



## **Bachelorarbeit**

# INTERNATIONALER VERGLEICH VON BERECHNUNGSVERFAHREN DES SCHALLIMMISSIONSPEGELS VON SCHIENENFAHRZEUGEN

zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science

vorgelegt von

**Peter Schindler**

Matr.Nr.: 01526590  
e01526590@student.tuwien.ac.at

Datum: 1. Juni 2020

**Betreuer:** Univ.Ass. Dipl.-Ing. Michael Ostermann, BSc

Institut für Verkehrswissenschaften  
Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/230-2  
A-1040 Wien

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenbeschreibung und Zielsetzung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Berechnungsgrundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Schalltechnische Grundlagen . . . . .	2
2.1.1	Physikalische Einheiten . . . . .	2
2.1.2	Wahrnehmung und Empfindung – Lärm . . . . .	3
2.1.3	Schallausbreitung . . . . .	4
2.2	Ausgewählte Modelle . . . . .	5
2.2.1	Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung Richtlinie Nr. 28 (ÖAL 28) . . . . .	5
2.2.2	Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Schall 03) . . . . .	6
2.2.3	sonRAIL . . . . .	6
2.2.4	New Nordic Prediction Method for Rail Traffic Noise (Nord 2000) . . . . .	6
2.2.5	Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Beschreibung internationaler Modelle</b>	<b>6</b>
3.1	ÖAL 28 [12] . . . . .	6
3.1.1	Anwendungsbereich . . . . .	6
3.1.2	Geometrische Betrachtung . . . . .	7
3.1.3	Modell . . . . .	7
3.1.4	Dämpfung . . . . .	7
3.1.5	Beurteilung . . . . .	9
3.2	Schall 03 [18] . . . . .	10
3.2.1	Anwendungsbereich . . . . .	10
3.2.2	Geometrische Betrachtung . . . . .	10
3.2.3	Modell . . . . .	10
3.2.4	Dämpfung . . . . .	12
3.2.5	Beurteilung . . . . .	14
3.3	sonRAIL [20] . . . . .	14
3.3.1	Anwendungsbereich . . . . .	14
3.3.2	Geometrische Betrachtung . . . . .	14
3.3.3	Modell . . . . .	15
3.3.4	Dämpfung . . . . .	16
3.3.5	Beurteilung . . . . .	18
3.4	Nord 2000 . . . . .	18
3.4.1	Anwendungsbereich . . . . .	18
3.4.2	Geometrische Betrachtung . . . . .	19
3.4.3	Modell . . . . .	19
3.4.4	Dämpfung . . . . .	20
3.4.5	Beurteilung . . . . .	22
3.5	Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual [21] . . . . .	22
3.5.1	Anwendungsbereich . . . . .	22
3.5.2	Geometrische Betrachtung . . . . .	22
3.5.3	Modell . . . . .	23
3.5.4	Dämpfung . . . . .	24
3.5.5	Beurteilung . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Vergleich</b>	<b>25</b>
	<b>Anhang</b>	<b>30</b>

### Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem qualitativen Vergleich von Berechnungsmodellen zur Schallimmissionsberechnung. Dabei werden Modelle aus Österreich, Deutschland, Schweiz, Skandinavien und den Vereinigten Staaten von Amerika betrachtet. Hierzu wird jedes Berechnungsverfahren in den Punkten Anwendungsbereich, geometrische Betrachtung, Modell, Dämpfungen und Beurteilung einzeln aufgeschlüsselt um festzustellen worin die Unterschiede liegen. Für eine optimale Vergleichbarkeit gleichen sich die einzelnen Kapitel in ihrem Aufbau. Das Ergebnis ist eine textliche Zusammenfassung sowie eine tabellarische Aufzählung der wichtigsten Unterscheidungsmerkmale.

## 1 Aufgabenbeschreibung und Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Vergleich von mehreren Normen und Richtlinien zur Schallimmissionsberechnung aufgestellt. Diese beinhalten sowohl die nationalen Bestimmungen aus Österreich, Deutschland und Schweiz, als auch internationale Werke. Ziel ist es diese Dokumente auf deren Inhalt und die Berechnungsmethode zu analysieren und deren Möglichkeiten, Umwelteinflüsse in den Berechnungen zu berücksichtigen. Hierzu werden die einzelnen Werke in ihrer Vielfältigkeit aufgeschlüsselt und anhand eines fiktiven Beispiels verglichen. Das Ergebnis soll einen Aufschluss über existierende Zahlenwerte darstellen

## 2 Berechnungsgrundlagen

### 2.1 Schalltechnische Grundlagen

In diesem Kapitel wird Schall aus physikalischer Sicht und die Subjektivität der Wahrnehmung erläutert. Hierbei setzt sich die Wirkungskette zusammen aus: Sender, Schallträger und Empfänger. Aus Sicht der Physik ist Schall eine Welle die vom Sender (z.B. Lautsprecher, Sprache, Maschinen) über den Schallträger (ein festes, flüssiges oder gasförmiges Medium) an den Empfänger (Ohr, Messgerät) weitergeleitet wird. [15] Hierbei spielt die Masse und Kompressibilität des Mediums eine entscheidende Rolle für die Art und Geschwindigkeit der Wellenausbreitung. [8]

Im Zuge dieser Arbeit wird ausschließlich die Schallübertragung über den Schallträger Luft bearbeitet. In den weiteren Unterkapiteln wird die Definition von Schall und dessen Wahrnehmung näher erläutert.

#### 2.1.1 Physikalische Einheiten

Für schalltechnische Berechnungen sind zwei Begriffe von Bedeutung:

- Frequenz  $f$  in Herz [Hz]
- Schalldruck  $p$  in Pascal [Pa]

Die Frequenz beschreibt hierbei die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde und gibt Aufschluss über die Höhe eines Tons. Welche Einflüsse diese hat und wie diese wahrgenommen werden sind weiter im Kapitel 2.1.2 beschrieben.

Um Luft, oder ein anderes Medium, in Schwingungen zu versetzen – also eine Welle auszulösen – muss ein Druck aufgebracht werden, der sogenannte Schalldruck. Das menschliche Ohr nimmt Schalldrücke von  $2 \cdot 10^{-5} Pa$  bis  $2 \cdot 10^2 Pa$ , also einen Unterschied von sieben Zehnerpotenzen, wahr. Zu bedenken ist die Gesetzmäßigkeit des relativen Höreneindrucks [8], welche im Kapitel 2.1.2 näher beschrieben wird. Dieses Gesetz und die große Reichweite des Hörbereichs empfiehlt eine logarithmische Skala, welche mit Hilfe des Schalldruckpegels ( $L_p$ ) verwirklicht wird. Um mit dieser Skala arbeiten zu können, wird eine Bezugsgröße benötigt, welche mit dem Bezugsschalldruck abgedeckt wird. Dieser entspricht  $2 \cdot 10^{-5} Pa$  und stellt somit in etwa die Hörschwelle des

menschlichen Gehörs dar. In der Gleichung (1) wird der mathematische Zusammenhang zwischen Schalldruck und Schalldruckpegel dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass für die Einheit dB ein Referenzschalldruck von  $2 \cdot 10^{-5} Pa$  benutzt wird. [8]

$$L = 10 \cdot \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Wie schon in der Einführung des Kapitels 2.1 erwähnt, gibt es für den Schall Sender und Empfänger. Hierbei wird beim Aussenden des Schalls von einem Schalleistungspegel gesprochen. Die Referenzschalleistung wird mit  $10^{-12} W$  festgelegt. Abhängig von der angenommenen Ausbreitungsart (siehe Kapitel 2.1.3) muss dieser Leistungspegel mit steigendem Abstand auf eine dementsprechend größere Oberfläche verteilt werden. Dadurch kommt dieser in einem reduzierten Ausmaß beim Empfänger an und wird als Schalldruckpegel bezeichnet. [15]

Weitere Größen, die benötigt werden sind die Schallschnelle ( $v$ ) und die Intensität ( $I$ ). Die Schallschnelle gibt die Geschwindigkeit eines Luftteilchens um die Ruhelage an. Die Intensität entspricht der Multiplikation der Schallschnelle mit dem Schalldruck. [15]

### 2.1.2 Wahrnehmung und Empfindung – Lärm

Aus physikalischer Sicht ist Schall eindeutig formuliert. Der Begriff Lärm hingegen subjektiv und an Wahrnehmungen des menschlichen Gehörs gebunden. Ein gesunder Menschen von etwa 20 Jahren nimmt Frequenzen im Bereich von ca.  $16 Hz$  bis  $16000 Hz$  wahr. Nicht jede Frequenz wird als gleich „laut“ empfunden. Der Mensch nimmt Frequenzunterschiede wahr, jedoch mit der Gesetzmäßigkeit des relativen Höheneindrucks [8]. Möser beschreibt dies in seinem Werk „Technische Akustik“ so:

*„Die Tonhöhenempfindung des Menschen ist nun so beschaffen, dass man die Höhendifferenz zweier Tonpaare dann als gleich hört, wenn das Frequenzverhältnis (und nicht etwa die Frequenzdifferenz) bei beiden Paaren gleich ist.“* [8, S. 3]

Zu sehen ist dies in Normen und Vorschriften in den Oktavbändern in Tab. 3 (siehe Anhang). Zwischen den einzelnen Bändern ist jeweils ein Faktor 2 vorzufinden. Schalltechnische Berechnungen werden für genau diese Bänder durchgeführt, um die Einflüsse auf menschliche Wahrnehmungen kalkulieren zu können. Weiters geht genau diese biologisch vorgegebene Eigenschaft durch den A-bewerteten Schalldruckpegel ein. [15]

Niederfrequente Töne werden im Allgemeinen leiser als hochfrequente Töne empfunden. Daher muss am Ende jeder Berechnung ein Korrekturwert angenommen werden, welcher in Tab. 4 (siehe Anhang) zu finden ist. [8]

Um diesen Zusammenhang noch zu verdeutlichen, wird hier ein Beispiel mit einer Frequenz von  $f = 500 Hz$  und einem Schalldruckpegel von  $L = 60 dB$  angeführt. Die Werte für den Korrekturwert sind aus Tab. 4 (siehe Anhang) zu entnehmen.

$$L_{A,500} = L + \Delta L_{500} = 60 dB - 3,2 dB = 56,8 dB$$

Der Schalldruckpegel wird also lediglich in der Höhe von  $56,8 dB$  wahrgenommen. Dies könnte leiser Sprache oder Musik entsprechen. Um vergleichen zu können, wie laut ein Geräusch ist, sind in Tab. 5 (siehe Anhang) weitere typische Werte für den A-bewerteten Schalldruckpegel angeführt. [15]

3 dB Unterschied würde eine Verdoppelung des Schalldruckpegels bedeuten und ist für das menschliche Ohr gerade noch wahrnehmbar. Durch die in Tab. 5 (siehe Anhang) angeführten Daten wird deutlich, dass die Werte eine Differenz von jeweils 10 dB aufweisen. Eine Differenz von

10 dB wird als doppelte Lautstärke empfunden. Dies ist auf den logarithmischen Zusammenhang zwischen Schalldruck und Schalldruckpegel zurückzuführen. [15]

### 2.1.3 Schallausbreitung

Bei der Ausbreitung von Schall sind einige Punkte zu berücksichtigen, welche in allen Berechnungen, laut den hier behandelten Richtlinien, beinhaltet sind.

**Geschwindigkeit** Die Schallgeschwindigkeit ist direkt proportional zur Dichte des durchschreitenden Mediums. Dadurch, dass das zu behandelnde Material Luft ist, ist die Temperatur ebenfalls maßgebend. In der Gleichung (2) wird dieser Zusammenhang verdeutlicht.  $M_{Mol}$  ist eine Materialkonstante und ist das Gewicht von einem Mol Luft, also 28,8 g.  $R$  ist die allgemeine Gaskonstante von 8,314 Nm/K.  $\kappa$  stellt ein Verhältnis zwischen der spezifischen Wärme bei konstantem Druck und der spezifischen Wärme bei konstantem Volumen dar und beträgt in diesem Fall 1,4.  $T_0$  ist die Temperatur der Luft in Kelvin [K] und damit die einzige Variable. [8]

$$c = \sqrt{\kappa \cdot \frac{R}{M_{Mol}} \cdot T_0} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Bei einer Lufttemperatur von 15°C entspricht dies einer (gerundeten) Schallgeschwindigkeit von  $c = 340 \text{ m/s}$ . Bei näherer Betrachtung würde ein Temperaturunterschied von  $\pm 5^\circ\text{C}$  eine Geschwindigkeitsänderung von 3m/s ausmachen und ist dadurch in den meisten Fällen vernachlässigbar gering.

$$c_{10} = \sqrt{1,4 \cdot \frac{8,314}{28,8 \cdot 10^{-3}} \cdot (10 + 273,15)} = 338 \text{ m/s}$$

$$c_{15} = \sqrt{1,4 \cdot \frac{8,314}{28,8 \cdot 10^{-3}} \cdot (15 + 273,15)} = 341 \text{ m/s}$$

$$c_{20} = \sqrt{1,4 \cdot \frac{8,314}{28,8 \cdot 10^{-3}} \cdot (20 + 273,15)} = 344 \text{ m/s}$$

**Punkt- und Linienquellen** Bei Schallimmissionsberechnungen ist es wichtig zu differenzieren, ob es sich bei der Quelle um eine Punkt- oder Linienquelle handelt. Punktquellen gehen von einem Punkt aus und haben hierbei eine kugelförmige – oder alle Bruchteile einer Kugel – Ausbreitung. Bei Linienquellen handelt es sich genauer gesagt um mehrere Punktquellen, die so nah beieinander liegen, dass sie rechnerisch als Linie angenommen werden können. In Abb. 8 und Abb. 9 (siehe Anhang) ist die Ausbreitung einer Punktquelle zu sehen. Abb. 10 und Abb. 11 (siehe Anhang) zeigen linienförmige Quellen. Die Unterscheidung ist dahingehend wichtig, da der Schalldruckpegel, abhängig von der Ausbreitungsart, unterschiedlich stark abnimmt. [15]

**Mehrere Quellen** Wie in den Kapiteln 2.1.1 und 2.1.2 angeführt, besteht ein logarithmischer Zusammenhang zwischen den Lärmpegeln. Die Addition – also Berücksichtigung – mehrerer Quellen ist also durch das Summieren des Schalldrucks und nicht des Schalldruckpegels gegeben. Die Pegeladdition erfolgt über die Gleichung (3). [15]

$$L_{tot} = 10 \cdot \log \left( \sum_{i=1}^N 10^{L_i \cdot 0,1} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

**Absorption** Dies ist die Fähigkeit eines Stoffes, Schall zu absorbieren, also zu dämpfen. Hierbei ist zu beachten, dass die Höhe des Absorptionsgrades von der Menge an vorhandener Luft im Absorbermaterial abhängig ist. Das bedeutet also wie porös ein Stoff ist. Zudem wird bei den schalltechnischen Berechnungen der Atmosphäre eine dämpfende Wirkung zugeschrieben. In den Normungen ist dieser Absorptionsgrad in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit angegeben und gibt in Prozentwerten das Ausmaß der Absorption an. [15]

**Reflexion** Die Reflexion stellt das Gegenteil zur Absorption dar. Trifft eine Schallwelle auf ein schallhartes Material so wird diese zur Gänze reflektiert. Um diese Wellen in den Berechnungen zu erfassen, wird mit Spiegelquellen gearbeitet. Um dies zu verdeutlichen, wird das Prinzip in Abb. 1 dargestellt. Eine Reflexion entspricht demnach einer zusätzlichen Quelle und kann sich negativ auf den Lärmpegel auswirken. [15]

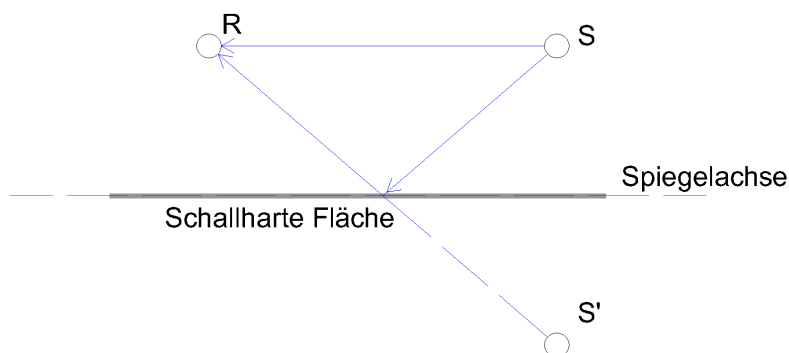


Abb. 1: Erfassung von Spiegelquellen

## 2.2 Ausgewählte Modelle

In diesem Kapitel geht es um die Modelle per se. Es wird beschrieben woher diese stammen und wie aktuell sie sind. Zudem wird dokumentiert, welche Themenbereiche die Modelle zusätzlich zu den Schallimmissionen behandeln.

### 2.2.1 Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung Richtlinie Nr. 28 (ÖAL 28)

Mit dem 01.01.2019 hat der österreichische Arbeitsring für Lärmbekämpfung die Richtlinie Nr. 28 [12] herausgegeben. Sie wurde aufgrund von Erneuerungen in den Bewertungsmethoden für Lärmindizes nach Artikel 6 der Richtlinie 2002/49/EG [16] erstellt und dient der Berechnung von Lärmdämpfungen im Freien sowie der strategischen Lärmkartierung. Für die Lärmemissionsberechnungen werden zusätzliche Vorschriften und Normen benötigt. So wird in dieser Richtlinie, für den Fall von Schienenverkehrslärm, auf die RVE 04.01.02 [17] verwiesen. In dieser Vorschrift werden zudem quellspezifische Bemessungsfälle festgelegt.

### **2.2.2 Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Schall 03)**

Die Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [18] wurde ursprünglich von der Deutschen Bundesbahn genutzt, um Prognosen für Geräuschimmissionen zu erstellen. Seit dem Jahr 2014 wurde die Neufassung in die Verkehrslärmschutzverordnung aufgenommen und ist damit in Deutschland verpflichtend.

### **2.2.3 sonRAIL**

Viele Jahre lang wurden in der Schweiz mit dem Modell SEMIBEL [19], welches in den 1980er-Jahren publiziert wurde, Eisenbahnlärberechnungen durchgeführt. Mit dem Projekt sonRAIL und dessen gleichnamigen Eisenbahnlärberechnungsmodell [20] konnte eine Aktualisierung, und vor allem Präzisierung dieser Berechnungen erreicht werden. Die Projektdokumentation und somit auch das Modell wurden am 7.10.2010 von der schweizerischen Eidgenossenschaft veröffentlicht. Ihre Schallausbreitungsberechnungen basieren auf der Norm ISO 9613-2 [13], jedoch unterscheidet sie sich im Hinblick auf die Einflussfaktoren, wie Bodeneffekt oder Reflexionen an künstlichen Objekten im urbanen Raum.

### **2.2.4 New Nordic Prediction Method for Rail Traffic Noise (Nord 2000)**

Mit dem 21.12.2001 löste das Nord 2000 Modell [11] seinen Vorgänger [14] zur Berechnung von Verkehrslärm ab. Dieses Modell wurde von einem Zusammenschluss mehrerer skandinavischer Organisationen erstellt und vom Swedish National Testing and Research Institut veröffentlicht. Die Grundstruktur unterscheidet sich nicht von der des Vorgängers. Jedoch hat sich das Modell in Hinblick auf die Schallausbreitung und Wettereinfluss stark verändert.

### **2.2.5 Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual**

Nach dem National Environmental Policy Act von 1969 ist es in den Vereinigten Staaten von Amerika verpflichtend, ein vom Staat finanziertes Projekt hinsichtlich der Einflüsse auf Mensch und Natur zu prüfen. Mit dem Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual (dt.: Handbuch zur Bewertung der Auswirkungen von Lärm und Vibrationen im Transitverkehr) [21] vom September 2018 wird dies in den Bereichen von Verkehrslärm und -vibrationen verwirklicht. Dieses Handbuch wurde von der Federal Transit Administration mit der Unterstützung der Federal Highway Administration publiziert.

## **3 Beschreibung internationaler Modelle**

In diesem Kapitel werden die Modelle der verschiedenen Normen und Richtlinien beschrieben. Zudem wird dadurch aufgezeigt, welche Möglichkeiten sie zur Berechnung bieten und wie diese eingehen.

### **3.1 ÖAL 28 [12]**

#### **3.1.1 Anwendungsbereich**

Die ÖAL 28 wird zur Berechnung von äquivalenten Dauerschallpegeln, hervorgerufen durch Verkehrs- und Industrielärm, im Freien verwendet. Schräge Abschirmungen von mehr als 15° von der Vertikalen gemessen werden nicht erfasst. Gerechnet wird für Straßenverkehrs-, Eisenbahn- und Industrielärm mit Oktavbändern. Eine Ausnahme bildet die Schalleistung bei Eisenbahnlärm, bei der mit Terzbändern gearbeitet wird. Das Modell liefert Ergebnisse in allen Frequenzbändern im Frequenzbereich von 63 Hz bis 8000 Hz, die zu A-bewerteten Langzeitmittelungspegeln in

den Referenzzeiträumen umgerechnet werden. Die Definition und Bemessung dieser werden in Kapitel 3.1.3 und 3.1.4 beschrieben.

### 3.1.2 Geometrische Betrachtung

Um mit diesem Modell rechnen zu können müssen zunächst Vorarbeiten bezüglich der Quellen und des Geländes geleistet werden. Reale Quellen müssen mithilfe einer Software oder anderer Verfahren in Punkt- oder inkohärente Linienquellen umgelegt werden.

Um die Geometrie des Geländes zu erfassen, wird das reale Gelände durch eine äquivalente mittlere Ebene ersetzt. Die ÖAL 28 stellt hierzu einen leicht verständlichen Formelapparat sowie eine Skizze zur Verfügung. Diese wird in Abb. 2 gezeigt.

### 3.1.3 Modell

In diesem Modell der Schallausbreitung muss für jeden Ausbreitungsweg eine Berechnung unter günstigen und homogenen Bedingungen erfolgen. Das Ergebnis entspricht einem äquivalenten Dauerschallpegel unter den jeweiligen Bedingungen. Anschließend werden durch Häufigkeitswerte diese Schalldruckpegel zu einem Langzeitmittelungspegel aufsummiert (Glg. (4) bis (6)). Eine Aufschlüsselung der Gesamtdämpfung erfolgt im Kapitel 3.1.4.

$$L_F = L_{W,0,dir} - A_F \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

$$L_H = L_{W,0,dir} - A_H \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

$$L_{LT} = 10 \cdot \log(p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1-p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}}) \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

mit:

$L_{W,0,dir}$  ...gerichteter In-Situ-Schalleistungspegel [dB]

$L_F$  ...Schallpegel bei günstigen Bedingungen [dB]

$L_H$  ...Schallpegel bei homogenen Bedingungen [dB]

$A_F$  ...Gesamtdämpfung entlang des Ausbreitungsweges bei günstigen Bedingungen [dB]

$A_H$  ...Gesamtdämpfung entlang des Ausbreitungsweges bei homogenen Bedingungen [dB]

$L_{LT}$  ...Langzeitmittelungspegel [dB]

Nach der Pegeladdition für jeden Ausbreitungsweg (7) erfolgt eine Summierung für jedes Frequenzband, sowie eine A-Bewertungskorrektur (8)

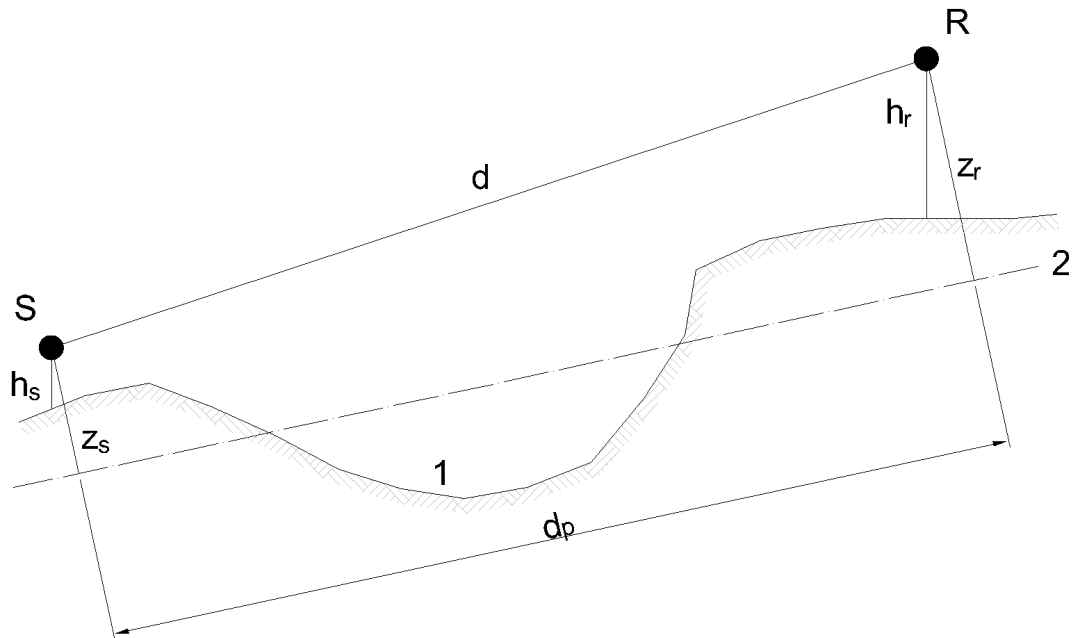
$$L_{tot,LT} = 10 \cdot \log\left(\sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{n,LT}}{10}}\right) \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

$$L_{Aeq,LT} = 10 \cdot \log\left(\sum_{i=1}^8 10^{\frac{L_{tot,LT} + A_{i,f}}{10}}\right) \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

### 3.1.4 Dämpfung

Die Dämpfung wird in diesem Modell durch eine Subtraktion vom jeweiligen In-Situ-Schalleistungspegel berücksichtigt. Für die Berechnung des Schalldämpfungsterms wird zwischen homogenen ( $A_H$ ) und günstigen ( $A_F$ ) Bedingungen unterschieden. In diesen Termen wird die Dämpfung aufgrund





**Abb. 2:** Erfassung der mittleren Ebene vgl. [12]

1 tatsächliches Gelände

2 mittlere Ebene

$R$  Empfänger

$S$  Quelle

$d$  direkte Schrägentfernung zwischen Quelle und dem Empfänger [m]

$d_p$  Abstand zwischen der Quelle und dem Empfänger in Projektion auf die mittlere Bezugsebene [m]

$h_r$  Höhe des Empfängers über dem Boden [m]

$h_s$  Höhe der Quelle über dem Boden [m]

$z_r$  äquivalente Empfängerhöhe [m]

$z_s$  äquivalente Quellenhöhe [m]

des Bodens, der Atmosphäre, der geometrischen Ausbreitung und, wenn vorhanden, einer Beugung berücksichtigt. Zudem kann eine Dämpfung aufgrund von Bewuchs vorgesehen werden, falls es sich bei den Berechnungen nicht um strategische Lärmkartierung handelt. Die Berechnung zur Dämpfung durch Bewuchs folgt den Regeln aus der Norm ISO 9613-2 [13].

**geometrische Ausbreitungsdämpfung** Wie im Kapitel 3.1.1 beschrieben wird bei diesem Modell mit Punktquellen (siehe Abb. 9) oder inkohärenten Linienquellen gearbeitet. Dadurch ergibt sich die geometrische Ausbreitungsdämpfung zu:

$$A_{div} = 20 \cdot \log(d) + 11 \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

Dies entspricht den allgemein gültigen Gleichungen für die Ausbreitung von Schall im Fernfeld.

**Luftabsorption** Diese wird durch einen Koeffizienten mit der Einheit  $\text{dB}/\text{km}$  berücksichtigt, welcher aus der ISO 9613-1 [4] zu entnehmen ist. Die Bedingungen für diesen Koeffizienten sind  $15^\circ\text{C}$ , 70% relative Luftfeuchtigkeit und ein Luftdruck von  $101,325\text{kPa}$  (es wird darauf verwiesen, dass für die strategischen Lärmkartierungen  $10^\circ\text{C}$  und 70% relative Luftfeuchtigkeit zu verwenden sind). Falls meteorologische Daten vorhanden sind, sind deren Langzeitdurchschnittswerte zu verwenden.

**Bodeneffekt** Einen großen Einfluss auf die Bodenabsorption stellt die Härte des Untergrundes dar. In diesem Modell gehen Werte aus einer Tabelle ein, die den Untergrund beschreiben. Für den Fall verschiedener Bodenarten (z.B. abwechselnd Parkplatz und Grünfläche) können diese Werte auch anteilig berechnet werden. Die anschließenden Berechnungen werden sowohl von diesen Tabellenwerten als auch von der Frequenz, der Schallgeschwindigkeit und der Lage von Sender und Empfänger zueinander beeinflusst. Ist unter den Gegebenheiten eine Beugung (z.B. Lärmschutzwände) vorhanden wird der Bodeneffekt nicht gesondert berücksichtigt, sondern geht direkt in die Berechnung der Beugung mit ein.

**Beugung** Laut diesem Modell entsteht Beugung erst dann, wenn die Weglängendifferenz größer ist als ein Zwanzigstel der Wellenlänge. Andernfalls ist die Dämpfung aufgrund der Beugung nicht zu berücksichtigen. Es kann sowohl die Einfach- als auch die Mehrfachbeugung an vertikalen Objekten berechnet werden. Diese Berechnung erfolgt durch eine Unterscheidung der Art des Hindernisses und der Lage von Sender und Empfänger zueinander. Zudem geht sowohl die Bodendämpfung zwischen Sender und Hindernis, als auch die zwischen Hindernis und Empfänger ein.

**Absorption und Reflexion** Absorption und Reflexion an vertikalen Hindernissen werden, wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, durch Spiegelquellen erfasst. Die Absorption wird hierbei durch einen prozentuellen Anteil beschrieben, welche die Schalleistung der Spiegelquelle beeinflusst.

### 3.1.5 Beurteilung

Das Ergebnis der Glg. (8) stellt einen A-bewerteten Langzeitpegel zu den verschiedenen Zeiten (Tag, Abend, Nacht) dar. Eine Beurteilung bzw. ein Vergleich mit maximal erlaubten Pegeln ist nicht Teil dieser Richtlinie.

Die ÖAL 28 bietet die Möglichkeit zur Berechnung des Lärmindezes, welcher in der Richtlinie 2002/49/EG [16] normiert ist und durch entsprechende Definition von Dosis-Wirkung-Relation eine Einschätzung der Auswirkungen auf die Gesundheit erlaubt. Dabei wird über die Schallpegel von Tag (6-19 Uhr), Abend (19-22 Uhr) und Nacht (22-6 Uhr) ein gewichteter Mittelwert gebildet.

Die Wichtung erfolgt durch eine Erhöhung der Schallpegels von 5dB während der Abendstunden und 10dB während der Nachtstunden.

Des Weiteren beinhaltet dieses Dokument Verfahren zur Erfassung von Empfangspunkten an Fassaden. Hierbei wird die Anzahl der Bewohner eines Gebäudes benötigt. Die Richtlinie bietet sowohl für den Fall, dass die genaue Anzahl der Bewohner bekannt ist, als auch für den Fall, dass die Anzahl der Bewohner unbekannt ist, geeignete Formeln an, welche die Anzahl der Bewohner ermitteln sollen. Im nächsten Schritt ist die Fassade auf 4m Höhe in einzelne Empfangspunkte aufzuteilen. Dabei sind die Abschnitte der Empfangspunkte maximal 5m lang und der Punkt jeweils in die Mitte des jeweiligen Abschnitts zu setzen. Für Statistiken zur Beurteilung der Lärmexposition für die Bevölkerung wird die einem Empfangspunkt zugewiesene Anzahl der Bewohner mit der Länge des jeweiligen Abschnitts gewichtet.

## 3.2 Schall 03 [18]

### 3.2.1 Anwendungsbereich

Da dieses Modell aus einem Verfahren der Deutschen Bundesbahn entwickelt wurde, ist der Anwendungsbereich auf Schienenwege begrenzt. Dies beinhaltet sowohl Eisen- und Straßenbahnen als auch U-Bahnen und wird im Endeffekt zwischen freier Strecke und Rangier- bzw. Umschlagbahnhöfen unterschieden. Der Ablauf bei der Berechnung von Rangier- und Umschlagbahnhöfen gleicht dem der freien Strecke mit dem Unterschied, dass in Teilflächen anstatt Teilstrecken unterteilt wird (siehe Kapitel 3.2.2). Zur Vereinfachung und aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in dieser Arbeit die freie Strecke betrachtet. Zudem befindet sich in dieser Verordnung ein Kapitel zur Modellierung von Schallquellen und somit zur Berechnung des Schalleistungspegels für alle geltenden Schienenfahrzeuge. Da dieses Modell eine Möglichkeit bietet die Schallquellen zu modellieren, wird kein weiteres Dokument benötigt um eine Prognose zu treffen.

### 3.2.2 Geometrische Betrachtung

In diesem Modell wird jede Linien- oder Flächenschallquelle in einzelne Punktquellen unterteilt. Hierbei geht die Länge  $l_{kS}$ , welche zwischen den halben Abständen der Einzelquellen besteht (siehe Abb. 3), in die Berechnung des Schalleistungspegels ein. Ergibt der Immissionsanteil zweier benachbarter Punktquellen eine Differenz von mehr als 0,1 dB laut Glg. (12), so muss der Abstand zwischen den Quellen verringert werden. Selbes gilt für Rangier- und Umschlagsbahnhöfe, wobei hier in Teilflächen unterteilt wird.

Das Gelände selbst wird über zwei Korrekturwerte (Glg. (10) und (11)) sowie über die mittlere Höhe (Abb. 5) erfasst. Die Korrekturwerte werden als Richtungswirkungsmaß ( $D_{I,kS,w}$ ) und Raumwinkelmaß ( $D_{\Omega,kS}$ ) bezeichnet und ergeben sich aus:

$$D_{I,kS,w} = 10 \cdot \log \left( 0,22 + 1,27 \cdot \sin(\delta_{kS}^2) \right) \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

$$D_{\Omega,kS} = 10 \cdot \log \left( 1 + \left[ \frac{d_p^2 + (h_q - h_r)^2}{d_p^2 + (h_q + h_r)^2} \right] \right) \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

### 3.2.3 Modell

In diesem Modell wird die gesamte Strecke in unterschiedliche Gleisabschnitte unterteilt. Zusammengefasst werden jene Teile bei denen Geschwindigkeit, Verkehrszusammensetzung, Geschwindigkeit, Fahrbahnart oder Fahrflächenzustand gleich sind. Der Schalleistungspegel ist abhängig von Art, Anzahl und Geschwindigkeit der Fahrzeuge sowie von der Unterteilung der Teilstücke und wird einer A-Bewertung unterzogen.

Es wird der äquivalente Dauerschallpegel für den Zeitraum einer vollen Stunde berechnet. Hierzu

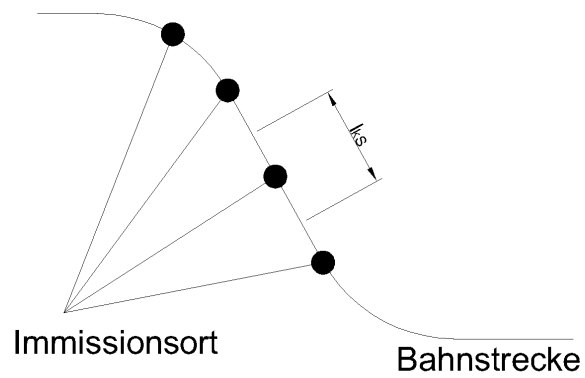


Abb. 3: Trennung in Teilstücke und Begrenzung dieser vgl. [18]

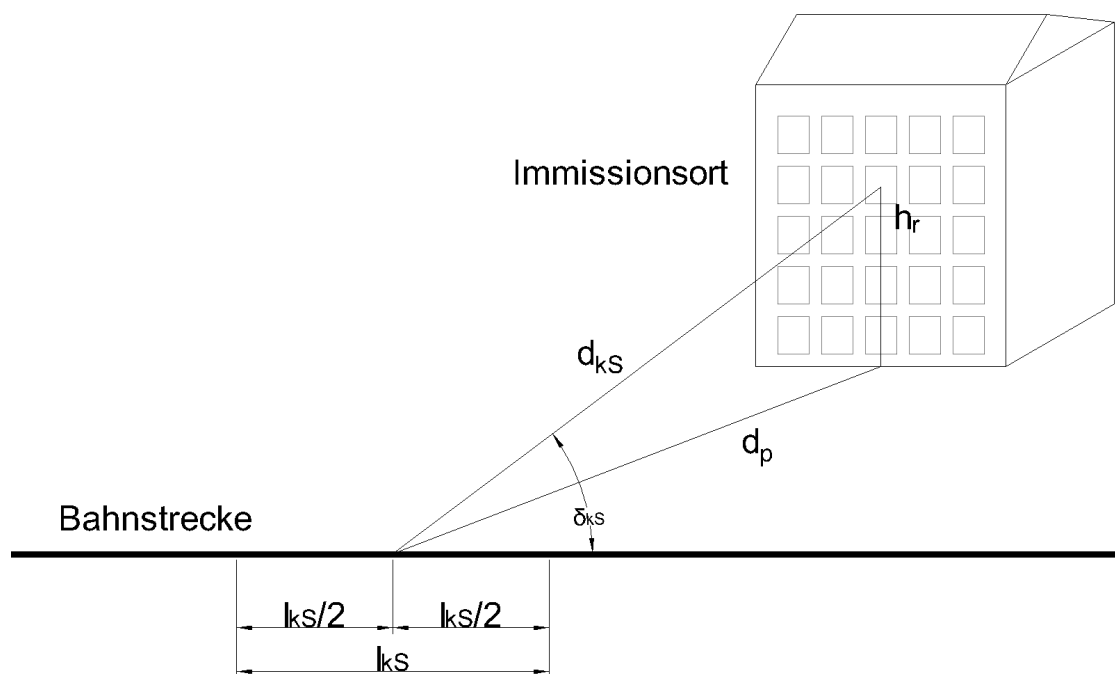


Abb. 4: Definition des Winkels  $\delta_{KS}$  vgl. [18]

erfolgt die Berechnung von Richtungswirkungsmaß, Rauwinkelmaß und Ausbreitungsdämpfungsmaß für jeden Höhenbereich, jedes Oktavband, jedes Teilstück und allen Ausbreitungswegen. Anschließend erfolgt eine energetische Addition mittels der Glg. (12):

$$L_{p,Aeq} = 10 \cdot \log\left(\sum_{f,h,k_S,w} 10^{0,1(L_{WA,f,h,k_S} + D_{I,k_S,w} + D_{\Omega,k_S} - A_{f,h,k_S,w})}\right) \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

mit:

$L_{p,Aeq}$  ...äquivalenter Dauerschalldruckpegel am Immissionsort [dB]

$f$  ...Zähler für Oktavband

$h$  ...Zähler für Höhenbereich

$k_S$  ...Zähler für Teilstücke

$w$  ...Zähler für unterschiedliche Ausbreitungswege

$L_{WA,f,h,k_S}$  ...A-bewerteter Schalleistungspegel der Punktschallquelle in der Mitte des Teilstücks  $k_S$ , der die Emission aus dem Höhenbereich  $h$  angibt [dB]

$D_{I,k_S,w}$  ...Richtwirk[dB]ungsmaß für den Ausbreitungsweg  $w$  [dB]

$D_{\Omega,k_S}$  ...Raumwinkelmaß [dB]

$A_{f,h,k_S,w}$  ...Ausbreitungsdämpfungsmaß im Oktavband  $f$  im Höhenbereich  $h$  vom Teilstück  $k_S$  längs des Weges  $w$  [dB]

### 3.2.4 Dämpfung

In diesem Modell weichen die Begrifflichkeiten zum Teil von den anderen Modellen ab. Um einen besseren Überblick zu verschaffen und diese Modelle vergleichbarer zu machen, werden die Begriffe aus Kapitel 3.1.4 für die Auflistung verwendet und deren Bezeichnung laut Modell anschließend in einer Klammer erwähnt.

Die Dämpfung wird allgemein für jeden Einfluss einzeln berechnet, aufsummiert und dann in Glg. (12) berücksichtigt.

**geometrische Ausbreitungsdämpfung** (laut Schall 03: geometrische Dämpfung) Es wird von einer kugelförmigen Schallausbreitung im Freien ausgegangen und die Dämpfung ergibt sich dadurch zu:

$$A_{div} = 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi d^2}{d_0^2}\right) \quad [\text{dB}] \quad (13)$$

Die Oberfläche einer Kugel ist hierbei (mit  $4\pi d^2$ ) zu erkennen, führt jedoch nicht zu dem selben Ergebnis wie Glg. (9).

**Luftabsorption** Eine Berücksichtigung erfolgt wie in Kapitel 3.1.4 demonstriert über einen Absorptionskoeffizienten, dieser ist aus der DIN ISO 9613-2 [2] zu entnehmen und auf eine Temperatur von 10°C zu beziehen.

**Bodeneffekt** (laut Schall 03 Bodeneinfluss) Hier wird bei der Dämpfung bzw. Reflexion am Boden zwischen Boden ( $A_{gr,B}$ ) und Wasser ( $A_{gr,W}$ ) unterschieden. Der Bodeneffekt wird also über rein geometrische Betrachtungen hinzugezogen. Dabei gehen Horizontalentfernungen ( $d_w$ ) über Wasserflächen, Horizontalentfernung ( $d_p$ ), direkte Entfernung ( $d$ ) zwischen Schallquelle und Immissionsort und die Fläche zwischen Laufweg und Boden ( $S$ ) (siehe Abb. 5) in die

Formeln (14) und (15) ein. Das Verhältnis  $S$  zu  $d$  ergibt die mittlere Höhe  $h_m$  und wird für die Berechnung benötigt.

$$A_{gr,B} = \left[ 4,8 - \frac{2h_m}{d} \left( 17 + \frac{300d_0}{d} \right) \right] \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

$$A_{gr,W} = \left( -3 \frac{d_w}{d_p} \right) \quad [\text{dB}] \quad (15)$$

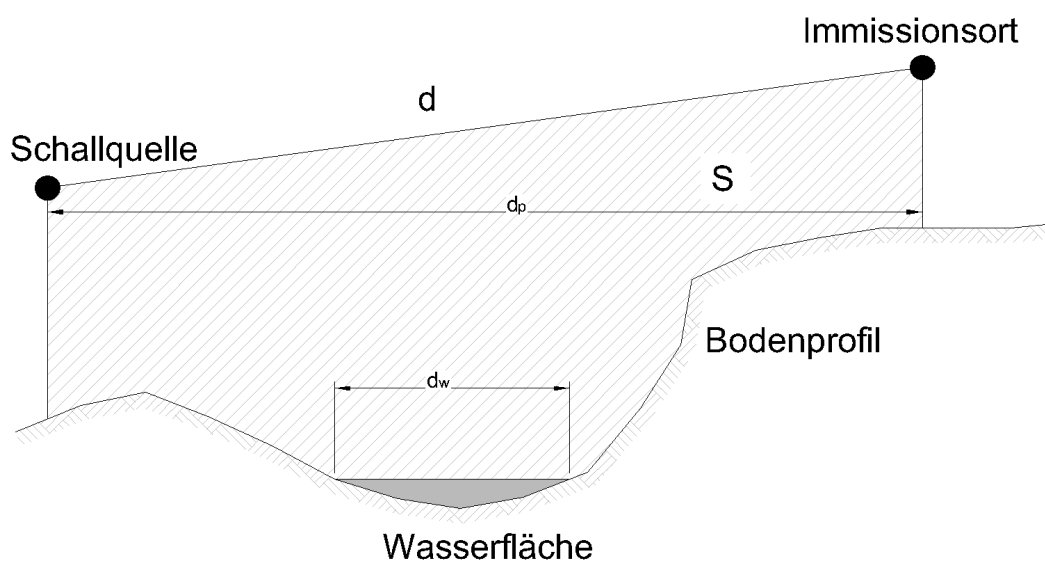


Abb. 5: Verfahren zur Bestimmung der mittleren Höhe vgl. [18]

**Beugung** (laut Schall 03 Abschirmung durch Hindernisse) Diese wird berücksichtigt wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- im Grundriss durchquert der Schallstrahl eine oder mehrere Beugungskanten
- die flächenbezogene Masse des Hindernisses ist größer als  $10\text{kg}/\text{m}^2$
- das Hindernis entspricht einer akustisch geschlossenen Oberfläche
- das Hindernis ist so groß, dass die Horizontallänge senkrecht zum Schallstrahl größer als die Wellenlänge ist

Wird die eine Beugung berücksichtigt, geht der Bodeneinfluss direkt in diese Gleichungen ein und wird nicht gesondert berücksichtigt. Zudem wird in den Formeln zwischen seitlicher Beugung und einer Beugung über das Hindernis unterschieden. Bei der seitlichen wird ein Abschirmmaß berücksichtigt. In der Formel für die Beugung über Hindernisse geht zusätzlich die Mehrfachreflexion zwischen Schallschutzwänden und Wagenaufbau ein und

der Bodeneffekt wird berücksichtigt. Um das Abschirmmaß zu berechnen, wird die Weglängendifferenz, also die Differenz zwischen direkter Verbindung und dem Umweg durch Beugung, und Art der Bahnanlage benötigt. Es sind Einfach- und Mehrfachbeugungen möglich.

**Absorption und Reflexion** (laut Schall 03 Pegelerhöhung durch Reflexionen) Reflexionen werden in diesem Modell erfasst, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- eine Spiegelquelle ist, wie im Kapitel 2.1.3 beschrieben, erfassbar
- der Schallreflexionsgrad der Hindernisoberfläche ist größer als  $\rho = 0,2$
- Glg. (16) ist erfüllt

Der Schalleistungspegel der Spiegelschallquelle ergibt sich aus der Addition des A-bewerteten Schalleistungspegels der ursprünglichen Quelle, einem Term für den Absorptionsverlust in dB und dem Richtwirkungsmaß laut Glg. (10). Der Absorptionsverlust wird dabei aus einer Tabelle entnommen, ist Frequenzunabhängig und wird in dB berücksichtigt.

$$l_{min} \cos \beta > \sqrt{\frac{2\lambda}{\frac{1}{d_{so}} + \frac{1}{d_{or}}}} \quad (16)$$

mit:

$l_{min}$  ...kleinste Abmessung des Reflektors [m]

$\beta$  ...Winkel zwischen der Verbindungslinie Quelle zu Immissionsort und der Reflektornormalen

$d_{so}$  ...Laufweg des Schalls von der Punktschallquelle zum Reflektor [m]

$d_{or}$  ...Laufweg des Schalls vom Reflektor zum Immissionsort [m]

### 3.2.5 Beurteilung

Bei der Beurteilung des Schallpegels werden die äquivalenten Dauerschallpegel aus jeder vollen Stunde aus Glg. (12) über Tag (6-22 Uhr) und über Nacht (22-6 Uhr) gemittelt und mit einem negativen Korrekturfaktor addiert, welcher die geringere Störwirkung von Schienen gegenüber Straßen berücksichtigt.

## 3.3 sonRAIL [20]

### 3.3.1 Anwendungsbereich

Dieses Modell wurde zur Beurteilung von Schallpegeln hinsichtlich der Schweizerischen Lärmschutzverordnung<sup>1</sup> [7] entwickelt. Es dient ausschließlich der Berechnung von Schallpegeln, welche von Eisenbahnen ausgehen und ist sowohl für das freie Feld, als auch für bebaute Gebiete geeignet.

### 3.3.2 Geometrische Betrachtung

Aufgrund einer komplexeren Betrachtung (siehe Kapitel 3.3.4) des vorliegenden Bodens wird für dieses Modell sowohl eine Optimierung, als auch eine Glättung des Terrains benötigt. Dabei wird das Gelände in abschnittsweise gerade Strecken unterteilt um die Bodenreflexionen vereinfachter und dennoch ausreichend genau zu erfassen. Hierzu wird im Geländeschnitt eine gerade Linie zwischen zwei Punkten im Gelände erstellt und die maximale Abweichung von dieser zum tatsächlichen Gelände gemessen. Sowohl die maximale Abweichung, als auch

<sup>1</sup>Verordnung aus dem Jahr 1986 (aktuelle Neufassung 07.05.2019) vom Schweizerischen Bundesrat und gestützt auf das Umweltschutzgesetz von 1983 [1].

die Distanzen zwischen den einzelnen Punkten haben Kriterien zu erfüllen. Falls diese nicht erfüllt sind, wird ein weiterer Punkt genau an der Stelle mit der maximalen Abweichung hinzugefügt und das Verfahren wiederholt. Dieser iterative Prozess wird solange wiederholt bis die Kriterien erfüllt sind. Für die Glättung wird zunächst eine Linie zwischen dem Geländepunkt an der Quelle zum Geländepunkt am Empfänger bestimmt. Die Abstände von den einzelnen Segmentanfangs- und Endpunkten zu dieser gedachten Linie werden dann mithilfe der Glg. (17) reduziert. Befindet sich an einem Punkt ein Hindernis wird dieser nicht verändert.

$$h' = h_i - \frac{ah_i}{b + h_i^c} \quad [\text{m}] \quad (17)$$

mit den Parametern:

$$a = 7$$

$$b = 9$$

$$c = 3$$

### 3.3.3 Modell

Für dieses Modell wird die Strecke in Gleisabschnitte gleicher Emissionsstärke unterteilt. Dabei wird auf die Eigenschaften des Untergrundes (Damm, Einschnitt, Bogen, Brücken, etc.), Schienen- und Radrauheit sowie Oberbau- und Fahrzeugfunktion Rücksicht genommen. Nach der Kalkulation des längenbezogenen Emissionspegels, muss für jede Teilquelle eine Bemessung der Ausbreitungsdämpfung (siehe Kapitel 3.3.4) erfolgen, um aus den Emissionspegeln Immissionspegel zu berechnen. Der A-bewertete Immissionsschalldruckpegel wird errechnet, indem in Glg. (18) eingesetzt wird, in dieser werden die Schalldruckpegel energetisch summiert. Dabei ist zu erkennen, dass sowohl die Frequenzbänder (hier in Terzbändern gerechnet), als auch Gleisabschnitte und Quellenhöhen berücksichtigt werden.

$$L_{Aeq} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{h=1}^H \oplus L_{eq,hji} + A_{bew,i} \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

mit:

$\oplus$  ...energetische Summation

$L_{Aeq}$  ...A-bewerteter Immissionsschalldruckpegel [dB]

$L_{eq,hji}$  ...Schalldruckpegel im Frequenzband i, des Abschnittes j, der Quellenhöhe h [dB]

$A_{bew,i}$  ...A-Bewertung im Frequenzband i [dB]

$I$  ...Anzahl der Frequenzbänder

$i$  ...Frequenzbandnummer

$J$  ...Anzahl der Gleisabschnitte

$j$  ...Abschnittsnummer

$H$  ...Anzahl der Quellenhöhen

$h$  ...Index der Quellenhöhe



### 3.3.4 Dämpfung

In diesem Modell weichen die Begrifflichkeiten teils von den anderen Modellen ab. Um einen besseren Überblick zu verschaffen und diese Modelle vergleichbarer zu machen, werden die Begriffe aus Kapitel 3.1.4 für die Auflistung verwendet und deren Bezeichnung laut Modell anschließend in einer Klammer erwähnt.

Im Allgemeinen ist in diesem Modell die Reflexion und Dämpfung an Waldrändern bzw. Felsen ein fester Bestandteil der Berechnungen. Zudem wird der Einfluss der am Immissionsort vorherrschenden meteorologischen Verhältnisse (in  $A_{Meteo,L}$ ) berücksichtigt, wenn diese von den Durchschnittswerten abweichen oder eine genauere Betrachtung gefordert ist. Falls keine Wälder oder Felsen vorhanden sind und das Durchschnittswetterverhältnis benötigt wird, können diese Terme laut Glg. 19 auch auf 0 gesetzt werden.

$$A_{total,hji} = -10 \cdot \log \left[ 10^{-0,1 \cdot (A_{Basic,L} + A_{Meteo,L})} + 10^{-0,1 \cdot (A_{Reflect,L})} + 10^{-0,1 \cdot (A_{ForestCliff,L})} \right] - \Delta E \quad (19)$$

mit:

$A_{Basic,L}$  ...Ausbreitungsdämpfung [dB]

$A_{Meteo,L}$  ...Meteokorrektur [dB]

$A_{Reflect,L}$  ...Ausbreitungsdämpfung für Reflexionen [dB]

$\Delta E$  ...Korrektur zur Unterscheidung von Empfangspunkten im Freien und im offenen Fenster.  
 $\Delta E$  wird bei Gebäuden auf 1 dB gesetzt. Bei Freifeldpunkten ist  $\Delta E = 0$  dB

$A_{ForestCliff,L}$  Ausbreitungsdämpfung für diffuse Reflexionen an Wald und Fels [dB]

**geometrische Ausbreitungsdämpfung** (laut sonRAIL geometrische Verdünnung) Die Berechnung erfolgt nach Glg.(9), ist jedoch aufgrund der nachhergehenden Formeln mit einem negativen Vorzeichen behaftet.

**Luftabsorption** (laut sonRAIL Luftdämpfung) Sie wird wie im Kapitel 3.1.4 berücksichtigt. Jedoch werden hier die Werte für den Absorptionskoeffizienten auf 76% relative Luftfeuchte und +8°C bezogen, was den Jahresmittelwerten für einen Schweizer Siedlungsraum entspricht. Zudem muss eine Zusatzbedingung laut Glg. (20) erfüllt werden. Diese berücksichtigt die größere Luftabsorption bei hohen Frequenzen ( $f$ ) und weiteren Distanzen ( $d$ ).

$$\frac{d}{1000} \left( \frac{f^2}{1000^2} \right) < 6 \quad (20)$$

**Bodeneffekt und Beugung** (laut sonRAIL Bodeneffekt und Hinderniswirkung) In diesem Modell werden einzelne Schallpfade betrachtet und daher werden auch Beugung und der Bodeneffekt in einem Kapitel bearbeitet. Ohne Hindernis gibt es eine Reflexion am Boden und dadurch einen betrachteten Schallpfad. Falls ein Hindernis existiert führt dies zu einem zusätzlichen Pfad (siehe Abb. 6). Für den Term der Hinderniswirkung hält sich dieses Modell an die Norm ISO 9613-2 [5]. Es wird jedoch im Gegensatz zur ÖAL 28 (Kapitel 3.1.4) mit dem Schalldruck gerechnet. Der Weg des Schallpfades wird über die Segmente, wie im Kapitel 3.3.2 erklärt, und über Fresnelzonen<sup>2</sup> bestimmt. Wichtige Eingangsgrößen sind dabei die Frequenzen, die jeweiligen Distanzen und der Strömungswiderstand des Bodens (welcher durch die Impedanz eingeht).

<sup>2</sup>Befriff aus der Wellenoptik analog in der Schalltechnik übernommen: Zone in welcher die Wellen durch Hindernisse gestört werden können.[6]

Um den Dämpfungsanteil des Bodeneffekts und der Beugung zu berechnen werden die Schalldrücke der einzelnen Schallpfade phasenempfindlich aufsummiert und in einen Schalldruckpegel umgewandelt. Die phasenempfindliche Summation wird mit einem frequenz- und längenabhängigen Kohärenzfaktor berücksichtigt. Da dieser Dämpfungseffekt stark frequenzabhängig ist, wird jedes Terzband nochmals in neun geometrisch verteilte Frequenzen geteilt und ein Mittelwert aus diesen Dämpfungstermen gebildet, welcher für die weiteren Berechnungen genutzt wird.

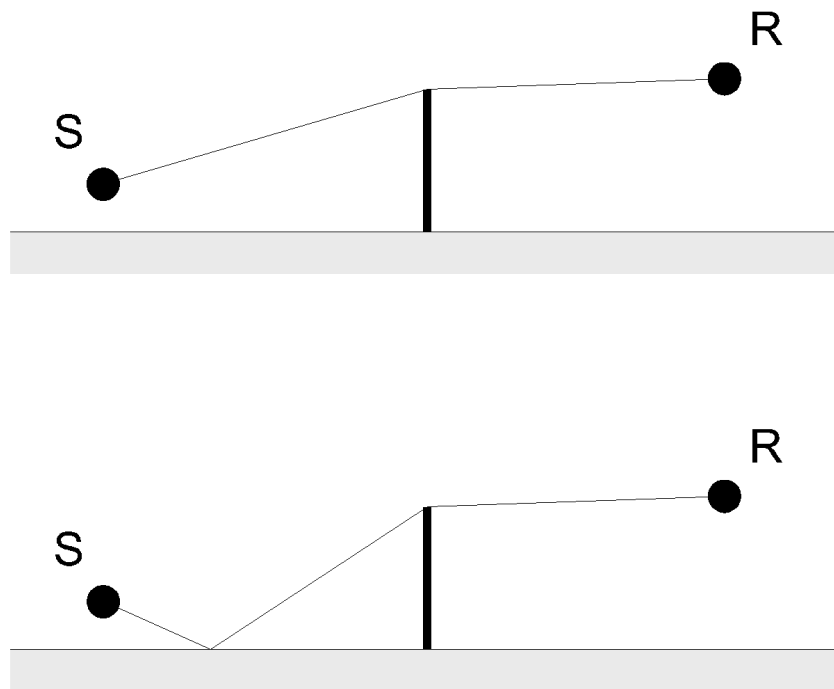


Abb. 6: Zusätzlicher Schallpfad infolge eines Hindernisses vgl. [20]

**Absorption und Reflexion** (laut sonRAIL wird zwischen Reflexionen an künstlichen Objekten, wie Gebäuden und Schallschirmen & Wald- und Felsreflexionen, unterschieden) Für die Reflexionen an künstlichen Objekten wird bei inkohärenten Reflexionen (Wellenlänge kleiner als Reflexionsstrukturtiefe) mit Intensitäten und bei kohärenten (Wellenlänge größer als Reflexionsstrukturtiefe) mit Schalldrücken gerechnet. Hierfür wird ein Dämpfungsterm, wie in Glg. (19) zu sehen ist, ermittelt. Um die Integration von Intensität bzw. Schalldruck auf den Flächen zu vereinfachen, wird diese jeweils in Teilflächen mit ausreichender Genauigkeit unterteilt, um mit Summen von Intensität bzw. Schalldruck arbeiten zu können. Die Intensität wird nachträglich in einen Schalldruck umgerechnet. Um nun vom Schalldruck auf einen Schallpegel zu kommen, wird die Summe aller Schalldrücke am Immissionsort gebildet und, wie in Glg. (1) gezeigt, umgerechnet. Von diesem wird der Luftdämpfungsterm abgezogen und das Ergebnis mit einem negativen Vorzeichen versehen um auf den Dämpfungsterm  $A_{Reflect,L}$  zu gelangen. Der prozentuelle Anteil an absorbiertem und reflektiertem Schall hat in der Summation von Intensität bzw. Schalldruck einen Einfluss. Für die Reflexionen an Wald und Felsen wird ebenfalls ein Dämpfungsterm ermittelt. Bei dem Term aus der Waldreflexion wird mit einer gewichteten Addition von Reflexionen an Stamm und Baumkrone gearbeitet. Diese ist von der Frequenz und der Anzahl der

Bäume abhängig. Felsen werden als Sekundärquelle modelliert. Dabei sind Oberflächengröße und –eigenschaft sowie die Winkel der einfallenden Schallwelle die Einflussfaktoren zur Berechnung dieser.

### 3.3.5 Beurteilung

Eine Beurteilung des errechneten Immissionspegels ist nicht Bestandteil dieses Modells. Die Ergebnisse sind demnach mit der Schweizerischen Lärmschutzverordnung [7] abzugleichen. Um die einzelnen Tageszeiten (Tag, Abend, Nacht) abbilden und beurteilen zu können, wird der Dämpfungsterm  $A_{Meteo}$  laut Glg. (19) herangezogen. Dies erfolgt über die Glg. (21) und (22). Hierbei finden die verschiedenen Wetterlagen und deren Auftrittswahrscheinlichkeit während der Tageszeiten ihren Einfluss. Zudem gibt es den Term  $D_{met,i}$  (aus einer empirischen Gleichung errechnet), welcher die Auswirkungen von Hindernissen berücksichtigt und zudem Frequenzabhängig ist. Hier kann außerdem der Einfluss durch Bewuchs herangezogen werden.

$$A_{Meteo,i} = (A_{atm,Meteo,i} - A_{atm,Basic}) + (A_{fol,Meteo,i} - A_{fol,Basic}) - D_{met,i} \quad [\text{dB}] \quad (21)$$

$$A_{Meteo} = -10 \cdot \log \left[ \frac{1}{\sum G_i} \sum_{i=1}^I G_i \cdot 10^{-0,1A_{Meteo,i}} \right] \quad [\text{dB}] \quad (22)$$

mit:

$A_{Meteo,L}$  ...Meteokorrektur [dB]

$A_{Meteo,i}$  ...Meteoeffekt der Wetterlage i [dB]

$A_{atm,Meteo,i}$  ...Luftdämpfung unter Berücksichtigung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit gemäß Wetterlage i [dB]

$A_{atm,Basic}$  ...Luftdämpfung bei Standardbedingungen [dB]

$A_{fol,Meteo,i}$  ...Bewuchsdämpfung unter Berücksichtigung gekrümmter Schallstrahlen gemäß Wetterlage i [dB]

$A_{fol,Basic}$  ...Bewuchsdämpfung unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre [dB]

$D_{met,i}$  ...Auswirkung der Schallausbreitung entlang gekrümmter Schallstrahlen auf die Hinderniswirkung [dB]

$G_i$  ...Auftrittswahrscheinlichkeit der Wetterlage i

## 3.4 Nord 2000

### 3.4.1 Anwendungsbereich

Die Entwicklung dieses Programms kam durch das Zusammenwirken der Länder Dänemark, Norwegen, Schweden und Finnland zustande und gilt dementsprechend in diesen Ländern. Für die Berechnungen in diesem Modell werden mehrere Dokumente benötigt. Diese Dokumente sind jeweils speziell für die Art der Lärmerzeugung ([11]) und für die Ausbreitung([9], [10] und [3]). Dies bedeutet es gibt für Eisenbahn-, Straßen- und Industrielärm eigene Grunddokumente. Sie haben einen abgegrenzten Geltungsbereich. Für die Ausbreitung selbst wird auf gemeinsame Dokumente verwiesen (für gerade Schallstrahlen [9] oder gebogene Schallstrahlen [10] möglich). Im Falle des Eisenbahnmodells werden manche Berechnungen, wie z.B. die Reflexion, doppelt

erklärt. Sie sind im Grunddokument für die Eisenbahn [11] und im Ausbreitungsdokument [9] zu finden.

### 3.4.2 Geometrische Betrachtung

Die geometrische Betrachtung ist für dieses Modell im Ausbreitungsdokument [9] zu finden. Hierbei wird eine Optimierung für das bestehende Gelände vorgenommen. Diese erfolgt wie im Kapitel 3.3.2 und hat demzufolge auch die selben Kriterien. Eine Glättung des Terrains wird hier nicht benötigt. Abhängig von dem Ergebnis der Optimierung wird das Terrain dann in vier Kategorien eingeteilt. Diese sind Flaches Terrain, Tal, Hügel & Lärmschutzwände oder gemischtes Gelände. Für jede Kategorie wird für den Bodeneffekt ein eigener Formelapparat verwendet. Näheres zu diesem ist im Kapitel 3.4.4 zu finden.

### 3.4.3 Modell

Das Modell geht von mehreren sich bewegenden Punktquellen aus und wird in Terzen berechnet. Hierzu muss die Strecke in einzelne Abschnitte unterteilt werden, wobei Bögen als gerade Strecken approximiert werden. Die Kriterien für die Unterteilung sind die Gradiente, Verkehrsdichte, Ausführungsqualität der Strecke und Geschwindigkeit. Zudem darf sich das Schnittprofil der Ausbreitungstrecke in einem Abschnitt nicht zu sehr unterscheiden. Falls folgende Kriterien nicht erfüllt werden, müssen die Streckenabschnitte zusätzlich unterteilt werden:

$\Delta x_{min} = 5 - 10m$  Wobei  $\Delta x$  der Länge der Teilabschnitte, wie in Abb. 7 gezeigt, entspricht

$\beta_{max} = 10^\circ$  Wobei  $\beta$  dem Öffnungswinkel zwischen  $|P_1R|$  und  $|P_2R|$  entspricht

$RD_{min} = 0,75$  mit  $RD_{min} = |P_1R|/|P_2R|$

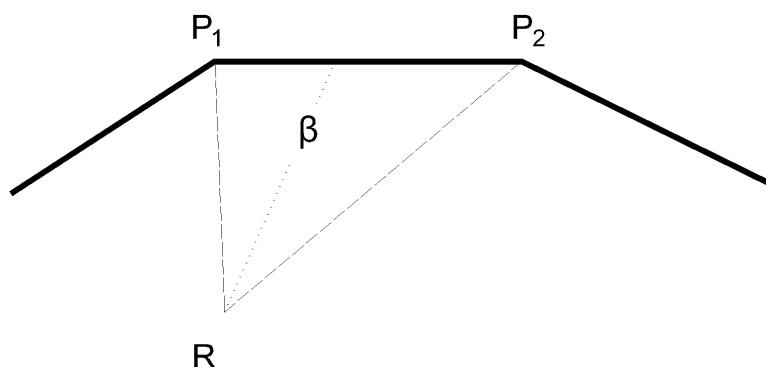


Abb. 7: Erfassung der Abschnitte vgl. [11]

Diese Aufteilung ist wichtig, da im Endeffekt jede Teilstrecke einzeln berechnet wird und für den Schalldruckpegel beim Empfänger – nach der Rechenregel in Glg. (1) – alle Abschnitte aufsummiert werden.

Für die Berechnung des Schalldruckpegels einer Punktquelle, wird nach Glg. (23) vorgegangen.

Diese Enthält mit  $\Delta L_{ij}$  einen Term für die Dämpfung. Im Hauptdokument [11] ist die geometrische Ausbreitungsdämpfung zu finden. Für die restlichen Einflüsse wird auf andere Dokumente [9, 10] verwiesen (genauer beschrieben in Kapitel 3.4.4). Die Daten für Wetter (15°C und 75% Luftfeuchtigkeit) und den Untergrund gibt das Hauptdokument [11] vor.

$$L_{E,ij} = 10 \cdot \log \left[ \frac{\Delta x_i}{v_i} 10^{(L_{W,ij} + \Delta L_{ij})/10} \right] \quad [\text{dB}] \quad (23)$$

mit:

$L_{E,ij}$  ...Schalldruckpegel am Immissionsort ausgegangen von der Position i der Quelle j [dB/s]

$\Delta x_i$  ...Länge des Teilabschnitts [m]

$v_i$  ...Geschwindigkeit an der Position i [m/s]

$L_{W,ij}$  ...Schalleistungspegel der Punktquelle an der Position i der Quelle j [dB]

$\Delta L_{ij}$  ...Ausbreitungsdämpfung an der Position i der Quelle j [dB]

Wie in Glg. (23) gezeigt, geht die Streckenabschnittslänge sowie die Geschwindigkeit in die Berechnung ein, was im Endeffekt in der Einheit einen Teil für die Zeit zurücklässt. Diese muss, wie die Glg. (24) zeigt, gesondert eliminiert werden. Diese Gleichung zeigt den Schalldruckpegel, den die selbe Art von Zug, während einer Zeitperiode, für den Empfänger hervorruft. Zum Schluss werden noch alle Zugarten aufsummiert um ein Gesamtergebnis zu erhalten. [11]

$$L_{eq,T,vc} = L_{E,v} - 10 \log(T) + 10 \log(N_{vc}) \quad [\text{dB}] \quad (24)$$

mit:

$L_{E,v}$  ...Schalldruckpegel aus der Summe aller Punktquellen aus allen Teilabschnitten einer Art von Zügen [dB]

$T$  ...Zeitdauer [s]

$N_{vc}$  ... Anzahl der Züge einer Art in der Zeitperiode T

Wird dies für jede Art von Zügen berechnet, ergibt das den Schalldruckpegel am Empfänger. Für die Berechnungen an Tunnelöffnungen existiert ein eigenes Kapitel, welches sich in der Bestimmung des Schalleistungspegels von der herkömmlichen Vorgangsweise unterscheidet.

Um den Schalldruckpegel bewerten zu können stehen Formelapparate für einen gewichteten Durchschnittsschallpegel für einen Tag, ein Jahresdurchschnittspegel oder der lauteste Schalldruckpegel eines Zuges zur Verfügung. Wie hier eine A-Bewertung vorgenommen werden kann, wird für letztere Option genauer definiert, da dort das Ergebnis bereits eine Bewertung enthält. Zum Schluss wird noch darauf hingewiesen, dass dieses Modell noch in der Testphase ist und Abweichungen vorkommen können. Dazu wird eine Formel und eine Tabelle für verschiedene Zustände bereitgestellt, welche eine Erhöhung der A-bewerteten Schalldruckpegels zufolge haben. [11]

### 3.4.4 Dämpfung

Die Ausbreitungsdämpfung wird durch den Term  $\Delta L_{ij}$  der Glg. (23) beschrieben. Das Hauptdokument [11] definiert diesen Term durch die geometrische Ausbreitungsdämpfung und verweist dann auf die zusätzlichen Dokumente [9, 10]. Welche Einflüsse bedingungslos verwendet werden müssen, ist hier nicht definiert. Zusätzlich ist im Hauptdokument [11] die Reflexion beschrieben. Streuungen durch Streuungszonen (Bewuchs und Gebäude) sind im Ausbreitungsdokument [9] zu finden.

**geometrische Ausbreitungsdämpfung** Diese ist direkt im Hauptdokument [11] beschrieben. Der Term  $\Delta L_{ij}$  ist dort definiert als:  $-10 \log(4\pi r_{ij}^2)$  + Korrektur aufgrund Bodeneinflüsse, etc. Damit entspricht sie der allgemeinen Definition der punktförmigen Ausbreitung.

**Luftabsorption** (laut Nord 2000: Effect of Air Absorption) Diese wird hier zunächst mit Hilfe der Norm ISO 9613-1 [4] ermittelt und entspricht damit dem Prinzip, welches im Kapitel 3.1.4 beschrieben wurde. Allerdings wird diese Methode allein als zu ungenau empfunden und es wird eine Korrektur ( $\Delta L_a$ ) vorgenommen. Diese kann mit einer Formel, welche nur von der Reinton-Luftabsorption abhängig ist (Glg. (25)), oder mit einem Diagramm erreicht werden. Das Diagramm ist ausschließlich von der Frequenz abhängig. [9]

$$\Delta L_a = -A_0(1,0053255 - 0,00122622A_0)^{1,6} \quad [\text{dB}] \quad (25)$$

mit:

$\Delta L_a$  ...korregierte Luftabsorption [dB]

$A_0$  ...Reinton-Luftabsorption [dB]

**Bodeneffekt und Beugung** (laut Nord 2000: Effect of Terrain and Screens) Nach der Einteilung in die vier verschiedenen Terraintypen, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, muss hier eine Fresnelzone ermittelt werden. Diese beschreibt den Bereich, an dem ein Einfluss durch den Boden erfolgt. Für jede Art von Terrain gibt es einen eigenen Rechengang. Das flache Terrain und das Tal folgen bei der Berechnung dem selben roten Faden, wobei beim Tal ein zusätzlicher Parameter vorhanden ist. Dieser ist davon abhängig ob der maßgebende Geländeteil konvex, konkav oder ein Übergangselement ist. Des Weiteren finden hier die Geometrie der Fresnelzone, die Bodenrauigkeit und die Positionen von Sender und Empfänger ihren Einfluss. Dabei geht die Bodenrauigkeit auf die selbe Weise, wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben (also über die Impedanz), in die Berechnungen ein. Diese ist nicht in diesem Dokument angeführt und es wird auf ein weiteres ([3]) verwiesen, welches für die Impedanz zuständig ist. Hier wird mit Schalldrücken gearbeitet, welche, unter dem Einfluss von bodenbeschreibenden Parametern, addiert werden. Das Dokument gibt nicht ausdrücklich vor, die Inkohärenz zu berücksichtigen, bietet jedoch in einem eigenen Kapitel die Möglichkeit dazu.

Für den Fall, dass Hügel oder Lärmschutzwände existieren, werden nochmals verschiedene Szenarien angegeben (eine Lärmschutzwand, zwei Lärmschutzwände etc.). Diese beschreiben für jeden Fall die Schallpfade und wie dabei der Schalldruck berechnet wird. Nachdem für jeden Pfad ein Schalldruck ermittelt wurde, können diese addiert und zu einem Schalldruckpegel umgewandelt werden, welcher die Dämpfung repräsentiert (Inkohärenz kann ebenfalls berücksichtigt werden).

Für den Fall, dass ein gemischtes Terrain existiert, können die Dämpfungswerte, wie in Glg. (26) gezeigt, gewichtet addiert werden. Diese Wichtung wird mit drei Parametern erreicht, welche von Geometrie des Geländes (bzw. Lärmschutzwände) und der Fresnelzonen, der Frequenz, der Weglängendifferenz sowie von den Höhen von Sender und Empfänger abhängig sind. [9]

$$\Delta L_t = r_{hill} \Delta L_{hill} + (1 - r_{hill}) \Delta L_{nonhill} \quad [\text{dB}] \quad (26)$$

$$r_{hill} = r_{\Delta l} r_{\lambda} r_{Fz} \quad (27)$$

mit:

$\Delta L_t$  ...Dämpfung durch ein gemischtes Terrain [dB]

$r_{hill}$  ... Übergangparameter aufgrund eines gemischten Terrains

$\Delta L_{hill}$  ...Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts im Hügel-Terrain [dB]

$\Delta L_{nonhill}$  ...Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts im Terrain ohne Hügel oder Lärmschutzwänden [dB]

$r_{\Delta l}$  ...Parameter aufgrund von Lärmschutzwänden

$r_{\lambda}$  ...Parameter für die Wellenlänge

$r_{Fz}$  ...Parameter für die Fresnelzone

**Absorption und Reflexion** (laut Nord 2000: Multiple reflections) Reflexionen werden hier mit Hilfe von Spiegelquellen, wie in Abb. 1 gezeigt, gelöst. Dabei wird die Absorption, wie auch im Kapitel 3.1.4 beschrieben, über einen prozentuellen Anteil erfasst, welcher den Schalleistungspegel reduziert. Dabei sind auch mehrere Subtraktionen möglich, falls Mehrfachreflexionen stattfinden. [11]

### 3.4.5 Beurteilung

Die Beurteilung ist nicht Teil dieses Modells, da jedes Land selbst entscheiden kann, wie diese vorgenommen wird. Es bietet die Möglichkeit zur Berechnung der äquivalenten Schallpegel für die Tageszeiten Tag, Abend und Nacht, sowie eine gewichtete Summe dieser. Bei dieser Summation werden für Abend- und Nachstunden ein Aufschlag von 5 bzw. 10 dB verhängt. Zudem kann mit einem Input von externen Wetterdaten ein Jahresmittelwert berechnet werden. [11]

## 3.5 Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual [21]

### 3.5.1 Anwendungsbereich

Dieses Modell ist für die Berechnung und Bewertung von Transitverkehr sowie Kombination von Schnellstraßen und Transitverkehr geeignet. Dominiert der Lärm der Schnellstraße wird ein anderes Modell benötigt. Als Transitverkehr wird hier Straße, Schiene sowie Bootsfahrt angeführt. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit Berechnungen, für alle im Betrieb vorkommenden stationären Lärmquellen (zum Beispiel Umschlagbahnhöfe), durchzuführen.

### 3.5.2 Geometrische Betrachtung

Eine spezielle geometrische Betrachtung ist hier nicht notwendig. Im Vergleich zu allen anderen in dieser Arbeit angeführten Modellen wird hier zunächst ein Schalldruckpegel in 50ft (15,24m) Entfernung berechnet und auf diesen sind dann alle notwendigen Einflüsse anzuwenden. Für die weiteren Berechnungen gehen die Distanzen zwischen Sender und Empfänger ein. Höhenunterschiede werden einzig für die Berechnung von Dämpfungen durch Boden oder Lärmschutzwände benötigt (siehe Kapitel 3.5.4).

### 3.5.3 Modell

Dieses Modell besteht aus drei Stufen mit unterschiedlichen Detailierungsgrad. Jede Stufe ist einem anderen Projektfortschritt zugeteilt und hat eigene Berechnungsregeln und Bewertungskriterien. Zudem wird von Beginn an unterschieden, welche Nutzungen beim Empfänger vorhanden sind und es werden dementsprechend andere Formeln verwendet. Die Einteilung der Empfänger erfolgt mit dem Start der Datensammlung und bestimmt die zukünftigen Vergleichswerte. Eingeteilt wird in:

**Nutzungskategorie 1** Flächen in denen Ruhe eine wesentliche Rolle spielt. Als Beispiele sind hier Aufnahmestudios und Konzertsäle angeführt.

**Nutzungskategorie 2** Das sind alle Gebäude in denen Menschen für gewöhnlich Nüchternungen tätigen (Krankenhäuser, Hotels, Wohnungen).

**Nutzungskategorie 3** Flächen mit vorwiegender Tages- und Abendnutzung, wie zum Beispiel Schulen und Bibliotheken.

Um die Berechnungen zu erleichtern, befindet sich in jedem Kapitel ein Berechnungsbeispiel. Eine A-Bewertung ist für die Endergebnisse in den Formeln enthalten. Die drei Stufen mit ansteigendem Detailierungsgrad sind:

#### **Lärmuntersuchung (Noise Screening Procedure)**

In diesem Stadium geht es um die Nutzung des zu untersuchenden Gebiets und um die Art des Projektes, sowie die zugehörigen Kriterien. Hier wird noch keine Berechnung durchgeführt, sondern Daten gesammelt und überprüft, ob eine weitere Untersuchung notwendig ist. Hierzu gibt es zwei Tabellen. Die erste ist für die Projektart und gibt an bis zu welcher Entfernung eine Lärmuntersuchung stattfinden muss. Dabei wird zwischen ungehinderter Schallausbreitung und durch Gebäude behinderte Schallausbreitung unterschieden. Die zweite Tabelle zeigt welche Annahmen für die zukünftige Nutzung des Projekts hinsichtlich der Anzahl der Fahrten, der Geschwindigkeit und Lärmbewertung getroffen wurden. Wenn sich kein maßgebender Empfänger innerhalb des zu untersuchenden Bereichs befindet und die Annahmen richtig sind, müssen keine weiteren Berechnungen durchgeführt werden.

#### **Generelle Lärmschätzung (General Noise Assessment)**

Hierbei handelt es sich um eine erste Abschätzung des Schalldruckpegels. Es wird mit Hilfe von Formeln, welche abhängig vom Projekt und Fahrzeugen sind, ein erster A-bewerteter Schalldruckpegel berechnet. Dies ist eine erste Vorbemessung um Alternativen bezüglich der Modell- und Trassenwahl zu diskutieren.

Hierzu wird die Fahrzeugart benötigt, welche einen Referenzschalldruckpegel mit Hilfe einer Tabelle bestimmt. Dieser Pegel ist für 50mph und ein Fahrzeug definiert. Mit diesem Referenzschalldruckpegel kann ein Schalldruckpegel in 50ft Entfernung berechnet werden. Für die Schalldruckpegelberechnung stehen drei Tabellen zur Verfügung, welche ein festes Führungssystem (Schiene), Schnellstraßen oder stationäre Lärmquellen repräsentieren. In diesen Tabellen sind die zu verwendenden Formeln zu finden. Hier haben Geschwindigkeit und Anzahl der Fahrzeuge, sowie Lärmschutzwände (durch eine Abminderung von 5 dB) ihren Einfluss. Zudem können hier die einzelnen Fahrzeuge addiert und als Tagesmittelwert berechnet werden. Dieser Schalldruckpegel bei 50ft Entfernung wird dann mit einem Diagramm oder einer weiteren Formel auf die notwendige Entfernung skaliert. Mit dem Ergebnis erfolgt dann eine Bewertung. Ein Beispiel zur Berechnung des Schalldruckpegels einer Diesellokomotive in 50ft Entfernung ist in Glg. (28) zu sehen.



$$L_{eq(lhr)} = SEL_{ref} + 10 \log(N_{Loco}) + K \cdot \log\left(\frac{S}{50}\right) + 10 \log(V) - 35,6 \quad [\text{dB}] \quad (28)$$

mit:

$L_{eq(lhr)}$  ... Lauteste Stunde während der lärmsensiblen Stunden [dB]

$SEL_{ref}$  ...Referenzschallpegel eines Fahrzeuges [dB]

$N_{Loco}$  ...Durchschnittliche Anzahl von Lokomotiven pro Zug

$K$  ...Konstante zur Berücksichtigung der Art des Zuges

$S$  ...Geschwindigkeit [mph]

$V$  ...Durchschnittliche Anzahl der Züge pro Stunde

### Detaillierte Lärmanalyse (Detailed Noise Analysis)

Der Vorgang ist hier der selbe wie bei der Lärmschätzung, jedoch kommt hier ein zusätzlicher Einfluss der Dämpfungen zur Geltung. Der Schalldruckpegel wird für eine Entfernung von 50ft berechnet und dann mit Hilfe von weiteren Formeln (wie z.B. durch Glg. (29)) an die notwendige Entfernung angepasst. In diesen Formeln gehen die Dämpfungswerte von Bodeneinfluss und Abschirmungen ein (siehe hierzu Kapitel 3.5.4). Anschließend werden alle Pegel aus allen Quellen nach der Rechenregel in Glg. (3) addiert und können bewertet werden.

#### 3.5.4 Dämpfung

Die Berücksichtigung der Dämpfung erfolgt in diesem Modell in Abhängigkeit von der Art der Schallquelle. In anderen Worten, ob es sich um eine stationäre Quelle, eine Lokomotive oder eine Schnellstraße etc. handelt. In Glg. (29) wird das Beispiel einer Lokomotive illustriert.

$$L_{DistShield} = L - 20 \log\left(\frac{D}{50}\right) + 10 \cdot G \cdot \log\left(\frac{D}{29}\right) - A_{Shielding} \quad [\text{dB}] \quad (29)$$

mit:

$L$  ...  $L_{dn}$  für Nutzungskategorie 2 oder  $L_{eq}$  für Nutzungskategorie 1 und 3 [dB]

$D$  ...Distanz [ft]

$G$  ...Bodenfaktor

$A_{Shielding}$  ... Dämpfungsmaß von Lärmschutzwänden, Gebäuden oder Bäumen [dB]

**geometrische Ausbreitungsdämpfung** Diese wird, wie in Glg. (29) gezeigt, berücksichtigt. Aufgrund der Unterschiede in den nationalen Einheiten der anderen Modelle ist in der geometrischen Ausbreitungsdämpfung eine Differenz in den Formeln nicht sofort zu erkennen. Jedoch wird in der textlichen Anleitung des Dokuments darauf hingewiesen, dass bei der Verdopplung der Distanz der Schalldruckpegel um 6 dB für Punktquellen und um 3 dB für Linienquellen abnimmt. Damit entspricht es den allgemeinen Berechnungsregeln für die geometrische Ausbreitungsdämpfung.

**Luftabsorption** In diesem Modell wird angenommen, dass die Dämpfung aufgrund des Bodeneffekts für Entfernungen bis 300ft maßgebend und dadurch der atmosphärische Einfluss vernachlässigbar ist. Sollte die Distanz über diese Entfernung hinausgehen, muss ein anderes Modell verwendet werden.

**Bodeneffekt** Dieser wird wie in Glg. (29) gezeigt, über eine Faktor  $G$  berücksichtigt. Dieser ist für harten Untergrund gleich 0 und für weichen wie nach Glg. (30) bis (32) zu rechnen.

$H_{eff}$  wird nach einer Tabelle berechnet, die die Höhen von Sender und Empfänger sowie die Position der Lärmschutzwand berücksichtigt.

$$0,66 \quad \text{für } H_{eff} \leq 5 \quad (30)$$

$$G = 0,75\left(1 - \frac{H_{eff}}{42}\right) \quad \text{für } 5 < H_{eff} < 42 \quad (31)$$

$$0 \quad \text{für } H_{eff} \geq 42 \quad (32)$$

**Beugung** Die Berücksichtigung der Beugung erfolgt über ein Dämpfungsmaß, welches sich aus der maximalen Dämpfung aus Lärmschutzwand, Gebäuden oder Bäumen ergibt.

Für die Dämpfung durch Lärmschutzwände geht die Art der Lärmschutzwand (absorbierend oder nicht absorbierend), die Weglängendifferenz, Bodenfaktor und die Distanz in die Rechnung ein. Wenn die Dämpfung durch Gebäude maßgebend ist, wird die Anzahl der Häuserreihen sowie der Zwischenabstand der Bauwerke benötigt. Bei der Dämpfung durch Bäume wird die Mächtigkeit der Baumreihe berücksichtigt.

**Absorption und Reflexion** Die Absorption wird bei der Art der Lärmschutzwand berücksichtigt um das Dämpfungsmaß zu berechnen. Reflexionen an harten Oberflächen werden in diesem Modell nicht explizit angeführt.

### 3.5.5 Beurteilung

Für die Beurteilung ist die Einteilung in Nutzungsklassen, wie in Kapitel 3.5.3 beschrieben, notwendig. Diese bestimmt ob entweder der Tagesdurchschnittspegel  $L_{dn}$  oder die lauteste Stunde  $L_{eq(1hr)}$  zum Vergleich hinzugezogen wird. Zudem bestimmt die Nutzungskategorie die maximal erlaubten Pegelgrenzen. Die Lärmpegelgrenzen sind dabei abhängig von dem derzeitigen Schalldruckpegel. In anderen Worten, die Lärmpegelerhöhung durch das zukünftige Projekt darf nicht überschritten werden.

Um einen derzeitigen Schalldruckpegel zu erhalten, gibt es in diesem Modell einige Formeln um diesen abschätzen zu können oder eine Anleitung um diesen zu messen. Unterteilt wird bei den Ergebnissen in keinen, mäßigen oder starken Einfluss auf die Umwelt. Falls diese Grenzen überschritten werden, gibt es zusätzlich ein paar Beispiele um den Schallschutz zu verbessern.

## 4 Vergleich

Aufgrund der großen Unterschiede in den einzelnen Modellen in Bezug auf Komplexität und den Formelapparat ist eine einfache Liste, welche zeigt ob bestimmte Inhalte vorhanden sind, nicht zielführend. Jedes Land hat eigene Rechtsgrundlagen, welche einzuhalten sind und dadurch ergaben sich unterschiedliche Detailierungsgrade in Abhängigkeit davon, wie sehr der Lärmschutz geachtet wird. Daher ist in diesem Kapitel eine textliche Beschreibung der auffälligsten Parallelen und Differenzen angeführt. Zudem wird in Tab. 1 und Tab. 2 in Kurzform demonstriert, auf welche Weise die Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Weiters führt sie nochmals die wichtigsten Daten an.

Es ist zu erwähnen, dass sich jedes Modell in den Punkten Temperatur und Luftfeuchtigkeit unterscheidet. Aufgrund der verschiedenen geographischen Lagen ist das eine plausible und logische Abweichung zwischen den Modellen. Auch wenn sich die Basiswerte hierfür unterscheiden, ist die Berücksichtigung in den Modellen ÖAL 28 [12], Schall 03 [18], sonRAIL [20] und Nord 2000 [11] die selbe.

Es ist zu sehen, dass das Modell aus den Vereinigten Staaten von Amerika die größten Differenzen zu den anderen Modellen aufweist. Auch wenn in den europäischen Modellen ein Unterschied in den Formelapparaten vorhanden ist, können Parallelen oder sogar Verweise auf die gleichen Normen erkannt werden. Um zu erkennen, welcher Detailierungsgrad ausreichend ist und wie weit

sich die Ergebnisse der Modelle zahlenmäßig voneinander unterscheiden, sind weitere Forschungen notwendig.

Jedes der Modelle weist eine Eigenheit auf welche im Laufe dieser Arbeit nicht verglichen werden konnte und daher wird diese nochamls hier hervorgehoben:

**ÖAL 28 [12]:** Dieses Modell ist das einzige von den hier angeführten, in welchem die strategische Lärmkartierung explizit in den Berechnungen hervorgehoben wurde. Zudem ist ein Verfahren zur Empfangspunktberechnung an Fassaden ausschließlich in diesem Modell vorzufinden.

**Schall 03 [18]:** Dieses Modell hat am Ende ein eigenes Kapitel, in welchem erklärt wird, wie bei neuer Bahntechnik oder schalltechnischen Innovationen vorzugehen ist. Dabei wird der Vorgang der Messung bei diesen Neuheiten beschrieben.

**sonRAIL [20]:** Da sich dieses Modell im Zuge eines Projektes entwickelt hat, ist die gesamte Dokumentation nachzulesen. Eine Beschreibung, weshalb die jeweiligen Einflussparameter gewählt wurden, ist vorzufinden und deren Werte wurden mit Messdaten hinterlegt.

**Nord 2000 [11]:** Dieses Modell besteht aus mehreren Einzeldokumenten, die alle für sich in eigenen Einsatzbereichen verwendet werden können. Daher könnten diese auch im Zuge von anderen Projekten eingesetzt werden.

**Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual [21]:** Im Gegensatz zu den anderen zu vergleichenden Modellen, beschreitet dieses im gesamten Formelapparat andere Wege. Der Stufenaufbau mit unterschiedlichen Detaillierungsgrad sorgt für frühzeitige Überlegungen während eines Projektes. Zudem enthält es eine komplette Beurteilungsstrategie.

**Tab. 1:** Berücksichtigung der Einflussfaktoren - Teil 1

	<b>Erschei- nungs- jahr</b>	<b>Art des Do- kumentes</b>	<b>Anwen- dungs- bereiche</b>	<b>Frequenz- bänder</b>	<b>Berechnung Emmission enthalten</b>	<b>Quellen</b>	<b>Gelände</b>	<b>geometrische Ausbrei- tungsdämp- fung</b>	<b>Luft- absorption</b>
<b>ÖAL 28</b>	2019	Richtlinie	Eisenbahn-, Straßen- und Industrie- lärm	Terzbänder	nicht enthalten	einzelne Punkt- quellen	mittlere Ebene	allgemeine Gleichung für Punktquellen	Absorptions- koeffizient nach ISO 9613- 1 [4]
<b>Schall 03</b>	2014	Verordnung	Eisen-, Straßen- und U-Bahn	Oktavbänder	enthalten	Zerlegung Strecke in Abschnitte mit Punktquellen	Winkelkorrektur- werte und mittlere Höhe	allgemeine Gleichung für Punktquellen	Absorptions- koeffizient nach DIN ISO 9613- 2 [2]
<b>sonRail</b>	2010	Projekt- dokumentation	Eisenbahn	Terzbänder	Input aus ge- messenen Em- missionspegeln	reale Punkt- quellen in abhängigkeit von Zug und Höhen	Optimierung und Glättung des Geländes	allgemeine Gleichung für Punktquellen	Absorptions- koeffizient nach ISO 9613- 1 [4]
<b>Nord 2000</b>	2001	Forschungs- projekt	Eisenbahn-, Straßen- und Industrie- lärm	Terzbänder	enthalten	Zerlegung in Abschnitte mit einer ge- schwindigkeits- behafteten Punktquelle	Optimierung des Geländes	allgemeine Gleichung für Punktquellen	Absorptions- koeffizient nach ISO 9613- 1 [4] & zusätz- liche Korrektur
<b>Transit Noise and Vi- bration Impact Assess- ment Manual</b>	2018	Forschungs- bericht	Transitverkehr von Straße, Schiene und Bootsfahrt	nicht berück- sichtigt	Anleitung für Messungen	ein Fahrzeug entspricht einer Quelle	Höhenunterschie- de und Distanz zwischen Sender und Empfänger maßgebend	allgemeine Gleichung für Punktquellen	nicht berück- sichtigt

**Tab. 2:** Berücksichtigung der Einflussfaktoren - Teil 2

	<b>Einfluss des Untergrundes</b>	<b>Beugung</b>	<b>Reflexion</b>	<b>Absorption</b>	<b>Bewuchs</b>	<b>Kohärenz</b>	<b>A-Bewertung</b>	<b>Beurteilung</b>
<b>ÖAL 28</b>	Tabellenwerte abhängig vom Strömungswiderstand des Bodens	Einfach- und Mehrfachbeugung möglich	Spiegelquelle	prozentueller Anteil von Reflexion	nach ISO 9613-2 [13]	nicht berücksichtigt	am Immissions-schallpegel	Berechnung eines Beurteilungspegels ohne Anführung von Grenzwerten
<b>Schall 03</b>	Boden oder Wasser	Einfach- und Mehrfachbeugung möglich	Spiegelquelle	Tabellenwert in dB	nicht berücksichtigt	nicht berücksichtigt	am Schalleis-tungspegel	Berechnung eines Beurteilungspegels ohne Anführung von Grenzwerten
<b>sonRail</b>	Strömungs-widerstand	über Schallpfade ge-rechnet und dadurch mit Bodeneffekt kombiniert, Einfluss durch Fresnelzonen	sekundäre Schall- quelle aus Schalldruck gebildet	Prozentueller Anteil aus sekundärer Schallquelle	sekundäre Schallquelle	enthalten	am Immissions-schallpegel	Berechnung eines Beurteilungspegels ohne Anführung von Grenzwerten
<b>Nord 2000</b>	Strömungs-widerstand	über Schallpfade ge-rechnet und dadurch mit Bodeneffekt kombiniert, Einfluss durch Fresnelzonen	Spiegelquelle	prozentueller Anteil von Reflexion	Berücksichtigung über Streungs-zonen möglich	Möglichkeit zur Berücksich-tigung	intransparent in Formelwerk	Berechnung eines Beurteilungspegels ohne Anführung von Grenzwerten
<b>Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual</b>	Faktor abhängig von Härte des Untergrundes und Höhenunterschie-de	Einfache Beugung aus Maximalwert von Lärmschutz-wand, Gebäude oder Bäumen	Berücksichtigu nicht ange-führt	im Dämpfungs-maß abhängig von der Art der Lärmschutz-wand	als Dämpfungs-term wenn maßgebend	nicht berück-sichtigt	nicht berücksich-tigt	komplett im Do-kument veran-kert

## Literatur

- [1] *Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG)*. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, 2018.
- [2] *DIN ISO 9613-2:1999-10 Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996)*. DIN Deutsches Institut für Normung, 1999.
- [3] *Ground Surfaces: Determination of the Acoustic Impedance*. Espo: NORDTEST, 1991.
- [4] *ISO 9613-1:1993 06 01: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors*. International Organization for Standardization, 1993.
- [5] *ISO 9613-2:1996 12 15: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation*. International Organization for Standardization, 1996.
- [6] Lange, K. und Löcherer, K.-H. *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*. Fünfte, überarbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1992.
- [7] *Lärmschutz-Verordnung (LSV)*. Schweizerische Bundesrat, 2019.
- [8] Möser, M. *Technische Akustik*. 8., aktualisierte Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [9] *Nord 2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction*. Kgs. Lyngby: DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics, 2001.
- [10] *Nord 2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 2: Propagation in an Atmosphere with Refraction*. HØrsolm: DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics, 2006.
- [11] *Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Rail Traffic Noise*. Borås: Swedish National Testing and Research Institute, 2001.
- [12] *ÖAL-Richtlinie Nr. 28: Berechnung der Schallausbreitung im Freien und Zuweisung von Lärmpegeln und Bewohnern zu Gebäuden*. Wien: Austrian Standards, 2019.
- [13] *ÖNORM ISO 9613-2:2008 07 01: Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren*. Austrian Standards Institute, 2008.
- [14] *Railway Traffic Noise - Nordic Prediction Method*. TemaNord, 1996.
- [15] Riccabona, C. und Bednar, T. *Baukonstruktionslehre 4 - Bauphysik*. 8., überarbeitete Auflage. Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH, 2010.
- [16] *Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm - Erklärung der Kommission im Vermittlungsausschuss zur Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*. Europäisches Parlament Rat der Europäischen Union, 2002.
- [17] *RVE 04.01.02 Berechnung von Schienenverkehrslärmemissionen*. Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2019.
- [18] *Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV) Anlage 2 (zu § 4) Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03)*. Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamts für Justiz, 2014.
- [19] *SEMIBEL Schweizerisches Emissions- und Immissionsmodell für die Berechnung von Eisenbahnlärm*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1990.
- [20] *sonRAIL - Projektdokumentation*. Schweizerische Eidgenossenschaft, 2010.
- [21] *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual*. Washington DC: Federal Transit Administration, 2018.

**Anhang****Tab. 3:** Wichtigen Terz- und Oktavbänder vgl. [15]

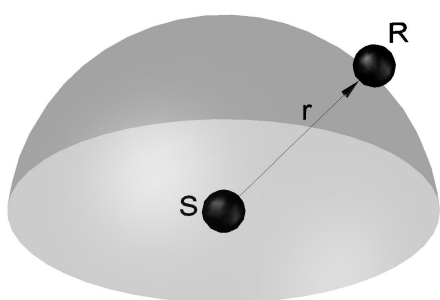
<b>Terzbänder</b>	<b>Oktavbänder</b>
Frequenz in Hz	Frequenz in Hz
50	
63	63
80	
100	
125	125
160	
200	
250	250
315	
400	
500	500
630	
800	
1000	1000
1250	
1600	
2000	2000
2500	
3150	
4000	4000
5000	

**Tab. 4:** A-Bewertung vgl. [12]

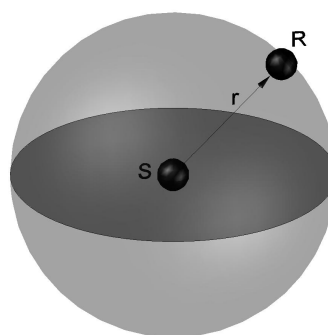
<b>Oktavband</b>	<b>A-Bewertung</b>
in Hz	in dB
63	-26,2
125	-16,1
250	-8,6
500	-3,2
1000	0
2000	+1,2
4000	+1,0

**Tab. 5:** Typische A-bewertete Schalldruckpegel vgl. [15]

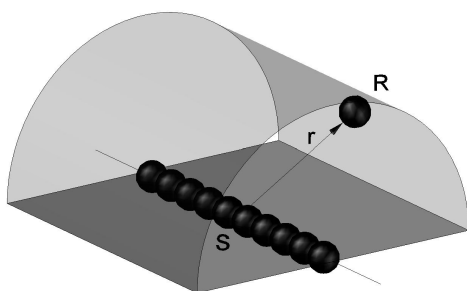
A-bewertete Schalldruckpegel in dB	
10-20	schwaches Blätterrauschen
20-30	Geh- und Installationsgeräusche
50-60	leise Sprache und Musik
60-70	Sprache und Musik in Wohnungen
70-80	laute Sprache und Musik
90-100	Diskotheek - bleibende Gehörschäden bei Dauereinwirkung
130-140	Düsenflugzeug beim Start aus der Nähe



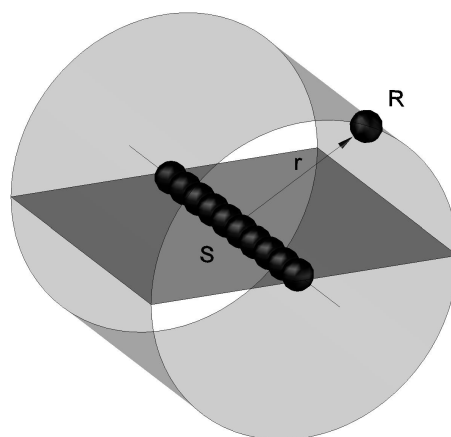
**Abb. 8:** Halbkugelförmige Ausbreitung



**Abb. 9:** Kugelförmige Ausbreitung



**Abb. 10:** Halbzylinderförmige Ausbreitung



**Abb. 11:** Zylinderförmige Ausbreitung