empfangspunkt Ausbreitungsdämpfungen in Form von Terzbandspektralen von 25 Hz bis 10 kHz liefert.

Das Schallausbreitungsmodell ist in vier Module unterteilt, die getrennt voneinander betrieben werden können. Das Berechnungsmodul *BASIC* wird für jede Ausbreitungsrechnung benötigt. In diesem Modul wird die Schallausbreitung zwischen Quelle und Empfänger in einem Vertikalschnitt unter der Annahme einer ungeschichteten Atmosphäre berechnet.

Im zweiten Modul *METEO* werden meteorologische Effekte auf die Schallausbreitung berechnet. Als zusätzliche Eingangsdaten werden dazu vertikale Profile der Windgeschwindigkeit, der Temperatur und der relativen Feuchte benötigt, welche zusätzlich je nach Untergrund variiert werden können. Zum einen wird auf diesem Weg der Wettereinfluss auf die Luftabsorption bestimmt. Zum anderen werden die resultierenden Schallgeschwindigkeitsprofile in einem Schallstrahl-Verfolgungs-Algorithmus eingesetzt, welcher Veränderungen bei den Hinderniswirkungen sowie die Ausbildung von akustischen Schattenzonen ermittelt. Die Pegelabnahme wird dabei aus geometrischen Parametern des Schallstrahles abgeleitet, welcher dem Empfänger am nächsten kommt. Das Modul *METEO* liefert als Resultat eine Verfeinerung der Direktschallberechnung des Moduls *BASIC* für eine oder mehrere Meteobedingungen mit inhomogener Atmosphäre.

Das dritte und vierte Modul behandeln Pegelerhöhungen als Folge von Reflexionen. In Modul *REFLECT* werden Reflexionen an Gebäuden und Schallschirmen bestimmt, wobei zwei separate Modelle, eines für kohärente, spiegelnde Reflexionen und eines für inkohärente, streuende Reflexionen zur Anwendung kommen. Im Modul *FOREST* werden diffuse Reflexionen an Wäldern und Felswänden berechnet.

2.2 Basis-Ausbreitungsmodell

2.2.1 Übersicht

Das Basis-Ausbreitungsmodell ist frequenzabhängig in Terzen von 25 Hz bis 10 kHz formuliert. Die Berechnung erfolgt in der 2D-Geometrie des vertikalen Schnitts durch Quelle und Empfänger, optional ergänzt um seitliche Umwege um allfällige Hindernisse. Die Luftdämpfung wird gemäss ISO 9613-1[1] berechnet. Das Bodeneffekt-Modell basiert auf einem Ansatz für Kugelwellenreflexionen an ebenem, homogenem Terrain. Mittels einer Fresnelzonen-Betrachtung

wird das Modell für unebenes Gelände und wechselnde Bodeneigenschaften erweitert. Es berücksichtigt zusätzlich Kohärenzverluste zwischen Direktschall und Reflexion in Abhängigkeit der Frequenz und der Ausbreitungsdistanz. Für die Berechnung der Hinderniswirkung kann entweder der Ansatz gemäss ISO 9613-2 [2] oder ein von A.D. Pierce [3] entwickeltes Verfahren verwendet werden. Ebenfalls nach ISO 9613-2 wird eine allfällige Zusatzdämpfung für Vegetation (foliage attenuation) berechnet.

In Anlehnung an die Nomenklatur in ISO 9613-2 lässt sich der von einer Punktquelle verursachte Terzband-Schalldruckpegel L_f am Immissionsort angeben als

$$L_f = L_{W,f} - A_f \quad (2.1)$$

mit

$L_{W,f}$	Schallleistungspegel im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
A_f	Ausbreitungsdämpfung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]

Die Ausbreitungsdämpfung $A_{Basic,f}$ lässt sich in die folgenden, voneinander unabhängigen Aspekte aufgliedern

$$A_{Basic,f} = A_{div,f} + A_{atm,f} + A_{gr/bar,f} + A_{fol,f} \quad (2.2)$$

mit

$A_{div,f}$	Geometrische Verdünnung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{atm,f}$	Luftdämpfung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{gr/bar,f}$	Bodeneffekt und Hinderniswirkung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{fol,f}$	zusätzliche Dämpfung durch dichten Bewuchs im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]

In der Berechnung einiger Ausbreitungsdämpfungsterme taucht die Schallgeschwindigkeit c auf. Im Modul BASIC wird $c = 340$ m/s verwendet.

2.2.2 Geometrische Verdünnung

Die geometrische Verdünnung beschreibt die Schalldruckabnahme einer Punktquelle mit der Distanz aufgrund der Verteilung der Schallleistung auf eine Kugeloberfläche mit zunehmendem Radius. Die geometrische Verdünnung ist frequenzunabhängig und lässt sich angeben zu:

$$A_{div,f} = 10 \log \left(\frac{4\pi r^2}{r_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) + 11 \quad [\text{dB}] \quad (2.3)$$

mit

r	Distanz Quelle - Empfänger [m]
r_0	Referenzabstand = 1 m

2.2.3 Luftdämpfung

Schall erfährt beim Durchgang durch die Luft eine Abschwächung als Folge von verschiedenen Absorptionsmechanismen. Diese sogenannte Luftdämpfung $A_{atm,f}$ ist abhängig vom Zustand der Luft (wobei vor allem die Temperatur und die relative Feuchte von Bedeutung sind), von der Frequenz und von der Länge des Wegs, den der Schall in der Luft zurücklegt. Es gilt:

$$A_{\text{atm},f} = \alpha_f \frac{r}{1000} \quad [\text{dB}] \quad (2.4)$$

mit

α_f frequenzabhängiger atmosphärischer Absorptionskoeffizient für die Terz mit Mittenfrequenz f [dB/km]
 r Distanz Quelle - Empfänger [m]

Die ISO Norm 9613-1 spezifiziert den atmosphärischen Absorptionskoeffizienten α in Abhängigkeit der Frequenz, der Luftfeuchte und der Temperatur. Die Einstellungen für Temperatur und Feuchte, welche im BASIC-Modul verwendet werden, sind als Modellparameter einstellbar (ein Referenz-Parametersatz ist im Anhang ab Seite 124 aufgeführt). Als Standardeinstellungen werden die Jahresmittelwerte für den Schweizer Siedlungsraum von +8°C resp. einer relative Feuchte von 76% empfohlen, welche basierend auf langjährigen klimatologischen Auswertungen bestimmt wurden. Die Tabelle 2.1 zeigt für jede Terz die entsprechenden atmosphärischen Absorptionskoeffizienten.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.5	4.7	6.8
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
9.7	14.3	21.6	33.6	50.9	77.9	119.8	176.2

Tabelle 2.1: Atmosphärischer Absorptionskoeffizient α_f in dB/km für eine Temperatur von 8°C und eine relative Luftfeuchte von 76% in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz.

Die in Tabelle 2.1 ausgewiesenen Absorptionskoeffizienten gelten für einen Reinton der entsprechenden Frequenz. Wenn dieser Wert für das ganze zugehörige Terzband, d.h. für eine breitbandig abstrahlende Schallquelle, verwendet wird, bleibt der Fehler < 0.5 dB unter der Bedingung (2.5) [1].

$$\frac{r}{1000} \left(\frac{f^2}{1000^2} \right) < 6 \quad (2.5)$$

mit

r Distanz Quelle - Empfänger [m]
 f Terzbandmittenfrequenz [Hz]

Für die 4000 Hz Terz als Beispiel, ergibt die Bedingung (2.5) eine maximale Distanz Quelle-Empfänger von knapp 400 m. Für deutlich grössere Distanzen kann eine alternative Berechnungsmethode der Luftdämpfung eingesetzt werden, welche ausgehend von der obigen Berechnung eine nachträgliche Korrektur für Breitbandrauschen einführt. Dieser Ansatz gemäss Gleichung 2.6, welcher im Harmonoise Referenz Modell dokumentiert wurde [4], ergibt im Vergleich zu einer Berechnung ausgehend von Reintönen etwas tiefere Dämpfungen. Bei einer Luftdämpfung A_{atm} von 10 dB für die Terzbandmittenfrequenz resultiert eine Reduktion um

0.1 dB, bei $A_{atm} = 20$ dB ergibt sich 0.6 dB und bei $A_{atm} = 30$ dB bewirkt die Korrektur eine Reduktion um 1.5 dB. Die Korrektur kann in der Parameterdatei über den Schalter 'AatmCorr-Broadband' aktiviert werden¹.

$$A_{air} = \alpha r (1.0053255 - 0.00122622\alpha r)^{1.6} \quad (2.6)$$

mit

α Luftdämpfung pro Meter, berechnet für Terzbandmittenfrequenzen [dB/m]
 r Ausbreitungsdistanz [m]

2.2.4 Bodeneffekt und Hinderniswirkung

Bodeneffekt und Hinderniswirkung werden aufgrund ihrer Wechselwirkung nicht als separate Phänomene betrachtet, sondern in Kombination berechnet und in Form des Dämpfungsterms $A_{gr/bar}$ ausgewiesen. Ausgehend von einem Höhenmodell, welches als Raster vorliegt, sowie einer Liste mit als Polygone definierten, vertikalen Wänden, werden zwischen Quelle und Empfänger Terrainschnitte erstellt, welche Bodensegmente mit zusätzlichen Hinderniskanten von Wänden enthalten. Überhängende Strukturen und vertikal geneigte Flächen können dabei nicht definiert werden. Allerdings ist es möglich, Hindernisse zu verwenden, welche keinen Bodenabschluss haben, sprich welche über eine Öffnung verfügen (siehe dazu die Ausführungen auf Seite 20).

Allgemeines

In praktisch allen Situationen existiert neben dem Direktschall von der Quelle zum Empfänger zusätzlich mindestens ein Schallausbreitungspfad via Bodenreflexion. In Hangsituationen treten oft zwei oder mehr Bodenreflexionspfade auf. Bei kleinen Abständen (typ. kleiner als 200 m), kleinen Quellen- und Empfängerhöhen, geringer Bodenrauhigkeit und tiefen Frequenzen sind die Pfade als kohärent zu betrachten, d.h. ihre Beiträge sind am Empfangspunkt phasenrichtig aufzusummieren. Je nach Phasenlage führt diese Überlagerung zu einer verstärkenden oder abschwächenden Wirkung.

Wenn einer der Schallpfade - also der Direktschall und/oder eine der Bodenreflexionen durch ein Hindernis unterbrochen wird, ergibt sich eine Abschwächung für den entsprechenden Pfad. Die Abschwächung durch das Hindernis ist im wesentlichen abhängig von der in Wellenlängen gemessenen Weglängendifferenz des Umwegs via Hinderniskante im Vergleich zur direkten Verbindung durch das Hindernis hindurch. Im Falle von Hindernissen entstehen durch die Einführung der Hinderniskantenpunkte als Sekundärquellen zusätzliche Schallpfade via Bodenreflexionen, siehe Abbildung 2.1. Der Pfad Quelle-Boden-Hinderniskante(n)-Boden-Empfänger wird optional, in Abhängigkeit des Parameters 'AdditionalGroundReflections' miteinbezogen. Für bodennahe Quellen und Empfänger wird jedoch empfohlen, auch diese Doppelreflexion am Untergrund zu berücksichtigen. Reflexionspfade mit Bodenkontakt zwischen Hindernissen, welche im Falle von Mehrfachhindernissen auftreten, können mit *sonX* nicht berechnet werden.

¹Die Korrektur der Luftdämpfung gemäss [4] fällt umso grösser aus, je grösser die für Reintöne berechnete Luftdämpfung ist. Ab einer Luftdämpfung von ca. 250 dB wird die Korrektur jedoch so gross, dass die resultierende Luftdämpfung mit zunehmendem Abstand kleiner wird. Dieses Fehlverhalten wurde dadurch korrigiert, dass bei der Implementation von Gleichung 2.6 αr in der Klammer auf 200 dB limitiert wird.

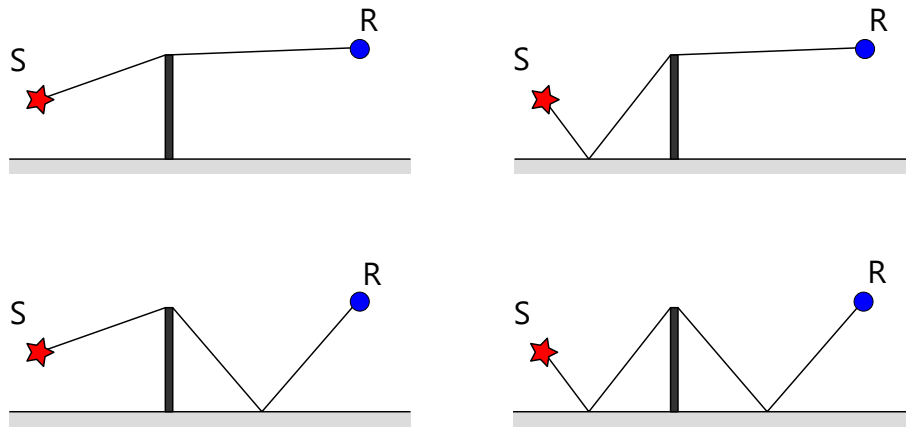


Abbildung 2.1: Ein Hindernis führt zu drei zusätzlichen Schallpfaden mit Bodenreflexionen auf der Quellen-, auf der Empfängerseite oder auf beiden Seiten des Hindernisses.

Der frequenzabhängige Dämpfungsterm $A_{gr/bar,f}$ ergibt sich aus der Differenz des Pegels des ungehinderten Direktschalls und dem Pegel, der sich aus der Überlagerung des Direktschalls und der oder den Bodenreflexionen, jeweils unter Berücksichtigung allfälliger Hinderniswirkungen, berechnet.

Zur Bestimmung von $A_{gr/bar,f}$ sind zuerst die gültigen Schallpfade zu ermitteln. Für jeden der Pfade wird die allfällige Hinderniswirkung nach ISO 9613-2 ($C2 = 40$) oder mit der analytischen Lösung von Pierce [3] bestimmt. Die Wahl des Algorithmus erfolgt über den Parameter *BarrierUsePierce* (siehe Anhang A.2). Für die am Boden reflektierten Pfade wird zusätzlich eine Amplituden- und Phasenkorrektur entsprechend dem Kugelwellenreflexionskoeffizienten in Abhängigkeit der Untergrundeigenschaften vorgenommen, wobei mittels einer Fresnelzonenbetrachtung eine Abschwächung der Reflexion bei ungenügend grosser Bodensegment-Fläche bestimmt wird. Unter Berücksichtigung der Laufzeit werden schliesslich alle Pfade am Empfangspunkt aufsummiert und mit dem ungehinderten Direktschall verglichen.

Ausbreitungsrechnung für die einzelnen Schallpfade

Wenn die relevanten Schallpfade ermittelt sind, wird für jeden Pfad der Schalldruck am Immissionspunkt nach Amplitude und Phase bestimmt, wobei eine hier festgelegte Normierung der Quellenstärke entsprechend einem Schalldruck von 1 Pa in 1 m Abstand verwendet wird. Als Referenzgrösse wird der Schalldruck $p_{dir,ref}(f)$ am Empfänger unter Vernachlässigung allfälliger Hinderniswirkungen benötigt.

$$p_{dir,ref}(f) = \frac{1}{r} e^{jkr} \quad (2.7)$$

mit

r	Abstand Quelle-Empfänger durch allfällige Hindernisse hindurch [m]
k	Wellenzahl = $\frac{2\pi}{\lambda}$ [1/m]
λ	Wellenlänge = $\frac{c}{f}$ [m]
c	Schallgeschwindigkeit = 340 [m/s]
f	Frequenz [Hz]
j	imaginäre Einheit, $j^2 \equiv -1$

Der effektive Direktschall $\underline{p}_{\text{dir}}(f)$ hat eine allfällige Hinderniswirkung zu berücksichtigen und ergibt sich zu

$$\underline{p}_{\text{dir}}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} \frac{1}{r} e^{jkr'} \quad (2.8)$$

mit

$D_z(f)$ allfällige Hinderniswirkung gemäss Gleichung 2.9 bzw. 2.10 in Funktion der Frequenz f [dB]
 r' Abstand Quelle-Empfänger um allfällige Hindernisse herum [m]

Algorithmen zur Berechnung der Hinderniswirkung

Zur Berechnung der Hinderniswirkung stehen zwei Methoden zur Verfügung, zum einen der Ansatz aus der ISO 9613-2 für den Fall der separaten Berücksichtigung der Bodenreflexion durch Spiegelquellen ($C_2 = 40$) gemäss Gleichung 2.9 und zum anderen die analytische Lösung von Pierce [3] (Gleichung 2.10).

Hinderniswirkung nach ISO 9613-2 (Maekawa)

$$D_z(f) = 10 \log \left(3 + \frac{40}{\lambda} C_3 z K_{\text{met}} \right) \geq 0 \quad (2.9)$$

mit

C_3 = 1 für die Beugung am Einfachhindernis, bzw. $= \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}$ 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. Da dieser Effekt in *sonX* separat berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.3) ist $K_{\text{met}} = 1.0$.

In Situationen, in welchen die Sichtlinie nicht unterbrochen ist, wird der kürzeste Umweg über das Terrain gesucht und z mit negativem Vorzeichen in Formel 2.9 eingesetzt. Dabei muss kontrolliert werden, dass die Klammer nicht negativ wird. In diesen Fällen wird D_z auf 0 gesetzt. Für weitere Details wird auf die ISO 9613-2 verwiesen.

Hinderniswirkung nach Pierce

$$D_z(f) = -10 \log \left| H - \frac{e^{j\pi/4}}{\sqrt{2}} A_D(X) e^{j(\pi/2)X^2} \right|^2 \quad (2.10)$$

mit

H Heaviside Funktion, wobei $H = 0$ wenn die Sichtlinie unterbrochen ist und $H = 1$ sonst
 $A_D(X)$ Beugungsintegral wobei $A_D(X) = f(X) - jg(X)$

$f(X)$	Realteil des Beugungsintegrals mit $f(X) \approx (1.0 + 0.926X)/(2.0 + 1.792X + 3.104X^2)$
$g(X)$	Imaginärteil des Beugungsintegrals mit $g(X) \approx (1.0)/(2.0 + 4.142X + 3.492X^2 + 6.67X^3)$
X	$= \sqrt{4f(L - R)/340.0}$
L	Pfadlänge um das Hindernis herum [m]
R	Pfadlänge durch das Hindernis hindurch [m]

Der Ansatz nach ISO 9613-2 wurde nur für Einfach- und Doppelhindernisse definiert. Um den allgemeinen Fall mit einer beliebigen Zahl an Beugungskanten abzubilden, wurde die Definition von e geringfügig angepasst.

Es wurde nur der Algorithmus nach Pierce für Einfachhindernisse implementiert. Bei Mehrfachhindernissen wird deshalb der Algorithmus nach Pierce nur auf das dominante Einzelhindernis angewandt. Gleichzeitig wird eine Berechnung nach Maekawa für das Mehrfachhindernis durchgeführt. Als Resultat wird jeweils die höhere Dämpfung übernommen.

Die Berechnungsalgorithmen nach Maekawa und Pierce berücksichtigen die Beugung an Kanten. Turbulenzbedingte Einstreuungen, welche die maximale Hinderniswirkung limitieren, werden jedoch nicht abgebildet. Aus diesem Grund werden zwei Modellparameter *SingleBarrierMaxAtt* und *MultiBarrierMaxAtt* eingeführt, mit welchen die Hinderniswirkung $D_z(f)$ für Ein- und Mehrfachhindernisse begrenzt werden kann. Die Limitierung greift dabei vor der Kombination der Resultate mit dem Bodeneffekt.

Als Standardeinstellung wird für beide Parameter 25 dB empfohlen. Für Mehrfachhindernisse entspricht diese Limite den Vorgaben der ISO 9613-2. Für Einfachhindernisse empfiehlt ISO 9613-2 jedoch lediglich 20 dB. Da im *son-X*-Ausbreitungsmodell meteorologische Effekte und Reflexionen explizit berücksichtigt werden, wird diese Begrenzung jedoch als zu konservativ angesehen.

Hinweis:

Der Ansatz nach Pierce liefert systematisch höhere Hinderniswirkungen als ISO 9613-2. Aufgrund von Vergleichen mit Messungen und theoretischen Überlegungen wird Pierce als Standardmethode empfohlen.

Hinderniswirkung auch in Situationen ohne Unterbrechung der Sichtlinie

Beide Ansätze, sowohl nach Maekawa als auch nach Pierce, können auch eine Abschirmwirkung ausweisen, wenn die Sichtlinie knapp nicht unterbrochen wird. Die Idee dabei ist, bei Über- bzw. Unterschreiten der Sichtlinie eine sprunghafte Veränderung der Immissionspegel zu vermeiden. Bei Maekawa bzw. der ISO 9613-2 wird dies durch Einführung eines negativen Umweges z in Formel 2.9 erreicht. Bei der Lösung von Pierce gemäss Formel 2.10 sind keine Anpassungen notwendig, da der Ansatz auf einer analytischen Lösung einer wellentheoretischen Betrachtung der Beugung an einer Hinderniskante basiert und entsprechend einen physikalisch korrekten, nahtlosen Übergang garantiert. Diese Funktionalität wird durch den Schalter *NegZobstacles* aktiviert.

Ist *NegZobstacles* aktiviert, muss im Falle einer freien Sichtverbindung zusätzlich die massgebliche Beugungskante identifiziert werden, welche im Terrainschnitt den kleinsten Umweg im Vergleich zur Direktverbindung ergibt. Dazu werden in *sonX* in einem ersten Schritt sämtliche Segmentpunkte gesucht, welche eine vorgegebene minimale Winkeländerung relativ zum Nachbarsegment übersteigen. Im Bereich unterhalb von Quelle bzw. Empfänger werden dabei

Segmentpunkte von der Suche ausgeschlossen, bei welchen sich der Terrainverlauf von der Direktverbindung wegbewegt. Für die so identifizierten Kantenpunkte wird in einem zweiten Schritt der Weg Quelle-Kante-Empfänger bestimmt. Für die Berechnung der Hinderniswirkung wird anschliessend die Kante mit dem kleinsten Umweg verwendet.

Die Setzung der minimalen Winkeländerung erfolgt mit dem Parameter *DeltaSlope*. *DeltaSlope* ist als relative Steigungsabnahme definiert; ein Wert von 0.5 entspricht einer konkaven Winkeländerung von 26.6°. Um die Zahl der zusätzlichen Umwegberechnungen und damit den Rechenaufwand tief zu halten, sollte *DeltaSlope* nicht zu tief gesetzt werden. Umgekehrt werden bei einer zu hohen Setzung kleinere Steigungsänderungen, wie sie z.B. bei einem sanften Hügelverlauf vorkommen, nicht als massgebliche Beugungskante identifizieren. Als Standardsetzung wird ein Wert von *DeltaSlope* = 0.1, entsprechend einer konkaven Winkeländerung von 5.7°, empfohlen. Falls keine Beugungskante identifiziert wird, erfolgt die Hinderniswirkungsrechnung wie mit deaktiviertem Schalter *NegZobstacles*, mit entsprechenden Resultaten.

Berechnung der Bodenreflexion

Für Schallpfade mit einer Bodenreflexion wird eine Ausbreitungsrechnung mit gespiegelten Quellen- bzw. Empfängerpositionen durchgeführt. In Ergänzung zu einer allfälligen Hinderniswirkung ist der frequenzabhängige Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ am Boden, sowie eine mögliche Abschwächung bei ungenügender Reflektorfläche zu berücksichtigen. Ist *NegZobstacles* aktiviert, so wird auch für bodenreflektierte Schallpfade bei freier Sicht eine Hinderniswirkung ausgewiesen, sofern eine massgebliche Beugungskante gefunden wurde.

Der Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ bestimmt sich aus der wellentheoretischen Lösung für eine Punktquelle über einer Impedanzebene [5]. Es wird ein lokal reagierender Boden vorausgesetzt, d.h. als Randbedingung ist zu erfüllen, dass das Verhältnis des Schalldrucks zur Vertikalkomponenten der Schallschnelle gleich der Bodenimpedanz ist. Die Berechnung basiert auf folgenden Grössen (siehe auch Abbildung 2.2):

d	horizontaler Abstand Quelle - Empfänger [m]
h_s	Quellenhöhe über Boden [m]
h_r	Empfängerhöhe über Boden [m]
$Z(f)$	auf ρc normierte Impedanz des Bodens
r_1	Abstand Quelle - Empfänger [m]
r_2	Abstand Quelle - Reflexionspunkt - Empfänger [m]
λ	Wellenlänge [m]
k	Wellenzahl = $\frac{2\pi}{\lambda}$ [1/m]
ψ	Reflexionswinkel

Der Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ leitet sich aus dem Reflexionskoeffizienten $r_p(f)$ der ebenen Welle gemäss Gleichung 2.11 ab. Man beachte, dass die komplexen Variablen sowohl eine Amplituden- als auch eine Phaseninformation beinhalten.

$$Q(f) = R_p(f) + (1 - R_p(f))F(w) \quad (2.11)$$

mit

$$R_p(f) = \frac{\sin(\psi) - \frac{1}{Z(f)}}{\sin(\psi) + \frac{1}{Z(f)}}$$

$$w = \frac{1+j}{2} \sqrt{k R_2} \left(\sin(\psi) + \frac{1}{Z(f)} \right)$$

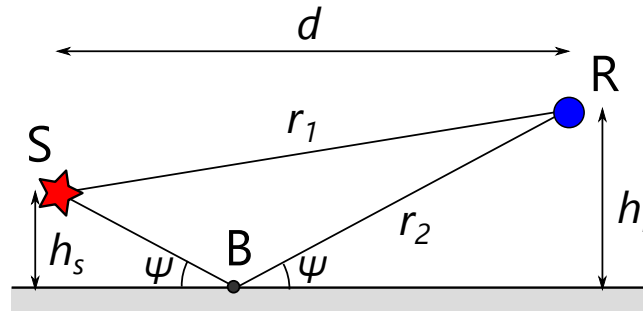


Abbildung 2.2: Situation zur Schallausbreitung einer Punktquelle über homogenem Boden der Impedanz $Z(f)$ mit der Quelle S, dem Reflexionspunkt B und dem Empfänger R.

Der Faktor $F(w)$ aus Gleichung 2.11 kann für streifende Schallausbreitung, d.h. $d \gg h_s + h_r$, approximiert werden zu [6].

$$F(w) \approx 1 + j\sqrt{\pi}we^{-w^2}\text{erfc}(-jw) = 1 + j\sqrt{\pi}w\text{wofz}(w) \quad (2.12)$$

In Gleichung 2.12 bezeichnet $\text{erfc}(-jw)$ die komplexe Errorfunktion [7]. Für die Funktion $\text{wofz}(w) = e^{-w^2}\text{erfc}(-jw)$ existiert ein sehr effizienter Algorithmus zur numerischen Auswertung [8].

Die Impedanz Z des Bodens ist frequenzabhängig. Zur Charakterisierung des Bodens mit einem Einzahlwert wird in der Regel der Strömungswiderstand σ (sigma) verwendet. Mit dem empirisch gefundenen Modell von Delany u. Bazley [9] gemäss Gleichung 2.13 kann daraus für jede Frequenz f die auf ρc normierte Impedanz $Z(f)$ bestimmt werden. Man beachte, dass das Vorzeichen des Imaginärteils der Impedanz in Gleichung 2.13 von der Konvention der Zeitabhängigkeit in der komplexen Darstellung abhängt. Hier wird für diesen Schwingungsterm $e^{-j\omega t}$ angenommen [10].

$$Z(f) = 1.0 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.75} + j11.9 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.73} \quad (2.13)$$

mit

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

Es wird angenommen, die Reflexion am Boden beanspruche ein Gebiet, das der Grösse einer $\lambda/4$ -Fresnelzone entspreche. Dieses Gebiet ist durch jene Bodenpunkte gegeben, für die die Summe der beiden Abstände Quelle-Bodenpunkt und Bodenpunkt-Empfänger höchstens $\lambda/4$ grösser ist als die Summe der Abstände Quelle-Reflexionspunkt und Reflexionspunkt-Empfänger. Wenn dieses Gebiet nicht zur Verfügung steht, reduziert sich der reflektierte Anteil entsprechend, wobei die Proportionalität zwischen Schalldruck und Fläche besteht [11],[12]. Da generell nur im Schnitt gearbeitet wird, reduziert sich die Untersuchung der Fresnelzone auf eine Strecke. Diese Vereinfachung entspricht der Annahme, dass die an sich ellipsenförmige Fresnelzone durch ein Rechteck approximiert wird. Der frequenzabhängige Fresnelzonenfaktor $\Phi(f)$ für eine Reflexion an einem Bodensegment ergibt sich aus Gleichung 2.14.

$$\Phi(f) = \frac{l_s(f)}{l_F(f)} \quad (2.14)$$

mit

$l_F(f)$ Länge der $\lambda/4$ -Fresnelzone

$l_s(f)$ Länge des Segmentsabschnitts, der innerhalb der $\lambda/4$ -Fresnelzone liegt.

Die Länge der $\lambda/4$ -Fresnelzone kann mittels Konstruktion des Schnitts einer Ellipse mit der Segmentgeraden gefunden werden. Die Brennpunkte der Ellipse sind durch den Quellen- und Empfängerpunkt, bzw. durch die beiden Pfaddeckpunkte unmittelbar vor und nach dem Reflexionspunkt gegeben. Die Ellipse beschreibt jenen geometrischen Ort für den gilt, dass die Summe der Abstände zum ersten und zweiten Brennpunkt konstant ist. Diese Summe der Abstände wird nun um $\lambda/4$ grösser als die Summe der Abstände des Reflexionspunkts zum Quellen- und Empfängerpunkt gewählt. Der Bereich, der zur Reflexion beiträgt, liegt zum einen innerhalb der Ellipse und zum anderen auf der Segmentgeraden. Der Abstand zwischen den beiden Schnittpunkten entspricht der Länge der $\lambda/4$ -Fresnelzone.

Es wird vorausgesetzt, dass die beiden Ellipsenbrennpunkte durch $F_1 = (x_{F_1}, z_{F_1})$ und $F_2 = (x_{F_2}, z_{F_2})$, der Reflexionspunkt durch $R = (x_R, z_R)$ gegeben seien. Dann gelten folgende Beziehungen für die Ellipsenhalbachsen a, b und die lineare Exzentrizität c :

$$a = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(x_{F_1} - x_R)^2 + (z_{F_1} - z_R)^2} + \sqrt{(x_{F_2} - x_R)^2 + (z_{F_2} - z_R)^2} + \frac{\lambda}{4} \right) \quad (2.15)$$

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{(x_{F_1} - x_{F_2})^2 + (z_{F_1} - z_{F_2})^2} \quad (2.16)$$

$$b = \sqrt{a^2 - c^2} \quad (2.17)$$

Die Berechnung der Schnittpunkte der Ellipse mit der Segmentgeraden wird relativ einfach, wenn durch zwei Koordinatentransformationen der Ellipsenmittelpunkt in den Koordinatenursprung verschoben und die grosse Ellipsenhalbachse auf die x -Achse gedreht wird.

Die Abbildung 2.3 zeigt exemplarisch die konstruierte Fresnelzonen-Ellipse einer Bodenreflexion.

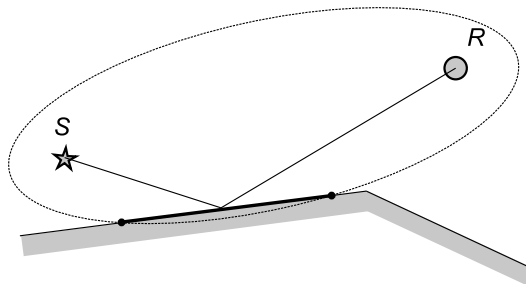


Abbildung 2.3: Beispiel einer Ausbreitungssituation mit der Fresnelzonen-Ellipse für eine Bodenreflexion. Die markierten Schnittpunkte mit dem Terrainsegment bezeichnen den Abschnitt der zur Reflexion beiträgt. Die Grösse der Ellipse ist frequenzabhängig.

Schliesslich ergibt sich der Schalldruck, der durch einen am Boden reflektierten Schallpfad am Empfänger hervorgerufen wird in komplexer Schreibweise zu:

$$\underline{p}_{\text{gr}}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} \frac{Q(f)\Phi(f)}{r} e^{jkr'} \quad (2.18)$$

mit

$D_z(f)$	allfällige Hinderniswirkung für den gespiegelten Pfad [dB]
$Q(f)$	Kugelwellenreflexionskoeffizient
$\Phi(f)$	Fresnelzonenfaktor
r	Länge des Pfads in der Spiegelform durch allfällige Hindernisse hindurch [m]
r'	Länge des Pfads in der Spiegelform um allfällige Hindernisse herum [m]

Die Beiträge der einzelnen Schallpfade lassen sich jetzt mit Gleichung 2.19 zum Term $A_{\text{gr}/\text{bar}}(f)$ zur Berücksichtigung des Bodeneffekts und der Hinderniswirkung verrechnen, wobei die Summierung über alle gültigen Pfade zu erfolgen hat.

$$A_{\text{gr}/\text{bar}}(f) = 10 \log \left(\frac{\left| \underline{p}_{\text{dir,ref}}(f) \right|^2}{K^2 \left| \underline{p}_{\text{dir}}(f) + \sum_{i'} \underline{p}_{\text{gr}}(f) \right|^2 + (1 - K^2) \left(\left| \underline{p}_{\text{dir}}(f) \right|^2 + \sum_{i'} \left| \underline{p}_{\text{gr}}(f) \right|^2 \right)} \right) \quad (2.19)$$

mit

$\underline{p}_{\text{dir,ref}}(f)$	Referenzschalldruck nach Gleichung 2.7.
$\underline{p}_{\text{dir}}(f)$	effektiver Direktschalldruck nach Gleichung 2.8.
$\underline{p}_{\text{gr}}(f)$	Schalldruck am Empfänger für einen Bodenreflexionspfad nach Gleichung 2.18.
K	Kohärenzfaktor nach Gleichung 2.20.
$ \dots $	Betrag der entsprechenden komplexen Grössen
$\sum_{i'}$	Summe über alle gültigen Bodenreflexionen

Grundsätzlich werden in Gleichung 2.19 der Direktschall und die Bodenreflexionen phasenempfindlich aufsummiert. Die streng phasenempfindliche Addition ist nur bei kleinen Abständen, kleinen Weglängenunterschieden und tiefen Frequenzen gültig. Inhomogenitäten in der Luft sowie Unebenheiten am Boden reduzieren die Kohärenz zwischen den einzelnen Beiträgen. Dieser Umstand wird hier durch einen Kohärenzfaktor K berücksichtigt. Ein Wert $K = 0$ bedeutet verschwindende Kohärenz, d.h. die Addition der Anteile erfolgt energetisch. Ein Wert $K = 1$ steht für vollständige Kohärenz, d.h. phasensensitive Addition. Die Schätzung von K ist schwierig und mit einer beträchtlichen Unsicherheit verbunden. Es lässt sich vermuten, dass K von der Länge der Schallwege, der örtlichen Trennung von Direktschall und Bodenreflexion, von der Bodenbeschaffenheit, von der Frequenz und vom Zustand der Atmosphäre (Temperaturschichtung, Stärke der Konvektion, Wind, ...) abhängt. Auch die aktuellste Theorie zum turbulenzbedingten Kohärenzverlust im Bodeneffekt besagt eine $e^{-\gamma f^2 r}$ -Abhängigkeit des Kohärenzfaktors [13, 14]. Vereinfachend wird hier für die Bestimmung von K die Gleichung 2.20 angesetzt. Die Frequenz f wird in der Bestimmungsgleichung für K nicht linear sondern im Quadrat angenommen, da die Frequenzabhängigkeit der Kohärenz von zwei Aspekten abhängt. Dabei wird von der Vorstellung ausgegangen, dass sowohl örtlich als auch zeitlich eine zufällige Streuung der Laufzeiten auftritt. Zum einen ist hinsichtlich der Auswirkungen auf die

Phase die Laufzeitstreuung in Wellenlängen zu messen. Zum anderen ergibt sich der Schalldruck, der durch einen Schallpfad hervorgerufen wird, aus der Integration über ein begrenztes räumliches Gebiet. Dadurch erfolgt eine gewisse Ausmittelung der Laufzeitstreuungs-Effekte. Der Grad der Ausmittelung kann über eine Fresnelzonenbetrachtung abgeschätzt werden, wobei der Flächeninhalt der ersten Fresnelzone im wesentlichen proportional zur Wellenlänge ist. Der Einfluss der örtlichen Trennung von Direktschall und Bodenreflexion wird ignoriert. Die Bodeneffektberechnung geht von der Annahme einer Punktquelle aus. Bei ausgedehnten Quellen kommt es zu einem zusätzlichen Kohärenzverlust, weshalb im Rahmen der Entwicklung von *sonAIR* ein zusätzlicher Parameter zur Berücksichtigung der Quellendimension eingeführt wurde (für Details siehe Abschnitt 6.3).

$$K = e^{-(\gamma_0 + \gamma_1 f^2 r'_{dir} + \gamma_2 f^2 d_s)} \quad (2.20)$$

mit

γ_0	empirischer Parameter = 9.0×10^{-3}
γ_1	empirischer Parameter = $1.0 \times 10^{-10} [s^2/m]$
γ_2	empirischer Parameter = $2.0 \times 10^{-9} [s^2/m]$
f	Frequenz [Hz]
r'_{dir}	Länge des Direktschallpfads, um allfällige Hindernisse herum [m].
d_s	Abmessung der Quelle [m].

Hinweis:

Durch Bildung der inkohärenten Summe in Gleichung 2.19 über die Betragsquadrate der Reflexionspfade wird der Bodeneffekt von der Segmentierung des Terrainschnittes abhängig. Dieser Effekt manifestiert sich nur bei grossen Abständen und hohen Frequenzen. Für die Anpassung der empirischen Parameter γ_0 und γ wurde von einer Segmentierung von 5 m ausgegangen. Tests haben ergeben, dass die Abweichungen für Segmentierungen zwischen 2 m und 25 m gering bleiben.

Der Bodeneffekt und die Hinderniswirkung sind stark frequenzabhängig. Ein jeweils für eine Terz stehender Term $A_{gr/bar,j}$ kann nicht nur anhand einer einzigen Frequenz bestimmt werden, sondern muss aus einer Mittelung über das ganze Terzband gewonnen werden. Für diese Mittelung wird ein Terzband durch neun geometrisch verteilte Frequenzen repräsentiert. Für die Terzen von 50 bis 10'000 Hz werden folgende Stützfrequenzen verwendet:

$$f_i = 44.76510929 \times 2^{\frac{i}{27}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.21)$$

wobei i die Werte 0,1,2,...,215 annimmt. Der Terzwert $A_{gr/bar,j}$ wird dann aus dem energetischen Mittelwert für die 9 im Terzband liegenden Frequenzen gewonnen:

$$A_{gr/bar,j} = -10 \log \left(\frac{1}{9} \sum_{i=9j}^{9j+8} 10^{-0.1 A_{gr/bar}(f_i)} \right) \quad (2.22)$$

wobei j der Terznummer entspricht und die Werte 0,1,2,...,23 annimmt. Die zu j gehörige Terzfrequenz ergibt sich zu $f_j = 44.76510929 \times 2^{\frac{9j+4}{27}} \text{ Hz}$.

Terrainoptimierung

Wie in Abbildung 2.4 dargestellt, basiert die Berechnung der Bodenreflexion auf einem Terrainschnitt, der aus stückweise geraden Segmenten besteht. (In Realität reicht der Geländeschnitt weiter als die Quellen und Empfängerposition). Die Anzahl Segmente hat dabei einen

bedeutenden Einfluss auf die Rechenzeiten. Es besteht deshalb ein Interesse, weitgehend eben verlaufende Geländesegmente zusammenzufassen. Zu diesem Zweck wird ein Verfahren zur Reduktion der Anzahl Terrainsegmente eingesetzt, welches auf dem Prinzip der maximalen Abweichung basiert. Das Verfahren wurde bereits bei anderen Berechnungsmodellen eingesetzt, z.B. beim Harmonoise-Engineering-Modell [15].

In einem ersten Schritt wird zwischen dem Start- und Endpunkt des Geländeschnittes der Punkt mit der maximalen Abweichung von der direkten Verbindung gesucht, wie in Abbildung 2.4 dargestellt. Für diesen Punkt P wird das Kriterium gemäss Gleichung 2.23 kontrolliert, welches darauf ausgerichtet ist, massgebliche Hinderniskanten zu identifizieren. Wird es erfüllt, so wird der Punkt P als optimierter Segmentendpunkt übernommen. Im nächsten Schritt wird für die Segmente $\overline{P_1P}$ und $\overline{P_2P}$ im gleichen Sinn verfahren. Dieser Vorgang wird iterativ so lange wiederholt, bis die Regel 2.23 nicht mehr erfüllt wird. Anschliessend wird das bereinigte Segmentprofil noch auf Kriterium Gleichung 2.24 geprüft, welches eine maximale Segmentlänge vorgibt. Sämtliche übrigen Punkte des originalen Geländeschnittes werden weggelassen und in der optimierten Variante nicht mehr berücksichtigt. Wird für ein Segment kein maximaler Abstand r_{\max} gefunden, so wird angenommen, der Punkt P liege in der Mitte zwischen P_1 und P_2 . Dies kann bei langen geradlinigen Segmenten auftreten, die infolge Regel 2.24 unterteilt werden müssen. In den ersten 10 m im Bereich direkt unter dem Start- und Endpunkt wird auf eine Terrainoptimierung verzichtet.

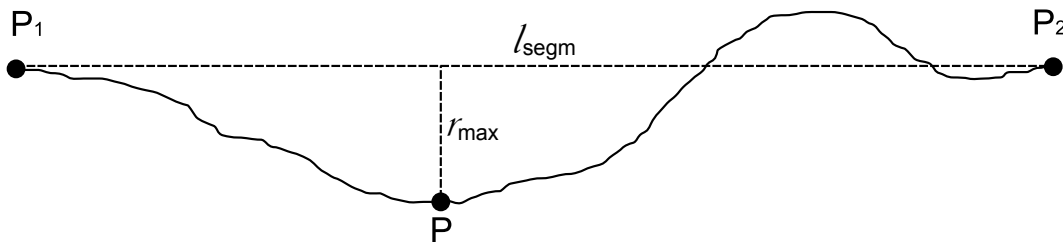


Abbildung 2.4: Identifikation des Punktes P , welcher in einem Geländeschnitt die grösste Distanz von der direkten Verbindung zwischen den Punkten P_1 und P_2 aufweist.

$$r_{\max} > \begin{cases} r_1 & \text{für } d \leq d_{r1} \\ r_1 + (r_2 - r_1) \cdot \frac{d - d_{r1}}{d_{r2} - d_{r1}} & \text{für } d_{r1} < d < d_{r2} \\ r_2 & \text{für } d \geq d_{r2} \end{cases} \quad (2.23)$$

$$l_{\text{segm}} > \begin{cases} l_1 & \text{für } d \leq d_{l1} \\ l_1 + (l_2 - l_1) \cdot \frac{d - d_{l1}}{d_{l2} - d_{l1}} & \text{für } d_{l1} < d < d_{l2} \\ l_2 & \text{für } d \geq d_{l2} \end{cases} \quad (2.24)$$

mit

r_{\max}	Maximale Abweichung eines Punktes P des Geländeschnittes von der direkten Verbindung des Start- und Endpunktes des Geländeschnittes.
d	Distanz zwischen dem Punkt bei r_{\max} und dem Start- bzw. Endpunkt P_1 bzw. P_2 .
l_{segm}	Länge des betrachteten Segments.
r_1, r_2	Untere und obere Grenze der maximal zulässigen Abweichung von der direkten Verbindung.
d_{r1}, d_{r2}	Grenzdistancen für die maximal zulässige Abweichung von der direkten Verbindung.
l_1, l_2	Untere und obere Grenze der maximal zulässigen Segmentlängen.
d_{l1}, d_{l2}	Grenzdistancen für die maximal zulässigen Segmentlängen.

Die Parameter in den Gleichungen 2.23 und 2.24 können durch den Nutzer verändert werden (siehe Kapitel A.2). Als Standardsettings wird empfohlen:

$$\begin{array}{ll} r_1 &= 0.25 \text{ m} & r_2 &= 1.00 \text{ m} \\ d_{r1} &= 50 \text{ m} & d_{r2} &= 500 \text{ m} \\ l_1 &= 5 \text{ m} & l_2 &= 50 \text{ m} \\ d_{l1} &= 20 \text{ m} & d_{l2} &= 200 \text{ m} \end{array}$$

Hinweis:

Die Terrainoptimierung wird basierend auf einem Geländeschnitt durchgeführt, der bereits künstliche Objekte wie Lärmschutzwände und Gebäude enthält. Dadurch wird sicher gestellt, dass durch die Optimierung keine relevanten Hinderniskanten verändert werden.

Hinweis:

Reliefpunkte an welchen ein Wechsel des Bodentyps statt findet, werden von der Terrainoptimierung ausgenommen und immer beibehalten.

Korrektur für seitliche Hinderniswirkungen

Neben den bisher berücksichtigten Schallpfaden, welche in der Vertikalen über ein Hindernis führen, kann es auch Schallpfade geben, welche seitlich um ein Hindernis verlaufen. In Situationen, in welchen der Umweg über das Hindernis grösser ist als ein seitlicher Pfad, wird die Immission durch diesen Beitrag dominiert. Eine rein vertikale Betrachtung führt hier zu einer Unterschätzung der Immissionen und zu einer Überbewertung der Abschirmwirkung von Hindernissen. Die Berücksichtigung dieser seitlichen Schallpfade erfolgt über den Parameter *AlateralOn*.

Der Effekt der seitlichen Hinderniswirkung ist als Pegelkorrektur zur normalen Direktschallberechnung im Modul BASIC integriert. Die spektrale Korrektur weist dabei die Pegelerhöhungen aus, welche sich aus einer Berücksichtigung der Schallpfade links und rechts um ein Hindernis ergeben. Die Berechnung der Korrektur erfolgt nach dem nachfolgend aufgeführten Verfahren. Diesem zugrunde liegt die Vorstellung, dass eine Berücksichtigung von seitlichen Schallpfaden nur bei künstlichen Objekten notwendig ist, da natürliche Geländeverläufe zumeist keine abrupten Höhenveränderungen aufweisen.

1. Es wird der Dämpfungsterm $A_{gr/bar,Tv}$ bestimmt, welcher sich in der Vertikalen ergibt, wenn nur das natürliche Gelände berücksichtigt wird (T für Terrain). Die effektive Hinderniswirkung in der Vertikalen - unter Berücksichtigung des veränderten Bodeneffektes - ergibt sich im Vergleich zum Dämpfungsterm $A_{gr/bar,THv}$ (H für Hindernis), der bei der Direktschallberechnung standardmässig ermittelt und in den Detailresultaten ausgewiesen wird.
2. Es werden sämtliche künstlichen Objekte ermittelt, welche die direkte Verbindung zwischen Quelle und Empfänger unterbrechen. Angrenzende Objekte mit einem Abstand von weniger als 5 cm werden zusätzlich berücksichtigt. Für den vertikalen Schallpfad mit Gelände und künstlichen Hindernissen wird der Umweg z_{THv} berechnet.
3. Für die künstlichen Objekte werden die Durchstosspunkte der direkten Verbindung bestimmt. Entlang dieser Verbindung von Quelle und Empfänger wird eine geneigte Ebene

gebildet, welche durch Quelle und Empfänger läuft und die vertikalen Strukturen der Objekte schneidet. Diese Schnittpunkte bilden die Schallpfade, welche seitlich von der Quelle um die Hindernisse zum Empfänger führen. Daraus resultieren die seitlichen Schallpfade, welche zur Berechnung der Umwege links und rechts, z_{Hl} und z_{Hr} verwendet werden. Verläuft diese Ebene unterhalb des Gebäudes und schneidet das Gelände, so wird der Abstand von der Quelle-Empfänger-Geraden mit einem Faktor zehn multipliziert; dies mit dem Ziel, die Korrektur für seitliche Hinderniswirkungen zu deaktivieren.

Die Höhe der Hindernisse wird relativ zum Untergrund definiert. Damit die Höhe der Hindernisse dem Untergrundverlauf folgt, werden lange Wände in Segmente konstanter Länge unterteilt, welche höchstens 2 m lang sein dürfen. Die Kontrolle der seitlichen Schallpfade erfolgt an allen Originalpunkten und an allen ergänzten Segmentpunkten.

4. Für jeden der drei resultierenden Umwege (oben, links, rechts) wird eine Hinderniswirkung A_{bar} ohne Berücksichtigung der Bodenreflexionen berechnet. Der Algorithmus entspricht dabei den bereits im Modul BASIC implementierten Varianten.
5. Für die seitlichen Schallpfade wird die Hinderniswirkung A_{bar} bei 500 Hz mit der maximalen Hinderniswirkung gemäss Parameter *SingleBarrierMaxAtt* verglichen. Wird dieser Wert überschritten, so wird dieser Schallpfad als vernachlässigbar eingestuft und für die weiteren Schritte ignoriert.
6. Die Korrektur der seitlichen Hinderniswirkung $A_{lateral}$ wird nun terzweise gemäss Formel 2.25 berechnet. Dabei wird in der ersten Zeile bestimmt, um wie viel sich der Immissionspegel im Vergleich zur Standardberechnung des Moduls BASIC erhöhen würde, wenn man auch die seitlichen Schallpfade um die künstlichen Hindernisse berücksichtigt.
7. Das Kriterium für die seitliche Hinderniswirkung gemäss der ersten Zeile berücksichtigt nur die Hinderniswirkung ohne Bodenreflexionen. Dies stellt eine Vereinfachung dar. Mit dem Kriterium in der zweiten Zeile wird sichergestellt, dass die Hinderniswirkung nur bis zum Niveau der Immissionen ohne Hindernis reduziert wird bzw. dass es in Anwesenheit eines sehr schmalen künstlichen Hindernisses nicht zu einer Pegelerhöhung kommt. (Die Differenz von $A_{gr/bar,THv}$ und $A_{gr/bar,Tv}$ muss zusätzlich grösser gleich null sein).

$$-A_{lateral}(f) = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} A_{bar,THv}(f) + 10 \cdot \log \left[10^{-0.1 \cdot A_{bar,THv}(f)} + 10^{-0.1 \cdot A_{bar,Hl}(f)} + 10^{-0.1 \cdot A_{bar,Hr}(f)} \right] \\ A_{gr/bar,THv}(f) - A_{gr/bar,Tv}(f) \end{array} \right. \quad (2.25)$$

Ergänzende Bemerkung:

Da sich durch die Anwesenheit eines Hindernisses auch die Reflexionspfade ändern, resultiert ein anderes Interferenzmuster zwischen Direktschall und den verschiedenen Reflexionspfaden am Boden. Ein deutlicher Interferenzeinbruch im unabgeschirmten Fall kann beispielsweise in Anwesenheit eines Hindernisses nicht mehr vorhanden sein, so dass sich im Endeffekt eine deutlich geringere Pegelreduktion ergibt als dies rein unter Betrachtung des Umweges z zu erwarten wäre. In Extremfällen ist es sogar nicht ausgeschlossen, dass die Anwesenheit eines Hindernisses zumindest in einzelnen Terzen zu einer Pegelerhöhung führt. Dieser Fall wird mit dem obigen zweiten Kriterium jedoch unterbunden.

Wie erwähnt kann die Korrektur für seitliche Hinderniswirkungen nur eine Erhöhung des Immissionspegels zur Folge haben. Entsprechend der Systematik der ISO 9613, welche

Ausbreitungsphänomene generell nur als Dämpfungen einführt, wurde die Korrektur für seitliche Hinderniswirkungen ebenfalls als Dämpfung definiert. A_{lateral} kann deshalb per Definitionem nur negative Werte annehmen. (Auch bei Boden- und Meteeffekt können negative Dämpfungen auftreten, was einer Erhöhung der Immissionspegel entspricht.)

Hinweis:

Der Algorithmus zur Suche von seitlichen Schallpfaden geht davon aus, dass es neben der Direktverbindung zwischen Quelle und Empfänger zu beiden Seiten je einen Pfad um die Hindernisse gibt und sich diese drei Pfade im Grundriss nicht kreuzen. Schallpfade, welche beispielsweise in Form von Schlangenlinien zwischen Gebäuden hindurch oder innerhalb von lückenlos geschlossenen Innenhöfen verlaufen, werden deshalb nicht korrekt identifiziert. Da die Pfadsuche für eine horizontale Ebene zwischen Quelle und Empfänger erfolgt, werden des weiteren kürzere Schallpfade ausserhalb dieser Ebene nicht erkannt.

Spezialfall von Hindernissen ohne Bodenabschluss

Seit der sonX-Version 5.3.1 besteht die Möglichkeit, Hindernisse zu definieren, welche neben einer Oberkante auch eine nicht bodenschlüssige Unterkante besitzen. Dadurch können sich neue Schallpfade ergeben, welche unter Hindernissen hindurchführen. Dieser Spezialfall von Ausbreitungssituationen mit frei im Raum schwebenden Hindernissen wird über den Parameter *AbottomOn* aktiviert und wie folgt behandelt: Der Schallpfad über das Hindernis wird wie bis anhin berechnet und als Referenz verwendet. Zusätzlich wird im Modul BASIC eine zweite Berechnung durchgeführt, wobei alle künstlichen Hindernisse ohne Bodenabschluss, welche im Original-Terrainschnitt erscheinen, weggelassen werden. Bei dieser Berechnung wird ergänzend eine Korrektur für die Grösse der Öffnung integriert, welche als letzter Schritt auf das resultierende Immissionsspektrum angewandt wird. Diese Korrektur gewichtet die Grösse der Öffnung im Verhältnis zur Grösse der ersten Fresnelzone ausgehend vom Durchstosspunkt, für jede Frequenz separat, analog zur Gewichtung der Reflektorfläche bei der Bodenreflexion. Die Durchstosspunkte für sämtliche Hindernisse ohne Bodenabschluss werden ausgehend vom Terrainschnitt mit Gelände und sämtlichen übrigen Hindernisse bestimmt. Somit wird auch ein Beitrag ausgewiesen, wenn keine direkte Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger besteht. Die Betrachtung wird nur in der Vertikalen durchgeführt, wobei unter Verwendung von Formel 2.14 ein Fresnelzonenfaktor ermittelt wird. Im Falle mehrerer Hindernisse ohne Bodenabschluss wird die Öffnung mit der kleinsten massgeblichen Abmessung in der Vertikalen (bzw. dem kleinsten resultierenden Fresnelzonenfaktor) verwendet. Der resultierende Gewichtungsfaktor für die Grösse der Öffnung w_{bottom} berechnet sich gemäss Gleichung 2.26.

$$A_{\text{bottom},f} = 20 \log(\Phi(f)) \quad (2.26)$$

Die beiden resultierenden Direktschallpegel, für den Schallpfad über Hindernisse und den neuen Schallpfad durch Öffnungen, werden energetisch addiert. In der Resultatverarbeitung wird eine Dämpfung A_{bottom} als Korrektur für Schallpfade durch Öffnungen ausgewiesen, welche die Pegelerhöhung (ausgedrückt als negative Dämpfung) des Direktschalls als Folge der Schallpfade unterhalb von Hindernissen ohne Bodenabschluss beschreibt.

Die Betrachtung wird nur im Modul BASIC durchgeführt. Bei den Reflexionsmodellen ist keine Berücksichtigung notwendig. Bei REFLECT wird die Öffnung automatisch richtig abgebildet (siehe Kapitel 2.4). Ein Beitrag von Wald- und Felsreflexionen durch Öffnungen kann vernachlässigt werden (siehe Kapitel 2.5).

Spezialfall Fenster:

Durch die Kombination einer Wand ohne Bodenabschluss und einer zweiten Wand mit Bodenabschluss und kleinerer Höhe an der exakt gleichen Stelle kann die Situation eines Fensters modelliert werden. In diesem Fall wird die Grösse der Öffnung nicht bis zum Boden, sondern nur bis zur zweiten Wand mit Bodenabschluss ermittelt.

Schalldurchgang (Transmission)

Um mobile Lärmschutzwände und -vorhänge modellieren zu können, wurde 2024 die Möglichkeit eingeführt, auch Transmission zu berücksichtigen. Künstliche Objekte werden in *sonX* mit drei Eigenschaften, Schallabsorption, Schalldämmung und Strukturtiefe, charakterisiert (siehe Kapitel A.4). Zur Wahl der Schalldämmung wurden drei Kategorien, entsprechend einer tiefen, mittleren und hohen Schalldämmung, eingeführt, welche je über ein spektrales Schalldämmmass DL_R spektral spezifiziert sind. Ausgehend von einem Strassenverkehrsspektrum erreicht eine Trennwand vom Typ B1 eine Luftschalldämmung DL_R von 12 dB(A) und eine vom Typ B2, 18 dB(A). Beim Typ B3 für hohe Schalldämmung wird wie bis anhin darauf verzichtet, einen Schallpfad durch das Hindernis zu berechnen. Die Berechnung der Transmission erfolgt in einem separaten Schritt ergänzend zur Berechnung von Schallpfaden über, unter und seitlich um Hindernisse. Der Effekt der Transmission ist analog zu den Schallpfaden unter und seitlich um Hindernisse herum als Pegelkorrektur zur normalen Direktschallberechnung im Modul BASIC integriert und wird in den Detailresultaten als Dämpfungsterm A_{trans} ausgewiesen. Die Berücksichtigung dieses Schallpfades erfolgt über den Parameter *AtransmOn* bzw. über die Wahl Materialeigenschaften (für Hindernisse mit hoher Schalldämmung wird keine Transmission gerechnet). Die Berechnung verläuft wie folgt:

1. Es wird der vertikale Pfad über alle Hindernisse (künstliche und natürliche) bestimmt und die spektrale Hinderniswirkung nach Maekawa ohne Limitierung berechnet.
2. Künstliche Hindernisse vom Typ B1 und B2, welche im Original-Terrainschnitt erscheinen, werden weggelassen und die Hinderniswirkung nach Maekawa wird neu berechnet. Die Differenz der beiden Hinderniswirkungen ΔA_{bar} beschreibt die Pegelerhöhung, welche sich ohne Hindernisse mit Transmission ergibt.
3. Entlang des Schallpfades, der in Punkt 2 bestimmt wurde, werden die durchstossenen Hindernisse mit Transmission identifiziert. Die Transmissionsdämpfung entlang des Schallpfades wird bei mehreren Hindernissen mit Schalldurchgang in der Regel aufsummiert ($\sum DL_R$). Durch Aktivierung des Parameters *SingleTransmission* wird jedoch nur die Transmission des Hindernisses mit der besten Schalldämmung berücksichtigt, die anderen werden ignoriert.
4. Der Direktschallpegel des Schallpfades, welcher durch Hindernisse führt, berechnet sich aus dem Referenz-Direktschallpegel über alle Hindernisse inklusive Bodenreflexion zu welcher ΔA_{bar} addiert und von welcher $\sum DL_R$ subtrahiert wird.
5. Es wird dabei zusätzlich kontrolliert bzw. limitiert, dass der Schallpfad durch das Hindernis nicht zu höheren Pegeln führen kann, als ein Schallpfad ohne dieses Hindernis. Dies kann aufgrund von destruktiven Bodeninterferenzen auftreten.
6. Die Dämpfung A_{trans} beschreibt die Pegelerhöhung (ausgedrückt als negative Dämpfung) des Direktschalls, die sich aus der Berücksichtigung des zusätzlichen Schallpfades durch Hindernisse ergibt. (Die Berechnung erfolgt indem die energetische Summe des Referenz-Direktschallpegels und des Direktschallpegels aus Punkt 4 berechnet wird und

davon wiederum der Referenz-Direktschallpegel abgezogen wird. Es sind nur negative Werte, also Pegelerhöhungen zulässig.)

Vermeidung von Überkompensationen bei Effekten, welche die Hinderniswirkung reduzieren

Wie beschrieben berücksichtigt *sonX* im Modul BASIC drei Effekte, welche die Hinderniswirkung reduzieren können: seitliche Schallpfade, Schallpfade durch Öffnungen sowie den Schalldurchgang. Jeder dieser Effekte kann im Extremfall die Hinderniswirkung aufheben und da die Effekte einzeln betrachtet werden, besteht auch die Möglichkeit einer Überkompensation, welche zu höheren Immissionspegeln als im Referenzfall ohne künstliche Objekte führt. Um dies zu vermeiden, wird terzbandweise bei der Resultatverarbeitung nur der stärkste Effekt berücksichtigt; die anderen beiden werden unterdrückt. Da in Realität durchaus Mehrfacheffekte auftreten können, wird diese Endverarbeitung in der Tendenz allenfalls zu einer Überschätzung der Immissionen führen.

Öffnungen werden bei der Suche der massgeblichen horizontalen Schallpfade für A_{lateral} berücksichtigt. Besteht freie Sichtverbindung durch eine Öffnung, wird keine seitliche Hinderniswirkung ausgewiesen und es wird nur die Dämpfung A_{bottom} in der Resultatverarbeitung verwendet.

Wettereinflüsse, welche im Modul METEO berücksichtigt werden, können auch zu einer Reduktion der Hinderniswirkung führen. In *sonARMS* wird für die Kombination mit dem Modul METEO eine analoge Kontrolle wie in BASIC angewandt, welche sicherstellt, dass die Summe von Beiträgen unter, seitlich um und durch ein Hindernis, in Kombination mit förderlichen Meteeffekten über das Hindernis, die gesamte Hinderniswirkung maximal aufheben, aber nicht überkompensieren. Bei den übrigen Anwendungen von *sonX* für Verkehrslärm ist eine solche Kontrolle zur Unterdrückung einer Überkompensation der Hinderniswirkung nicht möglich, da keine zentrale Resultatverarbeitung integriert ist, welche die Dämpfungen der Teilmodule kombiniert. Entsprechend kann es ratsam sein, die Korrekturen in BASIC zu deaktivieren, falls Berechnungen mit METEO gemacht werden.

Übergänge zwischen verschiedenen Situationen, welche die Hinderniswirkung korrigieren:

Die drei Dämpfungsterme A_{lateral} , A_{bottom} und A_{trans} beschreiben Korrekturen der Ausbreitungsdämpfung A_{grbar} . Da sie unabhängig voneinander bestimmt werden, auf der Betrachtung von Schallstrahlen aufbauen und jeweils nur der stärkste Effekt ausgewiesen wird, kann es an den Übergängen zwischen verschiedenen Situationen zu leichten Sprüngen bei den Immissionspegeln kommen. Nachfolgend werden diese Fälle aufgelistet:

1. Eine seitliche Hinderniswirkung wird nur ausgewiesen, wenn der direkte Schallpfad das Hindernis noch trifft. (Dies im Gegensatz zur Hinderniswirkung in der Vertikalen, wo auch eine Pegelreduktion ausgewiesen werden kann, wenn der Schallpfad über das Hindernis verläuft, siehe Seite 11.) In einer Situation, in welcher die Kante einer Wand seitlich gerade noch getroffen wird, wird dem seitlichen Pfad gemäss Maekawa eine Pegelreduktion von 4.8 dB zugewiesen. Dies führt dazu, dass die vertikale Hinderniswirkung weitgehend, aber nicht vollständig aufgehoben wird. Bei einem benachbarten Empfangspunkt, zu welchem der Schallpfad am Hindernis vorbei führt, wird die Hinderniswirkung vollständig aufgehoben. Zwischen diesen beiden Empfangspunkten kann es deshalb eine kleine Diskontinuität geben, welche zusätzlich dadurch beeinflusst wird, dass die sich die Bodenreflexionen in den beiden Fällen unterschiedlich verhalten.

2. Wie in Abschnitt 2.2.4 aufgeführt, werden seitliche Schallpfade ignoriert, wenn die maximale Hinderniswirkung gemäss Parameter *SingleBarrierMaxAtt* überschritten wird. In einer theoretischen Situation, in welcher die maximale Hinderniswirkung bei allen drei Pfaden (links, rechts und vertikal) erreicht wird, also alle drei Schallpfade gleich bedeutend sind, kann eine leichte Verschiebung der Geometrie dazu führen, dass ein seitlicher Pfad die Limite überschreitet, während die anderen beiden praktisch gleich bleiben. Dies würde bei der massgeblichen Frequenz für die Kontrolle der Limite von 500 Hz zu einer Pegelreduktion um 1.8 dB führen. Diese Differenz kann allerdings nicht bei allen Frequenzen erwartet werden, da sich dem Pfad in der Vertikalen noch das Bodeneffekt-Interferenzmuster überlagert, welches die relative Bedeutung der drei Schallpfade beeinflussen kann.
3. Ausgehend vom Bild eines Tores kann das Wechselspiel von A_{lateral} und A_{bottom} aufgezeigt werden. Verläuft die Quellen-Empfänger-Gerade durch den Torbogen, also durch die Wand oberhalb der Öffnung, so werden beide Korrekturen bestimmt und die stärkere wird bei der Resultatverarbeitung berücksichtigt. Führt die Gerade tiefer, direkt durch die Öffnung, wird A_{lateral} deaktiviert. Führt der Schallstrahl umgekehrt etwas seitlich am Torbogen vorbei, so wird die Korrektur für Öffnungen, welche sich nur auf eine Betrachtung in der Vertikalen abstützt, auf Null gesetzt.
4. Die Transmissionskorrektur kommt nur zur Anwendung, wenn der Schallstrahl durch Hindernisse mit tiefer bzw. mittlerer Schalldämmung führt. Im Falle einer leichten Verschiebung des Empfangspunktes, so dass der Schallpfade beispielsweise durch eine Wand mit hoher Schalldämmung führt, entfällt die Korrektur und der Immissionspegel reduziert sich entsprechend.

2.2.5 Bewuchsdämpfung

In Gebieten mit dichtem Bewuchs (Bäume und hohe Sträucher) wird die Schallausbreitung zusätzlich gedämpft. Die ISO 9613-2 gibt für diese Bewuchsdämpfung A_{fol} Abschwächungswerte pro Laufmeter gemäss Tabelle 2.2 an. Da die ISO-Norm 9613-2 nur für Oktavbänder definiert ist und die Berechnung in *sonX* in Terzen erfolgt, werden die Dämpfungswerte der einzelnen Terzen vereinfachend jeweils den entsprechenden Oktavwerten gleichgesetzt.

d_f	63	125	250	500	1k	2k	4k
10...20m	0dB	0dB	1dB	1dB	1dB	1dB	2dB
20...200m	0.02dB/m	0.03dB/m	0.04dB/m	0.05dB/m	0.06dB/m	0.08dB/m	0.09dB/m
> 200m	4 dB	6 dB	8 dB	10 dB	12 dB	16 dB	18 dB

Tabelle 2.2: Bewuchsdämpfung A_{fol} in Funktion der Frequenz gemäss ISO 9613-2.

Der effektiv im Bewuchs verlaufende Schallweg d_f wird gemäss Norm mittels einer zum Boden hin gekrümmten Kreisbahn mit einem Radius von 5 km ermittelt, entsprechend einer förderlichen Ausbreitung von der Quelle zum Empfänger. In der Ebene führt dies zu einer maximal im Wald verlaufenden Strecke von 200 m. Entsprechend wird die anrechenbare Ausbreitungsdistanz durch Wald in der Norm auf 200 m limitiert. Da in *sonX* die Ausbreitung im Basismodell mit geraden Schallstrahlen gerechnet wird und dafür der Geländeverlauf einfließt, wurde entschieden, diese Limitierung auf 200 m als freien Parameter einzuführen. Standardmässig wird jedoch ein Wert von 200 m verwendet. In Übereinstimmung mit der

ISO-Norm 9613-2 wird für $d_f < 10$ m keine Bewuchsdämpfung ausgewiesen.

Die Identifikation von Flächen mit relevantem Bewuchs erfolgt basierend auf den Bodenbedeckungskategorien. Neben der Systematik des Vektor25-Primärflächendatensatzes der SwissTopo und den Kategorien der amtlichen Vermessung, sind auch eigene verallgemeinerte Typisierungen implementiert. Eine Bewuchsdämpfung gemäss Tabelle 2.2 wird dabei für Waldflächen berechnet. Für gewisse Landnutzungen wie offener Wald wird eine reduzierte Bewuchsdämpfung ausgewiesen. Für sämtliche anderen Landnutzungen wird keine Bewuchsdämpfung ausgegeben, auch nicht bei Typen wie Baumschule, Obstanlage oder Reben. Bei letzteren ist die Dichte des Bewuchses für eine massgebliche Zusatzdämpfung nicht ausreichend. Auch wird die minimale Vegetationstiefe von 10 m kaum einmal erreicht.

Hinweis:

Die Bodenbedeckungskategorien werden dabei nicht nur zur Identifikation von Waldflächen verwendet. Den entsprechenden Bodentypen sind weitere Parameter zugeordnet, namentlich der Strömungswiderstand, welcher für die Bodeneffektberechnung benötigt wird, sowie Parameter, welche in die Berechnung von lokalen Meteoprofilen einfließen. In Anhang A.4.2 auf Seite 136 sind sämtliche Untergrundkategorien inkl. der zugehörigen Parameter aufgeführt.

2.3 Berücksichtigung von Wettereinflüssen

2.3.1 Übersicht

Meteorologische Parameter beeinflussen die Schallausbreitung in verschiedener Weise:

1. Vertikale Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten

Die bedeutendsten meteorologischen Einflüsse auf die Schallausbreitung werden durch vertikale Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten hervorgerufen. Diese führen zu einem Kippen der Wellenfronten und haben eine Schallausbreitung entlang gekrümmter Bahnen zur Folge. Im Vergleich zur Schallausbreitung in einem homogenen, ruhenden Medium wird dadurch die Wirkung von Hindernissen beeinflusst. Bei nach unten gekrümmten Schallstrahlen können Hindernisse überstiegen werden, selbst wenn die Sichtlinie zwischen Quelle und Empfänger unterbrochen ist. Entsprechende Situationen werden als förderlich bezeichnet. Umgekehrt kann es im gegenteiligen Fall, d.h. bei hinderlichen Situationen, zu deutlichen Pegelabsenkungen kommen, obwohl freier Blick zwischen Quelle und Empfänger besteht. In diesem Fall spricht man von der Ausbildung einer akustischen Schattenzone. Für grössere Distanzen und bodennahe Ausbreitung können durch diese Effekte im Vergleich zu neutralen Ausbreitungsbedingungen Pegelerhöhungen um bis zu 15 dB und teilweise sogar noch deutlichere Pegelreduktionen im Schattenfall auftreten. In *sonX* werden diese Effekte mit Hilfe eines Schallstrahlverfolgungsalgorithmus abgebildet (siehe Abschnitt 2.3.5).

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 einer zusätzlichen Pegelerhöhung. Mit dem in *sonX* implementierten Strahlverfolgungs-Verfahren können diese Mehrfachreflexionen allerdings nicht berechnet werden.

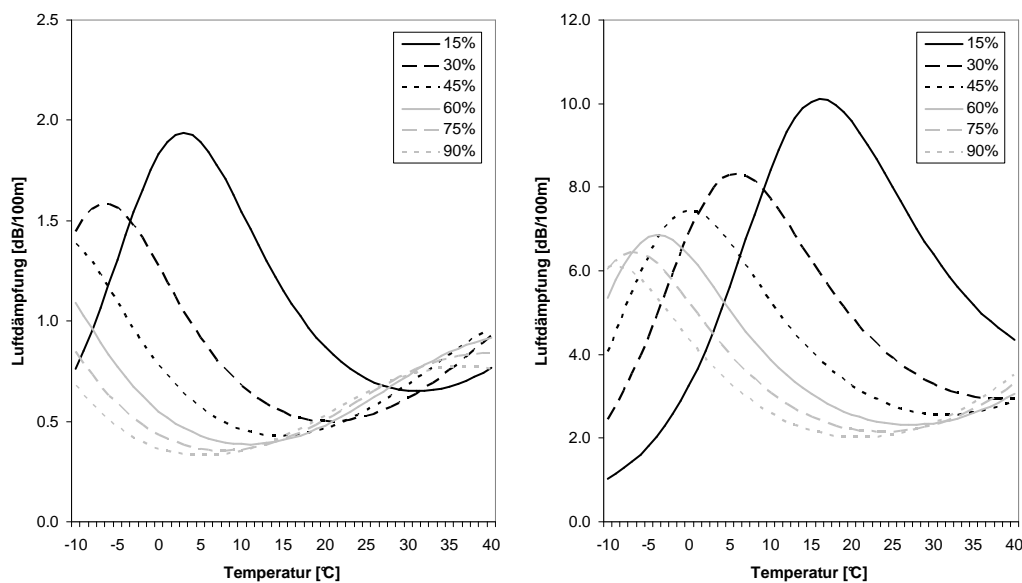


Abbildung 2.5: Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf die Luftdämpfung, dargestellt für Reintöne von 1 kHz (links) und 4 kHz (rechts).

Als weitere Auswirkung kommt es bei einer Schallausbreitung entlang gekrümmter Schallstrahlen zu einer Veränderung der Bodeneffektspektren (siehe Abschnitt 2.2.4). Die Gradienten von Temperatur und Wind, welche gerade in Bodennähe sehr ausgeprägt sind, führen sowohl beim Direktschall als auch bei den Reflexionspfaden zu veränderten Schalllaufzeiten und Schalleinfallswinkeln bzw. Reflexionsfaktoren. Dadurch ändert sich das resultierende Interferenzmuster, so dass es in einzelnen Terzen zu deutlichen Abweichungen kommen kann. Die Auswirkung auf A-bewertete Summenpegel unterliegt jedoch nicht einer eindeutigen Tendenz und ist auch schwer prognostizierbar. Entschärfend ist der Umstand zu werten, dass der A-Pegel relativ unempfindlich auf kleine Frequenzverschiebungen des Interferenzmusters reagiert. Es wurde deshalb beschlossen, im Rahmen von *sonX* auf eine Nachbildung dieses Effektes zu verzichten.

In Abschnitt 2.2.5 wurde die Zusatzdämpfung vorgestellt, die sich als Folge von dichtem Bewuchs ergibt. Diese Bewuchsdämpfung wird in Funktion der im bewaldeten Gebiet zurückgelegten Strecke bestimmt. Die ISO-Norm 9613-2 [2], welcher der Ansatz entnommen ist, geht grundsätzlich von leicht förderlichen Bedingungen aus. Unter der Annahme einer Ausbreitung in der Ebene ist deshalb die maximal innerhalb eines Waldes zurück zu legende Strecke in der Norm auf 200 m limitiert. In Abschnitt 2.3.6 wird ein Ansatz präsentiert, der die Dämpfung pro Laufmeter gemäss ISO 9613-2 mit den in der Schallstrahlverfolgung bestimmten Schallpfaden kombiniert. Je nach meteorologischen Bedingungen kann es zu grösseren oder kleineren Ausbreitungsdistanzen innerhalb des Waldes und entsprechend zu grösseren oder kleineren Bewuchsdämpfungen kommen.

2. absolute Temperatur und relative Feuchtigkeit

Die absolute Temperatur und die relative Feuchtigkeit beeinflussen die Luftdämpfung. Die Auswirkung auf die resultierenden Immissionspegel ist generell deutlich kleiner als dies aufgrund der Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten der Fall ist. Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch für 1 und 4 kHz die Abhängigkeit der resultierenden Luftdämpfung von Temperatur und Feuchte. Die Berücksichtigung im Rahmen von *sonX* wird in Abschnitt

2.3.7 dargestellt.

3. Mediumsinhomogenitäten und Turbulenzen

Mediumsinhomogenitäten und Turbulenzen führen zu einem zu kurzzeitigen Pegelschwankungen, welche aber im Hinblick auf die in *sonX* anvisierten Grössen keine Rolle spielen. Zum anderen treten jedoch auch Effekte auf, welche durchaus Auswirkungen auf die resultierenden Mittelungspegel haben können. So kommt es zu einer Reduktion des Bodeneffektes als Folge von Kohärenzverlusten verschiedener Schallpfade (Direktschall und Reflexionen). Ausserdem führen Streuungen zu einer Reduktion von Hinderniswirkungen bzw. zu einer Begrenzung des Pegelabfalls in Schattenzonen.

Diese Effekte werden implizit bereits an mehreren Stellen des Basis-Ausbreitungsmodells berücksichtigt, so durch den Kohärenzfaktor im Bodeneffektmodell gemäss Gleichung 2.20 oder durch die Limitierung der Hinderniswirkung. Auch bei der Berechnung des Meteoeffektes als Folge von Temperatur- und Windgeschwindigkeitsgradienten ist eine entsprechend motivierte Limitierung vorgesehen (siehe Abschnitt 2.3.5).

Das Ausmass an Inhomogenitäten und Turbulenzen wird jedoch nicht in Funktion des aktuellen Wetters bestimmt. Entsprechende Zusammenhänge sind zum heutigen Zeitpunkt nicht oder nicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelbar. Aus diesem Grund werden Annahmen zu mittleren Turbulenzeinflüssen verwendet, welche basierend auf Messerfahrungen sowie aus der Literatur abgeleitet wurden. Die Turbulenzeinflüsse werden somit nicht von Wetterlage zu Wetterlage variiert sondern im gesamten Berechnungsmodell als konstant angenommen.

2.3.2 Umsetzung im *sonX* Ausbreitungsmodell

Zur Berechnung von Wettereinflüssen müssen eine oder mehrere Wetterlagen definiert und ihre Auftretenshäufigkeit während der Tages-, Abend- und Nachtzeit angegeben werden (typischerweise 06 bis 18 Uhr, 18 bis 22 Uhr und 22 bis 06 Uhr). Zur Definition einer Wetterlage muss ein Meteoprofil sowie eine Windrichtung spezifiziert werden. In den Meteoprofilen sind die Vertikalprofile von Wind, Temperatur und Feuchte abgelegt, entweder parametrisiert nach einem LinLog-Ansatz (siehe Abschnitt 2.3.3) oder als absolute Profile. Wenn standardisierte Vertikalprofile verwendet werden, besteht die Möglichkeit auf einer wählbaren Höhe absolute Werte von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Druck anzugeben.

Für jede definierte Wetterlage i wird unter Berücksichtigung der erwähnten Einflüsse eine Ausbreitungsdämpfung $A_{\text{Meteo},i}$ ausgewiesen, welche als Pegeldifferenz einer Berechnung mit meteorologischen Einflüssen im Vergleich zur Basisberechnung ermittelt wird:

$$A_{\text{Meteo},i} = (A_{\text{atm},\text{Meteo},i} - A_{\text{atm},\text{Basic}}) + (A_{\text{fol},\text{Meteo},i} - A_{\text{fol},\text{Basic}}) - D_{\text{met},i} \quad (2.27)$$

mit

$A_{\text{atm},\text{Meteo},i}$	Luftdämpfung unter Berücksichtigung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit gemäss Wetterlage i . [dB]
$A_{\text{atm},\text{Basic}}$	Luftdämpfung bei Standardbedingungen. [dB]
$A_{\text{fol},\text{Meteo},i}$	Bewuchsdämpfung unter Berücksichtigung gekrümmter Schallstrahlen gemäss Wetterlage i . [dB]
$A_{\text{fol},\text{Basic}}$	Bewuchsdämpfung unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre. [dB]
$D_{\text{met},i}$	Auswirkung der Schallausbreitung entlang gekrümmter Schallstrahlen auf die Hinderniswirkung bzw. die Bildung von Schallschatten. Positive Werte bezeichnen dabei förderliche und negative Werte hinderliche Ausbreitungsbedingungen. [dB]

Die resultierende Ausbreitungsdämpfung des Moduls *Meteo* wird gemäss Gleichung 2.28 aus den Meteeffekten der verschiedenen Wettersituationen und ihren Auftretenshäufigkeiten, separat für die Zeiträume Tag, Abend und Nacht, berechnet. Dieser Wert entspricht dem für Langzeitmittelwerte repräsentativen Wettereinfluss:

$$A_{\text{Meteo}} = -10 \cdot \log \left[\frac{1}{\sum G_i} \sum_{i=1}^I G_i \cdot 10^{-0.1 A_{\text{Meteo},i}} \right] \quad (2.28)$$

mit

G_i Auftretenshäufigkeit der Wetterlage i .
 $A_{\text{Meteo},i}$ Meteeffekt der Wetterlage i . [dB]

2.3.3 Meteoprofile nach dem LinLog-Ansatz

Der Ansatz zur Modellierung der Profilkfunktionen von Windgeschwindigkeit und Temperatur aus der Kombination eines logarithmischen und eines linearen Terms wird in der Literatur häufig verwendet, siehe z.B. [16]². Gleichungen 2.29 und 2.30 zeigen die Profilkfunktionen mit der Höhe z , der Rauigkeitslänge z_0 , dem Nullflächenversatz d und den vier Skalierungsparametern $a_{u,\log}$, $a_{u,\text{lin}}$, $a_{T,\log}$ und $a_{T,\text{lin}}$:

$$u(z) = a_{u,\log} \cdot \ln \left[\frac{z - d + z_0}{z_0} \right] + a_{u,\text{lin}} \cdot (z - d) \quad (2.29)$$

$$T(z) = a_{0,T} + a_{T,\log} \cdot \ln \left[\frac{z - d + z_0}{z_0} \right] + a_{T,\text{lin}} \cdot (z - d) \quad (2.30)$$

Die Ansätze für die Skalierungsparameter werden aus der Theorie zur Surface layer scale similarity abgeleitet [4], [17], [18]:

$$a_{u,\log} = \frac{u_*}{k}$$

$$a_{u,\text{lin}} = \frac{u_*}{k} \frac{1.0}{L} \quad (\text{Tag}), \quad a_{u,\text{lin}} = \frac{u_*}{k} \frac{4.7}{L} \quad (\text{Nacht})$$

bzw.

$$a_{T,\log} = 0.74 \frac{\Theta_*}{k}$$

$$a_{T,\text{lin}} = \frac{\Theta_*}{k} \frac{0.74}{L} + \gamma_d \quad (\text{Tag}), \quad a_{T,\text{lin}} = \frac{\Theta_*}{k} \frac{4.7}{L} + \gamma_d \quad (\text{Nacht})$$

Die Skalierungsparameter bzw. die resultierenden Profile werden anschliessend noch verfeinert (für Details siehe [19]):

- Die obigen Ansätze für die Skalierungsparameter werden als Startwerte für eine Optimierung verwendet mit dem Ziel, die vorgegebene Temperatur und Windgeschwindigkeit auf der Referenzhöhe perfekt zu reproduzieren.

²In der zitierten Publikation [16] wird allerdings kein Nullflächenversatz d verwendet.

- Die Profilkfunktionen aus den Skalierungsparametern sind nur für Höhen bis zur Monin-Obukhov-Länge L gültig. Für grössere Höhen sind die so berechneten Werte nicht zulässig und führen namentlich in sehr stabilen oder sehr labilen Situationen zu völlig unrealistischen Werten. Die LinLog-Profilkfunktionen werden deshalb für grössere Höhen angepasst.
- Die der Berechnung der Meteoprofile zu Grunde liegende Ähnlichkeitstheorie setzt eine turbulente, genügend gut durchmischte Atmosphäre mit vertikalem Impulsaustausch voraus. Diese Voraussetzungen sind bei stabiler Luftschichtung und schwachem Wind nicht erfüllt. Damit auch Meteoprofile für geringe Windgeschwindigkeiten erstellt werden können, müssen daher zusätzliche Massnahmen getroffen werden.
- Bei Situationen mit grossen Rauigkeitshöhen, wie sie im Siedlungsbereich oder in der Nähe bewaldeter Flächen auftreten, bildet sich in Bodennähe ein sogenannter Roughness Sublayer. Die Windprofile in diesem Bereich folgen anderen Gesetzmässigkeiten und werden entsprechend modifiziert.

LinLog-Profile der absoluten Feuchte werden analog zu den bei der Temperatur eingesetzten Ansätzen ermittelt. Die Profile der relativen Feuchte werden anschliessend aus der absoluten Feuchte und der lokalen Temperatur berechnet.

2.3.4 Erstellung von lokalen Meteostatistiken für die ganze Schweiz

Im LinLog-Format besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Parameter für verschiedene Untergrundtypen zu variieren. Ausgehend von einer Klassenbildung der meteorologischen Bedingungen gemäss Tabelle 2.3 wurden 15 Standardprofilkfunktionen nach dem LinLog-Ansatz definiert und gemäss der Geländetypisierung für die variablen Untergrundeigenschaften variiert (in Anhang A.4.7 auf Seite 139 ist exemplarisch ein entsprechender Datensatz aufgeführt. Ausserdem werden dort weitere Angaben zur Verwendung der Profile gemacht). Detaillierte Informationen zur Klassierung und zu den entsprechenden Profilen können [19] entnommen werden.

Die Profilkfunktionen enthalten bereits absolute Werte für Temperatur und Feuchte, welche als Mittelwerte der entsprechenden Meteoklassen über die ganze Schweiz ermittelt wurden (siehe Tabelle 2.4). Optional können diese Parameter, welche zur Berechnung der Luftdämpfung verwendet werden, auch separat definiert werden. Im Falle der Temperatur wird die Temperaturdifferenz auf der Referenzhöhe von typischerweise 10 m zwischen der Vorgabe aus der Profilkfunktion und dem separat definierten Wert als Konstante zum Temperaturprofil addiert. Bei der Luftfeuchtigkeit wird eine Umrechnung in eine absolute Luftfeuchtigkeit vorgenommen und entsprechend das Profil der absoluten Luftfeuchtigkeit angepasst. Die im Hinblick auf die Berechnung der Luftdämpfung relevante relative Luftfeuchtigkeit wird danach in einem zweiten Schritt neu ermittelt.

Ausgehend von statistischen Wetterdaten des COSMO-2-Berechnungsmodells der MeteoSchweiz mit einer Kachelgrösse von 2.2 km wurden im Rahmen des Empa-Projektes 459'348 im Jahr 2011 Meteostatistiken gemäss der in Tabelle 2.3 dargestellten Systematik, jeweils pro Klasse für die drei dominierenden Windrichtungen und die drei Zeitabschnitte Tag (06 - 18 Uhr), Abend (18 - 22 Uhr) und Nacht (22 - 06 Uhr) aufbereitet. In Zusammenarbeit mit der Firma n-Sphere wurde anschliessend für jeden Punkt der Schweiz in einem 100 x 100 m Raster eine Zuordnung zu dem repräsentativsten COSMO-2-Gitterpunkt vorgenommen. Die Zuordnung erfolgte aufgrund des horizontalen und des vertikalen Abstandes, wobei letzterer fünffach gewichtet wird, sowie der Zuordnung als Land- oder Wasserpunkt. Als Resultat liegen

Windgeschwindigkeit		Strahlungsbilanz		
Klassengrenzen	Klassenmittel	Stabil	Neutral	Labil
		$\leq -18 \text{ W/m}^2$ -25 W/m ²	50 W/m ²	$\geq 180 \text{ W/m}^2$ 250 W/m ²
0-1 m/s	0.0 m/s	S0	N0	L0
1-2 m/s	1.5 m/s	S1	N1	L1
2-3 m/s	2.5 m/s	S2	N2	L2
3-5 m/s	4.0 m/s	S3	N3	L3
> 5 m/s	6.0 m/s	S4	N4	L4

Tabelle 2.3: Meteoklassierung mit mittleren Windgeschwindigkeiten v auf 10 m Höhe und der Netto-Strahlungsbilanzen Q_* . Es werden jeweils die Klassengrenzen und die Klassenmittelwerte angegeben.

Meteo-Klasse	L0	L1	L2	L3	L4
	N0	N1	N2	N3	N4
	S0	S1	S2	S3	S4
Temperatur [C°]	14.9	15.7	16.0	15.1	13.1
	7.1	7.5	7.8	7.5	6.6
	7.1	7.3	7.6	7.3	5.6
rel. Feuchte [%]	63	61	58	56	56
	81	81	79	77	75
	76	76	74	72	71

Tabelle 2.4: Durchschnittliche Temperatur in °C und relative Luftfeuchtigkeit in% auf 10 m Höhe für alle Meteo-Klassen gemäss Tabelle 2.3, ausgewertet über sämtliche Rasterpunkte des COSMO-2-Modells, welche innerhalb der Schweiz auf weniger als 1000 m über Meer liegen.

lokale Meteostatistiken vor, welche direkt für Berechnungen mit *sonX* und anderen Ausbreitungsmodellen verwendet werden können. Abbildung 2.6 zeigt exemplarisch einen Kartenausschnitt im Bereich des Zürichsees mit den zugeordneten Gebieten mit einheitlichen Meteostatistiken.

Im Jahr 2021 wurden die Meteostatistiken mit Daten von vier Jahren (2016-2019) des Nachfolgemodells COSMO1 mit einer Gitterauflösung von 1.1 km aktualisiert (siehe Empa-Projekt 5214.025099).

2.3.5 Berechnung gekrümmter Schallstrahlen mittels ray tracing

Aus den Temperatur- und Windgeschwindigkeitsprofilen wird in Kombination mit der Windrichtung ein Profil der effektiven Schallgeschwindigkeit ermittelt, welches als Eingangsparameter für die Schallstrahlverfolgung verwendet wird. Im *sonX* Ausbreitungsmodell kommt ein spezielles Strahlverfolgungs-Verfahren (ray tracing) 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.
- Vertikale Temperaturprofile (bez. Höhe über Boden) in Funktion der Untergrundeigenschaften.
- Vertikale Windprofile (bez. Höhe über Boden) in Funktion der Untergrundeigenschaften.
- Windrichtung. Diese wird verwendet, um die Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung zu bestimmen.

Ray tracing Algorithmen sind gut dazu geeignet, um die Refraktion, d.h. die Krümmungen von Schallstrahlen unter Meteeinfluss auch für komplexe Situationen zu berechnen. 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 horizontales Raster einsetzt und die Schrittweite je nach Situation variiert. Wenn zusätzlich die Meteogradienten als effektive Schallgeschwindigkeiten tabelliert werden, so werden zur Berechnung eines Iterationsschrittes auch unter Berücksichtigung des Terrains nur noch fünf Gleitkommaoperationen benötigt. Im folgenden Abschnitt wird diese Methode für die Schallausbreitung über flachem Boden mit beliebigem vertikalem effektiven Schallgeschwindigkeitsprofil hergeleitet. (Für zusätzliche Informationen siehe [20].

Der Einheitsvektor \vec{n} normal zur Wellenfront lässt sich gut zur Beschreibung der Refraktion einsetzen. Seine vertikale Komponente n_z wird nach Pierce [3] direkt vom lokalen, temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeitsgradienten $\partial c / \partial z$ beeinflusst:

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} = -\frac{\partial c(z)}{\partial z} \quad (2.31)$$

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

$$\frac{\partial n_z}{\partial t} \approx -\frac{\partial c_{\text{eff}}(z)}{\partial z} \quad (2.32)$$

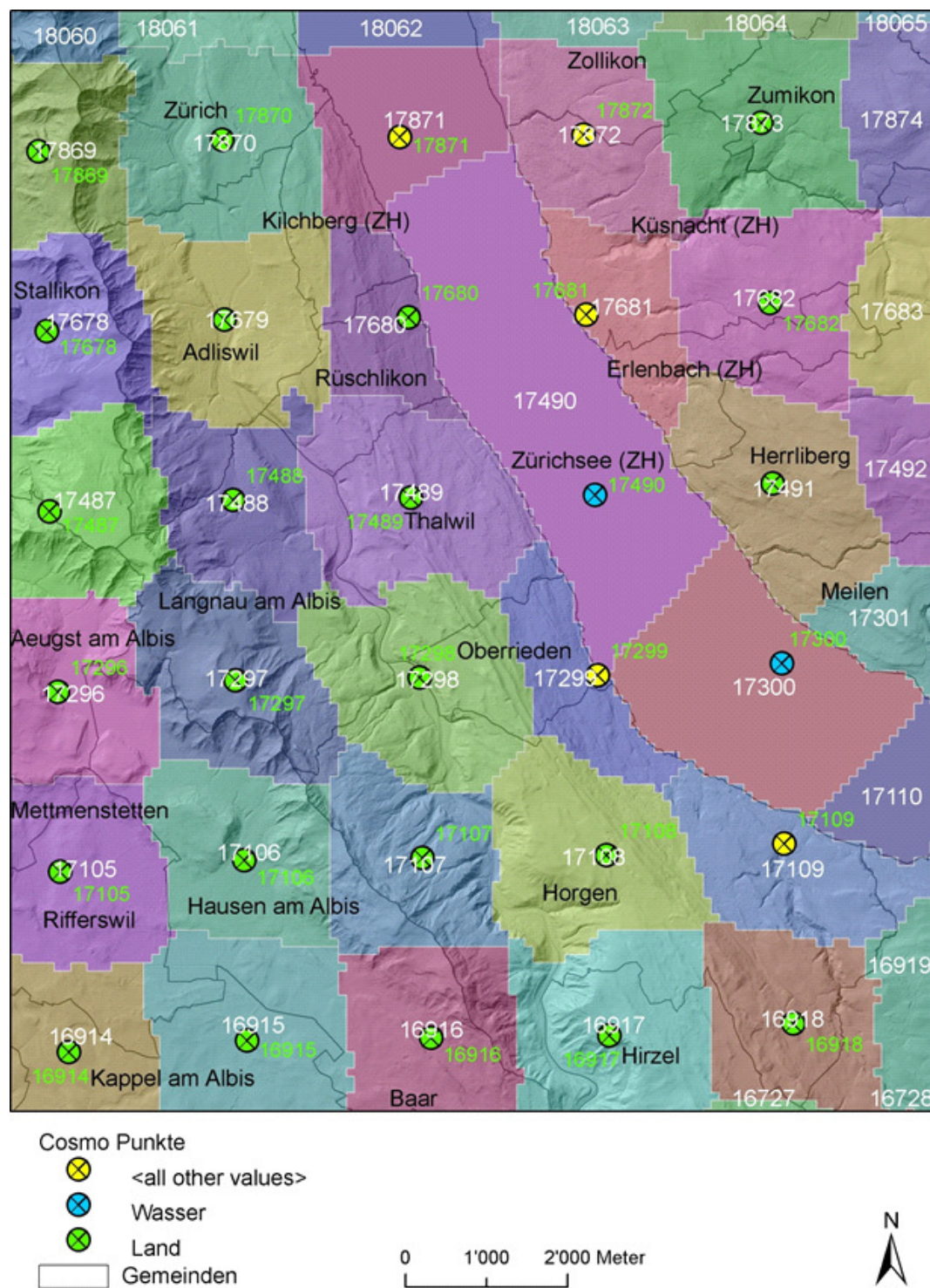


Abbildung 2.6: Darstellung der Meteogebiete, Ausschnitt aus dem Raum Zürich. Die Zahlen bezeichnen die IDs der Gitterpunkte des COSMO2-Modells.

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:

$$\vec{p}(t + \Delta t) = \vec{p}(t) + \Delta t \cdot c_{\text{eff}(p_z(t))} \cdot \vec{n}(t) \quad (2.33)$$

Der Einheitsvektor $\vec{n}_{(t)}$ normal zur Schallwellenfront zur Zeit t kann dabei mit Gleichung (2.32) 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:

$$\vec{p}[i] = \begin{pmatrix} i \cdot \Delta x \\ p_z[i] \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

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

$$\Delta p_z[i] = p_z[i] - p_z[i - 1] \quad (2.35)$$

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

$$\Delta p_z[i + 1] = \Delta p_z[i] + \left. \frac{\partial n_z}{\partial t} \right|_{z=p_z[i]} \cdot \Delta t \cdot \sqrt{\Delta x^2 + \Delta p_z[i]^2} \quad (2.36)$$

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

$$\Delta p_z[i + 1] = \Delta p_z[i] + \left. \frac{\partial n_z}{\partial t} \right|_{z=p_z[i]} \cdot \frac{\Delta x^2 + \Delta p_z[i]^2}{c_{\text{eff}(p_z[i])}} \quad (2.37)$$

Schliesslich kann $\partial n_z / \partial t$ durch Gleichung (2.32) ausgedrückt werden:

$$\Delta p_z[i + 1] = \Delta p_z[i] - \left. \frac{\partial c_{\text{eff}}(z)}{\partial z} \right|_{z=p_z[i]} \cdot \frac{\Delta x^2 + \Delta p_z[i]^2}{c_{\text{eff}(p_z[i])}} \quad (2.38)$$

Dabei kann der in der Gleichung (2.38) enthaltene relative effektive Schallgeschwindigkeitsgradient K zur Steigerung der Rechengeschwindigkeit tabelliert werden. Mit dieser tabellierten Grösse K erhält man folgende Gleichung:

$$\Delta p_z[i + 1] = \Delta p_z[i] - K_{(p_z[i])} \cdot (\Delta x^2 + \Delta p_z[i]^2) \quad (2.39)$$

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

$$\Delta p_z[i + 1] = \Delta p_z[i] - K_{(p_z[i]-G_{[i]})} \cdot (\Delta x^2 + \Delta p_z[i]^2) \quad (2.40)$$

Unterscheidung von förderlichen und hinderlichen Situationen

Wie in Abschnitt 2.3.1 ausgeführt, wird die Schallstrahlverfolgung dazu verwendet zwei meteorologische Effekte auf die Schallausbreitung abzubilden: die Reduktion der Hinderniswirkung bei förderlichen Bedingungen und das Entstehen von akustischen Schattenzonen bei hinderlichen Bedingungen. Der ray tracing Algorithmus gemäss Gleichung 2.40 wird dabei sowohl für hinderliche als auch für förderliche Ausbreitungsbedingungen eingesetzt. Der Ablauf der Strahlsuche und die verwendeten Optimierungskriterien unterscheiden sich aber in den beiden Fällen grundsätzlich, weshalb sie in den folgenden Abschnitten getrennt beschrieben werden. Die Entscheidung ob es sich um eine förderliche oder hinderliche Ausbreitungssituation handelt, ist bei der Zulassung komplexerer Meteoprofile nicht trivial, z.B. wenn die Schallausbreitung direkt über dem Boden förderlich, darüber aber hinderlich ist. Im Ablaufdiagramm, welches in Abbildung 2.7 dargestellt ist, wird zuerst kontrolliert, ob sich der Empfänger direkt über der Quelle befindet. Bei dieser Fallunterscheidung geht es jedoch nur darum numerische Probleme zu vermeiden, da bei vollständig vertikaler Ausbreitung keine Gradienten auftreten. Danach wird getestet, ob im Referenzfall unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre bzw. gerader Schallstrahlen eine Hinderniswirkung auftritt. Falls die Sichtverbindung unterbrochen ist (Pfad 3), wird eine Strahlsuche unter der Annahme hinderlicher Ausbreitungsbedingungen ausgeführt. Wird diese Annahme nicht bestätigt, d.h. trifft der Strahl den Empfänger bzw. reduziert sich im Vergleich zum Referenzfall die Schallschattendistanz, so wird das Verfahren zur Bestimmung unter förderlichen Ausbreitungsbedingungen durchgeführt.

Im alternativen Fall mit Sichtverbindung (Pfad 2) wird ein Strahl in Richtung Empfänger bei inhomogener Atmosphäre abgeschickt. Verläuft dieser oberhalb des Empfangspunktes, so liegt eine hinderliche, im anderen Fall eine förderliche Ausbreitungssituation vor. Im Falle einer hinderlichen Situation wird eine Strahloptimierung mit dem Ziel durchgeführt, dem Empfänger möglichst nahe zu kommen. Falls ein Strahl gefunden wird, welcher unterhalb des Empfängers durchgeht, wird die Meteorokorrektur für Schattenzonen auf Null gesetzt, da in diesem Fall davon ausgegangen werden kann, dass es auch einen Strahl gibt der den Empfänger trifft. Die Strahlsuche wird allerdings nicht abgebrochen, da mit der Strahlsuche zusätzlich die in Wald zurückgelegte Distanz bestimmt wird und dieser Wert andernfalls zu hoch ausfallen kann (siehe Abschnitt 2.3.6). Ebenfalls keine Meteorokorrektur resultiert im Falle einer Sichtverbindung und förderlichen Bedingungen, sofern keine Hinderniswirkung ohne Sichtverbindung gemäss Abschnitt 2.2.4 ausgewiesen wird.

In Abschnitt 3.1.3 sind die Optimierungs- und Abbruchkriterien der Strahlsuche sowie die zentralen Code-Routinen aufgeführt.

Meteoeffekt aufgrund von Temperatur- und Windgradienten bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen

Bei Gegenwind und/oder mit der Höhe abnehmenden Temperaturen 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.

Zur Nachbildung dieser Phänomene wird in *sonX* ein an der Empa entwickeltes Modell verwendet [20]. Es wurden dazu mit FDTD, einem numerischen Verfahren zur wellentheoretischen Simulation der Schallausbreitung, eine Vielzahl solcher Schallschatten-Situationen

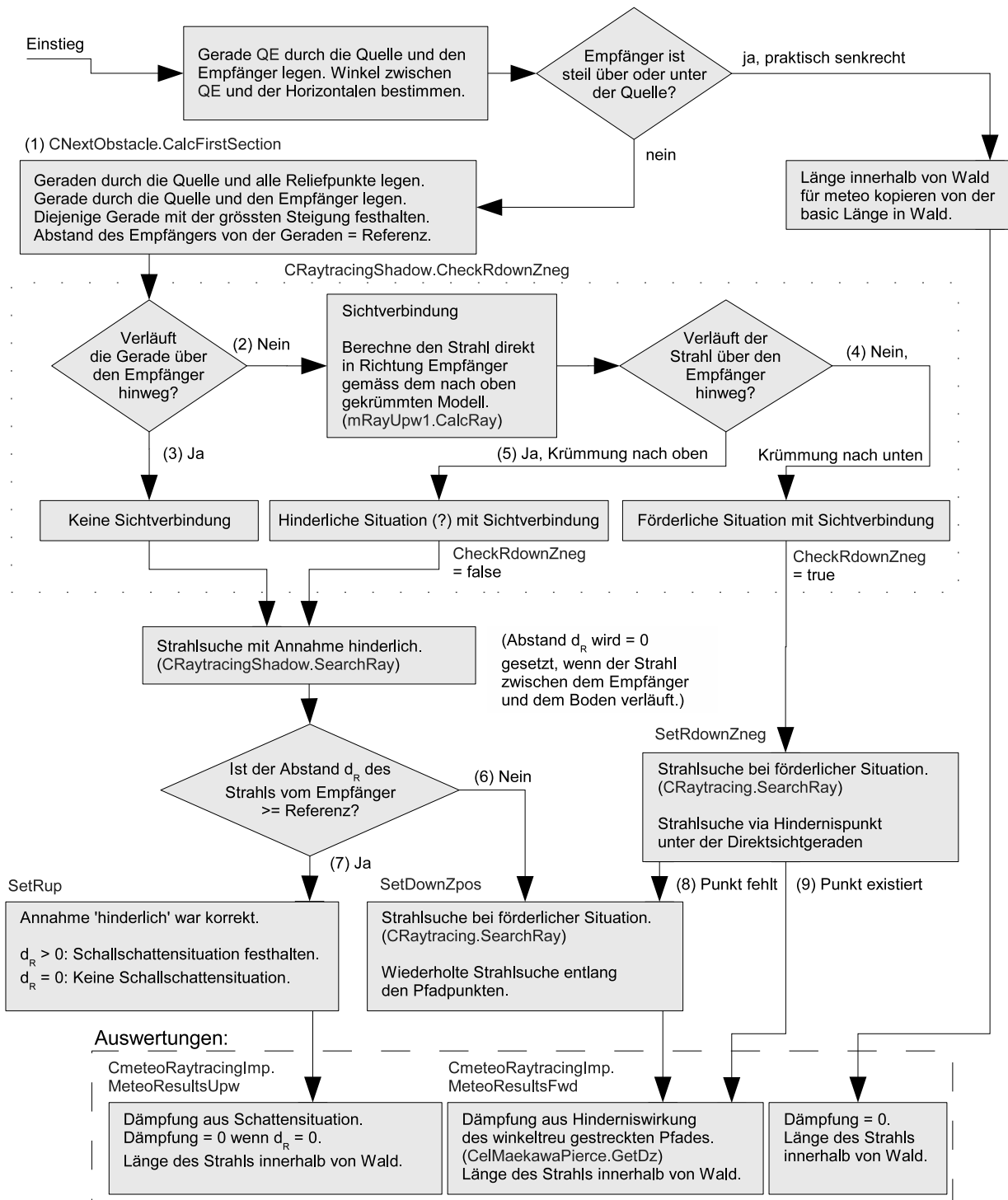


Abbildung 2.7: Fallunterscheidung beim Strahlverfolgungs-Algorithmus. (Ergänzt sind die dabei zur Anwendung kommenden Prozeduren.)

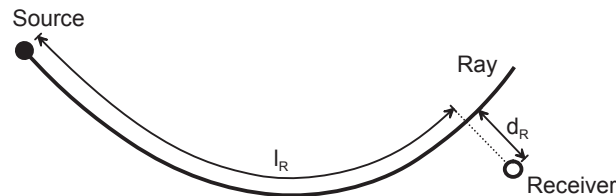


Abbildung 2.8: Die zur Charakterisierung einer Schattenzone verwendeten Parameter d_R und l_R .

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 *sonX* eignet. Die Simulationen wurden zur Modellbildung gegenüber Messungen bevorzugt, da die meteorologische Situation während einer Messung aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität und des in verschiedener Hinsicht stochastischen Verhaltens der bodennahen Atmosphäre nur punktuell bestimmt werden kann.

Im *sonX* Ausbreitungsmodell wird im Geländeschnitt zwischen Quelle und Empfangspunkt der in Abschnitt 2.3.5 beschriebene ray tracing-Algorithmus eingesetzt und so der Meteeinfluss auf die Ausbreitung charakterisiert. Dabei wird in einem iterativen Verfahren derjenige Schallstrahl gesucht, welcher dem Empfangspunkt möglichst nahe kommt. Wird ein Strahl gefunden, welcher unter dem Empfangspunkt durchführt (damit liegt der Empfangspunkt nicht in einem Schallschatten), so wird der Meteeffekt auf null gesetzt ($D_{\text{met}} = 0$).

Empfangspunkte im Schallschatten werden gemäss Abbildung 2.8 mit zwei Parametern charakterisiert. Mit der empirischen Gleichung 2.41 und den durch Vergleich mit den numerischen Simulationen gefundenen Koeffizienten A_0 und A_1 aus der Tabelle 2.5 wird der spektrale Meteeffekt D_{met} bestimmt, wobei zusätzlich eine Ausblendfunktion K_{fade} gemäss Gleichung 2.42 zur Anwendung kommt.

Hinweis:

In [20] werden die Werte für ein 3-Parameter-Modell gezeigt. Dieses wird jedoch nicht eingesetzt. Für tiefere und höhere Frequenzen im Vergleich zu Tabelle 2.5 werden in *sonX* die Parameter der untersten bzw. obersten Terz weiter verwendet.

$$D_{\text{met}} = [A_0 + A_1 \cdot \frac{d_R}{l_R}] \cdot K_{\text{fade}} \quad (2.41)$$

Ist bei einer Ausbreitungssituation die Sichtverbindung unterbrochen, muss der Algorithmus erweitert werden, da sonst 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 Abbildung 2.9). Kann auf diese Weise mit Gleichung 2.41 eine Dämpfung berechnet werden, wird diese vom eigentlichen Meteeffekt abgezogen.

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 darüber-

Frequency [Hz]	A_0 [dB]	A_1 [dB]
50	0.4	-50
63	1.3	-70
80	1.3	-85
100	2.3	-110
125	3.1	-135
160	5.4	-175
200	7.0	-200
250	10.8	-230
315	9.0	-180
400	7.5	-160
500	3.0	-120
630	-5.0	-50
800	-4.0	-100
1000	-4.0	-130
1250	0.0	-200
1600	0.0	-230

Tabelle 2.5: Die zur Berechnung des Meteeffekts im Schallschatten benötigten Koeffizienten.

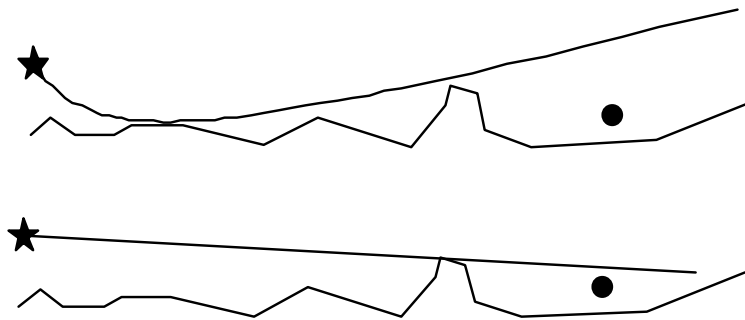


Abbildung 2.9: Suche des relevanten Schallstrahls zur Berechnung des Meteeffektes unter hinderlichen Ausbreitungsbedingungen. Der gefundene Strahl berührt, abhängig von der Meteosituation, oft den Boden nicht. Unten ist die Referenzsituation mit geradliniger Schallausbreitung dargestellt.

liegende 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 *sonX* im Spektrum auf Null gesetzt (siehe auch Abbildung 2.10).

Um Unstetigkeiten im Modell zu verhindern, wird der Meteeffekt an der Schallschattengrenze linear ausgeblendet. Dazu werden die Pegel D_{met} des mit Gleichung 2.41 berechneten Spektrums für Situationen mit $d_R/l_R < 0.05$ mit dem Faktor K_{fade} gewichtet:

$$K_{\text{fade}} = 20 \frac{d_R}{l_R} \quad (2.42)$$

Abbildung 2.10 zeigt den Meteeffekt für verschiedene Werte von d_R/l_R . Dabei liegt der

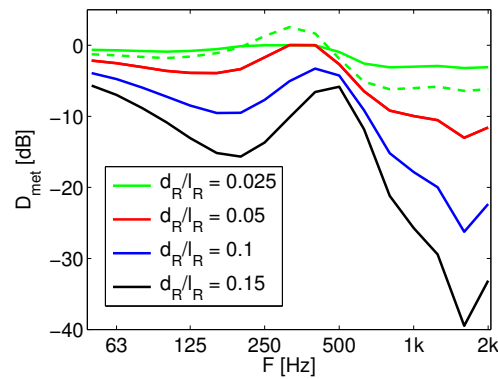


Abbildung 2.10: Die spektralen Meteeffekte D_{met} des Modells für unterschiedliche Werte für d_R/l_R . Die gestrichelte Linie zeigt das für $d_R/l_R = 0.025$ berechnete Spektrum gemäss Gleichung 2.41, welches aber aufgrund der Nähe zur Schallschattengrenze noch begrenzt und mit einem Faktor gewichtet werden muss.

kleinste Wert mit $d_R/l_R < 0.025$ 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.

Das Verfahren wurde mit wellentheoretischen Simulationen (FDTD) 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 Gleichung 2.39), sondern die Grösse $K_{(h)}^*$ eingesetzt:

$$K_{(h)}^* = 0.8 \cdot K_{(h+0.8)} \quad (2.43)$$

Die Schattenzonenkorrektur wurde bewusst so definiert, dass bei hinderlicher Ausbreitung für Frequenzen über 2 kHz ein tendenziell moderater Meteeffekt ausgewiesen wird. Der Grund dafür ist, dass bei diesen Situationen der an Luft-Inhomogenitäten, lokalen Schwankungen von Temperatur, Windrichtung und -stärke, gestreute Schall den Pegel bestimmt. Diese Luft-Inhomogenitäten wurden bei den Simulationen zur Abstimmung des *sonX*-Meteomodells berücksichtigt, 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.

Hinweis:

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 eine Gegenwindsituation für verschiedene Bodenrauigkeiten berechnet. Dabei wurde ein vereinfachtes logarithmisches Windprofil $v(z)$ so gewählt, dass die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe stets gleich blieb:

$$v(z) = v_m \cdot \frac{\ln(z/z_0 + 1)}{\ln(z_m/z_0 + 1)} \quad (2.44)$$

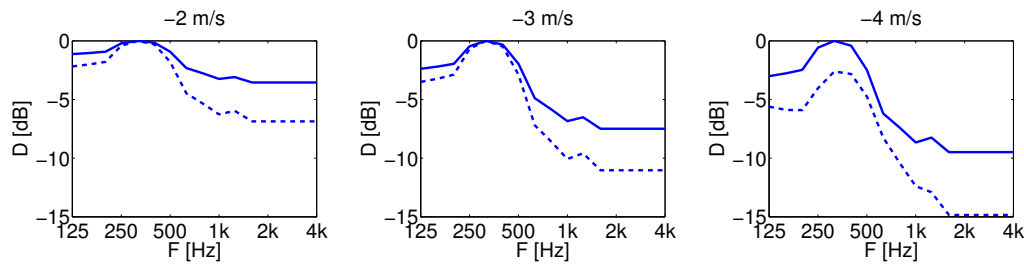


Abbildung 2.11: Mit *sonX* berechneter Meteoeffekt D_{met} für eine flache Ausbreitungssituation mit Quellenhöhe 0.4 m und Empfängerhöhe 4.0 m bei 4 m/s Gegenwind in 10 m Höhe. Angegeben sind die spektralen Pegeldifferenzen bezüglich neutraler Ausbreitung für den 150 m entfernten Empfängerpunkt. Die ausgezogene Kurve zeigt den Meteoeffekt bei geringer Bodenrauigkeit mit $z_0 = 0.005$ m, die gestrichelte Kurve den Meteoeffekt mit $z_0 = 0.1$ m.

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 m [21]. Diese beiden Eckwerte wurden für die Berechnung verwendet. Abbildung 2.11 zeigt die resultierenden Meteoeffekte. 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.

Meteoeffekt aufgrund von Temperatur- und Windgradienten bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen

Bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen wird als Meteoeffekt 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 2.3.5). Dabei wird für jede Pfadstrecke (unter neutralen Ausbreitungsbedingungen) der aufgrund des Meteeinflusses gekrümmte Schallstrahl mit gleichem Start- und Endpunkt gesucht. Abbildung 2.12 illustriert in zwei Schritten die Suche nach dem Direktschallpfad über eine Hinderniskante. Gezeigt ist das Gelände inklusive einer Hinderniskante im Profil mit einem Quellen- und einem Empfangspunkt. Abbildung 2.12 (a) illustriert die Suche nach dem Direktschall-Pfad zur Hinderniskante, Abbildung 2.12 (b) zeigt die Pfad-Suche von der Hinderniskante zum Empfänger.

Die Analyse des gekrümmten Direktschall-Pfades in Abbildung 2.12 (c) umfasst die Längen d_Q und d_E der Pfadabschnitte sowie der Winkel β zwischen den Tangenten an den ein- und ausfallenden Schallstrahlen auf der Hinderniskante. Die Beugungssituation an der Hinderniskante wird durch eine winkel- und längentreue Transformation nicht wesentlich beeinflusst. Daher entspricht die Hinderniswirkung der transformierten Situation unter neutralen Ausbreitungsbedingungen der Hinderniswirkung der originalen Situation unter den ursprünglichen förderlichen Ausbreitungsbedingungen. Hinderniskanten können sich aufgrund der Pfadstreckung aber so verschieben, dass sie die Sichtverbindung nicht länger unterbrechen. Dies entspricht

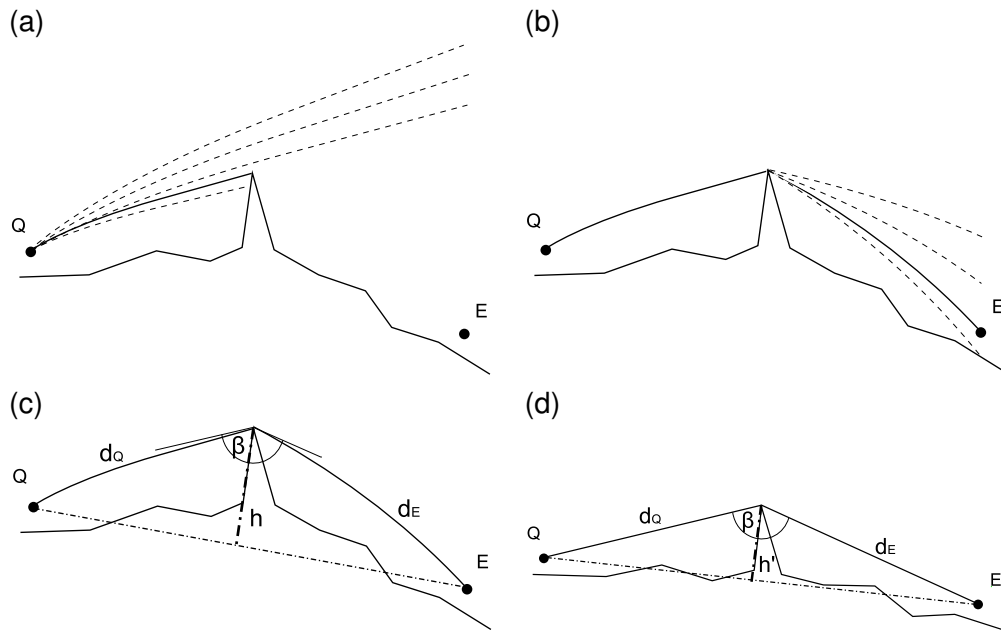


Abbildung 2.12: Suche nach dem Direktschall-Pfad bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen über eine Hinderniskante mit dem iterativen Strahlverfolgungsverfahren gemäss Abschnitt 2.3.5 vom Quellenpunkt Q zum Empfangspunkt E (Graphik (a) und (b)). Anschliessend folgt eine längen- und winkeltreue Transformation des Direktschall-Pfades (Graphik (c) und (d)).

der Situation, bei der aufgrund der gekrümmten Schallwege ein Hindernis überstiegen wird. Abbildung 2.12 (d) zeigt den transformierten Pfad mit der reduzierten Hinderniskantenhöhe h' .

Für den transformierten Schallpfad wird mit dem Verfahre nach ISO 9613-2 gemäss Gleichung 2.9 eine spektrale Hinderniswirkung $D_{z,\text{Meteo}}$ berechnet. Die Pegeldifferenz zur Hinderniswirkung $D_{z,\text{Neutral}}$, welche unter Annahme neutraler Meteobedingungen berechnet wird, stellt den gesuchten Meteeffekt D_{met} dar:

$$D_{\text{met}} = D_{z,\text{Neutral}} - D_{z,\text{Meteo}} \quad (2.45)$$

Begrenzung des Meteeffektes aufgrund von Temperatur- und Windgradienten

Um Extremwerte in speziellen Situationen zu vermeiden, werden sowohl positive (verstärkende) als auch negative Meteeffekte begrenzt. Die Einstellung erfolgt durch die Parameter MeteoDmax und MeteoDmin im Parameterdatensatz (siehe Anhang A.2). Als Standardwerte wird eine Parametersetzung von -20 dB bzw. +15 dB empfohlen. Im Falle negativer, d.h. Pegelsenkender Effekte erfolgt die Begrenzung spektral. Es muss dabei folgende Bedingung erfüllt sein (mit der Frequenz f und dem Parameter D_{min}).

$$D_{\text{met}} > \begin{cases} D_{\text{min}} - 3\text{dB} & \text{für } D_{\text{min}} > -0.1 \cdot f \\ -0.1 \cdot f - 3\text{dB} & \text{für } D_{\text{min}} \leq -0.1 \cdot f \end{cases} \quad (2.46)$$

Bei 100 Hz resultiert in diesem Fall somit ein maximaler negativer Meteeffekt von -13 dB und oberhalb von 200 Hz ein Wert von -23 dB.

Unberücksichtigte Effekte

Ergänzend sollen Effekte aufgeführt werden, welche in speziellen Ausbreitungssituationen bedeutend sein können, jedoch in *sonX* nicht berücksichtigt werden.

In *sonX* 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. Entschärfend ist der Umstand, dass der A-Pegel relativ unempfindlich auf kleine Frequenzverschiebungen des Interferenzmusters reagiert.

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.

Kombination von Meteeffekten und Hinderniswirkungen ohne Unterbrechung der Sichtverbindung

In Abschnitt 2.2.4 wurde eine Erweiterung der Hindernisberechnung eingeführt, welche auch in Situationen ohne Unterbrechung der Sichtverbindung eine Abschirmwirkung ausweisen kann. Diese hat im Falle förderlicher Bedingungen auch Auswirkungen auf die Berechnung des Meteeffektes. Wurde im Modul BASIC eine massgebliche Kante unterhalb der Sichtlinie gefunden, so wird nun ein Schallstrahl gesucht, der den Weg von der Quelle über diese Kante zum Empfänger findet. Anschliessend kommt wie vorgängig beschrieben das Verfahren zur Geländetransformation zur Anwendung. Bei hinderlichen Bedingungen ergeben sich keine Änderungen des Algorithmus und es wird wie bis anhin der Strahl gesucht, welcher dem Empfänger möglichst nahe kommt, ohne spezielle Berücksichtigung der erwähnten Kante. Diese Implementation zeigt folgendes Verhalten:

- Die Geländetransformation im förderlichen Fall führt dazu, dass Veränderungen in der Hinderniswirkung auch im vorliegenden Spezialfall ohne Unterbrechung der Sichtverbindung korrekt wiedergegeben werden. Allerdings stellt sich die Frage, welcher Strahl der Massgebliche ist. Alternativ zur Strahlsuche über die Hinderniskante könnte auch der Strahl ohne Bodenkontakt verwendet werden. Dieser weist aber schwächere Krümmungen auf, gerade wenn er hoch über Boden verläuft, was entsprechend auch nur zu kleineren wetterinduzierten Pegelerhöhungen führt. Aus diesem Grund wurde der Variante einer Strahlsuche mit zwingendem Terrainkontakt der Vorzug gegeben.
- Zusätzlich stellt sich die Frage, welche der Beugungskanten unterhalb der Sichtlinie denn im Endeffekt entscheidend ist. Es ist vorstellbar, dass im homogenen Fall eine Kante in der Mitte zwischen Quelle und Empfänger den kleinsten Umweg aufweist. Im Fall eines gekrümmten Strahles bzw. eines entsprechend gekrümmten Terrains kann aber eine andere Kante sich als massgeblich erweisen. Es wurde bei der Implementation eine Variante geprüft, die Strahlsuchen für mehrere Hinderniskanten durchgeführt hätte. Aus Rechenzeitgründen wurde diese Variante jedoch verworfen. Die Konsequenz daraus ist, dass eine Hinderniswirkung bei freier Sichtverbindung allenfalls zu schnell aufgehoben wird.

- Bei hinderlichen Bedingungen tritt kein Effekt auf, wenn der gekrümmte Strahl immer noch den Empfänger trifft. Hier würde man aufgrund der Nähe zum Boden aufgrund der Hindernisformel eine Pegelreduktion erwarten. Allerdings zeigen Simulationen mit Schattenzonen, dass es vielmehr in diesem Bereich sogar lauter werden kann (siehe dazu auch die Diskussion um Abbildung 2.10). Deshalb erscheint diese Vereinfachung akzeptabel.
- Falls bei Sichtverbindung aufgrund der hinderlichen Wetterbedingungen kein Strahl den Empfänger trifft, kommt die Schattenzonenformel zur Anwendung. Im Vergleich zu einer Berechnungsvariante ohne Aktivierung des Schalters *NegZobstacles*, d.h. ohne Berücksichtigung von Hinderniswirkungen auch in Fällen mit Sichtverbindung, resultieren tiefere Immissionspegel, da sich die Pegelreduktionen aufgrund der bodennahen Ausbreitung der Module BASIC und METEO addieren. Dieses Verhalten erscheint jedoch konsistent, da die Schattenzonenformel ausgehend von wellentheoretischen Simulationen entwickelt wurde, welche die Interaktion mit dem Untergrund sowohl für homogene als auch inhomogene Atmosphären gleich behandeln.

Optionale Modifikation der Vertikalprofile der effektiven Schallgeschwindigkeit zur Vermeidung von Inkonsistenzen

Sowohl bei den erwähnten LinLog-Profilen von Temperatur und Wind als auch bei absolut definierten Profilen kann es dazu kommen, dass sich bei den Schallgeschwindigkeitsprofilen kein einheitlicher Trend ergibt. Während Profile, welche in Bodennähe hinderlich sind diese Eigenschaft auch in grösseren Höhen behalten, drehen bodennah förderliche Profile in der Regel ab einer bestimmten Höhe auf hinderlich. Dies liegt daran, dass sich lokale Inversionslagen nur in Bodennähe zeigen und auch die Windgradienten mit der Höhe in der Tendenz immer kleiner werden, so dass schlussendlich die adiabatische Temperaturabnahme mit der Höhe zum dominanten Einflussfaktor wird. Bei der Strahlverfolgung können solche Profile mit wechselndem Trend dazu führen, dass Schallstrahlen zwar ober- und unterhalb eines Gebietes passieren, aber Empfangspunkte innerhalb dieser Linsen nie erreicht werden. Diese Situationen werden durch den Algorithmus fälschlicherweise als akustische Schattenzonen interpretiert. Um diese Unstetigkeiten bei der Schallstrahlsuche zu vermeiden, wurde deshalb eine 'Schönungsoption' integriert, welche zu eindeutigen Schallgeschwindigkeitsprofilen führt. (Diese kann über den Parameter *MeteoModify* ein- bzw. ausgeschaltet und die Methode gewählt werden, siehe Anhang A.2.) Aus dem Vergleich der Schallgeschwindigkeit auf 0 und 20 m wird dabei ermittelt, ob es sich um ein Profil mit mehrheitlich zunehmender oder abnehmender Schallgeschwindigkeit mit der Höhe handelt. Nach dieser Zuordnung werden in einer Auflösung von 10 cm die Gradienten bestimmt und solche, welche dem allgemeinen Trend zuwider laufen auf Null gesetzt. Bei einer Parametersetzung *MeteoModify*=1 wird der dominante Trend pro Meteosituation und Ausbreitungsrichtung für jeden Untergrundtyp individuell bestimmt. Bei einer Parametersetzung *MeteoModify*=2 wird der dominante Trend pro Meteosituation und Ausbreitungsrichtung nur für den Referenz-Untergrundtyp, typischerweise Grasland, bestimmt und dann auf alle Untergrundtypen angewandt.

Die Unterscheidung in *MeteoModify*=1 und 2 liegt darin begründet, dass sich z.T. unterschiedliche Trends je nach Untergrundtyp ergeben können. So können die Bedingungen über Grasland förderlich, über Wald aber hinderlich sein. Im Falle von *MeteoModify*=1 kann dies bei wechselndem Untergrund zu den im obigen Abschnitt beschriebenen Inkonsistenzen bei der Strahlsuche führen. Umgekehrt resultiert allenfalls über Wald ein falscher Trend, wenn *MeteoModify*=2 gewählt wird. Dieser Konflikt lässt sich nicht vollständig auflösen. Als Standardeinstellung wird *MeteoModify*=2 empfohlen.

Die Setzung des Parameters hat Auswirkungen auf die Fallunterscheidung beim Strahlsuche-Algorithmus, da bei *MeteoModify*=2 der allgemeine Trend (förderlich oder hinderlich) pro Meteosituation für eine bestimmte Ausbreitungsrichtung bereits von vornherein bekannt ist und bei *MeteoModify*=1 sich dieser je nach Untergrundtyp ändern kann. Abbildung 2.13 zeigt die Fallunterscheidung mit *MeteoModify*=2, dies im Vergleich zu Abbildung 2.7 auf Seite 34 mit *MeteoModify*=0 oder 1.

Hinweis:

Die so modifizierten Profile werden nicht zur Berechnung der Luftdämpfung verwendet.

2.3.6 Verwendung gekrümmter Schallstrahlen zur Berechnung der Bewuchsdämpfung

Die Bewuchsdämpfung $A_{\text{fol,met}}$ wird ebenfalls mit den distanzabhängigen Dämpfungstermen gemäss Tabelle 2.2 auf Seite 23 berechnet. Als Erweiterung des in der ISO-Norm 9613-2 [2] vorgeschlagenen Verfahren wird jedoch die effektiv im Wald zurückgelegte Strecke des Direktschalls gemäss dem in Abschnitt 2.3.5 vorgestellten Ray-tracing-Verfahren verwendet. Die Limitierung der im Wald zurückgelegten Ausbreitungsstrecke kann analog zur BASIC-Berechnung über den Parameter *FoliageDistLimit* frei gewählt werden (siehe Anhang A.2). Als Standardeinstellung wird aber 200 m gemäss der ISO 9613-2 empfohlen. Die Waldhöhe kann über den Parameter *ForestHeight* definiert werden. Der Parameter wird auch bei der Berechnung von Waldreflexionen verwendet und sollte deshalb den Vorgaben aus Abschnitt 2.5 entsprechend auf 20 m gesetzt werden.

Hinweis:

Falls kein Strahl gefunden wird, der den Empfänger erreicht, d.h. im Falle einer akustischen Schattenzone, wird auf eine Modifikation der Bewuchsdämpfung verzichtet und $A_{\text{fol,Meteo}}$ A_{fol} gleichgesetzt, d.h. es wird keine entsprechende Meteoerhöhung ausgewiesen. Um das Auftreten von Sprüngen zu reduzieren, wird eine Ausblendfunktion verwendet, welche erst bei einer Schattenzonendistanz von 0.1 m die Walddämpfung der BASIC-Berechnung vollständig übernimmt. Zwischen 0 und 0.1 m wird ein linearer Übergang der Walddämpfungen von METEO zu BASIC gewährleistet.

2.3.7 Meteorologische Einflüsse auf die Luftdämpfung

Die Luftdämpfung wird unter Berücksichtigung des lokalen Wetters ebenfalls gemäss ISO 9613-1 [1] berechnet, analog zum Ansatz im Basismodell gemäss Abschnitt 2.2.3. Im Gegensatz zum Basismodell werden jedoch nicht die Standardwerte von Temperatur und Feuchte verwendet, sondern vom Benutzer entsprechend den lokalen Bedingungen definierte Werte. Zusätzlich wird berücksichtigt, dass sich Temperatur und Feuchte mit der Höhe über Boden verändern. Als Basis werden dazu die Vertikalprofile des Standard-Bodentyps 'Z_Uebrige' (siehe Anhang A.4) der entsprechenden Wetterlage verwendet. Die Luftdämpfungen werden dabei für Höhenstufen von 0-1 m, 1-3 m, 3-6 m, 6-12 m, 12-25 m, 25-50 m und 50-100 m für die Terzmittenfrequenzen vorberechnet und tabelliert, wobei in 1m-Schritten die Luftdämpfung bestimmt und der Mittelwert pro Höhenstufe abgespeichert wird.

Pro Ausbreitungssituation wird die mittlere Ausbreitungshöhe über Boden aus dem Direktschallpfad bestimmt, wobei gerade Schallstrahlen zum Einsatz kommen. Diese Vereinfachung sowie der Verzicht auf eine Variation der Vertikalprofile je nach Untergrund erscheint im Hinblick auf die kleinen resultierenden Abweichungen und auf die Bedeutung des Effektes als

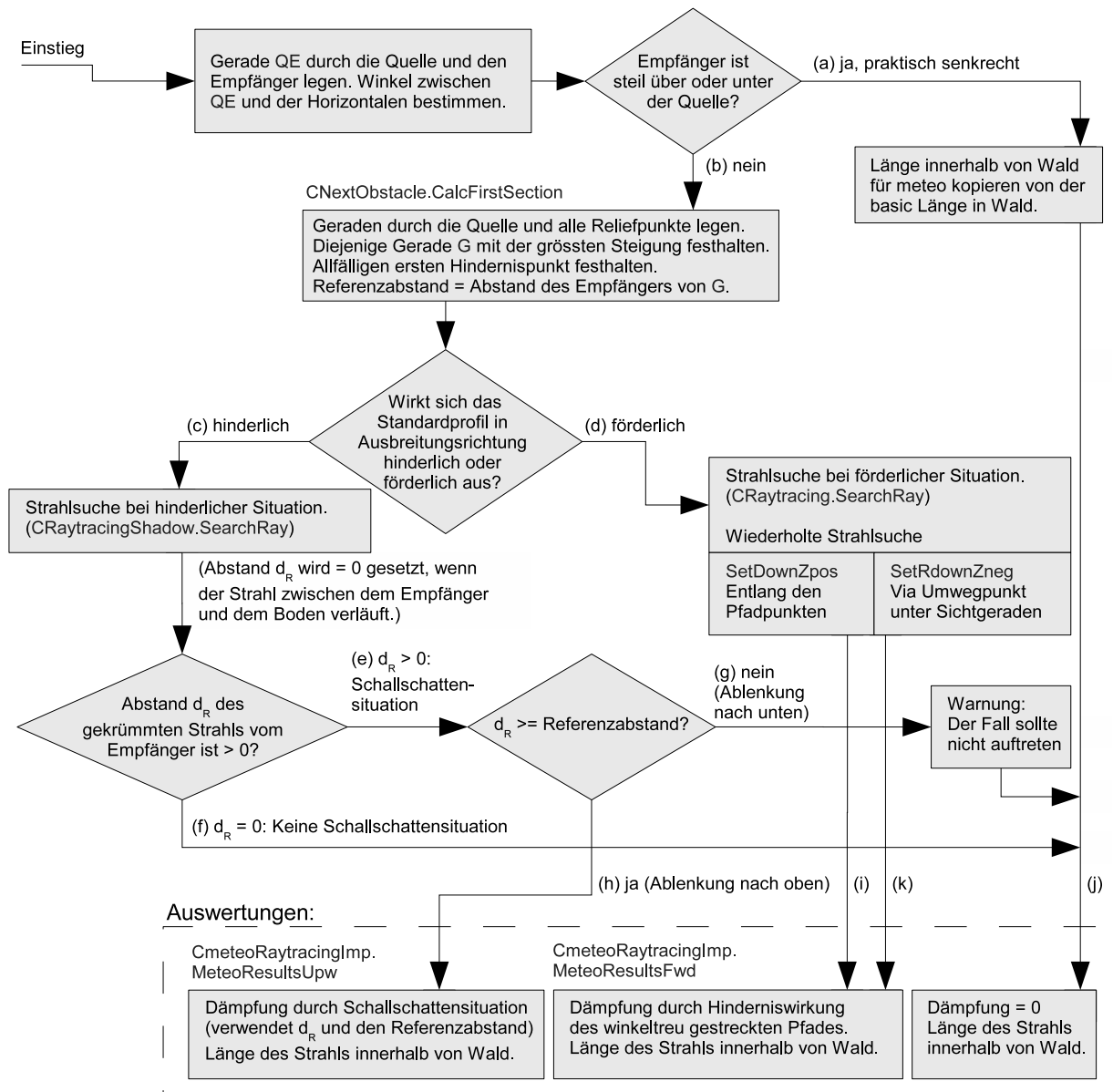


Abbildung 2.13: Fallunterscheidung beim Strahlverfolgungs-Algorithmus bei der Parametereinstellung *MeteoModify*=2. (Ergänzt sind die dabei zur Anwendung kommenden Prozeduren.)

Ganzem zulässig. Die resultierende mittlere Ausbreitungshöhe wird einer Höhenstufe zugeordnet und die vom Schall zurückgelegte Distanz wird mit den entsprechenden Dämpfungen pro Laufmeter multipliziert.

Für die Anwendung des Modells zur Berechnung von Fluglärm, wo sich die Quellen in grosser Höhe befinden und sehr grosse Ausbreitungsdistanzen auftreten, wurde die Methode zur Ermittlung der Luftdämpfung im Modul METEO erweitert.

- Es werden zusätzliche Höhenstufen in 100 m Schritten bis zu der Höhe ergänzt, welche mit dem Parameter *AatmMaxHeight* festgelegt wird.
- Die Luftdämpfung wird pro Höhenstufe berechnet und in der Tabelle *AirLookUp* abgelegt.
- Werden LinLog-Profile zur Definition der Meteobedingungen verwendet, so wird die Luftdämpfung für sämtliche Bodentypen und die damit verknüpften Temperatur- und Feuchtwerte bestimmt.

Der Berechnungsablauf wird wie folgt durchgeführt:

- Pro Höhenstufe und Bodentyp wird die in der Höhenstufe zurückgelegte Weg bestimmt und mit der zugehörigen spektralen Luftdämpfung pro Meter multipliziert.
- Die Luftdämpfungen sämtlicher Höhenstufen des Schallausbreitungspfades werden anschliessend aufsummiert.

Diese verfeinerte Methode zur Berechnung der Luftdämpfung wird über den Parameter *AatmMorePrecision* aktiviert. Befindet sich eine Quelle bzw. ein Empfänger höher als der Bereich in welchem Meteodaten definiert wurden (oberhalb von *AatmMaxHeight*), so werden die Luftdämpfungswerte der letzten tabellierten Höhenstufe verwendet.

2.4 Reflexionen an künstlichen Objekten wie Gebäuden und Schallschirmen

2.4.1 Einleitung

Eine Schallwelle, die auf ein künstliches Objekt auftrifft, wird je nach Materialeigenschaften und Frequenz zu unterschiedlichen Anteilen reflektiert oder absorbiert; die Transmission als dritte Variante kann in aller Regel vernachlässigt werden. Gebäude weisen in den meisten Fällen akustisch harte Oberflächen auf, weshalb kaum Absorption auftritt und die Schallwellen praktisch vollständig reflektiert werden. Bei speziell konditionierten Oberflächen wie z.B. absorbierenden Lärmschirmen wird die Reflexion hingegen deutlich gemindert.

Bei Reflexionen gilt es zwischen spiegelnden und diffusen Reflexionen, d.h. Streuungen zu unterscheiden. Der fundamentale Unterschied zwischen spiegelnden und diffusen Reflexionen liegt im "Gedächtnis". Während diffuse Reflexionen die auf den Reflektor auftreffende Leistung unabhängig von der Einfallrichtung weitergeben, hängt bei spiegelnder Reflexion die bevorzugte Abstrahlrichtung vom Schalleinfall und damit bei Mehrfachreflexionen von der ganzen Vorgeschichte ab. Diese Erinnerung bei spiegelnder Reflexion ist in der spezifischen Schalldruckverteilung auf jeder Reflektoroberfläche gespeichert. Für die Modellierung spiegelnder Reflexionen hat dieser Umstand entscheidende Bedeutung. Die klassische Lösung zu diesem Problem verwendet die Konstruktion von Spiegelquellen, allerdings unter Vernachlässigung

der endlichen Reflektorgrössen.

Hinsichtlich der Bedeutung der Reflexionen sind zwei Ausbreitungssituationen zu unterscheiden:

Im ersten Fall besteht eine direkte Sichtverbindung vom Empfängerpunkt zur Quelle, z.B. in einer Häuserschlucht. Die Reflexionsanteile (auch mehrfach) liegen dann in der gleichen Grössenordnung wie der Direktschall, so dass sich Unsicherheiten der Reflexionsberechnung abgeschwächt auf den Gesamtfehler auswirken. Vom akustischen Standpunkt aus gesehen wird diese Situation insofern vereinfacht, als keine Abschirmwirkungen zu berücksichtigen sind.

Der zweite Fall ist dadurch gekennzeichnet, dass der Direktschall weitgehend abgeschirmt ist, der Empfänger aber über Reflexionen mit bedeutenden Energieanteilen versorgt wird. In diesen Situationen kommt der präzisen Berechnung der Reflexionsanteile eine sehr grosse Bedeutung zu, da diese praktisch ausschliesslich den Immissionspegel bestimmen.

Ausgehend von diesen grundsätzlichen Überlegungen wurden die nachfolgenden Modellanforderungen formuliert und in Form eines Berechnungsalgorithmus umgesetzt, der in [22] bzw. [23] publiziert wurde.

2.4.2 Modellanforderungen

Das Reflexionsmodell muss in der Lage sein, die Auswirkungen von Reflexionen (sowohl einfach als auch mehrfach) auf das Schallfeld korrekt abzubilden. Dabei sollten folgende Aspekte mitberücksichtigt werden:

- Modellierung von diffus streuenden und spiegelnden Reflexionen, wobei auch Mischformen auftreten können. Die Aufteilung in einen diffusen und einen spiegelnden Anteil sollte frequenzabhängig sein.
- Modellierung des Effekts der endlichen Reflektorfläche, insbesondere bei spiegelnder Reflexion. Bei streifendem Einfall und tiefen Frequenzen können benötigte Flächen für vollständige Reflexionen deutlich grösser als typische Fassadenflächen werden.
- Modellierung des Effekts einer Teilreflexion, auch wenn der Reflexionspunkt nicht auf der Reflektorfläche liegt.

Abgesehen von numerischen wellentheoretischen Ansätzen mit genügend feiner Diskretisierung (typisch $1/6$ bis $1/10$ der kürzesten Wellenlänge) können obige Modellanforderungen nicht sinnvoll mit einem einzigen universellen Formalismus erfüllt werden. Deshalb wird hier eine Aufteilung in inkohärente (diffuse) bzw. kohärente (phasenempfindliche) Anteile mit entsprechend separater Modellierung angenommen. Für Frequenzen mit Wellenlängen grösser als ca. die vierfache Reflexionsstrukturtiefe wird kohärent, für Frequenzen mit kleineren Wellenlängen inkohärent gerechnet. Beiden Ansätzen ist gemein, dass sie die Begrenzungsflächen geeignet diskretisieren (Abbildung 2.14) und iterativ einen Intensitäts- bzw. Schalldruckaustausch vornehmen.

Vereinfachend wird angenommen, dass:

- die Reflexion am Boden verlustlos mit einer Verdopplung des Schalldruckeffektivwertquadrats erfolgt. Dies kann durch Verdopplung der Quellenleistung bzw. Annahme der Abstrahlung in den Halbraum abgebildet werden.

- Reflexionen nur bei existierender Sichtverbindung auftreten (d.h. Beugungseffekte werden ignoriert).
- die Luftdämpfung basierend auf dem Abstand Quelle-Empfänger berechnet wird.

Die Strategie wird wie folgt umgesetzt:

1. In einem ersten Schritt werden die Schalldruckverteilungen auf den Reflektorflächen berechnet.
2. Für einen Empfängerpunkt im Raum wird dann der Reflexionsanteil durch Oberflächenintegration über die Reflektoren bestimmt. Für inkohärente Reflexionen wird über die Oberflächenintensitäten integriert, für kohärente Reflexionen wird mittels Kirchhoff-Helmholtz-Integral über den Schalldruck integriert.
3. Verlustbehaftete Reflexionen werden durch eine entsprechende Dämpfung der Oberflächen-Schalldrucke und -Intensitäten berücksichtigt.

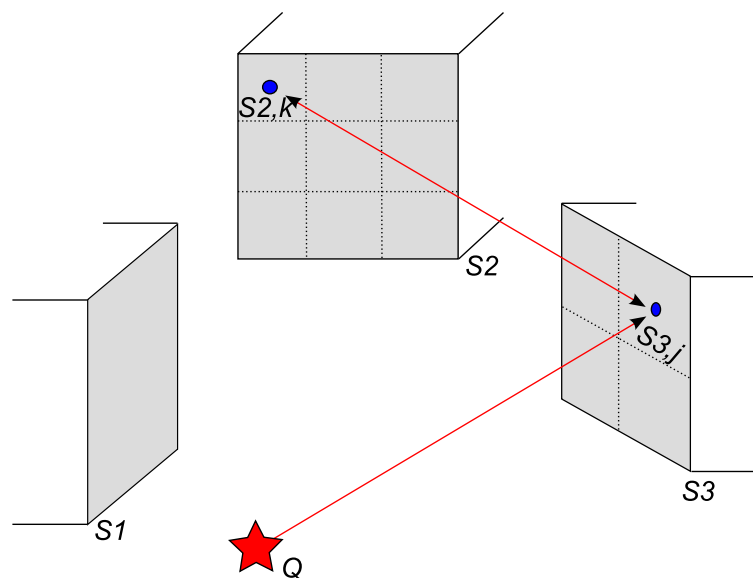


Abbildung 2.14: Situation zur Schallausbreitung mit Reflexionen. Die Geometrie ist durch die Quelle Q und drei reflektierende Flächen S_1, \dots, S_3 gegeben. Jede Fläche S_i wird in eine geeignete Zahl Teilflächen $S_{i,j}$ unterteilt.

2.4.3 Diffus-Modell für inkohärente Reflexionsanteile

Für die Modellierung der inkohärenten Reflexionsanteile muss die auf eine Reflektorfläche auftreffende Schallleistung ermittelt werden. Diese ergibt sich aus dem Produkt der Fläche und der Intensitätsnormalkomponente. Diese wiederum ist durch das Produkt der Normalkomponenten der Schallschnelle und dem Schalldruck gegeben. Die Normalkomponente der Schallschnelle hängt von der letzten und nur der letzten Absenderposition ab. Ein Algorithmus der diesen Energieaustausch nachbildet, muss kein weiter zurückreichendes Gedächtnis aufweisen. Der Fall des ganz streifenden Schalleinfalls an einem Reflektor führt zu einer verschwindenden Reflexion, da die Normalkomponente der Schnelle verschwindet.

Für die auf ein Flächenelement auftreffende Normalkomponente der Intensität kann geschrieben werden:

$$dI = \frac{W}{4\pi r_1^2} \cos \phi \quad (2.47)$$

mit

W	Leistung der Quelle
r_1	Abstand Quelle-Flächenelement
ϕ	Winkel der Verbindung Quelle-Flächenelement zur Flächennormalen

Die auf das Flächenelement auftreffende Leistung dW ergibt sich durch Multiplikation mit der Fläche dS . Es wird angenommen, dass diese Leistung gemäss dem Lambert'schen Gesetz zurückgeworfen wird. Die Intensität $dI(1m, \psi)$ in 1 m Abstand unter dem Winkel ψ bzgl. der Flächennormalen ist gegeben durch:

$$dI(1m, \psi) = I_0 \cos \psi \quad (2.48)$$

Die Konstante I_0 in Gleichung 2.48 wird bestimmt unter Ausnützung der Kenntnis, dass die reflektierte Leistung gleich der einfallenden ist. Dazu wird eine Integration über eine Halbkugel mit 1 m Radius vollführt und der einfallenden Leistung dW gleichgesetzt:

$$\int_{\text{Halbkugelfl.}} dI(1m, \psi) = \int_0^{\pi/2} I_0 \cos \psi 2\pi \sin \psi d\psi = I_0 2\pi \left[\frac{\sin^2 \psi}{2} \right]_0^{\pi/2} = I_0 \pi \quad (2.49)$$

Aus der Gleichsetzung

$$dW = I_0 \pi \quad (2.50)$$

lässt sich I_0 bestimmen. Die von dS herrührende Intensität an einem Empfangspunkt im Abstand r_2 unter dem Winkel ψ bzgl. der Flächennormalen wird schliesslich

$$dI(r_2, \psi) = \frac{dW}{\pi} \cos(\psi) \frac{1}{r_2^2} \quad (2.51)$$

Formulierung des Algorithmus

Als Schallfeldgrösse wird die Normalkomponente der Intensität auf den Begrenzungsflächen verwendet.

Schritt 1: Die Flächen S_i werden je in Teilflächen $S_{i,j}$ der Grösse ΔS unterteilt (Abbildung 2.14). i bezeichnet die Flächennummer, j steht für die Nummer der Teilfläche.

Schritt 2: Die nullte Schätzung der Intensitätsverteilung $I_{0,i,j}$ wird 0 gesetzt. Die erste Schätzung der Intensitätsverteilung $I_{1,i,j}$ auf den Flächen S_i wird gefunden, indem eine Ausbreitung von der Quelle zur Fläche berechnet wird:

$$I_{1,i,j} = \frac{W_q}{4\pi r^2} \cos(\psi) \quad \psi \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.52)$$

mit

W_q	Leistung der Quelle
r	Abstand von der Quelle
ψ	Winkel der Geraden von der Quelle zum Flächenpunkt mit der Flächennormalen.

Für Winkel $\psi > \frac{\pi}{2}$ wird $I = 0$ gesetzt.

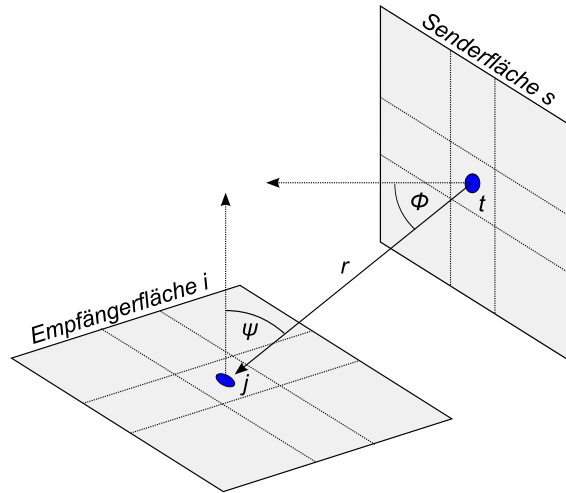


Abbildung 2.15: Situation zum iterativen Aufdatierungsprozess. Die Geometrie zeigt den von Teilfläche t auf der Oberfläche s herrührenden Beitrag an die Teilfläche j auf der Oberfläche i .

Schritt 3: Die n -te Schätzung der Intensitätsverteilung $I_{n,i,j}$ auf den Flächen S_i wird gefunden, indem die Beiträge der letzten Änderungen der Oberflächenpunkte dazu addiert werden:

$$I_{n,i,j} = I_{n-1,i,j} + \frac{1}{\pi} \sum_s \sum_t (1 - \alpha_s) (I_{n-1,s,t} - I_{n-2,s,t}) \frac{1}{r^2} \cos(\phi) \cos(\psi) \Delta S \quad \psi \leq \frac{\pi}{2}, \phi \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.53)$$

mit

ϕ	Winkel der Geraden vom Sender- zum Empfängerpunkt mit der Normalen zur Senderfläche.
α_s	Absorptionskoeffizient der Senderfläche s .

Man beachte, dass die Beiträge der Nachbarpunkte auf der eigenen Fläche S_i verschwinden. Für $\psi > \frac{\pi}{2}$ oder $\phi > \frac{\pi}{2}$ wird $I = 0$ gesetzt.

Schritt 4: Die in Gleichung 2.53 gefundenen Intensitäten werden in Schalldrucke umgerechnet. Es gilt

$$I \rho c = p'^2 \quad (2.54)$$

mit

p'	Schalldruck im Freifeld
------	-------------------------

Da auf der harten Oberfläche eine Schalldruckverdopplung stattfindet, ergibt sich schliesslich:

$$p = 2\sqrt{I \rho c} \quad \text{bzw.} \quad p^2 = 4I \rho c \quad (2.55)$$

2.4.4 Kirchhoff-Modell für kohärente Reflexionsanteile

Die Modellierung der kohärenten Reflexionsanteile erfolgt mit einem phasenempfindlichen Modell - in der Folge als *Kirchhoff-Modell* bezeichnet - das mathematisch auf dem Kirchhoff-Helmholtz-Integral basiert. Die Schallfeldberechnung erfolgt im Frequenzbereich.

Gemäss dem Kirchhoff-Helmholtzintegral (Gleichung 2.56) kann der Schalldruck $\check{p}(x, y, z, \omega)$ der Kreisfrequenz ω an einem beliebigen Beobachtungspunkt $< x, y, z >$ bestimmt werden, wenn auf einer geschlossenen Hüllfläche S , die den Punkt einschliesst, sowohl die Normalkomponente $\check{v}_S(\omega)$ der Oberflächenschnelle als auch der Oberflächenschalldruck $\check{p}_S(\omega)$ bekannt sind. Die Variable r bezeichnet den Abstand vom Oberflächenpunkt zum Beobachtungspunkt, ρ_0 steht für die Dichte des Mediums und c für die Schallgeschwindigkeit.

$$\check{p}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(j\omega\rho_0\check{v}_S(\omega) \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} + \check{p}_S(\omega) \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} \right) dS \quad (2.56)$$

Das Kirchhoff-Helmholtz Integral lässt sich mit folgenden Überlegungen in eine hier geeignetere Darstellung überführen:

$$\begin{aligned} k &= \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \Rightarrow e^{-j\omega r/c} = e^{-jkr} \\ \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) &= \frac{1}{r^2} \left(r \frac{\partial}{\partial n} (e^{-jkr}) - e^{-jkr} \frac{\partial r}{\partial n} \right) \\ &= \frac{1}{r^2} \left(-jkr \frac{\partial r}{\partial n} e^{-jkr} - e^{-jkr} \frac{\partial r}{\partial n} \right) = \frac{1}{r^2} e^{-jkr} (-jkr - 1) \frac{\partial r}{\partial n} \end{aligned} \quad (2.57)$$

In (2.57) entspricht $\partial r / \partial n$ der Projektion von r auf die Normalenrichtung \vec{n} . Damit wird $\partial r / \partial n = -\cos \phi$ wenn ϕ dem Winkel zwischen der Normalenrichtung \vec{n} und der Richtung zum Aufpunkt (x, y, z) entspricht.

Damit wird das Kirchhoff-Helmholtz Integral:

$$\check{p}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(j\omega\rho_0\check{v}_S(\omega) \frac{e^{-jkr}}{r} + \check{p}_S(\omega) \frac{1+jkr}{r^2} \cos \phi e^{-jkr} \right) dS \quad (2.58)$$

Obwohl später die Absorptionseigenschaft der Oberflächen berücksichtigt wird, gilt vorerst die Annahme, dass sämtliche Oberflächen schallhart sind, d.h. die Oberflächenschnelle verschwindet. In Gleichung 2.58 kann deshalb der Term mit der Schnelle ignoriert werden. In einer konkreten Situation werden die Oberflächenschalldrucke wie folgt iterativ bestimmt:

Formulierung des Algorithmus

Schritt 1: Die Flächen S_i werden je in Teilflächen $S_{i,j}$ der Grösse ΔS unterteilt (Abbildung 2.14).

Schritt 2: Die erste Schätzung der Schalldruckverteilung $\check{p}_{1,i,j}$ auf den Flächen S_i wird gefunden, indem eine Ausbreitung von der Quelle zur Fläche berechnet wird:

$$\check{p}_{1,i,j} = 2 \frac{j k \rho c Q}{4\pi r} e^{-jkr} \quad \psi \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.59)$$

mit

Q	Volumenfluss
ρ_0	Dichte
c	Schallgeschwindigkeit
k	Wellenzahl
ψ	Winkel der Geraden von der Quelle zum Flächenpunkt mit der Flächennormalen

ψ wird nur für die Kontrolle der Gültigkeit benötigt und geht ansonsten nicht in die Rechnung ein. Für Winkel $\psi > \frac{\pi}{2}$ wird $\check{p} = 0$ gesetzt. Der Faktor 2 beschreibt die Schalldruckverdopplung auf der harten Oberfläche.

Der Volumenfluss ergibt sich aus der Quellenleistung W gemäss:

$$Q = \sqrt{\frac{W 4\pi}{k^2 \rho c}} \quad (2.60)$$

Schritt 3: Die n -te Schätzung der Schalldruckverteilung $\check{p}_{n,i,j}$ auf den Flächen S_i wird gefunden, indem die Beiträge der letzten Änderungen der Oberflächenpunkte dazu addiert werden:

$$\check{p}_{n,i,j} = \check{p}_{n-1,i,j} + 2 \frac{1}{4\pi} \sum_s \sum_t \sqrt{1 - \alpha_s} (\check{p}_{n-1,s,t} - \check{p}_{n-2,s,t}) \frac{1 + jkr}{r^2} \cos(\phi) e^{-jkr} \Delta S \quad \psi \leq \frac{\pi}{2}, \phi \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.61)$$

mit

α_s	Absorptionskoeffizient der Senderfläche s
ϕ	Winkel der Geraden vom Sender- zum Empfängerpunkt mit der Normalen zur Senderfläche
ψ	Winkel der Geraden von der Quelle zum Flächenpunkt mit der Flächennormalen

Für $\psi > \frac{\pi}{2}$ oder $\phi > \frac{\pi}{2}$ wird $\check{p} = 0$ gesetzt. Man beachte, dass die Beiträge der Nachbarpunkte auf der eigenen Fläche S_i verschwinden ($\cos(\pi/2) = 0$).

2.4.5 Auswertung des Dämpfungsterms

Für die Ermittlung des Dämpfungsterms $A_{\text{Reflect,L}}$ wird von einer Quellenleistung 10^{-12}W ausgegangen. Damit ergibt sich ein Immissionspegel L_p von

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) - A_{\text{atm}} \quad (2.62)$$

wobei p dem Schalldruck gemäss Gl. 2.55 bzw. 2.61 und p_0 dem Bezugsdruck $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ entspricht. A_{atm} ist die Luftdämpfung für den Ausbreitungspfad Quelle - dominanter Reflektor - Empfänger. Daraus folgt für den Dämpfungsterm:

$$A_{\text{Reflect,L}} = -L_p \quad (2.63)$$

2.4.6 Diskretisierung

Die Feinheit der Diskretisierung ist von grosser Bedeutung hinsichtlich des Rechenaufwandes. Eine Halbierung der Gittermaschenweite führt auf eine viermal so hohe Gitterpunktezah

($n \rightarrow 4n$). Da die Ausbreitung von jedem Gitterpunkt zu allen anderen Gitterpunkten untersucht werden muss, ergibt sich ein bzgl. der Gitterpunktezah quadratischer Aufwand. Der Rechenaufwand mit der ursprünglichen Diskretisierung ist damit von der Ordnung n^2 , für die doppelt so feine Unterteilung ergibt sich $(4n)^2 = 16n^2 = 2^4 n^2$, d.h. der Aufwand steigt mit der vierten Potenz.

Für das Diffus-Modell ist die Feinheit der Diskretisierung nicht kritisch, hier kann relativ grob gearbeitet werden. Das Kirchhoffmodell dagegen verliert bei zu grober Auflösung das in der Oberflächen-Druckverteilung gespeicherte "Gedächtnis" und kann mit deutlich zu grossen Schallfeldwerten reagieren. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass sich bei spiegelnder Reflexion die Beiträge des grössten Teils der Reflektorfläche durch destruktive Interferenz gegenseitig annullieren. Bei ungenügender Diskretisierung erfolgt diese Annulation nicht mehr vollständig, was zu einer Überschätzung des durch die Reflexion hervorgerufenen Schalldruckanteils führt.

Als Gedankenmodell hilft eine auf Fresnelzonen basierende Vorstellung. Dabei werden auf dem Reflektor Zonen gebildet für welche der reflektierte Anteil innerhalb einer halben Wellenlänge bzw. 180° Phasendrehung eintrifft. Bei senkrechtem Schalleinfall und Reflexion sind diese Zonen Kreisinge, bei schrägem Einfall werden die Zonen ellipsenförmig verzerrt. Die Diskretisierung muss so fein sein, dass jede dieser Zonen genügend genau approximiert wird. Der kritischste Fall mit den kleinsten Zonenflächen entsteht für senkrechten Einfall und kleine Abstände der Quelle und des Empfängers zum Reflektor.

Die maximal zulässige Rasterung wurde numerisch mit dem oben formulierten Algorithmus untersucht. Dazu wurden der Quellen- und Empfängerpunkt an derselben Position im Abstand d vor einem Reflektor angenommen. Für eine Einfachreflexion wurde der Schalldruck am Empfänger in Abhängigkeit des Abstandes d , der Gitterweite Δx bzw. Δy , wobei $\Delta x = \Delta y$ angenommen wurde, und der Frequenz f untersucht. Die Abbildung 2.16 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Einfachreflexion an einer 10×10 m grossen Fläche. Für wachsende Rasterweiten und Frequenzen nehmen die Pegel ab einer bestimmten Grenze sprunghaft zu. Bei 800 und 1000 Hz wird dieser Punkt für eine Rasterweite von rund 0.35 m erreicht.

Aus den numerischen Untersuchungen folgt für die maximal zulässige Rasterweite $\Delta x, y$:

$$\Delta x_{\max} = \Delta y_{\max} \approx 0.11\sqrt{d\lambda} \quad (2.64)$$

mit

d Abstand zum Reflektor
 λ Wellenlänge

Die Beziehung für Δx_{\max} erinnert an die Lösung für den Radius der ersten Fresnelzone in grossem Abstand d :

$$r_1 = \sqrt{d\frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda^2}{16}} \approx \sqrt{d\frac{\lambda}{2}} \quad \text{für } d \gg \frac{\lambda}{8} \quad (2.65)$$

$\Delta x, y_{\max}$ entspricht damit rund 16% des Radius der ersten Fresnelzone.

Für das Modell wird von einem minimalen Abstand von 10 m ausgegangen. Damit ergeben sich in Funktion der Frequenz die in Tabelle 2.6 gezeigten minimalen Rasterweiten.

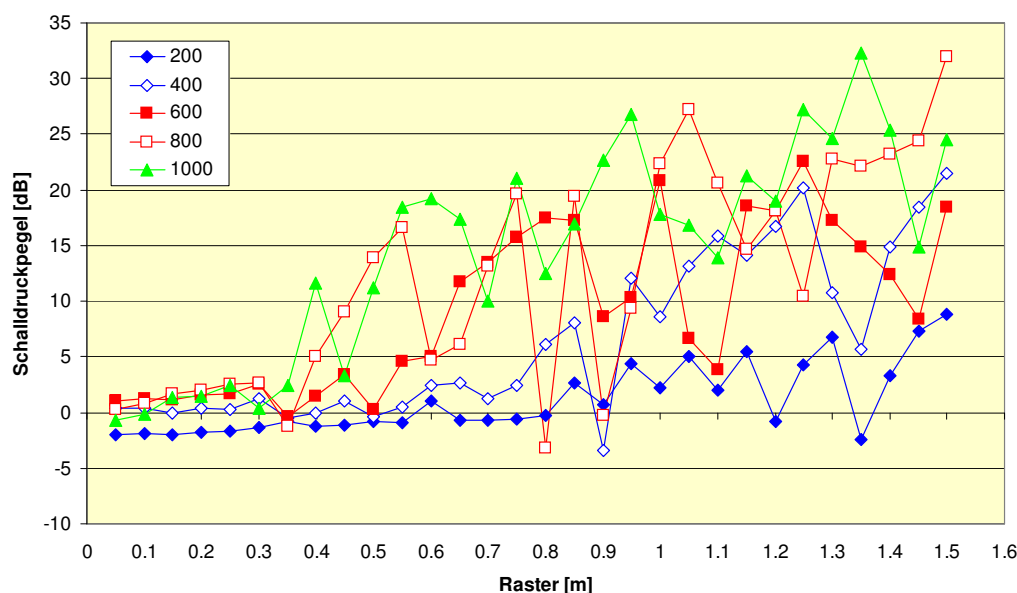


Abbildung 2.16: Einfluss der Rasterweite auf den Schalldruckpegel der Reflexion. Scharparameter ist die Frequenz. Gezeigt werden 200, 400, 600, 800 und 1000 Hz. Der Abstand des Quellen- und Empfängerpunktes beträgt 20 m.

Frequenz [Hz]	200	400	600	800	1000
Rasterweite [m]	0.45	0.32	0.26	0.22	0.20

Tabelle 2.6: Minimale Rasterweite in Funktion der Frequenz für das Kirchhoffmodell.

In der konkreten Implementierung werden Empfangspunkte, die näher als 1 m von einer Fassade entfernt liegen, als Fassadenpunkte interpretiert, d.h. sie erhalten von der entsprechenden Fassade keinen Beitrag.

2.4.7 Spezifikation der Absorptionseigenschaften

Jeder Oberfläche ist ein Absorptionsgrad α zugeordnet. Die zur Auswahl stehenden Absorptionsgrade richten sich nach der DIN EN Norm 1793-1:2013-04, Tabelle A.1, welche vier Kategorien für keine, geringe, mittlere und hohe Schallabsorption vorsieht (ID 501 bis 504, siehe Anhang A.4.2, Unterkapitel *Oberflächen - Schallabsorption*). Diesen Kategorien entsprechen Schallabsorptionsgrade von 0.00, 0.68, 0.87 und 0.94, was Differenzen des einfallenden und reflektierten Schalldruckpegels von 0, 5, 9 und 12 Dezibel entspricht. Es wird ein konstantes α bzw. eine konstante Differenz für alle Frequenzen angenommen.

Hinweis:

Die Validierung von sonARMS, ausschliesslich mit dem inkohärenten Modell, ergab 2019 eine Tendenz zur Überschätzung der Reflexionen von Gebäuden und anderen künstlichen Objekten unter der Annahme schallharter Flächen. Es wird deshalb empfohlen, pauschal den Oberflächentyp sämtlicher Gebäude von schallhart (ID 501) zu leicht absorbierend (ID 502) anzupassen.

Hinweis:

In sonARMS existiert ein zusätzliches Objekt mit der Bezeichnung Schützenhaus. Um Reflexionen des Mündungsknalles am Schützenhaus zu unterdrücken, wird die Schützenhauslinie als virtuelle Wand mit einem Absorptionsgrad von 0.99 eingeführt.

2.4.8 Identifikation von massgeblich an der Reflexion beteiligten Reflektoren

Bei der Berechnung von Reflexionen an Gebäuden und anderen künstlichen Objekten wird ein iterativer Austauschprozess zwischen einer grossen Zahl von Teilflächen durchgeführt. Der Schlüssel zur Reduktion der Rechenzeiten liegt darin, die Anzahl beteiligter Teilflächen zu verkleinern. Vor Beginn der Reflexionsberechnung wird eine Relevanzmatrix aufgebaut, in welcher sämtliche Quellen-Reflektor-, Reflektor-Reflektor- und Reflektor-Empfänger-Kombinationen auf ihre Relevanz beurteilt werden.

Maximale Ausbreitungsdistanz

Als erster Schritt zur Reduktion der Grösse der Relevanzmatrix kommt ein Distanzkriterium zur Anwendung. Es werden dabei sämtliche Reflektoren ignoriert, deren Flächenmittelpunkt weiter als in Parameter *ReflMaxDist* definiert von sämtlichen Quellen und Empfängern entfernt ist. Als Standardwert für Lärmkartierungen wird 300 m empfohlen.

Hinweis:

Der Parameter ReflMaxDist hat grossen Einfluss auf die Anzahl beteiligter Reflektoren und damit auf den Arbeitsspeicherbedarf und die Rechenzeit. Der empfohlene Standardwert von 300 m stellt einen Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Genauigkeit dar. Bei grösseren Quellen-Empfänger-Abständen und entsprechenden Ausbreitungsbedingungen, namentlich einer Abschirmung des Direktschalls in Kombination mit bedeutsamen Reflektoren, kann es zu einer Vernachlässigung von massgeblichen Reflexionen kommen. Es wird empfohlen, für kritische Einzelpunktberechnungen den Parameter zu erhöhen, idealerweise auf die Hälfte der maximalen Direktschallausbreitung (Parameter MaxDistance).

Sichtbarkeitskontrolle

Jeder Reflektor hat eine Orientierung. Kombinationen, bei welchen sich mindestens einer der Akteure im Rückraum des anderen befindet, werden als nicht sichtbar markiert.

Keine Sichtbarkeit ist ausserdem gegeben, wenn die Sichtlinie durch andere künstliche Objekte unterbrochen wird. Für diese Sichtbarkeitskontrolle werden grosse Reflektorflächen zusätzlich unterteilt. Die Parameter *ReflMaxWallSegmentHoriz* und *ReflMaxWallSegmentVert* definieren die maximale Abmessungen pro Subfläche, wobei als Standardsetting 10 bzw. 3 m empfohlen werden. Die Sichtbarkeitskontrolle wird für jede Subfläche separat durchgeführt, wobei die Kontrolle wiederum für den Flächenmittelpunkt erfolgt. Die feinere Setzung in der Vertikalen wird empfohlen, um den Fall einer teilweisen Abschirmung von unterschiedlich hohen Gebäuden abzufangen und so näherungsweise pro Stockwerk eine Teilfläche zu erhalten.

Für Quellen-Reflektor- und Reflektor-Empfänger-Kombinationen wird zusätzlich kontrolliert, ob eine Abschirmung durch das Gelände vorliegt. Die Kontrolle erfolgt nur für den Flächenmittelpunkt der Originalflächen.

Hinweis:

Aus Rechenzeitgründen wird auf eine Kontrolle von Geländeabschirmungen zwischen Reflektoren verzichtet. Dies kann zu einer Überschätzung der Reflexionen führen.

Ausschlusskriterien auf der Basis des maximal möglichen Energieaustausches

Während dem Austauschvorgang wird die Relevanz kontrolliert, d.h. Kombinationen, die zu wenig Potential für einen relevanten Beitrag haben, werden vernachlässigt und bei der Berechnung übersprungen.

Um vorneweg eine Berechnung von irrelevanten Reflexionsbeiträgen zu unterdrücken, wird – ausgehend von einer Referenz-Schallleistung von 0 dB – als generelles Absolutkriterium geprüft, ob die Intensität auf einer Fläche $\geq 10^{-20} \text{ W/m}^2$ ist. Anschliessend wird der maximal mögliche Energieaustausch gemäss Formel 2.66 kontrolliert,

$$\frac{1}{r^2} \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta \cdot F1 \cdot F2 > 10^{-3} \quad (2.66)$$

wobei r die Distanz zwischen den Flächen, $F1$ und $F2$ die Flächeninhalte der beiden Flächen und ϕ bzw. θ die Orientierung der Flächen in Bezug auf die direkte Verbindung der Flächenzentren bezeichnen. Die Grenze von 0.001 wurde aus Testberechnungen mit unterschiedlichen Parametersetzungen identifiziert.

Für Austauschvorgänge zwischen einer Fläche und einem Empfangspunkt bzw. einer Fläche und einer Quelle wird ein analoger Ansatz verwendet, wobei neben dem Abstand nur die Abmessung und Ausrichtung der beteiligten Fläche einfließt. Die Anpassung der Grenze von 10^{-3} auf 10^{-5} kann interpretiert werden als werde der Empfangspunkt bzw. die Quelle durch eine Fläche von 10 x 10 m repräsentiert.

$$\frac{1}{r^2} \cdot \cos \phi \cdot F1 > 10^{-5} \quad (2.67)$$

Unter der Annahme ideal ausgerichteter Flächen, d.h. mit $\cos \phi = 1$, können für vorgegebene Flächenmasse die maximalen Ausbreitungsdistanzen abgeleitet werden. Je kleiner die Fläche um so kleiner ist auch der Abstand. So resultiert für eine Fläche von 100 m² eine Grenzdistanz von über 3 km, bei 10 m² ist es genau 1 km.

Hinweis:

Für die Beurteilung von Quellen-Flächen-Beziehungen gemäss Gleichung 2.67 muss eine Punktquelle vorausgesetzt werden. Für eine Linienquelle gilt, dass sie durch eine Punktquelle ersetzt werden kann, wenn deren Länge kleiner als rund ein Drittel des Abstands zu einem Empfangspunkt ist. Entsprechend muss bei der Projektdefinition darauf geachtet werden, dass die maximale Länge der Linienquellen relativ zur kleinstmöglichen Flächendiskretisierung begrenzt wird.

Auswahl von Reflektoren zur Ermittlung der Immission

Die Anzahl Reflektoren in der Relevanzmatrix hängt auch von der Projektgrösse bzw. der Anzahl im Projekt vorhandenen Quellen und Empfänger ab. Werden zusätzliche Empfänger oder Quellen ergänzt, so kommen je nachdem auch zusätzliche Reflektoren dazu. In der Folge können sich die Immissionspegel für eine bestimmte Quellen-Empfänger-Kombination ändern, je nach dem ob im Projekte andere Quellen bzw. Empfänger ergänzt oder gelöscht werden. Dieses unerwünschte Verhalten kann zum einen dadurch vermieden werden, dass der Parameter

ReflMaxDist hoch gewählt wird. Um bei tiefer Setzung von *ReflMaxDist* die Resultate gleichwohl weitgehend unabhängig von der Anzahl Quellen und Empfänger im Projekt zu machen, werden nur Energieanteile für eine bestimmte Quellen-Empfänger-Kombination berücksichtigt, welche das Distanzkriterium erfüllen, sich also entweder nahe bei der Quelle oder beim Empfänger befinden. Wegen Mehrfachreflexionen über entfernte Reflektoren kann es aber gleichwohl zu leicht unterschiedlichen Berechnungsergebnissen kommen, wobei die Reflexionspegel mit zunehmender Projektgrösse in der Tendenz ansteigen.

2.4.9 Festlegung der Übergangsfrequenz zwischen kohärentem und inkohärentem Modell

Wie unter den Modellanforderungen erwähnt wird empfohlen, die Berechnung für Wellenlängen, welche grösser als rund die vierfache Strukturtiefe der reflektierenden Fassade ausfallen, kohärent durchzuführen und bei höheren Frequenzen den inkohärenten Modus zu verwenden. Obwohl bei der Definition der Oberflächeneigenschaften jedem Objekt eine eigene Strukturtiefe zugeordnet werden kann (siehe Anhang A.4), kann die entsprechende Übergangsfrequenz nur global festgelegt werden, durch den Parameter *ReflUebergangsFrequenz* des Parameterdatensatzes. Als Standardwert wird dabei 300 Hz empfohlen.

Die Festlegung der Übergangsfrequenz hat einen deutlichen Einfluss auf die Rechenzeiten. Zum einen ist das kohärente Modell per se aufwändiger, zum anderen wurden bei der Code-Optimierung gemäss Kapitel 3 einzig für das inkohärente Modell Beschleunigungsmassnahmen umgesetzt. Für die Berechnung von Lärmkarten und für Situationen, in welchen nur A-bewertete Pegel von Interesse sind, wird deshalb empfohlen, ausschliesslich das inkohärente Modell zu verwenden und den Parameter *ReflUebergangsFrequenz* entsprechend auf 1 zu setzen.

2.5 Wald- und Felsreflexionen

2.5.1 Übersicht

Neben Reflexionen an künstlichen Objekten, wie sie im vorigen Kapitel behandelt wurden, kann es auch an Wäldern und Felswänden zu Reflexionen kommen. Diese diffusen Reflexionen, welche sich aufgrund der Grösse der reflektierenden Flächen meist als langgezogenes Echo manifestieren, sind nur in seltenen Fällen grenzwertrelevant. Sie können jedoch in Situationen mit deutlichen Abschirmungen des Direktschalles gleichwohl den Mittelungspegel dominieren. Gerade in Talsituationen, wie sie im Alpenraum häufig sind, kommt diesen Echos eine besondere Bedeutung zu.

Die Reflexionen an Wäldern und Felswänden weisen ein grundsätzlich unterschiedliches Verhalten auf. Aus diesem Grund werden sie im Rahmen von *sonX* mit zwei separaten Modellen behandelt. Die Ansätze stellen eigenständige Ausbreitungsmodelle dar, welche unabhängig von den übrigen Berechnungsmodulen (Basisrechnung, Meteokorrektur, Reflexionen an künstlichen Objekten) betrieben werden können und direkt Ausbreitungsdämpfungen bei den Empfangspunkten liefern. Verschiedene Ausbreitalgorithmen werden jedoch vom Basismodell übernommen. Auf die Berechnung eines Wettereinflusses auf die Schallausbreitung wird im Sinne einer Rechenzeitoptimierung bewusst verzichtet. Diese Vereinfachung erscheint u.a. deshalb angebracht, da die Schallausbreitung in der Regel weniger bodennah als beim Direktschall vor sich geht und entsprechend von deutlich reduzierten meteorologischen

Einflüssen ausgegangen werden kann.

Die kombinierte Ausbreitungsdämpfung $A_{\text{ForestCliff}}$ wird aus den Anteilen Waldreflexion A_{Forest} und Felsreflexion A_{Cliff} wie folgt gebildet:

$$A_{\text{ForestCliff}} = -10 \cdot \log(10^{-0.1 \cdot A_{\text{Forest}}} + 10^{-0.1 \cdot A_{\text{Cliff}}}) \quad (2.68)$$

mit

A_{Forest}	Ausbreitungsdämpfung der Waldreflexionen gemäss Gleichung 2.71
A_{Cliff}	Ausbreitungsdämpfung der Felsreflexionen gemäss Gleichung 2.88

2.5.2 Reflexionen an Wäldern

Das Waldreflexionsmodell geht von der Vorstellung aus, dass die Reflexion an einem einzelnen Baum durch zwei Teilreflexionen, eine am Stamm und eine an der Baumkrone, abgebildet werden kann. Die Reflexion eines ganzen Waldes kann als Überlagerung der Beiträge sämtlicher Stämme interpretiert werden. Nachfolgend wird zuerst die Reflexion am Stamm und anschliessend an der Baumkrone für einen einzelnen Baum erläutert. Danach wird die Kombination dieser beiden Teilquellen sowie die Erweiterung auf den gesamten Wald gezeigt.

Das Waldreflexionsmodell wurde in einer älteren Version in [24] zusammen mit umfangreichen Validierungsergebnissen publiziert. Im Unterschied zur aktuellen Implementation wurde damals der Waldrand in Form eines geschlossenen Polygons als Reflektor definiert, während neu von einer flächigen Vorstellung ausgegangen wird. Da das Berechnungsverfahren grundsätzlich vom Bild eines einzelnen Baumes ausgeht, hat diese Veränderung der Reflektorabbildung nur geringe Anpassungen am Modell nach sich gezogen. So kann zum einen auf eine Korrektur verzichtet werden, welche die Reflexion aus der Tiefe des Waldes abgebildet hat. Zum anderen musste die Zahl der Streuquellen in der Baumkrone von vorher 250 auf 350 erhöht werden, da neu die Streuquellen nicht mehr nur am Waldrand sondern verteilt über den ganzen Wald platziert werden.

Reflexionen am Stamm

Der Stamm eines einzelnen Baumes wird als stehender Zylinder modelliert. Basierend auf den Grundlagen für die Streuung von Kugelwellen (siehe [25], [26], [27]) kann gemäss Salomons [28] der Kugelwellen-Reflexionskoeffizient ρ_{cyl} eines unendlich langen Zylinders folgendermassen beschrieben werden:

$$\rho_{\text{cyl}} = \left[\sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \cos(m\phi) (-i)^m H_m^{(1)}(kr) \frac{J'_m(ka)}{H_m^{(1)'}(ka)} \right]^2 \quad (2.69)$$

mit

ϕ	Streuwinkel, definiert als der Zwischenwinkel von ein- und ausfallendem Schall in der Horizontalen (0° bedeutet, dass Quelle und Empfänger am gleichen Ort sind)
r	kürzerer der beiden Abstände von der Quelle zum Reflektor bzw. vom Reflektor zum Empfänger
k	Wellenzahl, definiert als das Verhältnis von Kreisfrequenz und Schallgeschwindigkeit
a	Zylinderradius
ε	$= 1$ für $m = 0$ und $= 2$ für $m \geq 1$

$H_m^{(1)}$	Hankel Funktion erster Ordnung
$H_m^{(1)'} $	Erste Ableitung der Hankel Funktion erster Ordnung
$J_m' $	Erste Ableitung der Bessel Funktion J

In Abbildung 2.17 sind drei Beispielrechnungen des Kugelwellen-Reflexionskoeffizienten ρ_{cyl} gemäss Gleichung 2.69 in Funktion der Frequenz zusammengestellt, welche die Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser a , vom Abstand r und vom Streuwinkel ϕ darstellen. Für die zweite und dritte Darstellung wurde der Zylinderdurchmesser zu 27.5 cm angenommen, was gemäss einer statistischen Auswertung des Waldes dem mittleren Stammdurchmesser am Waldrand entspricht (siehe Abschnitt 'Statistische Kenngrössen für Wald' auf Seite 62). Dieser Wert wird auch für sämtliche Modellberechnungen verwendet.

Die Hankel Funktion erster Ordnung $H_m^{(1)}(kr)$ verhält sich in guter Näherung umgekehrt proportional zum Abstand r . Das Produkt aus ρ_{cyl} und r kann somit für gegebene Zylinderdurchmesser und Streuwinkel als konstant angesehen werden. Aus diesem Grund wird bei der Umsetzung in *sonX* darauf verzichtet, den Kugelwellen-Reflexionskoeffizienten ρ_{cyl} in jeder Situation neu zu berechnen. Vielmehr sind in tabellarischer Form die auf einen Referenzabstand von 1 m normierten Reflexionskoeffizienten in Terzen für diskrete Streuwinkel von 0 bis 105° mit einer Schrittweite von 15° abgelegt. Für beliebige Winkel wird eine Zuordnung zum nächstgelegenen tabellierten Winkel vorgenommen und der entsprechende Reflexionskoeffizient verwendet. Reflexionen von Streuwinkeln > 135° werden ignoriert. Zwischen 105° und 135° kommt eine Ausblendfunktion zur Anwendung, welche die Reflexionskoeffizienten bis 150° linear auf Null reduziert.

Reflexion an der Baumkrone

Reflexionen in der Baumkrone erfolgen in erster Linie an den grossen Ästen. Diese weisen im Vergleich zum Stamm einen kleineren Durchmesser und eine deutlich kleinere Länge auf und stehen seitlich vom Stamm in alle Richtungen ab. In Analogie zur Modellierung des Stammes könnten die Äste durch eine Reihe von unterschiedlich grossen und unterschiedlich angeordneten Zylindern abgebildet werden. Aufgrund der eher zufälligen, in erster Näherung omnidirektionalen Ausrichtung der Äste und ihrer Länge, welche viel weniger als der Stamm dem Bild des unendlich langen Zylinders entspricht, ergibt sich jedoch in der Summe sämtlicher Reflexionen an der Baumkrone eher das Bild eines Streukörpers, der in alle Richtungen abstrahlt. Entsprechend wurde ein einfacherer, integraler Ansatz gewählt, indem die Baumkrone als eine streuende Kugel modelliert wird. Als Kugelradius wurde 15 cm festgelegt. Im Vergleich zu den Astabmessungen erscheint dieser Radius gross. Es soll damit jedoch dem Umstand Rechnung getragen werden, dass Zylinder tiefe Frequenzen effektiver reflektieren als eine Kugel mit gleichem Durchmesser. Dieser Verlust an tieffrequenter Reflexion beim Wechsel vom Zylinder- zum Kugelmodell soll damit kompensiert werden.

Über die Anzahl der entsprechenden Streukugeln wird die Stärke der Reflexion aus der Baumkrone bestimmt. Im Vergleich mit den Messdaten wurde ein Wert von 400 Streuquellen festgelegt.

Ausgehend von einer Lösung des Reflexionsproblems für starre Kugeln gemäss Morse und Ingard [26] wurde folgender Ansatz für den Reflexionskoeffizienten an einer Kugel bestimmt:

$$\rho_{\text{sph}} = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \frac{k^4 a^6}{9} [1 - 3 \cos(\pi - \phi)]^2 \\ \frac{a^2}{4} [1 + \cot^2(\pi - \phi/2) J_1^2(ka \sin(\pi - \phi))] \end{array} \right\} \quad (2.70)$$

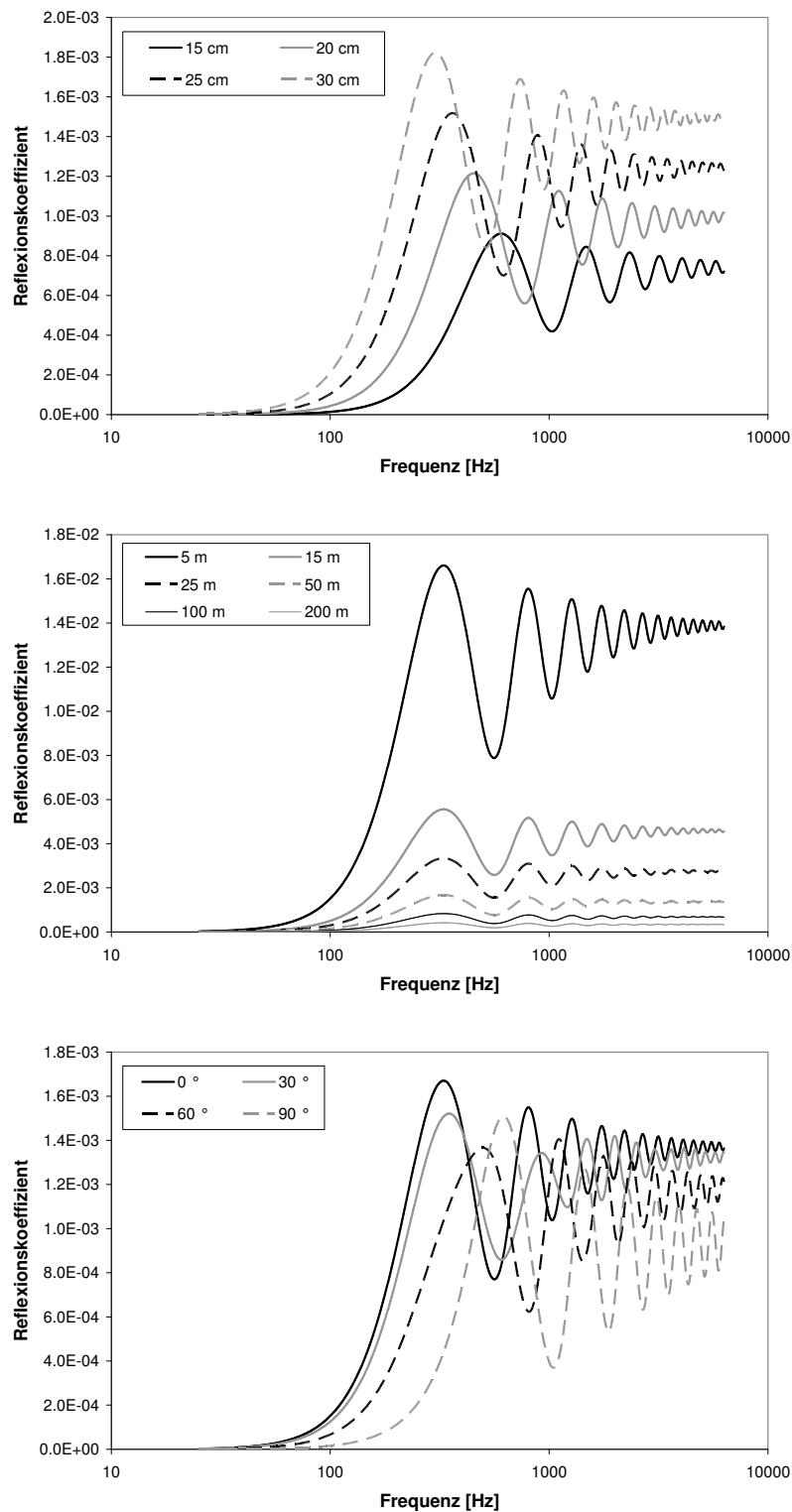


Abbildung 2.17: Reflexionskoeffizient eines Zylinders in Funktion des Durchmessers (a), der Distanz (b) und des Streuwinkels (c). Falls konstant gehalten, wurde der Streuwinkel auf 0° , die Distanz auf 50 m und der Zylinderdurchmesser auf 27.5 cm gesetzt.

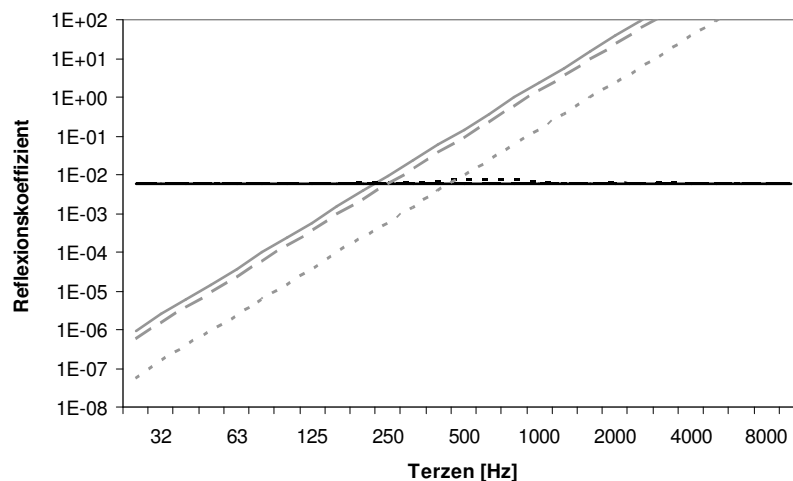


Abbildung 2.18: Reflexionskoeffizient einer Kugel mit Radius 15 cm. In grau ist der Ansatz für tiefe Frequenzen und in schwarz der Ansatz für hohe Frequenzen abgebildet. Für beide Ansätze sind Streuwinkel von 0, 45 und 90 ° als ausgezogene, gestrichelte und gepunktete Linien dargestellt.

mit

ϕ	Streuwinkel, definiert als der Zwischenwinkel von ein- und ausfallendem Schall
k	Wellenzahl, definiert als das Verhältnis von Kreisfrequenz und Schallgeschwindigkeit
a	Kugelradius. Der Kugelradius wird für die Streuung an der Baumkrone generell mit 0.15 m angenommen.
J_1	Bessel Funktion erster Ordnung

Der Reflexionskoeffizient ρ_{sph} ist dabei definiert als Verhältnis der gestreuten zur einfallenden Schallintensität in 1 m Abstand, ausgehend von einer ebenen Welle. Die beiden Ansätze gemäss [26] wurden unter der Annahme hergeleitet, dass $ka \ll 1$ (gültig für tiefe Frequenzen) bzw. $ka \gg 1$ (gültig für hohe Frequenzen). Je nach Streuwinkel findet sich eine unterschiedliche Frequenz bei welcher beide Lösungen das gleiche Resultat liefern. Abbildung 2.18 zeigt den spektralen Verlauf der beiden Lösungen von ρ_{sph} für Streuwinkel von 0, 45 und 90°.

Analog zur Umsetzung für den Kugelwellen-Reflexionskoeffizient am Zylinder ρ_{cyl} werden die Reflexionskoeffizienten an der Kugel in Terzen für diskrete Streuwinkel von 0 bis 135° mit einer Schrittweite von 15° in tabellarischer Form abgelegt.

Erweiterung für einen ganzen Wald

Die Reflexion eines ganzen Waldes kann grundsätzlich als Überlagerung der Reflexion vieler Einzelbäume berechnet werden. Im Sinne einer Rechenzeitoptimierung wird jedoch nicht jeder Baum modelliert, sondern es wird pro Flächenelement ein in Flächenmitte platzierter Baum berechnet und mit der Anzahl Bäume pro Flächenelement hochgerechnet. Gemäss den Angaben in Abschnitt 2.5.2 wird von 5 Bäumen pro Aare ausgegangen. Die Beiträge der einzelnen Bäume werden dabei nicht phasenrichtig sondern energetisch superponiert.

Die Dämpfung A_{Forest} berechnet sich gemäss Gleichung 2.71, wobei n die Anzahl der Flächenelemente bzw. repräsentativer Bäume, N_n die Anzahl Bäume pro Flächenelement n und $A_{\text{cyl},n}$ bzw. $A_{\text{sph},n}$ die Gesamtausbreitungsdämpfungen von Stamm und Krone des vom Flächenelement n reflektierten Schalls darstellen. Die Beiträge von Zylinder und Stamm werden energetisch addiert, wobei beim Stamm noch eine zusätzliche Gewichtungsfunktion w_{cyl} zum Einsatz kommt. w_{cyl} wurde basierend auf Messdaten bestimmt. Für Terzen bis 250 Hz beträgt w_{cyl} 1.0, d.h. die Zylinderreflexion wird voll berücksichtigt. Zwischen 250 Hz und 1 kHz wurde w_{cyl} auf 0.5 und oberhalb von 1 kHz auf 0.25 festgelegt. Diese Reduktion des Zylinderbeitrages kann dadurch erklärt werden, dass die tiefen Frequenzen durch die Anwesenheit der Äste nur wenig beeinflusst werden. Die Reflexion am Stamm erfolgt deshalb weitgehend ungestört. Bei den hohen Frequenzen erfährt die Schallwelle auf dem Weg zum Stamm und auf dem Rückweg aber eine Beeinflussung, so dass die Phasenbeziehung der am Zylinder reflektierten Welle gestört wird.

$$A_{\text{Forest}} = -10 \cdot \log \left(\sum_n N_n \left[w_{\text{cyl}} \cdot 10^{A_{\text{cyl},n}/10} + 10^{A_{\text{sph},n}/10} \right] \right) \quad (2.71)$$

Ausbreitungsrechnung für den Stamm

Die Gesamtausbreitungsdämpfung des von Baum n am Stamm reflektierten Schalls berechnet sich gemäss Gleichung 2.72 aus verschiedenen Dämpfungstermen:

$$A_{\text{cyl},n} = A_{\text{div},n} + A_{\text{atm},n} + A_{\text{gr}/\text{bar},n} + A_{\text{fol},n} + A_{\text{refl},n} \quad (2.72)$$

mit

$A_{\text{div},n}$	Geometrische Verdünnung = $20 \cdot \log(r_{r,n} + r_{s,n}) + 11$ mit r_s der Distanz Quelle-Reflektor und r_r der Distanz Reflektor-Empfänger.
$A_{\text{atm},n}$	Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.2.3 für die Strecke Quelle-Reflektor-Empfänger. Als Reflexionspunkt wird der Einfachheit halber die Lage der Streuquelle verwendet.
$A_{\text{gr}/\text{bar},n}$	Bodeneffekt und Hinderniswirkung für die Strecke Quelle-Reflektor-Empfänger. Die Berechnung erfolgt nach einem vereinfachten Verfahren gemäss Abschnitt 2.5.4.
$A_{\text{fol},n}$	Bewuchsdämpfung gemäss Abschnitt 2.2.5, wobei vereinfachend keine distanzabhängige Fallunterscheidung, sondern für alle Distanzen die Dämpfung pro Meter gemäss Tabelle 2.2 verwendet wird.
$A_{\text{refl},n}$	Reflexionsverlust gemäss Gleichung 2.73.

Die Ausbreitungsrechnung wird für einen Reflexionspunkt durchgeführt, welcher auf einem Drittel der Stammhöhe ab Boden liegt.

Der Reflexionsverlust $A_{\text{refl},n}$ wird gemäss Gleichung 2.73 aus dem Reflexionskoeffizienten von Zylinder n nach Gleichung 2.69 und einer Korrektur für die vertikale Effektivität der Reflexion Π_n berechnet.

$$A_{\text{refl},n} = -10 \cdot \log(\Pi_n^2 \cdot \rho_{\text{cyl},n}) \quad (2.73)$$

Mit Π_n wird berücksichtigt, dass die Zylinder in Wirklichkeit nicht unendlich hoch sind und dass namentlich bei grösseren Distanzen und tiefen Frequenzen die Höhe des Reflektors für eine vollständige Reflexion nicht mehr ausreicht. Zur Berechnung von Π wird wiederum ein Fresnel-Zonen-Ansatz verwendet, der jedoch in Erweiterung des beim Bodeneffekt-Modell verwendeten Ansatzes auch Pegelerhöhungen aufgrund begrenzter Reflektorabmessungen berücksichtigt (siehe Gleichung 2.19). Abbildung 2.19 illustriert die dabei verwendeten Parameter.

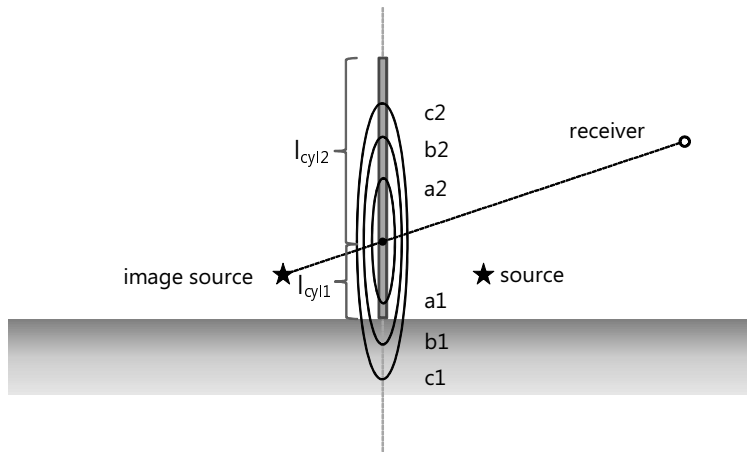


Abbildung 2.19: Visualisierung der Parameter, welche zur Bestimmung des Fresnel-Faktors Π gemäss Gleichung 2.74 benötigt werden. $l_{cyl,1}$ und $l_{cyl,2}$ bezeichnen dabei die Längen des reflektierenden Zylinders unter- und oberhalb des Reflexionspunktes. a , b und c stellen die Abmessungen der Fresnelzonen mit Weglängenunterschieden von $1/4\lambda$, $1/2\lambda$ und $3/4\lambda$ dar.

$$\Pi_n(\lambda) = \begin{cases} \frac{l_{cyl,n}}{l_{Fa,n}(\lambda)} & \text{for } l_{Fa,n}(\lambda) \geq l_{cyl,n} \\ 1 + \frac{l_{cyl,n} - l_{Fa,n}(\lambda)}{l_{Fb,n}(\lambda) - l_{Fa,n}(\lambda)} & \text{for } l_{Fb,n}(\lambda) \geq l_{cyl,n} > l_{Fa,n}(\lambda) \\ 2 - \frac{l_{cyl,n} - l_{Fb,n}(\lambda)}{l_{Fc,n}(\lambda) - l_{Fb,n}(\lambda)} & \text{for } l_{Fc,n}(\lambda) \geq l_{cyl,n} > l_{Fb,n}(\lambda) \\ 1 & \text{for } l_{cyl,n} > l_{Fc,n}(\lambda) \end{cases} \quad (2.74)$$

$$\Pi(\lambda) = \frac{\Pi_1(\lambda) + \Pi_2(\lambda)}{2} \quad (2.75)$$

Ausbreitungsrechnung für die Baumkrone

Die Gesamtausbreitungsdämpfung des von Baum n an der Baumkrone reflektierten Schalls berechnet sich gemäss Gleichung 2.76 aus verschiedenen Dämpfungstermen:

$$A_{sph,n} = A_{div,n} + A_{atm,n} + A_{gr/bar,n} + A_{fol,n} + A_{refl,n} \quad (2.76)$$

mit

- $A_{div,n}$ Geometrische Verdünnung = $20 \cdot \log(r_{r,n} \cdot r_{s,n}) + 11$ mit r_s der Distanz Quelle-Reflektor und r_r der Distanz Reflektor-Empfänger.
- $A_{atm,n}$ Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.2.3 für die Strecke Quelle-Reflektor-Empfänger.
- $A_{gr/bar,n}$ Bodeneffekt und Hinderniswirkung für die Strecke Quelle-Reflektor-Empfänger. Die Berechnung erfolgt nach einem vereinfachten Verfahren gemäss Abschnitt 2.5.4.
- $A_{fol,n}$ Bewuchsdämpfung gemäss Abschnitt 2.2.5.
- $A_{refl,n}$ Reflexionsverlust gemäss Gleichung 2.77.

Die Ausbreitungsrechnung wird zur Rechenzeitoptimierung für den gleichen Reflexionspunkt durchgeführt, welcher bereits beim Stamm verwendet wurde.

Der Reflexionsverlust $A_{\text{refl},n}$ wird gemäss Gleichung 2.77 berechnet. N_{sph} bezeichnet dabei die Anzahl Streuquellen, welche pro Baum angenommen wird. Im Vergleich mit den Validierungsmessungen wurde ein repräsentativer Wert von $N_{\text{sph}} = 400$ ermittelt.

$$A_{\text{refl},n} = -10 \cdot \log(N_{\text{sph}} \cdot \rho_{\text{sph},n}) \quad (2.77)$$

Hinweis:

Die maximale Ausbreitungsdistanz in Wald ist auf 255 m limitiert. Wird diese Distanz entweder auf dem Weg zum Reflektor oder auf dem Weg vom Reflektor zum Empfänger überschritten, so wird die Berechnung eines Reflexionsbeitrages für diesen Reflektor abgebrochen.

Identifikation von Waldflächen

Die Identifikation von Waldflächen erfolgt analog zur Bewuchsdämpfung gemäss Abschnitt 2.2.5 basierend auf der Geländetypisierung (siehe Anhang A.4.2). Für einige Geländetypen wie z.B. *Wald* oder *Geröll in Wald* wird eine vollständige Waldreflexion gemäss obigen Ansätzen berechnet. Für andere Geländearten wie z.B. *Wald offen* wird eine reduzierte Reflexion ausgewiesen. Der Gewichtungsfaktor ist im Parameter ρ_{ho_v} festgelegt. Die reduzierte Reflexion wird über eine Reduktion der Anzahl reflektierender Einzelbäume berücksichtigt.

Statistische Kenngrössen für Wald

Als Grundlage für die Berechnung von Waldreflexionen werden verschiedene Kenngrössen für Wald benötigt. Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL hat zu diesem Zweck statistische Angaben zur Anzahl Bäume pro Fläche, der durch die Stämme abgedeckten Grundfläche (Basalfläche), des mittleren Durchmessers und der mittleren Höhe für vier Waldkategorien zur Verfügung gestellt. Tabelle 2.7 zeigt eine Zusammenfassung der Resultate für sämtliche erfassten Standorte. Da bei Waldreflexionen die ersten Baumreihen den grössten Beitrag leisten, wurde eine zusätzliche Auswertung vorgenommen, welche nur Situationen am Waldrand umfasst (siehe Tabelle 2.8). Es zeigt sich, dass die Walddichte am Rand unabhängig vom Walddtyp etwas höher ausfällt.

Es wird generell empfohlen, für die Reflexionsberechnung die Mittelwerte von Tabelle 2.8 zu verwenden. Dabei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass im Einzelfall Abweichungen zu erwarten sind, welche sich bereits beim Vergleich der Mittelwerte verschiedener Walddtypen zeigen. Während sich der mittlere Baumdurchmesser und auch die Höhe unabhängig von der Waldkategorie als vergleichsweise stabil erweisen, variiert die Anzahl der Bäume und damit auch die Basalfläche je nach Typ deutlich. So weist ein reiner Nadelwald am Waldrand eine rund 20% höhere Dichte auf als ein reiner Laubwald. Dies entspricht einer um 0.8 dB höheren Reflexion. Pegelunterschiede in der gleichen Grössenordnung sind auch aufgrund der Schwankungen bei den mittleren Baumdurchmessern zu erwarten.

Die Validierungsmessungen haben zusätzlich systematische Unterschiede bei der Reflexion aus der Baumkrone je nach Baumart gezeigt. So ergaben Messungen an Laubbäumen mit ausladenden, dicken Ästen bei gleicher Geometrie rund 3 dB(A) höhere Reflexionen als bei Nadelbäumen mit wenig Ästen.

Oberhalb von 1000 m nimmt sowohl am Waldrand als auch in der Mitte die Walddichte ab und auch die mittleren Baumhöhen und -durchmesser gehen zurück.

Waldtyp	Anz. Bäume [N/100 m ²]	Basalfläche [m ² /100 m ²]	Durchmesser [cm]	Höhe [m]
> 90% Nadelbäume	5.38 ± 5%	0.386 ± 5%	26.8 ± 5%	21.8 ± 5%
> 50% Nadelbäume	4.70 ± 5%	0.355 ± 5%	27.8 ± 5%	22.0 ± 5%
> 50% Laubbäume	4.48 ± 6%	0.308 ± 6%	26.5 ± 6%	21.0 ± 6%
> 90% Laubbäume	4.76 ± 5%	0.266 ± 4%	23.7 ± 5%	18.5 ± 5%
Mittel	4.83 ± 2%	0.326 ± 2%	26.1 ± 2%	20.7 ± 2%

Tabelle 2.7: Statistik für Schweizer Wald bis 1000 m über Meer [29]. Die letzte Zeile gibt über die Häufigkeit der verschiedenen Waldkategorien gewichtete Mittelwerte an. Der Stammdurchmesser und die Basalfläche werden in einer Höhe von 1.3 m gemessen. Bäume mit weniger als 12 cm Durchmesser wurden nicht gezählt.

Waldtyp	Anz. Bäume [N/100 m ²]	Basalfläche [m ² /100 m ²]	Durchmesser [cm]	Höhe [m]
> 90% Nadelbäume	6.11 ± 14%	0.453 ± 13%	27.5 ± 14%	22.1 ± 14%
> 50% Nadelbäume	5.26 ± 10%	0.418 ± 10%	28.5 ± 11%	22.5 ± 11%
> 50% Laubbäume	4.75 ± 12%	0.361 ± 12%	27.7 ± 13%	21.8 ± 13%
> 90% Laubbäume	4.50 ± 9%	0.314 ± 9%	26.4 ± 10%	20.2 ± 10%
Mittel	5.01 ± 5%	0.374 ± 5%	27.5 ± 6%	21.5 ± 6%

Tabelle 2.8: Waldrandstatistik für Schweizer Wald bis 1000 m über Meer [29]. Es wurden jeweils nur die ersten 30 m des Waldes erfasst. Die letzte Zeile gibt über die Häufigkeit der verschiedenen Waldkategorien gewichtete Mittelwerte an. Der Stammdurchmesser und die Basalfläche werden in einer Höhe von 1.3 m gemessen. Bäume mit weniger als 12 cm Durchmesser wurden nicht gezählt.

Diskretisierung von Waldflächen

Einen bedeutenden Einfluss auf die resultierenden Rechenzeiten hat die Grösse der Flächenelemente. Da die Rechenzeit in erster Näherung proportional zur Anzahl Reflektorelemente ist, hängt die Rechenzeit im Quadrat von der Einheitslänge der Flächenelemente ab. Entsprechend ist es vorteilhaft, möglichst grosse Abmessungen zu wählen. Umgekehrt wirkt sich eine zu grobe Rasterung negativ auf die Qualität der Berechnungsergebnisse aus. Im Hinblick auf die Genauigkeit ist es entscheidend, dass Flächenelemente in kurzem Abstand zu Quelle und/oder Empfänger eine feine Rasterung aufweisen. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass die Bäume am Waldrand aufgrund des Einflusses der Walddämpfung ein überproportionales Gewicht erhalten (siehe [30]). Aus diesem Grund wurde eine adaptive Rasterung mit dem Ziel eingeführt, am Rand eine feine Gitterung zu erzielen, welche gegen Innen gröber wird. Das Vorgehen ist wie folgt: Über den Parameter *ForestGrid* wird ein Grundraster festgelegt. Die Untergrundeigenschaft wird im Zentrum der Zelle bestimmt. Um eine eindeutige Zuordnung zu erhalten, wird deshalb empfohlen, für *ForestGrid* ein ungerades Mehrfaches des zugrundeliegenden Bodennutzungs-Rasters zu wählen. Eine Berücksichtigung als Reflektor erfolgt, wenn ρ_v höher liegt als der Parameter *DiffusThreshold*, welcher standardmässig auf 0.2 gesetzt ist. Als Standardeinstellung wird für *ForestGrid* 25 m empfohlen. Bei komplexem Terrain und kleinräumiger Bewaldung ist diese Einstellung jedoch zu grob, weshalb in diesen Fällen ein Grundraster von 5 m besser geeignet ist. Diesem feinmaschigen Gitter werden vier grobmaschigere, sich deckende Gitter überlagert. Dabei werden jeweils 4, 16, 64 und 256 Zellen zusammengefasst, was bei *ForestGrid* = 25 m Maschenweiten von 50, 100, 200 und 400 m entspricht. Beginnend mit dem kleinsten Raster wird aufgrund der Landnutzungeigenschaft der Zellen entschieden, ob eine Zusammenfassung zu grösseren

Strukturen zulässig ist. Eine Zusammenfassung zu einem übergeordneten Reflektor wird dabei vorgenommen, wenn drei bzw. vier Quadranten vom Typ Wald sind. Falls diese Bedingung nicht erfüllt wird, ist eine Zusammenfassung nicht möglich. Die gleiche Kontrolle wird für den zweiten bzw. dritten Aufstufungsschritt angewandt. Reflektoren werden jeweils im Zentrum der resultierenden Elemente platziert und mit der Anzahl aktiver Feinzellen gewichtet. Ebenfalls auf eine Zusammenfassung wird verzichtet, wenn der zusammengefasste Reflektor sich näher als drei Mal die Seitenlänge des zugehörigen Flächenquadrates bei der Mündung, dem Ziel oder der Schusslinie befindet. Am Ende resultiert eine Liste mit unterschiedlich gewichteten Walddreflektoren, die für die Berechnung der Reflexionen zur Verfügung stehen.

Die Anzahl Reflektoren, die sich am Waldrand befinden, kann mit dem Ziel einer Rechenzeitoptimierung über den Parameter *ForestReflectors_Reduction* zusätzlich ausgedünnt werden. Standardmässig wird *ForestReflectors_Reduction* auf 3 gesetzt. Dies bedeutet, dass nur jeder dritte Reflektor (unterschiedlichen Gewichtes) effektiv zur Reflexion beiträgt und dass der Beitrag des mittleren Reflektors entsprechend der energetische Summe der drei beteiligten Reflektoren erhöht wird. Der Ausdünnungsprozess erfolgt von Nord nach Süd und in Ost-West-Richtung alternierend, jeweils innerhalb der Gross-Quadrate mit 16 x 16 Zellen. Die Gewichte der Reflektoren mit IDs, welche nicht durch den Reduktionsfaktor teilbar sind, werden auf den nächsten Reflektor transferiert. Falls zum Ende des Gross-Quadrates Reflektoren übrig bleiben, wird deren Gewicht auf das nächste Grossquadrat übertragen unter der Bedingung, dass es sich dabei um ein Gross-Quadrat mit Waldrandelementen handelt (welche aber nicht das gesamte Gross-Quadrat ausfüllen). Andernfalls entfällt ihr Beitrag.

Walddreflexionsberechnungen werden nicht nur vor und hinter, sondern auch im Walddinnern durchgeführt. Um zu hohe Pegel aufgrund von Quellen oder Empfängern, die sich in unmittelbarer Nähe von Reflektoren befinden, zu vermeiden, wird für die Berechnung eine minimale Distanz eingeführt. Für diese minimale Distanz kommen zwei Kriterien zur Anwendung. Die Minimaldistanz muss mindestens der Vegetationshöhe (Parameter *ForestHeight*) entsprechen und muss zusätzlich dreimal die Länge des zugehörigen Reflektor-Flächenquadrates erreichen. Mit dem zweiten Kriterium wird abgefangen, dass durch den Konzentrations- und Reduktionsprozess einzelne Reflektoren mit viel Energie aufgeladen werden und dies in zu kurzen Abständen zu unrealistisch hohen Reflexionspegeln führen kann.

2.5.3 Reflexionen an Felswänden

Das Berechnungsmodell für Felsreflexionen wurde in [31] veröffentlicht.

Übersicht

Reflektierende Felsflächen werden als reine Streuquellen modelliert. Auf eine Berücksichtigung spiegelnder Anteile wird verzichtet. Diese Vereinfachung erscheint aufgrund der typischen Geometrien zwischen Quellen, Reflektoren und Empfängern zulässig, welche zumeist Spiegelpfade aufweisen, die stark himmelwärts gerichtet sind.

Analog zu den Reflexionen an Wäldern kann a priori davon ausgegangen werden, dass zwischen den Beiträgen verschiedener reflektierender Elemente keine bedeutende Phasenbeziehung besteht. Entsprechend ist es zulässig, die Reflexionen einzelner Teilflächen energetisch zu addieren. Ebenso ist es auch statthaft, grössere Flächen zu diskretisieren und die Schallausbreitungsrechnung für jede Teilfläche separat durchzuführen.

Die Vorstellung reiner Streuquellen erlaubt eine separate Behandlung der Schallausbreitung

von der Quelle zum Reflektor und von dort weiter zum Empfänger. Abbildung 2.20 zeigt die Situation der Felsreflexionen mit den beiden Schallausbreitungspfaden für ein Reflektorelement.

Berechnung der Schalleistung der Sekundärquellen

Der Beitrag der Originalquelle i zur Schalleistung der Sekundärquelle j berechnet sich gemäss Gleichung 2.78:

$$L_{WS,i,j} = L_{W,i} - A_{\text{div},i,j} - A_{\text{atm},i,j} - A_{\text{gr}/\text{bar},i,j} + C_{\text{proj},i,j} \quad (2.78)$$

mit

$L_{WS,i,j}$	Schallleistungspegel der Sekundärquelle j , welcher durch die Originalquelle i erzeugt wird.
$L_{W,i}$	Schallleistungspegel der Originalquelle i .
$A_{\text{div},i,j}$	Geometrische Verdünnung $= 20 \cdot \log(r) + 11$ mit r als Distanz zwischen Original- und Sekundärquelle. Die Position der Sekundärquelle wird 0.1 m über Terrain in der Mitte der Reflektorfläche angenommen.
$A_{\text{atm},i,j}$	Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.2.3 für die Strecke Originalquelle-Sekundärquelle.
$A_{\text{gr}/\text{bar},i,j}$	Bodeneffekt und Hinderniswirkung für die Strecke Originalquelle-Sekundärquelle. Die Berechnung erfolgt nach einem vereinfachten Verfahren gemäss Abschnitt 2.5.4.
$C_{\text{proj},i,j}$	Projektionsanpassung gemäss Gleichung 2.79.

$$C_{\text{proj},i,j} = 10 \cdot \log(\cos(\phi_{i,j}) \cdot F_j) \quad (2.79)$$

mit

$\phi_{i,j}$	Winkel der einfallenden Schallwelle bezüglich der Reflektor-Flächennormalen.
F_j	Fläche des Reflektorelementes j .

Berechnung des Immissionspegels bei einem Empfangspunkt

Der Immissionspegel am Empfangspunkt k , der von der Sekundärquelle j , gespiesen durch die Originalquelle i , erzeugt wird, berechnet sich nach:

$$L_{i,j,k} = L_{WS,i,j} - A_{\text{div},j,k} - A_{\text{atm},j,k} - A_{\text{gr}/\text{bar},j,k} - A_{\text{refl},j,k} \quad (2.80)$$

mit

$L_{i,j,k}$	Immissionspegel der Sekundärquelle j , gespiesen durch die Originalquelle i , bei einem Empfangspunkt k .
$L_{WS,i,j}$	Schallleistungspegel der Sekundärquelle j , gespiesen durch Originalquelle i
$A_{\text{div},j,k}$	Geometrische Verdünnung $= 20 \cdot \log(r) + 11$ mit r als Distanz zwischen Sekundärquelle j und Empfänger k .
$A_{\text{atm},j,k}$	Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.2.3 für die Strecke Sekundärquelle-Empfänger.
$A_{\text{gr}/\text{bar},j,k}$	Bodeneffekt und Hinderniswirkung für die Strecke Sekundärquelle-Empfänger. Die Berechnung erfolgt nach einem vereinfachten Verfahren gemäss Abschnitt 2.5.4.
$A_{\text{refl},j,k}$	Reflexionsverlust gemäss Gleichung 2.81.

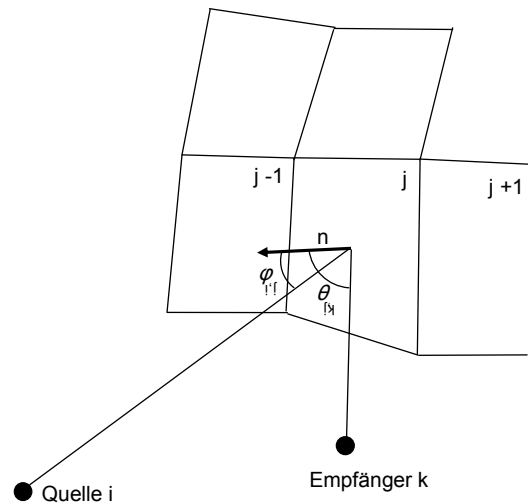


Abbildung 2.20: Situation zu den Felsreflexionen. Es sind die Schallausbreitungspfade für ein Reflektorelement j gezeigt, wobei $\phi_{i,j}$ den Schalleinfallswinkel bezüglich der Flächennormalen \mathbf{n} und $\theta_{j,k}$ den Schallausfallswinkel bezeichnen.

Der Dämpfungsterm $A_{\text{refl},j,k}$ beschreibt die Streu- und Absorptionseigenschaften des Reflektorelements und setzt sich aus folgenden drei Teilen zusammen

$$A_{\text{refl},j,k} = A_{\text{mat}} - C - D(\theta_{j,k}) \quad (2.81)$$

mit

A_{mat}	Materialverlust, der die Eigenschaften Absorption und Streuung der Reflektoroberfläche gemäss Gleichung 2.86 beschreibt.
C	Bündelungsmass der Sekundärquelle = 6dB für Lambert-Strahler gemäss Gleichung 2.85
$D(\theta_{j,k})$	Richtungsmass der Sekundärquelle gemäss Gleichung 2.83

Die diffuse Streuung an der Felsoberfläche wird mit dem Lambertschen Reflexionsgesetz modelliert. Der Richtungsfaktor Γ des Lambert-Strahlers ist definiert als

$$\Gamma_{\text{Lambert}}^2 = \begin{cases} \cos(\theta_{j,k}) & \text{wenn } \theta_{j,k} < \pi/2 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.82)$$

mit

$\theta_{j,k}$ Winkel der ausfallenden Schallwelle bezüglich der Reflektor-Flächennormalen.

Aus Gleichung 2.82 ergibt sich für das Richtungsmass D der Streuquelle per Definition

$$D = 10 \cdot \log(\Gamma_{\text{Lambert}}^2) \quad (2.83)$$

Für den Bündelungsgrad γ der Streuquelle erhält man durch Einsetzen von Gleichung 2.82 in die Definition und kurze Rechnung

$$\gamma = \frac{S}{\oint \Gamma^2 dS} = 4 \quad (2.84)$$

mit

S Kugeloberfläche mit Radius 1 m

Aus 2.84 folgt für das Bündelungsmass C der Streuquelle schliesslich

$$C = 10 \cdot \log(\gamma) = 6 \text{ dB.} \quad (2.85)$$

Der Dämpfungsterm A_{mat} beschreibt die akustischen Eigenschaften Streuung und Absorption des Reflektorelements. Der frequenzabhängige Streugrad s entspricht dem Verhältnis diffus reflektierter zu spiegelnd reflektierter Schallenergie. Der Absorptionsgrad α beschreibt den Anteil vom Reflektorelement absorbierte Schallenergie zur total einfallenden Schallenergie. Der Streu- und der Absorptionsgrad werden richtungsunabhängig modelliert und liegen im Bereich zwischen 0 und 1.

$$A_{\text{mat}} = 10 \cdot \log(s(1 - \alpha)) \quad (2.86)$$

mit

s Frequenzabhängiger statistischer Streugrad des Reflektors [0...1]

α Frequenzabhängiger statistischer Absorptionsgrad des Reflektors [0...1]

Für den Absorptionsgrad α der Felsoberfläche wird 0 angenommen. Der Streugrad s wurde mit Messungen indirekt bestimmt. Abbildung 2.21 zeigt den idealisierten Verlauf des Streugrades für unterschiedliche Felsflächenrasterungen.

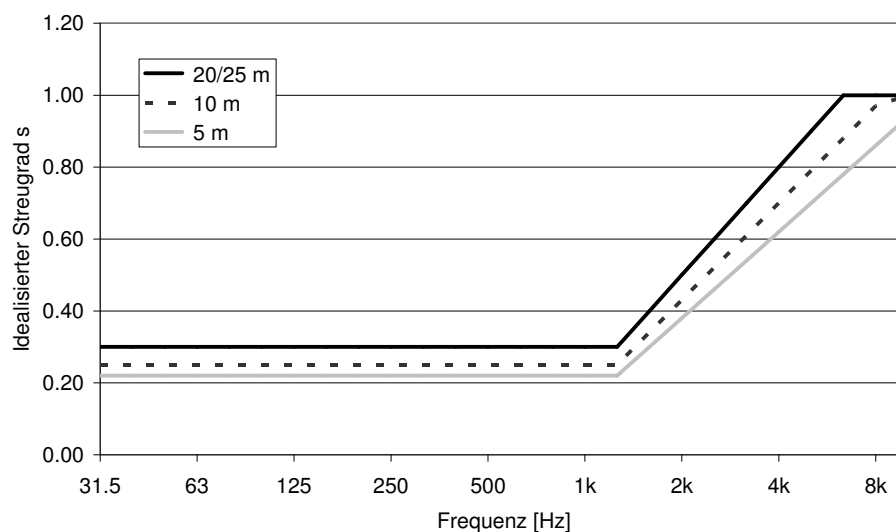


Abbildung 2.21: Idealisierte Streugrad s der Felsoberflächen für die Felsflächendiskretisierungen 20/25m, 10m und 5m.

Der gesamte Immissionspegel der Originalquelle i am Empfangspunkt k ergibt sich aus der Summation der Beiträge sämtlicher Streuquellen j :

$$L_{\text{Cliff},i,k} = 10 \cdot \log \left(\sum_j 10^{L_{i,j,k}/10} \right) \quad (2.87)$$

Durch Null-Setzen des Schallleistungspegels $L_{W,i}$ erhält man

$$A_{\text{Cliff},i,k} = -L_{\text{Cliff},i,k} \quad (2.88)$$

Identifikation und Diskretisierung von Felsflächen

Die Identifikation von Felsflächen erfolgt analog zu den bewaldeten Flächen basierend auf der Geländetypisierung, welche inkl. Parametersetzung in Anhang A.4.2 aufgeführt ist. Messungen, welche im Kapitel Validierung dokumentiert sind, haben gezeigt, dass neben dem Geländetyp *Fels* auch der Typ *Geröll* bei den Felsreflexionen berücksichtigt werden muss und dass für diese Geländeart die gleichen Eigenschaften wie für Fels verwendet werden können. Der Geländeart *Geröll* wird auch der Typ *Steinbruch* gleichgesetzt. Für die Geländetypen *Geröll mit Gebüsch*, *Geröll auf Gletscher*, *Geröll in Wald* und *Geröll in offenem Wald* wird eine um 50% reduzierte reflektierende Fläche angenommen. Für andere Geländearten wird keine Felsreflexion berechnet.

Zur Bestimmung der Sekundärquellen wird das Berechnungsgebiet mit einem Raster gemäss dem Parameter *RockGrid* überzogen. Gemäss dem Parameter *RasterRatioRock* werden diese Elemente zu grösseren Strukturen zusammengefasst, wobei eine mittlere Eigenschaft 'Fels' berechnet wird. *RasterRatioRock* kann als ganzzahlige Zahl frei gewählt werden. Ist *RasterRatioRock* geradzahlig, sitzt der Grobpunkt genau in der Mitte des Quadrates. Der Grobpunkt repräsentiert die umliegenden Eckpunkte des Quadrates im Feinraster. Ist das Verhältnis nicht geradzahlig, ist der Grobpunkt um eine halbe Primärflächeneinheit nach links und oben verschoben, was nur eine kleine Ungenauigkeit der Position bewirkt. In beiden Fällen wird eine allfällige repräsentative Raumfläche korrekt aus den beiden Dreiecken im Quadrat gebildet.

Das Flächenelement wird als Felsreflektor berücksichtigt, wenn der Felsanteil den Wert des Parameters *DiffusThreshold* übertrifft.

Da die Beiträge der einzelnen Reflektoren nicht phasenrichtig überlagert werden, kann die Rasterung recht gross ausfallen. Als Standardeinstellung wird *RockGrid* = 5 m und *RasterRatioRock* = 10 empfohlen, wobei *RockGrid* dabei idealerweise dem zugrundeliegenden Raster der Bodennutzungsdaten entspricht. Feinere Rasterungen sind jedoch zulässig. Diese wirken sich allerdings geringfügig auf den Streugrad aus, da die aus dem Höhenmodell abgeleiteten Neigungen der Rasterelemente bei zunehmender Maschenweite in der Tendenz kleiner ausfallen. In Abbildung 2.21 sind die Streugrade für 25, 10 und 5 m Gitterweiten dargestellt. Die Höhe des Reflektors wird aus dem Geländedatensatz in der Mitte des Rasterelementes bestimmt. Der Flächeninhalt und die mittlere Neigung wird aus den vier Eckpunkten des Reflektorelements ermittelt.

2.5.4 Vereinfachungen und weitergehende Details

Zur Optimierung der Rechenzeiten wird bei den Wald- und Felsreflexionen auf eine explizite Berechnung der Hinderniswirkung und des Bodeneffektes verzichtet. In einem ersten Schritt wird die Sichtverbindung zwischen Quelle und Reflektor bzw. zwischen Reflektor und Empfänger geprüft. Ist die Sichtverbindung unterbrochen, so wird die Berechnung dieses Elementes abgebrochen und kein Reflexionsbeitrag angerechnet. Besteht eine Sichtverbindung, so wird

ein idealisiertes Bodeneffektspektrum für $A_{gr/bar}$ gemäss Tabelle 2.9 eingesetzt. (Die entsprechenden Bodeneffektspektren sind in der Frequenztabelle gemäss Anhang A.4 abgelegt.)

Im Falle von Reflexionen an Wäldern erfolgt die Schallausbreitung in der Regel dem Direkt-schall vergleichbar in Bodennähe. Entsprechend tritt ein spektraler Einbruch auf, der sich auch durch die Integration über ganze Linienquellen und eine Vielzahl von Reflektor-Elementen nicht ausmittelt. In Tabelle 2.9 ist ein idealisiertes Bodeneffektspektrum dargestellt, welches im Vergleich mit Messwerten abgeleitet wurde.

Bei reflektierenden Felswänden erfolgt die Schallausbreitung in aller Regel in grösserem Abstand zum Boden. Berechnete Bodeneffektspektren weisen deshalb Interferenzmuster auf, welche eine dichte Abfolge von Auslöschungen mit ersten Einbrüchen bereits unterhalb von 200 Hz zeigen. Die entsprechenden Interferenzmuster verschieben sich je nach Geometrie, so dass es in der Überlagerung der Beiträge vieler Reflektoren zu einer Ausmittlung kommt. Basierend auf Simulationen mit unterschiedlichen Geometrien, aber Reflektorelementen, welche sich durchwegs 100 m über Grund befanden, wurde eine mittlere Bodeneffektkorrektur abgeleitet, welche bei tiefen Frequenzen pauschal eine Anhebung um 6 dB und ab der 160 Hz Terz einen Pegelanstieg von 2 dB ausweist.

Frequenz	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
Wald	6.0	6.0	6.0	3.0	0.0	-3.0	-9.0	-9.0
Fels	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	2.0	2.0	2.0

Frequenz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
Wald	-8.0	-6.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	0.0	2.0
Fels	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Frequenz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
Wald	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Fels	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Tabelle 2.9: Idealisierte Bodeneffektspektren für Wald und Fels. Hinweis: Die Bodeneffektspektren beziehen sich auf den Ausbreitungspfad Quelle-Reflektor-Empfänger. Auch im Falle der Reflexionen an Felswänden und Baumkronen, welche beide als Streukörper modelliert werden, kommt das entsprechende Bodeneffektspektrum nur einmal zur Anwendung.

Bei Wald und Geröllfeldern ist die Annahme, dass die reflektierenden Flächen sich hoch über Grund befinden, nicht gegeben. Entsprechend hat das idealisierte Bodeneffektspektrum gemäss Tabelle 2.9 nur eine begrenzte Gültigkeit und es muss von grösseren spektralen Abweichungen zwischen Messung und Berechnung ausgegangen werden. Da Reflexionen an Geröllfeldern primär im hochalpinen Raum ein Thema sind und in bewohnten Gebieten nur selten auftreten, wurde beschlossen, diese erhöhte Unsicherheit bei der Berechnung in Kauf zu nehmen.

Ein weiterer Spezialfall, der sich durch die Berücksichtigung von Geröll ergibt, ist, dass sich Quelle und Empfänger innerhalb von Flächen des Typs *Geröll* befinden können. Hier würden gleiche Flächen sowohl bei der Bodeneffektberechnung als auch bei der Berechnung diffuser Reflexionen einfließen. Um dies zu vermeiden, werden Reflektorelemente, die sich in zu

kurzem Abstand von Quelle oder Empfänger befinden, ignoriert. Als Standardeinstellung für dieses minimale Distanzkriterium wird 20 m verwendet.

Ebenfalls Teil der vereinfachten Schallausbreitungsrechnung ist, dass für Wald- und Felsreflexionen auf die Berücksichtigung meteorologischer Effekte auf die Schallausbreitung verzichtet wird. Im Falle von Felsformationen, bei welchen die Schallausbreitung mehrheitlich hoch über Grund erfolgt, ist nur von einem geringen Wettereinfluss auszugehen. Bei Waldreflexionen können aber namentlich in ebenen Situationen mit Schallausbreitungspfaden knapp über Grund meteorologische Einflüsse auftreten, welche dem Direktschall vergleichbar sind. Die Berechnung führt in diesen Fällen zu einer systematischen Überschätzung der Immissionen. Die Ausbreitungsdistanzen sind jedoch so gross, dass die resultierenden Immissionspegel deutlich unterhalb sämtlicher Grenzwerte liegen und die Überschätzung deshalb in Kauf genommen werden kann.

Für die Kontrolle der Sichtverbindung wird ein Reflexionspunkt benötigt. Für Fels wird dieser in 0.1 m Höhe im Zentrum des Reflektorelementes angenommen. Für den Wald wird eine repräsentative Reflektorhöhe über Terrain von 10 m verwendet, was der mittleren Baumhöhe gemäss Tabelle 2.8 entspricht.

Bei den Felsreflexionen werden Schallquellen mit stark streifenden Einfallswinkeln $\phi_{i,j}$ nicht berücksichtigt und entsprechende Beiträge vernachlässigt. Der Schalleinfallswinkel wird in der Standardeinstellung mit $\phi_{i,j} < 80^\circ$ beschränkt. Diese Limitierung wird mit dem Ziel einer Rechenzeitoptimierung eingeführt.

Berechnungsablauf

Die Berechnung für Wald- und Felsreflexionen erfolgt folgendermassen:

1. Erzeugung der Reflektoren
Es werden in separaten Rastern die Grundflächen mit der Eigenschaft Wald bzw. Fels identifiziert, wobei das Kriterium des *DiffusThreshold* erfüllt sein muss.
2. Die Waldreflektoren werden anschliessend kaskadenartig zusammengefasst und danach über den Parameter *ForestReflectors_Reduction* zusätzlich ausgedünnt.
3. Relevanztabelle
Es wird eine Relevanztabelle initialisiert, welche für sämtliche Quellen-Reflektor-Empfänger-Pfade festhält, ob diese berechnet werden müssen oder nicht. Die Befüllung der Tabelle erfolgt aufgrund der nachfolgenden drei Kriterien. Es werden zuerst die Beziehungen von allen Empfängern zu allen Reflektoren und in einem zweiten Schritt von allen Quellen zu allen Reflektoren ermittelt.
4. Kontrolle von Distanzkriterien
Die Parameter *maxDistForestPropagation* und *maxDistRockPropagation* definieren die maximal zu berücksichtigenden Ausbreitungsdistanzen, definiert für den Schallweg von der Quelle zum Reflektor und weiter zum Empfänger. Bei Wald wird zusätzlich die maximale Ausbreitungsdistanz von 255 m durch Wald, entweder auf dem Weg zum Reflektor oder vom Reflektor zum Empfänger, kontrolliert.
5. Kontrolle von Winkelkriterien
Für Wald und Fels sind Reflexionswinkel definiert, für welche eine Reflexion unterdrückt

wird. Bei Wald ist dies der Fall, wenn die Ausfallsrichtung weitgehend mit der Einfallrichtung übereinstimmt (Streuwinkel gemäss Formel 2.69 $> 135^\circ$). Bei Fels werden Reflexionen bei sehr flachen Schalleinfallswinkeln ($> 80^\circ$ relativ zur Flächennormalen) unterdrückt.

6. Sichtbarkeitskontrolle

Für die verbleibenden Ausbreitungspfade werden Geländeschnitte inklusive künstliche Hindernisse erzeugt und es wird die Sichtbarkeit untersucht. Ist diese nicht gegeben, wird der Reflexionsbeitrag als nicht relevant eingestuft und entsprechend in der Relevanztabelle markiert.

7. Berechnung der Reflexionsbeiträge

Als letzter Schritt werden für alle relevanten Quellen-Reflektor-Empfänger-Beziehungen die Reflexionsbeiträge für Wald und Fels berechnet.

2.6 Bestimmung der Modellunsicherheit des *sonX* Ausbreitungsmodells

Die Modellunsicherheit des *sonX*-Ausbreitungsmodells wurde 2013 in einem separaten Projekt untersucht. Nachfolgend wird die Zusammenfassung aus dem entsprechenden Empa-Bericht mit Nr. 5211.00381.100.01-1 (intern 510.2571) vom 11. Juli 2013 wiedergegeben:

Im Hinblick auf einen Einsatz des *sonX*-Ausbreitungsmodells in der Praxis wurde eine abschliessende Kontrolle der Leistungsfähigkeit und der Genauigkeit des Modells gemacht. Das Ziel war herauszufinden wie genau Einzelsituationen reproduziert werden. Dafür wurden Ausbreitungssituationen, welche bereits beim *sonRAIL*-Projektabschluss berücksichtigt worden waren, neu berechnet. Zusätzlich wurden unter Verwendung von Referenzschallquellen ergänzende Messungen für verschiedene Situationen durchgeführt und mit Berechnungen verglichen. Insgesamt wurden 101 Quellen-Empfänger-Kombinationen aus Messungen an sieben Standorten spektral ausgewertet. Getestet wurde der Direktschall inklusive Meteorologieeinfluss sowie Reflexionen an Gebäuden.

Im Mittel über alle Datenpunkte wies *sonX* rund 0.3 dB(A) zu hohe Immissionspegel aus. Es wurden keine systematischen Über- oder Unterschätzungen des Modells ausgemacht. Die Standardabweichung der Pegeldifferenzen zwischen Messungen und Berechnungen betrug 2.4 dB(A) und der mittlere Fehler 2.5 dB(A). Die mittlere Abweichung (Median) relativ zur Ausbreitungsdämpfung belief sich auf 2.8%. Die Validierungsfälle haben gezeigt, dass das Modell die grundlegenden Phänomene der Schallausbreitung richtig abbildet. Eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen wurde in den Situationen mit Hindernissen sowie mit relevanten Reflexionen erreicht. Etwas grössere Unsicherheiten wurden bei Ausbreitungssituationen mit freier Sicht über grössere Distanzen festgestellt, wo Wettereinflüsse und Bodenreflexionen einen massgeblichen Einfluss auf die resultierenden Immissionen haben. Es wird vermutet, dass dies am mangelnden Detaillierungsgrad der Eingangsparameter bzw. an lokalen Abweichungen im Vergleich zu Standard-Parametersetzungen liegt (komplexe Windfelder, lokale Variationen des Strömungswiderstandes des Bodens aufgrund unterschiedlicher Verdichtung, Korngrössenverteilung und Wassersättigung). Insgesamt ist die Übereinstimmung zwischen *sonX* und den Messresultaten sowohl spektral als auch in Bezug auf die resultierenden A-bewerteten Summenpegel als gut einzuschätzen.

3 Beschleunigungsmassnahmen

Im Rahmen des Projekts sonRAIL-SpeedUp, welches zusammen mit der Firma LCC Consulting AG, der Abteilung Medientechnik der Empa und Merz Technik durchgeführt und durch die Technologieförderung des BAFU finanziert wurde, wurde u.a. eine umfangreiche Überarbeitung des Ausbreitungsalgorithmus vorgenommen, mit dem Ziel den Berechnungsalgorithmus massiv zu beschleunigen. Die umgesetzten Massnahmen sind im Empa-Bericht 208'563 dokumentiert. Ausserdem wurden die Resultate an der Euronoise 2012 in Prag präsentiert [32]. Nachfolgend sind Auszüge des Berichtes zusammengestellt, welche die wichtigsten Beschleunigungsmassnahmen, zusätzliche Massnahmen zur Reduktion der Resultatmenge sowie im Rahmen der Arbeiten vorgenommene Anpassungen an den Ausbreitungsalgorithmen dokumentieren.

Im Frühsommer 2014 wurde die Strahlsuche im Modul METEO nochmals gründlich überarbeitet und weiter optimiert. In Abschnitt 3.1.2 werden für die beiden Fälle für förderliche und hinderliche Bedingungen die Such- und Abbruchkriterien sowie der Code der zentralen Routinen aufgeführt.

3.1 Massnahmen zur Beschleunigung des Ausbreitungsmodells

Im vorliegenden Kapitel wird ein Überblick zu den Massnahmen gegeben, welche im Endeffekt zu einer Beschleunigung des Rechenkerns geführt haben. In Abschnitt 3.1.1 werden generelle Strategien des Code-Tunings gezeigt. Exemplarisch werden auch einige Zeilen Code aufgeführt, um einen konkreteren Eindruck der Umsetzung zu vermitteln. In den nachfolgenden Abschnitten 3.1.2 bis 3.1.4 werden für die Module *BASIC*, *METEO* und *REFLECT* spezifische Beschleunigungsmassnahmen aufgeführt. Neben reinem Code-Tuning stehen dabei primär Massnahmen im Vordergrund, welche eine Reduktion des Rechenaufwandes erreichen, ohne dabei die Aussagekraft der Modelle massgeblich zu tangieren. Dabei lässt es sich teilweise nicht vermeiden, dass sich die Beschleunigung der Berechnung in Form einer Reduktion der Genauigkeit auswirkt. Da es im Einzelfall dem Benutzer überlassen werden soll, eine Gewichtung zwischen der erwünschten Genauigkeit im Vergleich zur in Kauf zu nehmenden Rechenzeit vorzunehmen, wurden entsprechende Einflussgrössen als frei veränderbare Parameter in eine Steuerungsdatei ausgelagert. Für sämtliche Parameter werden dabei Empfehlungen für drei Betriebsmodi *Survey*, *Engineering* und *Precision* angegeben. Bei einer Parametersetzung gemäss den Vorgaben von *Survey* wird eine maximale Rechengeschwindigkeit erreicht. Allerdings muss im Einzelfall mit grösseren Unsicherheiten gerechnet werden. Dieser Modus wird beispielsweise empfohlen um rasch für grosse Rechengebiete eine Identifikation relevanter Bereiche vorzunehmen. Die Einstellungen für *Engineering* stellen den Standardfall dar, welcher beispielsweise für die Erstellung von Lärmkarten verwendet werden soll. Die Unsicherheitsangaben in diesem Bericht und auch in der sonRAIL-Modelldokumentation basieren auf diesem Arbeitsmodus. Im dritten Modus *Precision* werden keine Kompromisse in Kauf genommen und es wird mit höchster Genauigkeit gerechnet. Der Aufwand ist jedoch entsprechend gross und kann im Einzelfall ein Vielfaches des *Engineering*-Modus ausmachen. Diese Betriebsart wird deshalb nur für Einzelpunkt-

Betrachtungen und Detailanalysen empfohlen.

Im Rahmen des Projektes *SpeedUp* wurden am vierten Modul *FOREST* keine Beschleunigungsmassnahmen umgesetzt. Dies zum einen da aus dem Profiling für dieses Modul kein unmittelbarer Handlungsbedarf abgeleitet wurde und zum anderen da bei der Modellentwicklung und Ausprogrammierung der Reduktion des Rechenaufwandes bereits grosse Aufmerksamkeit geschenkt wurde.

Neben den aufgeführten Massnahmen wurden einige weitere Ideen untersucht, welche jedoch im Endeffekt nicht eingeführt wurden. Auf eine Umsetzung wurde entweder verzichtet wenn sich der Ertrag im Vergleich zum Zeitaufwand als zu gering herausstellte oder wenn sich die Realisierung negativ auf die Codestruktur und/oder die Lesbarkeit ausgewirkt hätte. So wurden z.B. Versuche, entscheidende Routinen in Assembler nachzuprogrammieren um dadurch pro Rechentakt bis zu vier Operationen gleichzeitig ausführen zu können, nach eingehender Prüfung als nicht wünschenswert erachtet. Neben der Übersichtlichkeit und Lesbarkeit des Codes wurde auch der Portierbarkeit des Rechenkerns ein hohes Gewicht eingeräumt. Deshalb wurde darauf verzichtet Beschleunigungsverfahren einzusetzen, welche eine spezifische Rechnerarchitektur voraussetzen, wie dies beispielsweise bei der Auslagerung von Rechenaufgaben an Grafikprozessoren der Fall ist.

3.1.1 Generelle Massnahmen zur Code-Beschleunigung

1. Einsatz von Lookup-Tables

Funktionen, welche rechenaufwändig sind und oft gebraucht werden (wie z.B. trigonometrische Funktionen oder die Error-Funktion für die Kugelwellenreflexion) werden vorausberechnet und in Tabellen abgelegt. Der Zugriff auf den Tabellenwert erfolgt dann deutlich schneller als die eigentliche Berechnung. (Um den Umfang und damit den Speicherbedarf der Lookup-Tables zu begrenzen, wurden z.T. auch nur häufig auftretende Wertebereiche tabelliert. Treten Parameter ausserhalb des abgelegten Wertebereiches auf, wird die ursprüngliche Berechnungsfunktion aufgerufen.)

Bemerkung: Der Einsatz von Lookup-Tables ist umso erfolgreicher, je grösser die Projekte sind. Bei kleinen Projekten kann die Erstellung der Tabellen einen vergleichbaren Aufwand wie die eigentliche Berechnung der Werte im Projekt verursachen.

2. Wiederverwendung von Zwischenresultaten

Vertikale Geländeprofile sind ein Beispiel für Zwischenresultate, welche bei den verwendeten Modellen mehrfach benötigt werden. Durch eine geeignete Strukturierung der Arbeitsschritte und eine Zwischenspeicherung der Geländeschnitte kann vermieden werden, dass die rechenaufwändige Erzeugung mehrfach erfolgen muss. Analog zum Einsatz von Lookup-Tables wird die Zwischenspeicherung von Teilergebnissen durch den Zuwachs an Speicherbedarf begrenzt.

3. Optimierung von Schleifen-Strukturen

Der Speicherzugriff ist schneller, wenn benachbarte Speicherbereiche adressiert werden. Bei Schleifen in welchen auf mehrdimensionale Datenstrukturen zugegriffen wird, spielt deshalb die Reihenfolge eine Rolle.

4. Optimierung von Berechnungsformeln

Gleitkomma-Multiplikation ist schneller als Division.

Wiederholt gleiche Berechnungen sind zu vermeiden. Die Formeln müssen auch daraufhin untersucht werden, ob nicht Zwischenwerte gespeichert und wieder verwendet werden können. (Ein einfaches Beispiel und ein Klassiker in der Akustik ist der Ausdruck

$10 \cdot \log(4\pi)$, welcher aus den entsprechenden Formeln extrahiert und als Konstante mit dem Wert 11 implementiert werden kann.)

5. Optimierung von Datentypen

Bei Einfachpräzision sind die Berechnungen schneller als bei doppelter Präzision und *Integer*-Werte werden schneller als einfach präzise Gleitkommazahlen berechnet. Entsprechend ist es sinnvoll, speicher- und rechenintensive Datentypen nur dort einzusetzen, wo sich dies effektiv auf die Resultate auswirkt.

Wenn möglich sollen lokal anstatt Recordvariablen nur einzelne Variablen deklariert werden. (Beispiel: Anstatt einen zweidimensionalen Vektor V: CV2 zu initialisieren und Zugriffe auf V.x und V.y vorzunehmen ist es besser, lokal bloss x und y zu deklarieren.)

6. Prozeduraufrufe und Parameterübergaben

Records als Prozedurparameter (z.B. Koordinaten) sind mit *const* zu deklarieren, wenn sie in der Prozedur nicht verändert werden sollen. Das vermeidet eine Kopie (bei XYZ-Koordinaten entspricht das beispielsweise einer Einsparung von 24 bytes).

Verschachtelte Prozeduren mit Array-Parametern sollen in eine einzige Schleife zusammengefasst werden. (Beispiel: Sum(Array1, Mul(Array2, Array3)). Die Lösung ist, dass man die folgende Anweisung in eine einzige Schleife ohne Subroutine packt: Result[i] := Array1[i] + Array2[i] * Array3[i].)

Inline-Prozeduren sparen den Sprung/Rücksprung und die Übergabe von Prozedurparametern. Das Schlüsselwort *inline* wird vom Compiler allerdings nicht immer umgesetzt. Insbesondere nicht, wenn offene Arrays im Spiel sind, was oft der Fall ist. Um auch in diesen Fällen ein Inlining zu ermöglichen, muss der Code direkt in die übergeordnete Prozedur integriert werden. Da dies jedoch in der Tendenz die Lesbarkeit verschlechtert, wurden diese Massnahme nur an Stellen realisiert, die sehr oft durchlaufen werden und die somit einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamt-Ausführungszeit haben.

7. Prozessor-Cache

Begrenzte Speicherzugriffe und wenig Code in einer Schleife reduzieren den Transfer von Code bzw. Daten in den Cache und sind deshalb ausgesprochen schnell. Müssen während einer Schleife jedoch äussere Speicherbereiche wiederholt angesprochen (kopiert) werden, verlangsamt das den Code derart, dass kein Assemblercode das aufwiegen kann. Cache-Optimierung hat somit eine höhere Priorität als Assembler-Optimierung. Grundsätzlich muss bei Prozessen beurteilt werden, ob eigentliche Rechenoperationen oder Speicherzugriffe als limitierende Faktoren auftreten. Entsprechend dieser Einschätzung sind die Beschleunigungsmassnahmen auszulegen.

Viele der aufgeführten Massnahmen bringen einen gewissen Verlust an Leserlichkeit bzw. Verständlichkeit mit sich, beispielsweise indem Formeln nicht mehr auf den ersten Blick mit der Variante aus der Modelldokumentation verglichen werden können, Prozeduren durch das manuelle Inlining grösser werden oder durch den Verzicht auf strukturierte Datentypen Variablen nicht ohne weiteres interpretiert werden können. Diesem Umstand wurde bei der Programmierung Rechnung getragen, indem der Code und vor allem auch die Anpassung des Codes bei der Beschleunigung ausführlich kommentiert wurde. Bei Schlüsselstellen wurde oft auch die originale Version in auskommentierter Form stehen gelassen.

Zur Illustration folgt ein kleines Code-Beispiel. Es handelt sich um die innerste Schleife einer Reihe von verschachtelten Schleifen des REFLECT-Moduls aus einem zeitkritischen Abschnitt vor der Überarbeitung (Ausschnitt aus der Methode *find reflected sound at flaechen*):

```
with flaeche[ i] do
```

```

begin
...
for jj := 1 to flaeche[ii].nTFP do
begin
  r := sqrt(sqr({flaeche[i].}TFP[j].x-flaeche[ii].TFP[jj].x)+
    sqr({flaeche[i].}TFP[j].y-flaeche[ii].TFP[jj].y)+
    sqr({flaeche[i].}TFP[j].z-flaeche[ii].TFP[jj].z));

  ux := {flaeche[i].}n.x; uy := {flaeche[i].}n.y; uz := {flaeche[i].}n.z;
  vx := flaeche[ii].TFP[jj].x - {flaeche[i].}TFP[j].x;
  vy := flaeche[ii].TFP[jj].y - {flaeche[i].}TFP[j].y;
  vz := flaeche[ii].TFP[jj].z - {flaeche[i].}TFP[j].z;
  cosPhi := (ux*vx+uy*vy+uz*vz)/(sqrt(ux*ux+uy*uy+uz*uz)*sqrt(vx*vx+vy*vy+vz*vz));

  ux := flaeche[ii].n.x; uy := flaeche[ii].n.y; uz := flaeche[ii].n.z;
  vx := {flaeche[i].}TFP[j].x - flaeche[ii].TFP[jj].x;
  vy := {flaeche[i].}TFP[j].y - flaeche[ii].TFP[jj].y;
  vz := {flaeche[i].}TFP[j].z - flaeche[ii].TFP[jj].z;
  cosPsi := (ux*vx+uy*vy+uz*vz)/(sqrt(ux*ux+uy*uy+uz*uz)*sqrt(vx*vx+vy*vy+vz*vz));

  if ((cosPsi >= 0.0) and (cosPhi >= 0.0)) then
  begin
    a.re:= {flaeche[i].}pnm1[j].re - {flaeche[i].}pnm2[j].re;
    a.im:= {flaeche[i].}pnm1[j].im - {flaeche[i].}pnm2[j].im;
    b.re := 1.0;   b.im := wavenumber*r;   { original version }
    c.re := a.re*b.re - a.im*b.im;
    c.im := a.re*b.im + a.im*b.re;
    a := c;
    b.re := cos(-wavenumber*r);
    b.im := sin(-wavenumber*r);
    c.re := a.re*b.re - a.im*b.im;
    c.im := a.re*b.im + a.im*b.re;

    summand.re := (1.0/(2.0*3.14159))*c.re*cosPhi*{flaeche[i].}DeltaS/(r*r);
    summand.im := (1.0/(2.0*3.14159))*c.im*cosPhi*{flaeche[i].}DeltaS/(r*r);
    // Absorption der Senderflaeche beruecksichtigen:
    // Schalldruckreflexionsfaktor = Wurzel(1-alpha)
    summand.re := summand.re*sqrt(1-{flaeche[i].}alpha);
    summand.im := summand.im*sqrt(1-{flaeche[i].}alpha);
    flaeche[ii].pn[jj].re := flaeche[ii].pn[jj].re + summand.re;
    flaeche[ii].pn[jj].im := flaeche[ii].pn[jj].im + summand.im;
  end;
end;
...
end;

```

Dieselbe Schleife sieht nach der Überarbeitung wie folgt aus:

```

with flaeche[ i] do
begin
...
// ux1, uy1, uz1, Len1Sqr, Factor1, TFPjx, TFPjy, TFPjz werden vor der Schleife bestimmt
// und fallen zeitlich nicht so stark in's Gewicht.
for jj := 1 to flaeche[ii].nTFP do
begin
  with flaeche[ii].TFP[jj] do
  begin
    vx := {flaeche[ii].TFP[jj].}x - TFPjx;
    vy := {flaeche[ii].TFP[jj].}y - TFPjy;
    vz := {flaeche[ii].TFP[jj].}z - TFPjz;
  end;
  Len2Sqr := sqr( vx ) + sqr( vy ) + sqr( vz );

```

```

cosPhi := ( ux1 * vx + uy1 * vy + uz1 * vz) / sqrt( Len1Sqr * Len2Sqr);

RwaveNum := WaveNum * sqrt( Len2Sqr);
tmp      := -RwaveNum * gTrig.mRadiansToLocal; // gibt Winkel im Lokal- statt Bogenmass
bRe      := gTrig.VeryFastCos( tmp);           // Cos-Tabelle
bIm      := gTrig.VeryFastSin( tmp);           // Sin-Tabelle
cRe      := aRe { * 1}      - aIm * RwaveNum;
cIm      := aRe * RwaveNum + aIm { * 1};

tmp := Factor1 * cosPhi / Len2Sqr;
with flaeche[ii].pn[jj] do
begin
  re := re + ( cRe * bRe - cIm * bIm) * tmp;
  im := im + ( cRe * bIm + cIm * bRe) * tmp;
end;
end;
end;

```

Die Schleife ist kürzer und damit einiges schneller geworden:

- 13 Additionen/Subtraktionen statt 36
- 15 Multiplikationen statt 43
- 2 Divisionen statt 6
- Die vorgezogenen Berechnungen von ux1 bis TFPjz entlasten die Schleife
- Die with .. do Konstrukte vermeiden mehrmalige Zugriffe auf kompliziert adressierte x , y , z Variablen
- Zwischengespeicherte Werte werden mindestens zweimal verwendet, z.B. Len2Sqr.
- An die Stelle der zeitintensiven trigonometrischen Funktionen treten Tabellenzugriffe (2 trigonometrische Tabellenzugriffe anstatt 2 trigonometrische Funktionen)
- Die Prozessor-Cache Ladevorgänge stören möglicherweise die dargestellte oder die übergeordnete Schleife, weil wahrscheinlich nicht alle Flächenrecords inkl. Code im Cache Platz haben.

3.1.2 Spezifische Massnahmen im Modul BASIC

1. Quellendiskretisierung

In der ursprünglichen Modellversion wurden Linienquellen zu Beginn der Berechnung durch eine Reihe von Punktquellen in konstantem Abstand abgebildet. Die Ausbreitungsrechnung wurde danach von jeder dieser Punktquellen zu jedem Empfangspunkt durchgeführt. Eine massive Beschleunigung wurde dadurch erreicht, dass die Quellendiskretisierung neu für jeden Empfangspunkt und für jeden Quellenpunkt separat vorgenommen wird. Eine Linienquelle wird dabei fortlaufend diskretisiert, indem die Schrittweite zum nächsten Quellenpunkt aus der Distanz des aktuellen Quellenpunktes zum Empfänger ermittelt wird. Das ergibt bei nahen Empfangspunkten eine feinere Quellendiskretisierung als bisher (also auch eine genauere Rechnung) und eine gröbere Diskretisierung bei fernen Empfangspunkten. Eine untere und obere Abstandsgrenze kann über wählbare Parameter festgelegt werden. Im *Engineering*-Modus wird ein minimaler Diskretisierungsschritt von 1 m und ein maximaler Abstand von 100 m empfohlen. Im Zwischenbereich soll der Diskretisierungsschritt 10% der Ausbreitungsdistanz betragen.

Das gleiche Quellendiskretisierungsverfahren wird auch beim Modul *METEO* eingesetzt, allerdings mit einem minimalen Diskretisierungsschritt von 10 m. Bei den Modulen *REFLECT* und *FOREST* wurde die ursprüngliche Diskretisierung mit konstantem Abstand beibehalten. Im *Engineering*-Modus wird eine Schrittweite von 10 bzw. 25 m empfohlen.

2. Reduktion der Anzahl Geländesegmente pro Vertikalprofil

Mit Abstand den grössten Zeitbedarf bei der Direktschallberechnung nimmt die Bodeneffektmodellierung in Anspruch. Dabei wird im vertikalen Geländeschnitt in 10-tel Terzen an jedem Segment des Reliefs eine Reflexion berechnet. Der Rechenaufwand ist somit direkt proportional zur Anzahl Geländesegmente. Eine Zusammenfassung von Geländesegmenten, welche näherungsweise auf einer Geraden liegen, ist nicht nur aus Beschleunigungsgründen sinnvoll. Sie reduziert bei streifendem Schalleinfall auch die Empfindlichkeit bzgl. der Lage des Reflexionspunktes, welche bei einer rein geometrischen Betrachtung im Vergleich zu einem echten Wellenverhalten auftritt. Aus diesem Grund ist bereits in der *sonRAIL*-Modelldokumentation, welche zum Abschluss der Modellentwicklung verfasst worden war, ein Verfahren zur Reduktion der Anzahl Geländesegmente integriert. Dieses Verfahren, welches dem *Harmonoise*-Berechnungsmodell entlehnt wurde, zielt darauf ab, die massgeblichen Hinderniskanten unverändert zu lassen und die dazwischen liegenden Bereiche zusammenzufassen. Wie es sich gezeigt hat, war die Implementation der Methode, welche in der ursprünglichen *sonRAIL*-Variante integriert war, unzureichend. Zusätzlich wurden die in *Harmonoise* verwendeten Modellparameter weiter optimiert, so dass im Endeffekt eine deutliche Reduktion der Rechenzeiten resultierte. So wurde die minimal zulässige Höhendifferenz zwischen Segmentpunkten in kurzen Abständen von 0.1 m auf 0.25 m erhöht. Die zweite Einflussgrösse, welche die minimale Segmentlänge in Abhängigkeit des Abstandes vorgibt, wurde ebenfalls angepasst. Das Minimum wurde von 1 m auf 5 m und das Maximum, welches ab Ausbreitungsdistanzen von 200 m greift, von 10 m auf 50 m erhöht.

3. Verbesserung des Algorithmus zur Identifikation des massgeblichen Schallpfades

Der massgebliche Schallpfad, welcher für die Direktschallberechnung benötigt wird, stellt die kürzeste Verbindung zwischen Quelle und Empfänger unter Berücksichtigung sämtlicher Hinderniskanten im Vertikalschnitt dar. Durch den Einsatz eines optimierten Konvex-Hull-Algorithmus konnte der Aufwand zur Identifikation dieses Schallpfades reduziert werden.

3.1.3 Spezifische Massnahmen im Modul METEO

Bei der Berechnung des Wettereinflusses stellt die Schallstrahlsuche für die inhomogene Atmosphäre mit Abstand den rechenaufwändigsten Teil dar. Entsprechend konzentrieren sich die Anstrengungen darauf, diesen repräsentativen Schallpfad möglichst schnell zu identifizieren. Die Schallstrahlsuche stellt einen iterativen Prozess dar. Über einem vertikalen Geländeschnitt und unter Berücksichtigung von lokal, entsprechend den Untergrundeigenschaften variierenden Schallgeschwindigkeitsprofilen wird jener Schallstrahl gesucht, der von der Quelle zum Empfänger führt bzw. diesem am nächsten kommt. Bei Vorhandensein von relevanten Hinderniskanten, d.h. wenn kein Strahl existiert, welcher Quelle und Empfänger direkt verbindet, wird der Schallpfad gesucht, welcher via Hinderniskanten sein Ziel findet. Dabei gilt es einen Algorithmus zu finden, welcher aufgrund der Abweichungen der bisher berechneten Strahlen die Startbedingungen für die nächste Strahlsuche geeignet optimiert, so dass der anvisierte Empfangspunkt mit möglichst wenig Iterationen gefunden werden kann.

Allerdings gibt es sogenannte akustische Schattenzonen in welche kein Strahl hinein führt. Hier muss iterativ der Strahl gefunden werden, welcher dem Empfänger am nächsten kommt, was im Vergleich zum obigen Fall mit einem Treffer etwas mehr Iterationen in Anspruch nimmt. Für den Algorithmus entscheidend ist, dass diese Fallunterscheidung, ob es sich um eine akustische Schattenzone handelt oder nicht, trotz Vereinfachungen und Beschleunigungen korrekt zugeordnet wird, da sonst grosse Abweichungen bei den Resultaten auftreten können. Die ent-

sprechende Entscheidungsfindung ist in Abbildung 2.7 auf Seite 34 dargestellt. Nachfolgend werden die Routinen dargestellt, welche für hinderliche und förderliche Strahlsuchen zur Anwendung kommen. Zum besseren Verständnis werden die Such- und Abbruchkriterien separat aufgelistet.

Strahlsuche unter der Annahme hinderlicher Bedingungen

Die Strahlsuche für hinderliche Bedingungen wird zuerst behandelt, da der Entscheidungsbaum gemäss Abbildung 2.7 mit der Annahme einer hinderlichen Situation startet.

- Die horizontale Schrittweite bei der Strahlbildung beträgt konstant 2 m. Das hat zur Folge, dass das Gelände inkl. sämtlicher Objekte, welche sich zwischen Quelle und Empfänger befinden, auf dieses Raster abgebildet werden. So werden z.B. Wände auf das nächste Segment verschoben bzw. wird dort der Geländeverlauf entsprechend angehoben.
- Der erste Strahl wird von der Quelle in Richtung Empfänger oder im Falle einer unterbrochenen Sichtverbindung in Richtung der ersten massgeblichen Hinderniskante abgeschickt.
- Liegt die erste Hinderniskante weniger als 11 m entfernt, so wird die Strahloptimierung abgebrochen und dieser Strahl als Resultat verwendet.
- Da bei hinderlichen Situationen der Strahl oberhalb des Empfängers passiert, wird der zweite Strahl mit einem im Uhrzeigersinn gedrehten Abschusswinkel emittiert. Der initiale Winkelschritt wird dabei aus dem Punkt des ersten Strahls mit dem kürzesten Abstand zum Empfänger abgeleitet.
- Auch für die nachfolgenden Schritte bleibt der kürzeste Abstand d_R des Strahls vom Empfangspunkt, gemäss Abbildung 2.8 auf Seite 35 das massgebliche Optimierungskriterium.
- Für jede neue Strahlsuche wird der Winkelschritt reduziert. Der Winkelschritt wird dabei entweder mit einem Faktor 0.5 oder 0.9 multipliziert. 0.9 kommt zur Anwendung wenn der letzte Strahl den Boden getroffen hat oder wenn die Schallschattendistanz angewachsen ist, d.h. d_R beim aktuellen Strahl grösser als beim Vorhergehenden ist.
- Die Suchrichtung wird gedreht, wenn die bisherige Suchrichtung und die Entwicklung der Schallschattendistanz gleichläufig sind, d.h. wenn der letzte Emissionswinkel grösser als der Vorletzte ist und gleichzeitig die Schallschattendistanz zugenommen hat oder umgekehrt.
- Die Strahlsuche wird beendet, wenn entweder 26 Iterationen durchlaufen wurden, der Schallschatten weniger als 10 cm beträgt oder sich d_R zwischen zwei Durchläufen um weniger als 1% reduziert.
- Falls Sichtverbindung besteht und ein Strahl gefunden wurde, welcher unterhalb des Empfangspunktes durchgeht, wird das Endresultat auf Null gesetzt, d.h. es wird kein Meteoroeffekt aufgrund einer Ausbreitung entlang gekrümmter Strahlen ausgewiesen.

```

procedure CRaytracingShadow.SearchRay( StartAlpha: doub; // Ersatz vom 24-Jun-14
                                       NextObstacleX: doub); // neu ab 25-Jun-14
var
  PrevShadow: doub;           // Zuletzt berechnete gültige Schallschattendistanz.
                              // Das kann früher als vom Vorgänger stammen.
  PrevAlpha: doub;           // Zuletzt berechnete gültiger Abstrahlwinkel.

```

```

// Das kann früher als vom Vorgänger stammen.
CurrAlpha: doub; // Aktueller Strahlwinkel
var
  i: integer;
  DeltaAlpha: doub; // Winkelschrittweite
  Kdelta1: doub; // Reduktionsfaktor für die Winkelschritte stark
  Kdelta2: doub; // Reduktionsfaktor für die Winkelschritte schwach
  DeltaD: doub; // Differenz des Schallschattens zu PrevShadow
  {$IFDEF RAYFILE}
    s: string;
  {$ENDIF}
begin
  // Neu ab 20-Jun-14: Zwei kDelta Werte.
  kDelta1 := 0.5; // DeltaAlpha stark verkleinern
  kDelta2 := 0.9; // DeltaAlpha mässig verkleinern
  // Muss >= 0.85 sein, sonst erreicht man ausgehend
  // von -90° mit DeltaAlpha = 29.6° nicht +90°.
  PrevShadow := 1E12; // Soll viel grösser sein als mShadow.Dshadow.
  PrevAlpha := Pi/2; // also 180° (bloss gross)

  // Startwinkel setzen und begrenzen
  // -----
  //CurrAlpha := 0; // ersetzt am 16-Mai-14
  CurrAlpha := StartAlpha; // Regulär Src->Rcv, bzw, Src-> 1. Kante
  if CurrAlpha > cPiBy4s then CurrAlpha := cPiBy4s;
  if CurrAlpha < - cPiBy4s then CurrAlpha := - cPiBy4s;

  // Winkelschrittweite Startwert
  // -----
  DeltaAlpha := 3.1/6; // also 29.60281942°

  // Rückfall-Resultatwerte wenn alles missgelingt
  // -----
  // Die sollten eigentlich nicht beansprucht werden.
  mShadow.Dshadow := 1E6;
  mShadow.Lray := 1E6;
  mShadow.Hgnd := 1E6;
  mShadow.Sigma := -1;
  mShadow.Ngnd := 0;
  mForestLen := 0;

  // Maximal 26 Annäherungsversuche
  // -----
  for i := 1 to 26 do
  begin
    // Strahl in Richtung CurrAlpha rechnen
    // -----
    mRayUpw1.CalcRay( CurrAlpha);

    // Boden getroffen?
    // -----
    if mRayUpw1.mHitGnd then
    begin
      // -----
      // Zuletzt wurde der Boden getroffen
      // -----
      // Ohne Resultat.
      // Strahl nach oben drehen.

      // Winkelschrittweite für den nächsten Schritt verkleinern
      // -----

```

```

// Weil der Boden getroffen wurde nur mässig verkleinern.
DeltaAlpha := DeltaAlpha * kDelta2; {Schritt nahezu beibehalten}

// Winkelschritt nach oben
// -----
CurrAlpha := CurrAlpha + DeltaAlpha;

// Strahl nicht steiler als knapp 90° nach oben wegschicken
// -----
if CurrAlpha > cPiBy4s then CurrAlpha := cPiBy4s;

// Weiter mit nächster Strahlberechnung
// -----
// Rest der Routine überspringen.
continue;
end; // Boden getroffen?

// -----
// Zuletzt wurde der Boden nicht getroffen
// -----
// Resultat von CalcRay übernehmen.
mShadow := mRayUpw1.mShadow;
mForestLen := mRayUpw1.mForestLeng;

// Winkelschrittweite verkleinern
// -----
// Bei Abnahme der Schallschattendistanz stark verkleinern, sonst mässig.
if mShadow.Dshadow < PrevShadow then
  DeltaAlpha := DeltaAlpha * kDelta1 {Schritt verkleinern} else
  DeltaAlpha := DeltaAlpha * kDelta2; {Schritt nahezu beibehalten}

// Aufhören bei kurzer Distanz  ganzer Abschnitt neu ab 25-Jun-14
// -----
// Wenn das erste Hindernis oder der Empfänger näher als 11 m bei der
// Quelle ist, kann man nach der ersten Strahlberechnung aufhören.
// Alle weiteren Strahlberechnungen können nur schlechter sein!
// Bei einem Beispiel ohne diesen Abbruch mit einem Hindernis in 2 m
// Horizontalabstand ergaben sich weitere 10 Strahlberechnungen, nur um
// auf den fast gleichen Winkel und die fast gleiche Schallschattendistanz
// zu kommen. Das ist folglich ein Speedup.
if i = 1 then
begin
  if NextObstacleX < 11 then
  begin
    // Stop
    // ----
    break; // Schleife verlassen
  end;
end;

// Aufhören wenn die Schallschattendistanz klein oder 0 ist
// -----
// Wert 0: Der Strahl verläuft zwischen Empfänger und Boden,
// ohne den Boden zu treffen.
if mShadow.Dshadow < 0.1 then
begin
  // Stop
  // ----
  break; // Schleife verlassen
end; // if mShadow.Dshadow < 0.1 then

```



```

// Schallschattenänderung
// -----
// In Bezug auf die zuletzt festgehaltene Schallschattendistanz.
DeltaD := mShadow.Dshadow - PrevShadow;

// Aufhören wenn die Schallschattendistanz sich nur wenig geändert hat
// -----
// Die Schallschattendistanz hat sich gegenüber der letzten gültigen
// Berechnung um weniger als 5 Promille (ab 25-Jun-14 1%) geändert
// seitdem eine letzte gültige Schallschattendistanz berechnet werden
// konnte.
// 25-Jun-14: 10% ist nach Prüfung mit einer Bonaduz Lärmkarte nicht gut genug.
//          1% zeigte gegenüber 5 %o selten Abweichungen von 0.1 dB, meist 0.
//          1% sehen wir als gut genug.
// if abs( DeltaD) < 0.005 * mShadow.Dshadow then      geändert am 20-Jun-14
// if abs( DeltaD) < 0.1   * mShadow.Dshadow then      geändert am 24-Jun-14
// if abs( DeltaD) < 0.01  * mShadow.Dshadow then      // Wahl am 24-Jun-14
begin
  // Stop
  // ----
  break; // Schleife verlassen
end; // if abs( DeltaD) < 0.01 * mShadow.Dshadow then

// Weitersuchen, bisher kein Abbruch
// -----

// Abstrahlwinkel Alpha situativ neu einstellen für den nächsten Schritt
// -----
// Tendenzen der Winkel- und Schattendistanz-Änderungen berücksichtigen
if ( CurrAlpha - PrevAlpha >= 0) xor ( DeltaD >= 0) then
begin
  // Alpha und mShadow.Dshadow änderten sich gegenläufig
  // -----
  // Strahl nach oben drehen.
  PrevAlpha := CurrAlpha;
  CurrAlpha := CurrAlpha + DeltaAlpha;

  // Strahl nicht steiler als knapp 90° nach oben wegschicken
  // -----
  if CurrAlpha > cPiBy4s then CurrAlpha := cPiBy4s;
end else
begin
  // Alpha und mShadow.Dshadow änderten sich gleichläufig
  // -----
  // Strahl nach unten drehen.
  PrevAlpha := CurrAlpha;
  CurrAlpha := CurrAlpha - DeltaAlpha;

  // Strahl nicht steiler als knapp -90° nach unten wegschicken
  // -----
  if CurrAlpha < - cPiBy4s then CurrAlpha := - cPiBy4s;
end;

// Aktuelle Schallschattendistanz als vorige festhalten
// -----
// Boden getroffen: Hier kommt der Code nicht vorbei, PrevShadow bleibt.
// Wert 0:          Hier kommt der Code nicht vorbei, wegen Abbruch.
//              Kein Schallschatten. Der Strahl verläuft
//              zwischen Empfänger und Boden.
// Wert < 0.1:      Hier kommt der Code nicht vorbei, wegen Abbruch.
//              Der kleine Schallschatten gilt wie kein Schallschatten.

```

```

// Wert >= 0.1:      Schallschattendistanz. Hinderliche Ausbreitung.
PrevShadow := mShadow.Dshadow;
end; // for i := 1 to 26 do
end;

```

Strahlsuche unter der Annahme förderlicher Bedingungen

- Die horizontale Schrittweite bei der Strahlbildung beträgt ebenfalls konstant 2 m.
- Der erste Strahl wird horizontal abgeschickt.
- Der initiale Winkelschritt beträgt knapp 90°. Der zweite Strahl wird steil nach oben emittiert.
- Optimierungskriterium ist wiederum der kürzeste Abstand d_R des Strahls vom Empfangspunkt. Die Annäherung erfolgt von oben, d.h. Lösungen, welche unterhalb des Empfängers passieren, werden nicht weiter verfolgt.
- Für jede neue Strahlsuche wird der Winkelschritt um einen Faktor 1.97 reduziert.
- Die Suchrichtung wird gedreht, wenn der kürzeste Abstand d_R anwächst oder der Strahl unterhalb des Empfängers passiert.
- Die Strahlsuche wird beendet, wenn 15 Iterationen durchlaufen wurden.
- In sehr seltenen Fällen konvergiert obiger Suchalgorithmus nicht. Dann wird der gleiche Algorithmus nochmals durchlaufen, aber mit einem Reduktionsfaktor für den Winkelschritt von 1.999.

Strahlsuche von einem Pfadpunkt zum nächsten

```

procedure CRaytracing.SearchRay( const A: CV2;
                                const B: CV2);
var
  V: CV2;
  CurrAlpha: doub;
  DeltaAlpha: doub;
  i: integer;
begin
  mA := A;
  mB := B;
  V := sub_( B, A);
  if V.x < mMinMeteoDistance then
  begin
    mAlpha      := ArcTan2( V.y, V.x);
    mBeta       := mAlpha;
    mLray       := Distance( V);
    mRayErr     := 0;
    mForestLen := 0; // Bugfix 26-Mrz-14: Diese Anweisung fehlte bisher.
                    //                      Die Annahme 0 muss nicht stimmen,
                    //                      aber bisher blieb die Vorgänger-
                    //                      länge stehen, was meistens schlimmer
                    //                      gewesen sein dürfte.
    exit;
  end;
  CurrAlpha := 0;      // Startwinkel horizontal 0°
  DeltaAlpha := 1.55;  // Sprungweite zu Beginn knapp 90° (bzw. Pi/2)
  mRayErr    := 1E6;    // Sehr grosser Fehler als Start-Annahme
  mForestLen := 0;

```

```
for i := 0 to 14 do      // 15 statt 25 Iterationen
begin
  mRayFwd.CalcRay( A, B, CurrAlpha);
  // Diese Berechnung des Schallstrahls setzt immer:
  //   RayFwd.RayErr   (Absoluter Fehler)
  //   RayFwd.TooHigh  (true: Wenn Schallstrahl über den
  //                   Empfangspunkt hinweg geht
  //                   false: darunter)

  if mRayFwd.mTooHigh and ( mRayFwd.mRayErr < mRayErr) then
    // Werte werden nur übernommen, wenn
    // - Der Fehler kleiner als vorher ist
    // - Der Schallstrahl über den Empfangspunkt hinweg geht
    // Ich vermute die Bedingung TooHigh steht da, um sicherzustellen,
    // dass keine Schallstrahlen, die knapp unter dem Empfangspunkt
    // durchgehen, genommen werden, weil dadurch bei Bodennähe die
    // Chance besteht, dass der Strahl superknapp in den Boden trifft.
    // Es gibt nun Fälle, wo RayFwd.RayErr < RayErr ist, wo aber
    // RayFwd.TooHigh immer = false ist. Die enden in der Exception.
  begin
    // Werte übernehmen:
    mAlpha      := mRayFwd.mAlpha;
    mBeta       := mRayFwd.mBeta;
    mLray       := mRayFwd.mRayLength;
    mRayErr     := mRayFwd.mRayErr;
    mForestLen  := mRayFwd.mForestLeng;
  end;
  if mRayFwd.mTooHigh then
    CurrAlpha := CurrAlpha - DeltaAlpha else
    CurrAlpha := CurrAlpha + DeltaAlpha;
    // Der nächste Winkel soll um DeltaAlpha ändern, nach oben
    // oder unten je nach Wert von TooHigh. Dadurch, dass der
    // Winkel sich bei jeder Iteration etwa halbiert, konvergiert
    // das Ganze auf ein sehr genaues Endresultat hin.

  DeltaAlpha := DeltaAlpha / 1.97;
  // Halbierung der Winkelzunahme.
  // Warum dieser Wert 1.97 und nicht 2.0?
  // Theoretisch würde bei 2.0 und einem Resultatwinkel knapp unter
  // dem Horizontalwert 0, der Winkel von negativen Werten her
  // nach oben konvergieren. Dabei wäre aber TooHigh immer gleich
  // false, was unerwünscht ist, wenn die Vermutung oben stimmt.
  // So würden die Werte gar nicht übernommen.
  // Dieser Wert etwas kleiner als 2 ermöglicht, dass die Schritte
  // etwas grösser als die Hälfte des Vorgängerschrittes sind.
  // Dadurch kommt die Iteration auch auf die TooHigh Seite.
  //
  // Soweit käme immer ein Resultat heraus, wenn das System
  // linear wäre. Ist es aber nicht. Drum sind die 1.97
  // ziemlich empirisch. Wegen den zahlreichen Erfahrungen mit dem
  // Algorithmus ist das jedoch ein erprobter Wert.
  //
  // Es gibt aber Fälle, wo die Werte gar nie gesetzt werden.
  // Insbesondere können die Werte von RayFwd.RayErr < 1E6 sein,
  // aber wenn TooHigh dann = false ist, werden sie nicht
  // übernommen. --> Exception.
end;

// Bis hierher wurde am Code nichts verändert,    phm-Jan-08
// aber es wurden Kommentare eingefügt          phm-Jan-08
```

```
// Nachfolgender Code ist der neue Nachbrenner    phm-Jan-08

if mRayErr < 1E6 then exit;

// identischer Code wie oben, aber härter an 90°
CurrAlpha := 0;           // Startwinkel horizontal 0°
DeltaAlpha := 1.570796; // Sprungweite zu Beginn knapp < 90° (bzw. Pi/2)
mForestLen := 0;
for i := 0 to 14 do       // 15 statt 25 Iterationen
begin
  mRayFwd.CalcRay( A, B, CurrAlpha);
  if mRayFwd.mTooHigh and ( mRayFwd.mRayErr < mRayErr) then
  begin
    // Werte übernehmen:
    mAlpha      := mRayFwd.mAlpha;
    mBeta       := mRayFwd.mBeta;
    mLray       := mRayFwd.mRayLength;
    mRayErr     := mRayFwd.mRayErr;
    mForestLen  := mRayFwd.mForestLeng;
  end;
  if mRayFwd.mTooHigh then
    CurrAlpha := CurrAlpha - DeltaAlpha else
    CurrAlpha := CurrAlpha + DeltaAlpha;
  DeltaAlpha := DeltaAlpha / 1.9999; // damit nicht über 90°
end;

if mRayErr = 1E6 then
begin
  // Im C++ Code wurde hier noch ein Code eingefügt, der ausführlich darstellt
  // was zu diesem Fall geführt hat. Ob es das im Delphi Code ebenfalls braucht?
  raise ERangeError.CreateFmt( 'CRaytracing.SearchRay Fehler %d.', [149]);
end;
end;
```

3.1.4 Spezifische Massnahmen im Modul Reflect

Dieses Kapitel ist nicht mehr aktuell und wird nur noch zu Dokumentationszwecken aufgeführt.

Das Reflexionsmodell von *sonRAIL* bietet zwei Varianten, eine für kohärente und eine für inkohärente Reflexionen. Das Modell für kohärente Reflexionen ist dabei deutlich rechenintensiver, da zum einen die Teilflächendiskretisierung kleiner gewählt und zum anderen jede Frequenz einzeln durchgerechnet werden muss. Die Wahl, welches Modell zum Einsatz kommen soll, hängt von der Struktur der beteiligten Oberflächen ab. Für typische Gebäude wird empfohlen, bei tiefen Frequenzen phasenrichtig und bei höheren Frequenzen, ab ca. 600 Hz mit dem inkohärenten Modell zu rechnen. Dadurch können lokal auftretende Interferenzeffekte, welche bei einzelnen Frequenzen zu einer Auslöschung und bei anderen Frequenzen zu einer Überhöhung führen, prognostiziert werden. Im Hinblick auf die Auswertung von A-bewerteten Pegeln sind diese Effekte in der Regel vernachlässigbar. Da bei der Darstellung von Lärmkarten aber nur A-Pegel verwendet werden, wurde beschlossen, in erster Linie das inkohärente Modell zu beschleunigen. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich deshalb primär auf das inkohärente Modell; auch die Testberechnungen, welche zur Quantifizierung der Beschleunigung verwendet wurden, wurden nur mit diesem Modell durchgeführt.

Bei der Berechnung von Reflexionen an Gebäuden und anderen künstlichen Objekten wird

ein iterativer Austauschprozess zwischen einer grossen Zahl von Teilflächen durchgeführt. Der Schlüssel zur Reduktion der Rechenzeiten liegt darin, die Anzahl beteiligter Teilflächen zu verkleinern.

1. Optimierung der Sichtbarkeitskontrolle

Im Reflexionsmodell wurde bereits im Original eine Sichtbarkeitskontrolle durchgeführt. Flächen welche aufgrund eines natürlichen oder künstlichen Hindernisses abgeschirmt sind, werden bei den direkten Austauschprozessen ausgeschlossen (indirekt über weitere Flächen ist ein Austausch aber möglich). Bisher wurde bei der Überprüfung der Sichtbarkeit aller Flächenkombinationen für sämtliche übrigen Flächen kontrolliert, ob sie vollständig oder teilweise die Sichtverbindung unterbrechen. Neu wird in einem vorgeschalteten Prozess eine Vorauswahl getroffen, so dass die eigentliche Sichtbarkeitskontrolle nur noch für diejenigen Flächen C durchgeführt werden muss, welche nahe an der Verbindung der Flächenzentren von A und B liegen: $dist(AC) + dist(BC) - dist(AB) < \text{Länge der Fläche } C$.

2. Ausschlusskriterium auf der Basis des maximal möglichen Energieaustausches

Um vorneweg eine Berechnung von Reflexionsbeiträgen $= 0$ zu unterdrücken, wird als generelles Absolutkriterium geprüft, ob die Intensität auf einer Fläche $\geq 10^{-20} \text{ W/m}^2$ ist. Um bei grossen Projekten eine weitere Reduktion der möglichen Quellen-Flächen-Empfänger-Beziehungen zu erreichen, wurde ein Distanzkriterium eingeführt. Es wurden nur noch Flächen einbezogen, welche den entsprechenden Maximalabstand entweder zu einem Diskretisierungspunkt des Quellenobjektes oder zu einem Empfängerpunkt unterschritten. Im Rahmen der Codebeschleunigung wurde dieses Kriterium durch einen besser geeigneten Ansatz ersetzt, welcher auf der Basis des maximal möglichen Energieaustausches aufbaut. Für den Austausch zweier Flächen wurde folgendes Kriterium definiert:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta \cdot F1 \cdot F2 > 10^{-3} \quad (3.1)$$

wobei r die Distanz zwischen den Flächen, $F1$ und $F2$ und die Flächeninhalte der beiden Flächen und ϕ bzw. θ die Orientierung der Flächen in Bezug auf die direkte Verbindung der Flächenzentren bezeichnen. Die Grenze von 0.001 wurde aus Testberechnungen mit unterschiedlichen Parametersetzungen identifiziert. Abbildung 3.1 zeigt entsprechende Resultate für das Referenzprojekt in Steinen. Wie zu sehen ist, weist die Berechnung mit einer Grenze von 0.001 im Vergleich zur genaueren Berechnung mit einem Kriterium von 0.0001 nur minimale Abweichungen auf. Die übrigen Varianten mit Kriterien, welche mehr Austauschvorgänge ausschliessen, weisen hingegen deutlich grössere Differenzen auf. Ebenfalls nicht zu empfehlen ist das ursprünglich eingesetzte Distanzkriterium, hier berechnet mit einem maximalen Abstand von 400 m.

Für Austauschvorgänge zwischen einer Fläche und einem Empfangspunkt bzw. einer Fläche und einer Quelle wird ein analoger Ansatz verwendet, wobei neben dem Abstand nur die Abmessung und Ausrichtung der beteiligten Fläche einfließt. Die Anpassung der Grenze von 10^{-3} auf 10^{-5} kann interpretiert werden als werde der Empfangspunkt bzw. die Quelle durch eine Fläche von $10 \times 10 \text{ m}$ repräsentiert.

$$\frac{1}{r^2} \cdot \cos \phi \cdot F1 > 10^{-5} \quad (3.2)$$

Unter der Annahme ideal ausgerichteter Flächen, d.h. mit $\cos \phi = 1$, können für vorgegebene Flächenmasse die maximalen Ausbreitungsdistanzen abgeleitet werden. Je kleiner

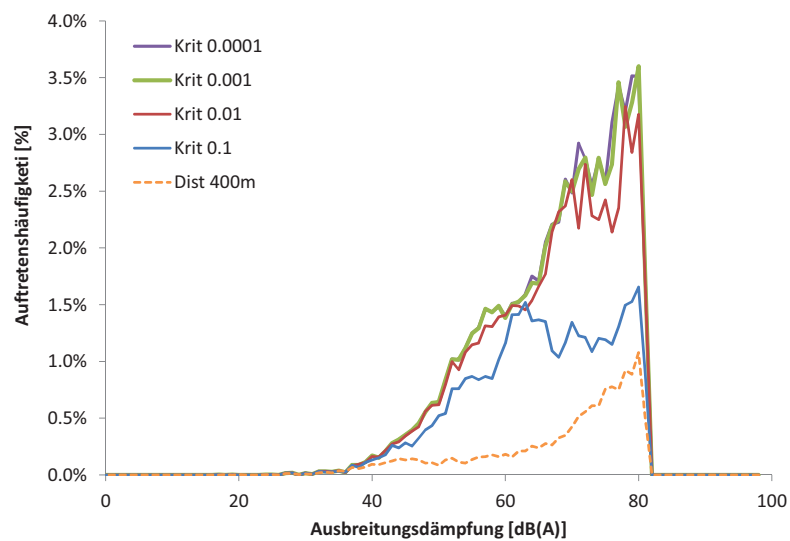


Abbildung 3.1: Auswertung der Ausbreitungsdämpfungen am Beispiel des Referenzprojektes Steinen, welche sich im Modul *REFLECT* in Abhängigkeit des Kriteriums für den maximal möglichen Energieaustausch ergeben. 100% entspricht dabei der Summe aller Quellen-Flächen-Empfänger-Beziehungen (31'832). Bei Kriterium 0.0001 werden 69% aller Austauschvorgänge effektiv gerechnet, d.h. 31% werden als vernachlässigbar eingeschätzt. Bei einem Kriterium von 0.1 werden 61% und beim Distanzkriterium von 400 m sogar 86% der Austauschvorgänge vernachlässigt.

die Fläche um so kleiner ist auch der Abstand. So resultiert für eine Fläche von 100 m^2 eine Grenzdistanz von über 3 km, bei 10 m^2 ist es genau 1 km.

Für die Beurteilung von Quellen-Flächen-Beziehungen gemäss Gleichung 3.2 muss eine Punktquelle vorausgesetzt werden. Für Linienquellen gilt, dass sie durch eine Punktquelle angenähert werden können sofern die Länge der Linienquelle höchstens drei Mal so lang wie der kürzeste Abstand des Empfangspunktes zur Gerade ist. Entsprechend muss bei der Projektdefinition darauf geachtet werden, dass die maximale Länge der Linienquellen relativ zur kleinstmöglichen Flächendiskretisierung begrenzt wird.

3. Einführung einer Maximaldistanz der Reflektoren zu Quelle bzw. Empfänger

Reflektoren, die sowohl weit von der Quelle als auch weit vom Empfänger entfernt liegen, werden ausgeschlossen. Als Standardwert wird diese Entfernung auf 400 m gesetzt.

4. Optimierung der Flächendiskretisierung

Im Originalmodell wird empfohlen, sämtliche Flächen in quadratische Teilflächen mit 1 m Kantenlänge zu unterteilen. Durch eine Verdoppelung der Gitterweite kann im Modell in erster Näherung eine Beschleunigung um einen Faktor 16 heraus geholt werden. (Je grösser die Teilflächen allerdings werden, umso grösser wird der Anteil an Restflächen, so dass dieser Faktor nicht beliebig beibehalten werden kann.) Abbildung 3.2 zeigt berechnete Ausbreitungsdämpfungen für das Referenzprojekt in Steinen, bei welchen Teilflächendiskretisierungen von 1, 2, 4 und 6 m verglichen werden. Bei kleinen Ausbreitungsdämpfungen, d.h. hohen Immissionspegeln stimmen die Resultate sämtlicher Varianten ideal überein. Mit zunehmender Ausbreitungsdämpfung kommt es zu gewissen Abweichungen, welche jedoch keinen systematischen Trend aufweisen. Bei Kantenlänge von 4 bzw. 6 m wurden im Einzelfall aber deutliche Abweichungen von im Extremfall über 10 dB(A) festgestellt, weshalb entschieden wurde, für das beschleunigte Modell einen Diskretisierungsabstand von 2 m festzulegen. Im Vergleich zur Originalvariante resultierte für die 2m-Lösung eine mittlere Abweichung von -0.123 dB(A) und eine Standardabweichung von 0.369 dB(A). Die maximale Abweichung aller Teilflächen betrug +6.4 und -3.8 dB(A).

Bemerkung: *Durch den Rechenkern wird fortlaufend eine Schätzung der Gesamtrechenzeit und des Prozentsatzes der Abarbeitung ausgegeben. Während bei den Modulen BASIC, METEO und FOREST über die Anzahl Quellen und Empfänger, welche sich in den äussersten beiden Schleifen des Algorithmus befinden, automatisch ein guter Schätzwert ermittelt werden kann, ist dies aufgrund der unterschiedlichen Struktur beim REFLECT-Modell nicht möglich. Deshalb wurde in der Originalversion in einem ersten Schritt die ganze Berechnung mit einer deutlich groberen Teilflächenpunkteverteilung wiederholt. Diese Berechnung nahm nur einen Bruchteil der Gesamtrechenzeit in Anspruch, lieferte dafür aber einen verlässlichen Schätzwert des zu erwartenden Aufwandes. Die eigentliche akustische Ausbreitungsrechnung, welche bisher mit Abstand am meisten Rechenaufwand in Anspruch nahm, hat aber in der optimierten Variante deutlich an Bedeutung verloren und die bisherige Zeitschätzung war nicht mehr brauchbar. Aus diesem Grund und um Doppelberechnungen zu vermeiden, wurde deshalb auf ein vereinfachtes Verfahren abgestellt, welches lediglich die Anzahl verbleibender Linienquellen mit den bereits gerechneten Linienquellen vergleicht. Je nach Grösse der Linienquelle bzw. der Anzahl an relevanten Reflektoren in der Nähe kann der Aufwand jedoch von Quelle zu Quelle deutlich schwanken. Entsprechend ist die Prognose der Gesamtrechenzeit im REFLECT-Modus mit einer grösseren Unsicherheit behaftet als dies bei den anderen Modi der Fall ist.*

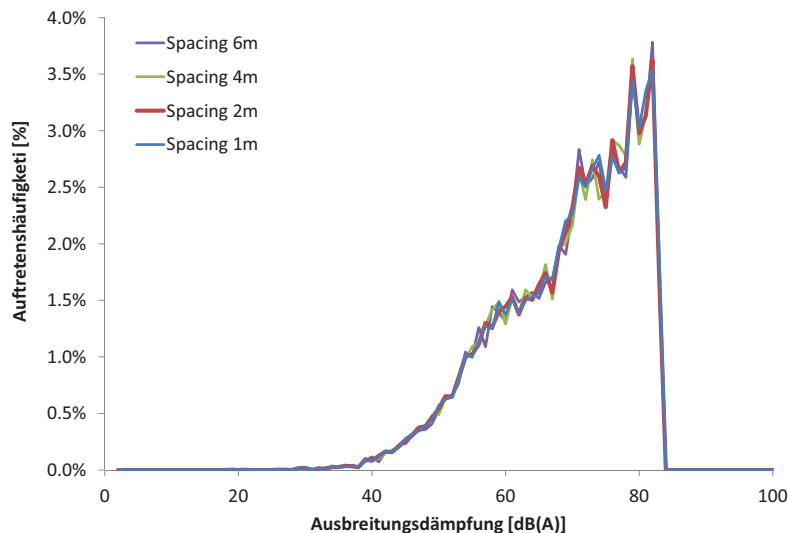


Abbildung 3.2: Auswertung der Ausbreitungsdämpfungen am Beispiel des Referenzprojektes Steinen, welche sich im Modul *REFLECT* ergeben, wenn die Teilflächendiskretisierung variiert wird. 100% entspricht dabei der Summe aller Quellen-Flächen-Empfänger-Beziehungen (31'832). Das Ausschlusskriterium wurde auf 0.001 gesetzt, so dass 67-68% aller Austauschvorgänge effektiv gerechnet werden.

Ergänzend kann festgehalten werden, dass im Rahmen der Beschleunigungsmassnahmen auch die Stabilität des Codes erhöht, sowie Warnungen und Meldungen aussagekräftiger gemacht wurden.

3.2 Massnahmen zur Reduktion der Grösse der Resultatdateien

3.2.1 Bewertung der Relevanz mittels Immissionspegelschätzungen

Dieses Kapitel ist nicht mehr aktuell und wird nur noch zu Dokumentationszwecken aufgeführt.

Neben der Rechenzeit zeigte sich gerade im Hinblick auf die Berechnung von Lärmkarten für grosse Gebiete, dass die Menge an Berechnungsergebnissen für die Datenbankanwendungen, welche die Verwaltung und Aufbereitung der Resultate übernehmen, zu einer grossen Belastung werden. Immerhin werden bei der Berechnung sämtlicher vier Betriebsmodi für jede Quellen-Empfänger-Kombination 14 Terzbandspektren mit gesamthaft 280 Dämpfungswerten erzeugt. Deshalb wurde als Option eine Bereinigung der Resultate implementiert, welche nach der eigentlichen Ausbreitungsrechnung zur Anwendung kommt. Als zusätzlicher Input wird dazu für jedes Quellenobjekt und jede Quellenhöhe eine Schätzung der Emission in Form eines Terzbandspektrums mitgeliefert. Um Variationen bei den Emissionen berücksichtigen zu können, wurden bei der Quellendefinition (siehe Abschnitt A.3) zwei zusätzliche Parameter *DeltaPlus* und *DeltaMinus* eingeführt, welche den möglichen Schwankungsbereich abbilden. In der Settingsdatei wurden zusätzlich zwei neue Parameter eingeführt. Ein Parameter definiert eine untere Grenze für Immissionspegel. Resultate, welche tiefere Pegel ergeben, werden nicht ausgegeben. Diese untere Immissionsgrenze orientiert sich am Hintergrundgeräusch und kann typischerweise auf 30 dB(A) festgelegt werden. Der zweite Parameter legt fest, um wie viele

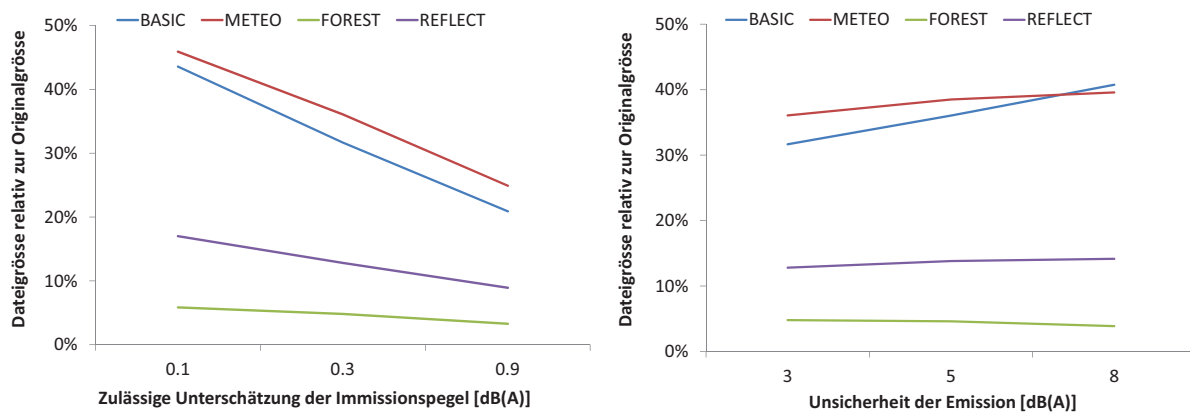


Abbildung 3.3: Auswertung der Dateigrößen am Beispiel des Referenzprojektes Steinen bei unterschiedlichen Parametersetzungen. Als untere Immissionsgrenze wurde generell 30 dB(A) verwendet. Die Bandbreite bei den Emissionsdaten wurde bei der Graphik auf der linken Seite auf ± 3 dB(A) festgelegt und die zulässige Unterschätzung der Immissionspegel auf der rechten Seite auf 0.3 dB(A).

dB(A) die resultierenden Immissionspegel aufgrund der Resultatmengenreduktion unterschätzt werden dürfen. Als Vorgaben werden für die Rechenkerneinstellungen *Precision* 0.1 dB(A), für *Engineering* 0.3 dB(A) und für *Survey* 0.9 dB(A) empfohlen. Der Rechenkern ermittelt unter Verwendung der minimalen Emissionen für jeden Empfangspunkt die Immissionspegel in dB(A) und ordnet diese nach ihrer Wichtigkeit. Danach werden die Beiträge aller Quellen, beginnend bei der lautesten, einzeln aufsummiert bis die Gesamtimmision den ursprünglichen Immissionswert abzüglich des Deltas erreicht. Um den Bereich möglicher Emissionen ebenfalls zu berücksichtigen, werden dann aus der geordneten Liste der Immissionen sämtliche Quellen dazu genommen, welche bei der höheren Emission einen mindestens gleich hohen Immissionspegel erreichen wie die als letzte in die Summation aufgenommene Quelle der ersten Auswahl. Die Resultate sämtlicher übrigen Quellen-Empfänger-Kombinationen werden nicht in die Resultatdatei ausgegeben.

Abbildung 3.3 zeigt in zwei Graphiken die resultierenden Reduktionen der Resultatmengen. Aus der Graphik auf der linken Seite kann der Einfluss der zulässigen Unterschätzung der Immissionspegel entnommen werden. Mit *Precision*-Einstellungen wird die Resultatmenge in den Modi *BASIC* und *METEO* rund halbiert, mit einer Einstellung von 0.9 dB(A) für *Survey* kann die Grösse der Resultatdatei weiter auf 20 - 25% der Originalgrösse gedrückt werden. Bei *REFLECT* und *FOREST* wird die Resultatgrösse auch rund halbiert. Die Resultatdateien sind aber unabhängig von der zulässigen Unterschätzung der Immissionspegel bereits deutlich kleiner, weil namentlich bei den Waldreflexionen ein Grossteil der Resultate durch die untere Immissionsgrenze von 30 dB(A) ausgeschieden wird. Bei einer Vergleichsrechnung bei Standard-Einstellungen für *Engineering*, aber mit einer Untergrenze von 0 dB(A), erhöht sich die Resultatdatei im *FOREST*-Modus von 5 auf 14%.

Mit grösser werdendem Bereich der Emissionen nimmt auch die Resultatmenge zu, wobei der Effekt wiederum ausgeprägter für die Modi *BASIC* und *METEO* in Erscheinung tritt. Die resultierenden Zunahmen sind jedoch vergleichsweise klein und betragen beispielsweise von ± 3 auf ± 8 dB(A) lediglich 9% im *BASIC*-Modus. Dies ist damit zu erklären, dass die auftretenden Ausbreitungsdämpfungen in viel grösserem Ausmass schwanken und deshalb die Bandbreite bei den Emissionen durchaus grosszügig geschätzt werden kann, ohne die erwünschte Reduktion der Resultatmengen stark zu beeinflussen.

3.2.2 Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeit der Module *BASIC* und *METEO*

Bei den Reflexionspegeln der Module *REFLECT* und *FOREST* resultieren Ausbreitungsdämpfungen, welche in Kombination mit einer Emission direkt einen Immissionspegel ergeben. Bei den Modulen *BASIC* und *METEO* sind die Resultate jedoch von einander abhängig, da die Meteoberechnung nur eine Verfeinerung der Direktschallberechnung des Moduls *BASIC* darstellt. Da zum einen Meteoberechnungen ohne eine zugehörige Basisberechnung nicht verwendet werden können und es zum anderen zu Unstetigkeiten kommt, wenn einzelne Quellen-Empfänger-Kombinationen Meteoberechnungen aufweisen und andere nicht, muss sichergestellt werden, dass jeweils für beide Modi Resultate ausgegeben werden. Zentral ist dabei, dass bei der *BASIC*-Berechnung nicht Resultate als vernachlässigbar aussortiert werden, welche aufgrund eines positiven Meteeffektes im Endeffekt bedeutend wären. Zu diesem Zweck wird bei der Hindernisberechnung im Modul *BASIC* zusätzlich die Meteokorrektur K_{met} gemäss ISO 9613-2 berechnet. Aus dem arithmetischen Mittel aller diskreten Punkte einer Linienquelle wird eine Schätzung des möglichen positiven Meteeffektes bei 1 kHz abgeleitet, welche bei der Auswahl der Quellen ergänzend zum Schwankungsbereich der Emissionen berücksichtigt wird.

3.2.3 Ergänzende Beschleunigung aufgrund der Massnahmen zur Reduktion der Dateigrössen

Bei der Berechnung des Wettereinflusses im Modul *METEO* wird die Ausbreitungsrechnung für 2 der 5 Quellenhöhen gemäss dem *sonRAIL*-Emissionsmodell weitgehend wiederholt, so dass die Sortierung der Resultate automatisch korrekt ausfällt. Somit kann hier grundsätzlich das gleiche Verfahren wie für die Module *REFLECT* und *FOREST*, ohne zusätzliche Korrektur angewandt werden. Falls jedoch bereits eine *BASIC*-Berechnung vorliegt und Resultate nur für Quellen-Empfänger-Kombinationen verwendet werden können, welche bei der Aussortierung berücksichtigt wurden, liegt es auf der Hand diese Information zu nutzen. Deshalb wurde die Möglichkeit geschaffen als zusätzliche Eingangsgrösse beim Start einer Meteoberechnung eine zweispaltige Tabelle mit allen relevanten Quellen-Empfänger-Paaren zu übergeben. Dadurch kann die Meteoberechnung auf diese Kombinationen eingeschränkt und entsprechend die Gesamtrechnenzeit weiter gesenkt werden.

4 Kombination mit dem Eisenbahnlärmmodell *sonRAIL*

4.1 Einleitung

Das Projekt zur Entwicklung des Eisenbahnlärmmodells *sonRAIL* wurde in den Jahren 2007 bis 2009 durchgeführt. Im Rahmen des Projektes wurden ein neues Emissions- und Ausbreitungsmodell entwickelt sowie umfangreiche Emissionsmessungen durchgeführt. Die Projektdokumentation kann auf der sonRAIL-Webseite sonrail.empa.ch eingesehen werden. Das sonRAIL-Emissionsmodell wurde durch die TU Berlin erarbeitet und in Form einer Dissertation von Thomas Thron veröffentlicht [33].

Das Emissionsmodell ist auf einen Frequenzbereich von 100 Hz bis 8 kHz ausgerichtet. Entsprechend wird auch die Ausbreitungsrechnung für diese Frequenzen durchgeführt.

4.2 Charakterisierung und Einbindung des Emissionsmodells

Dieses Kapitel ist nicht mehr aktuell und wird nur noch zu Dokumentationszwecken aufgeführt.

4.2.1 Quellendefinition und vorbereitende Schritte

Als Quelle wird ein Gleisabschnitt mit konstanter Schallemission, definiert als Schallleistung pro Laufmeter, vorgegeben. Gemäss Emissionsmodell setzt dies einen einheitlichen Oberbau, einheitliche Schienenrauhigkeiten, einen konstanten Fahrzeugmix (ohne Abzweigungen) und pro Zugart konstante Fahrgeschwindigkeiten voraus. Die Quelle wird räumlich durch eine Reihe von XY-Punkten spezifiziert, welche sich in Gleismitte auf Terrainhöhe befinden. Als zusätzliche Parameter benötigt der Kern eine Zuordnung der Oberbau-Ausführung (Unterscheidung zwischen Schotteroberbau und fester Fahrbahn) sowie bei Schotteroberbauten eine Angabe zur Schottertiefe. Mit einem optionalen Parameter kann zusätzlich die Höhenanpassung des quellennahen Profils ins Gelände beeinflusst werden.

Im Rechenkern werden im Hinblick auf die Ausbreitungsrechnung folgende Transformationen und vorbereitenden Schritte getätigt:

- Da Reflexionen in Quellennähe von grosser Bedeutung sind, wird ein Schotterbett mit spezifischen akustischen Eigenschaften ergänzt, welches sich bei mehrgleisiger Streckenführung auch über benachbarte Quellensegmente erstreckt. Bei diesem Schritt wird auch eine allfällige Höhenanpassung vorgenommen, beispielsweise bei einer Schienenführung in leichter Dammlage, welche im Geländemodell nicht enthalten ist. Die Definition des Quellen-nahen Untergrundes wird in der Settingsdatei *QuellenBoden-DB* vorgenommen.

Alternativ zu einer Gleisführung auf Schotter kann in der *QuellenBoden-DB* auch eine feste Fahrbahn definiert werden.

- Der als Linienquelle zu interpretierende Fahrweg wird durch eine Reihe von Punktquellen abgebildet. Die Diskretisierung der Linienquelle ist in der Settingsdatei *sonRAIL-Parameter* für jedes Rechenmodul separat definiert.
- Es besteht die Möglichkeit über die Settingsdatei *QuellenBoden-DB* die Punktquellen quer zur Fahrtrichtung seitlich zu verschieben, so dass sie sich über der Schiene befinden, welche näher zum Empfangspunkt liegt. Dadurch kann eine Quellenposition an der Fahrzeugoberfläche nachgebildet werden. Bei der Bestimmung der Parameter des sonRAIL-Emissionsmodells wurde allerdings von einer Quellenposition in Gleismitte ausgegangen, weshalb für eine korrektes Zusammenspiel mit sonRAIL Emissionsdaten auf diese Option verzichtet werden soll. Unabhängig davon ob die Quelle in Gleismitte oder an der Fahrzeugoberfläche angenommen wird, wird im Ausbreitungsmodell von einer Abstrahlung in den Vollraum ausgegangen (Verdünnung der Schallintensität über die Kugeloberfläche, siehe Gleichung 2.3).
- Jeder Quellenpunkt wird in fünf Teilquellen aufgeteilt, welchen bei gleicher XY-Position unterschiedliche Höhen von 0.0, 0.5, 2.0, 3.0 und 4.0 m über Schienenoberkante (SOK) zugeordnet werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sich die Schienenoberkante 0.15 m über Terrain befindet.

4.2.2 Resultate der Ausbreitungsrechnung - Schnittstelle zum Emissionsmodell

Das Ausbreitungsmodell übergibt als Resultat für jede Quellen-Empfänger-Kombination 14 Dämpfungsspektren, bestehend aus 20 Terzen von 100 Hz bis 8 kHz:

- 5 Dämpfungs-Spektren der Basis-Ausbreitungsrechnung, je für die Quellenhöhen von 0.0, 0.5, 2.0, 3.0 und 4.0 m über SOK.
- 6 Meteokorrekturen, unterteilt für Tag, Abend, Nachtzeit und tiefe resp. hohe Quellen (0.5 und 3.0 m Quellenhöhe). Die für eine Quellenhöhe von 0.5 m berechneten Dämpfungen werden als repräsentativ für die Quellenhöhe 0.0 m verwendet. Gleiches gilt für die Quellenhöhen von 2.0 und 4.0 m, welche den Daten auf 3.0 m gleichgesetzt werden.
- 2 Dämpfungs-Spektren für Reflexionen an Objekten (im überbauten Gebiet), jeweils separat für tiefe resp. hohe Quellen (0.5 und 3.0 m Quellenhöhe). Analog zur Meteokorrektur werden die Dämpfungsspektren der nicht explizit berechneten Quellenhöhen aus berechneten Spektren abgeleitet.
- 1 Dämpfungs-Spektrum für diffuse Reflexionen an Fels und Wald (Quellenhöhe auf 0.5 m). Dieses Spektrum wird für alle Quellenhöhen als repräsentativ verwendet.

Die Gesamt-Ausbreitungsdämpfung A_{total} , welche gemäss Gleichung 2.2 zur Berechnung der Immissionspegel aus den Schalleistungen benötigt wird, wird für jeden Streckenabschnitt, jede Quellenhöhe und jede Empfängerposition sowie zusätzlich differenziert nach der Tageszeit gemäss Gleichung A.1 berechnet. Mit dem Index L wird ergänzend zum Ausdruck gebracht, dass es sich dabei um integrale Dämpfungen für ganze Linienquellen handelt (siehe dazu den nachfolgenden Abschnitt A.5.2).

$$A_{total} = -10 \cdot \log \left[10^{-0.1 \cdot (A_{Basic,L} + A_{Meteo,L})} + 10^{-0.1 \cdot (A_{Reflect,L} - \Delta E)} + 10^{-0.1 \cdot A_{ForestCliff,L}} \right] \quad (4.1)$$

mit

$A_{Basic,L}$	Ausbreitungsdämpfung des Moduls <i>Basis</i> . [dB]
$A_{Meteo,L}$	Meteokorrektur gemäss dem Modul <i>Meteo</i> . Im Gegensatz zu den übrigen

	Dämpfungsspektren kann A_{Meteo} auch negative Werte aufweisen, dies bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen. [dB]
$A_{\text{Reflect},L}$	Ausbreitungsdämpfung für Reflexionen an Gebäuden und Schallschirmen. [dB]
Δ_E	Korrektur zur Unterscheidung von Empfangspunkten im Freien und im offenen Fenster. Δ_E wird bei Gebäudepunkten auf 2 dB gesetzt. Im Freifeld ist $\Delta_E = 0$ dB.
$A_{\text{ForestCliff},L}$	Ausbreitungsdämpfung für diffuse Reflexionen an Wald und Fels. [dB]

Bemerkungen:

- Der sonRAIL-Ausbreitungsalgorithmus berechnet grundsätzlich Freifeld-Pegel, unabhängig von der Lage des Empfangspunktes. Die Korrektur Δ_E wird deshalb nicht im Rahmen der Ausbreitungsrechnung, sondern erst anschliessend, bei der Immissionspegelberechnung berücksichtigt.
- Wie bereits erwähnt, müssen nicht alle Teildämpfungen gemäss Gleichung A.1 berechnet werden, um Immissionspegel auszuweisen. Lediglich die Basis-Dämpfung muss zwingend vorhanden sein. Wird der Meteeinfluss nicht ermittelt, so wird A_{Meteo} auf 0 gesetzt. Die Terme der Reflexionsmodelle können in der Summation weggelassen werden falls die entsprechenden Dämpfungen nicht ermittelt wurden.

4.2.3 Bestimmung der integralen Ausbreitungsdämpfung einer Linienquelle

Wie in Abschnitt 4.2.2 erwähnt, wird jeder als einzelne Quelle definierte Streckenabschnitt durch eine Reihe von Punktquellen abgebildet. Die eigentliche Ausbreitungsrechnung, wie sie in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird, ist grundsätzlich nur für Punktquellen, d.h. für eine Schallausbreitung zwischen einem Quellenpunkt und einem Empfängerpunkt, definiert. Die Ausbreitungsdämpfung pro Linienquelle ergibt sich aus der Summation der Ausbreitungsdämpfungen aller Punktquellen. Gleichung A.2 zeigt die Summation über m Punktquellen für die Teildämpfungen $A_{\text{Basic},m}$ des Basis-Moduls. Um nicht zwingend äquidistante Diskretisierungen der Linienquelle verwenden zu müssen, wird zusätzlich jede Teildämpfung mit einer Länge l des Gleisabschnittes gewichtet, für welche die Punktquelle repräsentativ ist. Für die Dämpfungen der anderen Module erfolgt die Summation sinngemäss.

$$A_{\text{Basic},L} = -10 \cdot \log \left[\frac{1}{\sum l_i} \sum_{i=1}^I l_i \cdot 10^{-0.1 A_{\text{Basic},i}} \right] \quad (4.2)$$

Die Diskretisierung der Linienquellen kann als Modellparameter für jedes Berechnungsmodul frei gewählt werden.

4.3 Spezifische Erweiterungen und Anpassungen des Ausbreitungsmodells

Grundsätzlich können Schallausbreitungsphänomene unabhängig von der Art der Lärmquelle beschrieben werden. Gleichwohl können Effekte auftreten, die sehr quellenspezifisch sind und deshalb gesondert behandelt werden müssen. Bei der Implementation von *sonRAIL* wurde zum einen ein spezielles Bodeneffektmodell für die Ausbreitung über Schotter gemäss Abschnitt 4.3.1 entwickelt. Zum anderen wurden für Kunstbauten wie Tunnels, Brücken und Geländeeinschnitte, welche für Eisenbahnlinien typisch sind und zu zusätzlichen Reflexionen und Abschirmungen führen, spezielle Lösungen integriert.

Für Tunnelportale und Geländeeinschnitte mit reflektierend ausgestalteten seitlichen Begrenzungen werden die zusätzlich auftretenden Reflexionen gemäss den in den Abschnitten 4.3.2 bzw. 4.3.3 beschriebenen Rezepten berücksichtigt. Die resultierenden Ausbreitungsdämpfungen werden anschliessend mit den Resultaten der Basisrechnung kombiniert.

Zur Berücksichtigung von Brücken sind keine Erweiterungen des Ausbreitungsalgorithmus notwendig. Da aber bei Brücken die Quelle nicht mehr dem Verlauf des Geländes gemäss Terrainmodell folgt, wird für die Ausbreitungsrechnung das Terrain unterhalb der Brücke soweit angehoben, dass sich ein gleichmässiger Geländeverlauf zwischen den Höhen der anschliessenden Quellenpunkte vor und nach der Brücke ergibt. Als Resultat ergibt sich eine Situation entsprechend eines Schienenverlaufs in Dammlage. Für Immissionspunkte, welche sich genau unterhalb der Brücke befinden, kann für diese Quelle keine Berechnung durchgeführt werden. Diese Terrainanpassung ist jedoch nur für die Brückenquelle wirksam, so dass für sämtliche anderen Quellen auch Resultate unterhalb der Brücke ausgewiesen werden. Die erhöhte Abstrahlung, welche sich bei Brücken ergibt, wird im Emissionsmodell behandelt.

In Ermangelung eines geeigneten Berechnungsmodells wird vorderhand auf eine spezielle Behandlung von Galerien verzichtet.

4.3.1 Schallausbreitung über Schotter - Ansatz mit lateral reagierendem Medium

Eine Besonderheit von Eisenbahnlärm ist die quellennahe Schallausbreitung über Schotter. Im Gegensatz zu harten Oberflächen oder Grasland ist Schotter extrem offenporig und durchlässig und muss als lateral reagierendes Medium modelliert werden [34]. Diese Vorstellung lässt - im Gegensatz zum lokal reagierenden Medium - eine Schallausbreitung im Medium selbst zu. Zur Charakterisierung eines lateral reagierenden Mediums wird nebst der Impedanz die im Allgemeinen ebenfalls komplexe Wellenzahl $k = k_0(\alpha + j\beta)$ benötigt. Die Ausbreitung einer ebenen Welle im Medium lässt sich beschreiben als:

$$p = \hat{p}e^{jkx}e^{-j\omega t} = \hat{p}e^{jk_0\alpha x}e^{-k_0\beta x}e^{-j\omega t} \quad (4.3)$$

wobei \hat{p} der Amplitude bei $x = 0$ entspricht. Der Realteil der Wellenzahl k beschreibt die Phasendrehung mit dem Ort x , der Imaginärteil führt auf eine Dämpfung.

Für ein gegebenes Medium ist die Bestimmung der Impedanz und der Wellenzahl schwierig. Eine theoretische Prognose ist möglich, allerdings ist dazu die Kenntnis von nichtakustischen Parametern wie Strömungswiderstand und Strukturfaktor notwendig [35], [36], [37]. Diese Parameter selbst sind nicht als Einzahlwerte zu verstehen, sondern sind frequenzabhängig. Basierend auf einer Vielzahl von Messungen an fiberartigem Material haben Delany und Bazley ein empirisches Formelwerk entwickelt [9], das anhand des einzigen Parameters *Strömungswiderstand* σ die Frequenzgänge der Impedanz Z und der Wellenzahl k darstellen:

$$\frac{Z}{\rho c} = 1 + 9.08 \left(\frac{\sigma}{f} \right)^{0.75} + j11.9 \left(\frac{\sigma}{f} \right)^{0.73} \quad (4.4)$$

$$\frac{k}{\frac{2\pi f}{c}} = 1 + 10.8 \left(\frac{\sigma}{f} \right)^{0.70} + j10.3 \left(\frac{\sigma}{f} \right)^{0.59} \quad (4.5)$$

Die beiden Kenngrössen Impedanz und Wellenzahl sind auch messtechnisch bestimmbar. Eine Standardmessung im Impedanzmessrohr reicht dazu allerdings nicht aus, da zwei Unbekannte gesucht sind. Grundsätzlich werden dazu zwei Konfigurationen benötigt. So können z.B.

zwei unterschiedliche Materialdicken oder zwei unterschiedliche rückseitige Volumina verwendet werden [38]. Allerdings ist dieses Messverfahren nicht in situ anwendbar.

Empirische Erweiterung der Weyl-Van der Pool Formel

Zur Berechnung der Bodenreflexion bei lateral reagierendem Medium schlagen Li et al. [39] eine heuristische Erweiterung der klassischen Weyl-Van der Pool Formel [40] vor. Dazu wird eine *effektive Admittanz* eingeführt, in welche die Materialkennwerte (Z, k) und die Parameter Schalleinfallswinkel und Schichtdicke eingehen. Die von einer Punktquelle ausgehende und unter dem Winkel θ (bzgl. der Flächennormalen) einfallende und am lateral reagierenden Medium reflektierte Schallwelle lässt sich schreiben als:

$$p = [R_p + (1 - R_p)F(w)] \frac{e^{jk_0 R_2}}{4\pi R_2} \quad (4.6)$$

wobei k_0 der Wellenzahl in Luft und R_2 dem Laufweg von der Quelle über den Reflexionspunkt zum Empfänger entspricht. Die Funktion $F(w)$ ist für nicht zu steilen Einfall

$$F(w) \approx 1 + j\sqrt{\pi}we^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw) \quad (4.7)$$

In Gleichung 4.7 ist "erfc" die Errorfunktion und w ist

$$w = (\cos \theta + \beta_e) \sqrt{\frac{1}{2} j k_1 R_2} \quad (4.8)$$

mit der komplexen Wellenzahl k_1 des Mediums.

R_p ist der ebene Welle-Reflexionskoeffizient gemäss

$$R_p = \frac{\cos \theta - \beta_e}{\cos \theta + \beta_e} \quad (4.9)$$

Für ein lateral reagierendes Medium der Schichtdicke d vor einem harten Abschluss gilt für die effektive Admittanz:

$$\beta_e = -jm_1 \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} \cdot \tan \left(k_0 d \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} \right) \quad (4.10)$$

dabei gilt $n_1 = \frac{k_1}{k_0}$ und $m_1 = \frac{1}{n_1}$.

Wie oben angesprochen setzt die Anwendung des Bodeneffektmodells von Li [39] Kenntnis der Impedanz Z und der Wellenzahl k voraus. Für Schotter sind in der Literatur weder Messangaben verfügbar noch konnte ein Modell gefunden werden, das die rechnerische, modelhafte Bestimmung von Z und k erlaubt hätte. Deshalb wurde ein einfaches Schottermodell gemäss dem nachfolgenden Abschnitt 4.3.1 angesetzt. Die Parameter wurden anschliessend im Vergleich mit Ausbreitungsmessungen optimal eingestellt [34].

Geometrisches Schottermodell

Das abstrahierte Schottermodell baut sich - von der Oberfläche aus in die Tiefe des Materials gesehen - aus Reihen von identisch grossen Poren mit Durchmesser d_P auf. Jeweils zwei übereinander liegende Poren einer Reihe sind über eine dünne Kapillare der Länge l und Durchmesser d_K miteinander verbunden. Der Abstand zwischen den Reihen wird mit s bezeichnet. Zwischen den Reihen existieren über Kapillaren der Länge $s - d_P$ ebenfalls Verbindungen (siehe Abbildung 4.1).

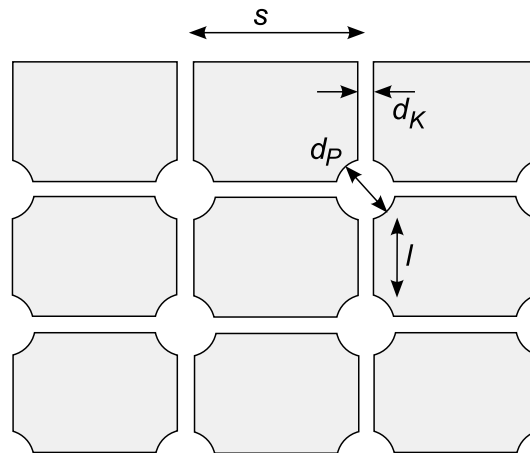


Abbildung 4.1: Geometrisches Schottermodell mit kugelförmigen Poren mit Durchmesser d_P und zylindrischen Kapillaren mit Durchmesser d_K und Länge l bzw. $s - d_P$.

Die akustische Eigenschaft einer Pore ist jene einer Feder, eine Kapillare wirkt als beschleunigte Masse und als Widerstand. In der elektrischen Analogie entspricht das Schottermodell einem RLC-Netzwerk (Abbildung 4.2). Man beachte, dass in der Akustik die Impedanzen als Verhältnis von Schalldruck zu Schallfluss verstanden werden.

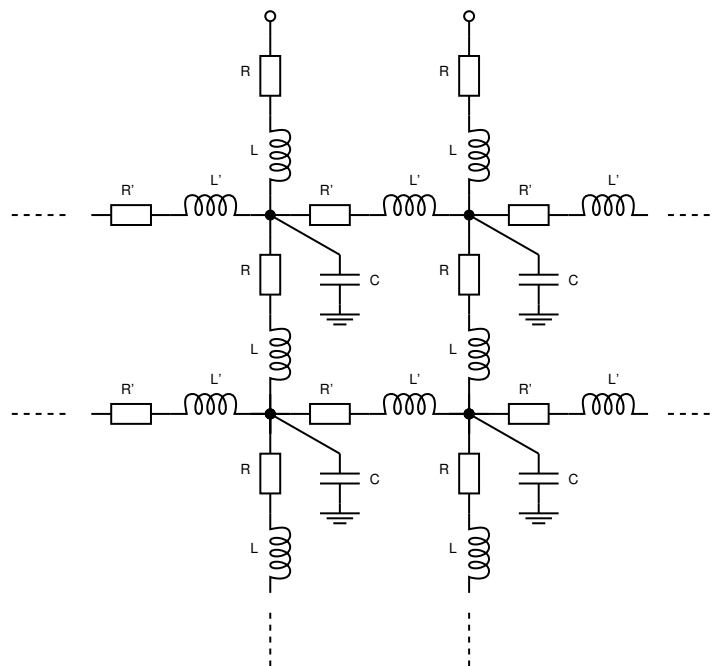


Abbildung 4.2: Analoges elektrisches Ersatzschaltbild für das Schottermodell.

Die Impedanz Z und die Wellenzahl k des Schotters können für eine senkrecht von oben einfallende ebene Welle diskutiert werden. Da horizontale Nachbarpunkte (über R' und L' verbunden) identische Druck und Flussverhältnisse sehen, finden keine horizontalen Ausgleichsvorgänge statt. Es genügt also die Diskussion einer vertikalen Kapillaren-Poren-Kaskade. Dies

führt auf das bekannte Netzwerk einer Transmission-Line (Abbildung 4.3).

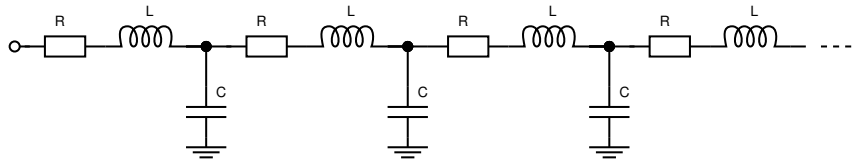


Abbildung 4.3: Elektrisches Ersatzschaltbild für das Schottermodell: Transmission Line.

Für die Schaltung in Abbildung 4.3 kann die Impedanz Z' angegeben werden zu:

$$Z' = \sqrt{\frac{L}{C} - j \frac{R}{\omega C}} \quad (4.11)$$

wobei ω der Kreisfrequenz $= 2\pi f$ entspricht. Die längenbezogene Ausbreitungskonstante Γ' wird

$$\Gamma' = \sqrt{-\omega^2 LC + j\omega RC} \quad (4.12)$$

Die Überführung der akustischen Federwirkung der Poren in eine Kapazität C erfolgt mit

$$C = \frac{V}{\rho c^2} \cdot \frac{1}{G_3 G_4} \quad (4.13)$$

wobei $V = \frac{\pi d_P^3}{6}$ dem Volumen einer Pore, ρ der Luftdichte und c der Schallgeschwindigkeit entspricht. Die Faktoren $G_3 = 1 \frac{Vm^2}{N}$ und $G_4 = 1 \frac{m^3}{As}$ stellen die Einheiten richtig.

Die Kapillare hat eine Massewirkung, entsprechend einer Induktivität L mit

$$L = \frac{\rho l}{A} \cdot G_3 G_4 \quad (4.14)$$

mit l : Länge und $A = \frac{\pi d_K^2}{4}$: Querschnittsfläche der Kapillare.

Die Kapillare zeigt einen Verlust, entsprechend einem Widerstand R mit

$$R = \frac{8l\eta}{\pi r^4} \quad (4.15)$$

mit l : Länge und $r = \frac{d_K}{2}$: Radius der Kapillare. Die dynamische Viskosität η ist $1.82 \times 10^{-5} \text{ Nsm}^{-2}$.

Die gemäss Gleichung 4.11 berechnete Impedanz Z' gilt für das Verhältnis Schalldruck zu Schallfluss. Durch Multiplikation mit der Querschnittsfläche A wird die übliche Impedanzdefinition p/v gewonnen. Diese Impedanz gilt am Eingang einer Kapillare. Auf der übrigen Oberfläche wird angenommen, dass die Schallschnelle $= 0$ ist, d.h. die Impedanz ist dort ∞ gross. Für die resultierende Impedanz Z ist eine entsprechende Gewichtung mit dem Flächenverhältnis anzuwenden:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C} - j \frac{R}{\omega C}} \cdot A \cdot \frac{s^2}{A} = s^2 \sqrt{\frac{L}{C} - j \frac{R}{\omega C}} \quad (4.16)$$

Man beachte, dass Z nach Gleichung 4.16 von der Konvention $e^{j\omega t}$ für den Schwingungsterm ausgeht. Unter der Annahme eines Ansatzes $e^{-j\omega t}$ ändert der Imaginärteil von Z das Vorzeichen.

Die Ausbreitungskonstante Γ' in Gleichung 4.12 ist längenbezogen zu verstehen, d.h. der Wert ist durch die physikalische Länge, die ein RLC Element aufspannt, zu dividieren. Damit ergibt sich Γ zu

$$\Gamma = \frac{1}{d_P + l} \sqrt{-\omega^2 LC + j\omega RC} \quad (4.17)$$

Die Wellenzahl k ergibt sich aus der Ausbreitungskonstanten Γ mit

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}[k] &= \operatorname{Im}[\Gamma] \\ \operatorname{Im}[k] &= \operatorname{Re}[\Gamma] \end{aligned} \quad (4.18)$$

Parameteroptimierung

Für die Parameteroptimierung, d.h. die Bestimmung der am besten passenden Werte für den Kapillardurchmesser d_K , die Kapillarlänge l , den Porendurchmesser d_P und den Reihenabstand s wurde auf einem Industriegleis eine Referenzausbreitungsmessung durchgeführt (Abbildung 4.4). Als Quelle wurde 0.5 m über Schotter ein Lautsprecher mit in der Vertikalen runden Abstrahlcharakteristik verwendet. Das Mikrophon wurde in 7.5 m Abstand 1.2 m über Schotter installiert. Die Quellen-Empfängerstrecke wurde längs dem Gleis angeordnet. Die Schwellen sind als über eine Stahlstrebe verbundene Betonklötze ausgeführt, so dass insgesamt von einem nahezu homogenen Schotterbett ausgegangen werden kann. Die Stärke des Schotterbetts lag bei rund 35 cm.

Mit folgenden optimierten Werten:

$$\begin{aligned} d_K &= 0.00127 \text{ m} \\ l &= 0.00132 \text{ m} \\ d_P &= 0.0056 \text{ m} \\ s &= 0.006 \text{ m} \end{aligned}$$

und einer Schottertiefen von 0.33 m ergibt sich bis etwa 1.5 kHz eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung (Abbildung 4.5). Gegen die hohen Frequenzen zeigt die Messung gegenüber der Berechnung eine zusätzliche Dämpfung, die vermutlich auf Streuverluste an der rauhen Oberfläche zurückzuführen ist. Man beachte, dass die optimalen Geometrieparameter durchaus realitätsnahe Werte annehmen. So liegt z.B. die Porosität des Modellmaterials bei 33%, was sehr gut mit Werten für realen Schotter übereinstimmt. Dies plausibilisiert die Annahme des einfachen Porenmodells.

Für die oben gezeigten Geometrieparameter ergeben sich die in Abbildung 4.6 und 4.7 gezeigten Frequenzgänge für Z und k .

Aktivierung des Bodeneffektmodells für Schotter

Der lokale Untergrundtyp wird über einen Bodennutzungsdatensatz (als Polygon- oder Rasterdatei) definiert, welcher auf die zugehörige Settingsdatei mit der Oberflächen-Geländetypisierung (siehe Anhang A.4.2) verweist. Im Standard-Bodeneffektmodell gemäss Kapitel 2.2.4 wird die Untergrundeigenschaft über den Strömungswiderstand σ definiert. Das



Abbildung 4.4: Schallausbreitungsexperiment auf einem Industriegleis mit dem anregenden Lautsprecher im Vordergrund und dem Mikrophon im Hintergrund.

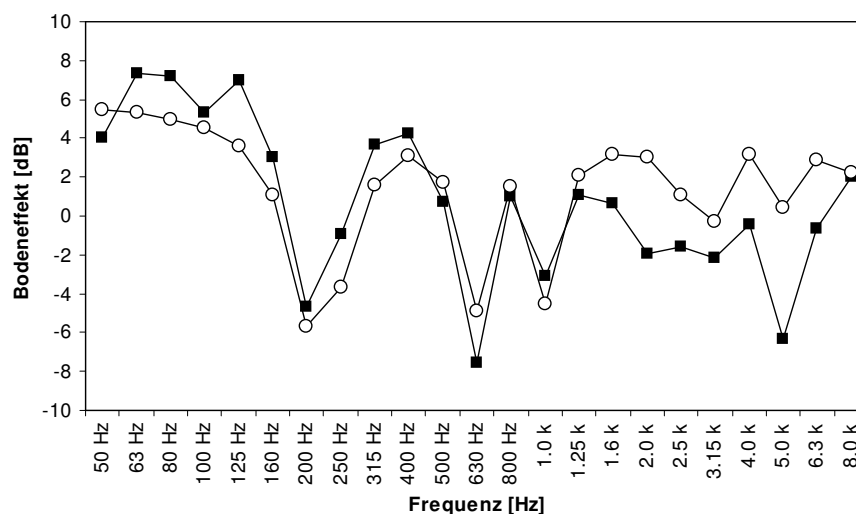


Abbildung 4.5: Gemessener (gefüllte Quadrate) und berechneter (leere Kreise) Bodeneffekt für eine Lautsprecherhöhe von 0.5 m, eine Empfängerhöhe von 1.2 m und einen Quellen-Empfängerabstand von 7.5 m.

Bodeneffektmodell kommt zur Anwendung, wenn im Datenfeld σ Werte < 10 eingetragen sind. Entsprechende Einträge sollen zusätzlich beim Feld *Value* das Schlüsselwort *Ballastbed* verwenden. Für jede Schottertiefen muss ein eigener Untergrundtyp definiert werden.

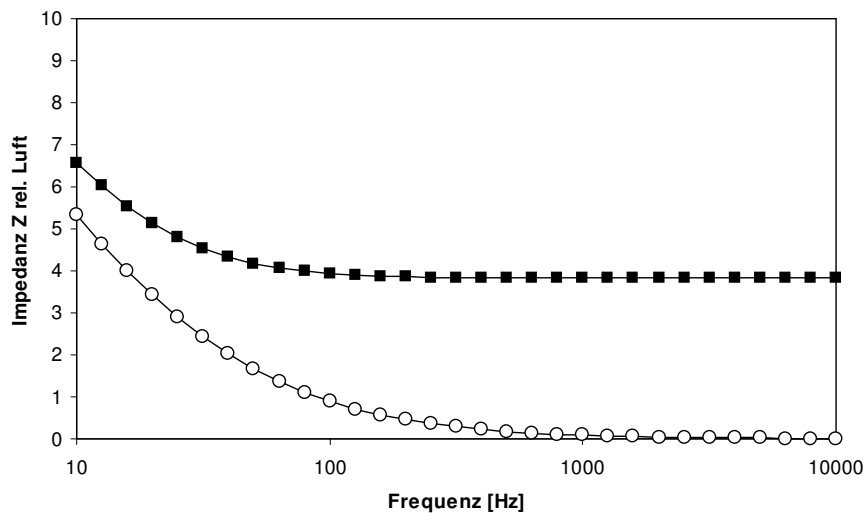


Abbildung 4.6: Frequenzgang der Impedanz Z bzgl. Luft (ρc) für den Modellschotter (gefüllte Quadrate: Realteil, leere Kreise: Imaginärteil).

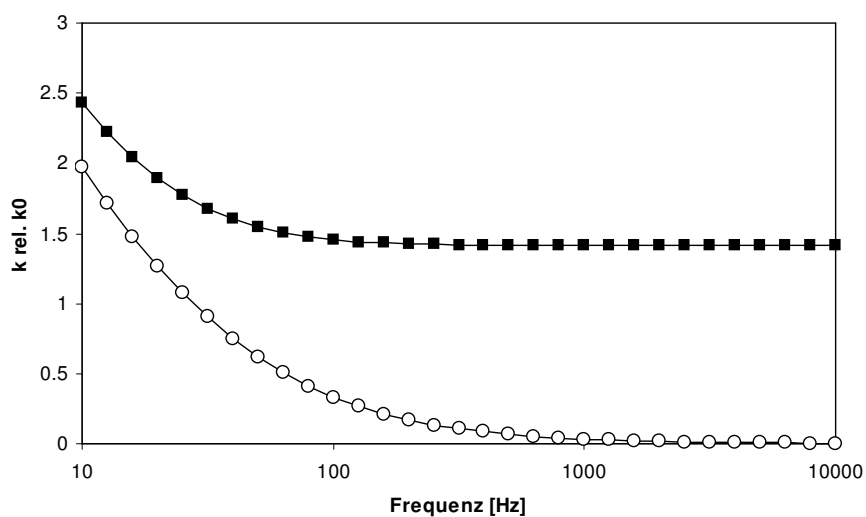


Abbildung 4.7: Frequenzgang der Wellenzahl k bzgl. k_0 für den Modellschotter (gefüllte Quadrate: Realteil, leere Kreise: Imaginärteil).

4.3.2 Schallabstrahlung von Tunnelportalen

Dieses Unterkapitel ist nicht mehr aktuell und wird nur noch zu Dokumentationszwecken aufgeführt.

Einleitung

Im Bereich von Eisenbahntunnelportalen können relevante Schallimmissionen entstehen, die vom Portal abgestrahlt werden. Diese Schallenergie tritt während der Tunnelfahrt als Folge von Reflexionen an den Tunnelwänden auf. Das in der Folge dargestellte Rechenmodell wurde im Auftrag des damaligen BUWAL im Jahre 2004 von der B+S Ingenieur AG in Bern und der Empa in Dübendorf entwickelt [41].

Rezept

Eine sich in einem Tunnel befindliche Quelle liefert an einen Empfänger Schallenergie aus zwei Anteilen. Zum einen erzeugt die Quelle im Tunnel durch Ein- und Mehrfachreflexionen an den Tunnelwänden eine Art diffuses Schallfeld. Dieses lässt sich durch die durch die Portalöffnung hindurchtretende diffuse Schallleistung $W_{\text{Portal,diffus}}$ beschreiben. Diese Schallleistung führt unter Berücksichtigung einer Richtwirkung zu einer Abstrahlung in die Umgebung. Für die Rechnung wird die Schallleistung in der Mitte der Portalöffnung konzentriert und ein Punktquellenverhalten (mit Richtcharakteristik), d.h. -6 dB/Abstandsverdopplung angenommen. Zum anderen versorgt die Quelle die Portalöffnung mit Direktschall $W_{\text{Portal,direkt}}$ und erzeugt am Empfangspunkt einen Direktschallanteil, wobei allfällige Hinderniswirkungen (z.B. an den Tunnelportalkanten) zu berücksichtigen sind. Figur 4.8 zeigt die allgemeine Tunnelsituation im Grundriss. Die Quelle befindet sich an den Koordinaten x, y_0, z_0 . Der Tunnel hat die Breite L_y und Höhe L_z wobei der Tunnelboden bei $z = 0$ und die empfängerseitige Tunnelseitenwand bei $y = 0$ liegt.

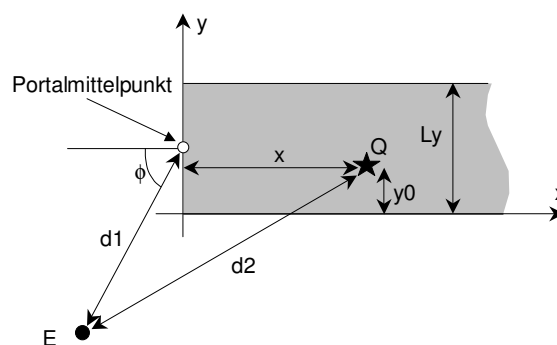


Abbildung 4.8: Situation im Grundriss zur Immission einer Quelle im Tunnel.

Basierend auf wellentheoretischen Betrachtungen zum Schallfeld in einem Kanal kann die totale, durch das Portal hindurchtretende Schallleistung $W_{\text{Portal}} = W_{\text{Portal,diffus}} + W_{\text{Portal,direkt}}$ angegeben werden zu

$$W_{\text{Portal}} \approx W_{\text{Quelle}} 10^{0.1(-3-\gamma \frac{x}{100\text{m}})} \quad (4.19)$$

mit

W_{Quelle}	Quellenleistung [W]
x	Abstand der Quelle vom Tunnelportal [m]
γ	Pegelabfall pro 100 m für den A-Pegel bzw. für die 1 kHz Oktave [dB/100 m]

Aus Messungen an realen Tunneln mit hartem Untergrund, d.h. ohne Schotter, kann als Erfahrungswert für γ ein Wert von 4 dB/100 m abgeleitet werden. Im Falle einer geschotterten

Fahrbahn ist für γ ein Wert von 10 dB/100 m anzusetzen.

Der diffuse Anteil der Portalleistung ergibt sich durch Subtraktion des Leistungsanteils, der direkt durch die Portalöffnung tritt:

$$W_{\text{Portal,diffus}} = W_{\text{Portal}} - W_{\text{Portal,direkt}} \quad (4.20)$$

Die direkt durch die Portalöffnung hindurchtretende Schalleistung $W_{\text{Portal,direkt}}$ ergibt sich nach Gleichung 4.21.

$$W_{\text{Portal,direkt}} = W_{\text{Quelle}} \frac{\theta}{4\pi} \quad (4.21)$$

mit

θ Raumwinkel den die Portalöffnung von der Quelle aus gesehen aufspannt.

Der Raumwinkel θ kann vereinfachend angenähert werden als Flächenverhältnis der Portalöffnung zur Kugeloberfläche mit einem Radius, der dem Abstand vom Quellenpunkt zur Portalmitte entspricht, skaliert mit 4π .

Wenn sich die Quelle gerade im Portal befindet, nimmt θ den Wert 2π an. Mit $W_{\text{Portal}} = 0.5W_{\text{Quelle}}$ wird $W_{\text{Portal,diffus}} = 0$.

Die entsprechenden Teil-Schalldruckpegel L_{diffus} und L_{direkt} am Immissionspunkt lassen sich schreiben als:

$$L_{\text{diffus}} = L_{W,\text{Portal,diffus}} + D(\phi) - 20 \log \frac{d_1}{1m} - 11 - A_{\text{Portal}} \quad (4.22)$$

mit

$L_{W,\text{Portal,diffus}}$	Diffuser Anteil der Portalleistung als Pegel = $10 \log \left(\frac{W_{\text{Portal,diffus}}}{10^{-12}W} \right)$ [dB]
$D(\phi)$	Richtwirkungskorrektur für die entsprechende Abstrahlrichtung [dB]
d_1	Abstand von der Portalmitte zum Immissionspunkt [m]
A_{Portal}	zusätzliche Dämpfungseffekte wie Hinderniswirkung, Luftdämpfung etc. zwischen Portalmittelpunkt und Immissionspunkt [dB]

$$L_{\text{direkt}} = L_{W,\text{Quelle}} - 20 \log \frac{d_2}{1m} - 11 - A_{\text{Quelle}} \quad (4.23)$$

mit

$L_{W,\text{Quelle}}$	Quellenleistung als Pegel = $10 \log \left(\frac{W_{\text{Quelle}}}{10^{-12}W} \right)$ [dB]
d_2	Abstand vom Quellen- zum Immissionspunkt [m]
A_{Quelle}	zusätzliche Dämpfungseffekte wie Hinderniswirkung, Luftdämpfung etc. zwischen Quellen- und Immissionspunkt [dB]. Vereinfachend kann die Luftdämpfung und die Hinderniswirkung stellvertretend an der Frequenz 1 kHz ausgewertet werden.

Achtung: Die Reflexion am Boden wird durch den Bodeneffekt berücksichtigt. Der Boden führt damit nicht zu einer Richtwirkungskorrektur.

Als Richtwirkung für die diffus abgestrahlte Portalleistung wird ein Zusammenhang gemäss Gleichung 4.24 angenommen.

$$I(\phi) = I_0 (1 + \beta \cos(\phi))^2 \quad (4.24)$$

mit

$I(\phi)$	Intensität in Richtung ϕ [W/m ²]
I_0	Skalierungskonstante [W/m ²]
β	Richtwirkungsparameter, hier zu 2.5 angenommen
ϕ	Winkel bzgl. der Tunnelflächennormalen bzw. der Geleiseachse

Es wird davon ausgegangen, dass die diffuse Portalleistung in den Halbraum abgestrahlt wird, d.h. es gilt:

$$\int_0^1 2\pi I_0 (1 + \beta h)^2 dh = W_{\text{Portal,diffus}} \quad (4.25)$$

bzw.

$$I_0 = \frac{W_{\text{Portal,diffus}}}{2\pi \left(1 + \beta + \frac{\beta^2}{3}\right)} \quad (4.26)$$

Die Richtwirkungskorrektur $D(\phi)$ in Gleichung 4.22 ergibt sich aus dem Verhältnis der Intensität in Richtung ϕ und der Intensität für eine ungerichtete Abstrahlung in den halben Raumwinkel 2π :

$$D(\phi) = 10 \log \left(\frac{(1 + \beta \cos(\phi))^2}{1 + \beta + \frac{\beta^2}{3}} \right) \quad (4.27)$$

bzw. mit obiger Annahme von $\beta = 2.5$

$$D(\phi) = 10 \log \left(\frac{(1 + 2.5 \cos(\phi))^2}{5.6} \right) \quad (4.28)$$

Der totale Schalldruckpegel am Immissionspunkt ergibt sich aus der energetischen Überlagerung von L_{diffus} und L_{direkt} :

$$L_{\text{total}} = 10 \log (10^{0.1 L_{\text{diffus}}} + 10^{0.1 L_{\text{direkt}}}) \quad (4.29)$$

Die absorbierende Ausgestaltung des Portalbereichs wird durch eine pauschale Pegelreduktion des diffusen Anteils L_{diffus} um 10 dB berücksichtigt. Der Direktschallanteil bleibt unbeeinflusst. Wenn sich die Quelle ausserhalb des Tunnels befindet verschwindet der Anteil von L_{diffus} .

Die Integration der Tunnelportalabstrahlung in sonRAIL erfolgt durch Modifikation des Ausbreitungsterms $A_{\text{Basic},f}$. Dazu wird in der Portalebene auf 4 m Höhe eine zusätzliche Schallquelle der Leistung $L_{W,\text{Portal,diffus}}$ eingeführt. Von dieser Quelle aus wird eine gewöhnliche Ausbreitungsrechnung zu den Empfangspunkten durchgeführt, wobei die Richtwirkungskorrektur $D(\phi)$ angewendet wird. Die so ermittelten Immissionen werden zu den übrigen Immissionen dazugeschlagen und verringern so das ursprüngliche $A_{\text{Basic},f}$.

4.3.3 Geländeeinschnitte

Dieses Unterkapitel ist nicht mehr aktuell und wird nur noch zu Dokumentationszwecken aufgeführt.

Einleitung

Das Schallfeld in einer Eisenbahneinschnittssituation wird durch den Direktschall und Reflexionen gebildet, die sich zwischen den Einschnittwänden und zwischen Einschnittwand und Zugkörper ergeben. Die Reflexionen lassen sich grob in zwei Kategorien aufteilen:

- Bei kleinen Abständen zwischen Einschnittwand und Wagenkasten findet keine eigentliche freie Ausbreitung mehr statt. Vielmehr wird die Schallenergie in einem Kanal nach oben bis zur Höhe der Einschnittwand bzw. des Wagenkastens geführt. Erst dort wird der Schall abgestrahlt.
- Bei grösseren Abständen zwischen Einschnittwand und Wagenkasten bzw. zwischen den Einschnittwänden finden diskrete Reflexionen statt. Diese können bei (im Vergleich zur Wellenlänge) glatten Oberflächen als spiegelnd betrachtet werden. Die Existenz dieser spiegelnden Reflexionen hängt von der Geometrie ab. Sie reagieren daher empfindlich auf die Einschnittwandneigung.

Das in der Folge dargestellte Rechenmodell wurde im Auftrag des damaligen BUWAL im Jahre 2006 von der Empa in Dübendorf entwickelt [42].

Rezept

In der Folge wird angenommen, dass die wesentliche Eisenbahnlärmquelle im Rad-/Schienenbereich liegt. Allfällige höherliegende Quellen wie Lüfter oder aerodynamische Ursachen werden ignoriert. Den in der Modellidee dargestellten Erkenntnissen folgend wird nebst den beiden Originalquellen (Rad/Schiene) zusätzlich auf beiden Seiten des Zugkörpers an der oberen Kante je eine Sekundärquelle angesetzt (Abbildung 4.9). Falls der Zugkörper die Einschnittwände überragt, werden diese Sekundärquellen auf den Einschnittwandkanten positioniert. Diese Sekundärquellen repräsentieren den diffus abgestrahlten Schallanteil.

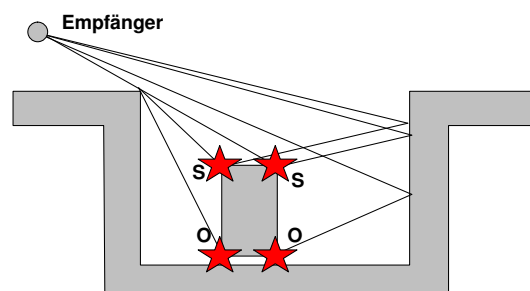


Abbildung 4.9: Schematische Einschnittssituation mit dem Zugkörper, den beiden Originalquellen O , den beiden Sekundärquellen S und den relevanten Ausbreitungspfaden zum Empfängerpunkt.

Der Immissionspegel L_p an einem Empfängerpunkt wird nach Gleichung 4.30 bestimmt:

$$L_p = 10 \log (10^{0.1L_{dO}} + 10^{0.1L_{rO}} + 10^{0.1L_{dS}} + 10^{0.1L_{rS}}) \quad [\text{dB}] \quad (4.30)$$

mit

L_{dO} Pegel des Direktschalls der Originalquellen unter Berücksichtigung möglicher Hinderniswirkung

L_{rO} Pegel der Spiegelreflexion 1. Ordnung der Originalquellen (sofern diese existiert) unter Berücksichtigung möglicher Abschwächung bei der Reflexion und Hinderniswirkung

L_{dS} Pegel des Direktschalls der beiden Sekundärquellen auf Höhe der Dachkante an beiden Seiten des Zugkörpers

L_{rS} Pegel der Spiegelreflexion der beiden Sekundärquellen auf Höhe der Dachkante an beiden Seiten des Zugkörpers

Die Quellstärke der beiden Sekundärquellen ergibt sich aus dem Winkelbereich, der je von der Originalquelle aus gesehen durch den nicht-absorbierenden Einschnittsbereich gebildet wird. Dieser Winkel ϕ wird ab der Horizontalen im kürzesten Abstand gemessen (Abbildung 4.10).

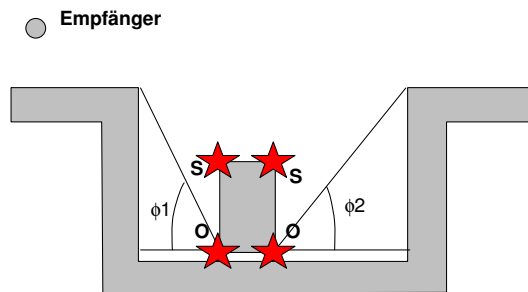


Abbildung 4.10: Relevante Winkelbereiche ϕ_1 und ϕ_2 zur Bestimmung der Stärke der Sekundärquellen.

$$L_{W,S} = L_{W,O} + 10 \log \left(\frac{\phi}{\frac{\pi}{2}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4.31)$$

mit

$L_{W,S}$ Schallleistungspegel je der beiden diffusen Sekundärquellen

$L_{W,O}$ Schallleistungspegel der Originalquelle

Wie Massstabsmodellexperimente gezeigt haben, ist bei den Sekundärquellen zusätzlich eine frequenzunabhängige Richtwirkung zu berücksichtigen. Dazu wird die Abstrahlung in eine Richtung mit Elevationswinkel β bzgl. der Horizontalen skaliert mit (Abbildung 4.11)

$$\Delta R [\text{dB}] = \begin{cases} -\infty & : \beta < 0 \\ 10 \log (0.15 + 2.5 \sin(\beta) - 1.3 \sin^2(\beta)) & : \beta \geq 0 \end{cases} \quad (4.32)$$

Die Integration in sonRAIL erfolgt durch entsprechende Modifikation des Dämpfungsterms $A_{\text{Basic},f}$. Für die Ausbreitungsrechnung werden nebst dem Direktschallpfad der oben eingeführte Pfad via spiegelnde Reflexion an der gegenüberliegenden Einschnittwand sowie der Anteil der Sekundärquellen betrachtet.

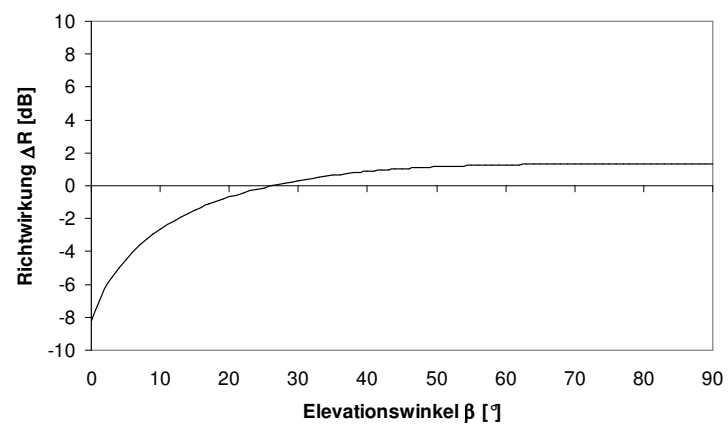


Abbildung 4.11: Richtwirkungskorrektur ΔR der Sekundärquellen in Funktion des Elevationswinkels β .

5 Kombination mit Schiesslärmmodell *sonARMS*

5.1 Einleitung

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU wurde durch die Empa in den Jahren 2010 bis 2012 ein Schiesslärmmodell entwickelt, welches sowohl für die Beurteilung ziviler Schiessanlagen als auch für militärische Waffen-, Schiess- und Übungsplätze eingesetzt werden kann. Das neue Berechnungsmodell mit der Bezeichnung *sonARMS* kombiniert dabei die Quellenbeschreibung des bisher für militärischen Schiesslärm eingesetzten Berechnungsmodells *WL04* mit dem Ausbreitungsmodell *sonX*. *sonARMS* wird über eine separat entwickelte Benutzeroberfläche gesteuert, mit welcher die Erstellung von Berechnungsprojekten, die Steuerung einer kombinierten Emissions- und Ausbreitungsrechnung sowie die Ermittlung von Beurteilungsspiegeln aus der Kombination von Einzelschussresultaten und Betriebsangaben ermöglicht wird. Zur Verwendung der Resultate für Lärmkataster und andere kartographische Darstellungen sind Schnittstellen zur Anbindung an geographische Informationssysteme integriert. Nachfolgend werden nur Modell-spezifische Aspekte, welche die Umsetzung von *sonX* für die Schiesslärmmodellierung betreffen, dargestellt. Für detaillierte Informationen zum Gesamtmodell sei auf die *sonARMS*-Modelldokumentation und auf die Publikation des Modells im Noise Control Engineering Journal [43] verwiesen.

5.2 Charakterisierung und Einbindung des Emissionsmodells

Das Emissionsmodell unterscheidet drei Arten von Schiesslärmquellen: Mündungsknall, Geschosknall und Detonation. Detonationen werden als ungerichtete Punktquellen modelliert. Mündungsknalle stellen ebenfalls Punktquellen dar, welche jedoch zusätzlich eine Richtwirkung aufweisen. Das Geschosknallmodell wurde von der ISO-Norm 17201-4 [44] übernommen.

Emissionen werden für einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 5 kHz ausgewiesen. Die Ausbreitungsrechnung wird für die entsprechenden Terzen ausgeführt.

5.3 Spezifische Erweiterungen und Anpassungen des Ausbreitungsmodells

Das *sonX*-Ausbreitungsmodell wurde für die Berücksichtigung von Schiesslärmquellen in folgenden Punkten angepasst und erweitert:

- Mündungsknall-Richtcharakteristik
Die Richtwirkung des Mündungsknalles wird als zusätzlicher Dämpfungsterm integriert, welcher bei sämtlichen Ausbreitungsphänomenen mit Ausnahme der Bodeneffektberechnung berücksichtigt wird. Bei der Bodeneffektberechnung wird vernachlässigt, dass der Direktschallpfad einen Emissionswert aufweist, welcher von den Reflexionspfaden am

Untergrund abweicht. Aufgrund der moderaten Zwischenwinkel zwischen Direktschallpfad und Reflexion scheint diese Vereinfachung jedoch zulässig.

- Geschossknall

Das Geschossknall-Modell der ISO-Norm 17201-4 ist sehr spezifisch auf die Quelleneigenschaften von Geschossknall ausgerichtet und verlangt bei der Implementierung umfangreiche Anpassungen sowohl beim Berechnungsablauf als auch beim Ausbreitungsteil, welche für andere Quellenmodelle kaum relevant sind und deshalb im Rahmen dieses Dokumentes nicht im Detail diskutiert werden.

- Seitliche Hinderniswirkung und Schallpfade durch Öffnungen

Bei der seitlichen Hinderniswirkung werden drei Schallpfade verglichen, welche unterschiedliche Emissionswinkel und deshalb bei gerichtet abstrahlenden Quellen auch unterschiedliche Emissionen aufweisen. In *sonARMS*, wo Informationen über die Richtwirkung der Quellen vorliegen, wird dieser Umstand berücksichtigt und es wird beim Vergleich von vertikalen und lateralen Schallpfaden die unterschiedliche Quellenstärke miteinbezogen. Es wird zusätzlich kontrolliert, dass die Summe aus den drei Effekten, welche zu einer Reduktion der Hinderniswirkung führen, nämlich seitliche Schallpfade, Schallpfade unter Hindernissen durch und förderliche Meteeffekte, die Hinderniswirkung maximal aufheben, aber nicht überkompensieren.

- Laufzeitanalyse und Berechnung von Maximalpegeln mit der Zeitkonstanten FAST

Die akustische Basisgrösse gemäss LSV Anhang 7, welche Schiesslärmgrenzwerte für zivile Schiessanlagen enthält, ist ein A-bewerteter Maximalpegel mit der Zeitkonstanten FAST. Die Berechnung des L_{AFmax} setzt eine Reproduktion des Pegel-Zeit-Verlaufes voraus, weshalb das Ausbreitungsmodell um eine Laufzeitanalyse erweitert wurde.

- Ausschlusskriterien in REFLECT

Im REFLECT Modul kommen Ausschlusskriterien zur Anwendung, welche Reflexionen mit vernachlässigbaren Beiträgen unterdrücken (siehe Unterkapitel 2.4.8). Als generelles Absolutkriterium wurde eine minimale Intensität auf einer Fläche von $\geq 10^{-20} \text{ W/m}^2$ eingeführt. Diese minimale Intensität wurde ausgehend von einer Schallleistung von 0 dB festgelegt. Im Falle von *sonARMS* sind die Emissionen bekannt und das Kriterium für die minimale Intensität wird entsprechend angehoben. Dabei wird die Quellenstärke bei Mündungsknall und Detonation bei 500 Hz, ohne Berücksichtigung einer Richtwirkung, als Emissionswert verwendet; bei Geschossknall fließt die Emission bei 2 kHz ein.

- Geschossknall und REFLECT

Als Startwert für die Reflexionsberechnung wird der Geschossknallpegel im Flächenzentrum aller sichtbaren Reflektoren berechnet. Falls der Subflächenmittelpunkt ausserhalb des Geschossknallbereiches liegt, wird keine Geschossknallreflexion ausgewiesen, selbst wenn dieser allenfalls auf einer Teilfläche auftritt.

- Laufzeitberechnung in REFLECT

Im REFLECT Modul wird die gesamte reflektierte Schallintensität auf einen Zeitpunkt zusammengefasst. Dabei wird eine repräsentative Ausbreitungsdistanz ermittelt, welche zum einen für die Berechnung der Luftdämpfung und zum anderen bei *sonARMS* für den Laufweg benötigt wird. Falls Reflexionen 1. Ordnung auftreten, wird davon ausgegangen, dass diese dominant sind. Als repräsentativer Laufweg wird der kürzeste Weg von der Quelle zu einem Reflektor und zum Empfänger verwendet. Die Bestimmung erfolgt nach der Sichtbarkeitskontrolle. Falls keine Reflexion erster Ordnung auftritt, wird generell ein Laufzeitunterschied von 0.5 s bzw. ein Laufwegunterschied von 170 m angenommen.

6 Kombination mit dem Fluglärmmodell *sonAIR*

6.1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes sonAIR (Empa-Nr. 5211.00687.100) wurde an der Abteilung Akustik/Lärminderung der Empa ein Berechnungsmodell für Fluglärm entwickelt, welches ein Quellenmodell zur detaillierten Beschreibung der richtungsabhängigen Schallemissionen in Abhängigkeit des Flugzustandes (Leistungssetzung und Flugkonfiguration wie Klappen- und Fahrwerkstellung) enthält. Dieses Emissionsmodell wird mit dem *sonX*-Schallausbreitungsmodell kombiniert. sonAIR wurde mit dem Ziel entwickelt, die lärmrelevanten Auswirkungen von An- und Abflugverfahren zuverlässig abschätzen und somit zu deren akustischen Optimierung und zur Minimierung der verursachten Belästigung tags, der Schlafstörungen nachts und schliesslich der (Lärm-)Kosten beitragen zu können [45].

Das Quellenmodell wird anhand von aufwändigen Messungen des realen Flugbetriebes im Nah- und Fernbereich des Flughafens Zürich, wo die wichtigsten in der Schweiz verkehrenden Grossflugzeuge erfasst werden können, erstellt. Im Hinblick auf die Modellentwicklung stellen dabei Cockpit-Daten, welche durch Swiss und Edelweiss Flüge zur Verfügung gestellt wurden, eine ideale Grundlage dar. Für Flugzeuge anderer Fluggesellschaften wurde in der initialen Projektphase neben Radardaten im Nahbereich des Flughafens ergänzend ein optisches Ortungssystem sowie ein spezielles Auswertverfahren eingesetzt, welches die Bestimmung der Triebwerkdrehzahl aus den akustischen Messungen der an- und abfliegenden Luftfahrzeuge erlaubt [46].

Die Entwicklung von sonAIR wurde 2013-2016 im Rahmen der Spezialfinanzierung Luftverkehr vom Schweizerischen Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL gefördert. Zusätzliche Unterstützung erfuhr das Projekt durch die Empa, die Flughafen Zürich AG, den internationalen Flughafen Genf (AIG), das Amt für Verkehr des Kantons Zürich sowie skyguide, im Rahmen des Projektes CHIPS. Als Partner eingebunden waren die Firmen SciTracks GmbH für die mobile Flugbahnerfassung und BeSB GmbH Berlin für die Bestimmung der Triebwerkdrehzahl.

Finanziert durch das Schweizerische Bundesamt für Umwelt BAFU erfolgte 2014-2016 in Zusammenarbeit mit der Firma n-Sphere AG eine Umsetzung des Berechnungsmodells in einem geographischen Informationssystem GIS, als Vorbereitung für eine Integration in sonBASE, der Lärmdatenbank Schweiz.

2018 bis 2019 folgten drei weitere Projekte im Rahmen der Spezialfinanzierung Luftverkehr, in welchen zusätzliche Quellenmodelle erstellt, sonAIR mit unabhängigen Messungen validiert und eine Methodik zur Schätzung von Flugpparametern aus Radardaten entwickelt wurde (Empa-Nummern 5211.01322.100, 5211.01323.100 und 5211.01324.100). 2019 bis 2020 folgte ein Projekt in welchem der Anwendungsbereich von sonAIR auf Drohnen erweitert wurde (Empa-Nr. 5211.01566.100). 2022 wurde eine Messkampagne zur Aktualisierung der Emissionsdatenbank für Grossflugzeuge durchgeführt (Empa-Nr. 5211.02005.100).

6.2 Konzept zur Integration des *sonX*-Ausbreitungsmodells

Im *sonAIR*-Berechnungsmodell wird das Konzept der Einzelflugsimulation fortgeführt, welches bereits beim Vorgängermodell *FLULA2* [47],[48],[49],[50] erfolgreich eingesetzt wurde. Dabei wird in der Simulation die Schallquelle, welche das Flugzeug repräsentiert, zeitschrittweise entlang der Flugbahn bewegt. Von jedem Quellenpunkt wird die Schallabstrahlung unter Berücksichtigung der Richtwirkung sowie der Schallausbreitung zu den Empfangspunkten berechnet. Dies erlaubt es, den Pegel-Zeit-Verlauf an einem bestimmten Ort zu reproduzieren und damit vielfältige akustische Grössen wie den Ereignispegel oder den Maximalpegel zu ermitteln. Die Einzelflugsimulation wird in zwei Varianten umgesetzt. Eine wissenschaftliche Variante wird in Matlab implementiert. Die wissenschaftliche Variante dient als Test- und Entwicklungsumgebung und wird für Spezialuntersuchungen und für die Erstellung von Emissionsmodellen eingesetzt. Sie weist eine hohe Flexibilität auf, kann im Gegenzug jedoch nur Berechnungen für einzelne Empfangspunkte liefern. Zusätzlich gibt es ein Produktivsystem auf der Basis der Programmiersprache C# in der .Net-Umgebung, das zusammen mit der Firma n-Sphere entwickelt wurde. Dieses *sonAIR*-Dienstleistungstool wurde speziell daraufhin ausgerichtet, um mit einem hochentwickelten und damit rechenaufwändigen Ausbreitungsmodell wie *sonX* auch Lärmkartierungen basierend auf vielen Einzelflügen simulieren zu können. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Betriebsmodi, mit verschiedenen Optimierungsstrategien. Beiden Implementationen gemein ist, dass die Ausbreitungsrechnung mit *sonX* in einem vorgelagerten Schritt erfolgt und die resultierenden Dämpfungen in einer Dämpfungsdatenbank abgelegt werden.

6.2.1 Betriebsmodi

Betriebsmodus Einzelflug

Der Einzelflug-Modus ist geeignet für die Berechnung von wenigen einzelnen Flugbahnen und für stark variierende Ausbreitungsbedingungen, beispielsweise bei Drohnenflügen in Bodennähe zwischen Häusern. Er wird durch den Schalter *UseAirGrid = false* aktiviert. Folgendes Datenformat kommt für Flugbahnquellpunkte zur Anwendung:

- ObjectID
- Koordinaten X, Y, Z
- DK_Habs (true / false); Spezifikation, ob Z als absolute oder als relative Höhe zu interpretieren ist
- ID_Flbahn; sobald ID_Flbahn ändert, beginnt eine neue Flugbahn-Punktsequenz

Weitere Datenfelder in der Headerzeile sind zulässig und werden von *sonAIR* ignoriert.

Betriebsmodus Luftraumgitter

Für die Erstellung von Lärmkarten ausgehend von einer grossen Anzahl Flugpfaden und die Berechnung von Jahresbelastungen, beispielsweise auf der Basis von Radardaten, wurde eine alternative Optimierungsstrategie gewählt. Der Luftraumgitter-Modus wird über den Schalter *UseAirGrid = true* aktiviert. Dabei wird der Luftraum in ein Zellgitter unterteilt. Die Zellen haben

eine einheitliche Grundfläche von standardmässig 100 x 100 m und eine mit zunehmender Höhe anwachsende Zellhöhe. Ausgehend von einer Grundhöhe von 5 m und einer pro Zellschicht um 25% zunehmenden Höhe kann so mit 25 Zellen bereits ein Luftraum von über 5 km Höhe abgedeckt werden. Die Zellen folgen dabei dem Geländeverlauf, sind also zueinander leicht versetzt.

Eine Ausbreitungsrechnung wird für jede Gitterecke durchgeführt. In der Einzelflugsimulation wird für jede Flugzeugposition die entsprechende Gitterzelle bestimmt und die Ausbreitungsdämpfungen der Eckpunkte geladen. Die Ausbreitungsdämpfung der Flugzeugposition wird als über den Abstand von den Zellecken arithmetisch gewichtetes Mittel der Eckpunkt-Dämpfungen berechnet. Folgendes Datenformat kommt für Luftraumgitterpunkte zur Anwendung:

- ObjectID
- Koordinaten X, Y, Z
- DK_Habs (true / false); Spezifikation, ob Z als absolute oder als relative Höhe zu interpretieren ist
- DK_CalcAlways (true / false); Gitterpunkte, welche auf true gesetzt sind, sind von der Gitterausdünnung ausgenommen. Das Hybridkonzept kommt allerdings weiter zur Anwendung.

Die Definition des Luftraumgitters wird in einer sogenannten Reduktionsdatei spezifiziert. Ein Beispiel ist in Abschnitt A.2.1 aufgeführt. Die Luftraumgitter-Variante wird umso effizienter, je mehr Flüge im gleichen Luftraum modelliert werden sollen.

Hinweis:

Wird im Projektfile der Eintrag bei Reduktionsdaten weggelassen, so wird keine Datenreduktion vorgenommen.

Bei beiden Betriebsmodi wird in einem letzten Schritt kontrolliert, ob sich die resultierenden Quellpunkte innerhalb des Rechengebietes inklusive Buffer befinden. Punkte ausserhalb, für welche die nötigen Eingangsdaten zu Gelände, Bodenbedeckung usw. fehlen, werden ignoriert.

6.2.2 Optimierung der Rechenzeit

Da die Ausbreitungsrechnung mit *sonX* vergleichsweise Rechenzeit-intensiv ist, wurde für das sonAIR Dienstleistungstool eine Reihe von Optimierungsmassnahmen zur Reduktion des Rechenaufwandes implementiert. Die entsprechenden Settings werden in einer Datei abgelegt, welche typischerweise mit 'ReduktionsParameter.txt' bezeichnet wird und sich am gleichen Ort wie die *sonAirParameter*-Datei befindet. Ein Beispiel ist in Anhang A.2 bei den Rechenkerneinstellungen abgelegt.

- Flugbahnpunkt-Ausdünnung (Betriebsmodus Einzelflug)
Die Quellendiskretisierung, welche in Abschnitt 3.1.2 für Linienquellen beschrieben ist, wird im Einzelflug-Modus auch für Flugbahnen angewandt. Dabei wird von diesen Quellenpositionen zu sämtlichen Empfangspunkten eine Ausbreitungsrechnung vorgenommen. Durch den Schalter *OutPutReduction = true* wird eine Ausdünnung der Flugbahnpunkte aktiviert. Dabei werden die Flugbahnpunkte dynamisch ausgedünnt, wobei der

Abstand von der Quelle zum Empfänger die Schrittweite zum nächsten Quellenpunkt beeinflusst. Die Ausdünnungsregel verwendet drei Parameter: *SourcePointsDistLow*, den minimalen Abstand zum nächsten berechneten Flugpunkt, *SourcePointsDistUpp*, den maximalen Abstand zum nächsten berechneten Flugpunkt und *SourcePointsDistSlope*, das Verhältnis des Quellpunkt-Abstandes zum Quellen-Empfänger-Abstand im Zwischenbereich. Im Gegensatz zu Linienquellen bei Strasse und Bahn wird bei sonAIR zwischen den Quellenpunkten nicht interpoliert, da nur bei den diskreten Punkten auch die notwendigen Angaben für das Emissionsmodell vorliegen. Um keine Sprünge in der Ausbreitungsrechnung zu erzeugen, müssen deshalb die Flugbahnpunkte entsprechend fein aufgelöst sein. Werden mehrere Module (BASIC, METEO, REFLECT oder FOREST) angewandt, so müssen einheitliche Settings verwendet werden, um eine konsistente Zuordnung der Dämpfungen in der Dämpfungsdatenbank zu gewährleisten. Als Parametersetzung wird vorgeschlagen, einen minimalen und maximalen Quellenabstand von 1 m bzw. 500 m und ein Verhältnis des Quellen- zum Ausbreitungsabstand von 5% zu verwenden. So beginnt die Ausdünnung bei einer Ausbreitungsdistanz von 20 m und erreicht ihr Maximum bei 10 km.

- Gitterpunkt-Ausdünnung (Betriebsmodus Luftraumgitter)

Analog zur Flugbahnpunkt-Ausdünnung aktiviert der Schalter *OutPutReduction = true* auch im Betriebsmodus Luftraumgitter eine Reduktion der Anzahl Ausbreitungsrechnungen. Dabei wird das Quellpunktgitter mit zunehmendem horizontalem Abstand zwischen Empfangspunkt und Gitterpunkt ausgedünnt bzw. vergrößert. In der Vertikalen findet keine Ausdünnung statt. Für Landesflughäfen wird beispielsweise folgendes Setting empfohlen: Ab 2 km Distanz wird die Grundfläche verdoppelt, d.h. die Anzahl Berechnungen reduziert sich um einen Faktor 4. Weitere Verdoppelungsschritte finden bei 4, 8 und 16 km Distanz statt, so dass in grossen Abständen Zellgrundflächen von 800 m Seitenlänge resultieren. (Siehe dazu das Beispiel in Abschnitt A.2.1. RASTER und GRENZE spezifizieren dabei die Zellabmessungen und die Reichweite des Settings in der Horizontalen.)

Der Schalter *DK_CalcAlways = true*, welcher für jeden Luftraumgitterpunkt einzeln gesetzt wird, deaktiviert die Gitterausdünnung für die betroffenen Gitterpunkte. Diese Option ist beispielsweise für Flugbahnpunkte in Bodennähe angezeigt, falls Luftraumgitterpunkte der grösseren Gitterstrukturen durch Gebäude abgeschirmt sein können. Generell wird aber empfohlen, Lärmkartierungen ohne Gebäude zu rechnen, weshalb diese Option nur in Ausnahmefällen zur Anwendung kommt.

- Fokus auf durchflogene Zellen (Betriebsmodus Luftraumgitter)

Unabhängig von der Schalterstellung von *OutPutReduction* werden in einem vorgeschalteten Prozess diejenigen Zellen bestimmt, die effektiv durchflogen werden. Nur für diese Zellen wird eine Ausbreitungsrechnung durchgeführt, was die Anzahl Ausbreitungsrechnungen und den zur Speicherung der Resultate notwendigen Speicherbedarf stark reduziert.

- Hybridmodell-Ansatz mit Fokus auf akustisch anspruchsvolle Situationen

Aus akustischer Sicht anspruchsvolle Ausbreitungssituationen sind solche mit Schallpfaden in Bodennähe, d.h. flachen Schalleinfallswinkeln. Hier können Hinderniswirkungen auftreten und auch Boden- und andere Reflexionen können einen bedeutenden Einfluss auf die resultierenden Immissionspegel haben. Des Weiteren führen hier, wie in Abschnitt 2.3 erwähnt, vertikale Wind- und Temperaturgradienten zu Meteeffekten. Bei steilem Schalleinfall hingegen kann die Schallausbreitungsrechnung deutlich vereinfacht

werden, da neben der geometrischen Dämpfung und der Dissipation kaum pegelrelevante Phänomene auftreten. Aus diesem Grund wird in *sonAIR* eine Fallunterscheidung angewandt. Befindet sich eine Quellenposition von einem Empfangspunkt aus betrachtet eindeutig über dem Sichtwinkel auf den Horizont (inkl. künstlichen Hindernissen), so wird auf eine Vorausberechnung der Ausbreitungsdämpfung verzichtet und es kommt während der Einzelflugsimulation eine vereinfachte Ausbreitungsrechnung zur Anwendung. Die vereinfachte Ausbreitungsrechnung berücksichtigt die geometrische Dämpfung und die Luftdämpfung, wobei dazu eine von *sonX* für die entsprechenden Bedingungen vorausberechnete Nachschlagetabelle mit Dämpfungswerten pro Frequenz und Höhenstufe zur Anwendung kommt. In dieser mit '*AirAtt.txt' bezeichneten Tabelle sind auch die Laufzeiten pro m für sämtliche Höhenstufen abgelegt. Zusätzlich zur geometrischen Dämpfung und zur Luftdämpfung wird ein repräsentatives Bodeneffektspektrum für Grasland gemäss Tabelle 6.1 verwendet. Das Spektrum wurde aus einer Reihe von Bodeneffekt-Berechnungen abgeleitet, welche für verschiedene Untergundtypen und Geometrien durchgeführt wurden, siehe Abbildung 6.1. Das idealisierte Bodeneffektspektrum wird im Simulationstool verwendet und ist dort hart kodiert. Auf weitere Ausbreitungseffekte, namentlich auf die Walddämpfung, wird verzichtet.

- Maximale Ausbreitungsdistanz

In den Rechenkerneinstellungen kann für die verschiedenen Betriebsmodi BASIC, METEO, FOREST und REFLECT eine maximale Ausbreitungsdistanz festgelegt werden, beispielsweise über den Parameter *MaxDistance* für die Direktschallberechnung. Diese Festlegungen kommen im Betriebsmodus Einzelflug zur Anwendung. Für den Betriebsmodus Luftraumgitter gilt mit dem Parameter *MaxAttenuationDistance* in der Reduktionsdatei ein zusätzliches Kriterium. Werden die Distanzkriterien der *sonAIR* Parameterdatei oder der Reduktionsdatei nicht erfüllt, so wird keine Ausbreitungsrechnung durchgeführt und die Beiträge der Quelle entfallen. Es wird empfohlen, *MaxAttenuationDistance* auf 33 km für Landesflughäfen und militärische Flugplätze mit Jetbetrieb zu setzen. Für Flugfelder und Helikopterlandeplätze wird eine Festlegung auf 13 km empfohlen, für Drohnenbetrieb auf 1.6 km.

Durch Aktivierung des Schalters *OutPutsSrcRcv* in der Parameterdatei wird eine Liste sämtlicher Quellen-Empfänger-Kombinationen erstellt, wobei bei nicht berechneten Ausbreitungsdämpfungen eine Begründung gegeben wird ('u' für unterdrückt aufgrund des Datenreduktionsinputs, 's' für zu steil und 'w' für zu weit).

Hinweis:

Weitere Informationen zu Modellen und Simulationstools können den Dokumentationen der erwähnten Projekte entnommen werden.

6.3 Spezifische Erweiterungen und Anpassungen des Ausbreitungsmodells

Das *sonX*-Ausbreitungsmodell wurde für die Anwendung für Fluglärm nur punktuell angepasst:

- Kohärenzverlust beim Bodeneffekt:

Der Vergleich von simulierten Pegel-Zeit-Verläufen mit Messdaten von Vorbeiflügen zeigte, dass in der Simulation bei hohen Frequenzen grössere Pegelschwankungen auftreten als bei den Messungen. Diese Pegelschwankungen sind auf Interferenzen zwischen Direktschall und Bodenreflexionen zurückzuführen. Es wird vermutet, dass der gleichmässiger Pegelverlauf in den Messdaten eine Folge der ausgedehnten

12.5 Hz	16 Hz	20 Hz	25 Hz	31.5 Hz	40 Hz		
2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30		
50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
2.30	2.18	2.07	1.95	1.83	1.72	1.60	1.48
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.37	1.25	1.13	1.02	0.90	0.78	0.67	0.55

Tabelle 6.1: Standardisiertes Bodeneffektspektrum für Fluglärm. Idealisiert ausgehend von Berechnungen für gerade Überflüge (Linienquellen) mit Flughöhen von 500 und 5000 m, Empfängerhöhen von 1.5, 4.0 und 10.0 m, einem seitlichen Versatz der Empfangspunkte von 0, 250 und 500 m und Grasland (Strömungswiderstand 200-300 Rayl).

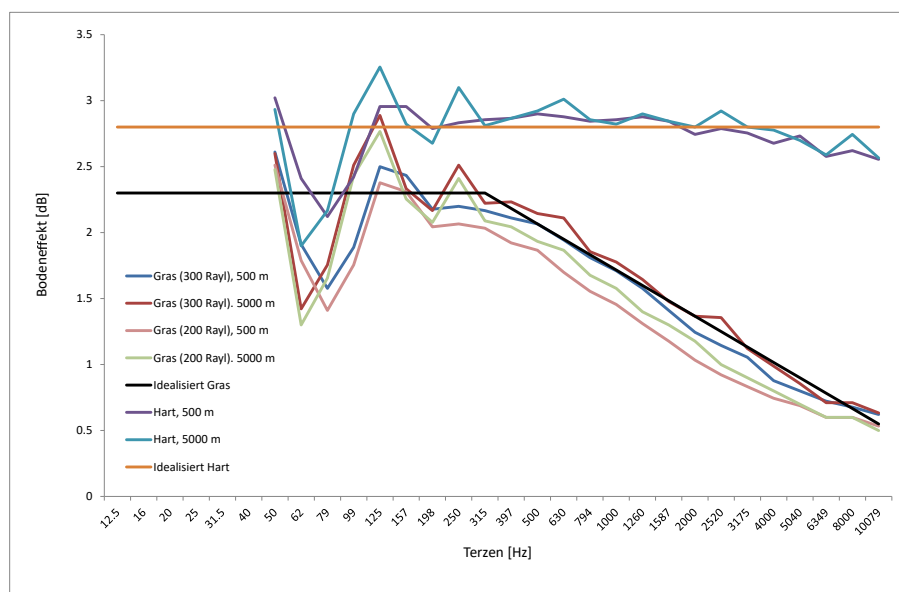


Abbildung 6.1: Bodeneffektspektren für gerade Überflüge (Linienquellen) mit Flughöhen von 500 und 5000 m und zwei Untergrundtypen, schallhart und Grasland (Strömungswiderstand 200-300 Rayl). Die Kurven stellen mittlere Spektren für Empfängerhöhen von 1.5, 4.0 und 10.0 m und einen seitlichen Versatz der Empfangspunkte von 0, 250 und 500 m dar. Zusätzlich dargestellt sind die idealisierten Bodeneffektspektren für Grasland und schallharten Untergrund.

Quelle ist. Während die Berechnung von einer Punktquelle ausgeht, strahlen in Realität verschiedene, räumliche getrennte Teilquellen wie z.B. die Triebwerke Schall ab. Diese Vermutung wird gestützt durch den Vergleich von Messdaten der Flugzeugtypen Airbus A3403 und Fokker 100. So weisen die Messdaten der Fokker 100, bei welcher die beiden Triebwerke direkt am Rumpf angebracht sind, grössere Pegelschwankungen auf als bei der A3403, welche über vier Triebwerke in einem Abstand von 46 m verfügt.

In Gleichung 2.20 auf Seite 16 wurde ein Kohärenzfaktor K eingeführt, der den Verlust an Kohärenz zwischen Direktschall und Bodenreflexion abbildet. Da ein kleiner Kohärenzfaktor einen Rückgang der Bodeneffekt-induzierten Pegelschwankungen zur Folge hat, wurde der Ansatz um einen zusätzlichen Term zur Berücksichtigung der Quellenabmessung erweitert. Der Parameter γ_2 in Gleichung 2.20 wurde ausgehend von Messdaten mit Distanzen zwischen Quelle und Empfänger von 100 m bis ca. 1 km ermittelt. Für Fluglärm soll als Standardwert für d_s 50 m verwendet werden (siehe Parameter *SourceDimension* in der Parameterliste in Anhang A.2). Wie ein Vergleich der Terme mit γ_1 und γ_2 zeigt, wird bei dieser Einstellung der Kohärenzfaktor ab 1 km Ausbreitungsdistanz durch den Distanz-abhängigen Teil mit γ_1 dominiert.

- Absolutprofile von Wind, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck:

Bereits von Anfang an war die Möglichkeit implementiert, meteorologische Daten nicht nur in parametrisierter Form, sondern auch als Absolutprofile einzugeben. Die Verwendung von Absolutprofilen war jedoch bei den bodennahen Quellen wie Strasse und Bahn kaum genutzt worden. Auch war der Definitionsbereich für Absolutprofile bisher aus Speicherplatzgründen auf 327 m Höhe begrenzt gewesen. Neu wird ein bodennaher Bereich, in welchem die Krümmung der Schallstrahlen einen massgeblichen Einfluss hat, und ein darüber liegenden Bereich unterschieden. Im bodennahen Bereich, welcher typischerweise bis 300 m Höhe reicht, werden alle 10 cm Werte geliefert. Darüber reicht eine Angabe alle 100 m. So werden auch Profile bis 10 km Höhe möglich. Neben Windrichtung und -stärke, Temperatur sowie Luftfeuchtigkeit kann auch der lokale Luftdruck mitgeführt werden. Ist eine Angabe zum Luftdruck vorhanden, so wird dieser Wert bei der Berechnung der Luftdämpfung gemäss ISO 9613-1 berücksichtigt. Ein Beispiel eines Absolutprofiles ist in Abschnitt A.4.7 zu finden.

- Luftdämpfung:

Zum einen wurde eine alternative Methode zur Berechnung der Luftdämpfung gemäss Abschnitt 2.3.7 implementiert, welche für grosse Ausbreitungsdistanzen genauer ist. Diese Option wird über den Schalter *AatmCorrBroadBand* = 1 aktiviert. Zum anderen kann über den Schalter *AatmMorePrecision* = 1 die Luftdämpfung für eine geschichtete Atmosphäre berechnet werden. Dazu wird für Höhenstufenstufen von 1, 3, 6, 12, 25, 50, 100, 200, 300... bis 10'000 m (Standardeinstellungen) eine mittlere Luftdämpfung berechnet und über die Weglänge pro Höhenstufe spektral die Gesamtdämpfung berechnet. Meteoprofile und entsprechend auch diese Option kommen nur im METEO-Modus zur Anwendung. Da die Ausbreitung teilweise über mehrere Kilometer erfolgt und dabei ganz unterschiedliche Schichten der Atmosphäre betroffen sind, wurde der bisherige Ansatz, welcher im METEO-Modus Temperatur und Feuchte für eine mittlere Höhe über Grund verwendet, als zu ungenau eingeschätzt.

- Laufzeitberechnung:

Ziel von *sonAIR* ist es, Pegel-Zeit-Verläufe nachbilden zu können. Dazu muss die Laufzeit des Schalles zwischen Quelle und Empfänger bekannt sein. Die Laufzeit wird für den

Direktschall berechnet, wobei der Schallpfad inkl. allfälliger Hinderniskanten verwendet wird. Die Berechnung erfolgt für die Module BASIC und METEO, wobei bei METEO im Modus *AatmMorePrecision = 1* die lokale Temperatur ausgehend von einer geschichteten Atmosphäre verwendet wird. Die Krümmung der Schallstrahlen wird jedoch nicht berücksichtigt. Für die Reflexionspfade gemäss FOREST und REFLECT wird keine Laufzeit bestimmt. Vereinfachend werden diese Beiträge im Pegelzeitverlauf dem Direktschall zugeordnet.

6.4 Anpassungen an In- und Outputs des Ausbreitungsmodells

Für die Anwendung im Fluglärm wurden einige Anpassungen an den Eingabedaten vorgenommen sowie neue Output-Formate definiert:

- Gelände-Definition:

Es wurde eine zusätzliche Topographie-Datei mit der Bezeichnung 'GelaendeGross' und eine zusätzliche Primärflächendatei 'PrimaerGross' eingeführt. Dieser zusätzliche Geländedatensatz muss den ganzen Bereich mit Quellkoordinaten, d.h. Flugbahnpunkten, abdecken. Die feiner aufgelösten Datensätze mit den Bezeichnungen 'Gelaende' bzw. 'Primärflächen' entsprechen der ursprünglichen Geländeverwendung von *sonX*. Sie müssen innerhalb des grossen Geländeausschnitts liegen und sämtliche übrigen Koordinaten, von Empfangspunkten, Gebäuden, Hindernissen und Primärflächen umfassen.

Diese Anpassung wurde vollzogen, da die Rechengebiete für Fluglärm sehr gross ausfallen und die entsprechenden Grundlagendaten nicht für das gesamte Gebiet in den Arbeitsspeicher geladen werden können. Da sich die Flugzeuge in der Regel hoch über Grund bewegen, ist es ausreichend, wenn Informationen über die Bebauung nur in der Nähe der Empfangspunkte bekannt sind. Die Geländeinformation des grossen Topographiedatensatzes wird dazu verwendet, jedem Quellenpunkt eine Höhe über Grund zuzuordnen, was für die Bestimmung der lokalen Meteoprofile notwendig ist, und um Abschirmungen durch die Topographie berücksichtigen zu können. Die Geländeasterung kann und soll jedoch deutlich grober ausfallen. Während beim feinen Gitter typischerweise ein Gitterabstand von 5 m verwendet wird, wird für das grobe Gitter 50 bis 250 m empfohlen. Die Berechnung von grossflächigen Lärmkarten erfolgt durch eine räumliche Kachelung, d.h. das Rechengebiet wird in Teilgebiete aufgeteilt. Während die Flugdaten für das gesamte Gebiet einheitlich sind, werden die Empfangspunkte gebietsweise gerechnet. Die Empfangspunkt-seitige Kachelung orientiert sich dabei an der Gebietseinteilung der Meteostatistiken gemäss Abschnitt 2.3.4.

- Quellen- und Empfänger-Definition:

Im Hinblick auf die Umsetzung des Zellkonzepts wurde für die Definition von Quellen- und Empfangspunkten die einfachst-mögliche Variante gewählt. Dabei werden zeilenweise in tabellarischer Form fünf Datenfelder spezifiziert: *ObjectID*, *X*, *Y*, *Z* und *DKHabs*. *DKHabs* ist eine boolsche Variable, welche bezeichnet, ob die Höhe als Absolutwert oder als Relativangabe zum Terrain zu interpretieren ist. Für jede Quellen-Empfänger-Kombination wird eine Punkt-Punkt-Ausbreitungsrechnung durchgeführt und das Resultat als Dämpfungsspektrum abgespeichert.

- Resultatausgabe inkl. Laufzeitberechnung:

Die Resultate werden modulweise als Ausbreitungsdämpfungen in Terzen zusammen mit der Quellen- und Empfänger-ID ausgegeben. Die Laufzeit wird bei den BASIC- und METEO-Resultaten im Anschluss an die Terzen angehängt.

Nr.	Bez.	Winkelbereich	Himmelsrichtung
0	W0:	337.5° bis 22.5°	Nord
1	W45:	22.5° bis 67.5°	Nordost
2	W90:	67.5° bis 112.5°	Ost
3	W135:	112.5° bis 157.5°	Südost
4	W180:	157.5° bis 202.5°	Süd
5	W225:	202.5° bis 247.5°	Südwest
6	W270:	247.5° bis 292.5°	West
7	W315:	292.5° bis 337.5°	Nordwest

Tabelle 6.2: Winkelbereiche für welche der Sichtwinkel auf den Horizont ausgegeben wird.

- Ergänzung der Sichtwinkel:

Wie bereits erwähnt, wird in *sonAIR* ein hybrider Ansatz verfolgt, bei welchem eine aufwändige Ausbreitungsrechnung mit *sonX* nur für anspruchsvolle Ausbreitungssituationen durchgeführt wird. Als Unterscheidungskriterium wird dazu für jeden Empfangspunkt der Sichtwinkel auf den Horizont, unter Berücksichtigung des Geländes und von künstlichen Hindernissen, in einem vorgeschalteten Prozess bestimmt. 0° entspricht dabei der Horizontalen, positive Winkelangaben bedeuten, dass der Horizont oberhalb der Horizontalen liegt. Die Berechnung erfolgt für 16 Ausbreitungsrichtungen bzw. für einen Winkelschritt in der XY-Ebene von 22.5°, beginnend bei 0°. Die Ergebnisse werden für 8 Winkelbereiche von je 45° gemäss Tabelle 6.2 zusammengefasst, wobei jeweils der grösste Sichtwinkel der drei Winkel pro Bereich gehalten wird. Das Resultat wird unter Verwendung der Bezeichnungen gemäss Tabelle 6.2 an den Datensatz mit den Empfangspunktkoordinaten angehängt und dieser wird neu abgespeichert, wobei der Name um 'W' ergänzt wird.

- Nachschlagetabellen für die Luftdämpfung:

Ebenfalls Teil des Hybrid-Konzeptes ist es, dass bei jeder Ausbreitungsrechnung Luftdämpfungsspektren pro Meter für jede Höhenstufe gemäss der Einteilung aus Abschnitt 2.3.7 abgespeichert werden (1, 3, 6, 12, 25, 50, 100, 200, 300... bis 10'000 m). Zusätzlich wird in dieser Tabelle die mittlere Laufzeit pro Meter ergänzt, d.h. der Kehrwert der Schallgeschwindigkeit. Diese Informationen werden im Hybridmodus dazu verwendet, die Luftdämpfung bzw. die Laufzeit für einfache Ausbreitungssituationen zu berechnen. Auf diesem Weg wird gewährleistet, dass es beim Wechsel vom Einfachmodus zu *sonX* nicht zu Sprüngen aufgrund der Luftdämpfung bzw. bei der Laufzeit kommt. Allerdings wird auf eine Unterscheidung in unterschiedliche Untergrundtypen verzichtet; es wird nur der Standardtyp verwendet. Im BASIC-Modus wird eine Datei erzeugt, welche aus dem Namen der Meteolink-Datei und der Endung 'AirAtt.txt' besteht; im METEO-Modus werden drei separate Dateien für Tag, Abend und Nacht abgespeichert ('AirAttDay.txt', 'AirAttEve.txt' und 'AirAttNig.txt').

- Trennung der Meteeffekte:

Im Betriebsmodus METEO, werden Wettereinflüsse auf die Luftdämpfung und infolge gekrümmter Schallstrahlen auf die Hinderniswirkung und die Walddämpfung ausgewiesen. Im Hinblick auf die Berechnung von Jahresbelastungen von Landesflughäfen wurde ein Konzept eingeführt, welches zur Reduktion der gegenseitigen Abhängigkeiten eine METEO-Berechnung ermöglicht, welche nur die Auswirkungen gekrümmter Schallstrahlen berücksichtigt. Dabei wird durch den Schalter *AatmOnlyBASIC = 1* im METEO-Modus die Luftdämpfung unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre, gleich wie im BASIC-Modus, berechnet. Die entsprechenden Ergebnisse werden auch in der Nach-

schlagetabelle mit Dämpfungswerten pro Frequenz und Höhenstufe '*AirAtt.txt' berücksichtigt.

7 Kombination mit dem Strassenlärmmodell *sonROAD18*

7.1 Einleitung

Das Strassenlärm Emissionsmodell *sonROAD18*, welches durch die Empa im Auftrag des BA-FU entwickelt wurde, ist in [51] bzw. [52] dokumentiert. Es basiert in weiten Teilen auf dem Formalismus des Europäischen Modells *CNOSSOS*, verwendet aber die in der Schweiz gebräuchlichen SWISS10-Fahrzeugkategorien, ergänzt um elektrisch bzw. hybrid angetriebene Fahrzeuge. In Abweichung zu *CNOSSOS* ist *sonROAD18* in Terzen formuliert und berücksichtigt eine nicht-runde vertikale Abstrahlcharakteristik. Das Modell beschreibt die akustisch abgestrahlte Leistung eines die entsprechende Kategorie repräsentierenden Fahrzeugs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Als weitere die Emission beeinflussende Faktoren werden der Belag, die Strassenlängsneigung und die Lufttemperatur berücksichtigt.

7.2 Quellendefinition

Als Quelle wird die Schallleistung eines Fahrzeuges bzw. ein Fahrbahnabschnitt mit konstanter Schall-emission, definiert als Schallleistung pro Laufmeter, vorgegeben. Die Linienquelle befindet sich dabei in Fahrbahnmitte auf einer Höhe von 0.05 m über Strassenniveau. Falls mehrere Fahrspuren berechnet werden sollen, müssen diese einzeln vorgegeben werden.

7.3 Spezifische Erweiterungen und Anpassungen des Ausbreitungsmodells

Um das Emissionsmodell *sonROAD18* mit dem *sonX*-Ausbreitungsmodell zu kombinieren, wurden zwei Anpassungen an *sonX* vorgenommen:

- Das Emissionsmodell von *sonROAD18* besitzt eine vertikale Richtcharakteristik. Für die Berechnung der Immissionen an einem bestimmten Empfangspunkt muss deshalb neben der von *sonX* berechneten Ausbreitungsdämpfung auch die Ausbreitungsrichtung bekannt sein. Im Falle von Beugung an Hinderniskanten entspricht der zugehörige Emissionswinkel nicht der direkten Verbindung zwischen Quellen- und Empfängerposition. Um dem Emissionsmodell diese Information zugänglich zu machen, wurde deshalb der mit *sonX* berechnete vertikale Emissionswinkel bei der Resultatausgabe ergänzt.
- Die Emissionswerte von *sonROAD18* werden analog zu *CNOSSOS* auf der Basis von Vorbeifahrtsmessungen in 7.5 m Abstand bestimmt, wobei die Bodenreflexion in Quellennähe, im Sinne einer Verdoppelung der Schallintensität, pauschal dem Emissionswert zugeschlagen wird. Um konsistente Vorbeifahrtspegel in der Referenzgeometrie beispielsweise mit der ISO 9613-2 zu erhalten, muss in *sonX* zum einen die Bodenreflexion auf der Fahrbahn unterdrückt und zum anderen die Emission um 3 dB erhöht werden. Die Umsetzung dieser Anforderung wurde wie nachfolgend beschrieben implementiert.

7.3.1 Unterdrückung von Bodenreflexionen in Quellennähe

Der Spezialmodus mit Unterdrückung von Bodenreflexionen in Quellennähe wird aktiviert, wenn bei sämtlichen Quellenpunkten in einem Berechnungsprojekt die Höhe relativ zum Gelände definiert und mit $5 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ mm}$ angegeben wird. Die Bodenreflexion wird für ein Strassenband unterdrückt, dessen Breite mit dem Parameter 'LaneWidth' in der Parameterdatei spezifiziert wird. Als Standardeinstellung wird eine Breite von 7.5 m empfohlen. Das Quelle-Empfänger-Relief hinter der Quelle wird ebenfalls auf nicht reflektierend gesetzt. Einzelne Strassenabschnitte müssen durch mehrere Strassenquellenpunkte definiert werden, welche über eine einheitliche Quellen-ID gruppiert werden (QUELLENGRUPPE oder FLBAHN, beide Begriffe sind zulässig, letzteres wurde für *sonAIR* eingeführt, siehe Kapitel 6). Der Vektor von einem Quellenpunkt zum nächsten definiert die Ausrichtung des Strassenabschnittes und damit die Länge des Ausbreitungspfad, welcher auf dem nicht-reflektierenden Strassenband liegt. Die horizontale Länge des nicht-reflektierenden Bodens ist auf maximal 500 m beschränkt. Berechnungsergebnisse, bei denen dieser Spezialmodus aktiv war, werden entweder mit 'Strasse' (.txt) bzw. 'sonROAD18' (.res) beschriftet. Bei den Resultaten wird zusätzlich beim Dämpfungsterm $A_{gr/bar}$ 3 dB abgezogen, um die entsprechende Erhöhung der Emission zu berücksichtigen.

Die Quellenhöhe von 0.05 m ist sehr sensitiv in Bezug auf Geländeunebenheiten in unmittelbarer Nähe, welche als Folge einer zu ungenauen oder zu groben Abtastung der Topographie auftreten können. Aus diesem Grund werden die Geländeschnitte bei der Ausbreitungsrechnung vereinfacht und der Fahrbahnbereich wird unabhängig von der Maschenweite des Topographiedatensatzes nur durch drei Punkte abgebildet: einen Punkt unterhalb der Quelle und je einen Punkt auf beiden Seiten beim Übergang der Fahrbahn zum realen Terrain.

Literaturverzeichnis

- [1] ISO 9613-1: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993.
- [2] ISO 9613-2: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation, 1996.
- [3] A. Pierce: Diffraction of sound around corners and over wide barriers. *The Journal of the Acoustical Society of America* **55**(5) (1974) 941–955.
- [4] J. Defrance, E. Salomons, I. Noordhoek, D. Heimann, B. Plovsing, G. Watts, H. Jonasson, X. T. Zhang, E. Premat, I. Schmich, F. Aballea, M. Baulac, F. de Roo: Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project. *Acta Acustica United with Acustica* **93** (2007) 213–227.
- [5] C. I. Chessell: Propagation of noise along a finite impedance boundary. *Journal of the Acoustical Society of America* **62** (1977) 825–834.
- [6] C. F. Chien, W. W. Soroka: A note on the calculation of sound propagation along an impedance surface. *Journal of Sound and Vibration* **69** (1980) 340–343.
- [7] M. Abramowitz, J. Stegun: *Handbook of Mathematical Functions*.
- [8] W. Gautschi: Efficient Computation of the Complex Error Function. *SIAM J. Numer. Anal.* **7** (1970) 187–198.
- [9] M. Delany, E. Bazley: Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics* **3** (1970) 105–116.
- [10] G. A. Daigle, e. al.: Some comments on the literature of propagation near boundaries of finite acoustical impedance. *J. Acoustical Society of America* **66** (1979) 918–919.
- [11] D. C. Hothersall, J. N. B. Harriott: Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries. *Journal of the Acoustical Society of America* **97** (1995) 918–926.
- [12] DELTA: Nord2000: Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Technical report, DELTA, Danish Electronics, Light and Acoustics (2001).
- [13] V. E. Ostashev, D. K. Wilson: *Acoustics in Moving Inhomogeneous Media*, Second Edition. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL (2016).
- [14] R. Pieren, D. Lincke: Auralization of aircraft flyovers with turbulence-induced coherence loss in ground effect. *J Acoust Soc Am* **151** (2022) 2453.
- [15] R. Nota, R. Barelds, D. van Maercke: Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning. Technical report (2005).
- [16] D. Heimann, E. M. Salomons: Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels. *Applied Acoustics* **65** (2004) 925–950.

- [17] D. Heimann: Three-dimensional linearised Euler model simulations of sound propagation in idealised urban situations with wind effects. *Applied Acoustics* **68** (2007) 217–237.
- [18] I. M. Noordhoek, J. D. van der Toorn: Validation of the Harmonoise models. HAR28TR-041109-TNO11.doc **D21** (2005).
- [19] J. M. Wunderli, M. W. Rotach: Application of statistical weather data from the numerical weather prediction model COSMO-2 for noise mapping purposes. *Acta Acustica United with Acustica* **97** (2011) 403–415.
- [20] J. Hofmann, K. Heutschi: An engineering model for sound pressure in shadow zones based on numerical simulations. *Acta Acustica United with Acustica* **91** (2005) 661–670.
- [21] VDI 3783 Blatt 12: Environmental meteorology - Physical modelling of flow and dispersion processes in the atmospheric boundary layer - Application of wind tunnel, 2000.
- [22] K. Heutschi: Calculation of Reflections in an Urban Environment. *Acta Acustica United with Acustica* **95** (2009) 644–652.
- [23] K. Heutschi: Incoherence Factor as Descriptor for the Diffusivity of Building Facades. *Acta Acustica United with Acustica* **97** (2011) 933–939.
- [24] J. M. Wunderli: An extended model to predict reflections from forests. *Acta Acustica United with Acustica* **98** (2012) 263–278(16).
- [25] J. Bowman, T. Senior, P. Uslenghi: Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes. North-Holland, Amsterdam (1969) 92–128.
- [26] P. Morse, K. Ingard: Theoretical Acoustics. McGraw-Hill, New York (1968).
- [27] J. Wait: Electromagnetic radiation from cylindrical structures. Pergamon, London (1959).
- [28] E. Salomons: A model for calculating specular and diffuse reflections in outdoor sound propagation. The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration (ICSV13), Vienna, Austria, July 2-6 (2006).
- [29] U. Ulmer: Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Spezialauswertung der Erhebung 1993-95 vom 24. Februar 2003. Technical report, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape (2003).
- [30] J. M. Wunderli, E. M. Salomons: A Model to Predict the Sound Reflection from Forests. *Acta Acustica United with Acustica* **95** (2009) 76–85.
- [31] R. Pieren, J. M. Wunderli: A Model to Predict Sound Reflections from Cliffs. *Acta Acustica United with Acustica* **97** (2011) 243–253.
- [32] J. M. Wunderli: sonRAIL - From the scientific model to an application in practice. In *Euro-noise*. 475–480.
- [33] T. Thron: Emissionsmodell fuer Schienenverkehrs-laerm. Ph.D. thesis (2010).
- [34] K. Heutschi: Sound Propagation over Ballast Surfaces. *Acta Acustica United with Acustica* **95** (2009) 1006 – 1012.
- [35] K. Attenborough: Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. *J. Acoustical Society of America* **73** (1983) 785–799.

- [36] R. Morse: Acoustic Propagation in Granular Media. J. Acoustical Society of America **24** (1952) 696–700.
- [37] P. Smith, R. Greenkorn: Theory of Acoustical Wave Propagation in Porous Media. J. Acoustical Society of America **52** (1971) 247–253.
- [38] H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa: Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials. J. Acoustical Society of America **86** (1989) 637–643.
- [39] K. M. Li, T. Waters-Fuller, K. Attenborough: Sound propagation from a point source over extended-reaction ground. Journal of the Acoustical Society of America **104** (1998) 679–685.
- [40] C. F. Chien, W. W. Soroka: Sound propagation along an impedance plane. Journal of Sound and Vibration **43** (1975) 9–20.
- [41] K. Heutschi, R. Bayer: Sound radiation from railway tunnel openings. Acta Acustica United with Acustica **92** (2006) 567–573.
- [42] K. Heutschi: On Single Event Measurements of Heavy Road Vehicles in Freely Flowing Traffic. Acta Acustica United with Acustica **94** (2008) 709–714.
- [43] J. M. Wunderli, R. Pieren, K. Heutschi: The Swiss shooting sound calculation model son-ARMS. Noise Control Engineering Journal **60** (2012) 224–235.
- [44] ISO 17201-4: Acoustics - Noise from shooting ranges - Part 4: Prediction of projectile sound, 2006.
- [45] Sound source data for aircraft noise calculations: state of the art and future challenges, 2012.
- [46] sonAIR - data acquisition for a next generation aircraft noise simulation model, 2013.
- [47] J. Pietrzco, R. Hofmann: Prediction of A-weighted aircraft noise based on measured directivity patterns. Applied Acoustics **23** (1988) 29–44.
- [48] W. Krebs, R. Buetikofer, S. Pluess, G. Thomann: Sound source data for aircraft noise simulation. Acta Acustica united with Acustica **90** (2004) 91–100.
- [49] Empa: FLULA2, Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglaermbelastung. Technische Programm-Dokumentation (FLULA2, a Method for the Calculation and Illustration of Aircraft Noise Exposure. Technical Program Documentation). Version 4. Technical report, Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Laboratory of Acoustics / Noise Control (2010).
- [50] B. Schaeffer, R. Buetikofer, S. Pluess, G. Thomann: Aircraft noise: accounting for changes in air traffic with time of day. Journal of the Acoustical Society of America **129** (2011) 185–199.
- [51] B. Heutschi, K. und Locher: sonROAD18 - Berechnungsmodell fuer Strassenlaerm. Herausgeber BAFU, Empa-Bericht Nr. 5214.010948 (2020).
- [52] K. Heutschi: sonROAD18 - Berechnungsmodell fuer Strassenlaerm - Weiterentwicklungen und Ergaenzungen (Version 2.0). Herausgeber BAFU, Empa-Berichte Nr. 5214.019298 und 5214.023513 (2020).

Anhang

Der Rechenkern von *sonX* wurde mit der Programmiersprache Delphi, Version 2009 erstellt. In den nachfolgenden Abschnitten sind ergänzende Informationen zur Implementation, Benutzung und Steuerung zusammengestellt. Die dargestellten Beispiele gelten für den allgemeinen Rechenkern und nicht für *sonARMS*, welches in einer separaten Dokumentation beschrieben wird.

A.1 Steuerung des Berechnungsablaufes

Die Berechnung wird typischerweise durch Aufruf einer '*.bat' Datei gestartet. Die Befehlszeile besteht aus drei Elementen, welche mit einem Leerschlag getrennt sind: (a) dem zu startenden Rechenkern, (b) dem Betriebsmodus ('Basic', 'Meteo', 'Reflect' oder 'Forest') sowie der Projektdatei mit Endung '*.sonx'. Untenstehend findet sich ein Beispiel für einen Programmaufruf.

```
@echo off
sonX_V4.0.exe basic "Testprojekt.sonx"
sonX_V4.0.exe meteo "Testprojekt.sonx"
echo -----
echo          fertig
echo -----
pause
```

In der Projektdatei werden sämtliche Pfade zu Input- und Steuerungsdateien sowie zu Resultat- und Logdateien gesetzt (siehe nachfolgendes Beispiel). Beispiele der aufgerufenen bzw. erzeugten Dateien werden in den nachfolgenden Unterkapiteln aufgeführt.

Hinweis:

Die Parameter 'Reduktionsdaten', 'Gebaeude' und 'Hindernisse' sind optional und können weggelassen werden.

```
//sonX Testprojekt:
// Datum:
// Autor:
// Kommentare:
```

```
Parameter          .\Settings\sonXParameter.txt
Frequenztabellen    .\Settings\sonXFrequencyTable.txt
Reduktionsdaten     .\Settings\ReductionData_Airfield_NoAirGrid_NoReduction.txt
```

```
Gelaende           .\Input\Terrain.txt
GelaendeGross       .\Input\Terrain_coarse.txt
Flaechen-DB         .\Settings\LandUseTypesV14.txt
```

```
Primaerflaechen     .\Input\LandCover.txt
PrimaerGross        .\Input\LandCover_coarse.txt
```

```

Quellen          .\Input\Quellen.txt
Empfaenger       .\Input\Empfaenger.txt
Gebaeude         .\Input\Gebaeude.txt
Hindernisse      .\Input\LSW.txt

Oberflaechentypen .\Settings\Oberflaechentypen.txt
Schallabsorption  .\Settings\Schallabsorption.txt
Schalldaemmung    .\Settings\Schalldaemmung.txt
Oberflaechenstrukturen .\Settings\Oberflaechenstrukturen.txt

Meteodateinamen  .\Settings\Meteodateinamen.txt
Meteolink        .\Input\MeteoSitu2Meteogebiet.txt

Logdateipfad     .\Log\
Errdateipfad     .\Log\
Statusdateipfad  .\Log\
OutBasicPfad     .\Out\
OutMeteoPfad     .\Out\
OutReflePfad     .\Out\
OutWaldPfad      .\Out\
OutDetailsPfad   .\Out\
Plotpfad         .\Out\

```

A.2 Einstellungen des Rechenkerns

In einer ASCII-Datei, welche in der obigen Steuerungsdatei mit *sonXParameter.txt* bezeichnet wurde, sind sämtliche Einstellungen des Rechenkerns zusammengestellt, wobei neben eigentlichen Modellparametern beispielsweise auch Art und Umfang der Resultatausgabe beeinflusst werden können. Die Datei wird für sämtliche Modellvarianten in einheitlicher Form verwendet. Das nachfolgende Beispiel zeigt die Standardeinstellungen für *sonAIR*. In der Datei sind Empfehlungen für die Einstellung der Parameter aufgeführt. 'S' steht dabei für den Betriebsmodus Survey (schnelle Resultate bei reduzierter Genauigkeit), 'E' für Engineering (Produktionseinstellung, Standard), 'P' für Precision (Produktionseinstellung, mit dem Ziel maximaler Genauigkeit) und 'D' für Debug (Resultatanalyse und Fehlersuche mit kleinen Projekten). Für weitergehende Informationen zu den einzelnen Parametern wird auf das Dokument 'sonX - Beschreibung der Modellparameter' verwiesen, welches Teil der *sonARMS*-Dokumentation ist.

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
//
// sonX-Parameter.txt - Reference settings for sonARMS
// =====
//
/////////////////////////////////////////////////////////////////

// Table of contents
//=====
//
// 0.) Change history since January 2015
// 1.) General parameters for in- and output control
// 2.) General parameters for the setup of the calculation model, sorted according the modules:
//     Basic - Meteo - Reflect - Forest
// 3.) Application spezific parameters for sonRAIL, sonAIR and sonROAD
// 4.) Spezific parameters for sonARMS

```

```
// Note: recommended parameter settings are given for the following applications:
// =====
// - S = Survey (quick calculation with reduced accuracy)
// - E = Engineering (balanced)
// - P = Precision (high accuracy, but longer calculation times)
// - D = Debug (with additional information for validation purposes)

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//
// 0.) Change history since January 2015
// -----
//
// 15-Apr-15: Neuer Parameter MaxWarnPercent (darf fehlen)
// 17-Apr-15: Neuer Parameter LiftRcvBelowGround (darf fehlen; SonRail, sonAir, nicht sonArms)
// 24-Aug-15: Neuer Parameter AatmCorrBroadBand (Luftdämpfung nicht für Terzbandmittenfrequenz)
// 07-Sep-15: Neuer Parameter OutPutsSrcRcv
// 27-Okt-15: Parameter MeteoModify erweitert auf Wert 2
// 25-Apr-16: Neuer Parameter ResMeteoMinMax
// 05-Dez-18: Parameter abgeschafft: ArmsDirectAtoMaxAF
// 07-Dez-18: Neuer Parameter ForestReflectors_Reduction
// 25-Nov-21: Neue Parameter RockGrid und ForestGrid
// 20-Jul-22: Neue Parameter AlateralOn und AbottomOn (sonX und sonArms)
// 09-Sep-22: Neue Parameter ReflMaxWallSegmentHoriz und ReflMaxWallSegmentVert (sonX und sonArms)
// 04-Mai-23: Parameter abgeschafft: LineSourcePointsDistFOREST, LineSourcePointsDistREFLECT
//                                     LineSourcePointsDistTunnel, LineSourcePointsDistLowBASIC,
//                                     LineSourcePointsDistUpBASIC, LineSourcePointsDistSlopeBASIC,
//                                     LineSourcePointsDistLowMETEO, LineSourcePointsDistUpMETEO,
//                                     LineSourcePointsDistSlopeMETEO
// 11-Mai-23: Wechsel des sonAir....exe Programmnamens in sonX....exe.
//           Wechsel des alten sonX Namens in CommonSource.
// 30-Mai-23: Neuer Parameter LaneWidth für sonX
// 05-Jun-23: Parameter abgeschafft: ForestRimPointsDist, MinForestDepth
// 18-Jun-24: Neuer Parameter AtransmOn
//
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//
// 1.) General parameters for in- and output control
// =====

// -----
InputTriage          0          S=E=P=D=0
DxfMaxHeightGnd      80 m
DxfMinHeightGnd      0.001 m
DxfMaxHeightEdges    80 m
DxfMinHeightEdges    0.001 m
// -----
FileNameNumbers      0          S=E=P=D=0
// -----
PlotRelief            0          S=E=P=0 D=1
// -----
LogSize              1          S=E=P=1 D=2oder3
MaxWarnPercent       10 %
// -----
LinLogProfilesHeight 100 m          (für Flugzeuge auf 300 m setzen)
LinLogProfilesDelta   0.1 m
WriteAbsMeteoProfiles 0          S=E=P=0 D=0oder1
// -----
```

```
ErrorPopUp          0          S=E=P=0 D=1
MaxThreads          512 (gilt für sonARMS, für übrige Anwendungen auf 0 setzen)
```

```
////////////////////////////////////
//
// 2.) General parameters for the setup of the calculation model, sorted according the modules:
//    Basic - Meteo - Reflect - Forest
// =====

// -----
AccelTrigonom      16384
AccelWofz          2000
// -----
OptimizeGndSeg      1          S=E=P=D=1
HarmonoiseDist1Rmax  50 m      S=E=P=D=50
HarmonoiseDist2Rmax  500 m     S=E=P=D=500
HarmonoiseR1        0.25 m     S=E=P=D=0.25
HarmonoiseR2        1 m        S=E=P=D=1
HarmonoiseDist1Dsegm 20 m      S=E=P=D=20
HarmonoiseDist2Dsegm 200 m     S=E=P=D=200
HarmonoiseD1        5 m        S=E=P=D=5
HarmonoiseD2        50 m       S=E=P=D=50
// -----
MinDistRecBarr      0 m        S=E=P=D=0
LiftRcvBelowGround  0 m
// -----
PathDmin            0.33 m
// -----
CoherenceLoss        1          S=E=P=D=1
// -----
ReliefSmoothing      0          S=E=P=D=0
// -----
AatmGradCelsius      8 °C
AatmHumidityPercent  76 %
AatmMilliBar         1013 mBar
// -----
AatmCorrBroadBand    0          (für Flugzeuge auf 1 setzen)
AatmMorePrecision    0          (für Flugzeuge auf 1 setzen)
AatmMaxHeight        1000 m     (für Flugzeuge auf 10000 m setzen)
AatmDelta            100 m
AatmOnlyBASIC        0
// -----
FlowResSigma         300
// -----
TerrainTypeGrid      1 m        S=10 E=5 P=D=2
TerrainTypeGridLarge 50 m       (für sonARMS nicht aktiv)
// -----
ForestHeight         20 m
FoliageDistLimit     200 m
// -----
MaxDistance          2000 m     (für Flugzeuge gleich setzen wie MaxAttenuationDistance, siehe Reduktionsdatei)
// -----
SingleBarrierMaxAtt   25 dB
MultiBarrierMaxAtt    25 dB
BarrierUsePierce      1          (für Flugzeuge auf 0 setzen)
AdditionalGroundReflections 1    (für Flugzeuge auf 0 setzen)
NegZobstacles        1
DeltaSlope           0.1
AlateralOn           1          (für Flugzeuge auf 0 setzen)
AbottomOn            1          (für Flugzeuge auf 0 setzen)
```

```

AtransmOn          1          (für Flugzeuge auf 0 setzen)
SingleTransmission  0
// -----
// Raytracing
// -----
RtDeltaX           2 m       S=E=P=D=2
MeteoModify         2         S=E=P=D=2          (für Flugzeuge auf 2 setzen)
SimpleMeteo         1         S=E=P=D=1
MeteoDmax           15 dB
MeteoDmin           -20 dB
// -----
ReflMaxWallSegmentHoriz 10 m
ReflMaxWallSegmentVert  3 m
ReflUebergangsFrequenz  1         S=1 (only incoherent) E=1 P=300 D=300
ReflSpacingFactorKohaerent 0.11    S=E=P=D=0.11
ReflSpacingInkohaerent  1.0        S=E=P=D=1
ReflIterationsWalls     2         S=1 E=2 P=3 D=2
ReflZugskoerper         0         S=0 E=0 P=0 D=0          (für Eisenbahn auf 1 setzen)
ReflMaxDist            300 m       S=200 E=D=300 P=500
ReflLimit              0.001
SourceConst            100
ReflLogVisibility       0
// -----
maxDistForestPropagation 2000 m       S=1000 E=2000 P=5000 D=2000
maxDistRockPropagation   3000 m       S=1500 E=3000 P=5000 D=3000
minDistRockReflector     20 m         S=E=P=D=20
maxRockReflAngle         1.3963 corresponds to 80°    S=E=P=D=1.3963
RasterRatioRock          10 times RockGrid    S=E=5=5=5
RockGrid                 5 m
ForestGrid               25 m
ForestMaxHorAngle        1.5707963 = Pi/2 = 90°    S=E=P=D=1.5707963
DiffusThreshold          0.2          S=0.3 E=D=0.2 P=0.1
LogReflectionPoints      0           S=E=P=0 D=1
CliffReflectorsOn        1           S=E=P=D=1
ForestReflectorsOn       1           S=E=P=D=1
ForestReflectors_NrOfSpheres 350
ForestReflectors_Reduction 3
//ForestReflectors_Reduction 1          zur Probe Versuch 4

////////////////////////////////////
//
// 3.) Application specific parameters for sonRAIL, sonAIR and sonROAD
// =====
//
// -----
OutPutsDetail          0         S=E=P=0 D=1
OutPutsSummary         1         S=E=P=1 D=1
OutputDbPrecision      2         S=E=P=D=2
// -----
SourceDimension         0 m       (sonAIR: 50 m)
AirAttenuationOutput    0         (für sonARMS nicht aktiv)
OutPutsSrcRcv          0         S=E=P=0 D=1          (Nur für Fluglärm sinnvoll, für sonARMS nicht aktiv)
LaneWidth              7.5 m     (Nur für Strassenquellen aktiv, in sonARMS nicht aktiv)

////////////////////////////////////
//
// 4.) Specific parameters for sonARMS
// =====
//
// -----
ArmsWriteInternalData   0         S=E=P=0 D=1

```



```

ArmsWriteDetailsP          1  S=E=P=0 D=1
ArmsWriteDetailsR          0  S=E=P=0 D=1
ArmsWriteTimeResponse      0  S=E=P=0 D=1
DeleteOutput               0  S=E=P=1 D=0
LogDominantReflector       0  S=E=P=0 D=1
MaxTargetDeviation        1000
// -----
ArmsTimeResponseStep       0.010  (=10ms)
ArmsTimeResponseLength     600  (600 x ArmsTimeResponseStep = 6 sec total time)
// -----
REFLECTwithMETEO          2          S=E=P=D=2  (nur für sonARMS aktiv)
// -----
ResMeteoMinMax            0          (nur für sonARMS aktiv)
Abuild                    0.0 dB     (nur für sonARMS aktiv)
////////////////////////////////////

```

A.2.1 Reduktionsdatei für das *sonAIR* Dienstleistungstool

Für den Betrieb des *sonAIR* Dienstleistungstools ist eine zusätzliche Datei zur Steuerung des Rechenkerns und der Einzelflugsimulation notwendig. Diese Reduktionsdatei enthält die Parameter, welche für die Berechnung des Dämpfungsgitters bei *sonAIR* verwendet werden. Wenn die Reduktionsdatei fehlt, werden alle Quellen- und Empfängerkombinationen mit *sonX* berechnet. Dies bedeutet u.a., dass der 'LineOfSightMarginAngle' auf 200° gesetzt wird.

```
// Input für sonAir Datenreduktion für basic und meteo Modus
// -----
// Forest und reflect Berechnungen und Output werden nicht reduziert.
// Regeln für die Reduktion:
// 1. Die Empfängerpositionen sind frei wählbar, insbesondere z.B. Messpunkte im Fenster.
// 2. Für die Schritte hier werden Absolutkoordinaten (Quelle, Empfänger) auf ganze Zahlen gerundet.
// 3. Die Quellen-Absolutpositionen müssen sich an das Raster halten (RASTER der ersten Zeile).
// 4. Vom Quelle-Empfänger-Abstand wird das Maximum d der Abstände in x, y Richtung festgehalten.
// 5. Der Abstand in z-Richtung ist indirekt bereits berücksichtigt durch den Grenzwinkel.
// 6. Das RASTER wird aufgrund der zu d passenden (Ober-)GRENZE bestimmt.
// 7. Ist d > die letzte GRENZE, so wird nichts berechnet.
// 8. Berechnung von Rx = Quellenkoordinate X mod RASTER
// 9. Berechnung von Ry = Quellenkoordinate y mod RASTER
// 10. Die Rechnung wird nur dann ausgeführt wenn: Rx = 0 und Ry = 0.
```

```
OBJECTID RASTER GRENZE
0 - 1000 m 100 1000
1000 - 4000 m 200 4000
4000 - 8000 m 400 8000
8000 - 16000 m 800 16000
16000 - 32000 m 1600 32000
END
```

```
// -----  
// Kriterien für Ausbreitungsrechnung  
// -----  
// OutPutReduction 1: Eingeschaltet: Die RASTER- und GRENZE-Parameter  
// oben sind, wie oben dargestellt, wirksam.  
// Ausbreitungsrechnungen, die nicht dem Raster  
// entsprechen, werden unterdrückt.  
// Oder mit UseAirGrid = 0 erfolgt die Ausdünnung der  
// Flugbahn aufgrund der Parameter unten (SourcePoints...),  
// anstelle der Gitterparameter oben.
```

```
//
//      0: Diese Unterdrückung von Ausbreitungsrechnungen
//      ist abgeschaltet (sowohl für Gitterpunkte als auch
//      für Flugbahnpunkte)
//
// LineOfSightMarginAngle: Die Ausbreitungsrechnung wird unterdrückt,
// = typisch 15 °      wenn eine Quelle in Bezug auf einen Empfänger
//                     über einem Grenzwinkel fliegt.
//                     Dieser Grenzwinkel ist der
//                     Winkel zum Horizont
//                     + LineOfSightMarginAngle (in Grad)
//                     Diese Unterdrückung ist unabhängig von
//                     OutPutReduction.
// = 200 ° = Unterdrückung abgeschaltet.
// -----
OutPutReduction          1
LineOfSightMarginAngle   200 °
//LineOfSightMarginAngle 15 °
SourcePointsDistLow      1.0
SourcePointsDistUpp      500.0
SourcePointsDistSlope    0.050

// Berechnungsmodus
// UseAirGrid 1: Der Quelleninput enthält wie bisher Luftraum-Gitterpunkte.
//               Gitterparameter kommen zum Einsatz.
// UseAirGrid 0: Der Quelleninput enthält Flugbahnpunkte. Einzelflugparameter kommen zum Einsatz.
UseAirGrid 1

// Wird nur in D-noise verwendet
MaxAttenuationDistance 32000

// Höhenregel   ergänzt ab 27-Jan-2015
// -----
// Diese Regel wird von SimTool.exe, nicht von sonAir.exe benutzt.
Zmin 2 m Starthöhe (1. Quellenniveau) *über Boden*
Zstep 1.5 Multiplikator der Höhe *über Boden* pro Höhenstufe.
Steps 40 für 9861m = Zmin * Zstep^(Steps - 1) oberste Quellenhöhe
Zdigits 2 Runden auf so viel Stellen nach dem Punkt, nach der Berechnung aller Stufen.
ZstepLimit 1000 m Limitiert die Schritthöhe (Limitierung neu ab 14-Sep-17)

// -----
// Dämpfungsspektren, bei denen der Wert MaxAttenuation für alle Frequenzen überschritten wird,
// werden bei der Dämpfungsberechnung nicht abgelegt.
// Bei der Footprintberechnung wird bei diesen Dämpfungsspektren für jede Frequenz der Wert
// MaxAttenuation verwendet.
MaxAttenuation 200
```

A.3 Input-Daten

Die nachfolgende Übersicht erklärt kurz alle Projekt-spezifischen Input-Daten, welche in der Projektdatei aufgerufen werden. Im Anschluss wird für jeden Dateityp in kurzes Beispiel gezeigt. Die zusätzlich aufgerufenen Projekt-unspezifischen Settingsdateien werden im Anschluss erklärt.

- Topographiedateien
Die Topographiedateien (Schlüsselworte 'Gelaende' und 'GelaendeGross') werden im

Format ESRI-Grid definiert. Der Rasterabstand wird in Meter angegeben und kann bis zu zwei Nachkommastellen aufweisen. Für *sonARMS* kann der Eintrag bei 'Gelaende-Gross' leergelassen werden. Für weitere Details siehe auch Abschnitt 6. Es wird davon ausgegangen, dass die Informationen zur Topographie aus externen Datenquellen aufbereitet und durch den Benutzer nicht verändert werden.

- Landnutzungsdateien

Die Landnutzungsdateien (Schlüsselworte 'Primaerflaechen' und 'PrimaerGross') können auf zwei Arten zur Verfügung gestellt werden. In der ersten Variante wird die Bodennutzung als TXT-Datei im Format Generate vorgegeben, wobei einzelne Flächen als geschlossene Polygonzüge definiert werden. Für *sonARMS* kann der Eintrag bei 'PrimaerGross' leergelassen werden. Beim Start einer Berechnung werden diese Polygone auf ein Kartenraster abgelegt. Damit dieser Schritt bei einer weiteren Berechnung nicht wiederholt werden muss, wird die Information zur Bodennutzung im Rasterformat während der ersten Berechnung am gleichen Ort wie die Originaldatei mit der Endung *.dat abgespeichert. Bei künftigen Berechnungen wird direkt die Rasterdatei geladen. Die Rasterung wird über den Parameter *TerrainTypeGrid* definiert.

Alternativ können die Bodennutzungsdaten direkt im ESRI-Grid-Format eingelesen werden. Die Maschenweite dieses Datensatzes kann frei gewählt werden und muss nicht mit der räumlichen Auflösung der Topographie übereinstimmen. (Es wird aber empfohlen, ein Mehrfaches des Topographie-Rasters zu wählen.) Die beiden Datensätze zur Topographie und zur Landnutzung müssen aber zwingend einen deckungsgleichen Fusspunkt verwenden. Die Einstellung des Parameters *TerrainTypeGrid* in der Parameterdatei wird bei dieser Variante ignoriert.

Es wird analog zum Gelände davon ausgegangen, dass die Informationen zur Landnutzung aus externen Datenquellen aufbereitet und durch den Benutzer nicht verändert werden. Zu dieser Regel gibt es allerdings eine Ausnahme: Bei der Modellierung von Eisenbahnen muss die Lage und Tiefe des Schotterbetts in der Generate Bodennutzungsdatei ganz zuunterst ergänzt werden.

- Quellen

Quellen können Linien- oder Punktquellen sein. Sie werden über einen Koordinatenpunkt sowie eine Höhenangabe, welche relativ zum Gelände oder absolut sein kann, definiert. Zusätzlich werden zwei weitere Felder verwendet. 'DK_CalcAlways' wird nur für die Optimierung der Berechnung im *sonAIR* Dienstleistungstool gebraucht und sollte sonst auf 'Ja' gestellt werden. In der Spalte 'ID_Quellengruppe', welche in *sonAIR* als 'ID_Flugbahn' bezeichnet wird, können Punktquellen zu Linienquellen verknüpft werden.

- Empfänger

Empfänger werden als Freifeldpunkte betrachtet. Sie werden ebenfalls über einen Koordinatenpunkt sowie eine Höhenangabe, welche relativ zum Gelände oder absolut sein kann, definiert.

- Gebaeude

Gebäude werden im Format Generate als geschlossene Polygonzüge eingelesen. Neben der Gebäudehöhe an jedem Koordinatenpunkt wird die Reflexionseigenschaft definiert. Über das Schlüsselwort 'NEXT' werden mehrere geschlossene Polygone zu grösseren Strukturen zusammengefasst. Die Verknüpfung von Gebäuden ist bei zusammenhängenden Bauten, wie z.B. bei Reiheneinfamilienhäusern angezeigt, und stellt sicher, dass die Schallpfadsuche für seitliche Schallpfade sämtliche relevanten Objekte umfasst. Es wird analog zu Gelände und Landnutzung davon ausgegangen, dass die Informationen

zu Gebäuden aus externen Datenquellen aufbereitet und durch den Benutzer nicht verändert werden.

- künstliche Hindernisse

In einer separaten TXT-Datei im Format Generate können zusätzliche künstliche Hindernisse definiert werden, welche nicht im Gebäudedatensatz enthalten sind. Ein Objekt umfasst mindestens zwei Koordinatenpunkte mit einer Höhenangabe. Durch Ergänzung einer zweiten Höhe können Objekte ohne Bodenabschluss definiert werden. Die Höhenangabe kann wiederum relativ oder absolut erfolgen. Zusätzlich wird pro Objekt ein Oberflächen-Typ definiert, was Einfluss auf die Reflexionsberechnung hat.

- Meteolink

Es gibt zwei Möglichkeiten eine einzelne meteorologische Situation zu definieren. Entweder kann auf ein Standard-Meteoprofil Bezug genommen werden oder es kann ein eigenes Vertikalprofil mit Absolutwerten von Wind, Temperatur, Feuchte und Druck verwendet werden. Im Gegensatz zu den Standardprofilen unterscheiden die Absolutprofile nicht zwischen verschiedenen Untergrundtypen. Die Definition erfolgt zum einen durch Angabe einer Liste mit Meteodateinamen von Profilen. Diese Liste sowie die zugehörigen Profildaten sind in der Regel projektunabhängig. Zum anderen wird eine Meteolink-Datei spezifiziert in welcher eine oder mehrere Meteosituationen durch Auswahl eines Profils, einer Auftretenshäufigkeit tags, abends und nachts sowie durch Angabe einer Temperatur, Feuchte und Druck auf einer spezifischen Höhe definiert werden. Bei der Verwendung von Standard-Meteoprofilen muss eine Angabe zur Windrichtung, Temperatur und Feuchte auf einer Referenzhöhe mitgeführt werden, bei Absolutprofilen müssen diese Felder leer gelassen werden. Weitere Informationen zur Definition von Meteobedingungen sind in Abschnitt A.4.7 zu finden.

Sämtliche Datensätze sind in Form von ASCII-Dateien, im Generate-Format gespeichert. Jedes Objekt beginnt dabei mit einer Zeile, in welcher die Parameter gesetzt werden. Danach folgt eine Liste mit Koordinatenpunkten, welche mit einem END abgeschlossen wird. Im Header der Datei sind jeweils die Parameter erklärt. Im Anschluss sind kurze Beispiele zur Dokumentation des Formates für Quellen (Bahnabschnitte), Empfänger, Wände und meteorologische Bedingungen aufgeführt. Auf eine Darstellung der *sonRAIL*-spezifischen Datensätze Brücken, Einschnitte und Tunnels wird verzichtet.

Hinweis: Der Rechenkern sucht gezielt nach den vorgegebenen Feldbezeichnungen. Es ist deshalb möglich, weitere Felder hinzuzufügen, welche beispielsweise in einer übergeordneten Datenbank Anwendung diesen Objekten zugeordnet sind. Diese Felder werden bei der Ausbreitungsrechnung jeweils ignoriert. In den nachfolgenden Beispielen sind nur die Parameter aufgeführt, welche vom Rechenkern zwingend benötigt werden.

A.3.1 Quellen

Als Koordinaten werden jeweils X (Welt-Kartenkoordinaten Ost-West) und Y (Welt-Kartenkoordinaten Nord-Süd) angegeben.

```
OBJECTID DK_HAbs DK_CalcAlways ID_Quellengruppe X Y Z
888_10 nein ja 888 2700035.501 1246424.766 0.05
888_12 nein ja 888 2700049.017 1246434.11 0.05
888_33 nein ja 888 2700101.49 1246470.386 0.05
888_34 nein ja 888 2700102.313 1246470.955 0.05
END
```

A.3.2 Empfänger

```
OBJECTID DK_HABS X Y Z
E1 ja 2700110.621 1246467.581 543.2
END
```

A.3.3 Gebäude

In der ersten Zeile pro Objekt wird eine Objekt-ID vergeben, definiert ob relative oder absolute Höhen erwartet werden und der Oberflächentyp spezifiziert. (Im nachfolgenden Beispiel wird das Flag 'DK_HABS' nicht verbal (Ja / Nein) sondern numerisch gesetzt, wobei Werte 0 und 1 relative Höhen definieren und der Wert 2 für absolute Höhen über Meer verwendet wird.) In den nachfolgenden Zeilen folgen einzelne Koordinatenpunkte mit einer oder zwei Höhenangaben. Falls nur eine Höhenangabe gemacht wird, wird davon ausgegangen, dass das Hindernis bis zum Boden reicht. Um Öffnungen in Hindernissen zu definieren, kann eine zweite Höhenangabe ergänzt werden, welche die untere Begrenzung des Wandpunktes definiert. Im untenstehenden Beispiel wird eine zweite Höhe angegeben; da diese aber mit 0 m definiert ist, reichen die Gebäude bis unter das Terrain.

```
OBJECTID DK_HAbs DK_Oberfl
1456323 2 502
2690074.926 1252462.145 437.4759 0
2690072.8065 1252459.9145 438.423 0
2690068.7358 1252463.7823 438.423 0
2690070.855 1252466.013 437.4759 0
2690074.926 1252462.145 437.4759 0
NEXT
2690072.8065 1252459.9145 438.4231 0
2690070.916 1252457.925 437.4917 0
2690066.846 1252461.793 437.4918 0
2690068.7358 1252463.7823 438.423 0
2690072.8065 1252459.9145 438.4231 0
END
END
```

A.3.4 künstliche Hindernisse

Künstliche Hindernisse werden analog zu Gebäuden definiert. Das untenstehende Beispiel zeigt ein Hindernis, das teilweise eine Öffnung aufweist.

```
OBJECTID DK_HABS DK_OBERFL
641 1 504
563670.008000001 174898.151999999 2.0 0.0
563662.217999998 174878.471000001 2.0 1.0
563648.219000001 174843.181000002 2.0 1.0
563567.329000001 174652.142999999 1.0 0.0
563551.776999999 174622.651999999 1.0 0.0
563552.958999999 174617.585000001 1.0 0.0
END
END
```

A.3.5 Meteolinkdatei

```
OBJECTID DK_PROFIL HAEUFT HAEUFA HAEUFN WINDRICHT TEMP RF H
03_272_A343 1602921 1 0 0 96.3 16.8 64.3 6.0
END
END
```

A.4 Settingsdateien

Der Rechenkern greift auf mehrere Settingsdateien zu:

- In den *Frequenztabelle*n wird festgelegt, für welche Terzbänder die Berechnungen in den einzelnen Modulen durchgeführt werden. Zusätzlich sind dort standardisierte Bodeneffektspektren für Wald- und Felsreflexionen, frequenzabhängige Diffusionsgrade für verschiedene Kartenraster, welche für das Felsreflexionsmodell benötigt werden, sowie Schalldämmwerte für künstliche Objekte abgelegt.
- Zur Definition der *Oberflächen* werden fünf verschiedene Dateien verwendet.

In der Datei *Geländetypisierung* werden für eine Vielzahl von Geländetypen die im Rahmen der Berechnung benötigten Eigenschaften aufgeführt. Neben akustischen Parametern wie dem Strömungswiderstand gehören dazu vor allem Parameter, welche für die Berechnung der Vertikalprofile von Wind, Temperatur und Feuchte benötigt werden. In der untenstehend aufgeführten Variante sind Geländetypisierungen mit acht Referenzuntergrundtypen aufgeführt, welche um die Spezialtypen für Schotterbett mit unterschiedlicher Schotterdicke ergänzt wurden.

Die Materialeigenschaften von künstlichen Objekten wie Gebäuden oder Lärmschutzwänden werden durch drei Grössen beschrieben: die Schallabsorption, die Schalldämmung und die Oberflächenstruktur. Der Absorptionsgrad einzelner Flächen fliesst im Reflexionsmodul ein. Die Schalldämmung wird seit 2024 im Modul BASIC verwendet, um den Schalldurchgang durch Hindernisse auszuweisen. Die Oberflächenstruktur kann in der aktuellen Version des Rechenkerns nur als integrale Grösse, über die Grenzfrequenz für den Wechsel von spiegelnder zu streuender Reflexion berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 2.4.9 auf Seite 55 bzw. Anhang A.2 auf Seite 125). Die unter Oberflächenstruktur vorgenommenen Einstellungen haben somit aktuell keine Konsequenzen. Um eine vollständige Beschreibung der Materialeigenschaften zu erhalten, wurde diese Grössen gleichwohl eingeführt.

Für die drei Grössen wird eine Klassierung verwendet, welche sich im Falle der Schallabsorption auf die Definition gemäss EN 1793-1:2013-04, Tabelle A.1 (Klassen A1 bis A4 für keine bis hohe Schallabsorption) und im Falle der Schalldämmung auf die Definition gemäss EN 1793-2:2012, Tabelle A.1 bezieht (Klassen B1 bis B3 für geringe bis hohe Schalldämmung). Das Klassierungssystem wurde für die Oberflächenstruktur erweitert, indem Werte C1 bis C3 für glatte sowie schwach und stark strukturierte Oberflächen eingeführt wurden. Die obigen Definitionen sind je in einer Datei abgelegt. In einer vierten Datei mit der Bezeichnung *Oberflächentypen* sind konkrete Beispiele von Objekten als Kombination der drei Eigenschaften aufgeführt. Als Input für das Berechnungsmodell muss jeweils einer dieser Materialtypen gewählt werden.

Für die Definition der spektralen Schalldämmung, welche bei der Berechnung für die Schalldämmklassen B1 und B2 berücksichtigt wird, wurden idealisierte spektrale Verläufe der Schalldämmung hinterlegt. Für die Schalldämmkurve B2 wurde eine konstante Schalldämmung von 10 dB von 25 Hz bis 200 Hz angenommen und gemäss dem Massegesetz darüber eine Zunahme der Schalldämmung um 6 dB pro Oktave verwendet. Für die Schalldämmkurve B1 wurde eine konstante Schalldämmung von 9 dB von 25 Hz bis 400 Hz hinterlegt. Für höhere Frequenzen wurde eine kleinere Zunahme der Schalldämmung von nur 3 dB pro Oktave angenommen; dies da bei so tiefen Schalldämmungen andere Mechanismen zum Tragen kommen als bei den einschaligen Wänden, welche die Grundlage für das Massegesetz darstellen. Die Einzahl-Angabe der Luftschalldämmungseigenschaft DL_R für B1 beträgt 12 dB(A) und für B2 18 dB(A). DL_R beschreibt dabei die Differenz der A-bewerteten Schalldruckpegel vor

und hinter einer Lärmschutzvorrichtung und dient dem Vergleich von in Laborversuchen geprüften Produkten hinsichtlich ihrer allgemeinen Schallschutzwirkung für Verkehrslärm.

- Im Modus METEO werden Wind-, Temperatur- und Feuchteprofile benötigt. Im Ordner Meteoprofile sind die Eingangsparameter zur Berechnung der entsprechenden Standardprofile für jede der 15 Meteoklassen abgelegt. Die Standardprofile müssen dabei für jeden Geländetyp definiert sein.
- Nur im Fall von *sonARMS* wird in einem weiteren mit *Waffen* bezeichneten Ordner, die Emissionsdatenbank sämtlicher Quellen abgelegt.

Nachfolgend wird für jede Settingsdatei mit Ausnahme der der Waffendatenbank, welche in der separaten *sonARMS*-Dokumentation gezeigt wird, ein Beispiel aufgeführt.

A.4.1 Frequenztabellen

```
// Version 22-Jul-24
//
// Frequenzschalter basic   100 Hz .. 8 kHz in Terzschritten
// Frequenzschalter meteo   100 Hz .. 8 kHz in Terzschritten
// Frequenzschalter forest  100 Hz .. 8 kHz in Terzschritten
// Frequenzschalter reflect 100 Hz .. 8 kHz in Terzschritten
//
// Für die Tabelle gilt:
//   - Terzbänder
//   - 27 Frequenzen von 24.803 Hz bis und mit 10079 Hz
//   - Alle Angaben beginnen mit der tiefsten Mittenfrequenz.
//   - Programm wird abgebrochen, wenn es nicht 27 Records sind.
//
// -----
// Datenfelder
// -----
//
// NormFreq
// -----
// Ist nur Bezeichner für Lesbarkeit, nicht verwendet.
// Das Terzband wird über den Index adressiert.
//
//
// SwitchBasic, SwitchMeteo, SwitchForest, SwitchReflect
// -----
// Gebrauch der Frequenzen
// Jedes Feld je für die Modi: basic, meteo, forest, reflect
//
// Wert 0: Frequenz nicht verwenden
// Wert 1:                verwenden
// Diese Schalter haben direkten Einfluss
//   - auf den Umfang des Resultates
//   - auf die Rechenzeit.
//
//
// AgrRock
// -----
// Mittleres aus Messungen bestimmtes Bodeneffektspektrum für Felsreflexionen
// Für Modus: forest
//
// ScatCoefRock
// -----
// Frequenzabhängiger Diffusitätsgrad
// Für Modus:                forest
```

```
// Rasterspezifisch: ScatCoefRock5m    für 2...7 m
//                               ScatCoefRock10m für 8..15 m
//                               ScatCoefRock    für 16..30 m oder höher
//
// 0 <= Werte <= 1
//
// AgrForest
// -----
// Mittleres aus Messungen bestimmtes Bodeneffektspektrum für Waldreflexionen
// Für Modus: forest
//

NormFreq SwitchBasic SwitchMeteo SwitchForest SwitchReflect AgrRock ScatCoefRock ScatCoefRock10m ScatCoefRock5m
25 1 1 1 1 -6 0.3 0.25 0.22 -6 9 10 199
31.5 1 1 1 1 -6 0.3 0.25 0.22 -6 9 10 199
40 1 1 1 1 -6 0.3 0.25 0.22 -6 9 10 199
50 1 1 1 1 -6 0.3 0.25 0.22 -6 9 10 199
63 1 1 1 1 -6 0.3 0.25 0.22 -6 9 10 199
80 1 1 1 1 -6 0.3 0.25 0.22 -6 9 10 199
100 1 1 1 1 -6 0.3 0.25 0.22 -5 9 10 199
125 1 1 1 1 -6 0.3 0.25 0.22 -3 9 10 199
160 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 0 9 10 199
200 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 8 9 10 199
250 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 8 9 10.5 199
315 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 6 9 12.5 199
400 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 6 9 14.6 199
500 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 4 10 16.5 199
630 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 2 11 18.5 199
800 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 2 12 20.6 199
1000 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 0 13 22.5 199
1250 1 1 1 1 -2 0.3 0.25 0.22 0 14 24.5 199
1600 1 1 1 1 -2 0.4 0.34 0.3 0 15 26.6 199
2000 1 1 1 1 -2 0.5 0.43 0.38 -1 16 28.6 199
2500 1 1 1 1 -2 0.6 0.52 0.46 -1 17 30.5 199
3150 1 1 1 1 -2 0.7 0.61 0.54 -2 18 32.5 199
4000 1 1 1 1 -2 0.8 0.7 0.62 -2 19 34.6 199
5000 1 1 1 1 -2 0.9 0.79 0.7 -2 20 36.5 199
6300 0 0 0 0 -2 1 0.88 0.78 -2 21 38.5 199
8000 0 0 0 0 -2 1 0.97 0.86 -2 22 40.6 199
10000 0 0 0 0 -2 1 1 1 -2 23 42.5 199
END
```

A.4.2 Oberflächen - Geländetypisierung

```
//Berechnungsmodell sonX - Geländetypisierung
//
//Version: 14
//Datum: 08.05.2023
//
// Felder
// -----
// Value    Schlüssel als string,
// TYPE_ID  Neuer Schlüssel (ab Dez-08). Für die EnvGDB zwingend Nummern.
//          Werte ab 601 schützen vor Verwechslungen mit internen Nummern.
// DESCR_DE Beschreibung auf deutsch
//
// //////////////////////////////////////
// Sigma    Strömungswiderstand [Rayl] (default)
// Sigma     Falls Sigma < 10 kommt das Schottermodell zur Anwendung
//           und die Eingabe wird als Schottertiefe interpretiert [m]
```



```
// Albedo   Faktor für die kurzwellige Rückstrahlung [ ]
// hr       Rauigkeitshöhe [m]
// a        Faktor für den Energiefluss in den Boden [ ]
// alpha    Verdunstungsfaktor [ ]
// rho_v    Faktor für die Vegetationsdichte [ ]
// hv       Vegetationshöhe [m]
// S         Flächengewichtung für Felsreflexionen []
// Kat      Kategorisierung für die Anzeige in sonARMS: Wald = W, Fels = F, Gewässer = G, poröse Böden = P,
//           versiegelte Böden = V, nichts anzeigen = -, bei allen Kategorien anzeigen = leer lassen.
////////////////////////////////////
// Hinweise: Die Anzahl Records dieser Tabelle ist beschränkt auf ein Maximum von 255.
//           Bildet zusammen mit einer Lin-Log-Meteoprofildatei eine 1:1 Tabelle.
//           (auch gleiche Reihenfolge!)
////////////////////////////////////
//           Default-Typ (falls keine Angabe): SemidenseMixedGround
////////////////////////////////////

Value DESCR_DE sigma Albedo hr a alpha rho_v hv S Kat TYPE_ID

DenseNaturalGround Fels / Geröll 20000 0.30 0.50 0.40 0.4 0.0 0 1.0 F 601
END
SealedArtificialGround Versiegelt, Siedlungsgebiet 20000 0.15 5.00 0.40 0.6 0.0 0 0.0 V 602
END
Water Gewässer 20000 0.08 0.05 0.40 1.4 0.0 0 0.0 G 603
END
SemidenseMixedGround Unbekannte Gebiete 2000 0.25 2.50 0.30 0.8 0.0 0 0.0 U 604
END
PorousNaturalGround Grasland / Acker 200 0.20 0.75 0.20 1.0 0.0 0 0.0 P 605
END
OpenVegetation offener Wald / Gebüsch 150 0.18 5.00 0.20 1.1 0.2 5 0.0 0 606
END
Forest Wald 100 0.16 10.00 0.20 1.2 1.0 20 0.0 W 607
END
VerySoftGround Schnee, Moor 50 0.40 0.50 0.20 1.0 0.0 0 0.0 S 608
END
Ballastbed_40cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 40 cm 0.4 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 620
END
Ballastbed_42cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 42 cm 0.42 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 621
END
Ballastbed_44cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 44 cm 0.44 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 622
END
Ballastbed_46cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 46 cm 0.46 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 623
END
Ballastbed_48cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 48 cm 0.48 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 624
END
Ballastbed_50cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 50 cm 0.5 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 625
END
Ballastbed_52cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 52 cm 0.52 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 626
END
Ballastbed_54cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 54 cm 0.54 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 627
END
Ballastbed_56cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 56 cm 0.56 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 628
END
Ballastbed_58cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 58 cm 0.58 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 629
END
Ballastbed_60cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 60 cm 0.6 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 630
END
Ballastbed_62cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 62 cm 0.62 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 631
END
Ballastbed_64cm Eisenbahntrasse, Schottertiefen 64 cm 0.64 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 632
END
```

```
Ballastbed_66cm Eisenbahntrasse, Schottertiefe 66 cm 0.66 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 633
END
Ballastbed_68cm Eisenbahntrasse, Schottertiefe 68 cm 0.68 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 634
END
Ballastbed_70cm Eisenbahntrasse, Schottertiefe 70 cm 0.7 0.15 0.75 0.10 0.3 0.0 0 0.0 P 635
END
END
```

Bemerkung:

Der Geländetyp 'Ballastbed' wurde zur Abbildung der speziellen Ausbreitungseigenschaften über dem Gleiskörper ergänzt.

A.4.3 Oberflächen - Schallabsorption

```
//AliasName: Schallabsorption
////-----
OBJECTID  ALIAS_DE  DESCR_DE  VALUE  OIDS  TYPE_ID
6  keine Schallabsorption  Differenz des einfallenden und reflektierten Schalldruckpegels <
   4 dB(A)  A1  501
END
7  geringe Schallabsorption  Differenz des einfallenden und reflektierten Schalldruckpegels
   4 - 7 dB(A)  A2  502
END
8  mittlere Schallabsorption  Differenz des einfallenden und reflektierten Schalldruckpegels
   8 - 11 dB(A)  A3  503
END
9  hohe Schallabsorption  Differenz des einfallenden und reflektierten Schalldruckpegels >
   11 dB(A)  A4  504
END
END
```

A.4.4 Oberflächen - Schalldämmung

```
//Schalldämmung
////-----
OBJECTID  ALIAS_DE  DESCR_DE  VALUE  OIDS  TYPE_ID
5  B1 (< 15 dB(A)) Differenz des einfallenden und hindurchtretenden Schalldruckpegels
   < 15 dB(A)  B1  501
END
6  B2 (15 - 24 dB(A)) Differenz des einfallenden und hindurchtretenden Schalldruckpegels
   15 - 24 dB(A)  B2  502
END
7  B3 (> 24 dB(A)) Differenz des einfallenden und hindurchtretenden Schalldruckpegels
   > 24 dB(A)  B3  503
END
END
```

A.4.5 Oberflächen - Oberflächeneigenschaften

```
//Oberflächenstruktur
////-----
OBJECTID  ALIAS_DE  DESCR_DE  VALUE  OIDS  TYPE_ID
5  glatte Oberfläche  Strukturtiefe in mm bis cm  C1  501
END
6  schwach strukturierte Oberfläche  Strukturtiefe in dm  C2  502
END
7  stark strukturierte Oberfläche  Strukturtiefe in m  C3  503
END
END
```

A.4.6 Oberflächen - Materialtypen

// MaterialTypes.txt Neue Ordnung, zusätzliche Felder für italienisch, 27-Jul-18

////-----

```
OBJECTID ALIAS_DE ALIAS_FR ALIAS_IT DESCR_DE DESCR_FR DESCR_IT DK_SCHAABS DK_SCHADAE DK_OBFLST VALUE TYPE_ID
6 voll reflektierend, hoch schalldämmend réfléchissant riflettente schallhart, glatte Oberfläche, hohe Schalldämmung
END
7 leicht absorbierend, hoch schalldämmend légèrement absorbant leggermente assorbente leicht absorbierend, glatte Oberfläche
END
8 mittel absorbierend, hoch schalldämmend moyennement absorbant mediamente assorbente mittel absorbierend, glatte Oberfläche
END
9 hoch absorbierend, hoch schalldämmend hautement absorbant altamente assorbente hoch absorbierend, glatte Oberfläche
END
10 mittel absorbierend, mittel schalldämmend moyennement absorbant et isolant mediamente assorbente et isolante
END
11 mittel absorbierend, schwach schalldämmend moyennement absorbant, faiblement isolant mediamente assorbente, p
END
END
```

A.4.7 Meteoprofile

Die Meteoprofile müssen am gleichen Ort gespeichert sein wie die Datei mit den Meteodateien. Diese enthält eine Liste sämtlicher Profilfunktionen mit den Datenfeldern *OBJECTID*, *FILENAME* und *TYPE_ID*. Die *TYPE_ID* stellt einen Bezug zur Spezifikation des Profils (Feld *DK_PROFIL*) der Meteolink-Datei her. Die Zeilen werden jeweils durch eine Zeile mit *END* getrennt. Zum Abschluss der Liste folgt eine weitere *END*-Zeile.

Meteoprofile können wie erwähnt auf zwei Arten definiert werden: in parametrisierter Form als LinLog-Profile und als Abfolge absoluter Werte. Die LinLog-Meteoprofile werden mit einem separaten Meteovorprozessor 'MVP25.exe' gemäss der in [19] vorgegebenen Methodik erzeugt. Diese Profile enthalten für jeden Bodentyp aus Abschnitt A.4.2 die Vertikalprofile für Windgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte. Entsprechend der Klassierung aus [19] mit 15 Meteoklassen, existieren 15 Datensätze. Nachfolgend dargestellt ist exemplarisch ein Auszug des Standardprofil Datensatzes für eine labil geschichtete Atmosphäre bei Windstille (Meteoklasse L0).

```
OBJECTID Filename Type_Id
1 SP14+_L0.txt 501
END
2 SP14+_L1.txt 502
END
3 SP14+_L2.txt 503
END
4 SP14+_L3.txt 504
END
5 SP14+_L4.txt 505
END
6 SP14+_N0.txt 506
END
7 SP14+_N1.txt 507
END
8 SP14+_N2.txt 508
END
9 SP14+_N3.txt 508
END
10 SP14+_N4.txt 510
END
11 SP14+_S0.txt 511
END
```

```

12 SP14+_S1.txt 512
END
13 SP14+_S2.txt 513
END
14 SP14+_S3.txt 514
END
15 SP14+_S4.txt 515
END
END

# Meteo-File Meteo-Vorprozessor MVP2
# -----
# Filename:          SP13_L0.txt
# Erstellungsdatum:  26.09.2020
# Ergänzt um zusätzliche Typen, 08.02.2023
# PARAMETERS:
# -----
# Key, Version, Filename
# Titel
# Kommentar
# a0_v, aLin_v, aLog_v, epsV
# a0_T, aLin_T, aLog_T, epsT
# a0_q, aLin_q, aLog_q, epsQ
# zm, T, rf, Wdir, vMes, vMin, vEff
# Q*, a, alpha, hr, N
# u, Th, q
# Qg, Qh, Qe
# L, Leff, h, L1, L2
# z0, d, s, p, s2, p2
# -----
MVP V2.5 SP13_L0.txt
DenseNaturalGround
Fels / Geröll
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.92692991E+02 1.70913743E+00 -1.70913743E+00 0.00000000E+00
7.09491083E-03 1.74464224E-04 -1.74464224E-04 0.00000000E+00
  9.9   14.9   63.0   0.0   0.0   0.7   0.7
 250   0.40   0.00   0.50   50
1.05175048E-01 -9.23858071E-01 -9.43049860E-05
100.000  119.624  30.376
 -0.879234 -1.000000 1000.000000 -1.0 20.0
  0.050    0.250    0.70    2.00    0.50    0.70
END
SealedArtificialGround
Versiegelt, Siedlungsgebiet
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.89667148E+02 2.22166577E-01 -9.28545929E-01 0.00000000E+00
6.89934311E-03 3.89642367E-05 -1.62851154E-04 0.00000000E+00
 12.1   14.9   63.0   0.0   0.0   0.7   0.7
 250   0.40   0.00   5.00   50
1.69012770E-01 -5.01916718E-01 -8.80276508E-05
100.000  104.437  45.563
 -4.179503 -4.179503 1000.000000 -1.0 20.0
  0.500    2.500    0.70    2.00    0.50    0.70
END
Water
Gewässer
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.94151846E+02 1.18575341E+00 -1.18575341E+00 0.00000000E+00
1.25278036E-02 1.16003806E-03 -1.16003806E-03 0.00000000E+00
  9.7   14.9   63.0   0.0   0.0   0.7   0.7
 250   0.40   0.00   0.05   50

```

```

5.53623997E-02 -6.40947788E-01 -6.27047602E-04
100.000 43.686 106.314
-0.351146 -1.000000 1000.000000 -1.0 20.0
0.005 0.025 0.70 2.00 0.50 0.70
END
SemidenseMixedGround
Unbekannte Gebiete
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.90228029E+02 4.12732525E-01 -1.08587682E+00 0.00000000E+00
7.19563132E-03 1.11165180E-04 -2.92469541E-04 0.00000000E+00
10.9 14.9 63.0 0.0 0.0 0.7 0.7
250 0.30 0.00 2.50 50
1.45014324E-01 -5.86960445E-01 -1.58091644E-04
75.000 104.790 70.210
-2.630946 -2.630946 1000.000000 -1.0 20.0
0.250 1.250 0.70 2.00 0.50 0.70
END
PorousNaturalGround
Grasland / Acker
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.91044297E+02 7.91675408E-01 -1.12002711E+00 0.00000000E+00
8.37252399E-03 4.72458189E-04 -6.68412804E-04 0.00000000E+00
10.0 14.9 63.0 0.0 0.0 0.7 0.7
250 0.20 0.00 0.75 50
1.08000578E-01 -6.05420059E-01 -3.61304219E-04
50.000 80.498 119.502
-1.414755 -1.414755 1000.000000 -1.0 20.0
0.075 0.375 0.70 2.00 0.50 0.70
END
OpenVegetation
offener Wald / Gebüsch
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.89367167E+02 1.44135521E-01 -6.84882318E-01 0.00000000E+00
7.54728188E-03 1.06341328E-04 -5.05297340E-04 0.00000000E+00
12.1 14.9 63.0 0.0 0.0 0.7 0.7
250 0.20 0.00 5.00 50
1.54769698E-01 -3.70206658E-01 -2.73133698E-04
50.000 70.539 129.461
-4.751655 -4.751655 1000.000000 -1.0 20.0
0.500 2.500 0.70 2.00 0.50 0.70
END
Forest
Wald
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.88958546E+02 6.51025155E-02 -5.20335979E-01 0.00000000E+00
7.40263105E-03 6.02295291E-05 -4.81388327E-04 0.00000000E+00
14.6 14.9 63.0 0.0 0.0 0.7 0.7
250 0.20 0.00 10.00 50
1.74953275E-01 -2.81262692E-01 -2.60209906E-04
50.000 60.581 139.419
-7.992563 -7.992563 1000.000000 -1.0 20.0
1.000 5.000 0.70 2.00 0.50 0.70
END
VerySoftGround
Schnee, Moor
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.92025828E+02 1.41275643E+00 -1.44582214E+00 0.00000000E+00
8.18482236E-03 5.63233858E-04 -5.76416401E-04 0.00000000E+00
9.9 14.9 63.0 0.0 0.0 0.7 0.7
250 0.20 0.00 0.50 50
1.04364613E-01 -7.81525479E-01 -3.11576433E-04

```

```

50.000 100.415 99.585
-1.023405 -1.023405 1000.000000 -1.0 20.0
0.050 0.250 0.70 2.00 0.50 0.70
END
Ballastbed_40cm
Eisenbahntrasse, Schottertiefen 40 cm
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.93114418E+02 2.25471889E+00 -2.25471889E+00 0.00000000E+00
6.97713180E-03 1.58129165E-04 -1.58129165E-04 0.00000000E+00
10.0 14.9 63.0 0.0 0.0 0.7 0.7
250 0.10 0.00 0.75 50
1.27679687E-01 -1.21876697E+00 -8.54752241E-05
25.000 191.578 33.422
-0.982220 -1.000000 1000.000000 -1.0 20.0
0.075 0.375 0.70 2.00 0.50 0.70
END
Ballastbed_42cm
Eisenbahntrasse, Schottertiefen 42 cm
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
2.93114418E+02 2.25471889E+00 -2.25471889E+00 0.00000000E+00
6.97713180E-03 1.58129165E-04 -1.58129165E-04 0.00000000E+00
10.0 14.9 63.0 0.0 0.0 0.7 0.7
250 0.10 0.00 0.75 50
1.27679687E-01 -1.21876697E+00 -8.54752241E-05
25.000 191.578 33.422
-0.982220 -1.000000 1000.000000 -1.0 20.0
0.075 0.375 0.70 2.00 0.50 0.70
END
END

```

Der nachfolgende Auszug zeigt ein Absolutprofil. Anforderungen an die Definition von Absolutprofilen sind:

- Absolutprofile müssen folgende Felder aufweisen: z, v, T, rF und p, mit der Höhe über Terrain in m, der Windgeschwindigkeit in m/s, der Temperatur in Kelvin, der relativen Luftfeuchtigkeit in% und dem Luftdruck in Pascal.
- Alle Daten müssen nach aufsteigender Höhe z sortiert sein. Für die erste Zeile gilt z = 0.
- Es werden zwei Höhenstufen unterschieden. Pro Höhenstufe muss die Höhenschrittweite konstant sein.
- Der bodennahe Bereich, welcher für das Raytracing massgeblich ist, wird durch den Parameter *LinLogProfilesHeight* mit 300 m als empfohlenem Setting begrenzt. Üblich und verlässlich ist in diesem Bereich eine Schrittweite von 0.1 m. Falls Absolut- und LinLog-Profile gemeinsam benutzt werden, muss diese Schrittweite mit dem Setting für LinLog-Profile, dem Parameter *LinLogProfilesDelta*, übereinstimmen.
- Im zweiten Bereich in welchem meteorologische Einflüsse auf die Luftdämpfung im Vordergrund stehen, kann die Atmosphäre deutlich vereinfacht dargestellt werden. Die Profile sollten bis zu einer Höhe fortgesetzt werden, welche dem Parameter *AatmMaxHeight* entspricht, bei einer Schrittweite von *AatmDelta* von typischerweise 100 m.

```

//Absolutes Meteoprofil
//=====
//
//Titel: Cosmo-2-Profil, DK-Nr: 114010100, Zeit: UTC
//Kommentar: Erstellt mit Aufbereitung_COSMO_fuer_sonX_24h.m
//dz: 0.1m bis 300m, dann 100m
//WindDir (10m): 169.9
//

```

```
//Profile: Absolutwerte für KLO
z v T rF p
0.00 0.00 272.89 83.42 96652.45
0.10 0.02 272.89 83.41 96651.29
0.20 0.04 272.89 83.40 96650.13
0.30 0.07 272.89 83.39 96648.97
0.40 0.09 272.89 83.39 96647.80
0.50 0.11 272.89 83.38 96646.64
0.60 0.13 272.89 83.37 96645.48
0.70 0.15 272.89 83.37 96644.32
0.80 0.18 272.89 83.36 96643.15
0.90 0.20 272.89 83.35 96641.99
1.00 0.22 272.89 83.35 96640.83
1.10 0.24 272.89 83.34 96639.67
1.20 0.26 272.89 83.33 96638.50
1.30 0.29 272.89 83.32 96637.34
1.40 0.31 272.89 83.32 96636.18
1.50 0.33 272.89 83.31 96635.01
1.60 0.35 272.89 83.30 96633.85
1.70 0.37 272.89 83.30 96632.68
1.80 0.40 272.89 83.29 96631.52
1.90 0.42 272.89 83.28 96630.36
2.00 0.44 272.89 83.27 96629.19
2.10 0.46 272.89 83.27 96628.03
2.20 0.49 272.89 83.26 96626.86
2.30 0.51 272.89 83.25 96625.70
2.40 0.53 272.89 83.25 96624.53
2.50 0.55 272.89 83.24 96623.37
...
299.70 12.12 275.48 57.08 93115.41
299.80 12.12 275.48 57.08 93114.24
299.90 12.12 275.48 57.07 93113.07
300.00 12.13 275.48 57.06 93111.90
400.00 13.82 276.91 50.42 91970.16
500.00 13.82 277.40 47.34 90843.11
600.00 12.07 277.14 45.93 89735.46
700.00 10.31 276.84 42.53 88634.30
800.00 9.25 276.68 37.59 87548.53
900.00 8.51 276.31 36.48 86476.46
1000.00 7.71 275.69 36.27 85414.39
1100.00 6.90 275.02 35.50 84361.43
1200.00 6.22 274.39 34.03 83319.34
1300.00 5.46 273.73 35.34 82288.71
1400.00 5.10 273.25 39.60 81270.10
1500.00 5.03 272.76 45.96 80263.35
...
9800.00 20.82 212.72 51.78 25025.88
9900.00 20.98 212.23 51.61 24628.10
10000.00 21.10 211.75 50.91 24234.61
end
```

Verarbeitung von LinLog-Profilen

Vor der Ausbreitungsrechnung werden die LinLog-Profile zu Absolutprofilen umgerechnet. Über die Parameter *LinLogProfilesHeight* und *LinLogProfilesDelta* wird die Höhe und die Schrittweite der Absolutprofile definiert. Die resultierenden Profile können durch Setzen des Schalters *WriteAbsMeteoProfiles* ausgegeben werden, entweder vor oder nach der Normierung auf eine absolute Temperatur und Feuchte. Falls sich Quellen oder Empfänger höher als *LinLogProfilesHeight* befinden, werden für das Raytracing die Gradienten der letzten Stufe

weiter verwendet. Für die Berechnung der Luftdämpfung werden die Profile extrapoliert. Die Temperatur nimmt mit der Höhe ab, der Wassergehalt bleibt konstant, die relative Feuchte nimmt somit zu. Für relative Luftfeuchtigkeiten kleiner 100% wird ein trockenadiabatischer Temperaturgradient von 9.8 °C/km und im Falle von gesättigter Luft (= 100%) ein feuchtadiabatischer Temperaturgradient von 6.5 °C/km verwendet.

Hinweis:

Der Parameter LinLogProfilesHeight ist Speicherplatz-sensitiv, da für alle Untergrundtypen und Meteosituationen Absolutprofile erzeugt werden. Ein Setting > 300 m wird deshalb nicht empfohlen.

A.5 Resultate der Ausbreitungsrechnung - Schnittstelle zu Emissionsmodellen

Das Ausbreitungsmodell übergibt als Resultat für jede Quellen-Empfänger-Kombination 6 Dämpfungsspektren, typischerweise bestehend aus 23 Terzen von 50 Hz bis 10 kHz (der Frequenzbereich kann über die Steuerungsdatei 'sonXFrequencyTable.txt' eingestellt werden):

- 1 Dämpfungs-Spektrum der Basis-Ausbreitungsrechnung
- 3 Meteokorrekturen, unterteilt für Tag, Abend und Nachtzeit
- 1 Dämpfungs-Spektrum für Reflexionen an Objekten wie Gebäuden und Schallschirmen
- 1 Dämpfungs-Spektrum für diffuse Reflexionen an Fels und Wald

Die Gesamt-Ausbreitungsdämpfung A_{total} , allenfalls differenziert nach Tageszeit, welche zur Berechnung der Immissionspegel aus den Schalleistungen benötigt wird, wird gemäss Gleichung A.1 berechnet.

$$A_{\text{total}} = -10 \cdot \log \left[10^{-0.1 \cdot (A_{\text{Basic}} + A_{\text{Meteo}})} + 10^{-0.1 \cdot A_{\text{Reflect}}} + 10^{-0.1 \cdot A_{\text{ForestCliff}}} \right] \quad (\text{A.1})$$

mit

A_{Basic}	Ausbreitungsdämpfung des Moduls <i>Basis</i> [dB]
A_{Meteo}	Meteokorrektur gemäss dem Modul <i>Meteo</i> . Im Gegensatz zu den übrigen Dämpfungsspektren kann A_{Meteo} auch negative Werte aufweisen, dies bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen. [dB]
A_{Reflect}	Ausbreitungsdämpfung für Reflexionen an Gebäuden und Schallschirmen. [dB]
$A_{\text{ForestCliff}}$	Ausbreitungsdämpfung für diffuse Reflexionen an Wald und Fels. [dB]

Wie bereits erwähnt, müssen nicht alle Teildämpfungen gemäss Gleichung A.1 berechnet werden, um Immissionspegel auszuweisen. Lediglich die Basis-Dämpfung muss zwingend vorhanden sein. Wird der Meteoeinfluss nicht ermittelt, so wird A_{Meteo} auf 0 gesetzt. Die Terme der Reflexionsmodelle können in der Summation weggelassen werden falls die entsprechenden Dämpfungen nicht ermittelt wurden.

A.5.1 Formate von Resultatdateien

Ist in der Settings-Datei der Schalter 'OutPutsSummary' aktiviert, so wird eine Datei mit der Endung '*.txt' gemäss dem nachfolgenden Beispiel ausgeschrieben. (Es werden nur die Terzpegel von 25 bis 40 Hz dargestellt.) Bei 'EmiWinkel' und 'LZ' wird der vertikale Emissionswinkel und die Laufzeit des Schalles in Sekunden angegeben.


```

OBJECTID ID_BER ID_PUNKT ID_QUELLE ID_QUELLENGRUPPE Quellentyp EmiWinkel LZ D0025 D0032 D0040
888_10_E1 E1 888_10 888 Strasse 0.56 0.255 44.01 43.93 43.87
888_12_E1 E1 888_12 888 Strasse 0.76 0.207 42.24 42.15 42.1
888_33_E1 E1 888_33 888 Strasse 6.26 0.028 26.19 26.11 26.03
888_34_E1 E1 888_34 888 Strasse 7.4 0.027 25.6 25.5 25.41

```

Bei Aktivierung des Schalter 'OutPutsDetail' wird eine Datei mit der Endung '*.res' gemäss dem nachfolgenden Beispiel, ebenfalls als ASCII-Datei mit TAB als Spaltendelimiter, ausgeschrieben. (Es werden nur die Terzpegel von 25 bis 160 Hz dargestellt.) Diese Datei enthält eine Aufstellung der Teildämpfungen und ihrer Verrechnung zur Gesamtdämpfung.

```

-----
sonX - Berechnungsergebnisse
-----
Gestartet: 12.06.2023 10:51:34
Version Rechenkern: sonX.exe V3.4.K vom 06-Jun-2023
Basiert auf sonRail: V6.5.M vom 06.06.2023
Programmtyp: Konsolenprogramm
Prozessor mit: MMX, SSE, SSE2, SSE3
Compiler: Delphi 2009
Gleitkommazahlen: Doppelte Präzision
Projektdatei: G:\509-Projekte\Testumgebung\StrassePfaeffikon_FBnah_red.sonx
Resultatdatei: .\Out\StrassePfaeffikon_FBnah_redBasis.res
Kommandozeilenparameter: StrassePfaeffikon_FBnah_red.sonx
Arbeitsmodus: BASIC
Empfänger: 1
Quellen: 4
Quellen x Empfänger: 4
Anzahl Meteosituationen: 0
LineOfSightMarginAngle: 200.0
OutPutReduction: false
-----

Quelle-Empfänger: 888_10_E1 ID_QUELLENGRUPPE/ID_FLBAHN 888
25 Hz 32 Hz 40 Hz 50 Hz 63 Hz 80 Hz 100 Hz 125 Hz 160 Hz
Adiv 49.53 49.53 49.53 49.53 49.53 49.53 49.53 49.53 49.53
Aatm 0 0 0 0.01 0.01 0.01 0.02 0.03 0.05
AgrBa -5.52 -5.6 -5.66 -5.63 -5.45 -5.18 -4.85 -4.46 -4.01
Afol 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Ages 44.01 43.93 43.87 43.91 44.09 44.36 44.7 45.1 45.57
Aatm meteo
AgrBa meteo
Afol meteo
Ages meteo
Ages meteo - Ages
Alateral 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Abottom 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Ages basic 44.01 43.93 43.87 43.91 44.09 44.36 44.7 45.1 45.57
Ameteo final
Vert. Emissionsw. 0.56 ° Quellenhöhe 5 cm -> SonROAD18 -> AgrBa wurde um 3 dB reduziert
Laufzeit basic 0.255

```

A.5.2 Bestimmung der integralen Ausbreitungsdämpfung einer Linienquelle

Die Ausbreitungsrechnung in *sonX* ist grundsätzlich nur für Punktquellen, d.h. für eine Schallausbreitung zwischen einem Quellenpunkt und einem Empfängerpunkt, definiert. Die Ausbreitungsdämpfung pro Linienquelle ergibt sich aus der Summation der Ausbreitungsdämpfungen

aller Punktquellen. Gleichung A.2 zeigt die Summation über m Punktquellen für die Teildämpfungen $A_{\text{Basic},m}$ des Basis-Moduls. Der Immissionspegel berechnet sich als Subtraktion dieser integralen Dämpfung vom längenbezogenen Schallleistungspegel (in [W/m]). Mit dem Index L wird dabei zum Ausdruck gebracht, dass es sich um integrale Dämpfungen für ganze Linienquellen handelt. Um nicht zwingend äquidistante Diskretisierungen der Linienquelle verwenden zu müssen, wird jede Teildämpfung mit einer Länge l des Gleisabschnittes gewichtet, für welche die Punktquelle repräsentativ ist. Für die Dämpfungen der anderen Module erfolgt die Summation sinngemäss.

$$A_{\text{Basic},L} = -10 \cdot \log \left[\frac{1}{\sum l_i} \sum_{i=1}^I l_i \cdot 10^{-0.1 A_{\text{Basic},i}} \right] \quad (\text{A.2})$$

Die Diskretisierung der Linienquellen kann je nach Anwendung und Modul frei gewählt werden. Für die Module REFLECT und FOREST wird eine äquidistante Linienquellendiskretisierung empfohlen, mit Quellpunktabständen von 10 bzw. 25 m. Für die Module BASIC und METEO wird ein Ansatz gemäss Abbildung A.1 empfohlen, mit einer minimalen Diskretisierung in kurzen Abständen, einer maximalen Diskretisierung in grossen Abständen und einem Zwischenteil mit einem linearen Übergang. Als Steigung wird für beide Module 10% empfohlen, d.h. dass im Mittelteil die Distanz zur nächsten Punktquelle ein Zehntel der Distanz der aktuellen Punktquelle zum Empfänger beträgt. Als minimale und maximale Quellenabstände werden für BASIC 1 m bzw. 100 m und für METEO 10 m bzw. 100 m empfohlen.

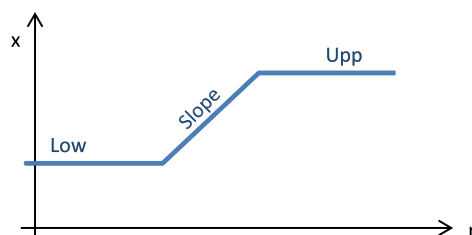


Abbildung A.1: Strategie zur effizienten Linienquellendiskretisierung.

A.6 Zur Implementation

Der sonX Rechenkern wurde mit der Programmiersprache Delphi, (CodeGearTM Delphi ©2009, Version 12.0.3420.21218) erstellt.

Der Code des sonX Rechenkerns (ohne sonArms) umfasst inklusive Kommentaren 5317189 Byte bzw. 5.1 MB, was ungefähr 1720 A4 Seiten zu 72 Zeilen oder 123'812 Zeilen entspricht. Der Gesamtumfang inklusive sonARMS und GUI beträgt 10590620 Byte bzw. 10.1 MB, was ungefähr 3425 A4 Seiten zu 72 Zeilen oder 246'605 Zeilen entspricht.

A.6.1 Klassen

Der Code ist in 112 Klassen strukturiert. Abbildung A.2 zeigt die wichtigsten im Überblick. Die Klassen wurden relativ stark mit Code befrachtet. Deswegen ist ihre Zahl im Vergleich mit andern objektorientierten Programmen nicht sehr gross. Das Klassendiagramm wurde für sonAir mit ein paar wichtigen Klassen aktualisiert. Der Grundcode ist in 'SonCommonSource'

enthalten, was historisch bedingt der *sonRAIL* Code ist. Klassen, die für sonAIR stehen, zeigen die Abweichungen/Modifikationen gegenüber dem Grundcode.

So zeigt beispielsweise *ConsoleSonAir.pas* diejenigen Daten und Routinen, die gegenüber dem ähnlich benannten Grundmodul *Console.pas* (d.h. gegenüber *sonRAIL*) abgeändert oder erweitert sind. Die abgeleitete Klasse *CConsoleSonAir* erzeugt beispielsweise eine zusätzliche zweite Topographie für das grosse grob gerasterte Gebiet, das bei *sonAIR* zusätzlich zum fein gerasterten ursprünglichen Gebiet von *sonRAIL* zur Verfügung steht. Routinen ändern oder erweitern das Verhalten der *sonRAIL* Routinen mit dem Schlüsselwort *override*". So liest die Methode *CConsoleSonAir.ReadProject* die *sonAIR* Projekte ein, die ziemlich anders aussehen als die *sonRAIL* Projekte, die durch *CConsole.ReadProject* eingelesen werden. Auf die Art wird durch Vererbung und überschreiben (eigentlich ersetzen) von Routinen das Verhalten des Programmes modifiziert, hier für *sonAIR*, dem neuen *sonX*, anstelle des alten *sonRAIL*.

Als zweites Beispiel ist die Klasse *CLineSourceSonAir* von der Klasse *CLineSource* abgeleitet und ändert das Linienquellenmodell von *sonRAIL* in das Punktquellenmodell von *sonAIR*. So gesehen ist der Name *CLineSourceSonAir* etwas irreführend, aber es soll mit diesem Namen gezeigt sein, dass die *sonAIR* Klasse ein Nachkomme der *sonRAIL* Klasse ist. Die *sonAIR* Klasse fügt Datenelemente für die seitliche Hinderniswirkung und für Öffnungen hinzu und vereinfacht die Linienquellen zu Punktquellen.

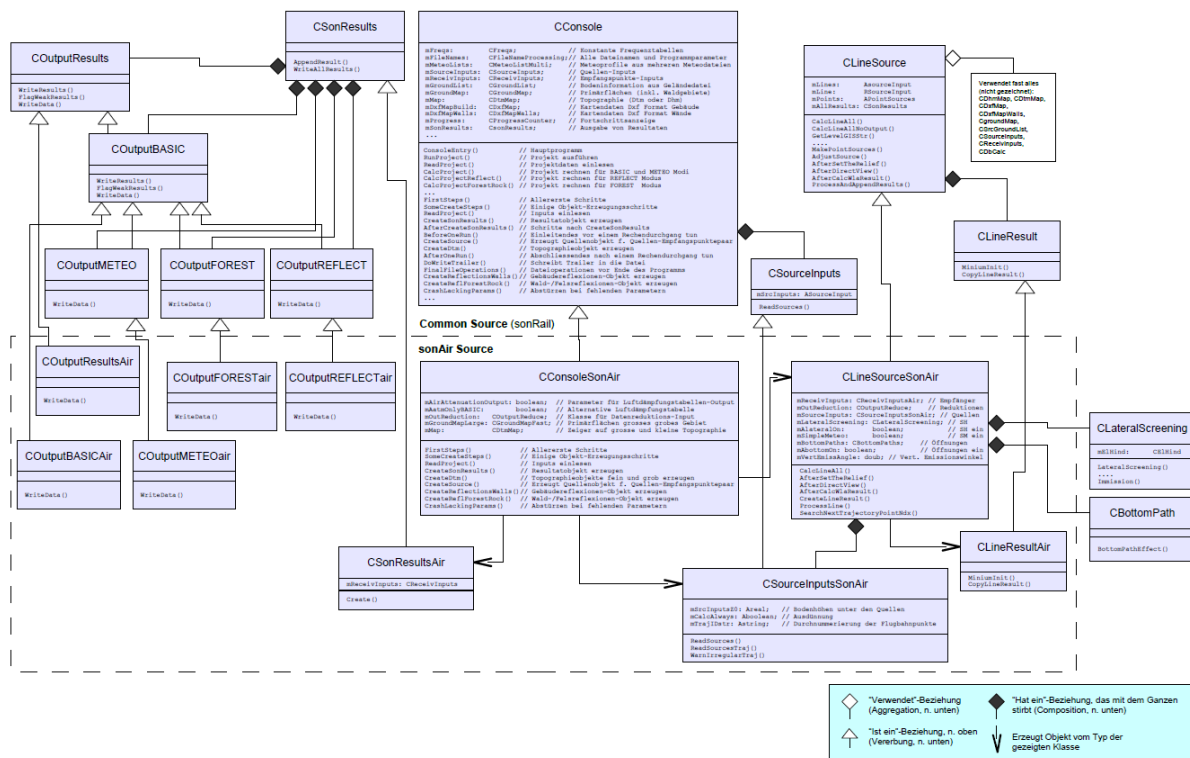


Abbildung A.2: Klassendiagramm des sonX Rechenkerns (ohne Details zur Strahlverfolgung).

A.6.2 Dateien

Der Code ist in 116 Dateien aufgeteilt, wobei 100 auf die *SonCommonSource* und 16 auf die *sonAIR* Erweiterungen entfallen. Die einzelnen Dateien sind in den Tabellen A.1 und A.2 zusammengestellt.

Acalc.pas	FileNameProcessing.pas	LineSourceTrain.pas	PlotRelief.pas
AgrBar.pas	FileValues.pas	LineSourceTrainBridge.pas	Points.pas
Airdamp.pas	FlagList.pas	LineSourceTrainCut.pas	procs.pas
aku1.pas	Foliage.pas	LineSourceTrainTunnel.pas	ProgressCounter.pas
aku2.pas	FreqCalc.pas	Log.pas	QuickConvexHull.pas
aku3.pas	Freqs.pas	LookupAbsorb.pas	ray_file.pas
aku4.pas	Globals.pas	Maekawa.pas	ray_imp.pas
aku5.pas	Ground.pas	MaekawaParams.pas	ray_search_fwd.pas
AkuFast.pas	GroundList.pas	MaekawaPierce.pas	ray_search_upw.pas
AkuFastTrig.pas	GroundMap.pas	MapRegion.pas	ray_tools.pas
AkuTrig.pas	GroundMapFast.pas	MemChecker.pas	Redefinitions.pas
AsmRoutines.pas	GroundSegmented.pas	MeteoFilenames.pas	ReflectionsForestRock.pas
BottomPaths.pas	GroundSegRelief.pas	MeteoLink.pas	ReflectionsWalls.pas
CompilerDefines.pas	InputsGIS.pas	MeteoList.pas	ShellFunctions.pas
Console.pas	InputsGISLookup.pas	MeteoListLinLog.pas	SonCalcs.pas
CutFast.pas	InputsReceiver.pas	MeteoListMulti.pas	SonRecords.pas
DbCalcP.pas	InputsSource.pas	OneDimMap.pas	SonResults.pas
DhmMap.pas	Interpolation.pas	OpMode.pas	SonResultsBin.pas
DtmMap.pas	KoordCheck.pas	OutputBMFR.pas	SourceGroundList.pas
DtmMapTwo.pas	KoordCheckTwo.pas	OutputResults.pas	StringLists.pas
DxfCloseObjects.pas	LanguageCommonParameter.pas	OutputResultsBin.pas	ThreadMachine.pas
DxfMap.pas	LateralScreening.pas	OutputResultsNdx.pas	TypeMapping.pas
DxfMapWalls.pas	LineCreate.pas	PathFinder.pas	VersionInfo.pas
Elcut.pas	LineSource.pas	PathFunc.pas	WlpGeneric.pas
FastWofz.pas	LineSourceFunc.pas	Pierce.pas	WriteLine.pas

Tabelle A.1: Liste der Dateien der *SonCommonSource*.

ConsoleSonAir.pas	InputsSourceSonAir.pas	OutputResultsAir.pas	SonCalcsAir.pas
DbCalcPair.pas	LineSourceSonAir.pas	SonAirMain.pas	SonRecordsAir.pas
FileNameProcessingSonAir.pas	OutputBMFRair.pas	SonAirReflectionsForestRock.pas	SonResultsAir.pas
InputsReceiverSonAir.pas	OutputReduce.pas	SonAirReflectionsWalls.pas	VersionInfoSonAir.pas

Tabelle A.2: Liste der Dateien von *sonAIR*.

A.6.3 Dokumentation des Codes

Der Code ist überall mit teils ausführlichen Kommentaren versehen. Geänderte Stellen im Code werden zudem mit einem Änderungsdatum versehen, was die Rückverfolgbarkeit von Änderungen sehr erleichtert.

Zusätzlich wurde durch Philipp Merz ein Arbeitsjournal (Word 2000 Dokument) geführt, welches sowohl Änderungen am Code als auch zusätzliche Diskussionen und Abklärungen in Einzelpunkten chronologisch aufführt und aktuell 2040 Punkte bzw. 918 Seiten umfasst.

A.6.4 Versionierung

Es werden normalerweise nur grössere Versionssprünge via das BAFU veröffentlicht bzw. an armasuisse abgegeben. Für die Entwicklung jedoch werden auch kleine Ausbauschritte mit einer Versionsnummer festgehalten. Sämtliche Versionen stehen zur Verfügung. Wird ein neuer Fehler gefunden, so können die Entwickler alle Versionsschritte rückwärts verfolgen und so mittels Textvergleich leichter die Stelle finden, wo der Fehler eingeführt worden ist.