

**SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 366**

Lärm

SonRoad

**Berechnungsmodell
für Strassenlärm**



**Bundesamt für
Umwelt, Wald und
Landschaft
BUWAL**

**SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 366**

Lärm

SonRoad

**Berechnungsmodell
für Strassenlärm**

**Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL
Bern, 2004**

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
*Das BUWAL ist ein Amt des Eidg. Departements für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)*

Auftragnehmer

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA),
Abteilung Akustik, Dübendorf

Autor

Dr. Kurt Heutschi

Begleitung BUWAL

Jean-Daniel Liengme, Abt. Lärmbekämpfung

Zitierung

Heutschi K, 2004: SonRoad – Berechnungsmodell für
Strassenlärm. Schriftenreihe Umwelt Nr. 366. Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 74 S.

Titelbild

© BUWAL/Docuphot

Download PDF

<http://www.buwalshop.ch>

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

Code: SRU-366-D

© BUWAL 2004

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Symbole	5
Abstracts	7
Vorwort	9
Zusammenfassung	11
1 Auftrag und Projektteam	13
2 Aktueller Stand der Technik	14
2.1 Französisches Modell XP S 31-133	14
2.1.1 Quellenmodell	14
2.1.2 Ausbreitungsmodell	14
2.2 Amerikanisches Modell TNM	16
2.2.1 Einleitung	16
2.2.2 Quellenmodell	16
2.2.3 Ausbreitungsmodell	17
2.3 Skandinavisches Modell Nord2000	19
2.3.1 Einleitung	19
2.3.2 Ausbreitungsmodell	19
2.4 Bewertung der Algorithmen und Folgerungen für SonRoad	21
2.5 Zusammenstellung der Merkmale der diskutierten Berechnungsmodelle	21
3 Berechnungsmodell SonRoad	23
3.1 Grundlegende Modellannahmen für SonRoad	23
3.2 Allgemeiner Ablauf einer Strassenlärmimmissionsberechnung	23
3.3 Quellenmodell	23
3.3.1 Quellenstärke	23
3.3.2 Formulierung als Quellenleistung	28
3.3.3 Umrechnung vom maximalen Vorbeifahrtpegel auf den Mittelungspegel L_{eq}	29
3.3.4 Quellenhöhe	30
3.3.5 Tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit	30
3.3.6 Diskretisierung der Strasse	31
3.4 Ausbreitungsmodell	31
3.4.1 Einleitung	31
3.4.2 Übersicht	31
3.4.3 Geometrische Verdünnung	32
3.4.4 Luftdämpfung	32
3.4.5 Bodeneffekt, Hinderniswirkung und Reflexionen	33
3.5 Zusätzliche Dämpfungseffekte	40
3.6 Berechnung des A-bewerteten Immissionspegels	40
3.7 Bestimmung des Beurteilungspegels	41
3.8 Anwendungshinweise	42
4 Vergleich von SonRoad mit StL-86	45

5	Ausblick - zukünftige Ergänzungen und Erweiterungen des Modells	47
Anhänge		
A	Konformitätserklärung zur Implementierung von SonRoad	48
B	Mit SonRoad berechnete Benchmark-Situationen	50
	B.1 Punkt-Punkt Ausbreitung	50
	B.2 Lange gerade Strasse	64
C	Mögliche Strategie zum Auffinden der relevanten Schallpfade	65
	C.1 Allgemeines	65
	C.2 Suche des Direktschallpfades	66
	C.3 Konstruktion der möglichen Reflexionspfade	66
	C.4 Erstes Ausscheiden der ungültigen Reflexionspfade	67
	C.5 Allfällige Begradigung der Reflexionspfade und Bestimmung der Reflexionspunkte . . .	67
	C.6 Zweites Ausscheiden der ungültigen Reflexionspfade	67
D	Komplexe Darstellung von sinusförmigen Grössen	69
E	Numerische Auswertung von wofz(z) (Errorfunktion)	70
F	Abschätzung des Kohärenzverlustparameters	72
G	A-Filter Dämpfungen in Terzbändern	73
H	Fresnelzonenkonzept	74

Verwendete Symbole

α_f	atmosphärischer Absorptionskoeffizient im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB/km]
A_f	Ausbreitungsdämpfung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{div,f}$	Geometrische Verdünnung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{atm,f}$	Luftdämpfung im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{gr/bar/refl,f}$	Bodeneffekt und Hinderniswirkung inkl. Reflexionen im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_{fol,f}$	zusätzliche Dämpfung durch dichten Bewuchs im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$A_j(i, k)$	Ausbreitungsdämpfung in der Terz mit Nummer j von der k -ten Punktquelle auf dem i -ten Linienquellenabschnitt zum Empfänger [dB]
c	Schallgeschwindigkeit = 340 m/s
d	Abstand [m]
d_0	Referenzabstand = 1 m
d_{ss}	Distanz Quelle - erste Hinderniskante [m]
d_{sr}	Distanz zweite Hinderniskante - Empfänger [m]
$D_z(f)$	Hinderniswirkung in Funktion der Frequenz f [dB]
Δ_{BG}	Belagskorrektur auf dem Gesamtgeräusch [dB(A)]
Δ_{BR}	Belagskorrektur auf dem Rollgeräusch [dB(A)]
Δ_S	Steigungskorrektur [dB(A)]
e	Distanz der beiden Hinderniskanten im Falle von Doppelbeugung [m]
f	Frequenz [Hz]
g	Steigung der Strasse [%]
γ, γ_0	empirische Parameter zur Berücksichtigung des Kohärenzverlustes
h_s	Quellenhöhe über Boden [m]
h_r	Empfängerhöhe über Boden [m]
k	Wellenzahl = $\frac{2\pi}{\lambda}$ [1/m]
$K1$	Pegelkorrektur zur Berücksichtigung der Verkehrsstärke
K_{met}	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Reduktion der Hinderniswirkung
λ	Wellenlänge [m]
l_F	Länge der $\lambda/4$ -Fresnelzone [m]
l_s	Länge des Segmentsabschnitts, der innerhalb der $\lambda/4$ -Fresnelzone liegt [m]
$L_{Max,7.5m,A}$	A-bewerteter maximaler Vorbeifahrtpegel in 7.5 m Abstand [dB(A)]
$L_{W,A}$	A-bewerteter Schallleistungspegel [dB(A)]
$L_{7.5m,A, Freifeld}$	A-bewerteter Schalldruckpegel in 7.5 m Abstand unter Freifeldbedingungen [dB(A)]
$L_{eq, frei, A}$	A-bewerteter Immissionspegel am freiliegenden Empfangspunkt [dB(A)]
$L_{eq, m}$	A-bewerteter Immissionspegel im offenen Fenster [dB(A)]
L_r	Beurteilungspegel [dB]
$L_{W, f}$	Schallleistungspegel im Terzband mit Mittenfrequenz f [dB]
$L_{W, A, PW}(i)$	A-bewerteter Schallleistungspegel eines verkehrenden Personenwagens auf dem i -ten Linienquellenabschnitt gemäss Gl. 3.3 [dB(A)]
$L_{W, A, LKW}(i)$	A-bewerteter Schallleistungspegel eines verkehrenden Lastwagens auf dem i -ten Linienquellenabschnitt gemäss Gl. 3.4 [dB(A)]
$M_{PW}(i)$	Anzahl Personenwagen pro Stunde auf dem i -ten Linienquellenabschnitt
$M_{LKW}(i)$	Anzahl Lastwagen pro Stunde auf dem i -ten Linienquellenabschnitt
N	stündlicher Motorfahrzeugverkehr tags bzw. nachts
p	Schalldruckeffektivwert in komplexer Darstellung [Pa]
$p_{A, Q}$	A-bewerteter maximaler Schalldruckeffektivwert bei Vorbeifahrt in 1 m Abstand [Pa]
p_0	Bezugsschalldruckeffektivwert = 2E-5 Pa
$\underline{p}_{dir, ref}(f)$	Referenzschalldruck am Empfänger wenn nur die geometrische Verdünnung berücksichtigt wird [Pa]

$\underline{p}_{\text{dir}}(f)$	Schalldruck des Direktschalls am Empfänger wenn geometrische Verdünnung und allfällige Hinderniswirkung berücksichtigt wird [Pa]
$\underline{p}_{\text{gr}}(f)$	Schalldruck einer Bodenreflexion am Empfänger [Pa]
$\underline{p}_{\text{refl}}(f)$	Schalldruck einer Nicht-Boden-Reflexion am Empfänger [Pa]
$\Phi(f)$	Fresnelzonenfaktor
$Q(f)$	Kugelwellenreflexionskoeffizient
r	Abstand [m]
R_1	Abstand Quelle - Empfänger [m]
R_2	Abstand Quelle - Reflexionspunkt - Empfänger [m]
$r_p(f)$	Ebene Welle Reflexionskoeffizient
$\Delta R(i)$	Reflexionsverlust für die Spiegelung am i -ten Segment [dB]
σ	Strömungswiderstand [Rayl]
$\Delta s(i, k)$	durch die k -te Punktquelle auf dem i -ten Linienquellenabschnitt repräsentierter Längenabschnitt [m]
t	Zeit [s]
T_j	Strassenverkehrslärm-Pegeldifferenz A-Pegel minus A-bewerteter Terzbandpegel für die Terz mit Nummer j gemäss Tabelle 3.5 [dB]
v'	Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
v	Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]
$v_{\text{PW}}(i)$	Geschwindigkeit der Personenwagen auf dem i -ten Linienquellenabschnitt [km/h]
$v_{\text{LKW}}(i)$	Geschwindigkeit der Lastwagen auf dem i -ten Linienquellenabschnitt [km/h]
z	Pfadlängendifferenz [m]
$Z(f)$	auf ρc normierte Impedanz einer Begrenzungsfläche mit $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$

Abstracts

The new SonRoad model permits calculation of the exposure to road traffic noise at small and medium distances from the source, while ignoring the influence of the weather. The source specification is significantly more detailed than that of the StL86+ model used till now in Switzerland. In the new model, the motor and wheel noise components are calculated separately for cars and lorries as a function of speed, longitudinal road inclination, surface characteristics and traffic density. The SonRoad propagation model is based on the ISO 9613-2 standard, but adopts an entirely different approach to the calculation of the ground effect in the application of wave theory.

For direct propagation (i.e. without interference from obstacles), comparison between the old and the new models shows a general reduction in the values for soft ground (e.g. grass) and an increase in those for hard ground (e.g. asphalt) using SonRoad. In the presence of intervening obstacles, the values calculated by SonRoad are higher than for StL86+. The differences between the two models also depend on the particular circumstances and can amount to several dB.

Keywords: road noise, road noise model, source model, noise propagation model

Das neue Berechnungsmodell SonRoad bildet die Grundlage zur Berechnung von Strassenverkehrslärmimmissionen für kleine bis mittlere Abstände ohne Berücksichtigung von Wettereinflüssen. Die Quellenbeschreibung wurde gegenüber dem bisher in der Schweiz verwendeten Modell StL86+ wesentlich verfeinert: Die Antriebs- und Rollgeräuschkomponenten werden getrennt für Personen- und Lastwagen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, der Strassenlängsneigung, des Belagstyps und der Verkehrsstärke beschrieben. Das Ausbreitungsmodell orientiert sich weitgehend an der Norm ISO 9613-2, beschreitet aber bei der Behandlung des Bodeneffekts unter Einbezug von wellentheoretischen Lösungen einen völlig anderen Weg.

Der Vergleich des neuen Modells SonRoad mit dem Modell StL86+ zeigt tendenziell bei einer Schallausbreitung ohne Hindernis eine Verringerung der Werte bei weichem Boden (Rasen) und eine Erhöhung bei hartem Boden (Asphalt). Bei einer Unterbrechung der Sichtlinie durch Hindernisse liegen die mit SonRoad berechneten Pegel höher als jene von StL86+. Situationsabhängig zeigen sich zwischen dem alten und dem neuen Modell Unterschiede von mehreren dB.

Stichwörter: Strassenlärm, Strassenlärberechnungsmodell, Quellenmodell, Schallausbreitungsmodell

Le nouveau modèle SonRoad permet de calculer les immissions de bruit du trafic routier sur de petites et de moyennes distances, sans tenir compte des influences météorologiques. La description de la source est nettement plus détaillée qu'avec le modèle StL86+, utilisé jusqu'à présent en Suisse: le bruit de la propulsion et le bruit de roulement sont décrits séparément pour les voitures de tourisme et les poids lourds, en fonction de la vitesse, de la pente de la route, du type de revêtement et du débit. Le modèle de propagation se réfère à la norme ISO 9613-2, même s'il traite l'effet de sol sous un tout autre angle, celui de la théorie ondulatoire.

En comparant les deux méthodes, il apparaît que, dans le cas de figure d'une propagation sans obstacle, le modèle SonRoad conduit généralement à des valeurs plus faibles que le modèle StL86+ avec un sol mou (pelouse), alors que les niveaux sont plus élevés en présence d'un sol dur (asphalte). Si des obstacles interrompent la ligne de visée, les niveaux calculés avec SonRoad sont plus élevés que ceux qui découlent de StL86+. Dans certaines situations, les différences entre les deux modèles sont de l'ordre de plusieurs dB.

Mots-clés: bruit du trafic routier, modèle de calcul du bruit du trafic routier, modèle de source, modèle de propagation

Il nuovo modello di calcolo SonRoad offre una base per rilevare da breve e media distanza le immissioni foniche causate dal traffico stradale, escludendo l'influenza esercitata dalle condizioni meteorologiche. Rispetto al modello StL86+ utilizzato sinora in Svizzera, la descrizione delle fonti è stata notevolmente migliorata: le componenti propulsione e rumore di rotolamento delle automobili e degli autocarri sono state suddivise e descritte nelle categorie velocità, pendenza delle strade, tipo di manto stradale e intensità del traffico. Il modello di propagazione poggia prevalentemente sulla norma ISO 9613-2, ma per trattare l'effetto suolo percorre un'altra strada ricorrendo a soluzioni basate su teorie delle onde. Se le onde sonore si propagano senza incontrare ostacoli, il confronto fra il nuovo modello SonRoad e il modello StL86+ mostra tendenzialmente che i valori del rumore si riducono quando la superficie del suolo è morbida (prato) e aumentano quando tale superficie è dura (asfalto). Se ci sono ostacoli che interrompono la linea di visuale, i livelli di rumore calcolati con SonRoad sono invece superiori a quelli stabiliti con il modello StL86+. A seconda della situazione, tra i due modelli emergono differenze di diversi dB.

Parole chiave: rumore stradale, modello di rumore stradale, modello di fonte, modello di propagazione sonora

Vorwort

Für viele Anwendungen, insbesondere für den Vollzug der Lärmschutzgesetzgebung, muss die Lärmbelastung für reale Situationen berechnet werden können. Die Basis dazu bildet ein Berechnungsmodell, das in der heutigen Zeit auch in die entsprechenden Softwareprodukte eingebunden werden kann.

Für die Berechnung der Lärmimmissionen des Strassenverkehrs hat das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) gemäss seinem gesetzlichen Auftrag bisher zwei Berechnungsmodelle publiziert, nämlich das Computermodell StL86 (Schriftenreihe Umwelt Nr. 60, 1987) und das Strassenlärmmodell für überbaute Gebiete (Schriftenreihe Umwelt Nr. 15, 1991 (3. Auflage))¹. Das Strassenlärmrechnungsmodell wurde 1995 auf den damaligen Stand des Wissens aktualisiert (Mitteilung zur LSV Nr. 6) und wird heute in der Schweiz als Berechnungsalgorithmus StL86+ im Bereich Strassenlärm allgemein genutzt.

Das Berechnungsverfahren für das StL86+ stammt ursprünglich aus den frühen 80er-Jahren und ist in vielerlei Hinsicht nicht mehr aktuell. Sowohl das stetig vergrösserte Wissen um die physikalischen Vorgänge als auch die heutzutage zur Verfügung stehende Rechenleistung erlauben es, die Berechnungsansätze zu optimieren. Das vorliegende neue Berechnungsmodell SonRoad bringt die Strassenlärmrechnung in der Schweiz wieder auf den aktuellen Stand des Wissens. Gleichzeitig findet mit der Verwendung des neuen Berechnungsalgorithmus ein Angleichen an die derzeitige Entwicklung der Modellberechnungen im internationalen Umfeld statt.

SonRoad soll als verbesserte Grundlage zur Berechnung der Lärmimmissionen des Strassenverkehrs genutzt werden und so einen Beitrag zur Lärmbekämpfung in der Schweiz leisten.

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Urs Jörg
Chef der Abteilung Lärmbekämpfung

¹Beide Dokumente sind vergriffen.

Zusammenfassung

Bislang basierten Strassenlärberechnungen in der Schweiz auf dem Modell StL-86 oder auf vergleichbaren Algorithmen wie RLS-90. Die Modelle haben ihren Ursprung in den frühen 1980er-Jahren und sind in vielerlei Hinsicht nicht mehr aktuell. So hat sich in der Zwischenzeit zum einen die Quellstärke, d.h. die Emission der Fahrzeuge verändert und zum anderen stehen hinsichtlich der Schallausbreitung heute wesentlich verfeinerte Ansätze zur Verfügung. Um die Strassenlärberechnung in der Schweiz wieder dem aktuellen Stand des Wissens anzugleichen, beauftragte das BUWAL die EMPA, Abteilung Akustik, mit der Aktualisierung der Vorschrift für Strassenlärberechnungen - in der Folge SonRoad genannt.

Zur Beschreibung der Emissionen wurde ein neues Quellenmodell entwickelt, das für frei fliessenden Verkehr, aufgeschlüsselt nach Personen- und Lastwagen, das Antriebs- und das Rollgeräusch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ausweist. Mit dieser gegenüber dem alten Modell wesentlich verfeinerten Quellenbeschreibung ist es möglich, äussere Einflussparameter wie spezielle Strassenbeläge oder Steigungen präziser und eleganter zu modellieren. Das Quellenmodell basiert auf der effektiv gefahrenen Geschwindigkeit. Falls keine Kenntnis über diese Geschwindigkeit vorliegt, muss für typische Strassensituationen auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden.

Für die Berechnung der Schallausbreitung von der Quelle zu den Immissionspunkten existiert mit der internationalen Norm ISO 9613-2 eine vollständige Rechenvorschrift. Das neue Modell SonRoad basiert im wesentlichen auf diesem Formelwerk, beschreitet aber für die Behandlung des Bodeneffekts einen anderen Weg. Mit der heute zur Verfügung stehenden Rechenleistung ist es möglich, numerische Näherungslösungen für die wellentheoretische Behandlung der Punktquelle über ebenem homogenem Terrain einzusetzen. Die aktuellen Entwicklungen von Ausbreitungsmodellen im Ausland stützen sich praktisch ausschliesslich auf diesen Ansatz ab. SonRoad verwendet ebenfalls diese Lösung. Durch semi-empirische Erweiterungen mit einem Fresnelzonenkonzept wird die Lösung auf beliebiges Terrain verallgemeinert.

Der Vergleich der neuen Vorschrift SonRoad mit StL-86 zeigt in der Tendenz, dass für den Fall ohne Hindernis bei weichem Boden (Rasen) zwischen Quelle und Immissionspunkt der neue Ansatz tiefere Werte als StL-86 ergibt. Bei hartem Boden wie z.B. Asphalt sind die Pegel bei SonRoad höher als bei StL-86. Wenn Hindernisse die Sichtlinie unterbrechen, liegen die mit SonRoad berechneten Pegel höher als jene von StL-86.

Der vorliegende Bericht dokumentiert das komplette Strassenlärberechnungsmodell SonRoad. Die Algorithmen wurden in Prototyp-Form zweimal unabhängig ausprogrammiert und getestet. Für weitere Implementationen ist eine Reihe von Testfällen zu Kontrollzwecken aufgeführt.

1 Auftrag und Projektteam

Mit Vertrag vom 30. November 2001 beauftragte das BUWAL, Abteilung Lärmbekämpfung die EMPA, Abteilung Akustik mit der Aktualisierung der heute gültigen Version des Schweizerischen Berechnungsmodells für Strassenlärm StL-86. Das Modell StL-86 stammt aus den 1980er-Jahren und entspricht nicht mehr dem aktuellen Stand des Wissens. Das Ziel besteht in der Formulierung eines zeitgemässen Berechnungsmodells mit aktualisierten Algorithmen. Diese Neuerungen betreffen sowohl die Quellenbeschreibung als auch die Modellierung der Schallausbreitung. Es soll sichergestellt werden, dass mit dem neuen Modell SonRoad eine wirklichkeitsgetreue Abbildung der Lärmbelastung durch Strassenverkehr ermöglicht wird.

Projektleiter seitens BUWAL war Jean-Daniel Liengme, die Projektleitung auf Seite der EMPA lag bei Kurt Heutschi. Der Belagseinfluss auf die Emission und das Rezept zur Berücksichtigung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit wurde im Rahmen eines separaten Projekts von der Firma Gro-limund+Partner AG in Aarau, vertreten durch Toni Ziegler, erarbeitet. Jan Hofmann von der EMPA hat wesentlichen Anteil an der Umsetzung und Implementierung der SonRoad Modellkonzepte.

2 Aktueller Stand der Technik

Ende 2001 existierte weltweit eine Vielzahl von Strassenverkehrslärberechnungsverfahren¹. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Referenzmodellen, die auf einer numerischen Lösung der Wellengleichung basieren und Engineeringmodellen, die sich auf mehr oder weniger empirisches Formelwerk stützen.

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

Die Referenzmodelle werden praktisch ausschliesslich an wissenschaftlichen Institutionen eingesetzt, während dem die Engineeringmodelle die Werkzeuge für grossräumige Lärmbelastungsberechnungen darstellen. In der EU gibt es mit dem Harmonoise-Projekt klare Tendenzen einer Vereinheitlichung der Strassenlärberechnungsmodelle. Es kann davon ausgegangen werden, dass in etwa 7 bis 10 Jahren ein EU-Strassenlärmmodell auf dem Tisch liegt. Die grosse Schwierigkeit besteht dabei nicht in der Akzeptanz, dass die Physik überall die gleiche ist, sondern im Umstand, dass auf den physikalischen Berechnungen Beurteilungen basieren, die ihrerseits von Land zu Land sehr unterschiedlich sind. In der Übergangszeit bis zum Inkrafttreten des EU-Einheitsmodells wird jenen Ländern, die über kein eigenes Strassenlärmmodell verfügen, empfohlen, das Französische Modell *XP S 31-133* (siehe unten) zu verwenden. Neben diesem französischen Modell sind aus heutiger Sicht vor allem die jüngst entwickelten Modelle *TNM* aus den USA und *Nord2000* aus Skandinavien von besonderem Interesse. Das neue Schweizer Strassenlärmmodell sollte sich an diesen drei Modellen orientieren und messen.

2.1 Französisches Modell XP S 31-133

Das französische Modell XP S 31-133 behandelt sowohl Strassen- als auch Eisenbahnlärm. Es ist als nationale Norm formuliert und 2001 publiziert worden³.

2.1.1 Quellenmodell

Zu den Emissionspegeln werden keine konkreten Angaben gemacht. Für Strassenverkehrslärm wird eine Quellenhöhe von 0.50 m vorgegeben.

2.1.2 Ausbreitungsmodell

In einem ersten Schritt wird die Strasse in genügend kleine Segmente unterteilt die dann durch je einen Quellenpunkt repräsentiert werden. Im zweiten Schritt werden die Ausbreitungsdämpfungen in Oktaven von jedem Quellenpunkt zu jedem Empfängerpunkt berechnet. Hierbei werden berücksichtigt:

- geometrische Verdünnung
- Luftabsorption

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

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

³Acoustique: Bruit des infrastructures de transports terrestres, AFNOR, normalisation française, XP S 31-133, 2001.

- Bodeneffekt
- Abschirmung durch Hindernisse
- Pegelerhöhung durch Einfachreflexion an vertikalen Wänden

Quellenverteilung entlang der Strasse

Es wird empfohlen, jede Fahrspur separat zu behandeln. Für die Segmentbildung, d.h. die Aufteilung der Fahrspur in einzelne Punktquellen werden drei Möglichkeiten aufgezeigt:

- Segmentierung entsprechend konstanten Winkelschritten.
- Segmentierung entsprechend konstanten Längenabschnitten auf der Strasse. Als Faustregel wird empfohlen, die Länge eines Abschnitts höchstens so gross wie der halbe Abstand des Immissionspunktes zur Fahrspur und nicht grösser als 20 m zu wählen.
- variable, bzw. adaptive Segmentierung.

Die zu einem Segment gehörende Quellenleistung ist proportional zum repräsentierten Längenabschnitt.

Luftabsorption

Die Luftabsorption wird gemäss ISO 9613-1 berechnet. Für eine Temperatur von 15°C und eine Luftfeuchte von 70% werden in einer Tabelle die Dämpfungskonstanten pro Oktavband ausgewiesen. Die Dämpfungskonstanten wurden für die jeweiligen Oktavbandmittenfrequenzen bestimmt. Gegen hohe Frequenzen hin dürfte die Oktaveinteilung für die Berechnung der Luftdämpfung zu grob sein und zu systematischen Fehlern führen.

Bodeneffekt

Der Bodeneffekt wird in Oktaven entsprechend dem in ISO 9613-2 dargelegten Verfahren berechnet. Da der Bodeneffekt nach dieser Vorschrift nur für ebenes Terrain berechnet werden kann, muss der Terrainverlauf zwischen Quellen- und Empfangspunkt vollkommen ausgemittelt werden. Diese Ausmittlung erfolgt anhand einer linearen Regression nach dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate. Dabei kann es vorkommen, dass der Quellen- oder Empfangspunkt unter den ausgemittelten Boden zu liegen kommt. In diesen Fällen wird der Punkt auf Höhe 0 gesetzt. Das Verfahren kann die beiden Bodenarten absorbierend (Gras, etc.) und reflektierend (Asphalt, etc.) unterscheiden. Das französische Modell unterscheidet die beiden Ausbreitungskategorien: bevorzugte Ausbreitungsbedingung (Mitwind, Temperaturinversion) und homogene (neutrale) Ausbreitungsbedingung. Im Falle der bevorzugten Ausbreitungsbedingung folgt die Berechnung des Bodeneffekts exakt ISO 9613-2. Im Falle der homogenen Ausbreitungsbedingung wird eine neue Formel angewendet.

Hindernisse

Wenn Hindernisse die direkte Verbindung Quelle-Empfänger unterbrechen, wird eine Berechnung wie folgt durchgeführt: Auf der Hinderniskante wird ein Hilfspunkt eingeführt. Quellen- und empfängerseitig wird das Terrain wiederum ausgemittelt. Am jeweiligen geglätteten Terrain werden der Quellenpunkt und der Empfängerpunkt gespiegelt. Es werden nun für die Pfade Quelle-Hilfspunkt-Empfänger, gespiegelte Quelle-Hilfspunkt-Empfänger und Quelle-Hilfspunkt-gespiegelter Empfänger die Hinderniswirkungen bestimmt, wobei die Hindernisformel aus ISO 9613-2 (mit $C^2 = 40$) zur Anwendung kommt. Unter Berücksichtigung der bereits oben verwendeten Bodeneffektformel werden die drei Pfade überlagert und in eine globale Hinderniswirkung übersetzt. Diese Hinderniswirkung wird auf maximal 25 dB begrenzt. Im Falle der die Ausbreitung begünstigenden Bedingungen wird für den Direktschall eine nach unten gekrümmte Ausbreitung angenommen. Es wird eine Formel angegeben, mit der bestimmt werden kann, um wie viel sich der Schnittpunkt der Direktverbindung Quelle-Empfänger mit dem Hindernis nach oben verschiebt. Dadurch reduziert sich die die Hinderniswirkung bestimmende Pfadlängendifferenz.

Reflexion an Wänden

An senkrecht stehenden Wänden werden spiegelnde Reflexionen angenommen. Als Bedingung für eine Reflexion wird ohne präzise Quantifizierung gefordert, dass die Reflektorabmessungen wesentlich grösser als die Wellenlänge sind.

Meteorologische Einflüsse

Meteorologische Einflüsse werden im wesentlichen empirisch bei der Berechnung des Bodeneffekts und der Hinderniswirkung (wie oben beschrieben) berücksichtigt. Explizit ausgenommen sind Fälle mit Bedingungen, die der Ausbreitung abträglich sind (Gegenwind, labile Temperaturschichtung).

2.2 Amerikanisches Modell TNM

2.2.1 Einleitung

Ende der Neunzigerjahre wurde in den USA das neue Strassenlärmmodell TNM (Traffic Noise Model) eingeführt. Es löste das bis dahin verwendete Modell STAMINA ab. Die Algorithmen von TNM wurden unter der Aegide des Volpe-Centers (U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts) vom Akustikbüro Harris Miller Miller & Hanson Inc. entwickelt. Die Softwareumsetzung besorgte die Firma Foliage Software Systems Inc. TNM kommt praktisch für alle US-amerikanischen Autobahnprojekte (mit der FHWA als Geldgeber) zwingend zur Anwendung.

2.2.2 Quellenmodell

Die Datenbasis zum Quellenmodell stellen 6000 Einzelvorbeifahrtmessungen in 15 m Abstand von der Fahrzeugachse dar, die zwischen 1993 und 1995 in neun verschiedenen US Bundesstaaten erhoben wurden. Das daraus abgeleitete Quellenmodell teilt den Verkehr in fünf Fahrzeugkategorien (Personenwagen, leichte LKW's, schwere LKW's, Busse, Motorräder) ein, für die separate Emissionswerte ausgewiesen werden. Die Emissionswerte werden für jeweils zwei Subquellen in Terzen angegeben und berücksichtigen folgende Einflussparameter:

- Geschwindigkeit
- Belag (vier Typen)
- Steigung (ja / nein)
- Verkehrsfluss (gleichförmig / beschleunigt)

A-bewerteter Emissionspegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Die Emissionspegel einer Fahrzeugkategorie sind als maximale Vorbeifahrtpegel in 15 m Abstand zu interpretieren. In einem ersten Schritt werden sie als A-Pegel ausgewiesen. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit hat die Form

$$L_{\max,15m,A}(v) = 10 \log(C + Bv^A) \quad (2.1)$$

mit

A, B, C Konstanten
 v Geschwindigkeit.

Terzbandemissionsspektrum

Vom A-Pegel (durch 3 Konstanten beschrieben) ausgehend wird eine Aufteilung in Terzen vorgenommen, wobei das Spektrum durch ein Polynom 6. Ordnung beschrieben wird. Die Polynomkoeffizienten sind geschwindigkeitsabhängig mit einem Ansatz erster Ordnung. Für die spektrale Darstellung eines A-Pegels werden damit 14 Konstanten ($D1, D2, E1, E2, \dots, J1, J2$) benötigt. Für jede Fahrzeugkategorie und jeden Belagstyp existieren zwei Emissionspegel. Der eine gilt für gleichförmige, der andere für beschleunigte Bewegung. Für die Beschreibung aller Emissionspegel werden damit 680 (5 Kategorien x 4 Beläge x 17 x 2) Konstanten benötigt.

Subquellen

Die Emissionen werden für jede Fahrzeugkategorie auf zwei Subquellen unterschiedlicher Höhe aufgeteilt. Die Höhen sind 0 m und 1.5 m für PW's, leichte LKW's, Busse und Motorräder bzw. 0 m und 3.66 m für die schweren LKW's. Die Aufteilung des Emissionswertes ist abhängig von der Fahrzeugkategorie, dem Belag, dem Verkehrsfluss (gleichförmig / beschleunigt) und der Frequenz - aber nicht von der Geschwindigkeit. Die Subquellenhöhen sind das Ergebnis von Untersuchungen mit Mikrophonarrays.

Steigungen

Steigungen werden nur bei den schweren LKW's in Form einer Ja/Nein-Unterscheidung berücksichtigt. Dabei wird für Steigungen, bei denen die vorgegebene Geschwindigkeit nicht erreicht werden kann, für den geschwindigkeitsunabhängigen Term der Emissionsformel die Beschleunigungskonstante (Vollgas) eingesetzt. Für kleine Geschwindigkeiten resultiert eine Pegelzunahme von 5 dB (Unstetigkeit).

Ungleichmässiger Verkehrsfluss

Das Modell behandelt neben gleichförmigem Verkehrsfluss auch Beschleunigungs- bzw. Abbremsstrecken wie z.B. Anfahrstrecken nach Stoppsignalen oder Steigungswechsel bei schweren LKW's. Für jede Fahrzeugkategorie bestimmt das Modell den Geschwindigkeitsverlauf. Im Falle positiver Beschleunigung wird bis zum Erreichen der Endgeschwindigkeit in der Emissionsformel der Konstantensatz für Beschleunigung (Vollgas) verwendet.

2.2.3 Ausbreitungsmodell

Das Ausbreitungsmodell gliedert sich in die horizontale und vertikale Geometrie. In einem ersten Schritt wird die Strasse in genügend kleine Segmente unterteilt die dann durch je einen Quellenpunkt repräsentiert werden können. Zusätzlich wird die zum Segment zugehörige Quellenstärke bestimmt. Im zweiten Schritt wird die Vertikalgeometrie zwischen den die Segmente repräsentierenden Quellenpunkten und den Empfängerpunkten untersucht. Im Schnitt werden die Ausbreitungsdämpfungen in Terzen berechnet. Hierbei werden berücksichtigt:

- geometrische Verdünnung
- Luftabsorption
- Bodeneffekt
- Abschirmung durch Wände und Wälle
- Abschirmung durch Häuserzeilen
- Dämpfung durch Wald
- Pegelerhöhung durch Einfachreflexion an Wänden
- Pegelerhöhung durch Mehrfachreflexion zwischen parallelen Wänden

Quellenverteilung entlang der Strasse

TNM teilt die Strassenzüge in Segmente auf, die durch einen Punkt repräsentiert werden können. Diese Segmentierung wird für jeden Empfängerpunkt separat durchgeführt. Dazu wird in der xy-Ebene vom Empfängerpunkt aus durch jeden Eingabepunkt (Strassenzug, Hindernis, Topographie ...) ein Strahl gezogen und mit dem Strassenzug geschnitten. Wenn der Winkel zwischen zwei benachbarten Strahlen eine bestimmte Grenze überschreitet, wird ein zusätzlicher Strahl eingeführt. Diese Grenze liegt in der Grössenordnung von wenigen Grad. Entsprechend dem Quellenmodell und dem Segmentwinkel wird ein zugehöriger Emissionswert ermittelt. Die Ausbreitungsdämpfung wird gewonnen, indem von den beiden Segmentendpunkten aus im Vertikalschnitt die Ausbreitung zum Empfängerpunkt berechnet wird. Der Mittelwert gilt dann stellvertretend für das Segment.

Luftabsorption

Die Luftabsorption wird in TNM gemäss ISO 9613-1 berechnet. Der Anwender kann die Temperatur und die Feuchte vorgeben. TNM berechnet die Absorption gemäss dem in der Norm enthaltenen Formelsatz.

Bodeneffekt, Hindernisse

Bodeneffekt (Bodenreflexion) und Hindernisse werden in TNM in einem Guss behandelt. Im einfachsten Fall besteht der Boden aus einer homogenen ebenen Fläche. Dann existiert neben dem Direktschall ein einziger zusätzlicher Pfad - die Bodenreflexion. TNM erlaubt die Behandlung zweier Arten von Bodenunstetigkeiten. Zum einen sind dies Geländeknicke, d.h. Unstetigkeiten im Profil, zum anderen eine sich ändernde Bodenimpedanz. Wenn eine Unstetigkeit auftritt, führt TNM einen Beugungspunkt ein. Nun werden alle Pfade konstruiert, die vom Sender direkt und via Bodenreflexionen und via Beugungspunkte zum Empfänger führen. Für jeden dieser Pfade wird der Schalldruck nach Amplitude und Phase ermittelt. Am Empfänger schliesslich werden alle Beiträge aufsummiert. Der Schalldruck eines Pfades basiert auf einem Produkt von Reflexions- und Beugungskoeffizienten. Die Reflexionskoeffizienten bestimmen sich nach der allgemein bekannten Lösung für die Reflexion einer Punktquelle an einer Impedanz. Die in TNM vorgesehenen Bodenarten werden durch ihren Strömungswiderstand beschrieben und mit dem Ansatz von Delany⁴ auf die Impedanz umgerechnet. Die Beugungskoeffizienten im Falle von Geländeknicke bzw. Hindernissen basieren auf einer Lösung von Pierce⁵. Die Beugungskoeffizienten für die Punkte an Impedanzsprüngen bestimmen sich nach einer empirischen Lösung von De Jong⁶. Er führt das Problem auf den Fall des Schallschirms zurück und multipliziert den so gewonnenen Beugungskoeffizienten mit der Differenz der Reflexionskoeffizienten der beiden aneinandergrenzenden Schichten.

Die strikte Einführung von Beugungspunkten führt oft zu einer grossen Zahl von Pfaden zwischen Sender und Empfänger. Um den Aufwand zu begrenzen, sind in TNM zwei Bremsen eingebaut. Die erste Massnahme nimmt eine Terrainglättung vor. Dabei wird ein Geländepunkt immer dann eliminiert, wenn sein Lot auf die Verbindung seiner beiden Nachbarn eine bestimmte Grenze d_{max} unterschreitet. Die zweite Massnahme eliminiert einen Beugungspunkt P_j , wenn eine direkte Verbindung zwischen seinen beiden benachbarten Pfadpunkten P_i und P_k besteht und der Wegunterschied $d = P_i P_k - ((P_i P_j) + (P_j P_k))$ kleiner als -0.15λ ist (λ : Wellenlänge). Dies entspricht dem Ignorieren von stark negativen Hindernissen.

Abschirmung durch Häuserzeilen

Die abschwächende Wirkung von Häuserzeilen für einen Empfänger in der zweiten Reihe wird global berechnet. Häuserzeilen werden durch den Bebauungsgrad (Prozentsatz Bebauung) und die Höhe beschrieben. Im Übrigen haben sie eine verschwindende Dicke und stellen für den Schallpfad kein Hindernis dar. Die Pegelreduktion berechnet sich nach einem Ansatz der Deutschen Bahn. Dabei wird zuerst in jeder Terz die Hinderniswirkung ermittelt wie wenn die Häuserzeile eine geschlossenen Wand wäre. Diese Abschwächung wird dann entsprechend dem Öffnungsverhältnis reduziert. Die maximale Wirkung ist auf 10 dB limitiert.

Dämpfung durch Wald

Die Dämpfung von Wald wird nach ISO 9613-2 berechnet. Die Norm liefert Oktavbandwerte. TNM setzt jeweils für die drei Terzen einer Oktave den Oktavwert ein.

Reflexion an Wänden

TNM berechnet für eine vorgegebene Quelle (Strassenzug) und einen vorgegebenen Schallschirm die Wirkung der resultierenden Spiegelquelle. Dabei kann ein Absorptionskoeffizient definiert werden.

Schallschirme beidseits der Strasse

TNM bietet ein separates Modul zur Behandlung von Situationen mit beidseits der Strasse stehenden parallelen Schallschirmen an. Die Berechnung liefert die Reduktion der Abschirmwirkung durch Mehrfachreflexion zwischen den beiden Wänden. In die Rechnung geht die Lage der Quelle (Fahrspur), die Lage und der Absorptionskoeffizient der Wände sowie die Empfängerposition ein. TNM führt eine zweidimensionale Strahlverfolgung durch. Die Empfängerkugel hat einen Radius von 0.3 m, pro Quelle

⁴M. E. Delany, E. N. Bazley, Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials, Applied Acoustics, 3, p.105-116 (1970).

⁵A. D. Pierce, Diffraction of sound around corners and over barriers, Journal of the Acoustical Society of America 55, p.941-955 (1974).

⁶B. A. De Jong, Propagation of Sound Over Grassland and Over an Earth Barrier, J. Sound and Vib. 86, p.23-46 (1983).

werden 10'000 Strahlen gestartet. Für Strahlen, die in der Nähe der oberen Schirmkante verlaufen und die Wand treffen, wird ein einfacher Beugungsansatz verwendet. Dazu wird die duale Situation konstruiert (Quelle → Spiegelquelle, Wandbereich → Freiraum, Freiraum → Wandbereich) womit das Problem auf die Beugung am Hindernis zurückgeführt wird. Die auf diese Weise gewonnenen Ergebnisse decken sich nicht befriedigend mit Messergebnissen, was eine zusätzliche Kalibration nötig macht.

Meteorologische Einflüsse

TNM nimmt eine homogene, neutrale Atmosphäre an (verschwindende Gradienten) und ignoriert meteorologische Einflüsse.

2.3 Skandinavisches Modell Nord2000

2.3.1 Einleitung

Ende der Neunzigerjahre wurde von einer skandinavischen Projektgruppe unter der Federführung von DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics, das Schallausbreitungsmodell Nord2000 entwickelt⁷. Das Modell ist allgemein für Schallausbreitungssituationen im Freien zwischen einer Punktquelle und einem Immissionsort formuliert und wird durch ein spezifisches Quellenmodell ergänzt.

2.3.2 Ausbreitungsmodell

Das Ausbreitungsmodell basiert auf geometrischer Akustik, ergänzt durch wellentheoretische Formulierungen für den Bodeneffekt und die Hinderniswirkung. Die Berechnungen werden in Terzen durchgeführt, wobei folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- geometrische Verdünnung
- Luftabsorption
- Ausbreitungseffekte durch Boden und Hindernisse
- Ausbreitungseffekte durch Streuzonen
- Pegelerhöhung durch Reflexion an Wänden und Objekten

Die aufgeführten Aspekte werden als unabhängig voneinander betrachtet und können deshalb separat berechnet und dann in ihrer Wirkung aufsummiert werden. Für bewegte Quellen können gemäss Nord2000 die Berechnungen insofern vereinfacht werden, als für den Bodeneffekt und die Hinderniswirkung nur im Schnitt gearbeitet wird, d.h. Beugung an vertikalen Kanten wird auf Grund der Ausmittelung bei der Vorbeifahrt ignoriert.

Luftabsorption

Die Luftabsorption wird in Nord2000 gemäss ISO 9613-1 berechnet. Um die jeweils für einen Reinton gültigen Absorptionswerte auf ein Terzband anzuwenden, wird eine Korrekturformel angegeben. Die Terzbandabschwächung fällt etwas geringer aus als die Abschwächung für den Reinton der Terzmittenfrequenz, wobei der Unterschied erst bei einer Abschwächung ab etwa 20 dB (→ 0.6 dB) nennenswert wird. Da unterhalb von 50 Hz ISO 9613-1 keine Angaben macht, wird die Luftabsorption in diesem Frequenzbereich ignoriert.

Bodeneffekt, Hindernisse

Bodeneffekt (Interferenz zwischen Direktschall und Bodenreflexion) und Hindernisse werden in Nord2000 integral behandelt. Es wird von einem zweidimensionalen Terrainschnitt, der als Polygonzug dargestellt werden kann, ausgegangen. Das Terrain kann durch seine Form selbst oder durch künstliche Hindernisse die Sichtlinie zwischen Quelle und Empfänger verstellen. Dabei werden höchstens die zwei wichtigsten Hinderniskanten berücksichtigt.

Da der Rechenaufwand stark von der Anzahl Terrainsegmente abhängt, wird in einem ersten Schritt das Terrain geeignet geglättet. Dazu wird ein Algorithmus - nach dem Prinzip der maximalen Abweichung -

⁷<http://www.delta.dk/nord2000/>

vorgeschlagen. Das feinaufgelöste Terrain wird grob quantisiert und dann iterativ bis zur gewünschten Detailstufe verfeinert.

Ausgangspunkt für die Berechnung des Bodeneffekts ist die Lösung für die Punktquelle über ebenem homogenem Terrain. Diese Lösung wird mit einem von Hothersall und Harriot vorgestellten Fresnelzonenkonzept⁸ auf den allgemeinen Fall des inhomogenen und nichtflachen Bodens erweitert. Gemäss diesem Ansatz werden die Bodenreflexionen separat für die verschiedenen Bodentypen bzw. Terrainsegmente berechnet unter der Annahme einer sehr grossen Ausdehnung. Dann wird ein gewichtetes Mittel der Reflexionsbeiträge der unterschiedlichen Bodentypen bzw. Segmentabschnitte bestimmt, wobei die Gewichtsfaktoren gemäss der Fläche des jeweiligen Bodentyps bzw. Segmentabschnitts innerhalb der Fresnelzone FZ berechnet werden. FZ wird dabei nicht wie üblich als Region für Reflexionspfadlängen innerhalb $1/2 \lambda$ (λ : Wellenlänge) sondern je nach Situation innerhalb $1/4$ oder $1/8 \lambda$ bestimmt. Um nicht mit der umständlichen Ellipsenform rechnen zu müssen, wird diese als Rechteck approximiert. In Abweichung zu Hothersall und Harriott wird der Gewichtsfaktor frequenzabhängig etwas modifiziert um eine bessere Übereinstimmung mit aufwändigeren Modellen zu erzielen.

Als Besonderheit sieht Nord2000 für die Spezifikation des Bodens nicht nur den Strömungswiderstand (bzw. die Impedanz) sondern auch einen Rauheitsparameter vor. Dieser berechnet sich als Standardabweichung der Terrainhöhe innerhalb eines Segments. Diese Rauheit führt zu einem gewissen Verlust der Kohärenz der Bodenreflexion im Vergleich zum Direktschall. Dieser Aspekt ist allerdings noch nicht hinreichend durch Messungen validiert. Das Modell gibt für sieben Bodenkategorien den zugehörigen Strömungswiderstand an. Mittels des klassischen Einparameter-Impedanzmodells von Delany und Bazley⁹ wird aus dem Strömungswiderstand auf die Impedanz geschlossen.

Bei der effektiven Berechnung des Bodeneffekts und der Hinderniswirkung wird zwischen den drei Situationen:

- flat terrain model
- valley model
- hill model

bzw. entsprechenden Mischformen unterschieden. Je nach Situationstyp wird eine unterschiedliche Rechenvorschrift verwendet. Für die Behandlung der Beugungseffekte wird auf eine Lösung von Hadden und Pierce¹⁰ abgestützt.

In realen Situationen erfolgt die Überlagerung von Direktschall und Bodenreflexionen nicht vollkommen kohärent. Dieser Aspekt wird durch einen sogenannten Kohärenzkoeffizient F berücksichtigt. Dabei bezeichnet F den Schalldruckanteil der kohärent, d.h. phasenempfindlich überlagert wird. Für verschiedene Phänomene, die die Kohärenz reduzieren, werden entsprechende empirisch gewonnene Formeln angegeben, wobei bzgl. der messtechnischen Validierung noch Nachholbedarf besteht.

Meteorologische Einflüsse

Für die Berechnung der Schallausbreitung bei mässigen Gradienten der Schallausbreitungsgeschwindigkeit wird in Nord2000 eine Methode mit gekrümmten Schallpfaden aufgezeigt. Die zentrale Vereinfachung besteht in der Annahme von linearen Gradienten, d.h. die Veränderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit verläuft linear mit der Höhe. Dies führt zu kreisförmigen Schallpfaden, die sich analytisch relativ einfach beherrschen lassen¹¹. Ein mässiger Gradient führt auf Grund der gekrümmten Ausbreitung zu einer berechenbaren Veränderung der Amplitude und Phase sowohl des Direktschalls als auch der Bodenreflexionen. Beim Direktschall ändert sich die Amplitude geringfügig als Folge des grösseren Wegs. Die Phase variiert auf Grund der veränderten Laufzeit. Im Falle von Hindernissen müssen zusätzlich die geänderten Beugungswinkel berücksichtigt werden. Bei der Bodenreflexion ist zu berücksichtigen, dass sich der Kugelwellenreflexionskoeffizient Q als Folge der veränderten Auftreffwinkel am Boden ändert. Nord2000 bietet auch eine Rechenvorschrift für starke Gradienten, d.h. Fälle bei denen sich Schattenzonen bzw. zusätzliche Bodenreflexionen ausbilden.

⁸D. C. Hothersall, J. B. N. Harriott, Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 97, p.918-926 (1995).

⁹M. E. Delany, E. N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics vol. 3, p.105-116 (1970).

¹⁰J. W. Hadden, A. D. Pierce, Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 69, p.1266-1276 (1981).

¹¹A. L'Esperance et. al., Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile, Applied Acoustics, vol. 37, p.111-139 (1992).

2.4 Bewertung der Algorithmen und Folgerungen für SonRoad

Mit der ISO Norm 9613-2¹² steht im Prinzip ein vollständiges Engineering-Modell zur Schallausbreitungsberechnung zur Verfügung. Es beschreibt die Berechnung der von einer Punktquelle ausgehenden Immission an einem Empfangspunkt unter meteorologischen Bedingungen, die die Schallausbreitung begünstigen. Die Berechnungen erfolgen in Oktaven und umfassen die geometrische Verdünnung, die Luftabsorption, den Bodeneffekt, die Hinderniswirkung, den Schalldurchgang durch Vegetation sowie die Reflexionen an Oberflächen.

Die klare Schwachstelle von ISO 9613-2 ist der Bodeneffekt. In der aufwändigen und frequenzabhängigen Form kann er nur für ebenes Terrain berechnet werden. Im allgemeinen Fall muss auf eine empirische Formel zurückgegriffen werden, die nur eine Aussage zum A-Pegel auf Grund der mittleren Ausbreitungshöhe über Boden und des Abstandes erlaubt. Ein weiterer kritischer Punkt stellt die Kombination von Bodeneffekt und Hinderniswirkung dar. Wenn eine Hinderniswirkung auftritt, ist der Bodeneffekt gemäss ISO 9613-2 zu ignorieren. Dies erscheint insbesondere bei grösseren Abständen zwischen Hindernis und Empfänger oder Quelle und Hindernis nicht plausibel und kann zu beträchtlichen Unstetigkeiten führen.

Als Konsequenz für das neue Strassenlärmmodell ergibt sich, dass sich SonRoad im Wesentlichen an ISO 9613-2 orientieren kann, allerdings für die Aspekte Bodeneffekt/Hinderniswirkung einen neuen Weg beschreitet. Die oben beschriebenen Modelle gehen in diesem Punkt unterschiedlich weit. Das französische Modell hält an der ISO 9613-2 Bodeneffektformel fest, wobei Abstriche an der Terrainform gemacht werden, damit konsequent mit dem aufwändigen Ansatz gearbeitet werden kann. Das amerikanische und nordische Modell basieren beide auf der gleichen numerischen Lösung für die Wellenausbreitung über ebenem homogenem Terrain. Mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung erscheint dieser Aufwand aus heutiger Sicht gerechtfertigt. Für SonRoad wird deshalb der gleiche Ansatz für die Bodenreflexion gewählt. Die Erweiterung der Lösung für den ebenen homogenen Boden auf allgemeines inhomogenes Terrain, bzw. der Einbezug von Hindernissen wird im amerikanischen und nordischen Modell unterschiedlich gelöst. Da beide Verfahren relativ kompliziert sind, geht SonRoad einen etwas anderen Weg. Die Hinderniswirkung wird streng nach ISO 9613-2 berechnet, wobei explizit die dabei zusätzlich auftretenden Bodenreflexionen berechnet werden. Das allgemeine Terrain wird durch Verwendung eines Fresnelzonenkonzepts auf den Fall des ebenen homogenen Terrains zurückgeführt. Dieses Konzept wird teilweise auch im nordischen Modell Nord2000 eingesetzt und liefert eine robuste Lösung.

2.5 Zusammenstellung der Merkmale der diskutierten Berechnungsmodelle

Die Tabelle 2.1 zeigt in einer Zusammenstellung die wesentlichen Merkmale der diskutierten Berechnungsmodelle und des neuen Ansatzes SonRoad.

¹²ISO 9613-2 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation (1996).

	XP S31-133	TNM	Nord2000	ISO 9613	StL-86	SonRoad
<i>Quellenmodell</i>						
Linienquellenansatz					x	
Punktquellenansatz	x	x				x
Quellenhöhe [m]	0.5	0.0 .. 3.66			0.8	0.45
Emissionsformel: Totalgeräusch					x	
Emissionsformel: PW/LKW		x				x
Emissionsformel: Antriebs-/Rollgeräusch						x
Emissionsformel: f(Geschwindigkeit)		x			x	x
Emissionsformel: f(Steigung)		x			x	x
Emissionsformel: f(Verkehrsfluss)		x				
Emissionsformel: f(Belag)		x			(x)	x
Emissionsformel: A-Pegel					x	
Emissionsformel: Terzen		x				x
<i>Ausbreitungsmodell</i>						
Ausbreitungsdämpfungen A-bewertet					x	
Ausbreitungsdämpfungen in Oktaven	x			x		
Ausbreitungsdämpfungen in Terzen		x	x			x
Luftdämpfung gemäss ISO 9613-1	x	x	x	x		x
Bodeneffekt empirisch	x(1)			x	x	
Bodeneffekt wellentheoretisch		x	x			x
Bodeneffekt: f(Bodenbeschaffenheit)	x(2)	x	x	x(2)		x
Hinderniswirkung empirisch	x			x	x	x
Hinderniswirkung wellentheoretisch		x	x			
Einfachreflexion an Wänden	x	x	x	x		x
Einfachreflexion: f(Grösse, Frequenz)			x	x(3)		x
Einfachreflexion: f(Absorption)		x	x	x		x
Mehrfachreflexionen		x(4)				
Walddurchgangsdämpfung		x	x	x		x
Meteo-Einflüsse auf Bodeneffekt	x		x(5)			
Meteo-Einflüsse auf Hinderniswirkung	x		x(5)	x		x

(1) ISO 9613-2, aber nur ebener Boden

(2) nur hart/weich Unterscheidung

(3) nur ja/nein Unterscheidung

(4) mittels ray tracing Algorithmus

(5) Annahme: konstante Gradienten

Tabelle 2.1: Vergleich der wichtigsten Merkmale verschiedener Modelle zur Berechnung von Strassenverkehrslärm.

3 Berechnungsmodell SonRoad

3.1 Grundlegende Modellannahmen für SonRoad

Die Ursache des Strassenverkehrslärms sind die Emissionen der sich in der Regel bewegenden Fahrzeuge. Die Vorbeifahrt der Quellen wird in genügend kleine Abschnitte diskretisiert. Der Mittelpunkt jedes Abschnitts wird dann als Zentrum einer Punktquelle aufgefasst, wobei die Quellenenergie der Punktquelle proportional zur repräsentierten Abschnittslänge ist. Vom Zentrum der jeweiligen Punktquelle aus wird die Schallausbreitung zum Immissionspunkt berechnet. Die Ausbreitungsdämpfung wird ausschliesslich anhand des Vertikalschnitts ermittelt. Die Beugung an vertikalen Hinderniskanten wird ignoriert. Diese Vereinfachung ist im Allgemeinen für Linienquellen zulässig. Am Boden und an reflektierenden Flächen werden die Quellenpunkte gespiegelt. Damit ergeben sich zusätzliche Ausbreitungspfade von den Spiegelquellenpunkten zum Immissionspunkt. Die Schallausbreitungsphänomene sind teilweise frequenzabhängig. Deshalb erfolgen alle Berechnungen in Terzen. Am Schluss der Berechnung werden die Terzbandpegel zu einem A-bewerteten Mittelungspegel aufsummiert.

Die Immissionsberechnung von Strassenverkehrslärm umfasst zwei Module. In einem Quellenmodell wird auf Grund der Situation die abgestrahlte Schalleistung bzw. -energie bestimmt. Mit einem Ausbreitungsmodell werden dann jeweils für alle Quellenpunkt-Empfängerpunkt Verbindungen die Ausbreitungsdämpfungen zum Immissionsort berechnet und die resultierenden Immissionsanteile zu einem Immissionspegel aufsummiert. In der folgenden Modellbeschreibung sind die wesentlichen Formeln und Tabellen fett hervorgehoben.

3.2 Allgemeiner Ablauf einer Strassenlärmimmissionsberechnung

Die Berechnung der Strassenlärmimmission an einem Empfangspunkt setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

- Definition der Situationsgeometrie.
- Diskretisierung der Strasse bzw. der Fahrspuren in einzelne Punktquellen.
- Bestimmung der Quellenleistung bzw. -energie der einzelnen Punktquellen pro Fahrzeugkategorie, abhängig von der Verkehrsmenge, der Länge des repräsentierten Abschnitts, der gefahrenen Geschwindigkeit, der Längsneigung der Strasse und dem Belag.
- Bestimmung der Schallpfade (inklusive aller Reflexionen von allen Quellenpunkten zum Immissionspunkt).
- Berechnung der Ausbreitungsdämpfungen in Terzen.
- Aufsummation der Terzbandpegel zum A-bewerteten Mittelungspegel.
- Berechnung des Beurteilungspegels.

3.3 Quellenmodell

3.3.1 Quellenstärke

Allgemeines

Die Geräusche von benzin- oder dieselbetriebenen Motorfahrzeugen lassen sich in zwei Klassen unterteilen. Die erste Klasse bilden die Antriebsgeräusche. Diese haben ihren Ursprung hauptsächlich im Motor, im Getriebe und in der Auspuff- und Ansauganlage. Die Antriebsgeräusche hängen vom Motortyp und dessen Betriebszustand ab. Bei gegebenem Motor sind die Antriebsgeräusche in erster Linie von der Drehzahl und etwas schwächer von der Motorbelastung abhängig. Dagegen ist es

unbedeutend, wie schnell sich der Motor auf der Strasse fortbewegt. Die Rollgeräusche bilden die zweite Klasse von Fahrzeuggeräuschen. Sie umfassen die Geräusche, die sich aus dem Abrollvorgang des Reifens auf der Fahrbahn ergeben. Das Abrollgeräusch ist vom Fahrzeug (Gewicht, Reifenbreite und -profil), dem Fahrbahnbelag und der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig. Allfällige aerodynamische Strömungsgeräusche werden zum Rollgeräusch gezählt. Im Normalfall sind sie jedoch vernachlässigbar. Die Abbildung 3.1 zeigt die wesentlichen Einflussfaktoren auf die akustischen Emissionen eines Fahrzeuges.

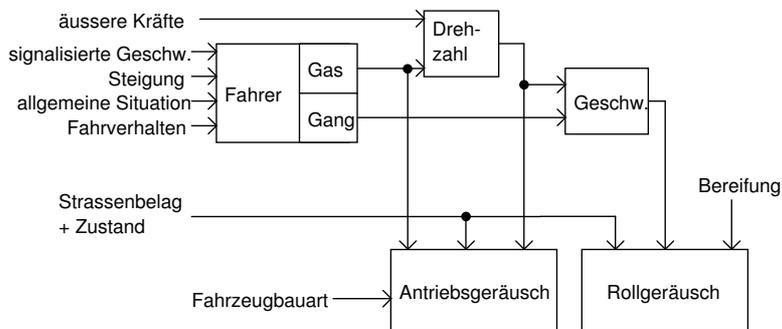


Abbildung 3.1: Blockbild der wichtigsten Einflussfaktoren auf das Fahrzeuggeräusch.

Es bietet sich an, die oben erwähnten zwei Geräuschkategorien (Antriebs- und Rollgeräusch) in einem Quellenmodell für Strassenlärm separat zu modellieren. Damit wird es möglich, unterschiedliche Einflussparameter wie Steigung oder Fahrbahnbelag, die jeweils nur eine Geräuschkomponente massgeblich beeinflussen, präziser zu modellieren. Der auf Strassen verkehrende Fahrzeugmix ist sehr vielfältig. Aus Sicht der Modellbildung wäre es wünschenswert, eine relativ feine Aufteilung in einzelne Kategorien vorzunehmen. Allerdings nützt ein hochaufgelöstes Modell in der Praxis wenig, wenn die entsprechenden Verkehrszahlen nicht verfügbar sind. Aus diesem Grund wurde wie bisher eine Zweiklassenkategorisierung mit Personenwagen und Lastwagen gewählt¹. Insbesondere in der Lastwagenkategorie ist aber mit beträchtlichen Streuungen zu rechnen. Generell gilt, dass nur Aussagen über einen Mittelwert (Durchschnitt) einer Fahrzeugkategorie gemacht werden können, da die von einem einzelnen Fahrzeug ausgehende Schallemission von einer Vielzahl von unerfassbaren Einflussfaktoren abhängig ist (Abbildung 3.1).

Die Beschreibung der Quellenstärke basiert auf dem gemessenen maximalen A-bewerteten Vorbeifahrtpegel eines Fahrzeuges in 7.5 m Abstand von der Fahrzeugachse auf einer Höhe von 1.2 m über Boden. Diese Anordnung wird z.B. in der Norm ISO 11819-1² näher spezifiziert. Dabei wird vorausgesetzt, dass die wesentliche Bodenfläche zwischen Fahrzeug und Mikrophon schallhart ist. Bei der Messung dieses maximalen Vorbeifahrtpegels am realen Verkehr kann diese Voraussetzung z.B. durch Verwendung der fernen Fahrspur erfüllt werden. An Autobahnen mit einem Pannestreifen ist die Voraussetzung automatisch gegeben. Der maximale Vorbeifahrtpegel soll jenen Pegel beschreiben, den ein mit dem Auto mitbewegtes Mikrophon messen würde. Im Falle des stationären Mikrophons wird dieser Pegel durch Ermittlung des Maximalpegels unter Verwendung einer genügend kurzen Zeitkonstanten approximiert. Bei einer zu kurzen Zeitkonstante steigt allerdings der zufällige Messfehler als Folge des stochastischen Signalcharakters stark an. Als günstiger Kompromiss erweist sich die Zeitkonstante FAST (=125 ms). Bei hohen Geschwindigkeiten führt die Trägheit von FAST allerdings zu Pegelunterschätzungen in der Grössenordnung von rund 0.5 dB.

Man beachte, dass im Vergleich zum maximalen Vorbeifahrtpegel der Mittelungspegel Leq zusätzlich eine negative $10 \log(v)$ -Abhängigkeit aufweist (mit v : Fahrzeuggeschwindigkeit, d.h. die Geschwindigkeitsabhängigkeit ist für den Leq geringer als für den maximalen Vorbeifahrtpegel).

¹LSV, Schweizerische Lärmschutzverordnung, Anhang 3, Ziffer 32, Stand 3. Juli 2001.

²ISO 11819-1 Acoustics - Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical pass-by method (1997).

Geschwindigkeitsabhängigkeit

Für unbeschleunigte Fahrweise auf horizontaler Strasse mit Schwarzbelag wurden anhand umfangreicher Messungen der EMPA^{3,4} die in Tabelle 3.1 gezeigten maximalen Vorbeifahrtpegel gefunden:

	Rollgeräusch	Antriebsgeräusch
Personenwagen	$9.5 + 35.0 \log(v)$	$62.7 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{44.0} \right)^{3.5} \right)$
Lastwagen	$18.5 + 35.0 \log(v)$	$76.9 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{56.0} \right)^{3.5} \right)$

Tabelle 3.1: Maximale Vorbeifahrtpegel für Schwarzbelag in dB(A) in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit v in km/h für harten Boden in 7.5 m Abstand bei einer Mikrophonhöhe von 1.2 m. Die systematische Pegelunterschätzung bei hohen Geschwindigkeiten als Folge der Trägheit der Zeitkonstanten FAST wurde korrigiert.

Steigungskorrektur

Bei Strecken mit positiver Steigung (bergwärts) erhöht sich gemäss den oben erwähnten EMPA-Messungen die Antriebsgeräuschkomponente um Δ_S mit

$$\Delta_S = 0.8g \quad [\text{dB(A)}] \quad (3.1)$$

mit

g Steigung der Strasse in % und $g > 0$.

Bei Strecken mit negativer Steigung (talwärts) wird keine Änderung der Antriebsgeräuschkomponente vorgenommen. Sowohl bei positiver als auch bei negativer Steigung ist ein allfällig verändertes Geschwindigkeitsverhalten zu berücksichtigen.

Belagskorrektur

Für die Quantifizierung der Belagskorrektur wird auf Messungen Dritter abgestellt. Vom Tiefbauamt des Kt. Appenzell A.Rh. wurden Untersuchungen zum Strassenlärm im Ortskern, insbesondere bei Granitpflasterung als Fahrbahnoberfläche vorgenommen⁵. Anhand kontrollierter Fahrzeugvorbeifahrten konnte im Vergleich zu Messungen auf einem Schwarzbelag eine geschwindigkeitsabhängige Emissionspegelkorrektur für die Pflasterung ermittelt werden. Die Messergebnisse können mit obiger Emissionsformel durch eine geschwindigkeitsunabhängige, nur auf das Rollgeräusch anzuwendende Belagskorrektur Δ_{BR} von +5.6 dB(A) mit einer Abweichung < 1 dB(A) nachgebildet werden (Abbildung 3.2).

Für die Korrekturen weiterer Beläge wurden Auswertungen von Grolimund+Partner herangezogen⁶. Die Daten erlaubten allerdings keine Spezifikation einer Belagskorrektur auf dem Rollgeräusch alleine, sondern wurden als Korrektur auf dem Gesamtgeräusch Δ_{BG} formuliert. Unter Berücksichtigung von Plausibilitätsüberlegungen lassen sich basierend auf dem Bericht von Grolimund+Partner die in Tabelle 3.2 aufgeführten Belagskorrekturen angeben, wobei ein Belagsalter zwischen 3 und 20 Jahre vorausgesetzt wird:

³A. Rosenheck, K. Heutschi, Bericht zum F+E-Projekt Neues EMPA-Modell für Strassenlärm: Teil Quellenbeschreibung, EMPA Nr. 156'479 (1997).

⁴K. Heutschi, Ein aktualisiertes Strassenlärmquellenmodell, Schweizer Ingenieur und Architekt, S. 26-30, Nr. 39, 1. Oktober 1999.

⁵Hans Peter Rohrer, Ralph Gerschweiler, Strassenlärm im Ortskern, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 22, 26. Mai 1994.

⁶Formulierung einer Belagskorrektur für das neue Strassenlärmmodell SonRoad, Ch. Luther, Grolimund+Partner AG in Aarau, 28. April 2003.

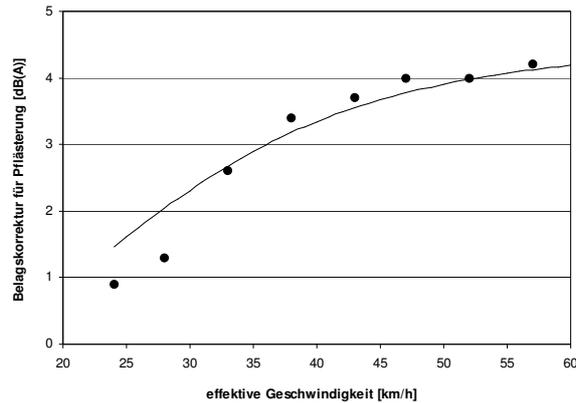


Abbildung 3.2: Vergleich der gemessenen Belagskorrektur für Pflasterung (Punkte) und der berechneten Korrektur bei einem Zuschlag von +5.6 dB(A) auf das Rollgeräusch (Linie).

Belagstyp	Δ_{BG} [dB(A)]	Δ_{BR} [dB(A)]
Asphaltbeton (asphalt concrete) AC 8,11,16 (früher auch AB 10,11,16)	0	0
Beton (abhängig von Alter und Zustand)	+2	0
Offenporiger Asphalt (porous asphalt) PA 8,11 (früher auch Drainasphalt DRA 10,11) für $v > 70$ km/h	-4	0
Gussasphalt (mastic asphalt) MA 8,11,16 (früher auch GA)	0	0
Rauasphalt AC MR 8,11 (früher auch Macro-Rugeux MR 6,11)	-1	0
Oberflächenbehandlung OB 3/6	0	0
Oberflächenbehandlung OB 6/11	+1	0
Splittmastixasphalt (stone mastic asphalt) SMA 6	-1	0
Splittmastixasphalt (stone mastic asphalt) SMA 8,11	0	0
Splittasphalt SPA 6,8,11	0	0
Teerasphaltbeton TA 10	0	0
Teerasphaltbeton TA 16	+1	0
Pflasterung (Achtung: grössere individuelle Streuungen möglich.)	0	+6

Tabelle 3.2: Belagskorrekturen für das Gesamtgeräusch Δ_{BG} bzw. für das Rollgeräusch Δ_{BR} .

Verkehrslärmspektrum

Da die Schallausbreitungsdämpfungen frequenzabhängig sind, werden die Ausbreitungsberechnungen spektral durchgeführt. Entsprechend muss auch das Quellenmodell eine Angabe über die Frequenzzusammensetzung bereitstellen. Dazu wird auf das standardisierte Verkehrslärmspektrum aus der SN EN 1793-3⁷ zurückgegriffen (Tabelle 3.3).

Bodeneffekt beim maximalen Vorbeifahrtpegel für die typische Messanordnung 7.5/1.2 m

In der oben beschriebenen Situationsgeometrie der Maximalpegelbestimmung in 7.5 m Abstand und 1.2 m über hartem Boden führt der Bodeneffekt zu einer Beeinflussung des Mikrophonsignals im Vergleich zur Ausbreitung im Freifeld. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich auf Grund der gleitenden Mittelung mit FAST für die Maximalpegelbestimmung eine gewisse Verschmierung über einen geschwindigkeitsabhängigen Abschnitt der Vorbeifahrt ergibt. Die Definition der Quellstärke im SonRoad muss dem Freifeldwert entsprechen. Für die Umrechnung des gemessenen Vorbeifahrtpegels auf den Freifeldwert wurde mit dem weiter unten beschriebenen Ausbreitungsmodell der Bodeneffekt

⁷SN EN 1793-3, Lärmschutzeinrichtungen an Strassen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum (1997).

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-	-	-	-20	-20	-18	-16	-15
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-14	-13	-12	-11	-9	-8	-9	-10
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-11	-13	-15	-16	-18	-	-	-

Tabelle 3.3: A-bewertetes Verkehrslärm-Terzbandspektrum [dB] gemäss SN EN 1793-3. Ein Wert von -12 für die 500 Hz Terz besagt, dass der A-bewertete 500 Hz Terzbandpegel 12 dB unter dem Gesamt-A-Pegel liegt.

für die Messgeometrie ermittelt.

Die Abbildung 3.3 zeigt das anhand der rechnerischen Simulation für eine sich vorbeibewegende Punktquelle auf 0.45 m Höhe über hartem Boden gewonnene Spektrum des maximalen Vorbeifahrtpegels. Die Auswertung des Maximums erfolgte in jeder Terz zum Zeitpunkt, da sich die Quelle im kürzesten Abstand befand.

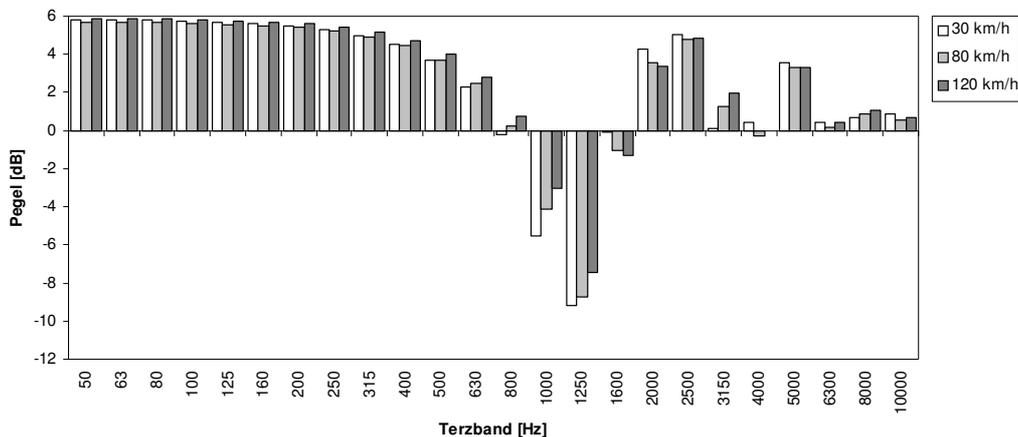


Abbildung 3.3: Rechnerisch bestimmtes Terzbandspektrum des maximalen Vorbeifahrtpegels bei einer Quelle 0.45 m über hartem Boden für die drei Geschwindigkeiten 30, 80 und 120 km/h. Die Werte sind auf Freifeld bezogen, d.h. ein Wert von +5 dB bedeutet, dass der Bodeneffekt zu einer Pegelerhöhung von 5 dB führt.

Unter Berücksichtigung des Verkehrslärmspektrums aus Tabelle 3.3 ergibt sich aus den in Abbildung 3.3 gezeigten Ergebnissen eine Erhöhung des A-Pegels zwischen 2.0 und 2.3 dB für die Geschwindigkeiten 30, 80 und 120 km/h. Diese minimale Geschwindigkeitsabhängigkeit wird vernachlässigt. Insgesamt kann der Bodeneffekt für den A-bewerteten maximalen Vorbeifahrtpegel zu 2.2 dB angenommen werden, d.h. sämtliche Messwerte des A-Pegels sind um 2.2 dB zu reduzieren um Freifeldwerte - wie sie für das Quellenmodell benötigt werden - zu erhalten.

Aus den in Tabelle 3.1 gezeigten Roll- und Antriebsgeräuschkomponenten ergeben sich damit für Freifeld die Pegel gemäss Tabelle 3.4.

Bodeneffekt der Energie einer ganzen Vorbeifahrt für die typische Messanordnung 7.5/1.2 m

Das in Tabelle 3.3 gezeigte standardisierte Verkehrslärmspektrum ist als Leq- bzw. SEL Spektrum aufzufassen und beinhaltet einen Bodeneffektanteil. Für die Spezifikation des Quellenspektrums in SonRoad muss ein Freifeldspektrum vorgegeben werden. Unter der Annahme der gleichen Situationsgeometrie wie oben lässt sich wiederum rechnerisch der Bodeneffekt bestimmen und subtrahieren. Dabei ergibt die rechnerische Simulation des Bodeneffekts für die Energie der ganzen Vorbeifahrt die Pegel gemäss

	Rollgeräusch	Antriebsgeräusch
Personenwagen	$7.3 + 35.0 \log(v)$	$60.5 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{44.0} \right)^{3.5} \right)$
Lastwagen	$16.3 + 35.0 \log(v)$	$74.7 + 10 \log \left(1 + \left(\frac{v}{56.0} \right)^{3.5} \right)$

Tabelle 3.4: Maximale Vorbeifahrtpegel in dB(A) in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit v in km/h für Freifeld in 7.5 m Abstand.

Abbildung 3.4.

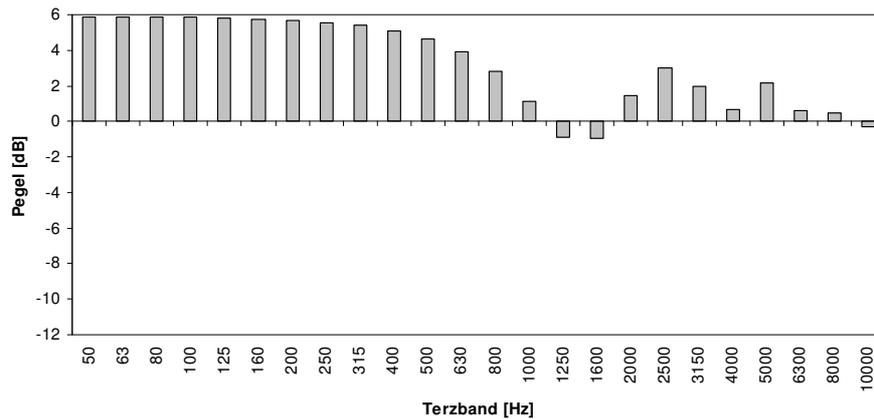


Abbildung 3.4: Rechnerisch bestimmtes Terzbandspektrum der Energie einer ganzen Vorbeifahrt bei einer Quelle 0.45 m über hartem Boden. Die Werte sind auf Freifeld bezogen, d.h. ein Wert von +5 dB bedeutet, dass der Bodeneffekt zu einer Pegelerhöhung von 5 dB führt.

Der in Abbildung 3.4 ausgewiesene Bodeneffekt muss vom Quellspektrum (Tabelle 3.3) abgezogen werden um die für das Modell benötigte Freifeldsituation zu erhalten. Nach der Neuskalierung auf 0 dB ergibt sich damit das in Tabelle 3.5 gezeigte Quellspektrum.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-	-	-	-24.3	-24.3	-22.3	-20.2	-19.1
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-17.9	-16.6	-15.1	-13.4	-10.3	-7.6	-6.6	-7.5
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-10.9	-14.5	-15.5	-15.1	-18.7	-	-	-

Tabelle 3.5: Auf Freifeld umgerechnetes A-bewertetes Verkehrslärm-Terzbandspektrum [dB]. Ein Wert von -15.1 für die 500 Hz Terz besagt, dass der A-bewertete 500 Hz Terzbandpegel 15.1 dB unter dem Gesamt-A-Pegel liegt.

3.3.2 Formulierung als Quellenleistung

Die obigen Angaben beziehen sich auf den Pegel, der im Freifeld von einem Fahrzeug im Abstand von 7.5 m erzeugt wird. Die Umrechnung auf den Schallleistungspegel $L_{W,A}$ folgt Gleichung 3.2.

$$L_{W,A} = L_{7.5m, \text{Freifeld}, A} + 20 \log \left(\frac{7.5m}{1.0m} \right) + 10 \log(4\pi) = L_{7.5m, \text{Freifeld}, A} + 28.5 \quad [\text{dB(A)}] \quad (3.2)$$

mit

$L_{W,A}$ A-bewerteter Schallleistungspegel [dB(A)]
 $L_{7.5m, Freifeld, A}$ A-bewerteter Freifeldschalldruckpegel in 7.5 m Abstand [dB(A)]

Mit Tabelle 3.4 ergeben sich damit die folgenden Beziehungen für den A-bewerteten Schallleistungspegel für PW's $L_{W,A,PW}$ und für Lastwagen $L_{W,A,LKW}$:

$$L_{W,A,PW} = 28.5 + 10 \log \left(10^{0.1(7.3+35 \log(v)+\Delta_{BR})} + 10^{0.1(60.5+10 \log(1+(\frac{v}{44})^{3.5})+\Delta_S)} \right) + \Delta_{BG} \quad (3.3)$$

mit

v Fahrzeuggeschwindigkeit der PW [km/h]
 Δ_{BR} Rollgeräusch-Belagskorrektur gemäss Tabelle 3.2 [dB(A)]
 Δ_{BG} Gesamtgeräusch-Belagskorrektur gemäss Tabelle 3.2 [dB(A)]
 Δ_S Steigungskorrektur gemäss Gl. 3.1 [dB(A)]

$$L_{W,A,LKW} = 28.5 + 10 \log \left(10^{0.1(16.3+35 \log(v)+\Delta_{BR})} + 10^{0.1(74.7+10 \log(1+(\frac{v}{66})^{3.5})+\Delta_S)} \right) + \Delta_{BG} \quad (3.4)$$

mit

v Fahrzeuggeschwindigkeit der LKW [km/h]
 Δ_{BR} Rollgeräusch-Belagskorrektur gemäss Tabelle 3.2 [dB(A)]
 Δ_{BG} Gesamtgeräusch-Belagskorrektur gemäss Tabelle 3.2 [dB(A)]
 Δ_S Steigungskorrektur gemäss Gl. 3.1 [dB(A)]

Zahlenbeispiel

Ein Personenwagen sei mit 80 km/h auf flacher Strasse unterwegs. Gemäss Gl. 3.3 entspricht der Schallleistungspegel $L_{W,A,PW}$ 103.9 dB(A). Die Aufgliederung in die Terzen nach Tabelle 3.5 ergibt einen A-bewerteten Schallleistungspegel von 103.9 - 24.3 = 79.6 dB für die 100 Hz Terz, von 103.9 - 24.3 = 79.6 für die 125 Hz Terz, von 103.9 - 22.3 = 81.6 für die 160 Hz Terz, etc.

3.3.3 Umrechnung vom maximalen Vorbeifahrtpegel auf den Mittelungspegel Leq

Unter der vereinfachenden Annahme, dass sich ein Fahrzeug mit runder Abstrahlcharakteristik auf einer langen geraden Strasse, die von $-\infty$ bis $+\infty$ einsehbar ist, mit konstanter Geschwindigkeit bewegt und mit Ausnahme der geometrischen Verdünnung keine Zusatzdämpfungen berücksichtigt werden, kann der Mittelungspegel Leq im Abstand d für eine Fahrzeugpassage pro Stunde wie folgt aus dem maximalen Vorbeifahrtpegel bestimmt werden:

$$Leq_{1Fz/h,A} = 10 \log \left(\frac{1}{3600} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p_{Q,A}^2}{p_0^2(d^2 + (v't)^2)} dt \right) \quad (3.5)$$

mit

$p_{Q,A}$ maximaler A-bewerteter Schalldruckeffektivwert bei Vorbeifahrt in 1 m Abstand [Pa]
 p_0 Bezugsschalldruckeffektivwert = 2E-5 Pa
 v' Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
 d Abstand Empfänger - Fahrspur [m]
 t Zeit [s]

mit $dt = \frac{dx}{v'}$ ergibt sich

$$Leq_{1Fz/h,A} = 10 \log \left(\frac{p_{Q,A}^2}{3600v'p_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{d^2 + x^2} dx \right) = 10 \log \left(\frac{p_{Q,A}^2 \pi}{3600v'dp_0^2} \right) \quad [\text{dB(A)}] \quad (3.6)$$

Für die Geschwindigkeit v in [km/h] wird schliesslich

$$Leq_{1Fz/h,A} = L_{\max,7.5m,A} - 10 \log(v) - 10 \log(d) - 7.5 \quad [\text{dB(A)}] \quad (3.7)$$

mit

$L_{\max,7.5m,A}$	maximaler A-bewerteter Vorbeifahrtpegel in 7.5 m Abstand [dB(A)]
v	Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]
d	Abstand Empfänger - Fahrspur [m]

Man beachte, dass der mit Gl. 3.7 berechnete $Leq_{1Fz/h,A}$ ein Minimum aufweist, das nicht mit Geschwindigkeit 0 erzielt wird. Das Minimum ist relativ flach und wird für Personenwagen bei $v = 23$ km/h und bei Lastwagen bei $v = 32$ km/h erreicht.

3.3.4 Quellenhöhe

Die Quellenhöhe von Strassenverkehrslärm ist bei der Berechnung des Bodeneffekts und vor allem bei der Hinderniswirkung ein entscheidender Parameter. Aktuelle Untersuchungsergebnisse, die im Rahmen eines ASTRA-Forschungsauftrags⁸ gefunden wurden, zeigen, dass die Quellenhöhe deutlich tiefer liegt als die bisher in StL-86 angenommenen 0.8 m. Für Personenwagen lassen die Ergebnisse auf eine Höhe von 0.4 m, für Lastwagen auf 0.5 m schliessen. Die Verwendung von zwei verschiedenen Quellenhöhen hat eine Verdoppelung des Rechenaufwands in der Ausbreitungsrechnung zur Folge. Dieser Aufwand erscheint auf Grund des geringen Höhenunterschieds nicht gerechtfertigt, sodass eine einheitliche Quellenhöhe von 0.45 m über der Strassenoberfläche angenommen wird. Man beachte, dass diese Neufestlegung der Quellenhöhe nicht mit der aktuellen Lärmschutzverordnung in Einklang steht.

3.3.5 Tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit

Das vorliegende Emissionsmodell setzt voraus, dass die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit in die Quellenformel eingesetzt wird. Im Allgemeinen sind für Personen- und Lastwagen unterschiedliche Geschwindigkeiten anzunehmen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Emissionsformel für freie Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit gilt, d.h. Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge können nicht explizit modelliert werden. Wenn keine Angaben zur tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit vorliegen, kann von folgenden Schätzwerten ausgegangen werden⁹:

Innerorts, Tempo 30 Tempo 30 Strecken können sehr unterschiedlich ausgestaltet sein, entsprechend variabel ist das Geschwindigkeitverhalten. Auch wenn im Falle von Beruhigungsmassnahmen die durchschnittliche Geschwindigkeit deutlich tiefer liegen kann, ist jedoch mindestens ein Wert von 30 km/h einzusetzen um die erhöhten Emissionen durch Beschleunigungsvorgänge zu berücksichtigen.

Innerorts, Tempo 50 Auf innerorts Strecken mit Tempo 50 liegen die mittleren Geschwindigkeiten in der Regel tiefer als 50 km/h. Um die erhöhten Emissionen auf Grund des nichtstationären Verkehrsflusses zu berücksichtigen wird jedoch empfohlen, einen Wert von 50 km/h einzusetzen.

Ausserorts, Tempo 80 Aus Untersuchungen des Geschwindigkeitsverhaltens an verschiedenen Standorten ergeben sich durchschnittliche effektiv gefahrene Geschwindigkeiten von 83/86 km/h für Personenwagen tags/nachts und 78/82 km/h für Lastwagen tags/nachts.

Ausserorts, Tempo 100 Aus Untersuchungen des Geschwindigkeitsverhaltens an verschiedenen Standorten ergeben sich durchschnittliche effektiv gefahrene Geschwindigkeiten von 103/107 km/h für Personenwagen tags/nachts und 89/92 km/h für Lastwagen tags/nachts.

⁸Lärmschirme an Strassen - Akustische Quellenhöhe bei der Berechnung der Hinderniswirkung, UVEK/Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag 51/00, VSS, Vereinigung Schweiz. Strassenfachleute, 2001.

⁹Beurteilung der effektiv gefahrenen Geschwindigkeit, Bericht Grolimund+Partner AG, Aarau (2003).

Autobahnen Aus Untersuchungen des Geschwindigkeitsverhaltens an verschiedenen Standorten ergeben sich durchschnittliche effektiv gefahrene Geschwindigkeiten von 119/122 km/h für Personewagen tags/nachts und 94/97 km/h für Lastwagen tags/nachts.

Steigungsstrecken Bei Steigungen bis 5% tritt im Vergleich zur Ebene keine Veränderung des Geschwindigkeitsverhaltens auf. Bei grösseren Steigungen ist bei der Bergfahrt von einer Geschwindigkeitsreduktion, bei der Talfahrt von einer Geschwindigkeitszunahme auszugehen.

3.3.6 Diskretisierung der Strasse

Die Schallausbreitungsrechnung erfolgt jeweils für eine Quellenpunkt - Empfangspunkt Strecke. Die als Polygonzug definierte Quelle (Strasse) muss deshalb vorgängig diskretisiert, d.h. in Einzelpunkte aufgelöst werden. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, sollte die Diskretisierung möglichst fein gewählt werden. Andererseits bedeutet eine feine Diskretisierung viele Quellenpunkte und einen entsprechend hohen Rechenaufwand. In der Praxis ist die Diskretisierung so fein zu wählen, dass alle wesentlichen Änderungen der Ausbreitungsbedingungen erfasst zu werden. Der schlimmste Fall dürfte dort auftreten, wo eine Quelle mit Ausnahme eines kurzen Abschnitts durch ein Hindernis abgedeckt ist. Die Diskretisierung muss dann so fein sein, dass mindestens ein Quellenpunkt in den nicht abgedeckten Bereich fällt. Es sind Strategien denkbar, mit denen anhand des Terrains bzw. der Bebauung eine optimierte Quellenverteilung ermittelt wird. Es ist allerdings fraglich, ob sich der entsprechende Aufwand lohnt. Hier wird empfohlen, situationsunabhängig eine fixe Diskretisierung von 5 m zu wählen.

3.4 Ausbreitungsmodell

3.4.1 Einleitung

Das Ausbreitungsmodell in SonRoad ist frequenzabhängig in Terzen formuliert und orientiert sich im Wesentlichen an ISO 9613-1/2¹⁰. Vom ISO Standard wird beim Bodeneffekt abgewichen (siehe Abschnitt 2.4). In SonRoad wird auf die numerische Näherungslösung für die Ausbreitung einer Punktquelle über ebenem homogenem Boden abgestützt. Die Lösung wird mit einer empirischen Fresnelzonenbetrachtung auf unebenes Terrain und inhomogenen Boden erweitert. Der Boden lässt sich durch Angabe eines Strömungswiderstandes lokal beschreiben. Ein zentraler Knackpunkt besteht im automatischen Auffinden der relevanten Schallpfade zwischen Quelle und Empfänger. Dabei werden der Direktschall und alle Einfachreflexionen in einem vertikalen Terrainschnitt ermittelt. Der Direktschall und die Bodenreflexionen werden schliesslich unter Berücksichtigung eines distanz- und frequenzabhängigen Kohärenzverlustes phasenempfindlich aufsummiert. Die Reflexionen an weiteren Strukturen wie Lärmschutzwänden etc. werden mittels eines zugeordneten Reflexionsverlustes zur Beschreibung der Absorption skaliert und energetisch zum Gesamtpegel dazu addiert. Eine in vertikaler Richtung nicht genügend grosse Reflektorfläche führt wie im Fall der Bodenreflexion durch Ansetzen einer Fresnelzonenbetrachtung zu einem Pegelverlust. Aus den Ausbreitungsdämpfungen für jede diskrete Punktquelle wird schliesslich der Gesamtimmissionspegel errechnet.

3.4.2 Übersicht

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

$$L_f = L_{W,f} - A_f \quad (3.8)$$

mit

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

Die Ausbreitungsdämpfung A_f lässt sich in die folgenden, *voneinander unabhängigen* Aspekte aufgliedern

$$A_f = A_{\text{div},f} + A_{\text{atm},f} + A_{\text{gr}/\text{bar}/\text{refl},f} + A_{\text{fol},f} \quad (3.9)$$

mit

¹⁰ISO 9613: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors (1996).

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

In der Berechnung einiger Ausbreitungsdämpfungsterme taucht die Schallgeschwindigkeit c auf. Generell wird für $c = 340$ m/s angenommen.

3.4.3 Geometrische Verdünnung

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

$$A_{\text{div},f} = 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \quad [\text{dB}] \quad (3.10)$$

mit

d	Distanz Quelle - Empfänger [m]
d_0	Referenzabstand = 1 m

Der Term $+ 11$ dB in Gl. 3.10 ergibt sich aus der Umrechnung vom Schalleistungspegel auf den Schalldruckpegel in 1 m Abstand.

3.4.4 Luftdämpfung

Schall erfährt beim Durchgang durch die Luft eine Abschwächung als Folge von verschiedenen Absorptionsmechanismen. Diese sogenannte Luftdämpfung $A_{\text{atm},f}$ 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:

$$A_{\text{atm},f} = \alpha_f \frac{d}{1000} \quad [\text{dB}] \quad (3.11)$$

mit

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

Die ISO Norm 9613-1 spezifiziert den atmosphärischen Absorptionskoeffizienten α in Abhängigkeit der Frequenz, der Luftfeuchte und der Temperatur.

Die durchschnittliche Temperatur und Luftfeuchte lässt sich anhand von mehrjährigen Wetterdaten der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt bestimmen. Für den Mittelwert wurden folgende Stationen verwendet: Adelboden, Altdorf, Bad Ragaz, Basel, Bern, Buchs-Suhr, Buffalora, Chateau d' Oex, La Chaux-de-Fonds, Chur, Davos, Einsiedeln, Fribourg, Geneve, Glarus, Guttannen, Hallau, Kloten, Lausanne/Pully, Locarno-Monti, Lugano, Luzern, Montreux, Neuchatel, Oeschberg, Robbia, Samedan, Schaffhausen, Sils Maria, Sion, St.Gallen, Zürich SMA. Dabei resultiert eine Jahresdurchschnittstemperatur von $+8^\circ\text{C}$ (bei einer Streuung von Station zu Station von 2.5° im Sinne einer Standardabweichung) und eine durchschnittliche relative Luftfeuchte von 76% (bei einer Streuung von Station zu Station von 4% im Sinne einer Standardabweichung). Für die Temperatur ergeben sich die Tageshöchst- bzw. Tagestiefstwerte im Jahresdurchschnitt zu 12.9°C und 3.5°C . Für die relative Luftfeuchte finden sich die Tageshöchst- bzw. Tagestiefstwerte im Jahresdurchschnitt zu 86% und 62%. Auf Grund der relativ geringen Unterschiede wird auf eine Berücksichtigung der systematischen Tag/Nachtunterschiede hinsichtlich der Luftdämpfung verzichtet. Tatsächlich sind für eine Tag/Nachtdefinition mit den Übergangszeiten 06 und 22 Uhr die Tag/Nacht-Abweichungen von den globalen Jahresdurchschnittswerten geringer als dies aus den Extremwerten abzulesen ist.

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

Die Tabelle 3.6 zeigt für jede Terz die zu verwendenden atmosphärischen Absorptionskoeffizienten für eine Temperatur von +8°C und eine relative Feuchte von 76%.

Die in Tabelle 3.6 ausgewiesenen Absorptionskoeffizienten gelten streng genommen nur für einen Reinton der entsprechenden Frequenz. Wenn dieser Wert für das ganze zugehörige Terzband verwendet wird, bleibt der Fehler < 0.5 dB unter der Bedingung (3.12)¹¹.

$$\frac{d}{1000} \left(\frac{f^2}{1000^2} \right) < 6 \quad (3.12)$$

mit

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

Für die 5000 Hz Terz, zum Beispiel, ergibt die Bedingung (3.12) eine maximale Distanz Quelle-Empfänger von 240 m. Im typischen Einsatzbereich sind die oben aufgelisteten Terzbandabsorptionskoeffizienten gültig.

3.4.5 Bodeneffekt, Hinderniswirkung und Reflexionen

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 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 Ueberlagerung zu einer verstärkenden oder abschwächenden Wirkung. StL-86 kannte für diesen sogenannten Bodeneffekt nur eine mehr oder weniger ausgeprägte Abschwächung, ignorierte also, dass auch Verstärkung möglich ist. Zudem basierte der Bodeneffekt in StL-86 mit der mittleren Höhe über Boden auf einem stark verallgemeinernden Parameter ohne Berücksichtigung des spezifischen Terrainverlaufs.

Wenn einer der Schallpfade - also der Direktschall und/oder die Bodenreflexion durch ein Hindernis unterbrochen wird, ergibt sich eine Abschwächung für den entsprechenden Pfad. Der Pfad muss dann so gelegt werden, dass er via jene Hinderniskante oder -kanten verläuft, für die der kleinste Umweg resultiert. 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 Hinderniskantenpunkten als Sekundärquellen zusätzliche Schallpfade via Bodenreflexionen (Abbildung 3.5).

Durch Reflexionen an ebenen, oft vertikalen Strukturen können zusätzliche Ausbreitungspfade entstehen. Wenn die reflektierende Struktur teilweise absorbierend wirkt, reduziert sich die Stärke der Reflexionen entsprechend. Es werden grundsätzlich nur Einfachreflexionen betrachtet. Die reflektierende Wirkung solcher Strukturen wird hier abweichend vom üblicherweise verwendeten Spiegelquellenkonzept

¹¹ISO 9613-1, Acoustics - attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.

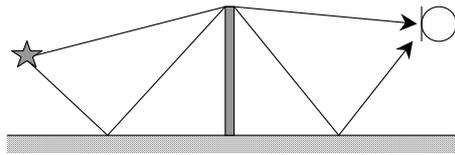


Abbildung 3.5: Ein Hindernis führt zu einem zusätzlichen Schallpfad, indem eine Bodenreflexion auf der Quellen- und eine auf der Empfängerseite des Hindernisses entsteht. Der Pfad Quelle-Boden-Hinderniskante-Boden-Empfänger wird ignoriert.

behandelt (siehe Abbildung 3.6). Vereinfachend wird angenommen, dass Reflexionen immer dann entstehen, wenn die vertikale Schnittebene durch den Quellen- und Empfängerpunkt den Reflektor schneidet. Dieser Ansatz erlaubt die konsequente 2D-Berechnung und setzt keine Kenntnis der azimutalen Ausrichtung des Reflektors voraus. Es ist damit möglich, auf einfache Weise moderne digitale Oberflächenmodelle einzusetzen. Gegenüber dem Spiegelquellenkonzept wird mit dem hier vorgeschlagenen Ansatz der reflektierte Anteil bei kleinen Reflektoren leicht unterschätzt.

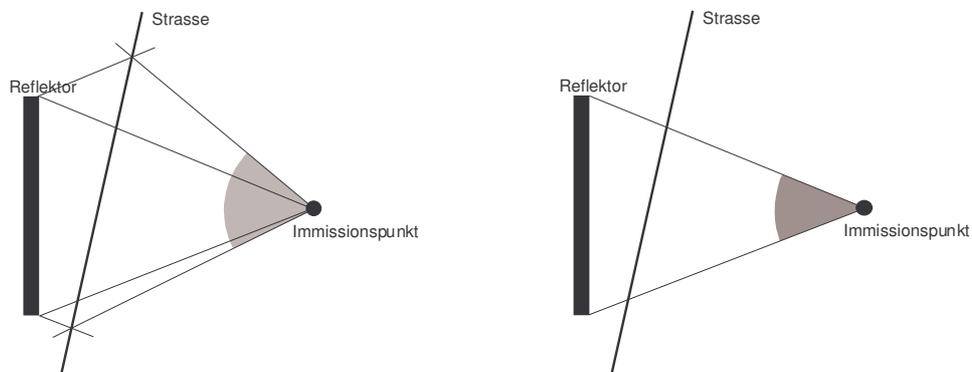


Abbildung 3.6: Berücksichtigung von Reflexionen: klassisches Spiegelquellenkonzept (links) und in Son-Road verwendete Regel (rechts). Der markierte Winkel bezeichnet den Aspektwinkel der Strasse der via Reflektor einen zusätzlichen Anteil an die Immissionen beisteuert.

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

Zur Bestimmung von $A_{gr/bar/refl,f}$ sind zuerst die relevanten Schallpfade, d.h. jene Pfade, die einem sinnvollen Ausbreitungsweg entsprechen, zu ermitteln. Für jeden der Pfade wird die allfällige Hinderniswirkung nach ISO 9613-2 ($C_2 = 40$) bestimmt. Für die am Boden reflektierten Pfade wird zusätzlich eine Amplituden- und Phasenkorrektur entsprechend dem Kugelwellenreflexionskoeffizienten vorgenommen, wobei mittels einer Fresnelzonenbetrachtung (siehe Anhang H) eine Abschwächung der Reflexion bei ungenügend grosser Bodenfläche bestimmt wird. Bei Pfaden, die durch Reflexion an *nicht-Boden-Strukturen* entstehen, wird die Phase ignoriert. Die Amplitude erfährt abhängig von der Absorption der Reflektorfläche eine entsprechende Abschwächung. Wenn der Reflektor nicht genügend gross ist wird wie im Fall der Bodenreflexion anhand einer Fresnelzonenbetrachtung eine zusätzliche Abschwächung eingerechnet.

Unter Berücksichtigung der Laufzeit werden schliesslich alle Pfade am Empfangspunkt aufsummiert und mit dem ungehinderten Direktschall verglichen. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es - abgesehen von der Hinderniswirkung im Übergang zur geometrischen Schattenzone - kontinuierlich ist, d.h. eine genügend kleine Änderung der Situationsparameter führt zu einer beliebig kleinen Resultatänderung.

Auffinden der relevanten Schallpfade

Das automatische Auffinden aller relevanten Schallpfade zwischen Quelle und Empfänger ist ein Knackpunkt des ganzen Rechenmodells. Es wird vorausgesetzt, dass das Terrain inklusive Reflektoren und allfälliger Hindernisse als Schnitt in Form eines Polygonzugs bestehend aus jeweils geraden Segmenten dargestellt ist. Jedes Segment ist entweder ein Bodensegment oder ein Reflektorsegment. Die akustischen Eigenschaften der Bodensegmente werden durch einen Strömungswiderstand beschrieben. Die Reflektorsegmente werden durch einen Reflexionsverlust bzgl. einer vollständigen Reflexion an einer harten Fläche beschrieben. Eine mögliche Strategie zur Pfadsuche ist im Anhang C beschrieben. Die Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch einen Terrainschnitt mit allen relevanten Schallpfaden.

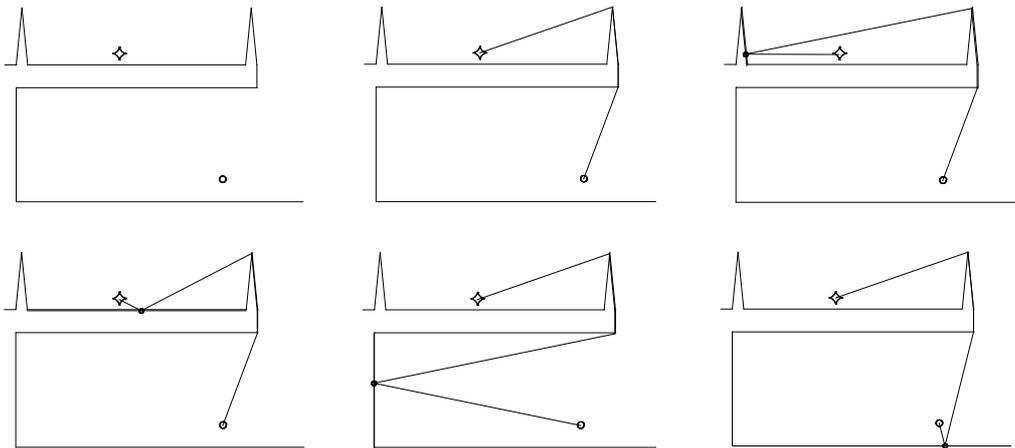


Abbildung 3.7: Beispiel eines Terrainschnitts (Galerieszituation mit erhöhter Strasse und darunterliegendem Empfangspunkt) mit allen relevanten Schallpfaden. Der Stern markiert die Quelle, der Punkt den Empfänger.

Ausbreitungsrechnungen für die einzelnen Schallpfade

Wenn die relevanten Schallpfade gefunden sind, wird für jeden Pfad der Schalldruck am Immissionspunkt nach Amplitude und Phase bestimmt, wobei eine willkürliche Normierung der Quellenstärke entsprechend einem Schalldruck von 1 Pa in 1 m Abstand verwendet wird. Als Referenzgrösse wird der Schalldruck $\underline{p}_{\text{dir,ref}}(f)$ am Empfänger unter Vernachlässigung allfälliger Hinderniswirkungen benötigt (zur komplexen Darstellung von sinusförmigen Grössen siehe Anhang D).

$$\underline{p}_{\text{dir,ref}}(f) = \frac{1}{r} e^{jkr} \quad (3.13)$$

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

$$\underline{p}_{\text{dir}}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} \frac{1}{r} e^{jkr'} \quad (3.14)$$

mit

$D_z(f)$	allfällige Hinderniswirkung gemäss Gl. 3.15 in Funktion der Frequenz f [dB]
r	Abstand Quelle-Empfänger durch allfällige Hindernisse hindurch [m]

r' Abstand Quelle-Empfänger um allfällige Hindernisse herum [m]

Für die Hinderniswirkung $D_z(f)$ wird der Ansatz nach ISO 9613-2 für den Fall der separaten Berücksichtigung der Bodenreflexion durch Spiegelquellen ($C_2 = 40$) verwendet (3.15).

$$D_z(f) = 10 \log \left(3 + \frac{40}{\lambda} C_3 z K_{\text{met}} \right) \geq 0 \quad (3.15)$$

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]. Negative Hindernisse, die die direkte Sichtlinie knapp nicht unterbrechen, werden ignoriert. Dies führt zu einer Unstetigkeit an der <i>Schattengrenze</i> . Die tatsächliche Pegeländerung knapp ausserhalb der Schattengrenze verläuft allerdings derart abrupt, dass eine Approximation durch einen Sprung gerechtfertigt erscheint.
e	Im Falle von Doppel-bzw. Mehrfachbeugung: Distanz zwischen der ersten und letzten relevanten Hinderniskante [m].
K_{met}	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Reduktion der Hinderniswirkung im Falle von gegen den Boden gekrümmter Ausbreitung. Bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen ist $K_{\text{met}} = e^{-\left(\frac{1}{2000}\right) \sqrt{\frac{d_{ss} d_{sr} d}{2z}}}$, bei neutralen Bedingungen ist $K_{\text{met}} = 1.0$.
d_{ss}	Distanz Quelle - erste Hinderniskante [m]
d_{sr}	Distanz zweite Hinderniskante - Empfänger [m]
d	Abstand Quelle - Empfänger [m]

Die Hinderniswirkung $D_z(f)$ wird auf 20 dB begrenzt.

Für die Schallpfade mit einer Bodenreflexion wird die Berechnung mit der Spiegelquelle und den gespiegelten Pfaden durchgeführt. In Ergänzung zu einer allfälligen Hinderniswirkung ist der frequenzabhängige Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ am Boden, sowie eine allfällige Abschwächung bei ungenügender Reflektorfläche zu berücksichtigen.

Der Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ bestimmt sich aus der Lösung für eine Punktquelle über ebenem homogenem Terrain¹². Als Quellenpunkt wird jeweils der Pfadepunkt vor dem Reflexionspunkt und als Empfängerpunkt der Pfadepunkt nach dem Reflexionspunkt betrachtet. 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 3.8):

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]

Der Kugelwellenreflexionskoeffizient $Q(f)$ leitet sich aus dem Reflexionskoeffizienten $r_p(f)$ der ebenen Welle gemäss Gl. 3.16 ab. Man beachte, dass die komplexen Variablen sowohl eine Amplituden- als auch eine Phaseninformation beinhalten.

$$Q(f) = r_p(f) + (1 - r_p(f))F(w) \quad (3.16)$$

mit

¹²C. I. Chessel, Propagation of noise along a finite impedance boundary. J. Acoustical Society of America, 62, p.825-834 (1977).

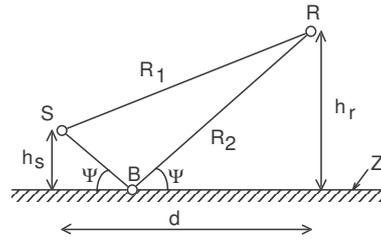


Abbildung 3.8: Situation zur Schallausbreitung einer Punktquelle über homogenem Boden der Impedanz $Z(f)$ mit der Quelle S, dem Reflexionspunkt B und dem Empfänger R.

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

$$w = \frac{1+j}{2} \sqrt{kR_2} \left(\sin(\psi) + \frac{1}{Z(f)} \right)$$

Der Faktor $F(w)$ aus Gl. 3.16 kann für streifende Schallausbreitung, d.h. $d \gg h_s + h_r$, approximiert werden zu¹³

$$F(w) \approx 1 + j\sqrt{\pi}we^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw) = 1 + j\sqrt{\pi}w \operatorname{wofz}(w) \quad (3.17)$$

In Gl. 3.17 bezeichnet $\operatorname{erfc}(-jw)$ die komplexe Errorfunktion¹⁴. Für die Funktion $\operatorname{wofz}(w) = e^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw)$ existiert ein sehr effizienter Algorithmus zur numerischen Auswertung^{15,16} (siehe Anhang).

Die Impedanz 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. Bazley¹⁷ (3.18) 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 Gl. 3.18 von der Konvention der Zeitabhängigkeit in der komplexen Darstellung abhängt. Hier wird für diesen Schwingungsterm $e^{-j\omega t}$ angenommen¹⁸.

$$Z(f) = 1.0 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.75} + j11.9 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.73} \quad (3.18)$$

mit

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

Die Tabelle 3.7 gibt für verschiedene Bodentypen den zugehörigen Strömungswiderstand an. Es wird angenommen, die Reflexion am Boden beanspruche ein Gebiet, das der Größe einer $\lambda/4$ -Fresnelzone (siehe Anhang H) 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^{19,20}. Da generell nur im Schnitt gearbeitet

¹³C. F. Chien, W. W. Soroka, A note on the calculation of sound propagation along an impedance surface. J. Sound and Vib. vol. 69, 340-343 (1980).

¹⁴M. Abramowitz, J. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions.

¹⁵W. Gautschi, Efficient Computation of the Complex Error Function. SIAM J. Numer. Anal. vol. 7, 187-198 (1970).

¹⁶Collected Algorithms from CACM. Algorithm 363.

¹⁷M. E. Delany, E. N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics vol. 3, 105-116 (1970).

¹⁸G. A. Daigle et al. Some comments on the literature of propagation near boundaries of finite acoustical impedance, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 66, p.918-919 (1979).

¹⁹D. C. Hothersall, J. B. N. Harriott, Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries, J. Acoustical Society of America, vol. 97, p.918-926 (1995).

²⁰DELTA, Danish Electronics, Light & Acoustics, Nord2000: Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model, 2001.

Bodentyp	Strömungswiderstand σ [Rayl]
Asphalt, Wasser	20'000
harter Erdboden	5'000
lockerer Erdboden, Kies	500
Rasen	300
Weidland	150
Hartschnee	40
Pulverschnee	10

Tabelle 3.7: Strömungswiderstände für verschiedene Bodentypen.

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 Gl. 3.19.

$$\Phi(f) = \frac{l_s(f)}{l_F(f)} \quad (3.19)$$

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 :

$$a = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(x_{F_1} - x_R)^2 + (z_{F_1} - z_R)^2} + \sqrt{(x_{F_2} - x_R)^2 + (z_{F_2} - z_R)^2} + \frac{\lambda}{4} \right) \quad (3.20)$$

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{(x_{F_1} - x_{F_2})^2 + (z_{F_1} - z_{F_2})^2} \quad (3.21)$$

$$b = \sqrt{a^2 - c^2} \quad (3.22)$$

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 3.9 zeigt exemplarisch die konstruierte Fresnelzonen-Ellipse einer Bodenreflexion. Schliesslich ergibt sich der Schalldruck, der durch einen am Boden reflektierten Schallpfad am Empfänger hervorgerufen wird in komplexer Schreibweise zu:

$$\underline{p}_{gr}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} \frac{Q(f)\Phi(f)}{r} e^{jkr'} \quad (3.23)$$

mit

$D_z(f)$ allfällige Hinderniswirkung für den gespiegelten Pfad [dB]
 $Q(f)$ Kugelwellenreflexionskoeffizient
 $\Phi(f)$ Fresnelzonenfaktor

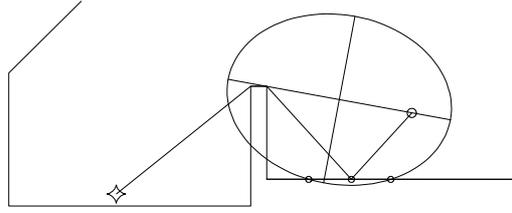


Abbildung 3.9: Beispiel einer Ausbreitungssituation mit der Fresnelzonen-Ellipse für eine Bodenreflexion. Die markierten Schnittpunkte mit dem Terrainsegment bezeichnen den Abschnitt der zur Reflexion beiträgt. Die Grösse der Ellipse ist frequenzabhängig.

- 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 an vertikalen oder schräggestellten Nicht-Boden-Strukturen entstehenden Reflexionen werden ähnlich behandelt wie die Bodenreflexionen, wobei anstelle des Kugelwellenreflexionskoeffizienten ein allfälliger Reflexionsverlust herangezogen wird. Der Reflexionsverlust ist ein Mass für die Absorption des Reflektors. Für hochabsorbierende Wände kann - wenn keine genaueren Angaben vorliegen - von einem Reflexionsverlust von typisch 8 dB(A) ausgegangen werden.

$$\underline{p}_{\text{refl}}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} 10^{-0.05\Delta R(f)} \frac{\Phi(f)}{r} e^{jkr'} \quad (3.24)$$

mit

- $D_z(f)$ allfällige Hinderniswirkung für den gespiegelten Pfad [dB]
- $\Delta R(f)$ Reflexionsverlust (0 ... 10 dB)
- $\Phi(f)$ Fresnelzonenfaktor
- r Länge des gespiegelten Pfads durch allfällige Hindernisse hindurch [m]
- r' Länge des gespiegelten Pfads um allfällige Hindernisse herum [m]

Die Beiträge der einzelnen Schallpfade lassen sich jetzt mit Gl. 3.25 zum Term $A_{\text{gr}/\text{bar}/\text{refl}}(f)$ zur Berücksichtigung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und der Reflexionsbeiträge verrechnen, wobei die Summe über alle gültigen Pfade zu verstehen ist.

$$10 \log \left(\frac{A_{\text{gr}/\text{bar}/\text{refl}}(f) = |\underline{p}_{\text{dir,ref}}(f)|^2}{K^2 \left| \underline{p}_{\text{dir}}(f) + \sum_{i'} \underline{p}_{\text{gr}}(f) \right|^2 + (1 - K^2) \left(|\underline{p}_{\text{dir}}(f)|^2 + \sum_{i'} |\underline{p}_{\text{gr}}(f)|^2 \right) + \sum_{i''} |\underline{p}_{\text{refl}}(f)|^2} \right) \quad (3.25)$$

mit

- $\underline{p}_{\text{dir,ref}}(f)$ Referenzschalldruck nach Gl. 3.13.
- $\underline{p}_{\text{dir}}(f)$ effektiver Direktschalldruck nach Gl. 3.14.
- $\underline{p}_{\text{gr}}(f)$ Schalldruck am Empfänger für einen Bodenreflexionspfad nach Gl. 3.23.
- $\underline{p}_{\text{refl}}(f)$ Schalldruck am Empfänger für einen nicht Bodenreflexionspfad nach Gl. 3.24.
- K Kohärenzfaktor nach Gl. 3.26.
- $|\dots|$ Betrag der entsprechenden komplexen Grössen
- $\sum_{i'}$ Summe über alle gültigen Bodenreflexionen
- $\sum_{i''}$ Summe über alle gültigen Nicht-Boden-Reflexionen

Grundsätzlich werden in Gl. 3.25 der Direktschall und die Bodenreflexionen phasenempfindlich aufsummiert, wogegen die übrigen Reflexionsbeiträge energetisch addiert werden. 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. Vereinfachend wird hier für die Bestimmung von K die Gl. 3.26 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 Ausmittlung der Laufzeitstreuungs-Effekte. Der Grad der Ausmittlung 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.

$$K = e^{-(\gamma_0 + \gamma f^2 r'_{dir})} \quad (3.26)$$

mit

γ_0	empirischer Parameter = 9.0×10^{-3} , siehe Anhang. F
γ	empirischer Parameter = $4.5 \times 10^{-11} [s^2/m]$, siehe Anhang F
f	Frequenz [Hz]
r'_{dir}	Länge des Direktschallpfads, um allfällige Hindernisse herum [m].

Der Bodeneffekt und die Hinderniswirkung sind stark frequenzabhängig. Ein jeweils für eine Terz stehender Term $A_{gr/bar/refl,j}$ 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:

$$f_i = 44.76510929 \times 2^{\frac{i}{27}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.27)$$

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

$$A_{gr/bar/refl,j} = -10 \log \left(\frac{1}{9} \sum_{i=9j}^{9j+8} 10^{-0.1 A_{gr/bar/refl}(f_i)} \right) \quad (3.28)$$

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

3.5 Zusätzliche Dämpfungseffekte

ISO 9613-2 folgend wird - falls vorhanden - als zusätzlicher Dämpfungseffekt A_{fol} die Schalldurchgangsdämpfung durch dichten Bewuchs (Bäume und Sträucher) berücksichtigt. Dazu wird der effektiv im Bewuchs verlaufende Schallweg d_f ermittelt, wobei eine zum Boden hin gekrümmte Ausbreitung von der Quelle zum Empfänger entsprechend einer Kreisbahn mit einem Radius 5 km angenommen wird. Für $d_f < 10$ m wird $A_{fol} = 0$. Für $d_f > 10$ m gelten die Abschwächungswerte gemäss Tabelle 3.8. Als Dämpfungswerte der einzelnen Terzen werden jeweils die entsprechenden Oktavwerte eingesetzt.

3.6 Berechnung des A-bewerteten Immissionspegels

Im letzten Schritt sind alle oben gewonnenen Teilergebnisse zu einem Gesamtimmissionspegel zu verrechnen. Es wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

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 3.8: Bewuchsdämpfung A_{fol} in Funktion der Frequenz (Oktavbandwerte).

- Die Situation ist durch l relevante Linienquellenabschnitte mit je konstanter Verkehrsmenge, konstanter Verkehrszusammensetzung und konstanter Geschwindigkeit gegeben.
- Jeder relevante Linienquellenabschnitt ist in $n(i)$ Punktquellen diskretisiert worden. Jede dieser Punktquellen repräsentiere einen Längenabschnitt $\Delta s(i, k)$ (mit k : Nummer der Punktquelle auf dem i -ten Linienquellenabschnitt) und weise in der Terz mit Nummer j eine Ausbreitungsdämpfung zum Empfänger von $A_j(i, k)$ auf.

Damit ergibt sich der Mittelungspegel $L_{eq, frei, A}$ am Immissionspunkt zu:

$$L_{eq, frei, A} = 10 \log \left(\sum_{j=0}^{23} \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{n(i)} \left(\frac{M_{PW}(i)}{3600} \frac{3.6 \Delta s(i, k)}{v_{PW}(i)} 10^{0.1(L_{W, A, PW}(i) + T_j - A_j(i, k))} + \frac{M_{LKW}(i)}{3600} \frac{3.6 \Delta s(i, k)}{v_{LKW}(i)} 10^{0.1(L_{W, A, LKW}(i) + T_j - A_j(i, k))} \right) \right) \quad (3.29)$$

mit

l	Anzahl Linienquellenabschnitte
$n(i)$	Anzahl Punktquellen für den i -ten Linienquellenabschnitt
$M_{PW}(i)$	Anzahl Personenwagen pro Stunde auf dem i -ten Linienquellenabschnitt [1/h].
$M_{LKW}(i)$	Anzahl Lastwagen pro Stunde auf dem i -ten Linienquellenabschnitt [1/h].
$v_{PW}(i)$	Geschwindigkeit der Personenwagen in auf dem i -ten Linienquellenabschnitt [km/h].
$v_{LKW}(i)$	Geschwindigkeit der Lastwagen in auf dem i -ten Linienquellenabschnitt [km/h].
$L_{W, A, PW}(i)$	A-bewerteter Schalleistungspegel eines verkehrenden Personenwagens auf dem i -ten Linienquellenabschnitt gemäss Gl. 3.3 [dB(A)].
$L_{W, A, LKW}(i)$	A-bewerteter Schalleistungspegel eines verkehrenden Lastwagens auf dem i -ten Linienquellenabschnitt gemäss Gl. 3.4 [dB(A)].
T_j	Strassenverkehrslärm-Pegeldifferenz A-Pegel minus A-bewerteter Terzbandpegel für die Terz mit Nummer j gemäss Tabelle 3.5 [dB].
$\Delta s(i, k)$	durch die k -te Punktquelle auf dem i -ten Linienquellenabschnitt repräsentierter Längenabschnitt [m].
$A_j(i, k)$	Ausbreitungsdämpfung in der Terz mit Nummer j von der k -ten Punktquelle auf dem i -ten Linienquellenabschnitt zum Empfänger [dB].

3.7 Bestimmung des Beurteilungspegels

Die Beurteilung gemäss LSV²¹ geht von einem Immissionspunkt im offenen Fenster aus. Der in Gl. 3.29 bestimmte A-bewertete Immissionspegel gilt allerdings für einen frei liegenden Empfangspunkt. Die Umrechnung des Freifeld-Immissionspegels auf den Wert im offenen Fenster erfolgt nach Gl. 3.30²². Man beachte, dass diese Korrektur in StL-86 nicht enthalten war.

$$L_{eq, m} = L_{eq, frei, A} + 1 \quad [\text{dB(A)}] \quad (3.30)$$

mit

$L_{eq, m}$	A-bewerteter Immissionspegel im offenen Fenster [dB(A)]
$L_{eq, frei, A}$	A-bewerteter Immissionspegel am freiliegenden Empfangspunkt [dB(A)]

²¹LSV, Schweizerische Lärmschutzverordnung, Stand 15. Juli 1997.

²²Methode zur Ermittlung der Aussenlärmimmissionen bei geschlossenem Fenster. Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung (LSV) Nr. 7, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (1995).

Der Beurteilungspegel L_r wird getrennt für den Tag (6-22 Uhr) und die Nacht (22-6 Uhr) bestimmt. Ausgehend vom A-bewerteten Immissionspegel im offenen Fenster ist zusätzlich eine Korrektur $K1$ anhand des durchschnittlichen Tages- und Nachtverkehrs zu addieren.

$$L_r = L_{eq,m} + K1 \quad (3.31)$$

mit

L_r	Beurteilungspegel [dB]
$L_{eq,m}$	A-bewerteter Immissionspegel im offenen Fenster [dB(A)]
$K1$	Pegelkorrektur gemäss Gl. 3.32.

$$K1 = \begin{cases} -5 & : N < 31.6 \\ 10 \log\left(\frac{N}{100}\right) & : 31.6 \leq N \leq 100 \\ 0 & : N > 100 \end{cases} \quad (3.32)$$

mit

N	stündlicher Motorfahrzeugverkehr tags bzw. nachts auf jenem Strassenabschnitt, der am Empfangspunkt den grössten Anteil zum Immissionspegel beisteuert.
-----	---

3.8 Anwendungshinweise

Kontrollmessung Das vorliegende Rechenmodell entspricht dem aktuellen Stand der Technik. Unter den gegebenen Randbedingungen dürfen zuverlässige Resultate erwartet werden. Es wird aber empfohlen, wenn immer möglich die Richtigkeit von durchgeführten Berechnungen stichprobenartig mit Messungen zu überprüfen. Dabei sollte die messtechnisch untersuchte Situation möglichst repräsentativ sein und die für die Ausbreitung wesentlichen Geometrielemente wie z.B. Lärmschirme beinhalten.

Individuelle Quellenwerte Die dem Modell zu Grunde liegenden Emissionsformeln basieren auf einem durchschnittlichen, anhand vieler Einzelmessungen gewonnenen Fahrzeugmix. In Fällen mit einer speziellen Fahrzeugparkzusammensetzung (z.B. Strecke mit besonderen Kieslastwagen) oder ausserordentlichem Belag kann es sinnvoll sein, die Emissionsformel basierend auf eigenen maximalen Vorbeifahrtpegelmessungen anzupassen. Dabei ist dem in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Prozedere zu folgen.

PW - LKW Kategorisierung Die Unterteilung der Fahrzeuge in die beiden Kategorien folgt der LSV. Die PW Kategorie umfasst Personenwagen, Lieferwagen, Kleinbusse, Motorfahräder und Trolleybusse. Die LKW Kategorie umfasst Lastwagen, Sattelschlepper, Gesellschaftswagen, Motorräder und Traktoren.

Nichtstationärer Verkehrsfluss, Kreuzungen, Kreiseln, enge Kurven etc. Das Modell SonRoad setzt grundsätzlich einen stationären Verkehrsfluss, d.h. konstante Fahrzeuggeschwindigkeit voraus. Wenn keine besonderen Anhaltspunkte vorliegen wird empfohlen, bei Kreuzungen, Lichtsignalanlagen, Kreiseln, engen Kurven etc. die Fahrzeuggeschwindigkeit der freien Strecke einzusetzen. Die Erfahrung zeigt, dass oft eine gegenseitige Kompensation der erhöhten Emissionen während den Beschleunigungsvorgängen mit den reduzierten Emissionen während den Stillstandphasen bzw. Phasen mit reduzierter Fahrgeschwindigkeit auftritt.

Auflösung in einzelne Fahrspuren Die Definition der Quelle obliegt der Verantwortung des Anwenders. Im einfachsten Fall kann eine ganze Strasse zu einer einzigen Linienquelle in Strassenmitte zusammengefasst werden. Wenn sich allerdings Immissionspunkte oder für die Ausbreitung bedeutende Elemente wie Lärmschirme in Strassennähe befinden, muss die Lage der Quelle feiner aufgelöst werden. In diesen Fällen wird empfohlen, jede Fahrspur separat zu modellieren.

Parkplätze Das vorliegende Modell kann die von Parkplätzen ausgehenden Immissionen *nicht* berechnen. Im Rahmen eines vom VSS getragenen Forschungsprojekts wird zurzeit eine Schweizer-Norm zu Lärmimmissionen von Parkierungsanlagen entwickelt.

Reflexionen SonRoad berücksichtigt automatisch Reflexionen erster Ordnung an vertikalen Strukturen, sofern diese in der vertikalen Schnittebene durch den Quellen- und Empfängerpunkt erscheinen. In besonderen Fällen kann es notwendig sein, separate Spiegelquellen einzufügen.

Mehrfachreflexionen zwischen Lärmschirmen und Fassaden In Situationen mit parallel zu einer Hausfassade verlaufender Lärmschutzwand kann durch Reflexionen an der Fassade und der Lärmschutzwandrückseite eine Pegelerhöhung am Immissionspunkt auf der Fassade auftreten. Diese scheinbar reduzierte Hinderniswirkung kann in der Grössenordnung von bis zu 4 dB liegen und ist umso ausgeprägter je tiefer der Immissionspunkt im Schatten liegt²³. Dieser Effekt muss von Hand dazugerechnet werden.

Strassenschluchten In Strassenschluchten, d.h. Strassenzügen mit beidseitiger Bebauung treten pegelrelevante Mehrfachreflexionen auf. Überdies sind diese Reflexionen oft diffus, da die bedeutenden Flächen durch Fassadenelemente wie Balkone etc. stark strukturiert sind. Das vorliegende Rechenmodell kann nur Einfachreflexionen behandeln. Es wird deshalb empfohlen, in diesen Fällen das in den Mitteilungen Nr. 6 zur Lärmschutzverordnung 1995 vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft publizierte Rezept zur Abschätzung der pegelerhöhenden Wirkung für eine gerade, mehr oder weniger dicht bebaute Strasse zu verwenden.

Tunnelportale Für die Behandlung der Abstrahlung von Tunnelportalen bietet SonRoad kein eigenes Verfahren. Hierzu wird auf die Publikation von EMPA und Balzari und Schudel²⁴ verwiesen.

Besondere Lärmschutzbauten Bei besonderen Lärmschutzbauten wie Galerien, Einhausungen mit Lüftungsöffnungen etc. muss auf spezielle Untersuchungsmethoden wie die Massstabsmodelltechnik²⁵ oder wellentheoretische Berechnungsverfahren zurückgegriffen werden.

Waldreflexionen An Waldrändern entstehen diffuse, d.h. streuende Reflexionen. Diese Art von Reflexionen können nicht automatisch mit SonRoad berechnet werden. Erfahrungsgemäss liegt der Reflexionsverlust im Vergleich zu einer ideal spiegelnden Reflexion bei typisch rund 15 dB(A).

Beugung an vertikalen Kanten SonRoad berücksichtigt keine Beugung an vertikalen Kanten. In speziellen Situationen ohne übliche Ausmittlung der Vorbeifahrt über einen grossen Aspektwinkel kann dadurch allenfalls ein Fehler entstehen.

Hinderniswirkung bepflanzter Lärmschutzwälle Die Bepflanzung von Lärmschutzwällen führt als Folge der Streuwirkung der Pflanzenteile im Allgemeinen zu einer leichten Reduktion der Hinderniswirkung. Auf der anderen Seite beeinflusst eine Bepflanzung das Windfeld rund um das Hindernis herum und zwar in dem Sinne, dass bei Mitwind und Bepflanzung eine höhere Hinderniswirkung resultiert als bei Mitwind ohne Bepflanzung²⁶.

Schallschirme mit besonderen Aufsätzen Es sind Produkte auf dem Markt erhältlich, die in Form eines besonderen Abschlusses auf Lärmschutzwände aufgesetzt werden. Dabei soll sich die Hinderniswirkung signifikant erhöhen und zwar stärker, als dies rein geometrisch durch die Erhöhung des Schirms zu erwarten wäre. In der Literatur bisher präsentierte Untersuchungen zeigen frequenzabhängig tatsächlich eine geringe Erhöhung der Hinderniswirkung (Grössenordnung 1 dB), allerdings wird zum jetzigen Zeitpunkt der Gewinn als zu klein erachtet, um den Aufwand zu rechtfertigen.

Besondere Hindernisse Die Hinderniswirkung von von oben herunter wachsenden Strukturen wird im SonRoad ignoriert.

Wettereinfluss SonRoad setzt im Wesentlichen neutrale Ausbreitungsbedingungen, d.h. eine homogene Atmosphäre voraus. Bei Hindernissen besteht allerdings die Möglichkeit, eine reduzierte Hinderniswirkung in Rechnung zu stellen, um Inversionslagen bzw. Mitwindsituationen nachzubilden. Da insbesondere nachts von systematisch förderlichen Schallausbreitungsbedingungen auszugehen ist, wird empfohlen, bei der Berechnung von Nacht-Beurteilungspegeln lediglich die reduzierte

²³Kurt Heutschi, Parameter study of the insertion loss reduction in case of a building facade parallel to a noise barrier, Acta Acustica, vol. 89 (2003).

²⁴Die Lärmabstrahlung von Strassentunnel-Portalen, Bundesamt für Strassenbau, Forschungsaufträge 25/77 und 16/82, (1983).

²⁵Kurt Eggenschwiler, Kurt Heutschi, Nicole Lüthi-Freuler, Optimaler Lärmschutz dank akustischer Modellmessung, tec21, Heft 7 (2001).

²⁶T. Van Renterghem et. al., Reducing Screen-Induced Refraction of Noise Barriers in Wind by Vegetative Screens, Acta Acustica United with Acustica, No. 2, p.231-238, vol. 88 (2002).

Hinderniswirkung einzusetzen. Man beachte, dass das in ISO 9613-2 beschriebene Verfahren der Meteororrektur C_{met} nicht verwendet werden kann, da SonRoad mit einem abweichenden Bodeneffektansatz arbeitet.

Zulässiger Abstandsbereich Da SonRoad den Wettereinfluss auf die Schallausbreitung weitgehend ignoriert, sind mit zunehmendem Abstand grössere Fehler in den Berechnungsergebnissen zu erwarten. Insbesondere unberücksichtigt bleibt das Phänomen des Schallschattens, das immer bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen wie Gegenwind und/oder labiler Temperaturschichtung (abnehmende Temperatur mit zunehmender Höhe) auftritt. Ein Immissionspunkt im Schallschatten erhält bei geometrischer Betrachtung (ray tracing) überhaupt keine Schallenergie von der Quelle. In der Praxis verschwindet der Pegel nicht ganz, es zeigt sich allerdings eine beträchtliche Zusatzdämpfung. Anhand von ray tracing Simulationen kann gezeigt werden, dass im Flächen bei typischen labilen Temperaturschichtungen, wie sie oft tagsüber entstehen, auf einer Immissionspunkthöhe von 10 m ab rund 250 m Abstand von der Quelle ein Schallschatten auftritt. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich bei moderatem Gegenwind von 2 m/s. Bei Abständen von über 200 m nimmt die Zuverlässigkeit der mit SonRoad gewonnenen Rechenergebnisse ab. Im Rahmen eines ASTRA-Forschungsprojektes wird zur Zeit ein Strassenlärmmodell für grössere Abstände entwickelt, das mit erhöhtem Rechenauswand eine grössere Genauigkeit für grössere Abstände liefern soll.

Brücken Brücken können hinsichtlich der Schallemissionen eine besondere Rolle spielen. Zum einen kann die erhöhte Lage typisch zu einem Wegfall des Bodeneffekts und allfälliger Hinderniswirkungen führen. Dieser Effekt wird durch das Modell bei richtiger Situationsdefinition richtig berücksichtigt. Zum anderen können an den Fugenstellen zusätzliche impulsartige Geräusche auftreten. Zu diesen Geräuschen lassen sich allerdings keine allgemeinen Angaben machen.

Modellierung des Bodens bei Drainbelag Die Schallausbreitung über Drainbelag kann anhand des aktuellen Wissensstandes mit dem vorliegenden Modell nicht zuverlässig nachgebildet werden. Es wird empfohlen, für Drainbelag wie für Hartbelag einen Strömungswiderstand von 20'000 Rayl einzusetzen. Die pegelmindernde Wirkung wird durch die Belagkorrektur im Emissionsmodell berücksichtigt.

Freifeld → **offenes Fenster** Die Beurteilung von Strassenlärmimmissionen hat im Normalfall für Immissionspunkte im offenen Fenster zu erfolgen. Für die Umrechnung vom Pegel des frei liegenden Empfangspunktes auf den Wert im offenen Fenster wird ein pauschaler Zuschlag von 1 dB angesetzt²⁷.

Strassenbahnen SonRoad verzichtet auf die Spezifikation von Emissionswerten von Strassenbahnen. Auf Grund der enormen Vielfalt von Fahrzeugtypen und der damit verbundenen grossen Streuung der akustischen Eigenschaften lassen sich nicht ohne weiteres allgemein gültige Daten angeben. Wenn in einer konkreten Situation davon auszugehen ist, dass die Immissionen von Strassenbahnen relevant sind, wird empfohlen, speziell für den verkehrenden Fahrzeugpark und die gegebene Trasseart individuelle Emissionswerte zu bestimmen.

Genauigkeit Die Genauigkeit einer mit SonRoad durchgeführten Berechnung hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Toleranzen in der Geometriespezifikation der Situation
- Unsicherheiten hinsichtlich der Quellstärke (Menge, Geschwindigkeit, Emissionswerte)
- prinzipielle Unsicherheiten des Rechenmodells (abhängig vom Quellen-Empfänger Abstand, Höhe der Ausbreitung über Boden, Komplexität der Situation, Vorhandensein von Hinderniswirkungen, ...)
- Unsicherheit des nur sehr vereinfacht berücksichtigten Wettereinflusses

In Anlehnung an ISO 9613-2 kann insgesamt unter der Annahme einer fehlerfreien Situationsdefinition für Abstände bis etwa 100 m für den Jahresmittelwert von einer Unsicherheit in der Grössenordnung von 2 dB im Sinne einer Standardabweichung ausgegangen werden. Für grössere Abstände erhöht sich die Unsicherheit entsprechend.

²⁷ Methode zur Ermittlung der Aussenlärmimmissionen bei geschlossenem Fenster. Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung (LSV) Nr. 7, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (1995).

4 Vergleich von SonRoad mit StL-86

Bei der Einführung eines neuen Modells muss sich die Frage stellen, wie gross die möglichen Abweichungen zu bisherigen Berechnungen ausfallen werden. Dazu ist keine eindeutige bzw. abschliessende Antwort möglich. Anhand einiger exemplarischer Testfälle, die sowohl mit StL-86 als auch mit SonRoad berechnet wurden, kann die Grössenordnung der Resultatunterschiede aufgezeigt werden. Die Vergleiche wurden mit der sogenannten StL-86+ Variante angestellt. Gegenüber dem Original StL-86 wurde dort der Emissionswert generell um 1 dB(A) erhöht¹. Das neue Modell SonRoad erlaubt eine primitive Berücksichtigung der Meteoverhältnisse, indem bei der Hinderniswirkung ein Meteor Korrekturfaktor K_{met} eingeführt wird, der unter förderlichen Bedingungen (Mitwind oder Inversionslage) eine etwas verminderte Hinderniswirkung liefert. Die SonRoad Berechnungen wurden einmal unter Berücksichtigung des Meteor Korrekturfaktors (SonRoad_F) und einmal ohne Meteor Korrektur (SonRoad_N), d.h. für neutrale Ausbreitungsbedingungen durchgeführt. Nicht berücksichtigt wurde die +1 dB Korrektur für die Umrechnung auf das offene Fenster, d.h. es wurde für einen Empfangspunkt im Freifeld gerechnet.

Es wird von einer 8 m breiten, und 1000 m langen zweispurigen Strasse ausgegangen. Der Strassenbelag weist einen Strömungswiderstand von $\sigma = 20'000$ Rayl auf. Auf jeder 4 m breiten Fahrspur verkehren (in der Fahrspurmitte angenommen) pro Stunde 1000 Personen- und 100 Lastwagen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h. An die Strasse grenzt eine ebene Bodenfläche an. Die Empfangspunkte befinden sich auf einer Linie senkrecht zur Strasse auf halber Länge des Strassenstücks in 20, 50, 100 und 200 m Abstand in Höhen 3 und 10 m. Es werden folgende Varianten untersucht:

- Die Bodenfläche ab dem Strassenrand ist Rasen mit einem Strömungswiderstand $\sigma = 300$ Rayl
- Die Bodenfläche ab dem Strassenrand ist hart mit einem Strömungswiderstand $\sigma = 20'000$ Rayl
- Die Bodenfläche ab dem Strassenrand ist Rasen und zusätzlich steht am Strassenrand eine 3 m hohe Lärmschutzwand
- Die Bodenfläche ab dem Strassenrand ist Rasen und zusätzlich steht am Strassenrand eine 6 m hohe Lärmschutzwand

Die Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen die Ergebnisse. Für die Berechnungen wurde eine Diskretisierung von 5 m gewählt.

Aus dem Vergleich kann in der Tendenz gefolgert werden:

- Für den Fall ohne Hindernis liefert SonRoad bei weichem Boden (Rasen) tiefere Werte als StL-86. Bei hartem Boden liegt SonRoad höher als StL-86.
- Die Immissionspegel liegen in den Fällen mit Hindernis bei SonRoad höher als bei StL-86.
- Die gefundenen Pegelunterschiede SonRoad - StL-86 liegen im Intervall $-4 \dots +6$ dB(A).

¹Strassenlärm: Korrekturen zum Strassenlärm-Berechnungsmodell, Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung, Nr. 6, BUWAL (1995).

Bodenfläche	Wandhöhe	Abstand	StL-86+	SonRoad _F - StL-86+	SonRoad _N - StL-86+
Rasen	0 m	20 m	71.9	-1.4	-1.4
Rasen	0 m	50 m	66.7	-2.3	-2.3
Rasen	0 m	100 m	62.1	-4.0	-4.0
Rasen	0 m	200 m	56.6	-4.4	-4.4
hart	0 m	20 m	71.9	1.4	1.4
hart	0 m	50 m	66.7	3.8	3.8
hart	0 m	100 m	62.1	5.1	5.1
hart	0 m	200 m	56.6	6.3	6.3
Rasen	3 m	20 m	57.7	1.4	0.4
Rasen	3 m	50 m	51.9	2.0	1.1
Rasen	3 m	100 m	47.1	3.5	2.5
Rasen	3 m	200 m	41.6	4.1	3.0
Rasen	6 m	20 m	50.9	5.1	4.4
Rasen	6 m	50 m	46.0	4.9	4.6
Rasen	6 m	100 m	42.2	5.3	5.1
Rasen	6 m	200 m	38.5	5.4	5.3

Tabelle 4.1: Vergleich der Immissionsberechnungen mit StL-86+ und SonRoad für eine Empfängerhöhe von 3 m. SonRoad_F steht für die Berechnung unter förderlichen Ausbreitungsbedingungen (reduzierte Hinderniswirkung), SonRoad_N gilt für neutrale Bedingungen.

Bodenfläche	Wandhöhe	Abstand	StL-86+	SonRoad _F - StL-86+	SonRoad _N - StL-86+
Rasen	0 m	20 m	71.9	1.3	1.3
Rasen	0 m	50 m	67.5	-0.9	-0.9
Rasen	0 m	100 m	63.5	-1.7	-1.7
Rasen	0 m	200 m	58.8	-3.1	-3.1
hart	0 m	20 m	71.9	1.6	1.6
hart	0 m	50 m	67.5	1.0	1.0
hart	0 m	100 m	63.5	2.3	2.3
hart	0 m	200 m	58.8	4.0	4.0
Rasen	3 m	20 m	66.1	2.3	2.1
Rasen	3 m	50 m	55.1	0.9	-0.5
Rasen	3 m	100 m	49.3	1.6	0.2
Rasen	3 m	200 m	43.5	3.5	2.0
Rasen	6 m	20 m	54.5	2.5	1.5
Rasen	6 m	50 m	47.5	3.7	3.2
Rasen	6 m	100 m	43.2	3.9	3.7
Rasen	6 m	200 m	39.3	4.1	3.9

Tabelle 4.2: Vergleich der Immissionsberechnungen mit StL-86+ und SonRoad für eine Empfängerhöhe von 10 m. SonRoad_F steht für die Berechnung unter förderlichen Ausbreitungsbedingungen (reduzierte Hinderniswirkung), SonRoad_N gilt für neutrale Bedingungen.

5 Ausblick - zukünftige Ergänzungen und Erweiterungen des Modells

Das vorliegende Rechenmodell SonRoad stellt eine wesentliche Verfeinerung gegenüber dem bisherigen Modell StL-86 dar und entspricht dem aktuellen Stand der Technik. Selbstverständlich weist das Modell aber in vielerlei Hinsicht noch Lücken auf. Die folgende Liste versucht, diese Lücken zu benennen und kann damit Hinweise liefern, in welchen Punkten das Modell in Zukunft noch verbessert werden sollte.

Quellenwertanpassungen bei beschleunigter Fahrweise SonRoad geht explizit von konstanter Fahrweise aus. Es ist bisher nicht möglich, die pegelerhöhende Wirkung von beschleunigter Fahrweise rechnerisch zu berücksichtigen. Obwohl in vielen Fällen die Bedingung konstanter Fahrweise bzw. die Ausmittlung hinsichtlich mittleren Emissionen gegeben sein dürfte, sind Situationen mit systematischen Beschleunigungsstrecken denkbar.

Vertikale Quellen-Richtcharakteristik SonRoad nimmt an, dass das Fahrzeug in alle Richtungen gleichviel abstrahlt. In der Horizontalen ist diese Annahme gerechtfertigt und verifiziert. Hier gibt es durch die Vorbeifahrt überdies eine Ausmittlung allfälliger Richtwirkungseffekte. Hinsichtlich der vertikalen Abstrahlcharakteristik gibt es Hinweise, dass diese durchaus inhomogen sein könnte. Im Falle von hochliegenden Immissionspunkten bzw. hohen und nahe an der Strasse stehenden Hindernissen kann diese vertikale Richtcharakteristik einen bedeutenden Einfluss auf die Rechengenauigkeit erhalten.

Spektrale Belagskorrekturen Im vorliegenden Emissionsmodell erfolgt die Belagskorrektur im A-Pegel, obwohl diese z.B. bei Drainbelag eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit zeigt. Nicht zuletzt im Hinblick auf Untersuchungen zur subjektiven Störwirkung verschiedenartiger Beläge wäre die Einführung einer spektralen Belagskorrektur wichtig.

Modellierung der Schallausbreitung über Drainbelag Erste Vorversuche haben gezeigt, dass sich das Reflexions- bzw. Absorptionsverhalten von Drainbelag nicht mit dem in SonRoad verwendeten Bodenimpedanzmodell gemäss Delany und Bazley, basierend auf einem Strömungswiderstand, beschreiben lässt. Ein noch zu entwickelndes, verfeinertes Bodenimpedanzmodell würde insbesondere für Empfangspunkte nahe der Strasse mit Drainbelag zuverlässigere Prognosen erlauben.

Meteoeinfluss auf den Bodeneffekt SonRoad berücksichtigt einen Meteoeinfluss lediglich bei der Hinderniswirkung. Als Folge der gekrümmten Schallausbreitung bei nichtneutraler Temperaturschichtung und/oder Wind verändert sich aber auch das Interferenzmuster zwischen Direktschall und Bodenreflexion (Schalllaufzeiten, Reflexionswinkel), sodass ein meteoabhängiger Bodeneffekt resultiert. Im Rahmen eines vom ASTRA finanzierten Forschungsprojekts wird ein spezielles Strassenlärmmodell für grosse Abstände entwickelt.

Meteoeinfluss bei hinderlichen Ausbreitungsbedingungen SonRoad unterscheidet zwischen neutralen und förderlichen Ausbreitungsbedingungen. Bisher existieren im Modell keine Instrumente, um für die Schallausbreitung hinderliche Ausbreitungsbedingungen (Schattenzonen) rechnerisch zu berücksichtigen. Dies wäre im Hinblick auf Vergleiche mit Messungen, die gerne tagsüber bei Sonnenschein (entsprechend hinderlichen Bedingungen) durchgeführt werden, besonders wünschenswert.

Mehrfachreflexionen SonRoad erlaubt nur die Behandlung von Einfachreflexionen, d.h. Schallausbreitungspfade, die mehr als eine Reflexion beinhalten, werden ignoriert. Zwischen parallel stehenden vertikalen Strukturen (z.B. in Strassenschluchten) können Mehrfachreflexionen durchaus pegelrelevant werden. Es wäre zu prüfen, inwiefern mit einer Modellerweiterung solche Situationen behandelbar werden.

Echte 3D Simulation SonRoad untersucht das Terrain und reflektierende Strukturen lediglich im Schnitt. Mit einer echten dreidimensionalen Analyse könnten automatisch auch Reflexionen berechnet werden, deren Ausbreitung nicht in der Vertikalebene durch die Quelle und den Empfänger verlaufen. Überdies wäre eine Berücksichtigung der Beugung an vertikalen Kanten möglich.

A Konformitätserklärung zur Implementierung von SonRoad

Konformitätserklärung zur Implementierung von SonRoad

Grundlagen:

SonRoad: Modell zur Berechnung von Strassenverkehrslärm, BUWAL 2003.

LSV: Lärmschutzverordnung vom 3. Juli 2001.

	ja	ingeschr.	nein
In der Referenzeinstellung kann der Beurteilungspegel von Strassenverkehrslärm an einem oder mehreren Immissionspunkten errechnet werden und zwar			
getrennt für Tag (06-22) und Nacht (22-06)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
unter Berücksichtigung von mehreren Quellen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
unter Berücksichtigung der Anz. Personen- und Lastwagen (SonRoad Gl. 3.29)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
unter Berücksichtigung der verkehrsmengenabhängigen Korrektur K1 (LSV, Anhang 3; bzw. SonRoad Gl. 3.32)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
unter Berücksichtigung, ob sich der Empfangspunkt im Freien oder im offenen Fenster befindet (SonRoad Gl. 3.30)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
wahlweise für neutrale oder förderliche Ausbreitungsbed. (SonRoad Gl. 3.15)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der Referenzeinstellung werden die Quellenpolygonzüge geeignet diskretisiert			
in Punktquellen im Abstand von 5 m	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
auf einer Höhe von 0.45 m über der Strassenoberfläche	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der Referenzeinstellung wird die Quellenleistung der Punktquellen bestimmt unter Berücksichtigung			
der effektiv gefahrenen Geschwindigkeit der Personen- und Lastwagen (SonRoad Gl. 3.3, 3.4)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
einer allfälligen Steigungskorrektur (SonRoad Gl. 3.1)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
einer allfälligen Belagskorrektur (SonRoad Tabelle 3.2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der Referenzeinstellung wird im Vertikalschnitt die Ausbreitungsdämpfung von jedem Quellenpunkt zum Empfängerpunkt in Terzen bestimmt			
indem alle relevanten Schallpfade zw. Quelle und Empfänger gesucht werden	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
indem für jeden relevanten Schallpfad folgende Dämpfungsterme berücksichtigt werden			
Geometrische Verdünnung (SonRoad Gl. 3.10)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Luftdämpfung (SonRoad Gl. 3.11)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bodeneffekt, Hinderniswirkung und Reflexionen unter Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit, der Grösse der Reflektorflächen und allfälliger Reflexionsverluste an Wänden (SonRoad Gl. 3.28)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Dämpfung beim Schalldurchgang durch Vegetation (SonRoad Tabelle 3.8)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
indem die Beiträge aller Schallpfade unter Berücksichtigung eines Kohärenzverlustfaktors phasenrichtig aufaddiert werden (SonRoad Gl. 3.25)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
In der Referenzeinstellung werden die Beiträge aller Quellen energetisch zum Immissionspegel aufaddiert (SonRoad Gl. 3.29)			
In der Referenzeinstellung werden die im Dokument SonRoad aufgeführten Benchmarksituationen auf 0.2 dB genau reproduziert			

Tabelle A.1: Konformitätserklärung betreffend die Implementierung des Formelwerkes SonRoad.

B Mit SonRoad berechnete Benchmark-Situationen

B.1 Punkt-Punkt Ausbreitung

In der Folge werden 13 zweidimensionale Testfälle aufgelistet mit den durch den Algorithmus zu findenden relevanten Pfaden zwischen Quellen- und Empfangspunkt sowie den Terzbandwerten des Terms $A_{gr/\bar{bar}/refl}$ für förderliche Bedingungen. Die Situationen werden jeweils durch folgende exemplarische Beschreibung definiert:

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: n.n n.n

Empfängerkoordinaten [X Z]: n.n n.n

Anzahl Terrainsegmente: n

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: n.n n.n n.n n.n n

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: n.n n.n n.n n.n n

Es wird ein zweidimensionales x, z -Koordinatensystem vorausgesetzt. Nach Spezifikation der x - bzw. z -Koordinaten der Quelle und des Empfängers und Angabe der Anzahl definierter Terrainsegmente folgt die Liste der Terrainsegmente. Jede Zeile steht für ein Segment, das durch seine beiden Endpunkte gegeben ist. Der Schlusspunkt eines Segments ist identisch mit dem Startpunkt des folgenden Segments. Neben den Endpunkten erhält die Segmentdefinition eine Angabe des Strömungswiderstandes (Bodensegmente) bzw. im Fall einer Zahl < 30 die Angabe des Reflexionsverlusts in dB (Nicht-Bodensegmente).

Testfall 1

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 5.0 -4.55

Empfängerkoordinaten [X Z]: 16.0 -1.5

Anzahl Terrainsegmente: 8

```
Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 3.7 2.7 1.0 0.0 0
Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 1.0 0.0 1.0 -5.0 4
Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 1.0 -5.0 10.0 -5.0 20000
Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.0 -5.0 10.0 -0.5 8
Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.0 -0.5 10.6 -0.5 8
Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.6 -0.5 10.6 -4.0 8
Segment 7 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.6 -4.0 20.0 -4.0 20000
Segment 8 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 20.0 -4.0 20.0 -1.6 0
```

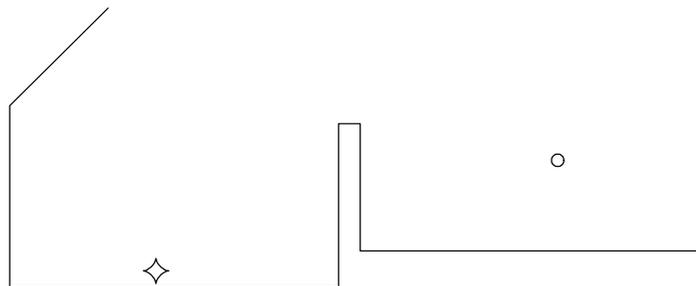


Abbildung B.1: Situation zum Testfall 1. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 1, 2, 3, 7, 8.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.1.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
4.62	6.23	6.84	5.95	5.16	5.75	7.63	7.70
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
7.47	6.61	5.97	5.98	6.12	5.43	5.00	4.60
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
4.65	4.60	4.60	4.61	4.74	4.52	4.62	4.67

Tabelle B.1: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 1.

Testfall 2

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 0.0 3.0

Empfängerkoordinaten [X Z]: 50.0 5.0

Anzahl Terrainsegmente: 7

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -10.0 0.0 10.0 2.0 20000

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.0 2.0 11.0 7.0 300

Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 11.0 7.0 12.0 2.0 300

Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 12.0 2.0 22.0 1.0 300

Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 22.0 1.0 23.0 8.0 300

Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 23.0 8.0 24.0 0.0 300

Segment 7 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 24.0 0.0 60.0 0.0 300



Abbildung B.2: Situation zum Testfall 2. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 1, 7.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.2.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
8.11	13.51	18.92	14.69	13.80	16.65	12.38	11.04
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
19.64	17.29	15.05	15.79	15.44	16.22	17.08	16.70
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
16.28	17.13	16.49	17.08	17.08	17.12	18.46	17.14

Tabelle B.2: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 2.

Testfall 3

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 8.0 1.0

Empfängerkoordinaten [X Z]: 16.0 -3.0

Anzahl Terrainsegmente: 9

```
Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -5.0 5.0 0.0 5.0 300
Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 0.0 5.0 0.0 0.0 300
Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 0.0 0.0 10.0 0.0 20000
Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.0 0.0 10.0 -5.0 300
Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.0 -5.0 11.0 -5.0 300
Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 11.0 -5.0 12.0 -5.0 300
Segment 7 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 12.0 -5.0 25.0 -5.0 300
Segment 8 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 25.0 -5.0 28.0 3.0 300
Segment 9 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 28.0 3.0 35.0 3.0 300
```

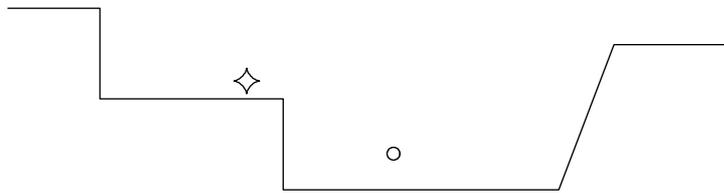


Abbildung B.3: Situation zum Testfall 3. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 2, 5, 6, 7, 8.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.3.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
2.53	3.57	2.62	-0.59	-2.22	-1.39	2.15	-1.27
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
0.43	-0.84	-0.14	0.01	0.06	-0.31	-0.01	-0.08
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
0.01	-0.05	0.01	-0.06	0.21	0.03	0.02	0.09

Tabelle B.3: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 3.

Testfall 4

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: -1.0 5.0

Empfängerkoordinaten [X Z]: 8.0 -6.0

Anzahl Terrainsegmente: 10

Segment	X1	Z1	X2	Z2	sigma
1	-11.0	4.0	-10.0	4.0	20000
2	-10.0	4.0	-9.5	9.0	20000
3	-9.5	9.0	-9.0	4.0	2
4	-9.0	4.0	10.0	4.0	20000
5	10.0	4.0	10.5	9.0	20000
6	10.5	9.0	11.0	4.0	20000
7	11.0	4.0	11.0	2.0	20000
8	11.0	2.0	-10.0	2.0	300
9	-10.0	2.0	-10.0	-8.0	2
10	-10.0	-8.0	15.0	-8.0	300

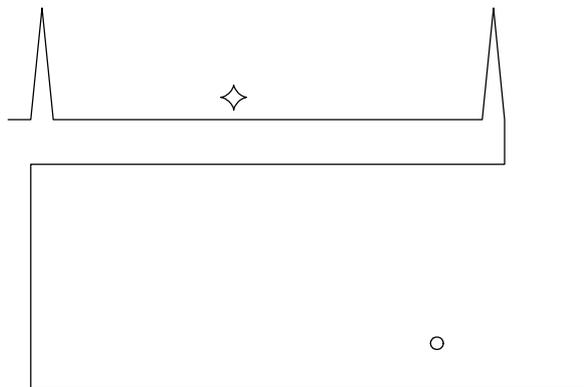


Abbildung B.4: Situation zum Testfall 4. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 3, 4, 9, 10.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.4.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
17.50	16.09	13.32	12.57	16.09	22.05	19.08	17.97
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
15.34	13.38	13.92	19.14	14.12	16.57	14.33	15.44
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
15.39	16.47	15.34	15.98	15.65	16.57	15.86	16.58

Tabelle B.4: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 4.

Testfall 5

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: -5.0 3.5

Empfängerkoordinaten [X Z]: 40.0 2.0

Anzahl Terrainsegmente: 2

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -10.0 0.0 5.0 -1.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 5.0 -1.0 50.0 1.0 300



Abbildung B.5: Situation zum Testfall 5. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 1, 2.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.5.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-5.68	-5.45	-5.10	-4.57	-3.70	-2.35	-0.56	1.73
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
4.68	6.38	2.09	-1.60	-3.12	-1.72	3.25	-1.51
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-1.34	-0.54	-0.26	-1.45	-1.05	-1.74	-0.99	-1.61

Tabelle B.5: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 5.

Testfall 6

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 0.0 1.0

Empfängerkoordinaten [X Z]: 100.0 1.5

Anzahl Terrainsegmente: 7

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-20.0	0.0	10.0	0.0	300
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	0.0	38.0	0.0	300
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	38.0	0.0	39.0	0.0	300
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	39.0	0.0	40.0	0.0	300
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	40.0	0.0	41.0	0.0	300
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	41.0	0.0	43.0	0.0	300
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	43.0	0.0	110.0	0.0	300



Abbildung B.6: Situation zum Testfall 6. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.6.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-5.86	-5.76	-5.60	-5.33	-4.88	-4.14	-2.92	-0.95
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
2.19	6.82	11.76	12.96	11.21	8.59	5.88	3.34
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.04	-0.99	-2.71	-4.02	-4.73	-4.50	-2.88	-0.24

Tabelle B.6: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 6.

Testfall 7

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: -5.0 4.5

Empfängerkoordinaten [X Z]: 26.0 7.0

Anzahl Terrainsegmente: 10

```
Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -10.0 3.0 7.0 3.0 300
Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 7.0 3.0 7.0 -5.0 300
Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 7.0 -5.0 10.0 -5.0 300
Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.0 -5.0 10.0 -2.0 300
Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.0 -2.0 15.0 -2.0 300
Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 15.0 -2.0 15.0 -5.0 300
Segment 7 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 15.0 -5.0 35.0 -5.0 300
Segment 8 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 35.0 -5.0 35.0 5.0 300
Segment 9 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 35.0 5.0 30.0 5.0 300
Segment 10 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 30.0 5.0 30.0 5.5 300
```

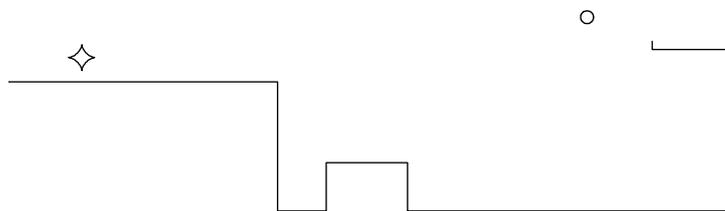


Abbildung B.7: Situation zum Testfall 7. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 1, 5, 7, 8, 10.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.7.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-1.73	-2.19	-3.92	-1.58	-1.74	-1.40	0.57	1.82
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
3.19	2.86	0.32	-1.94	-2.15	0.96	0.61	-1.94
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.01	-1.06	-1.33	-0.71	-0.45	-1.34	-1.03	-1.41

Tabelle B.7: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 7.

Testfall 8

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: -5.0 4.5

Empfängerkoordinaten [X Z]: 30.0 2.0

Anzahl Terrainsegmente: 7

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -10.0 3.0 7.0 3.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 7.0 3.0 7.0 -5.0 300

Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 7.0 -5.0 15.0 -5.0 300

Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 15.0 -5.0 15.0 -2.0 300

Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 15.0 -2.0 25.0 -2.0 300

Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 25.0 -2.0 25.0 -5.0 300

Segment 7 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 25.0 -5.0 35.0 -5.0 300

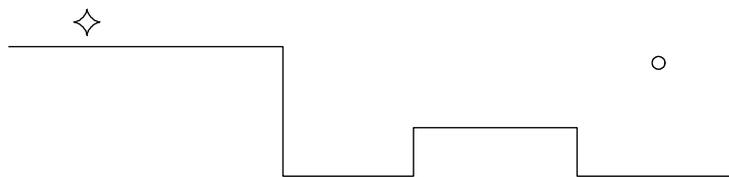


Abbildung B.8: Situation zum Testfall 8. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 5, 7.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.8.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-1.09	0.56	2.63	1.61	1.36	-1.02	-1.87	0.27
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
0.76	-1.09	0.55	-0.22	-0.16	0.03	-0.22	-0.01
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
0.37	-0.04	-0.03	-0.16	-0.09	-0.08	0.18	0.03

Tabelle B.8: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 8.

Testfall 9

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 2.0 1.0

Empfängerkoordinaten [X Z]: 20.0 5.0

Anzahl Terrainsegmente: 6

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 0.0 0.0 3.0 0.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 3.0 0.0 3.5 4.0 300

Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 3.5 4.0 12.0 0.0 300

Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 12.0 0.0 12.0 10.0 300

Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 12.0 10.0 13.0 0.0 300

Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 13.0 0.0 30.0 0.0 300

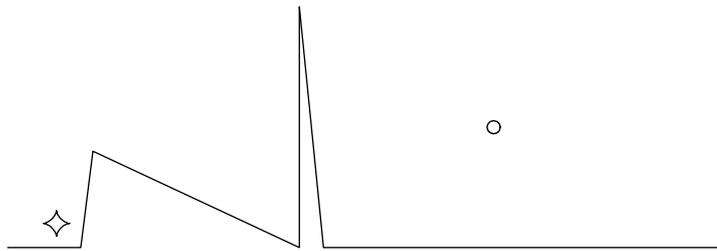


Abbildung B.9: Situation zum Testfall 9. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 1, 6.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.9.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
10.90	16.85	19.90	19.68	15.52	15.95	14.72	17.62
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
16.35	15.21	15.83	17.46	16.14	15.93	17.40	17.24
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
17.39	17.45	18.40	18.99	18.19	17.92	18.65	19.83

Tabelle B.9: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 9.

Testfall 10

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 1.0 2.0

Empfängerkoordinaten [X Z]: 6.0 2.0

Anzahl Terrainsegmente: 7

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	0.0	0.0	3.0	0.0	300
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.0	0.0	3.0	4.0	300
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.0	4.0	3.5	4.0	300
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.5	4.0	3.5	0.0	300
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.5	0.0	12.0	0.0	300
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	12.0	0.0	12.0	10.0	300
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	12.0	10.0	8.0	14.0	300

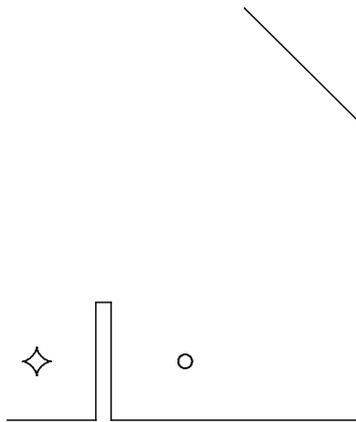


Abbildung B.10: Situation zum Testfall 10. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 1, 5, 6, 7.
Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.10.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
16.56	13.16	8.39	7.96	10.10	15.82	10.61	16.56
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
13.75	15.09	16.97	17.94	16.86	19.00	18.00	14.98
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
16.80	19.84	17.96	17.18	17.50	19.32	18.54	18.92

Tabelle B.10: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 10.

Testfall 11

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 6.0 0.45

Empfängerkoordinaten [X Z]: 25.0 14.0

Anzahl Terrainsegmente: 4

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -5.0 5.0 0.0 5.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 0.0 5.0 2.0 0.0 300

Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 2.0 0.0 20.0 0.0 20000

Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 20.0 0.0 30.0 0.0 300

○



Abbildung B.11: Situation zum Testfall 11. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 2, 3, 4.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.11.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-6.85	-4.73	-5.00	-5.51	-4.00	-2.80	-1.33	2.11
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
8.10	1.39	-3.72	-5.70	-2.99	1.84	-5.06	0.77
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-3.36	-3.14	-2.20	-3.21	-2.33	-3.12	-2.51	-2.25

Tabelle B.11: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 11.

Testfall 12

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 5.0 -4.55

Empfängerkoordinaten [X Z]: 16.0 -1.5

Anzahl Terrainsegmente: 8

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.7	2.7	1.0	0.0	0
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	1.0	0.0	1.0	-5.0	4
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	1.0	-5.0	10.0	-5.0	20000
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	-5.0	10.0	2.5	8
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	2.5	10.6	2.5	8
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.6	2.5	10.6	-4.0	8
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.6	-4.0	20.0	-4.0	20000
Segment 8	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	20.0	-4.0	20.0	-1.6	0

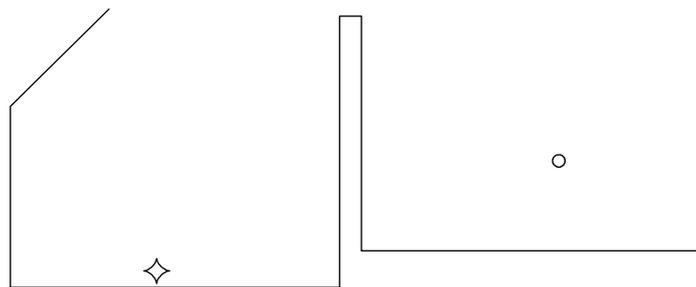


Abbildung B.12: Situation zum Testfall 12. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 1, 2, 3, 7, 8.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.12.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
12.69	12.03	10.20	10.19	13.99	19.31	16.59	17.28
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
16.08	13.84	13.08	17.56	15.37	14.41	15.17	15.78
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
14.86	14.40	15.81	15.65	15.72	15.48	14.81	14.10

Tabelle B.12: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 12.

Testfall 13

Kommentarzeile

Quellenkoordinaten [X Z]: 32.0 0.45

Empfängerkoordinaten [X Z]: 70.0 3.0

Anzahl Terrainsegmente: 8

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	0.0	2.5	4.7	2.5	300
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	4.7	2.5	4.7	5.5	1
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	4.7	5.5	5.0	5.5	1
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	5.0	5.5	5.0	2.5	1
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	5.0	2.5	7.5	0.0	300
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	7.5	0.0	25.0	0.0	300
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	25.0	0.0	35.0	0.0	20000
Segment 8	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	35.0	0.0	80.0	0.0	300



Abbildung B.13: Situation zum Testfall 13. Der Rhombus markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

relevante Pfade: Direktschall, Reflexion an den Segmenten 4, 7, 8.

Für die Dämpfungswerte siehe Tabelle B.13.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-5.81	-5.72	-5.59	-5.40	-5.11	-4.69	-4.09	-3.25
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-2.11	-0.68	0.99	2.73	4.17	4.40	2.86	0.51
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-1.62	-2.99	-3.07	-0.78	3.78	-1.76	-2.90	0.40

Tabelle B.13: Terzbandwerte des Dämpfungsterms $A_{gr/bar/refl}$ für förderliche Bedingungen zur Beschreibung des Bodeneffekts, der Hinderniswirkung und allfälliger Reflexionen für den Testfall 13.

B.2 Lange gerade Strasse

Es wird von einer 4 m breiten und 1000 m langen Strasse ausgegangen. Die Strasse weist einen Strömungswiderstand $\sigma = 20'000$ Rayl auf. In der Mitte der Strasse verkehren pro Stunde 1000 Personen- und 100 Lastwagen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h. An die Strasse grenzt eine ebene Bodenfläche mit einem σ von 300 Rayl an. Zwei Empfangspunkte liegen in 100 m Abstand auf halber Länge der Strasse auf einer Höhe von 3 bzw. 10 m über Boden. Die Tabellen B.14 und B.15 zeigen die sich ergebenden Terzbandpegel (ohne A-Bewertung).

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-99.9	-99.9	-99.9	61.1	57.3	55.6	53.7	50.2
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
46.4	42.7	40.2	39.4	40.9	43.2	45.0	45.6
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
43.9	41.7	41.8	42.5	38.5	-99.9	-99.9	-99.9

Tabelle B.14: Unbewertete Terzbandwerte des Immissionspegels am Empfänger auf 3 m über Boden für den Testfall lange gerade Strasse. Der A-Pegel ergibt sich zu 55.1 dB(A).

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-99.9	-99.9	-99.9	60.6	56.9	55.4	54.0	51.8
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
49.8	47.9	46.3	45.0	45.9	48.3	50.7	51.6
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
49.5	46.1	43.7	40.5	35.5	-99.9	-99.9	-99.9

Tabelle B.15: Unbewertete Terzbandwerte des Immissionspegels am Empfänger auf 10 m über Boden für den Testfall lange gerade Strasse. Der A-Pegel ergibt sich zu 59.0 dB(A).

C Mögliche Strategie zum Auffinden der relevanten Schallpfade

C.1 Allgemeines

Es wird angenommen, dass das Terrain inklusive Reflektoren und allfälliger Hindernisse als Schnitt in Form eines Polygonzugs bestehend aus jeweils geraden Segmenten dargestellt ist. Jedes Segment ist entweder ein Bodensegment oder ein Reflektorsegment. Die akustischen Eigenschaften der Bodensegmente werden durch einen Strömungswiderstand beschrieben. Die Reflektorsegmente werden durch einen Reflexionsverlust bzgl. einer vollständigen Reflexion an einer harten Fläche beschrieben. Der Polygonzug setzt sich aus n Segmenten zusammen wobei jeweils der Endpunkt des Segments mit Nummer i mit dem Anfangspunkt des Segmentes $i + 1$ zusammenfällt. Der Quellenpunkt liege über dem Segment $i_{\text{Quellensegment}}$, der Empfänger über dem Segment $i_{\text{Empfängersegment}}$. Ein ebenes aber hinsichtlich der Bodenbeschaffenheit inhomogenes Bodenstück wird durch mehrere Segmente mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften beschrieben. Ein Hindernis führt zwingend zu einer Unterteilung des Segments, auf dem es steht. Die Abbildung C.1 zeigt ein Beispiel eines Terrainverlaufs.

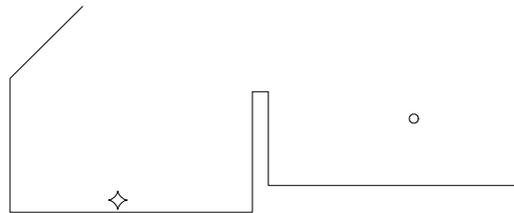


Abbildung C.1: Beispiel eines Terrainverlaufs. Der Stern markiert die Quelle, der Kreis den Empfänger.

Für die Ermittlung der relevanten Pfade wird eine Terrain-Hilfslinie benötigt, die knapp (z.B. 0.001 m) unterhalb, bzw. neben der echten Terrainlinie verläuft (Abbildung C.2).

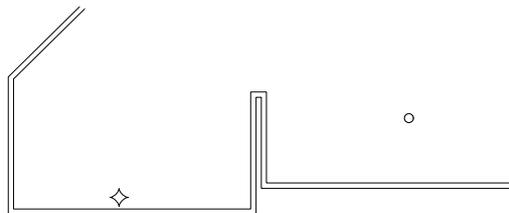


Abbildung C.2: Beispiel des Terrainverlaufs aus Abbildung C.1 mit dazu konstruierter Terrainhilfslinie. Zur Illustration ist der Abstand zur Terrainhilfslinie übertrieben gross gewählt worden.

Die Prozedur zum Auffinden der relevanten Pfade gliedert sich in fünf Schritte:

1. Suche des Direktschallpfades
2. Konstruktion der möglichen Reflexionspfade
3. erstes Ausscheiden der ungültigen Reflexionspfade
4. allfällige Begradigung der Reflexionspfade
5. zweites Ausscheiden der ungültigen Reflexionspfade

C.2 Suche des Direktschallpfades

Bei der Suche des Direktschallpfades wird der unten beschriebene iterative Prozess abgearbeitet. Dazu wird ein variabler Hilfspunkt S' eingeführt.

1. Der Hilfspunkt S' wird mit dem Quellenpunkt gleichgesetzt.
2. Von S' aus wird geprüft, ob freie Sicht auf den Empfänger besteht. Dieser Test wird durch Kontrolle von Schnittpunkten mit den Hilfslinien der Segmente, die zwischen Quelle und Empfänger liegen durchgeführt, d.h. $i_{\text{Quellensegment}} < i < i_{\text{Empfängersegment}}$. Dabei wird vorausgesetzt, dass ein Segment, das nicht zwischen Quelle und Empfänger liegt, kein Hindernis darstellen kann. Wenn freie Sicht besteht, wird der iterative Prozess verlassen.
3. Es wird der Terrainsegment-Endpunkt T_i mit dem höchsten Index i gesucht, für welchen *freie Verbindung* zu S' besteht. Die *freie Verbindung* wird mit dem Kriterium geprüft, dass die Strecke $S' \rightarrow T_i$ die Terrainhilfslinie nicht schneiden darf. Diese Suche wird nur mit den Segmenten, die zwischen Quelle und Empfänger liegen durchgeführt, d.h. $i_{\text{Quellensegment}} < i < i_{\text{Empfängersegment}}$. Es muss ausgeschlossen werden, dass der Pfad um den ersten bzw. letzten Terrainpolygonpunkt herum führt.
4. T_i wird zum neuen Hilfspunkt S' .
5. Sprung zu Schritt 2.

Der oben beschriebene iterative Prozess wird mit dem Ausstiegskriterium unter Schritt 2 verlassen. Die Folge der Hilfspunkte S' beschreibt zusammen mit dem Empfänger den Direktschallpfad (Abbildung C.3).

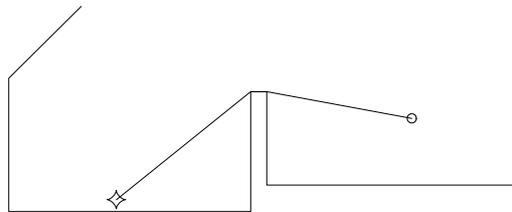


Abbildung C.3: Direktschallpfad im Beispiel aus Abbildung C.1.

C.3 Konstruktion der möglichen Reflexionspfade

Es werden grundsätzlich nur Einfachreflexionen betrachtet. Die möglichen Pfade ergeben sich durch Spiegelung an allen Terrainpolygonsegmenten. Unter der Voraussetzung, dass sich die Quelle über dem Segment $i_{\text{Quellensegment}}$ befinde, wird die Reflexion am Segment j wie folgt gefunden:

1. Die Quelle wird an der Segmentgeraden j gespiegelt.
2. Alle Segmente, die zwischen j (exklusive) und $i_{\text{Quellensegment}}$ (inklusive) liegen, werden inklusive der Hilfslinien an der Segmentgeraden j gespiegelt. Die Originalsegmente bleiben erhalten.
3. Die Segmente werden neu durchnummeriert, beginnend mit dem unter der gespiegelten Quelle befindlichen Segment und endend mit dem unter dem Empfänger liegenden Segment. Man beachte, dass teilweise die Start- und Endpunkte der Segmente durch die Spiegelung vertauscht werden. Die weitere Verarbeitung basiert auf diesem neuen Terrain.
4. Das Segment j wird eliminiert, sodass in der Regel ein *Loch* entsteht. In der so entstandenen, teilweise gespiegelten Situation wird analog der oben beschriebenen Suche des Direktschalls der Schallpfad bestimmt (siehe Abbildung C.4). Wie im Falle des Direktschalls muss verhindert werden, dass der Pfad um den ersten bzw. letzten Polygonendpunkt herum führt, allerdings nur, wenn die Reflexion nicht am ersten bzw. letzten Terrainsegment stattfindet. Der gefundene Schallpfad weist mit dem Lochsegment j einen Schnittpunkt auf, der innerhalb des Segments, auf einem Endpunkt oder ausserhalb liegen kann.

Die Abbildung C.4 zeigt exemplarisch einen konstruierten Reflexionspfad in der Spiegelformdarstellung.

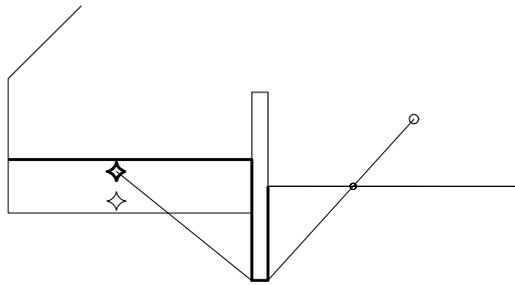


Abbildung C.4: Beispiel eines konstruierten Reflexionspfades. Die dünne Linie zeigt das Originalterrain, die dicke Linie zeigt den relevanten Terrainverlauf in der Spiegelform und den Reflexionspfad.

C.4 Erstes Ausscheiden der ungültigen Reflexionspfade

Von den oben gefundenen Reflexionspfaden werden die ungültigen ausgeschieden. Ein gültiger Pfad muss in seiner gespiegelten Form folgende drei Bedingungen erfüllen:

1. Wenn das Reflektorsegment zwischen dem Quellen- und Empfängersegment liegt, muss der durch Spiegelung am Terrainsegment j entstandene Pfad das Terrainsegment j schneiden oder durch einen der beiden Segmentendpunkte verlaufen.
2. Der durch Spiegelung am Terrainsegment j entstandene Pfad bilde mit dem Terrainsegment j bzw. mit der zugehörigen Geraden den Schnittpunkt P . Dann muss gelten:
 - Der von P aus gesehen quellseitig liegende Pfadabschnitt muss von der Quelle aus gesehen zuerst die nichtgespiegelte Terrainhilfslinie des Terrainsegments j und erst dann das Terrainsegment j schneiden.
 - Der von P aus gesehen empfängerseitig liegende Pfadabschnitt muss vom Empfänger aus gesehen zuerst das Terrainsegment j und erst dann die nichtgespiegelte Terrainhilfslinie des Terrainsegments j schneiden.
3. Der durch Spiegelung am Terrainsegment j entstandene Pfad darf keinen Abschnitt enthalten, der mit dem Terrainsegment j identisch ist.

C.5 Allfällige Begradigung der Reflexionspfade und Bestimmung der Reflexionspunkte

Wenn der durch Spiegelung am Terrainsegment j entstandene Pfad durch einen der beiden Endpunkte des Segments j verläuft, muss der Pfad *begradigt* werden. In diesem Fall liegt der Reflexionspunkt nicht auf dem für die Spiegelung verantwortlichen Terrainsegment. Die Reflexion wird aber vorerst gleichwohl weiterverfolgt und erst beim Vergleich mit der Fresnelzone entsprechend abgeschwächt. Die Begradigung erfolgt durch Weglassen des mit dem Segmentendpunkt (Lochendpunkt) zusammenfallenden Pfadpunktes, d.h. es wird eine direkte Verbindung zwischen den beiden benachbarten Pfadpunkten gezogen. Der virtuelle Reflexionspunkt ergibt sich als Schnittpunkt des begradigten Pfadabschnitts mit der zum Terrainsegment j gehörenden Geraden.

Wenn keine Begradigung vorgenommen werden muss, ergibt sich der Reflexionspunkt, indem die Segmentgerade mit allen Pfadabschnitten geschnitten wird und jener Punkt gesucht wird, der innerhalb des Terrainsegments j liegt, bzw. von den Endpunkten den kleinsten Abstand aufweist. Wenn kein Schnittpunkt zwischen der Segmentgeraden und einem Pfadabschnitt existiert, wird der Pfad verworfen.

C.6 Zweites Ausscheiden der ungültigen Reflexionspfade

Nach der allfälligen Begradigung der Reflexionspfade muss ein letzter Test auf Gültigkeit durchgeführt werden:

- Der Pfad in seiner Spiegelform darf keine *zick-zack* Linie bilden, d.h. er muss konkav bzw. konvex sein. Dieser Test kann z.B. mittels Vektorprodukten durchgeführt werden. Dabei müssen die z -Komponenten des Vektorprodukts von aufeinanderfolgenden Pfadabschnitten alle gleiches Vorzeichen haben.

Mit der Einhaltung dieses Tests wird sichergestellt, dass sich die Hinderniswirkung der verbleibenden Pfade konform nach ISO 9613-2 bestimmen lässt.

Die Abbildung C.5 zeigt für das Terrainbeispiel aus Abbildung C.1 alle relevanten Schallpfade.

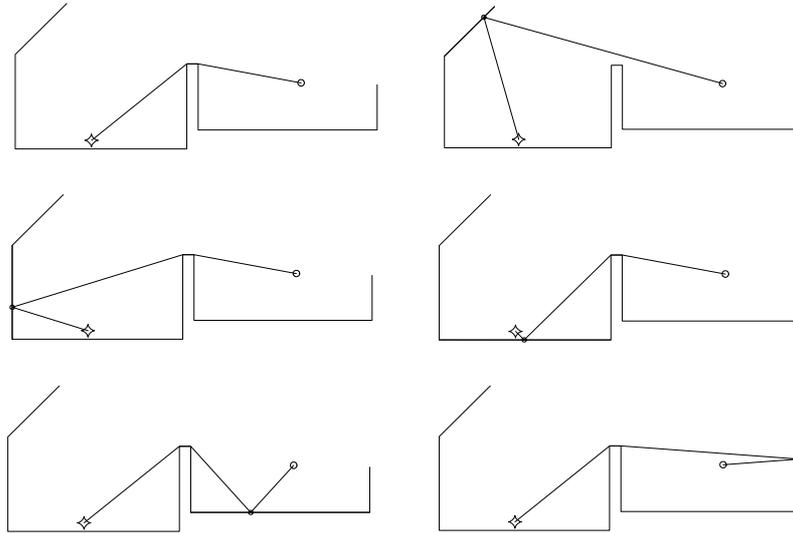


Abbildung C.5: Relevante Schallpfade in Reflexionsform für das Terrainbeispiel aus Abbildung C.1.

D Komplexe Darstellung von sinusförmigen Grössen

Sinusförmige Wechselgrössen können als Zeiger in der komplexen Ebene dargestellt werden. Der Zeiger hat entsprechend der Amplitude eine fixe Länge und rotiert entsprechend der Kreisfrequenz mit konstanter Winkelgeschwindigkeit im Gegenuhrzeigersinn (mathematisch positiver Drehsinn). Die Spitze des Zeigers markiert eine komplexe Zahl, wobei deren Imaginärteil die sinus-Funktion der Wechselgrösse beschreibt (Abbildung D.1).

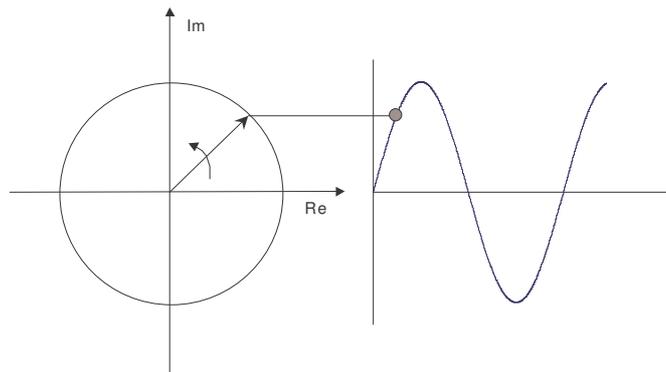


Abbildung D.1: Darstellung einer sinusförmigen Wechselgrösse als Imaginärteil eines rotierenden Zeigers in der komplexen Ebene.

Die Wechselgrösse p :

$$p(t) = \hat{p} \sin(\omega t + \phi) \quad (\text{D.1})$$

wird auf den Zeiger \underline{p} abgebildet:

$$\underline{p}(t) = \hat{p} e^{j\omega t + \phi} \quad (\text{D.2})$$

E Numerische Auswertung von wofz(z) (Errorfunktion)

Pascal (Delphi) Notation:

```
procedure wofz(z:complex; var out:complex);
{  procedure to calculate the function  $w(z) = \exp(-z^2)*\operatorname{erfc}(-iz)$ 
  where erfc is the complex errorfunction.
  Algorithm according to
  Collected Algorithms from ACM no. 363
  REF: W. Gautschi, Efficient computation of the complex error function
  SIAM J. Numer. Anal. v.7, no.1, 1970. }
var  x,y,real,im : real;
     capn,nu,n,np1 : integer;
     h,h2,lambda,r1,r2,s,s1,s2,t1,t2,c : real;
     b : boolean;
     quadrant : integer;
begin
  x := z.r;  y := z.i;
  { the original algorithm works only in the first quadrant.
    here it is extended for the 4. quadrant by using
    the relations  $w(z') = w(-z)'$  and  $w(-z) = 2*\exp(-2^2)-w(z)$ 
    where ' means conj. complex }
  if y >= 0.0 then quadrant := 1 else quadrant := 4;
  if quadrant = 4 then y := -y;

  { start of the original algorithm }
  if ((y < 4.29) and (x < 5.33)) then
  begin
    s := (1.0-y/4.29)*sqrt(1.0-x*x/28.41);
    h := 1.6*s;
    h2 := 2.0*h;
    capn := 6 + round(23.0*s);
    nu := 9 + round(21.0*s);
  end
  else
  begin
    h := 0.0;
    capn := 0;
    nu := 8;
  end;
  if h > 0.0 then lambda := exp(capn*ln(h2));
  b := ((h = 0) or (lambda = 0));
  r1 := 0.0;
  r2 := 0.0;
  s1 := 0.0;
  s2 := 0.0;
  for n := nu downto 0 do
  begin
    np1 := n+1;
    t1 := y+h+(np1*r1);
    t2 := x-(np1*r2);
    c := 0.5/(t1*t1 + t2*t2);
    r1 := c*t1;
    r2 := c*t2;
```

```

    if ((h > 0) and (n <= capn)) then
    begin
        t1 := lambda+s1;
        s1 := r1*t1 - r2*s2;
        s2 := r2*t1 + r1*s2;
        lambda := lambda/h2;
    end;
end;
if (y = 0) then re := exp(-x*x) else
begin
    if b = true then re := 1.12837916709551*r1 else
        re := 1.12837916709551*s1;
end;
if b = true then im := 1.12837916709551*r2 else
    im := 1.12837916709551*s2;

if quadrant = 4 then
begin
    re := re;
    im := -im;
    re := 2.0*exp(sqr(y)-sqr(x))*cos(2.0*x*y) - re;
    im := 2.0*exp(sqr(y)-sqr(x))*sin(2.0*x*y) - im;
end;

    out.r := re;
    out.i := im;
end; {wofz}

```

Zahlenbeispiele:

```

wofz(0.1 + j0.3) = 7.29337265621325E - 0001 + j6.84103609909243E - 0002
wofz(0.6 - j0.3) = 8.59651234150988E - 0001 + j8.82483015439902E - 0001
wofz(5.1 + j6.4) = 5.41284773433404E - 0002 + j4.24988961431723E - 0002

```

F Abschätzung des Kohärenzverlustparameters

Die Überlagerung der Beiträge der verschiedenen Schallpfade (Direktschall und Bodenreflexionen) erfolgt nicht vollständig kohärent. Mit der Gl. 3.26 wurde weiter oben ein empirischer Ansatz zur Bestimmung des Kohärenzfaktors vorgeschlagen. Die freien Parameter γ_0 und γ sind anhand der viel zitierten Schallausbreitungsmessungen von Parkin und Scholes¹ bzw. den darauf basierenden Auswertungen von Daigle² optimiert. Dabei wurden die Ergebnisse für neutrale Atmosphäre und Windstille herangezogen. Die Abbildung F.1 zeigt die gute Reproduktion der Messergebnisse durch die Berechnung.

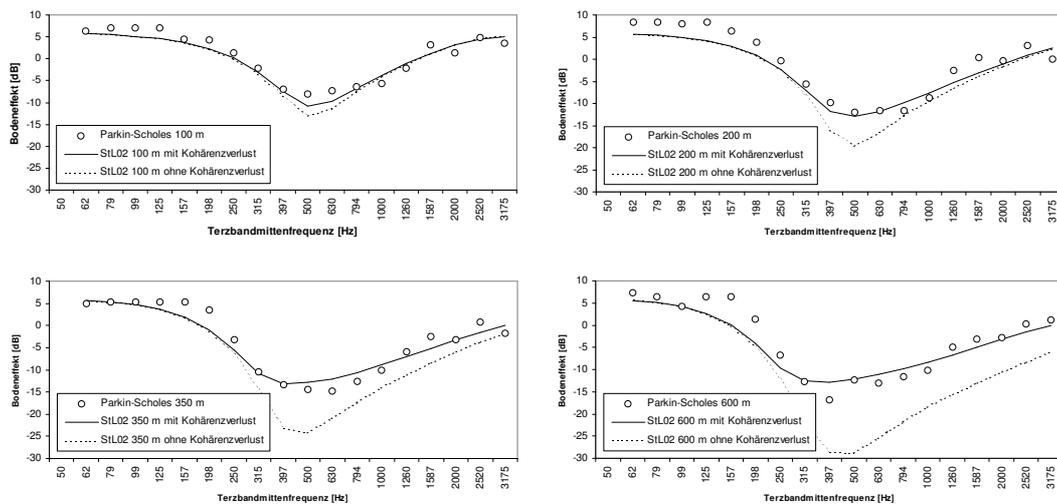


Abbildung F.1: Vergleich der Messdaten des Bodeneffekts nach Parkin und Scholes mit der Berechnung nach SonRoad für Grasboden ($\sigma = 300$ Rayl) mit und ohne Berücksichtigung des Kohärenzverlusts für die Abstände 100 m, 200 m, 350 m und 600 m. Die Quellen- und Empfängerhöhen lagen bei 1.8 bzw. 1.5 m. Alle Werte entsprechen Terzbandpegel.

¹P. H. Parkin, W. F. Scholes, The Horizontal Propagation of Sound From a Jet Engine Close to the Ground at Hatfield, Journal of Sound and Vibration, vol. 2, p.353-374 (1965).

²G. A. Daigle, Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves above a finite impedance boundary, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65, p.45-49 (1979).

G A-Filter Dämpfungen in Terzbändern

Für die A-Bewertung von Terzbandspektren werden die in Tabelle G.1 dargestellten Verstärkungswerte angenommen. Sie wurden für jede Terz aus der A-Filterkurve¹ als Mittelwert über 11 geometrisch verteilte Frequenzpunkte gewonnen. Man beachte, dass sich dadurch geringe Unterschiede gegenüber den A-Bewertungen bei den Terzfiltermittenfrequenzen selbst ergeben können.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-30.3	-26.3	-22.6	-19.2	-16.1	-13.4	-10.9	-8.6
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-6.6	-4.8	-3.2	-1.9	-0.8	0.0	0.6	1.0
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.2	1.3	1.2	1.0	0.5	-0.2	-1.2	-2.5

Tabelle G.1: A-Bewertung für Terzbänder in dB. Positive Werte entsprechen einer Verstärkung, negative Werte einer Abschwächung.

¹IEC 61672-1 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications (2002).

H Fresnelzonenkonzept

Die theoretische Behandlung der Reflexion an einer Fläche lässt sich mathematisch im Frequenzbereich auf das Kirchhoff-Helmholtz Integral zurückführen (H.1).

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

Das den Schalldruck p am Empfangspunkt (x, y, z) beschreibende Integral in Gl. H.1 entspricht der Aufsummation der Beiträge von Monopol- und Dipolquellen, die auf der geschlossenen Hüllfläche S liegen (Sekundärquellen gemäss dem Huygens'schen Prinzip). In vielen Fällen verändert sich die Amplitude bei der Integration über S nur langsam, sodass vereinfachend lediglich die Variation der Phase berücksichtigt werden muss. Eine weitere Vereinfachung ergibt sich, wenn die Phasen den beiden Klassen $+1$ ($0 \dots 180^\circ$) und -1 ($180 \dots 360^\circ$) zugeordnet werden. Dann reduziert sich die phasenrichtige Aufintegration der Beiträge in Gl. H.1 auf Additionen bzw. Subtraktionen der Amplituden. Mit der Normierung, dass die kleinste auftretende Phase zu 0 gesetzt wird, lassen sich die Phasenklassen mit einem Zählparameter n durchnummerieren wobei die Phase der n -ten Klasse im Intervall $(n-1) \times 180^\circ \dots n \times 180^\circ$ liegt. $+1$ -Klassen (positive Beiträge) haben ungerade n , gerade n stehen für -1 -Klassen (negative Beiträge). Ein Gebiet auf der Fläche S , dessen Beiträge innerhalb der n -ten Phasenklasse am Empfangspunkt eintreffen, wird n -te Fresnelzone genannt¹. Die Ausdehnung einer Fresnelzone ist frequenzabhängig im dem Sinne, dass tiefe Frequenzen zu grossen und hohe Frequenzen zu kleinen Zonen führen. Auf einer ebenen Fläche sind die Fresnelzonen im Allgemeinen ellipsenförmige Ringe. Der Schalldruck am Empfangspunkt ergibt sich durch Addition und Subtraktion der zu den Flächen proportionalen Beiträge der aufsteigenden Zonen. Dabei kompensieren sich die Beiträge weitgehend weg, sodass netto lediglich der Anteil der halben ersten Fresnelzone übrigbleibt. Die erste Fresnelzone kann als das für die Reflexion relevante Gebiet interpretiert werden. Wenn der Reflektor so klein ist, dass die erste Fresnelzone nicht Platz findet, reduziert sich der Beitrag entsprechend dem Verhältnis der Reflektorfläche zur Fläche der ersten Fresnelzone.

Bisher wurde angenommen, dass jedes Flächenelement innerhalb einer Fresnelzone einen gleich bedeutenden Anteil an den Schalldruck am Empfänger beisteuert. Tatsächlich erfolgt aber die phasenrichtige Überlagerung nicht über den ganzen Bereich von 180° , sondern angenähert nur über einen Teil davon. Deshalb wird oft als massgebender Bereich für die Reflexion nicht die Zone für einen Weglängenunterschied von $\lambda/2$ (entsprechend 180°) sondern lediglich für $\lambda/4$ eingesetzt.

¹Cremer L., Fresnels Methoden zur Berechnung von Beugungsfeldern, Acustica, vol. 72, p.1-6 (1990).