

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Grundgleichung für Punkt-Punkt Ausbreitung

Grundgleichung für Punkt-Punkt Ausbreitung nach ISO 9613-2

$$L_p(\text{Empfänger}) = L_W + D - \sum A \quad (1)$$

mit

$L_p(\text{Empfänger})$: Schalldruckpegel am Empfänger

L_W : Schallleistungspegel der Quelle

D : Korrektur der Richtwirkung der Quelle

A : Abschwächungen bei der Ausbreitung

Abschwächungsterme A sind typisch frequenzabhängig
→ Berechnung in Frequenzbändern (Terzen/Oktaven)

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Richtwirkung der Quelle

Richtwirkung der Quelle

Richtwirkungskorrekturen D für eine rundum strahlende Punktquelle in verschiedenen Anordnungen:

Lage der Quelle	Raumwinkel	D [dB]
frei im Raum	4π	0
unmittelbar vor Fläche	2π	+3
unmittelbar vor Kante	π	+6
unmittelbar vor Ecke	$\frac{\pi}{2}$	+9

Abschwächung: Geometrische Verdünnung

Abschwächung: Geometrische Verdünnung

- ▶ Abnahme des Schalldrucks mit Distanz, da Verteilung der Leistung auf immer grössere Fläche
- ▶ frequenzunabhängig

Generell gilt für eine Punktquelle:

$$I = \frac{W}{4\pi d^2} \quad (2)$$

mit

I : Intensität im Abstand d von der Quelle

W : Quellenleistung

Abschwächung: Geometrische Verdünnung

Für Abstände grösser als einige Wellenlängen gilt:

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \rightarrow p^2 = \frac{W \rho_0 c}{4\pi d^2} \quad (3)$$

$$A_{div} = 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

mit

d : Abstand Quelle - Empfänger

d_0 : Referenzabstand = 1 m

Abschwächung: Luftdämpfung

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Abschwächung: Luftdämpfung

- ▶ Umwandlung der Schallenergie in Wärme
- ▶ pro Distanzeinheit wird konstanter Prozentsatz an Energie entzogen
- ▶ stark frequenzabhängig
- ▶ abhängig von Temperatur und Luftfeuchte

Abschwächung: Luftdämpfung

$$A_{atm} = \alpha d \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

α in [dB/km]:

T[°C]	F[%]	125	250	500	1k	2k	4k	8k
10	70	0.4	1.0	1.9	3.7	9.7	32.8	117
20	70	0.3	1.1	2.8	5.0	9.0	22.9	76.6
15	50	0.5	1.2	2.2	4.2	10.8	36.2	129
15	80	0.3	1.1	2.4	4.1	8.3	23.7	82.8

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

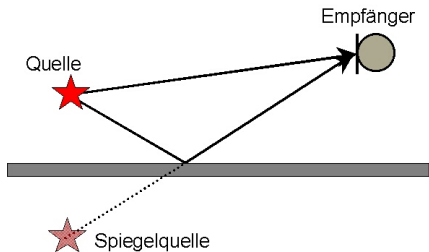
Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Abschwächung?: Bodeneffekt

Abschwächung?: Bodeneffekt



- ▶ oft findet Schallausbreitung in Bodennähe statt → am Boden reflektierte Welle
- ▶ konstruktive und destruktive Interferenz mit Direktschall

Abschwächung?: Bodeneffekt

- ▶ oft wird Möglichkeit der konstruktiven Interferenz ignoriert

Empirische Näherung ISO 9613-2:

$$A_{ground} = 4.8 - \frac{2h_m}{d} \left(17 + \frac{300}{d} \right) \geq 0 \quad [\text{dB(A)}] \quad (6)$$

mit

h_m : mittlere Höhe des Ausbreitungspfades ü. Boden [m]

d : Abstand Quelle - Empfänger [m]

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

back

Abschwächung?: Bodeneffekt

heute zu haben:

- ▶ Numerische Lösung für den Interferenzeffekt der Punktquelle über ebenem homogenem Boden (wellentheoretischer Ansatz)
- ▶ → groundf.exe

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Abschwächung: Hindernisse

Abschwächung: Hindernisse - Bewuchs

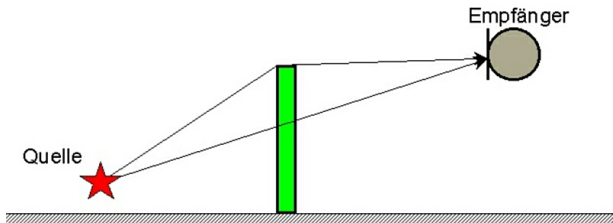
nennenswerte Dämpfungen erst bei Schalldurchgang ab
ca. 20 m

A_{foliage} :

Distanz	250	500	1k	2k
10. . . 20m	1dB	1dB	1dB	1dB
20. . . 200m	0.04dB/m	0.05dB/m	0.06dB/m	0.08dB/m
> 200m	8 dB	10 dB	12 dB	16 dB

Abschwächung: Hindernisse - Schallschirme

- ▶ oft künstliche Hindernisse, flächenbezogene Masse $> 10 \text{ kg/m}^2$
- ▶ Ziel: Unterbrechen der Sichtverbindung Quelle - Empfänger



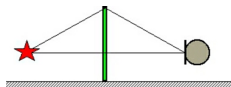
Abschwächung: Hindernisse - Schallschirme

- ▶ Hinderniswirkung ist gegeben durch die dem Schall aufgezwungene Weglängendifferenz, gemessen in Wellenlängen
- ▶ zunehmende Hinderniswirkung mit zunehmender Frequenz

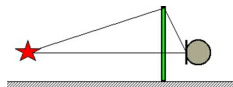
Umwegoptimierung:



gut



schlecht



gut

Abschwächung: Hindernisse - Schallschirme

Berechnung:

$$A_{screen} = 10 \log \left(3 + \frac{C_2}{\lambda} C_3 z K_w \right) \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

mit

$$C_2 = 20$$

$C_3 = 1$ für einfaches Hindernis

λ : Wellenlänge

z : Umweg

K_w : Meteo-Korrekturfaktor ≤ 1.0

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Verstärkung: Reflexionen

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Verstärkung: Reflexionen

2 Arten:

- ▶ spiegelnde Reflexion - glatte Reflektorfläche
- ▶ diffuse Reflexion - strukturierte Reflektorfläche (bzgl. der Wellenlänge)

Verstärkung: Reflexionen: spiegelnd

spiegelnde Reflexionen:

- ▶ z.B. an glatter Hausfassade, Schallschutzwand
- ▶ Behandlung mittels Spiegelquelle → energetische Ueberlagerung
- ▶ check, ob Reflexionspunkt auf Reflektor liegt
- ▶ allfällige Abschwächung durch Absorption
- ▶ allfällige Abschwächung infolge zu geringer Reflektorgrösse (z.B. mit Fresnelzonen)

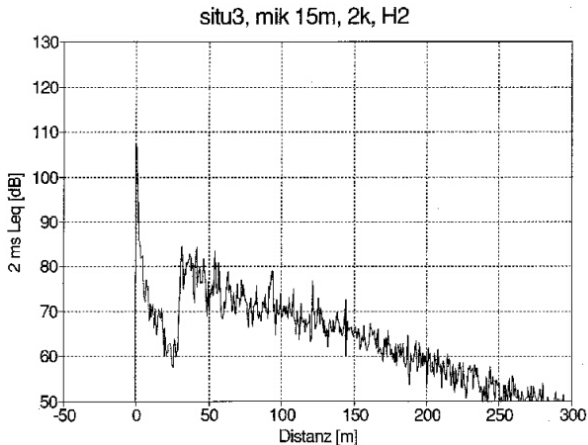
Verstärkung: Reflexionen: diffus

diffuse Reflexionen:

- ▶ z.B. an strukturierter Hausfassade, an Waldrand, an Felswand, ...
- ▶ Behandlung schwieriger als spiegelnde Reflexion → empirische Modelle

Verstärkung: Reflexionen: diffus

Beispiel: Reflexion eines Schusses an Waldrand:



Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Mechanismen

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung

- ▶ Temperatur und Feuchte → Variation Luftdämpfung
- ▶ Lokal unterschiedliche Temperatur (→ vertikale Gradienten)
- ▶ Wind (immer vertikaler Gradient)
- ▶ Mediumsinhomogenitäten, Turbulenzen

Auswirkungen von Temperatur- und Feuchteschwankungen auf die Luftdämpfung

- ▶ Abhängigkeit der Luftdämpfung vom Zustand der Atmosphäre:
 - ▶ Luftfeuchte
 - ▶ Temperatur
- ▶ Berechnung mittels Formelsammlung ISO 9613-1
- ▶ Mittelwerte für CH: rel. Luftfeuchte: 76%,
Temperatur: 8°C

Auswirkungen von Temperaturgradienten

Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit:

$$c \approx 343.2 \sqrt{\frac{T}{293}} \quad (8)$$

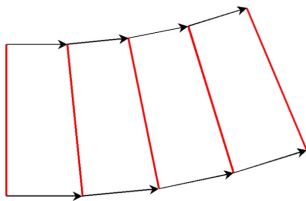
c : Schallgeschwindigkeit in [m/s]

T : Lufttemperatur in Kelvin

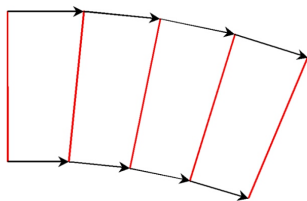
typisch +0.6 m/s pro Grad C Erwärmung

Auswirkungen von Temperaturgradienten

Kippen von ebenen Wellenfronten:



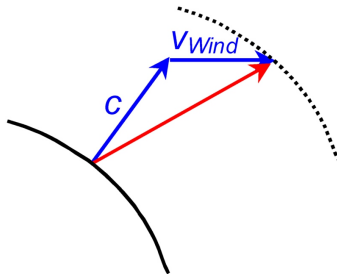
mit Höhe abnehmende T.



mit Höhe zunehmende T.

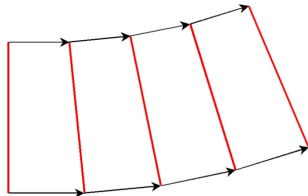
Auswirkungen von Wind

- ▶ schrittweise Konstruktion von Wellenfronten im allgemeinen Medium
 - ▶ gegeben: Wellenfront zum Zeitpunkt t_0
 - ▶ gesucht: Wellenfront zum Zeitpunkt t_1

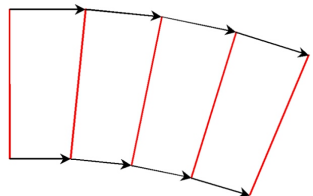


Auswirkungen von Wind

- ▶ Wind bedeutet immer vertikaler Gradient der Windgeschwindigkeit
- ▶ Schallausbreitungsgeschwindigkeit höhenabhängig
- ▶ Krümmung der Ausbreitung analog Temperaturgradienten.

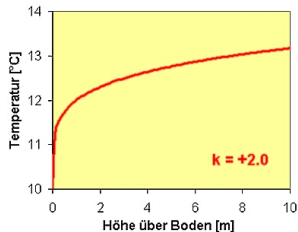
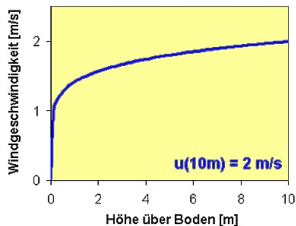


Gegenwind



Mitwind

Beispiele von Wind- und Temperaturprofilen



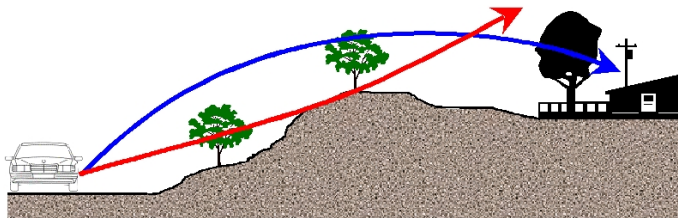
$$u(z) = u_{\text{ref}} \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^{0.15}$$

$$T(z) = T(0) + kz^{0.2}$$

(9)

Konsequenzen gekrümmter Schallausbreitung

- ▶ Aufwärtskrümmung: Ausbildung von Schattenzonen
→ grosse Dämpfung
- ▶ Abwärtskrümmung: Uebersteigen von Hindernissen
möglich, Bodeneffektreduktion → verstärkende
Wirkung



Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Auswirkungen von Turbulenzen

Konsequenzen für die Immission:

- ▶ kurzfristige Pegelschwankungen (\approx energieneutral)
- ▶ Streuung von Schallenergie in Schattenzonen
- ▶ allmählicher Kohärenzverlust zwischen verschiedenen Ausbreitungspfaden

Methoden zur Berechnung von Meteeffekten auf die Schallausbreitung

Methoden zur Berechnung von Meteoeffekten auf die Schallausbreitung

- ▶ Empirische Ansätze betr. Hinderniswirkung (ISO 9613-2)
- ▶ Analytisch geometrischer Ansatz: Approximation mit Kreisbahnen
- ▶ Numerischer geometrischer Ansatz: ray tracing
- ▶ Numerische Lösungen der (approximierten) Wellengleichung:
 - ▶ Parabolische Gleichung (PE)
 - ▶ Finite Differenzen im Zeitbereich (FDTD)

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Empirische Ansätze zur Hinderniswirkung

Empirische Ansätze zur Hinderniswirkung

Berechnung der Hinderniswirkung nach ISO 9613-2:

$$D_z = 10 \log \left(3 + \frac{C_2}{\lambda} z K_{\text{met}} \right) \leq 20.0 \text{ bzw. } 25.0 \quad (10)$$

mit

$C_2 = 20$ bzw. 40

z : Pfadlängendifferenz [m]

$$K_{\text{met}} = \exp \left(-\frac{1}{2000} \sqrt{\frac{d_{ss} d_{sr} d}{2z}} \right) < 1.0$$

d_{ss} : Abstand Quelle - Hindernis [m]

d_{sr} : Abstand Hindernis - Empfänger [m]

d : Abstand Quelle - Empfänger [m]

Analytisch geometrischer Ansatz: Approximation mit Kreisbahnen

Analytisch geometrische Ansätze: Approximation mit Kreisbahnen

- ▶ typische Annahme: lineares Höhenprofil der Schallausbreitungsgeschwindigkeit → konstante Gradienten → Kreisbahnen
- ▶ Krümmung der Schallstrahlen analytisch bestimmen
- ▶ anhand der Schallstrahlenverläufe modifizierte Hinderniswirkung und Bodeneffekt bestimmen

Berechnung des Kreisbahnradius

Der Radius der Schallstrahlkreisbahn ist abhängig von

- ▶ Schallausbreitungsgeschwindigkeit auf der Abschusshöhe $c(z)$
- ▶ Gradienten der Schallausbreitungsgeschwindigkeit mit der Höhe $\frac{dc}{dz}$
- ▶ Abschusswinkel θ
 - ▶ für $\theta = 0$ und $\frac{dc}{dz} \approx \pm 0.05 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ wird $R \approx$ einige Kilometer

Achtung: Grundannahme konstanter Gradient ist etwas problematisch!

Numerisch geometrischer Ansatz: Ray Tracing

Schallstrahlenverfolgung (ray tracing)

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

- ▶ Schallstrahl (ray): Kurve im Raum, die fester Punkt einer Wellenfront beschreibt
- ▶ Numerische Verfahren zur schrittweisen Konstruktion
- ▶ Berücksichtigung variabler Wind- und Schallgeschwindigkeiten

Schallstrahlenverfolgung (ray tracing)

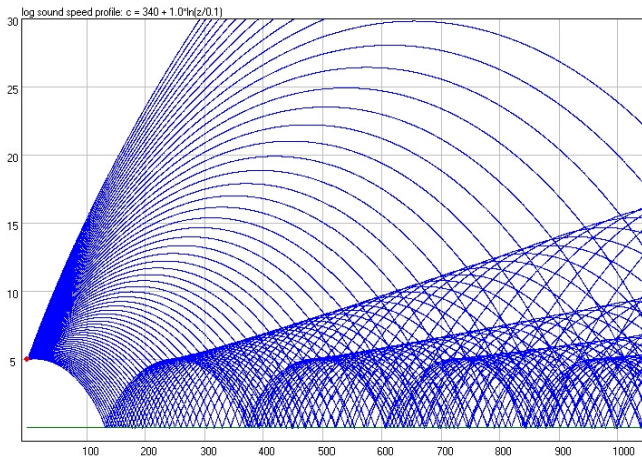
Grundgleichung

- Richtwirkung der Quelle
- Geometrische Verdünnung
- Luftdämpfung
- Bodeneffekt
- Hindernisse
- Reflexionen

Meteoeffekte

- Mechanismen
- Berechnungsmethoden

[back](#)



Schallstrahlenverfolgung (ray tracing)

Strategie der Schallstrahlenverfolgung für die Immissionsprognose:

1. suche aller Pfade, die von der Quelle zum Empfänger führen
2. Bestimmen des Schalldrucks am Empfänger durch Aufsummation aller Strahlenbeiträge

Schallstrahlenverfolgung (ray tracing)

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

- ▶ Vorteile:
 - ▶ relativ schneller Algorithmus
 - ▶ empirisch erweiterbar, z.B. Reflexionen an Wäldern und Felswänden
- ▶ Problempunkte:
 - ▶ Singularitäten (Kaustriken)
 - ▶ geometrischer Ansatz → keine Wellenphänomene
 - ▶ unrealistisch scharfe Uebergänge (z.B. Schattenzone)
 - ▶ schlaue Ergänzungen für Hindernisse notwendig

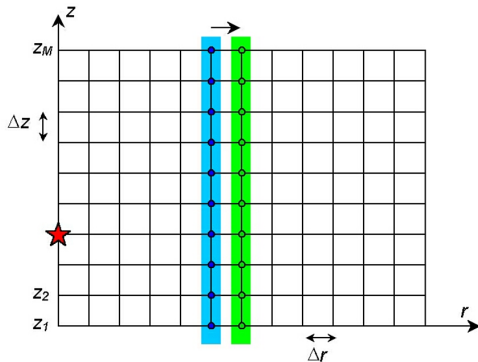
Numerische Lösungen der Wellengleichung: Parabolische Gleichung (PE)

Parabolische Gleichung (PE)

- ▶ Ursprung in der Unterwasserakustik, seit rund 20 Jahren für Schallausbreitung im Freien eingesetzt
- ▶ Formulierung im Frequenzbereich (Helmholtzgl.: $\Delta\check{p} + \frac{\omega^2}{c^2}\check{p} = 0$)
- ▶ Helmholtzgleichung in Zylinderkoordinaten für achsialsymmetrische Näherung (mit 2D Rechnung Punktquellenverhalten simulieren)
- ▶ Simulationsbereich: 2D Gitter mit Maschenweite $\approx 0.1\lambda$ bzw. $\approx 10\lambda$
- ▶ Näherung durch Aufteilung des Schallfeldes in langsam veränderlichen Amplitudenanteil und schnell ändernden Schwingungsanteil

Parabolische Gleichung (PE)

- ▶ Vorteil gegenüber FE: schrittweise Lösung $p(r, z) \rightarrow p(r + \Delta r, z)$ d.h. nur Gleichungssystem mit M Unbekannten lösen (M : Anzahl Elemente in der Höhe)



Parabolische Gleichung (PE)

Problempunkte:

- ▶ streng ist nur ebener Boden zugelassen
- ▶ Näherungen für sanfte Bodenunebenheiten möglich
- ▶ kritisch sind abrupte Inhomogenitäten wie Lärmschirme
- ▶ keine Windfelder simulierbar, sondern nur effektive Schallausbreitungsgeschwindigkeit
- ▶ Rechenaufwand lässt nur exemplarische Berechnungen zu

Numerische Lösungen der Wellengleichung: Finite Differenzen im Zeitbereich (FDTD)

Finite Differenzen im Zeitbereich (FDTD)

- ▶ Grundgleichungen:

- ▶ $\text{grad}(p) = -\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$

- ▶ $-\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa P_0 \text{div}(\vec{v})$

- ▶ Simulationsbereich: 2/3D Gitter mit Maschenweite $\approx 0.1\lambda$
- ▶ Berechnung durch zeit-schrittweises Aufdatieren der Schallfeldgrößen in den Gitterpunkten
- ▶ Vorteil: kein Gleichungssystem zu lösen, Resultat ist Impulsantwort, d.h. enthält Info zu allen Frequenzen

Finite Differenzen im Zeitbereich (FDTD)

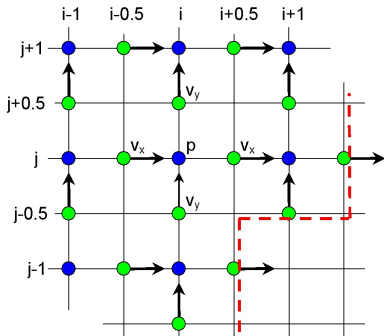
Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle
Geometrische Verdünnung
Luftdämpfung
Bodeneffekt
Hindernisse
Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen
Berechnungsmethoden

back



$$v_x^{\text{neu}} = v_x^{\text{alt}} - \alpha (p_{\text{rechts}} - p_{\text{links}})$$
$$p^{\text{neu}} = p^{\text{alt}} - \beta (v_{x\text{rechts}} - v_{x\text{links}}) - \beta (v_{y\text{oben}} - v_{y\text{unten}})$$

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Finite Differenzen im Zeitbereich (FDTD)

Problempunkte:

- ▶ delikate Approximation der Bodenimpedanz im Zeitbereich
- ▶ Rechenaufwand lässt nur exemplarische Berechnungen zu

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

Eingabegrössen???

Eingabegrößen???

- ▶ mit etwas Anstrengung können heute Meteeffekte auf die Schallausbreitung berechnet werden
- ▶ ABER: wer nennt uns die notwendigen Eingabegrößen (Windgeschwindigkeit und Temperatur in jedem Raumpunkt)
- ▶ Ansätze:
 - ▶ einfache Topographie → einfache Annahmen wie z.B. identische Höhenabhängigkeit der Größen für alle XY-Koordinatenpunkte
 - ▶ komplexe Topographie → diagnostische Meteomodelle vorschalten.
- ▶ absehbare Grenze der Steigerung der Rechengenauigkeit.

Grundgleichung

Richtwirkung der Quelle

Geometrische Verdünnung

Luftdämpfung

Bodeneffekt

Hindernisse

Reflexionen

Meteoeffekte

Mechanismen

Berechnungsmethoden

[back](#)

hmtz-akustik eth-akustik-1