

**Berechnungsmethode für den Umgebungslärm
von bodennahen Quellen
– Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe –**

BUB

*vom 7. September 2021 (BAnz AT 05.10.2021 B4)
(Die amtliche Fassung steht nur im Bundesanzeiger.)*

*Aufgestellt: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare
Sicherheit (BMU) / Bundesministerium für Verkehr und
digitale Infrastruktur (BMVI)*

*Bekanntgegeben: Bekanntmachung BMU/BMVI vom 7. September 2021 –
IG 13 – 5021/100-2021-001 // G24/3523.12/1*

*Ersetzt: Berechnungsmethode für den Umgebungslärm
von bodennahen Quellen (BUB). Stand: 20. November 2018*

**Bekanntmachung
der Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach § 5 Absatz 1
der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV)*)**

vom 7. September 2021

Anlagen:

- Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB) ([FGSV 334/3](#))
- Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von Flugplätzen (BUF) (*hier nicht abgedruckt*)
- Berechnungsmethode zur Ermittlung der Belastetenzahlen durch Umgebungslärm (BEB) ([FGSV 334/5](#))
- Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB-D) (*hier nicht abgedruckt*)
- Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von Flugplätzen (BUF-D) (*hier nicht abgedruckt*)

Die oben genannten Berechnungsverfahren werden im Einvernehmen zwischen dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur bekannt gemacht (Anlagen 1 bis 5). Die Berechnungsverfahren sind ab dem 31. Dezember 2021 anzuwenden.

Die in diesen Bewertungsmethoden genannten DIN-Normen, DIN-EN-Normen, DIN-EN-ISO-Normen, DIN-CEN/TR-Normen und ISO-Normen sind bei der Beuth Verlag GmbH, Berlin, zu beziehen und in der Deutschen Nationalbibliothek archivmäßig gesichert niedergelegt.

Die Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach § 5 Absatz 1 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV) vom 20. November 2018 (BAnz AT 28.12.2018 B7) werden zum 31. Dezember 2021 aufgehoben.

Im Auftrag
Dr. Brüggemann
Dr. Stadler

*) Amtliche Anmerkung: Diese Bekanntmachung dient der Umsetzung der Delegierten Richtlinie (EU) 2021/1226 der Kommission vom 21. Dezember 2020 zur Änderung des Anhangs II der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich gemeinsamer Methoden zur Lärmbewertung zwecks Anpassung an den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt.

**Berechnungsmethode für den Umgebungslärm
von bodennahen Quellen
(Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe)**

BUB

Stand: 7. September 2021

Inhaltsübersicht

	Seite
1 Allgemeine Bestimmungen	1
1.1 Definition der Indizes, Frequenzbereiche und Frequenzbänder	1
1.2 Qualitätsrahmen	1
1.2.1 Genauigkeit der Eingangswerte	1
1.2.2 Verwendung von Standardwerten	1
1.2.3 Qualität der für die Berechnungen verwendeten Software	2
1.3 Ziel und Anwendungsbereich	2
2 Straßenverkehrslärm	2
2.1 Verwendete Symbole und Beschreibung der Quellen	2
2.1.1 Verwendete Symbole	2
2.1.2 Klassifizierung der Fahrzeuge	3
2.1.3 Anzahl und Position äquivalenter Schallquellen	4
2.1.4 Schalleistungspegel	5
2.1.4.1 Allgemeine Betrachtungen	5
2.1.4.2 Verkehrsfluss	5
2.1.4.3 Einzelnes Fahrzeug	6
2.2 Referenzbedingungen	6
2.3 Rollgeräusche	7
2.3.1 Allgemeine Gleichung	7
2.3.2 Einfluss der Lufttemperatur auf die Rollgeräuschkorrektur	7
2.4 Antriebsgeräusche	8
2.4.1 Allgemeine Gleichung	8
2.4.2 Einfluss von Straßensteigungen	8

	Seite
2.5 Einfluss des Beschleunigens und Abbremsens von Fahrzeugen	9
2.6 Einfluss der Art der Straßenoberfläche	9
2.6.1 Allgemeine Grundsätze	9
2.6.2 Einfluss der Gebrauchsdauer auf die Geräuscheigenschaften von Straßenoberflächen	10
3 Schienenverkehrslärm	10
4 Industrie- und Gewerbelärm	10
5 Schallausbreitung	10
5.1 Anwendungsbereich	10
5.2 Normative Verweisungen	11
5.3 Definitionen und verwendete Symbole	11
5.4 Überblick über die Berechnungsmethode	15
5.4.1 Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel am Punkt R in Dezibel A (dB(A))	16
5.4.2 Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel am Punkt R je Frequenzband	16
5.4.3 Langzeit-Dauerschallpegel für einen Ausbreitungsweg von S_q nach R	17
5.4.4 Schallpegel am Immissionsort R für einen einzelnen Ausbreitungsweg ...	17
5.5 Geometrische Betrachtungen	18
5.5.1 Schallausbreitungswege	18
5.5.1.1 Freie Sichtverbindung	18
5.5.1.1.1 Freie Sichtverbindung mit Beugung	19
5.5.1.1.2 Freie Sichtverbindung ohne Beugung	19
5.5.1.2 Blockierte Sichtverbindung	19
5.5.1.3 Seitliche Beugung	20
5.5.1.4 Reflexionen	20
5.5.2 Mittlere Grundlinie (MGL)	21
5.5.3 Beugung – Berechnung der Weglängendifferenzen δH und δF	23
5.5.3.1 Beugung bei blockierter Sichtverbindung	23
5.5.3.2 Beugung bei freier Sichtverbindung	25
5.5.4 Bodendämpfung bei gebeugten Ausbreitungswegen in der vertikalen Ausbreitungsebene	25
5.5.5 Bodendämpfung – gemittelter Bodenparameter	26
5.5.6 Dämpfung durch Retrobeugung	27
5.6 Modell der Schallausbreitung	28
5.6.1 Dämpfung aufgrund geometrischer Divergenz	28
5.6.2 Dämpfung aufgrund von Luftabsorption	28
5.6.3 Bodendämpfung	29
5.6.4 Dämpfung aufgrund von Beugung	30
5.6.5 Dämpfung aufgrund von Reflexionen	32

1 Allgemeine Bestimmungen

1.1 Definition der Indizes, Frequenzbereiche und Frequenzbänder

Die Berechnung des Schalldruckpegels ist für die acht Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 8 kHz vorzunehmen.

Die Berechnung des Straßenverkehrs-, Schienenverkehrs- sowie Industrie- und Gewerbelärms erfolgt in Oktavbändern, ausgenommen jedoch die Schalleistung der Quelle des Schienenverkehrslärms, bei der die Terzbänder genutzt werden. Für den Straßenverkehrs-, Schienenverkehrs- sowie Industrie- und Gewerbelärm, der auf diesen Oktavbandergebnissen beruht, wird der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel für den Zeitraum Tag, Abend und Nacht gemäß § 2 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSch V) durch Summierung über alle Frequenzen berechnet:

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \sum_{i=1}^8 10^{(L_{eq,T,i} + A_i)/10} . \quad (1.1)$$

Dabei gilt:

A_i bezeichnet die A-Bewertungskorrektur (siehe Tabelle 5.2),

i Frequenzbandindex und

T Index für den Zeitraum (Tag, Abend oder Nacht).

Wichtige Lärmparameter und weitere physikalische Parameter sind in Tabelle 1.1 aufgeführt.

Tabelle 1.1: Wichtige Parameter

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
L_p	in dB (re $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)	Momentaner Schalldruckpegel
$L_{Aeq,LT}$	in dB (re $2 \cdot 10^{-5}$ Pa)	Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel L_{Aeq} ausgehend von allen Quellen und Spiegelquellen am Punkt R
L_w	in dB (re 10^{-12} W)	In-Situ-Schalleistungspegel einer Punktquelle (Bewegung oder Stand)
$L_{w, i, dir}$	in dB (re 10^{-12} W)	Gerichteter In-Situ-Schalleistungspegel für das i -te Frequenzband
$L_{w'}$	in dB (re 10^{-12} W/m)	Längenbezogener Schalleistungspegel einer Quellenlinie
p	in Pa	Effektivwert des momentanen Schalldrucks
p_0	in Pa	Referenzschalldruck = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa
W_0	in W	Referenzschalleistung = 10^{-12} W

1.2 Qualitätsrahmen

1.2.1 Genauigkeit der Eingangswerte

Alle Eingangswerte, die den Emissionspegel einer Quelle beeinflussen, sind mit mindestens der Genauigkeit zu bestimmen, die einer Unsicherheit von ± 2 dB(A) im Emissionspegel der Quelle entspricht (wobei alle anderen Parameter unverändert bleiben).

1.2.2 Verwendung von Standardwerten

Die Eingangswerte für die Berechnung entsprechen der tatsächlichen Nutzung. Generell dürfen keine Standardeingangswerte oder -annahmen zugrunde gelegt werden.

Standardeingangswerte und -annahmen werden akzeptiert, wenn die Erfassung realer Daten mit unverhältnismäßig hohen Kosten verbunden ist.

1.2.3 Qualität der für die Berechnungen verwendeten Software

Die für die Berechnung verwendeten Softwareprodukte müssen die normgerechte Abbildung dieser Vorschrift sicherstellen; dies kann erfolgen in Anlehnung an die DIN 45687:2006-05, Akustik – Software-Erzeugnisse zur Berechnung der Schallimmissionen im Freien – Qualitätsanforderungen und Prüfbestimmungen.

1.3 Ziel und Anwendungsbereich

Mit der „Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB)“ können die Lärmindizes L_{DEN} (Tag-Abend-Nacht-Lärmindex) und L_{Night} (Nacht-Lärmindex) der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV) für den Straßenverkehr, den Schienenverkehr sowie für Industrie und Gewerbeanlagen berechnet werden, die für die Kartierung von Umgebungslärm nach § 47c des Bundes-Immissionsschutzgesetzes benötigt werden. Die Datengrundlage ist in der „Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB-D)“ dargestellt.

Die BUB gilt nicht für Schallberechnungen nach der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV) und der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm).

2 Straßenverkehrslärm

2.1 Verwendete Symbole und Beschreibung der Quellen

2.1.1 Verwendete Symbole

Tabelle 2.1: Formelzeichen, Einheiten und Bedeutung

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$a_{i,m}$	dB	Spektralkorrektur der Fahrbahnoberfläche
β_m	dB	Geschwindigkeitskorrektur der Fahrbahnoberfläche
$\Delta L_{WP,acc,m,k}$	dB	Korrekturterm zur Berücksichtigung des Einflusses einer lichtzeichengeregelten Kreuzung oder eines Kreisverkehrs auf das Antriebsgeräusch
$\Delta L_{WP,grad,m}$	dB	Korrekturterm zur Berücksichtigung des Einflusses der Längsneigung der Straße auf das Antriebsgeräusch
$\Delta L_{WP,i,m}$	dB	Gesamtkorrekturterm für das Antriebsgeräusch
$\Delta L_{WP,road,i,m}$	dB	Korrekturterm zur Berücksichtigung des Einflusses der Straßenoberfläche auf das Antriebsgeräusch
$\Delta L_{WR,acc,m,k}$	dB	Korrekturterm zur Berücksichtigung des Einflusses einer lichtzeichengeregelten Kreuzung oder eines Kreisverkehrs auf das Rollgeräusch
$\Delta L_{WR,i,m}$	dB	Gesamtkorrekturterm für das Rollgeräusch
$\Delta L_{WR,road,i,m}$	dB	Korrekturterm zur Berücksichtigung des Einflusses der Straßenoberfläche auf das Rollgeräusch

(Fortsetzung Tabelle 2.1: Formelzeichen, Einheiten und Bedeutung)

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\Delta L_{WR,temp}$	dB	Korrekturterm zur Berücksichtigung des Einflusses der Lufttemperatur auf das Rollgeräusch
τ	°C	Jahresdurchschnittstemperatur
τ_{ref}	–	Referenztemperatur ($\tau_{ref} = 20\text{ °C}$)
$A_{P,i,m}$	dB	Grundkoeffizient für das Antriebsgeräusch
$A_{R,i,m}$	dB	Grundkoeffizient für das Rollgeräusch
$B_{P,i,m}$	dB	Geschwindigkeitskoeffizient für das Antriebsgeräusch
$B_{R,i,m}$	dB	Geschwindigkeitskoeffizient für das Rollgeräusch
$C_{P,m,k}$	dB	Antriebsgeräuschkoeffizient, abhängig von der Art des Straßenknotenpunkts
$C_{R,m,k}$	dB	Rollgeräuschkoeffizient, abhängig von der Art des Straßenknotenpunkts
i	–	Index für das Frequenzband
k	–	Index für die Art des Straßenknotenpunkts
K_m	dB/°C	Korrekturkoeffizient für die Temperatur
$L_{W,i,m}$	dB	Gesamtschalleistungspegel eines Fahrzeugs
$L_{W',i,m}$	dB	Längenbezogener Schalleistungspegel einer Quellenlinie
$L_{WP,i,m}$	dB	Schalleistungspegel des Antriebsgeräuschs eines Fahrzeugs
$L_{WR,i,m}$	dB	Schalleistungspegel des Rollgeräuschs eines Fahrzeugs
m	–	Index für die Fahrzeugklasse
Q_m	1/h	Verkehrsfluss von Fahrzeugen der Klasse m
s	%	Längsneigung der Straße
v_m	km/h	Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeugklasse m
v_{ref}	–	Referenzgeschwindigkeit $v_{ref} = 70\text{ km/h}$
x	m	Entfernung der Punktquelle vom nächstgelegenen Schnittpunkt der entsprechenden Quellenlinie mit einer anderen Quellenlinie

2.1.2 Klassifizierung der Fahrzeuge

Die Quelle von Straßenverkehrslärm wird durch Kombination der Schallemission jedes einzelnen Fahrzeugs, das Teil des Verkehrsflusses ist, bestimmt. Die Fahrzeuge werden ausgehend von den Merkmalen ihrer Schallemission in vier Klassen eingeteilt:

- Klasse 1: Leichte Kraftfahrzeuge,
- Klasse 2: Mittelschwere Fahrzeuge,
- Klasse 3: Schwere Fahrzeuge,
- Klasse 4: Zweirädrige Kraftfahrzeuge,

Bei den zweirädrigen Kraftfahrzeugen erfolgt eine weitere Unterteilung in zwei Teilklassen, nämlich Mopeds und leistungsstärkere Krafträder, da sie sehr unterschiedlich gefahren werden und in der Regel zahlenmäßig weit auseinanderliegen.

Genauere Angaben zu den verschiedenen Fahrzeugklassen finden sich in Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Fahrzeugklassen

Klasse	Bezeichnung	Beschreibung	Fahrzeugklasse in EG-Typgenehmigung für vollständige Fahrzeuge ¹
1	Leichte Kraftfahrzeuge	PKW, Lieferwagen ≤ 3,5 t, Geländewagen (SUV ²), Großraumlimousinen ³ , einschließlich Anhänger und Wohnwagen	M1 und N1
2	Mittelschwere Fahrzeuge	Mittelschwere Fahrzeuge, Lieferwagen > 3,5 t, Busse, Wohnmobile usw. mit zwei Achsen und Doppelbereifung auf der Hinterachse	M2, M3 und N2, N3
3	Schwere Fahrzeuge	Schwere Nutzfahrzeuge, Reisebusse, Busse, mit drei oder mehr Achsen	M2 und N2 mit Anhänger, M3 und N3
4	Zweirädrige Kraftfahrzeuge	4a Zwei-, drei- und vierrädrige Mopeds 4b Motorräder mit und ohne Seitenwagen, drei- und vierrädrige Motorräder	L1e, L2e, L6e L3e, L4e, L5e, L7e

1 Klassen M und N gemäß „Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG“; Klasse L gemäß „Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen“.

2 SUV (Sports Utility Vehicles) Geländewagen

3 MPV (Multi-Purpose Vehicles) Mehrzweckfahrzeuge

2.1.3 Anzahl und Position äquivalenter Schallquellen

Bei diesem Verfahren wird jedes Fahrzeug (Klasse 1, 2, 3 und 4) durch eine einzige Punktquelle dargestellt, die gleichförmig in den 2π -Halbraum über dem Boden abstrahlt. Die erste Reflexion an der Straßenoberfläche wird implizit behandelt. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, befindet sich die Punktquelle 0,05 m über der Straßenoberfläche.

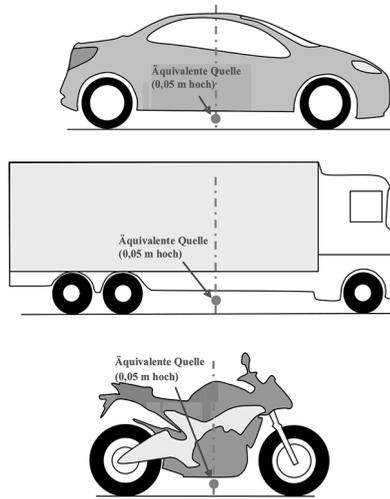


Abbildung 2.1: Position der äquivalenten Punktquelle bei leichten Fahrzeugen (Klasse 1), schweren Fahrzeugen (Klassen 2 und 3) und zweirädrigen Kraftfahrzeugen (Klasse 4)

Die Darstellung des Verkehrsflusses erfolgt durch eine Quellenlinie. Bei der Modellierung einer Straße mit mehreren Fahrspuren sollte idealerweise jede Fahrspur durch eine in ihrer Mitte verlaufende Quellenlinie repräsentiert werden. Es ist jedoch auch akzeptabel, bei einer Straße mit zwei Richtungsfahrbahnen eine Quellenlinie in der Straßenmitte oder bei mehrspurigen Straßen eine Quellenlinie je Fahrbahn in der äußeren Fahrspur zu modellieren.

2.1.4 Schalleistungspegel

2.1.4.1 Allgemeine Betrachtungen

Da die Schalleistung der Quelle im „akustischen Halbraum“ definiert wird, umfasst die Schalleistung auch den Effekt der Reflexion am Boden direkt unter der modellierten Quelle, wo es, abgesehen von der Reflexion an der Straßenoberfläche, die sich nicht direkt unter der modellierten Quelle befindet, keine störenden Gegenstände im unmittelbaren Umfeld gibt.

2.1.4.2 Verkehrsfluss

Die Schallemission eines Verkehrsflusses wird durch eine Quellenlinie dargestellt, die durch ihre gerichtete Schalleistung je Meter pro Frequenz gekennzeichnet ist. Dies entspricht der Summe der Schallemission der einzelnen Fahrzeuge im Verkehrsfluss unter Berücksichtigung der von den Fahrzeugen im untersuchten Straßenabschnitt verbrachten Zeit. Die Darstellung des einzelnen Fahrzeugs im Fluss erfordert die Anwendung eines Verkehrsflussmodells.

Wird ein stetiger Verkehrsfluss von Q_m Fahrzeugen der Klassen je Stunde mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit v_m (in km/h) angenommen, so wird die Schalleistung je Meter im Frequenzband i der Quellenlinie, $L_{W',i,m}$ bestimmt durch:

$$L_{W',i,m} = L_{W,i,m} + 10 \lg \left(\frac{Q_m}{1000 v_m} \right), \quad (2.1)$$

wobei $L_{W,i,m}$ die Schalleistung eines einzelnen Fahrzeugs ist. $L_{W',i,m}$ wird in dB angegeben (re 10^{-12} W/m). Diese Schalleistungspegel werden für jedes Oktavband i von 63 Hz bis 8 kHz berechnet.

Verkehrsflussdaten Q_m sind als Jahresdurchschnitt je Zeitraum (Tag-Abend-Nacht), je Fahrzeugklasse und je Quellenlinie anzugeben. Für alle Klassen sind die Eingabedaten für den Verkehrsfluss zu verwenden, die im Rahmen von Straßenverkehrszählungen oder mithilfe von Verkehrsmodellen ermittelt wurden.

Die Geschwindigkeit v_m ist eine repräsentative Geschwindigkeit je Fahrzeugklasse: in den meisten Fällen die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit für den Straßenabschnitt oder die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit für die Fahrzeugklasse, je nachdem, welcher Wert niedriger ist. Stehen vor Ort erfasste Messdaten nicht zur Verfügung, wird die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit für die Fahrzeugklasse verwendet.

2.1.4.3 Einzelnes Fahrzeug

Im Verkehrsfluss wird für alle Fahrzeuge der Klassen angenommen, dass sie mit der gleichen Geschwindigkeit fahren, also v_m , der Durchschnittsgeschwindigkeit des Verkehrsflusses der Klasse.

Ein Straßenfahrzeug wird mittels einer Reihe mathematischer Gleichungen modelliert, die die beiden Hauptgeräuschquellen repräsentieren:

- 1) Rollgeräusche aufgrund der Wechselwirkung Reifen/Straße;
- 2) Antriebsgeräusche, die vom Antriebssystem (Motor, Auspuff usw.) des Fahrzeugs erzeugt werden.

Aerodynamische Geräusche sind in der Quelle für Rollgeräusche inbegriffen.

Für leichte, mittelschwere und schwere Kraftfahrzeuge (Klassen 1, 2 und 3) entspricht die Gesamtschalleistung der energetischen Summe der Roll- und der Antriebsgeräusche. Somit wird der Gesamtschalleistungspegel eines Fahrzeugs für $m = 1, 2$ oder 3 definiert durch:

$$L_{W,i,m}(v_m) = 10 \lg(10^{L_{WR,i,m}(v_m)/10} + 10^{L_{WP,i,m}(v_m)/10}), \quad (2.2)$$

wobei $L_{WR,i,m}$ der Schalleistungspegel für Rollgeräusche und $L_{WP,i,m}$ der Schalleistungspegel für Antriebsgeräusche ist. Dies gilt für alle Geschwindigkeitsbereiche. Bei Geschwindigkeiten unter 20 km/h entspricht der Schalleistungspegel dem Wert, wie er durch die Formel für $v_m = 20$ km/h bestimmt ist.

Für zweirädrige Kraftfahrzeuge (Klasse 4) werden für die Quelle nur die Antriebsgeräusche berücksichtigt:

$$L_{W,i,m=4}(v_{m=4}) = L_{WP,i,m=4}(v_{m=4}). \quad (2.3)$$

Dies gilt für alle Geschwindigkeitsbereiche. Bei Geschwindigkeiten unter 20 km/h entspricht der Schalleistungspegel dem Wert, wie er durch die Formel für $v_m = 20$ km/h bestimmt ist.

2.2 Referenzbedingungen

Die Quellengleichungen und -koeffizienten gelten für folgende Referenzbedingungen:

- konstante Fahrzeuggeschwindigkeit,
- ebene Straße,
- Lufttemperatur von $\tau_{\text{ref}} = 20$ °C,
- virtuelle Referenzstraßenoberfläche, bestehend aus einem einen durchschnittlichen Verdichtungsgrad aufweisenden Asphaltbeton 0/11 und Splittmastixasphalt 0/11, zwei bis sieben Jahre alt und in einem repräsentativen Instandhaltungszustand und
- eine trockene Straßenoberfläche.

2.3 Rollgeräusche

2.3.1 Allgemeine Gleichung

Der Schalleistungspegel der Rollgeräusche im Frequenzband für ein Fahrzeug der Klasse $m = 1, 2$ oder 3 wird definiert als:

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \cdot \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,i,m} \quad (2.4)$$

Die Koeffizienten $A_{R,i,m}$ und $B_{R,i,m}$ sind für jede Fahrzeugklasse und für eine Referenzgeschwindigkeit von $v_{ref} = 70$ km/h in Oktavbändern gegeben. $\Delta L_{WR,i,m}$ entspricht der Summe der Korrekturkoeffizienten, die auf die Rollgeräuschemissionen bei bestimmten Straßen- oder Fahrzeugbedingungen angewendet werden, die von den Referenzbedingungen abweichen:

$$\Delta L_{WR,i,m} = \Delta L_{WR,road,i,m} + \Delta L_{WR,acc,m,k} + \Delta L_{W,temp} \quad (2.5)$$

Dabei gilt:

- $\Delta L_{WR,road,i,m}$ dient der Berücksichtigung des Einflusses, den eine Straßenoberfläche mit akustischen Eigenschaften, die von denen der virtuellen Referenzoberfläche nach Abschnitt 2.2 abweichen, auf die Rollgeräusche ausübt. Der Wert schließt den Einfluss sowohl auf die Ausbreitung als auch auf die Entstehung ein.
- $\Delta L_{WR,acc,m,k}$ dient der Berücksichtigung des Einflusses, den eine lichtzeichengeregelte Kreuzung oder ein Kreisverkehr auf die Rollgeräusche ausübt. Der Wert schließt den Einfluss der Geschwindigkeitsveränderung auf die Geräuscherzeugung ein.
- $\Delta L_{WR,temp}$ ist ein Term zur Korrektur einer Durchschnittstemperatur τ , die von der Referenztemperatur $\tau_{ref} = 20^\circ\text{C}$ abweicht.

2.3.2 Einfluss der Lufttemperatur auf die Rollgeräuschkorrektur

Die Lufttemperatur beeinflusst die Rollgeräuschemissionen in der Form, dass der Schalleistungspegel der Rollgeräusche mit steigender Lufttemperatur absinkt. Der Einfluss der Lufttemperatur wird in die Korrektur der Rollgeräusche auf der Straßenoberfläche einbezogen. Die Korrektur der Rollgeräusche auf der Straßenoberfläche wird normalerweise bei einer Lufttemperatur von $\tau_{ref} = 20^\circ\text{C}$ bewertet. Im Falle einer anderen Jahresdurchschnittslufttemperatur τ (in $^\circ\text{C}$) wird der durch die Straßenoberfläche verursachte Schall korrigiert durch:

$$\Delta L_{WR,temp} = K_m \cdot (\tau_{ref} - \tau) \quad (2.6)$$

Der Korrekturterm ist bei Temperaturen unter 20°C positiv (d. h. der Schallpegel steigt) und bei höheren Temperaturen negativ (d. h. der Schallpegel sinkt). Der Koeffizient K ist abhängig von der Straßenoberfläche und den Reifenmerkmalen und weist im Allgemeinen eine gewisse Frequenzabhängigkeit auf. Bei allen Straßenoberflächen ist ein generischer Koeffizient für leichte Fahrzeuge (Klasse 1) von $K_{m=1} = 0,08$ dB/ $^\circ\text{C}$ und für schwere Fahrzeuge (Klassen 2 und 3) von $K_{m=2} = K_{m=3} = 0,04$ dB/ $^\circ\text{C}$ anzuwenden. Der Korrekturkoeffizient ist auf alle Oktavbänder von 63 Hz bis 8 kHz gleichmäßig anzuwenden.

2.4 Antriebsgeräusche

2.4.1 Allgemeine Gleichung

Die Emission der Antriebsgeräusche umfasst die Gesamtheit der Anteile, die auf Motor, Auspuff, Getriebe, Lufteinlass usw. entfallen. Der Schallleistungspegel für die Antriebsgeräusche im Frequenzband i für ein Fahrzeug der Klasse m wird definiert als:

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \cdot \left(\frac{v_m - v_{ref}}{v_{ref}} \right) + \Delta L_{WP,i,m}. \quad (2.7)$$

Die Koeffizienten $A_{P,i,m}$ und $B_{P,i,m}$ werden in Oktavbändern für jede Fahrzeugklasse und für eine Referenzgeschwindigkeit $v_{ref} = 70$ km/h angegeben.

$\Delta L_{WP,i,m}$ entspricht der Summe der Korrekturkoeffizienten, die auf die Emission von Antriebsgeräuschen bei bestimmten Fahr- oder regionalen Bedingungen anzuwenden sind, die von den Referenzbedingungen abweichen:

$$\Delta L_{WP,i,m} = \Delta L_{WP,road,i,m} + \Delta L_{WP,grad,m} + \Delta L_{WP,acc,m,k}. \quad (2.8)$$

$\Delta L_{WP,road,i,m}$ dient der Berücksichtigung des Einflusses, den die Straßenoberfläche auf die Antriebsgeräusche mittels Absorption ausübt. Die Berechnung wird gemäß Abschnitt 2.6 durchgeführt.

$\Delta L_{WP,acc,m,k}$ und $\Delta L_{WP,grad,m}$ dienen der Berücksichtigung des Einflusses, den Straßensteigungen und das Abbremsen sowie Beschleunigen der Fahrzeuge an Straßenkreuzungen ausüben. Sie werden gemäß Abschnitt 2.4.2 bzw. 2.5 berechnet.

2.4.2 Einfluss von Straßensteigungen

Die Straßensteigung wirkt sich in zweierlei Hinsicht auf die Schallemission des Fahrzeugs aus:

- zum einen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit und damit auf die Emission von Roll- und Antriebsgeräuschen des Fahrzeugs;
- zum anderen auf die Motorleistung und die Motordrehzahl je nach eingelegtem Gang und damit auf die Emission von Antriebsgeräuschen des Fahrzeugs.

In diesem Abschnitt wird nur der Einfluss auf die Antriebsgeräusche betrachtet, wobei eine gleichbleibende Geschwindigkeit angenommen wird.

Der Einfluss der Straßensteigung auf die Antriebsgeräusche wird durch den Korrekturterm $\Delta L_{WP,grad,m}$ berücksichtigt, der von der Längsneigung s (in%), der Fahrzeuggeschwindigkeit v_m (in km/h) und der Fahrzeugklasse m abhängig ist. Bei einem Verkehrsfluss mit Gegenverkehr muss der Fluss in zwei Komponenten aufgespalten und zur Hälfte für bergauf sowie zur Hälfte für bergab korrigiert werden. Der Korrekturterm wird allen Oktavbändern gleichmäßig angerechnet:

- Für $m = 1$

$$\Delta L_{WP,grad,m=1}(v_m) = \begin{cases} \frac{\min\{12\%; -s\} - 6\%}{1\%} & \text{für } s < -6\% \\ 0 & \text{für } -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{\min\{12\%; s\} - 2\%}{1,5\%} \cdot \frac{v_m}{100} & \text{für } s > 2\% \end{cases} \quad (2.9)$$

- Für $m = 2$

$$\Delta L_{WP,grad,m=2}(v_m) = \begin{cases} \frac{\min\{12\%; -s\} - 4\%}{0,7\%} \cdot \frac{v_m - 20}{100} & \text{für } s < -4\% \\ 0 & \text{für } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\min\{12\%; s\}}{1\%} \cdot \frac{v_m}{100} & \text{für } s > 0\% \end{cases} \quad (2.10)$$

- Für $m = 3$

$$\Delta L_{WP,grad,m=3}(v_m) = \begin{cases} \frac{\min\{12\%; -s\} - 4\%}{0,5\%} \cdot \frac{v_m - 10}{100} & \text{für } s < -4\% \\ 0 & \text{für } -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\min\{12\%; s\}}{0,8\%} \cdot \frac{v_m}{100} & \text{für } s > 0\% \end{cases} \quad (2.11)$$

- Für $m = 4$

$$\Delta L_{WP,grad,m=4}(v_m) = 0 \quad (2.12)$$

Die Korrektur $\Delta L_{WP,grad,m}$ schließt implizit den Einfluss der Längsneigung auf die Geschwindigkeit ein.

2.5 Einfluss des Beschleunigens und Abbremsens von Fahrzeugen

Zur Berücksichtigung des Einflusses des Beschleunigens und Abbremsens vor bzw. nach lichtzeichengeregelten Kreuzungen und Kreisverkehren ist eine Korrektur wie nachfolgend beschrieben vorzunehmen.

Die Korrekturterme für Rollgeräusche, $\Delta L_{WR,acc,m,k}$, und Antriebsgeräusche, $\Delta L_{WP,acc,m,k}$, sind lineare Funktionen der Entfernung x (in m) der Punktquelle vom nächstgelegenen Schnittpunkt der entsprechenden Quellenlinie mit einer anderen Quellenlinie. Sie werden allen Oktavbändern gleichmäßig angerechnet:

$$\Delta L_{WR,acc,m,k} = C_{R,m,k} \cdot \max\left\{1 - \frac{|x|}{100}; 0\right\}, \quad (2.13)$$

$$\Delta L_{WP,acc,m,k} = C_{P,m,k} \cdot \max\left\{1 - \frac{|x|}{100}; 0\right\}. \quad (2.14)$$

Die Koeffizienten $C_{R,m,k}$ und $C_{P,m,k}$ sind abhängig von der Art des Straßenknotenpunkts k ($k = 1$ für eine lichtzeichengeregelte Kreuzung; $k = 2$ für einen Kreisverkehr) und werden für jede einzelne Fahrzeugklasse angegeben. Die Korrektur schließt den Einfluss der Geschwindigkeitsänderung beim Heranfahren an eine Kreuzung oder einen Kreisverkehr bzw. beim Verlassen der Kreuzung oder des Kreisverkehrs ein.

Zu beachten ist, dass bei einer Entfernung von $|x| \geq 100$ m Folgendes gilt:

$$\Delta L_{WR,acc,m,k} = \Delta L_{WP,acc,m,k} = 0.$$

2.6 Einfluss der Art der Straßenoberfläche

2.6.1 Allgemeine Grundsätze

Bei Straßenoberflächen mit akustischen Eigenschaften, die von denen der Referenzoberfläche abweichen, ist sowohl für die Rollgeräusche als auch für die Antriebsgeräusche ein Spektralkorrekturterm anzuwenden.

Für die Rollgeräuschemissionen wird der in Bezug auf die Straßenoberfläche anzuwendende Korrekturterm angegeben durch:

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \cdot \lg\left(\frac{v_m}{v_{ref}}\right). \quad (2.15)$$

Dabei gilt:

$\alpha_{i,m}$ ist die Spektralkorrektur in dB bei Referenzgeschwindigkeit v_{ref} für Klasse m (1, 2 oder 3) und Spektralband i .

β_m ist der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Verringerung der Rollgeräusche für Klasse m (1, 2 oder 3) und ist für alle Frequenzbänder identisch.

Für die Antriebsgeräuschemissionen wird der in Bezug auf die Straßenoberfläche anzuwendende Korrekturterm angegeben durch:

$$\Delta L_{WP,road,t,m} = \min\{\alpha_{i,m}; 0\}. \quad (2.16)$$

Die Antriebsgeräusche werden durch absorbierende Oberflächen verringert, durch nicht absorbierende Oberflächen aber nicht verstärkt.

2.6.2 Einfluss der Gebrauchsdauer auf die Geräuscheigenschaften von Straßenoberflächen

Die Geräuschmerkmale von Straßenoberflächen variieren je nach Gebrauchsdauer und Instandhaltungszustand, wobei die Lautstärke im Zeitverlauf tendenziell zunimmt. Bei diesem Verfahren werden die Straßenoberflächenparameter so abgeleitet, dass sie für die akustische Leistung der jeweiligen Straßenoberfläche repräsentativ sind und für eine repräsentative Gebrauchsdauer gemittelt werden, wobei eine ordnungsgemäße Instandhaltung angenommen wird.

3 Schienenverkehrslärm

4 Industrie- und Gewerbelärm

Die Abschnitte 3 und 4 sind nicht wiedergegeben

5 Schallausbreitung

5.1 Anwendungsbereich

In diesem Kapitel wird das Verfahren zur Berechnung der Dämpfung von Schall während seiner Ausbreitung im Freien beschrieben. Bei Kenntnis der Quelleigenschaften berechnet dieses Verfahren den äquivalenten Langzeit-Dauerschallpegel am Immissionsort für zwei spezielle Klassen atmosphärischer Ausbreitungsbedingungen:

- günstige Ausbreitungsbedingungen, gekennzeichnet durch eine Zunahme der effektiven Schallgeschwindigkeit mit dem Abstand vom Boden und damit Abwärtsbrechung von der Quelle zum Immissionsort
- homogene Ausbreitungsbedingungen, gekennzeichnet durch eine vom Abstand vom Boden unabhängige effektive Schallgeschwindigkeit zwischen Quelle und Immissionsort

Ausbreitungsbedingungen, in denen die effektive Schallgeschwindigkeit mit dem Abstand vom Boden abnimmt und dadurch Aufwärtsbrechung von der Quelle zum Immissionsort erzeugt, werden im Folgenden näherungsweise wie homogene Ausbreitungsbedingungen behandelt.

Das in diesem Kapitel beschriebene Berechnungsverfahren gilt für Industrie- und Gewerbeanlagen sowie für Straßen- und Schienenverkehrsanlagen. Beim Luftverkehr fallen nur Tätigkeiten am Boden in den Anwendungsbereich des Verfahrens, Starts und Landungen dagegen nicht.

Das Verfahren liefert Ergebnisse je Oktavband von 63 Hz bis 8 kHz. Die Berechnungen werden für jede nominelle Mittenfrequenz vorgenommen.

Das in diesem Kapitel beschriebene Berechnungsverfahren betrachtet nur punktförmige Schallquellen. Räumlich ausgedehnte Quellen wie Flächen- und Linienquellen sind daher näherungsweise durch Punktquellen zu ersetzen. Die Wahl geeigneter Ersatzquellen hängt vom räumlichen Kontext von Quelle und Immissionsort ab und bedarf gegebenenfalls über dieses Berechnungsverfahren hinausgehende Festlegungen.

5.2 Normative Verweisungen

Die folgenden normativen Dokumente enthalten Festlegungen, die durch Verweisung in diesem Text Bestandteil der vorliegenden Veröffentlichung sind.

- DIN EN 1793-1:2013-04, Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 1: Produktspezifische Merkmale der Schallabsorption
- DIN EN 61672-1:2003-10, Elektroakustik- Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen
- ISO 9613-1:1993-06, Akustik; Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft

5.3 Definitionen und verwendete Symbole

Alle in diesem Kapitel verwendeten Abstände, Höhen und Dimensionen werden in Metern (m) angegeben.

Die Bezeichnung \overline{MN} steht für den Abstand in drei Dimensionen (3D) zwischen den Punkten M und N , also die Länge der diese Punkte verbindenden Strecke.

Die Bezeichnung \widehat{MN} steht für die Länge des gebogenen Ausbreitungswegs zwischen den Punkten M und N bei günstigen Bedingungen.

Die Bezeichnung (M,N) als Index verweist auf den Ausbreitungsweg zwischen M und N . Reale Höhen werden vertikal im rechten Winkel zur horizontalen Ebene gemessen. Höhen von Punkten über dem lokalen Boden werden mit h bezeichnet, absolute Höhen von Punkten und absolute Höhen des Bodens mit H .

Zur Berücksichtigung des Reliefs des Geländes entlang eines Ausbreitungswegs werden sogenannte Mittlere Grundlinien (MGL) eingeführt. Der Begriff „äquivalente Höhe“ bezeichnet den Abstand eines Punktes von der MGL und wird mit z bezeichnet.

Werden die Begriffe „links“ und „rechts“ verwendet, so ist von einer Betrachtungsposition auszugehen, aus der die Quelle links und der Immissionsort rechts liegt.

Mit dem Großbuchstaben L ohne den Index A werden bandbegrenzte Schallpegel in Dezibel (dB) je Frequenzband bezeichnet. Bewertete Schallpegel in Dezibel (A) (dB(A)) tragen dagegen den Index A .

In den Gleichungen dieses Kapitels werden folgende Symbole verwendet:

Tabelle 5.1: Formelzeichen, Einheiten und Bedeutung

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a_{atm}	dB/km	Koeffizient der Dämpfung von Luft in dB/km
a_r	–	Absorptionskoeffizient der Oberfläche des Reflektors
Γ	m	Radius des gekrümmten Ausbreitungswegs bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
δ	m	allgemeine Weglängendifferenz
δ^*	m	allgemeine Weglängendifferenz in Bezug auf die an der quellseitigen MGL gebildete Spiegelquelle S^* und den an der immissionsortseitigen MGL gebildeten Spiegelimmissionsort R^*
δ_D	m	allgemeine Weglängendifferenz durch den Punkt D

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
δ_D^*	m	allgemeine Weglängendifferenz durch den Punkt D in Bezug auf die an der quellseitigen MGL gebildete Spiegelquelle S^* und den an der immissionsortseitigen MGL gebildeten Spiegelimmissionsort R^*
δ_F	m	Weglängendifferenz bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
δ_H	m	Weglängendifferenz bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
δ_R	m	Weglängendifferenz zur Berechnung der Dämpfung durch Retrobeugung
$\Delta_{\text{dif},F,(S,R)}$	dB	Dämpfung aufgrund von Beugung zwischen der Quelle S und dem Immissionsort R bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
$\Delta_{\text{dif},H,(S,R)}$	dB	Dämpfung aufgrund von Beugung zwischen der Quelle S und dem Immissionsort R bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
$\Delta_{\text{ground},F,(O,R)}$	dB	Bodendämpfung im Bereich des Immissionsortes, bewertet mittels der Beugung im Bereich des Immissionsortes bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
$\Delta_{\text{ground},F,(S,O)}$	dB	Bodendämpfung im Quellbereich, bewertet mittels der Beugung im Quellbereich bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
$\Delta_{\text{ground},H,(O,R)}$	dB	Bodendämpfung im Bereich des Immissionsortes, bewertet mittels der Beugung im Bereich des Immissionsortes bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
$\Delta_{\text{ground},H,(S,O)}$	dB	Bodendämpfung im Quellbereich, bewertet mittels der Beugung im Quellbereich bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
Δ_{retrodif}	dB	Dämpfung durch Retrobeugung
λ	m	Wellenlänge bei der nominellen Mittenfrequenz des betrachteten Oktavbands
ζ_l	m	modifizierte äquivalente Höhe des „linken“ Begrenzungspunktes der MGL
ζ_r	m	modifizierte äquivalente Höhe des „rechten“ Begrenzungspunktes der MGL
a	–	Steigungsparameter der MGL
a_t	–	Steigungsparameter des t-ten Segments des Hindernisprofils
A	m^3	Zwischenergebnis zur Berechnung der MGL
A_i	dB	A-Bewertungskorrektur (siehe Tabelle 5.2)
A_{atm}	dB	Dämpfung aufgrund von Luftabsorption
$A_{\text{boundary},F}$	dB	Dämpfung aufgrund von Wechselwirkungen mit dem Boden und Hindernissen bei günstigen Ausbreitungsbedingungen

(Fortsetzung Tabelle 5.1: Formelzeichen, Einheiten und Bedeutung)

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A_{\text{boundary,H}}$	dB	Dämpfung aufgrund von Wechselwirkungen mit dem Boden und Hindernissen bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
$A_{\text{dif,F}}$	dB	Dämpfung aufgrund von Beugung inklusive Bodendämpfung bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
$A_{\text{dif,H}}$	dB	Dämpfung aufgrund von Beugung inklusive Bodendämpfung bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
A_{div}	dB	Dämpfung aufgrund geometrischer Divergenz
$A_{\text{ground,F}}$	dB	Bodendämpfung bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
$A_{\text{ground,F,min}}$	dB	Untergrenze der Bodendämpfung bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
$A_{\text{ground,H}}$	dB	Bodendämpfung bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
$A_{\text{ground,H,min}}$	dB	Untergrenze der Bodendämpfung bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
b	m	Abschnittsparameter der MGL
b_t	m	Abschnittsparameter des t -ten Segments des Hindernisprofils
B	m ²	Zwischenergebnis zur Berechnung der MGL
c	m/s	Geschwindigkeit des Schalls in Luft, angenommen als 34 m/s
C''	–	Koeffizient zur Berücksichtigung von Mehrfachbeugung
C_t	m	frequenzabhängige Längenkorrektur bei der Berechnung der Bodendämpfung
d	m	3D-Schrägentfernung zwischen Quelle und Immissionsort, bzw. für Ausbreitungswege in der lateralen Ausbreitungsebene die Länge des gebeugten Ausbreitungswegs von der Quelle zum Immissionsort bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
D	–	Punkt des Hindernisprofils, der bei freier Sichtverbindung zwischen Quelle und Immissionsort die größte Weglängendifferenz erzeugt
d_p	m	Länge des auf die MGL projizierten Abstands der Beugungspunkte der MGL
e_F	m	Länge des Teilabschnitts eines gebeugten Ausbreitungswegs zwischen erstem und letztem Beugungspunkt bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
e_H	m	Länge des Teilabschnitts eines gebeugten Ausbreitungswegs zwischen erstem und letztem Beugungspunkt bei homogenen Ausbreitungsbedingungen

(Fortsetzung Tabelle 5.1: Formelzeichen, Einheiten und Bedeutung)

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
E	–	Schnittpunkt der vertikalen Verlängerung eines Beugungspunktes mit der geraden Verbindungslinie zwischen Quelle und Immissionsort
f_m	Hz	nominelle Mittenfrequenz des betrachteten Oktavbands (siehe Tabelle 5.2)
G	–	Bodenfaktor zur Beschreibung der Absorptionseigenschaften des Bodens
G_m	–	generischer Bodenfaktor
G_{path}	–	Mittelwert des Bodenfaktors für einen Ausbreitungsweg
G'_{path}	–	korrigierter Mittelwert des Bodenfaktors für einen Ausbreitungsweg
G_s	–	Bodenfaktor unterhalb der Quelle
G_w	–	generischer Bodenfaktor
H_t	m	absolute Höhe des t -ten Stützpunktes des Hindernisprofils
i	–	Index für das betrachtete Oktavband
k	m^{-1}	Wellenzahl für Luftschall der nominellen Mittenfrequenz des betrachteten Frequenzbandes
$L_{\text{Aeq,LT}}$	dB(A)	A-bewerteter Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel
L_F	dB	Schallpegel bei günstigen Ausbreitungsbedingungen
L_H	dB	Schallpegel bei homogenen Ausbreitungsbedingungen
L_{LT}	dB	Langzeit-Dauerschallpegel für einen Ausbreitungsweg
$L_{q,m,LT}$	dB	Langzeit-Dauerschallpegel-Beitrag der Quelle q entlang des Ausbreitungswegs m
$L_{\text{tot,LT},i}$	dB	Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel im Oktavband i
$L_{w,0,\text{dir}}$	dB	gerichteter Schalleistungspegel, und zwar in Richtung des quellnächsten Beugungspunktes, wenn der Ausbreitungsweg Beugung enthält, und sonst in Richtung des Immissionsortes R
$L_{w,S}$	dB	Schalleistungspegel der Originalschallquelle
$L_{w,S'}$	dB	Schalleistungspegel der Spiegelschallquelle
m	–	Index für den Ausbreitungsweg in Bezug auf ein bestimmtes Quelle-Immissionsort-Paar
M	–	allgemeiner Punkt
n	–	Anzahl der Beugungspunkte eines Ausbreitungswegs
N	–	allgemeiner Punkt
O	–	Beugungspunkt
p	–	Wahrscheinlichkeit des Auftretens günstiger Ausbreitungsbedingungen entlang eines bestimmten Ausbreitungswegs

(Fortsetzung Tabelle 5.1: Formelzeichen, Einheiten und Bedeutung)

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
P	–	fiktiver Beugungspunkt bei der Berechnung der Retrobeugung
q	–	Index für die Punktquelle in Bezug auf einen bestimmten Immissionsort
R	–	Immissionsort
R^*	–	an der MGL gespiegelter Immissionsort
S	–	Quellpunkt
S^*	–	an der MGL gespiegelter Quellpunkt
S'	–	an einem Reflektor gespiegelter Quellpunkt
t	–	Index der Stützpunkte des Hindernisprofils
T	–	Anzahl der Stützpunkte des Hindernisprofils
w	m^{-1}	Korrekturterm bei der Berechnung der Bodendämpfung
x_1	m	x-Koordinate des „linken“ Begrenzungspunktes der MGL
x_r	m	x-Koordinate des „rechten“ Begrenzungspunktes der MGL
x_t	m	x-Koordinate des t -ten Stützpunktes des Hindernisprofils
z_1	m	äquivalente Höhe des „linken“ Begrenzungspunktes der MGL
z_r	m	äquivalente Höhe des „rechten“ Begrenzungspunktes der MGL
z_R	m	äquivalente Höhe des Immissionsortes
z_S	m	äquivalente Höhe des Quellpunktes

5.4 Überblick über die Berechnungsmethode

Die Berechnung des Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegels an einem Immissionsort R gliedert sich in folgende Schritte:

- Die Berechnungen erfolgen getrennt für jedes der acht Oktavbänder, gekennzeichnet durch den Index $i \in \{1; 8\}$.
- Alle für den Immissionsort R relevanten Quellen werden gesucht. Dafür werden räumlich ausgedehnte Quellen durch Punktquellen ersetzt und beim Auftreten von Reflexionen zusätzliche Spiegelquellen gebildet. Für den Immissionsort R entsteht so ein Satz zu betrachtender Quellen S_q mit $q \in \{1; Q\}$.
- Für jedes Quelle-Immissionsort-Paar $\langle S_q, R \rangle$ wird ein Ausbreitungsweg in der vertikalen Ausbreitungsebene bestimmt. Für die Fälle, in denen auch seitliche Beugung berücksichtigt werden muss, sind bis zu zwei zusätzliche Ausbreitungswege in der lateralen Ausbreitungsebene zu bestimmen.
- Für jeden Ausbreitungsweg erfolgt nun die Berechnung der Dämpfung bei günstigen Ausbreitungsbedingungen und bei homogenen Ausbreitungsbedingungen, um aus beiden Teilergebnissen den Langzeit-Dauerschallpegel für den betrachteten Ausbreitungsweg zu berechnen.

- Die Langzeit-Dauerschallpegel aller relevanten Quellen und aller dazugehörigen Ausbreitungswege werden energetisch zum Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel im betrachteten Oktavband aufsummiert.
- Der A-bewertete Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel am Immissionsort R ergibt sich durch energetische Addition der Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel aller acht Oktavbänder unter Anwendung des A-Filters.

5.4.1 Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel am Punkt R in Dezibel A (dB(A))

Der Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel in Dezibel A (dB(A)) am Immissionsort R wird durch Summierung der Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel in jedem einzelnen Frequenzband bestimmt:

$$L_{Aeq,LT} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^8 10^{(L_{tot,LT,i} + A_i)/10} . \quad (5.1)$$

Dabei gilt:

i ist der Index für das Oktavband.

$L_{tot,LT,i}$ ist der Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel am Immissionsort R im Oktavband i .

A_i ist die A-Bewertungskorrektur (siehe Tabelle 5.2).

Der Pegel $L_{Aeq,LT}$ stellt das Endresultat dar, d. h. den A-bewerteten Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel am Immissionsort R in einem bestimmten Referenzzeitraum (z. B. Tag oder Abend oder Nacht oder einer kürzeren Zeit am Tag, am Abend oder in der Nacht).

Tabelle 5.2: A-Korrektur gemäß DIN EN 61672-1:2003-10

Index i	nominelle Mittenfrequenz des Oktavbands i in Hz	A_i in dB
1	63	-26,2
2	125	-16,1
3	250	-8,6
4	500	-3,2
5	1000	0,0
6	2000	1,2
7	4000	1,0
8	8000	-1,1

5.4.2 Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel am Punkt R je Frequenzband

Der Gesamt-Langzeit-Dauerschallpegel am Immissionsort R wird für jedes Frequenzband getrennt durch die energetische Summierung der Beiträge aller Quellen und aller dazugehörigen Ausbreitungswege errechnet:

$$L_{tot,LT} = 10 \cdot \lg \sum_q \sum_m 10^{L_{q,m,LT}/10} . \quad (5.2)$$

Der Index i für das betrachtete Frequenzband wurde zur Verbesserung der Lesbarkeit weggelassen, und es gilt:

q ist der Index für die Punktquelle S_q .

m ist der Index für den Ausbreitungsweg von S_q nach R .

$L_{q,m,LT}$ ist der Beitrag der Quelle S_q zum Dauerschallpegel am Immissionsort R über den Ausbreitungsweg m .

5.4.3 Langzeit-Dauerschallpegel für einen Ausbreitungsweg von S_q nach R

Der Langzeit-Dauerschallpegel für einen Ausbreitungsweg von der Punktquelle S_q zum Immissionsort R wird aus dem Schallpegel bei günstigen Ausbreitungsbedingungen und dem bei homogenen Ausbreitungsbedingungen unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung beider Ausbreitungsbedingungen gebildet:

$$L_{LT} = 10 \cdot \lg \left(p \cdot 10^{L_F/10} + (1-p) \cdot 10^{L_H/10} \right). \quad (5.3)$$

Die Indizes i für das betrachtete Frequenzband, q für die betrachtete Punktquelle und m für den betrachteten Ausbreitungsweg wurden zur Verbesserung der Lesbarkeit weggelassen und es gilt:

- p ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens günstiger Ausbreitungsbedingungen auf dem betrachteten Ausbreitungsweg von S_q nach R .
- L_F ist der Beitrag der Quelle S_q zum Dauerschallpegel am Immissionsort R über den Ausbreitungsweg m bei günstigen Ausbreitungsbedingungen.
- L_H ist der Beitrag der Quelle S_q zum Dauerschallpegel am Immissionsort R über den Ausbreitungsweg m bei homogenen Ausbreitungsbedingungen.

Handelt es sich bei der betrachteten Quelle um eine Spiegelquelle zur Berücksichtigung von Reflexionen, so wird p als die Wahrscheinlichkeit des Auftretens günstiger Ausbreitungsbedingungen entlang der direkten Verbindungslinie von der Originalquelle zum Immissionsort R angesetzt. Gleiches gilt für seitlich gebeugte Ausbreitungswege.

Für die Lärmkartierung ist für den Referenzzeitraum „Tag“ ein Wert von $p_{\text{Day}} = 0,50$, für den Referenzzeitraum „Abend“ ein Wert von $p_{\text{Evening}} = 0,75$ und für den Referenzzeitraum „Nacht“ ein Wert von $p_{\text{Night}} = 1,00$ zu verwenden.

5.4.4 Schallpegel am Immissionsort R für einen einzelnen Ausbreitungsweg

Der Beitrag der Punktquelle S_q zum Schallpegel am Immissionsort R im Frequenzband i über den Ausbreitungsweg m ergibt sich aus dem Schalleistungspegel der Quelle und der Dämpfung auf dem Ausbreitungsweg:

$$L_H = L_{W,0,\text{dir}} - A_{\text{div}} - A_{\text{atm}} - A_{\text{boundary,H}}, \quad (5.4)$$

$$L_F = L_{W,0,\text{dir}} - A_{\text{div}} - A_{\text{atm}} - A_{\text{boundary,F}}. \quad (5.5)$$

Dabei gilt:

- $L_{W,0,\text{dir}}$ ist der gerichtete Schalleistungspegel, und zwar in Richtung des quellenächsten Beugungspunktes, wenn der Ausbreitungsweg Beugung enthält, und sonst in Richtung des Immissionsortes R .
- A_{div} ist die Dämpfung aufgrund geometrischer Divergenz.
- A_{atm} ist die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption.
- $A_{\text{boundary,H}}$ ist die Dämpfung aufgrund von Wechselwirkungen mit dem Boden und Hindernissen bei homogenen Ausbreitungsbedingungen.
- $A_{\text{boundary,F}}$ ist die Dämpfung aufgrund von Wechselwirkungen mit dem Boden und Hindernissen bei günstigen Ausbreitungsbedingungen.

Die Wechselwirkungsterme $A_{\text{boundary,F}}$ und $A_{\text{boundary,H}}$ enthalten Terme zur Beschreibung von Bodendämpfung und Beugungsdämpfung.

Für Ausbreitungswege in der vertikalen Ausbreitungsebene (siehe Abschnitt 5.5), die keine Beugung enthalten, gilt:

$$A_{\text{boundary,H}} = A_{\text{ground,H}} , \quad (5.6)$$

$$A_{\text{boundary,F}} = A_{\text{ground,F}} . \quad (5.7)$$

Dabei gilt:

$A_{\text{ground,H}}$ ist die Bodendämpfung bei homogenen Ausbreitungsbedingungen.

$A_{\text{ground,F}}$ ist die Bodendämpfung bei günstigen Ausbreitungsbedingungen.

Für gebeugte Ausbreitungswege in der vertikalen Ausbreitungsebene gilt:

$$A_{\text{boundary,H}} = A_{\text{dif,H}} , \quad (5.8)$$

$$A_{\text{boundary,F}} = A_{\text{dif,F}} . \quad (5.9)$$

Dabei gilt:

$A_{\text{dif,H}}$ ist die Dämpfung aufgrund von Beugung inklusive Bodendämpfung bei homogenen Ausbreitungsbedingungen.

$A_{\text{dif,F}}$ ist die Dämpfung aufgrund von Beugung inklusive Bodendämpfung bei günstigen Ausbreitungsbedingungen.

Für Ausbreitungswege in der lateralen Ausbreitungsebene gilt:

$$A_{\text{boundary,H}} = A_{\text{ground,H}} + \Delta_{\text{dif,H,(S,R)}} , \quad (5.10)$$

$$A_{\text{boundary,F}} = A_{\text{ground,F}} + \Delta_{\text{dif,H,(S,R)}} . \quad (5.11)$$

Dabei gilt:

$\Delta_{\text{dif,H,(S,R)}}$ ist die Dämpfung aufgrund von Beugung bei homogenen Ausbreitungsbedingungen zwischen dem Quellpunkt S und dem Immissionsort R . Dieser Term kommt bei Ausbreitungswegen in der lateralen Ausbreitungsebene sowohl bei homogenen als auch bei günstigen Ausbreitungsbedingungen zur Anwendung.

5.5 Geometrische Betrachtungen

5.5.1 Schallausbreitungswege

Das Verfahren arbeitet mit einem geometrischen Modell, das aus einer Reihe zusammenhängender Boden- und Hindernisflächen besteht. Darin werden Schallausbreitungswege getrennt für homogene und günstige Ausbreitungsbedingungen und in jedem Oktavband einzeln nach folgendem Schema konstruiert:

Für jedes Quelle-Immissionsort-Paar wird ein Ausbreitungsweg in der vertikalen Ebene, die Quelle und Immissionsort enthält, der sogenannten vertikalen Ausbreitungsebene, bestimmt. Zunächst ist zu prüfen, ob eine freie Sichtverbindung zwischen Quelle und Immissionsort besteht. Dafür wird das Bodenprofil mit allen Hindernissen wie z. B. Gebäuden und Lärmschutzwällen zum sogenannten Hindernisprofil zusammengefügt. Die Sichtverbindung gilt als frei, wenn kein Punkt des Hindernisprofils oberhalb des direkten Schallstrahls von der Quelle zum Immissionsort liegt. Unter homogenen Ausbreitungsbedingungen ist der direkte Schallstrahl ein Geradenabschnitt, unter günstigen Ausbreitungsbedingungen ein Kreissegment.

5.5.1.1 Freie Sichtverbindung

Besteht eine freie Sichtverbindung zwischen Quelle und Immissionsort, so wird geprüft, ob ein Punkt des Hindernisprofils zwischen Quelle und Immissionsort in relevantem Maß Beugungsdämpfung erzeugt. Dafür wird für alle Punkte des Hindernisprofils zwischen Quelle und Immissionsort die (in diesem Fall negative) Weglängendifferenz δ berechnet und der Punkt D mit dem größten δ ermittelt, genannt δ_D .

5.5.1.1.1 Freie Sichtverbindung mit Beugung

Der Punkt D zerteilt den Ausbreitungsweg in einen quellseitigen und einen immissionsortseitigen Teil. Für beide Teile wird eine eigene MGL berechnet. Die vom Punkt D des Hindernisprofils erzeugte Beugung wird als relevant angesehen, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

- 1) Die Weglängendifferenz δ_D muss größer als $-\lambda/20$ sein, wobei λ die Wellenlänge bei der nominellen Mittenfrequenz des betrachteten Oktavbands ist.
- 2) Das sogenannte Rayleigh-Kriterium muss erfüllt sein, was der Fall ist, wenn δ_D größer als $\lambda/4 - \delta_D^*$ ist, wobei δ_D^* die Weglängendifferenz durch den Punkt D in Bezug auf die an der quellseitigen MGL gebildete Spiegelquelle S^* und den an der immissionsortseitigen MGL gebildeten Spiegelimmissionsort R^* ist. Bei der Berechnung von δ_D^* werden nur die Punkte S^* , D und R^* verwendet und andere den Schallstrahl blockierende Hindernisse vernachlässigt.

Sind beide Kriterien erfüllt, wird die vom Punkt D erzeugte Beugung berücksichtigt und die Bodenterme getrennt für den Quellbereich über der quellseitigen MGL und für den Bereich des Immissionsortes über der immissionsortseitigen MGL berechnet.

5.5.1.1.2 Freie Sichtverbindung ohne Beugung

Ist mindestens eines der Kriterien aus Abschnitt 5.5.1.1.1 nicht erfüllt, so wird keine Beugungsdämpfung im Ausbreitungsweg berücksichtigt und eine gemeinsame MGL für den gesamten Ausbreitungsweg berechnet.

5.5.1.2 Blockierte Sichtverbindung

Ist die Sichtverbindung zwischen Quelle und Immissionsort blockiert, fungieren ein oder mehrere Punkte des Hindernisprofils als Beugungspunkte. Der Schallstrahl besteht damit aus Abschnitten, die unter homogenen Ausbreitungsbedingungen Geradenabschnitte und unter günstigen Ausbreitungsbedingungen Kreissegmente gleichen Radius sind.

Der zu betrachtende gebeugte Ausbreitungsweg ist definiert als die kürzeste konvexe über alle Hindernisse hinweg verlaufende Verbindung von Quelle und Immissionsort in der vertikalen Ausbreitungsebene (Punkte des Hindernisprofils unterhalb der direkten Sichtverbindung kommen damit in diesem Fall grundsätzlich nicht als Beugungspunkte in Frage). Die Anforderung der Konvexität bedeutet, dass an jedem Beugungspunkt der abgehende Strahlabschnitt gegenüber dem ankommenden Strahlabschnitt nach unten abknickt.

Unter homogenen Ausbreitungsbedingungen kann der Ausbreitungsweg mittels eines Gummibands gefunden werden. Unter günstigen Ausbreitungsbedingungen kann ein analoges iteratives Suchverfahren gewählt werden, das die Konvexität des Ausbreitungswegs an allen Beugungspunkten gewährleistet.

Für den Quellbereich zwischen Quelle und erstem Beugungspunkt ist eine quellseitige MGL und für den Bereich des Immissionsortes zwischen letztem Beugungspunkt und Immissionsort eine immissionsortseitige MGL zu berechnen. Unter Verwendung der oben definierten Beugungspunkte werden die Weglängendifferenzen δ und δ^* berechnet, wobei δ^* die Weglängendifferenz durch die zur Bestimmung von δ verwendeten Beugungspunkte in Bezug auf die an der quellseitigen MGL gebildete Spiegelquelle S^* und den an der immissionsortseitigen MGL gebildeten Spiegelimmissionsort R^* ist – ohne Berücksichtigung anderer den Schallstrahl blockierender Hindernisse.

5.5.1.3 Seitliche Beugung

Seitliche Beugung wird nur im Ausnahmefall berücksichtigt, und zwar wenn alle der folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Bei der Quelle handelt es sich um eine explizit als Punktquelle beschriebene Industrie- und Gewerbelärmquelle.
- Bei der Quelle handelt es sich um eine Originalquelle, also nicht um eine durch Reflexion entstandene Spiegelquelle.
- Die Sichtverbindung zwischen Quelle und Immissionsort verläuft oberhalb des Bodenprofils.
- In der vertikalen Ausbreitungsebene liegt eine Weglängendifferenz $\delta > 0$ vor, die Sichtverbindung wird also durch mindestens einen Punkt des Hindernisprofils blockiert. Daher gibt es Situationen, in denen unter homogenen Bedingungen seitliche Beugung berücksichtigt wird, unter günstigen Bedingungen jedoch nicht.

Sind alle diese Bedingungen erfüllt, werden neben dem Ausbreitungsweg, der über das die Sichtverbindung blockierende Hindernis, bzw. die die Sichtverbindung blockierenden Hindernisse hinweg gebeugt wird, bis zu zwei seitlich gebeugte Ausbreitungswege berücksichtigt. Dafür werden die Schnittflächen aller Hindernisse, die von der Sichtverbindung durchdrungen werden, mit der Ebene, die senkrecht auf der vertikalen Ausbreitungsebene steht und Quelle und Immissionsort enthält, der sogenannten lateralen Ausbreitungsebene, gebildet. In der lateralen Ausbreitungsebene definiert die kürzeste, konvexe, aus Geradenabschnitten bestehende Verbindung von Quelle und Immissionsort rechts bzw. links um die soeben gebildeten Schnittflächen herum die vertikalen Kanten, um die die seitlichen Ausbreitungswege gebeugt werden.

Zur Berechnung der Bodendämpfung auf einem seitlich gebeugten Ausbreitungsweg wird für das Hindernisprofil vertikal unter dem Ausbreitungsweg eine MGL zwischen Quelle und Immissionsort berechnet. Dies geschieht in einer vertikalen X-Z-Hilfsebene, deren Z-Koordinate der absoluten Höhe entspricht und deren X-Koordinate der Entfernung vom Quellpunkt entlang des Ausbreitungswegs in der Projektion auf eine horizontale Ebene entspricht. Schneidet ein seitlicher Ausbreitungsweg in der Projektion auf die Horizontale den Grundriss eines Gebäudes, wird dieses bei der Berechnung von G_{path} (in der Regel mit $G = 0$) und bei der Berechnung der MGL mit seiner Höhe berücksichtigt.

In dieser Hilfsebene wird der Ausbreitungsweg in Bezug auf die Berechnung der Bodendämpfung als Ausbreitungsweg mit freier Sichtverbindung ohne Beugung behandelt.

5.5.1.4 Reflexionen

Ausbreitungswege in der vertikalen Ausbreitungsebene können Reflexionen enthalten, die über Spiegelschallquellen abgebildet werden, wie in Abbildung 5.1 in der Projektion auf die horizontale Ebene dargestellt. Ein Hindernis wird nur dann als Reflektor berücksichtigt, wenn seine Neigung zur Vertikalen 15 Grad nicht überschreitet und es die Sichtverbindung zur Spiegelquelle blockiert. Als Reflexionspunkt wird der Punkt der reflektierenden Fläche definiert, an dem die – je nach Ausbreitungsbedingungen gerade oder kreisförmige – Sichtverbindung zur Spiegelquelle die als vertikal angenommene Ebene des Reflektors durchdringt. Das reflektierende Hindernis muss mindestens folgende Ausdehnung haben, um berücksichtigt zu werden: Die vertikal durch den Reflexionspunkt gemessene Höhe muss aus Sicht des einfallenden Strahls mindestens 0,5 m betragen. Und nach Projektion auf eine horizontale Fläche muss die horizontal durch den Reflexionspunkt gemessene Breite der reflektierenden Fläche aus Sicht des einfallenden Strahls ebenfalls mindestens 0,5 m betragen.

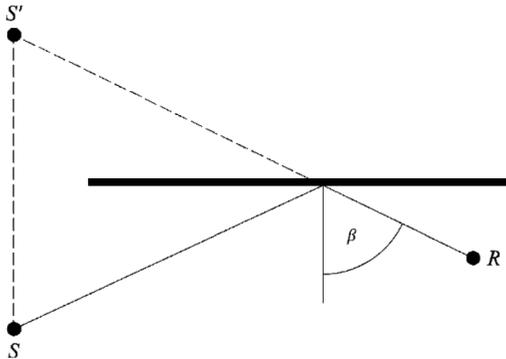


Abbildung 5.1: Mit dem Spiegelquellverfahren erfasste spiegelnde Reflexion an einem Hindernis (**S:** Quelle, **S':** Spiegelquelle, **R:** Immissionsort).

Bildet die Einfallsebene mit dem Lot auf die als vertikal betrachtete reflektierende Fläche einen Winkel von β , so bilden Einfalls- und Ausfallsebene am Reflektor einen Winkel von 2β . Einfalls- und Ausfallsebene werden dann um den Winkel $180^\circ - 2\beta$ aufgefaltet und bilden so die gemeinsame vertikale Ausbreitungsebene. In dieser gemeinsamen vertikalen Ausbreitungsebene werden der Parameter d zur Berechnung der Dämpfung aufgrund von Luftabsorption und zur Berechnung des Krümmungsradius Γ unter günstigen Ausbreitungsbedingungen und der Abstand $S'R$ zur Berechnung der Dämpfung aufgrund geometrischer Divergenz bestimmt.

Für die Lärmkartierung sind nur Ausbreitungswege mit maximal einer Reflexion zu berücksichtigen.

5.5.2 Mittlere Grundlinie (MGL)

In der vertikalen Ausbreitungsebene bildet das Hindernisprofil eine Polylinie. Zur Berechnung der Bodendämpfung wird diese Polylinie durch eine Gerade ersetzt, die sogenannte Mittlere Grundlinie (MGL). Die äquivalente Höhe eines Punktes ist gleich seinem Abstand von der Mittleren Grundlinie. Weist die äquivalente Höhe eines Punktes einen negativen Wert auf, d. h. befindet sich der Punkt unterhalb der mittleren Grundlinie, wird die äquivalente Höhe zu null gesetzt.

Abbildung 5.2 zeigt das Konzept der Mittleren Grundlinie für den Fall eines Ausbreitungswegs ohne Beugung, in dem nur eine MGL zwischen Quelle und Immissionsort berechnet wird. Für Ausbreitungswege mit Beugung werden zwei MGLn berechnet: Eine quellseitige zwischen Quelle und erstem Beugungspunkt sowie eine immissionsortseitige zwischen letztem Beugungspunkt und Immissionsort, wie in Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 dargestellt.

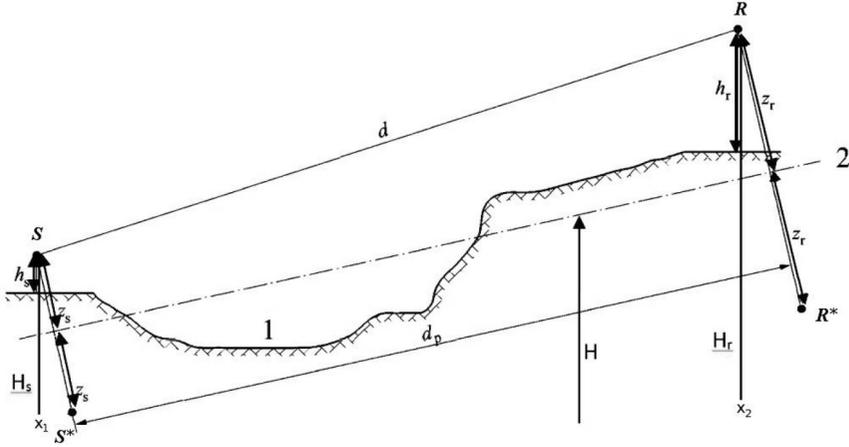


Abbildung 5.2: Äquivalente Höhen über der Mittleren Grundlinie

1: Tatsächliches Relief

2: Mittlere Grundlinie

Zur Berechnung der Mittleren Grundlinie wird das Hindernisprofil, also die Kombination von Bodenprofil und allen vom Menschen errichteten Hindernissen wie z. B. Gebäuden und Dämmen, in der vertikalen Ausbreitungsebene als eine geordnete Menge von Punkten (x_t, H_t) mit $t \in \{1; T\}$ beschrieben. Diese Punktmenge definiert eine Polylinie oder – äquivalent dazu – eine Abfolge gerader Segmente $H(x) = a_t x + b_t$ mit $x \in [x_t; x_{t+1}]$ und $t \in \{1; T-1\}$. Die Parameter a_t und b_t sind definiert als:

$$a_t = \frac{H_{t+1} - H_t}{x_{t+1} - x_t}, \quad (5.12)$$

$$b_t = \frac{H_t x_{t+1} - H_{t+1} x_t}{x_{t+1} - x_t}. \quad (5.13)$$

Die Mittlere Grundlinie wird durch die Gerade $H_{MGL}(x) = ax + b$ dargestellt, die an die Polylinie mittels Approximation nach der Methode der kleinsten Quadrate angepasst wird. Die Gleichung der Mittleren Grundlinie kann analytisch abgeleitet werden:

$$A = \frac{2}{3} \sum_{t=1}^{T-1} a_t (x_{t+1}^3 - x_t^3) + \sum_{t=1}^{T-1} b_t (x_{t+1}^2 - x_t^2), \quad (5.14)$$

$$B = \sum_{t=1}^{T-1} a_t (x_{t+1}^2 - x_t^2) + 2 \sum_{t=1}^{T-1} b_t (x_{t+1} - x_t). \quad (5.15)$$

Substituiert man hierin die Gleichungen (5.12) und (5.13), so ergeben sich folgende vereinfachte Gleichungen, die Singularitäten bei $x_t = x_{t+1}$ umgehen:

$$A = \sum_{t=1}^{T-1} \left[\frac{2}{3} (H_{t+1} - H_t) (x_{t+1}^2 + x_{t+1} x_t + x_t^2) + (H_t x_{t+1} - H_{t+1} x_t) (x_{t+1} + x_t) \right] \quad (5.16)$$

$$B = \sum_{t=1}^{T-1} (H_{t+1} + H_t) (x_{t+1} - x_t). \quad (5.17)$$

Die Koeffizienten der Mittleren Grundlinie sind wie folgt gegeben:

$$a = \frac{3[2A - B(x_T + x_1)]}{(x_T - x_1)^3}, \quad (5.18)$$

$$b = \frac{2(x_T^3 - x_1^3)}{(x_T - x_1)^4} B - \frac{3(x_T + x_1)}{(x_T - x_1)^3} A. \quad (5.19)$$

5.5.3 Beugung – Berechnung der Weglängendifferenzen δ_H und δ_F

Das Verfahren zur Berechnung der Beugung an dünnen und dicken Schallschirmen, Gebäuden, natürlichen und künstlichen Wällen sowie durch die Kanten von Böschungen, Geländeeinschnitten und Viadukten beruht auf der Kenntnis der Weglängendifferenz zwischen dem gebeugten Schallstrahl und dem fiktiven direkten Schallstrahl von der Quelle und zum Immissionsort.

Bei homogenen Ausbreitungsbedingungen wird mit geraden Schallstrahlen gerechnet. Bei günstigen Ausbreitungsbedingungen wird mit gekrümmten Schallstrahlen gerechnet und angenommen, dass alle Abschnitte eines Ausbreitungswegs vom Quellpunkt S zum Immissionsort R denselben Radius r haben:

$$r = \max(1000; 8d). \quad (5.20)$$

Dabei gilt:

d ist für Ausbreitungswege in der vertikalen Ausbreitungsebene die direkte 3D-Schrägentfernung zwischen Quelle und Immissionsort, also $d = \overline{SR}$. Für seitlich gebeugte Ausbreitungswege ist d die Länge des gebeugten Ausbreitungswegs von der Quelle zum Immissionsort unter homogenen Ausbreitungsbedingungen, also $d = \overline{SO_1} + e_H + \overline{O_nR}$.

Die Länge des gekrümmten Schallstrahlbogens zwischen den Punkten M und N beträgt dann:

$$\widehat{MN} = 2\Gamma \arcsin\left(\frac{\overline{MN}}{2\Gamma}\right). \quad (5.21)$$

5.5.3.1 Beugung bei blockierter Sichtverbindung

Ist die Sichtlinie zwischen Quelle und Immissionsort blockiert, werden unter homogenen Ausbreitungsbedingungen die zu berücksichtigenden Beugungspunkte in der vertikalen Ausbreitungsebene mittels Gummiband als kürzeste konvexe aus Geradenabschnitten bestehende Verbindung von Quelle und Immissionsort bestimmt, wie in Abbildung 5.3 dargestellt.

Unter günstigen Ausbreitungsbedingungen ergeben sich die zu berücksichtigenden Beugungspunkte durch Konstruktion der kürzesten konvexen aus Kreisabschnitten bestehenden Verbindung zwischen Quelle und Immissionsort in der vertikalen Ausbreitungsebene, wie in Abbildung 5.4 dargestellt.

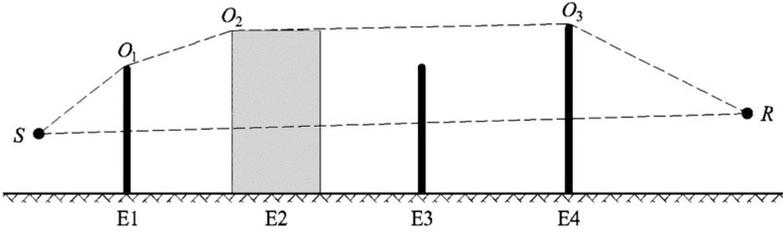


Abbildung 5.3: Anwendung des Gummibands in der Ausbreitungsebene zur Identifizierung zu berücksichtigender Beugungspunkte unter homogenen Ausbreitungsbedingungen. Die rechte Kante des Hindernisses E2 und das Hindernis E3 berühren das Gummiband nicht und bleiben deshalb unberücksichtigt.

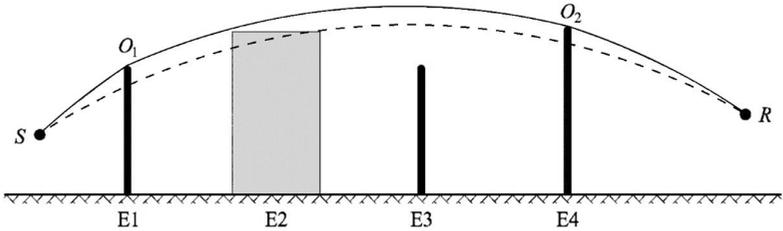


Abbildung 5.4: Konstruktion der zu berücksichtigenden Beugungspunkte unter günstigen Ausbreitungsbedingungen mittels Kreisabschnitten. Die Hindernisse E2 und E3 liegen unterhalb des Ausbreitungswegs und bleiben deshalb unberücksichtigt.

Die Weglängendifferenzen δ_H und δ_F sind als Differenz zwischen der Länge des gebeugten Strahls und der Länge des direkten Strahls definiert und werden folgendermaßen berechnet:

$$e_H = \sum_{i=1}^{n-1} \overline{O_i O_{i+1}}, \quad (5.22)$$

$$\delta_H = \overline{S O_1} + e_H + \overline{O_n R} - \overline{S R}, \quad (5.23)$$

$$e_F = \sum_{i=1}^{n-1} \widehat{O_i O_{i+1}}, \quad (5.24)$$

$$\delta_F = \widehat{S O_1} + e_F + \widehat{O_n R} - \widehat{S R}. \quad (5.25)$$

Dabei ist n die Anzahl der zu berücksichtigenden Beugungspunkte im Ausbreitungsweg; im Beispiel aus Abbildung 5.3 gilt also $n = 3$. Im Fall nur eines Beugungspunktes gilt $n = 1$, womit die Summen in den Gleichungen (5.22) und (5.24) gleich null sind.

Die Berechnung der Weglängendifferenz funktioniert gleichermaßen in der vertikalen wie in der lateralen Ausbreitungsebene.

5.5.3.2 Beugung bei freier Sichtverbindung

Bei freier Sichtverbindung zwischen Quelle und Immissionsort wird maximal ein Beugungspunkt berücksichtigt, wie in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt.

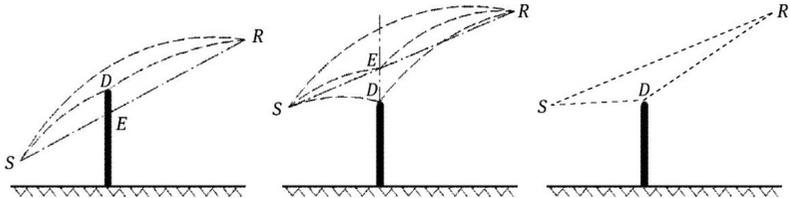


Abbildung 5.5: Berechnung der Weglängendifferenzen bei freier Sichtverbindung unter günstigen Ausbreitungsbedingungen (links und Mitte) und homogenen Ausbreitungsbedingungen (rechts)

Die Weglängendifferenzen δ_H und δ_F werden in diesem Fall folgendermaßen berechnet:

$$\delta_H = \overline{SR} - \overline{SD} - \overline{DR}, \quad (5.26)$$

$$\delta_F = \begin{cases} 2 \cdot \widehat{SE} + 2 \cdot \widehat{ER} - \widehat{SD} - \widehat{DR} - \widehat{SR} & \text{wenn } E \text{ oberhalb von } D \text{ liegt,} \\ \widehat{SD} + \widehat{DR} - \widehat{SR} & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.27)$$

Dabei ist der Punkt E als der Schnittpunkt der vertikalen Geraden durch den Beugungspunkt D mit der geraden Verbindungsstrecke zwischen S und R definiert.

5.5.4 Bodendämpfung bei gebeugten Ausbreitungswegen in der vertikalen Ausbreitungsebene

Zur Berechnung der Bodendämpfung bei gebeugten Ausbreitungswegen in der vertikalen Ausbreitungsebene werden, wie in Abbildung 5.6 für homogene Ausbreitungsbedingungen und in Abbildung 5.7 für günstige Ausbreitungsbedingungen dargestellt, zwei zusätzliche Punkte konstruiert:

- 1) Der Spiegelquellpunkt S^* wird durch Spiegelung des Quellpunktes S an der quellseitigen MGL zwischen Quelle und erstem Beugungspunkt O_1 gebildet,
- 2) der Spiegelimmissionsort R^* wird analog durch Spiegelung des Immissionsortes R an der immissionsortseitigen MGL zwischen letztem Beugungspunkt O_n und Immissionsort gebildet.

Mit Hilfe dieser Punkte können die Weglängendifferenzen δ_H und δ_F für die drei zu betrachtenden gebeugten Ausbreitungswegen (S,R), (S^*,R) und (S,R^*) berechnet werden, wobei auch für die beiden letztgenannten Ausbreitungswegen ausschließlich die Beugungspunkte berücksichtigt werden, die beim erstgenannten Ausbreitungsweg betrachtet wurden, und andere den Schallstrahl blockierende Hindernisse vernachlässigt werden.

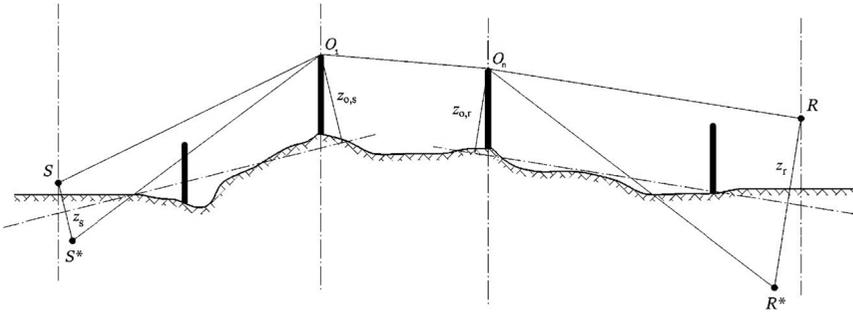


Abbildung 5.6: Bildung des Spiegelquellpunktes S^* und des Spiegelimmissionsortes R^* unter homogenen Ausbreitungsbedingungen.

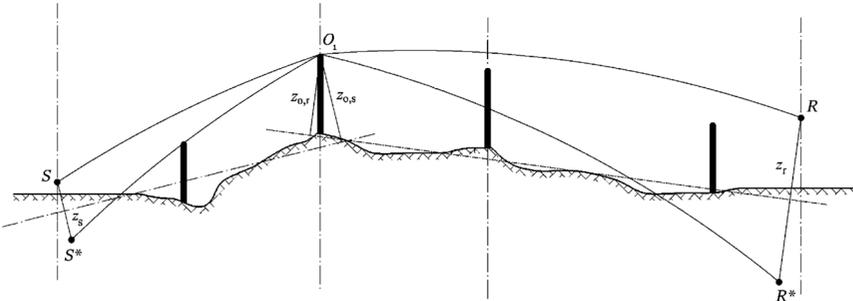


Abbildung 5.7: Bildung des Spiegelquellpunktes S^* und des Spiegelimmissionsortes R^* unter günstigen Ausbreitungsbedingungen.

5.5.5 Bodendämpfung – gemittelter Bodenparameter

Die akustischen Absorptionseigenschaften des Bodens unterhalb des Ausbreitungswegs haben wesentlichen Einfluss auf die Bodendämpfung. Dabei spielt vor allem die Porosität des Bodens eine Rolle: Ein dichter Boden ist im Allgemeinen reflektierend, ein poröser Boden absorbierend.

Für die Berechnung der Bodendämpfung wird die akustische Absorption des Bodens durch den dimensionslosen Koeffizienten G ausgedrückt, der Werte von 0 für vollständig reflektierenden Boden bis 1 für komplett absorbierenden Boden annehmen kann. G ist unabhängig von der Frequenz. Tabelle 5.3 enthält beispielhaft für ausgewählte Bodenarten typische G -Werte.

Tabelle 5.3: Typische G -Werte für ausgewählte Bodenarten

Beschreibung des Bodens	G -Wert
Sehr weicher Boden bis normaler nicht verdichteter Boden (z. B. Schnee, Waldboden, Weideland)	1,0
Verdichtetes Feld und Schotter (z. B. verdichteter Rasen, Grünanlage)	0,7
Verdichteter dichter Boden (z. B. Schotterstraße, Parkplatz)	0,3
Harte und sehr harte Oberflächen (z. B. dichter Asphalt, Beton, Wasser)	0,0

Die Berechnung der Bodendämpfung A_{ground} erfolgt immer in Bezug auf eine Mittlere Grundlinie. Zur Berechnung des mittleren G -Werts, G_{path} , für den Ausbreitungsweg, bzw. den durch die MGL abgebildeten Teil des Ausbreitungswegs, werden die G -Werte des Hindernisprofils vertikal unter dem Ausbreitungsweg, bzw. dem betrachteten Teil des Ausbreitungswegs, arithmetisch gemittelt:

$$G_{\text{path}} = \frac{1}{x_r - x_l} \int_{x_l}^{x_r} G(x) dx. \quad (5.28)$$

Dabei gilt (siehe auch Abbildung 5.2):

- x_l ist die x -Koordinate des „linken“ Begrenzungspunktes der MGL, also entweder der Quelle oder des letzten Beugungspunktes.
- x_r ist die x -Koordinate des „rechten“ Begrenzungspunktes der MGL, also entweder des ersten Beugungspunktes oder des Immissionsortes.
- $G(x)$ ist der G -Wert entlang des Hindernisprofils in der vertikalen Ausbreitungsebene.

Für die Lärmkartierung ist $G_{\text{path}} = 0,6$ zu verwenden.

Wenn Quelle und Immissionsort, bzw. Quelle und erster Beugungspunkt, nahe beieinander liegen, so dass ihr Abstand in der Projektion auf die MGL, genannt d_p (siehe Abbildung 5.2), kleiner oder gleich dem 30-Fachen der Summe der äquivalenten Höhen der Begrenzungspunkte der MGL ist, so ist die Bodenart nahe der Quelle dominant. Um dem Rechnung zu tragen, wird in diesem Fall der Bodenfaktor G_{path} wie folgt korrigiert:

$$G'_{\text{path}} = \begin{cases} G_{\text{path}} \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} + G_s \left(1 - \frac{d_p}{30(z_s + z_r)} \right) & \text{wenn } d_p \leq 30(z_s + z_r) \\ G_{\text{path}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.29)$$

Dabei gilt (siehe auch Abbildung 5.2):

- G_s ist der G -Wert des Bodens unter der Quelle.
- d_p ist die Länge des auf die MGL projizierten Abstands der Begrenzungspunkte der MGL.
- z_s ist die äquivalente Höhe des Quellpunktes.
- z_r ist die äquivalente Höhe des „rechten“ Begrenzungspunktes der MGL. Für gebeugte Ausbreitungswege in der vertikalen Ausbreitungsebene gilt $z_r = z_{01}$, für alle anderen Ausbreitungswege gilt $z_r = z_R$.

Für Quellen des Straßenverkehrs gilt $G_s = 0$; die Absorption poröser Straßendecken ist bereits im Emissionsmodell der Straße berücksichtigt. Für Quellen des Schienenverkehrs gilt für Bahnstrecken mit Fester Fahrbahn $G_s = 0$ und für Bahnstrecken mit Gleisen auf Schotterbettung und Bahnstrecken mit anderen absorbierenden Oberbauarten $G_s = 1$. Für industrielle und gewerbliche Quellen und Anlagen gibt es keine pauschale Antwort und G_s ist im Einzelfall zu ermitteln.

5.5.6 Dämpfung durch Retrobeugung

Bei der Reflexion an einem Hindernis (Lärmschutzwand, Gebäude) bestimmt die Position des Auftreffens des Strahls in Bezug auf die Oberkante des Hindernisses den Anteil an Energie, der tatsächlich reflektiert wird. Dieser Verlust an akustischer Energie bei der Reflexion durch die Nähe des Reflexionspunktes zur Oberkante des Reflektors wird als Dämpfung durch Retrobeugung bezeichnet.

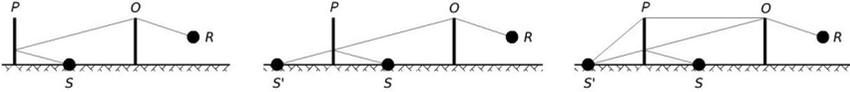


Abbildung 5.8: Konstruktion des fiktiven gebeugten Ausbreitungswegs mit der Oberkante des Reflektors als Beugungspunkt unter homogenen Ausbreitungsbedingungen

Abbildung 5.8 zeigt das der Retrobeugung zugrundeliegende Konstruktionsprinzip am Beispiel eines Ausbreitungswegs mit einem Reflektor und einem Beugungspunkt unter homogenen Ausbreitungsbedingungen. Im linken Teil der Abbildung ist der Ausbreitungsweg vom Quellpunkt S zum Reflektor und von dort zum Beugungspunkt O und schließlich zum Immissionsort R dargestellt. Im mittleren Teil der Abbildung wurde der am Reflektor gebildete Spiegelquellpunkt S' eingefügt und im rechten Teil der Abbildung ein fiktiver Ausbreitungsweg mit der Oberkante des Reflektors als zusätzlichem Beugungspunkt P hinzugefügt.

Die Dämpfung durch Retrobeugung wird als Beugungsdämpfung berechnet, und zwar basierend auf der Weglängendifferenz δ_R , die als Differenz der Länge des Ausbreitungswegs ohne den fiktiven Beugungspunkt P an der Oberkante des Reflektors und des Ausbreitungswegs mit diesem Punkt definiert ist. Die Weglängendifferenz δ_R ist daher immer kleiner oder gleich null. Im Beispiel aus Abbildung 5.8 ergibt sich $\delta_R = S'O - S'P - \overline{PO}$.

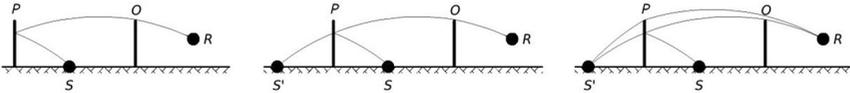


Abbildung 5.9: Konstruktion des fiktiven gebeugten Ausbreitungswegs mit der Oberkante des Reflektors als Beugungspunkt unter günstigen Ausbreitungsbedingungen

Abbildung 5.9 zeigt das Konstruktionsprinzip unter günstigen Ausbreitungsbedingungen. Im linken Teil der Abbildung ist wieder der Ausbreitungsweg vom Quellpunkt S zum Reflektor und von dort zum Beugungspunkt O und schließlich zum Immissionsort R dargestellt, allerdings aus Kreisabschnitten gebildet. Im mittleren Teil der Abbildung wurde der am Reflektor gebildete Spiegelquellpunkt S' eingefügt und im rechten Teil der Abbildung ein fiktiver Ausbreitungsweg mit der Oberkante des Reflektors als zusätzlichem Beugungspunkt P hinzugefügt. Der Punkt O liegt in diesem Beispiel unterhalb des fiktiven Ausbreitungswegs, weshalb sich $\delta_R = \widehat{S'O} + \widehat{OR} - S'P - \widehat{PR}$ ergibt.

5.6 Modell der Schallausbreitung

5.6.1 Dämpfung aufgrund geometrischer Divergenz

Die Dämpfung aufgrund geometrischer Divergenz A_{div} , entspricht einer Verringerung des Schallpegels mit zunehmender Ausbreitungsentfernung. Sie ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$A_{\text{div}} = 20 \cdot \lg(\overline{SR}) + 11. \quad (5.30)$$

5.6.2 Dämpfung aufgrund von Luftabsorption

Die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption A_{atm} , während der Ausbreitung von der Quelle zum Immissionsort ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$A_{\text{atm}} = \alpha_{\text{atm}} \cdot \frac{d}{1000}. \quad (5.31)$$

Dabei gilt:

α_{atm} ist der Koeffizient der Dämpfung von Luft in dB/km gemäß ISO 9613-1:1993-06.

Für die Lärmkartierung sind die Koeffizienten α_{atm} für eine Temperatur von 10°C , eine relative Luftfeuchtigkeit von 70 % und einen Luftdruck von 1013,25 hPa zu verwenden.

5.6.3 Bodendämpfung

Die Berechnung der Bodendämpfung A_{ground} erfolgt immer in Bezug auf eine Mittlere Grundlinie. Je nach Art des Ausbreitungswegs werden MGLn für drei verschiedene Bereiche gebildet:

- 1) Für den gesamten Ausbreitungsweg (S,R),
- 2) für den Quellbereich bis zum ersten Beugungspunkt (S,O) und
- 3) für den Bereich des Immissionsortes hinter dem letzten Beugungspunkt (O,R).

Eigentlich müssten die Beugungspunkte O in der Beschreibung der für die Bildung der MGLn verwendeten Bereiche die Indizes 1, bzw. n tragen. Da keine Verwechslungsgefahr besteht, entfallen diese Indizes im Interesse der Lesbarkeit der Gleichungen.

Abhängig vom betrachteten Bereich und von den Ausbreitungsbedingungen wird bei der Berechnung der Bodendämpfung entweder G_{path} oder G'_{path} verwendet. In den folgenden Gleichungen werden die generischen Bezeichnungen G_{w} und G_{m} benutzt, deren Bedeutung vom Anwendungsfall abhängt, wie in Tabelle 5.4 definiert.

Unter Verwendung dieser generischen Bezeichnungen gelten die Gleichungen in diesem Abschnitt für alle drei Anwendungsbereiche (S,R), (S,O) und (O,R), weshalb auf diesen Index im Interesse der Lesbarkeit der Gleichungen verzichtet wird.

Tabelle 5.4: Definition der generischen Bezeichnungen G_{w} und G_{m}

	Ausbreitungsbedingungen	
	homogen	günstig
gesamter Ausbreitungsweg oder Quellbereich (S,R) oder (S,O)	$G_{\text{w}} = G_{\text{m}} = G'_{\text{path}}$	$G_{\text{w}} = G_{\text{path}}$ $G_{\text{m}} = G'_{\text{path}}$
Bereich des Immissionsortes (O,R)	$G_{\text{w}} = G_{\text{m}} = G_{\text{path}}$	

Zunächst wird der allgemeine Fall betrachtet, dass $G_{\text{path}} > 0$.

Die Bodendämpfung bei homogenen Ausbreitungsbedingungen wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$A_{\text{ground,H}} = \max \left[-10 \lg \left(4 \frac{k^2}{d_{\text{p}}^2} \left(z_1^2 - z_1 \sqrt{\frac{2C_{\text{f}}}{k} + \frac{C_{\text{f}}}{k}} \right) \left(z_{\text{r}}^2 - z_{\text{r}} \sqrt{\frac{2C_{\text{f}}}{k} + \frac{C_{\text{f}}}{k}} \right) \right), A_{\text{ground,H,min}} \right]. \quad (5.32)$$

Dabei gilt:

k ist definiert als $k = (2\pi f_{\text{m}})/c$, wobei f_{m} die nominelle Mittenfrequenz des betrachteten Oktavbands in Hz ist und c die Geschwindigkeit des Schalls in Luft, angenommen als 340 m/s.

z_1 ist die äquivalente Höhe des „linken“ Begrenzungspunktes der MGL.

C_{f} ist folgendermaßen definiert:

$$C_{\text{f}} = d_{\text{p}} \frac{1 + 3wd_{\text{p}}e^{-\sqrt{wd_{\text{p}}}}}{1 + wd_{\text{p}}}. \quad (5.33)$$

Dabei ist w folgendermaßen definiert:

$$w = 0,0185 \frac{f_m^{2,5} G_w^{2,6}}{f_m^{1,5} G_w^{2,6} + 1,3 \cdot 10^3 f_m^{0,75} G_w^{1,3} + 1,16 \cdot 10^6} . \quad (5.34)$$

Die Untergrenze für $A_{\text{ground,H}}$ ist folgendermaßen definiert:

$$A_{\text{ground,H,min}} = -3(1 - G_m) . \quad (5.35)$$

Diese Untergrenze trägt dem Umstand Rechnung, dass bei einem großen Abstand zwischen Quelle und Immissionsort die erste quellenseitige Reflexion nicht mehr auf der quellnahen Oberfläche, sondern auf natürlichem Gelände erfolgt.

Zur Berechnung der Bodendämpfung bei günstigen Bedingungen werden die modifizierten äquivalenten Höhen ζ_l und ζ_r eingeführt, die der Krümmung der Schallstrahlung und atmosphärischer Turbulenz Rechnung tragen und folgendermaßen definiert sind:

$$\zeta_l = z_l + 2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{z_l}{z_l + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2} + 6 \cdot 10^{-3} \frac{d_p}{z_l + z_r} , \quad (5.36)$$

$$\zeta_r = z_r + 2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{z_r}{z_l + z_r} \right)^2 \frac{d_p^2}{2} + 6 \cdot 10^{-3} \frac{d_p}{z_l + z_r} . \quad (5.37)$$

Diese modifizierten äquivalenten Höhen werden anstelle der äquivalenten Höhen zur Berechnung der Bodendämpfung $A_{\text{ground,F}}$ verwendet:

$$A_{\text{ground,F}} = \max \left[-10 \cdot \lg \left(4 \frac{k^2}{d_p^2} \left(\zeta_l^2 - \zeta_l \sqrt{\frac{2C_f}{k} + \frac{C_f}{k}} \right) \left(\zeta_r^2 - \zeta_r \sqrt{\frac{2C_f}{k} + \frac{C_f}{k}} \right) \right), A_{\text{ground,F,min}} \right] . \quad (5.38)$$

Die Untergrenze für $A_{\text{ground,F}}$ ist folgendermaßen definiert:

$$A_{\text{ground,F,min}} = \begin{cases} -3(1 - G_m) & \text{wenn } d_p \leq 30(z_l + z_r) \\ -3(1 - G_m) \cdot \left(1 + 2 \left(1 - \frac{30(z_l + z_r)}{d_p} \right) \right) & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.39)$$

Im seltenen Fall, dass unter günstigen Ausbreitungsbedingungen $z_l = z_r = 0$, können die Gleichungen (5.36), (5.37) und (5.38) nicht angewendet werden, und es gilt pauschal $A_{\text{ground,F}} = A_{\text{ground,F,min}}$.

Für den speziellen Fall, dass $G_{\text{path}} = 0$, gilt:

$$A_{\text{ground,H}} = -3 , \quad (5.40)$$

$$A_{\text{ground,F}} = A_{\text{ground,F,min}} . \quad (5.41)$$

5.6.4 Dämpfung aufgrund von Beugung

Die Berechnung der Dämpfung aufgrund von Beugung beruht auf der durch das Hindernis verursachten Weglängendifferenz gegenüber der ungehinderten Schallausbreitung. Der Einfluss der Ausbreitungsbedingungen auf die Beugungsdämpfung Δ_{dif} wird ausschließlich bei der Berechnung der Weglängendifferenzen berücksichtigt. Die folgenden Gleichungen zur Berechnung von Δ_{dif} gelten gleichermaßen für homogene und günstige Ausbreitungsbedingungen:

$$\Delta_{\text{dif}} = \begin{cases} 10 \cdot \lg \left(3 + \frac{40}{\lambda} C'' \delta \right) & \text{wenn } \delta \geq -\frac{\lambda}{20 C''} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.42)$$

Dabei gilt:

λ ist die Wellenlänge bei der nominellen Mittenfrequenz des betrachteten Oktavbands.

δ ist die Weglängendifferenz, also entweder δ_{H} oder δ_{F} (siehe Abschnitt 5.5.3).

C'' ist ein Koeffizient zur Berücksichtigung von Mehrfachbeugung, der folgendermaßen definiert ist:

$$C'' = \begin{cases} \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2} & \text{wenn } e > 0,3 \text{ m} \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.43)$$

Dabei gilt:

e ist die Länge des Teilabschnitts eines gebeugten Ausbreitungswegs zwischen erstem und letztem Beugungspunkt, also entweder e_{H} oder e_{F} .

Die Terme $A_{\text{dif,H}}$ und $A_{\text{dif,F}}$ beschreiben die Dämpfung durch Beugung inklusive Bodendämpfung für gebeugte Ausbreitungswege in der vertikalen Ausbreitungsebene und sind folgendermaßen definiert:

$$A_{\text{dif,H}} = \min(\Delta_{\text{dif,H,(S,R)}; 25) + \Delta_{\text{ground,H,(S,O)}} + \Delta_{\text{ground,H,(O,R)}}, \quad (5.44)$$

$$A_{\text{dif,F}} = \min(\Delta_{\text{dif,F,(S,R)}; 25) + \Delta_{\text{ground,F,(S,O)}} + \Delta_{\text{ground,F,(O,R)}}. \quad (5.45)$$

Dabei gilt:

$\Delta_{\text{dif,H,(S,R)}}$ ist die Dämpfung aufgrund der Beugung zwischen der Quelle S und dem Immissionsort R bei homogenen Ausbreitungsbedingungen.

$\Delta_{\text{ground,H,(S,O)}}$ ist die Bodendämpfung im Quellbereich, bewertet mittels der Beugung im Quellbereich bei homogenen Ausbreitungsbedingungen.

$\Delta_{\text{ground,H,(O,R)}}$ ist die Bodendämpfung im Bereich des Immissionsortes, bewertet mittels der Beugung im Bereich des Immissionsortes bei homogenen Ausbreitungsbedingungen.

$\Delta_{\text{dif,F,(S,R)}}$ ist die Dämpfung aufgrund der Beugung zwischen der Quelle S und dem Immissionsort R bei günstigen Ausbreitungsbedingungen.

$\Delta_{\text{ground,F,(S,O)}}$ ist die Bodendämpfung im Quellbereich, bewertet mittels der Beugung im Quellbereich bei günstigen Ausbreitungsbedingungen.

$\Delta_{\text{ground,F,(O,R)}}$ ist die Bodendämpfung im Bereich des Immissionsortes, bewertet mittels der Beugung im Bereich des Immissionsortes bei günstigen Ausbreitungsbedingungen.

Liegen der Quellpunkt und der erste Beugungspunkt oberhalb der quellseitigen MGL, so sind die bewerteten Bodendämpfungsterme für den Quellbereich folgendermaßen definiert:

$$\Delta_{\text{ground,H,(S,O)}} = -20 \cdot \lg \left[1 + \left(10^{\frac{-A_{\text{ground,H,(S,O)}}}{20}} - 1 \right) \cdot 10^{\frac{-(\Delta_{\text{dif,H,(S',R)}} - \Delta_{\text{dif,H,(S,R)})}{20}} \right], \quad (5.46)$$

$$\Delta_{\text{ground,F,(S,O)}} = -20 \cdot \lg \left[1 + \left(10^{\frac{-A_{\text{ground,F,(S,O)}}}{20}} - 1 \right) \cdot 10^{\frac{-(\Delta_{\text{dif,F,(S',R)}} - \Delta_{\text{dif,F,(S,R)})}{20}} \right]. \quad (5.47)$$

Ansonsten gilt:

$$\Delta_{\text{ground,H,(S,O)}} = A_{\text{ground,H,(S,O)}}, \quad (5.48)$$

$$\Delta_{\text{ground,F,(S,O)}} = A_{\text{ground,F,(S,O)}}. \quad (5.49)$$

Liegen der letzte Beugungspunkt und der Immissionsort oberhalb der immissionsortseitigen MGL, so sind die bewerteten Bodendämpfungsterme für den Bereich des Immissionsortes folgendermaßen definiert:

$$\Delta_{\text{ground,H,(O,R)}} = -20 \cdot \lg \left[1 + \left(10^{\frac{-A_{\text{ground,H,(O,R)}}}{20}} - 1 \right) \cdot 10^{\frac{-(\Delta_{\text{dif,H,(S,R)}} - \Delta_{\text{dif,H,(S,R)})}{20}} \right], \quad (5.50)$$

$$\Delta_{\text{ground,F,(O,R)}} = -20 \cdot \lg \left[1 + \left(10^{\frac{-A_{\text{ground,F,(O,R)}}}{20}} - 1 \right) \cdot 10^{\frac{-(\Delta_{\text{dif,F,(S,R)}} - \Delta_{\text{dif,F,(S,R)})}{20}} \right]. \quad (5.51)$$

Ansonsten gilt:

$$\Delta_{\text{ground,H,(O,R)}} = A_{\text{ground,H,(O,R)}}, \quad (5.52)$$

$$\Delta_{\text{ground,F,(O,R)}} = A_{\text{ground,F,(O,R)}}. \quad (5.53)$$

5.6.5 Dämpfung aufgrund von Reflexionen

Beim Auftreffen auf einen Reflektor wird ein Teil der einfallenden Schallenergie vom Reflektor absorbiert. Zusammen mit der Dämpfung durch Retrobeugung führt dies dazu, dass der Schalleistungspegel der Spiegelschallquelle kleiner als der der Originalschallquelle ist:

$$L_{W,S'} = L_{W,S} + 10 \cdot \lg(1 - \alpha_r) - \Delta_{\text{retrodif}}. \quad (5.54)$$

Dabei gilt:

$L_{W,S'}$ ist der Schalleistungspegel der Spiegelschallquelle S' .

$L_{W,S}$ ist der Schalleistungspegel der Originalschallquelle S .

α_r ist der Absorptionskoeffizient der Oberfläche des Reflektors gemäß Definition in DIN EN 1793-1:2013-04.

Die Dämpfung durch Retrobeugung Δ_{retrodif} ist dabei definiert als:

$$\Delta_{\text{retrodif}} = \begin{cases} 10 \cdot \lg \left(3 + \frac{40}{\lambda} \delta_R \right) & \text{wenn } \delta_R > -\frac{\lambda}{20} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.55)$$

Dabei gilt:

λ ist die Wellenlänge bei der nominellen Mittenfrequenz des betrachteten Oktavbands.

δ_R ist die Weglängendifferenz der Retrobeugung, wie in Abschnitt 5.5.6 definiert.