

Schallquellenlokalisation

ÖAL Tagung

Holger Waubke

Österreichische Akademie der
Wissenschaften

Institut für Schallforschung
holger.waubke@oeaw.ac.at



apl. Prof. Dr.-Ing. Holger Waubke studierte Bauingenieurwesen an der TU München. Er promovierte und habilitierte dort. Er arbeite bei Müller-BBM und ist jetzt für die physikalische und numerische Akustik Gruppe am Institut für Schallforschung verantwortlich.

Stationäre Rauschquellen

- Fourier Transformation in der Zeit

$$\hat{p}_i(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_i(t) e^{-j\omega t} dt, \quad i = 1..n, \quad j^2 = -1$$

$$S_{ij}(\omega) = \hat{p}_i(\omega) \hat{p}_j^*(\omega) \quad i, j = 1..n$$

$$\hat{p}_{i,k}(\omega) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p_{i,k}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad i = 1..n, \quad k = 1..m, \quad j^2 = -1$$

$$\tilde{S}_{ij}(\omega) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \hat{p}_{i,k}(\omega) \hat{p}_{j,k}^*(\omega) \quad i, j = 1..n$$

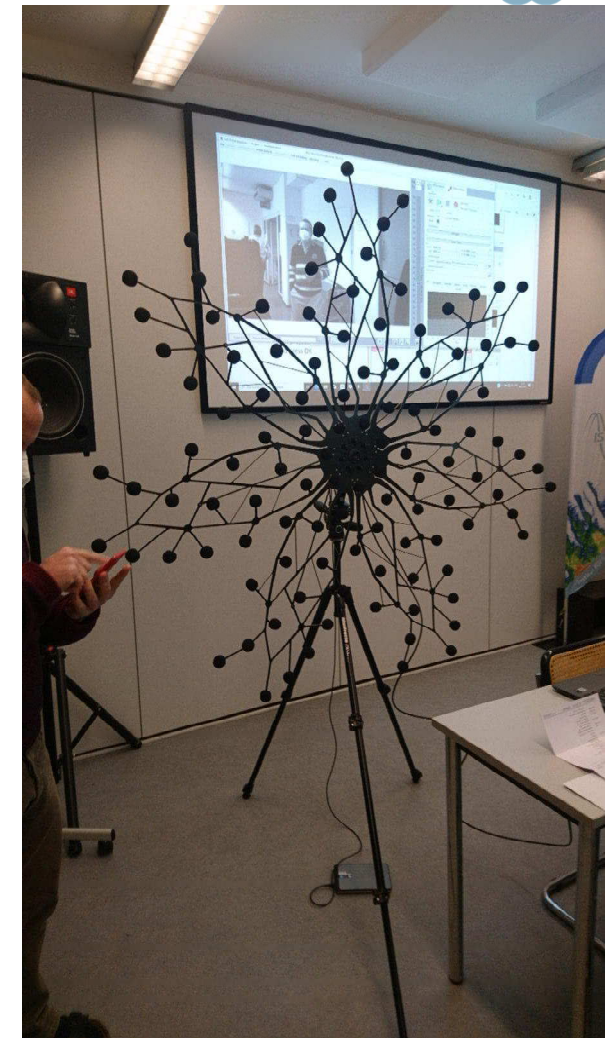
- Spektralleistungsdichte enthält relative Laufzeiten als Phase

Stationäre Rauschquellen

- Hauptkomponentenanalyse (PCA)
 - Eigenwert gibt Intensität der Komponente wieder
 - Eigenvektor gibt die Form der Komponente auf den Mikrofonen wieder
- Verwendung:
 - Beam Forming Methode und
 - akustische Holographie (STSF)

Beam Forming Methode

- Delay-and-Sum Beamformer
 - Die Signale werden so verzögert, dass die Laufzeitdifferenzen von einer angenommenen Quelle kompensiert werden
 - Die verzögerten Signale werden addiert
 - Verbesserungsmöglichkeit:
 - Optimierung der Delays mit dem Ziel der Reduzierung der Nebenkeulen
 - Zufällige Anordnung der Mikrophone reduziert Aliasing

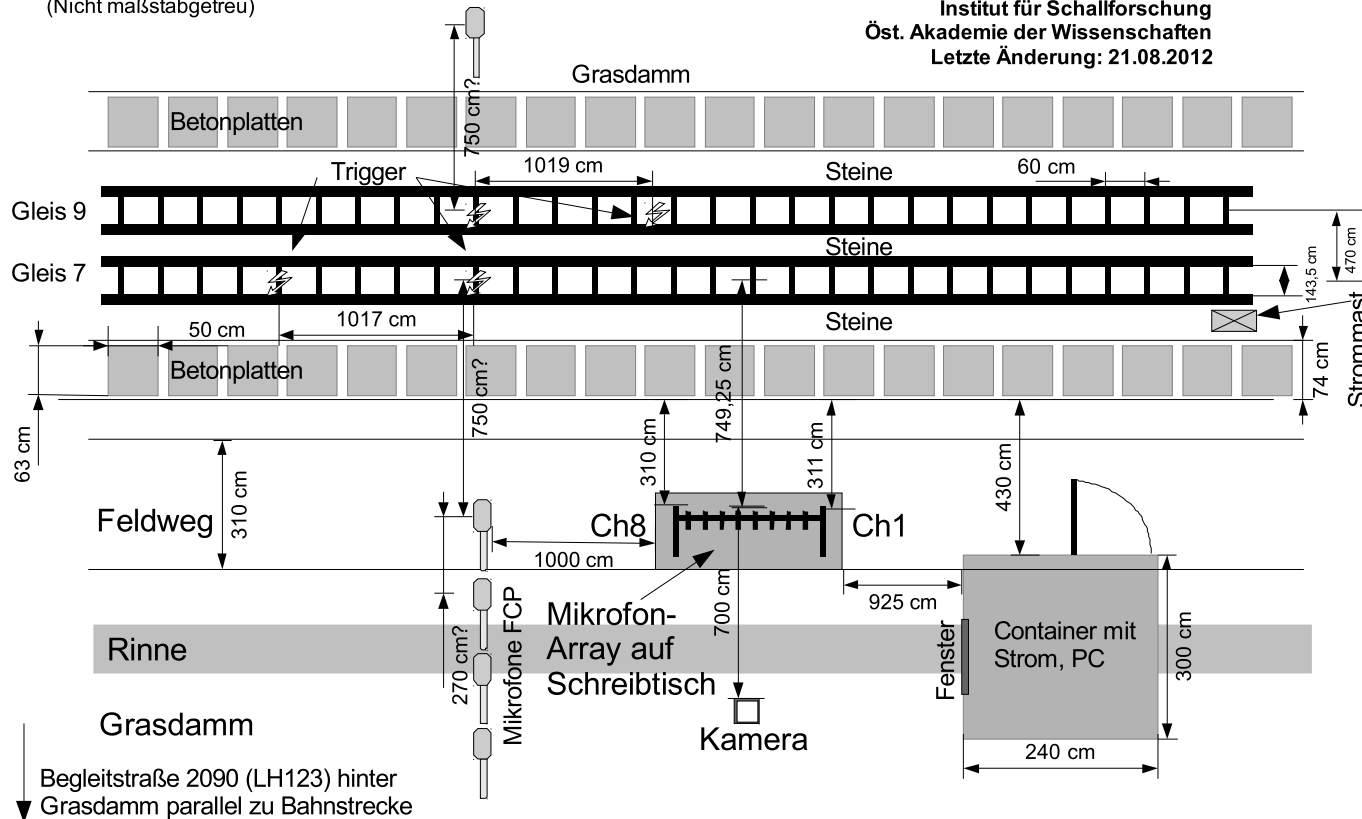


Messungen im Tullnerfeld – Grundriß

Messort Tullnerfeld – Grundriss

(Nicht maßstabgetreu)

Michael Mihocic
Institut für Schallforschung
Öst. Akademie der Wissenschaften
Letzte Änderung: 21.08.2012



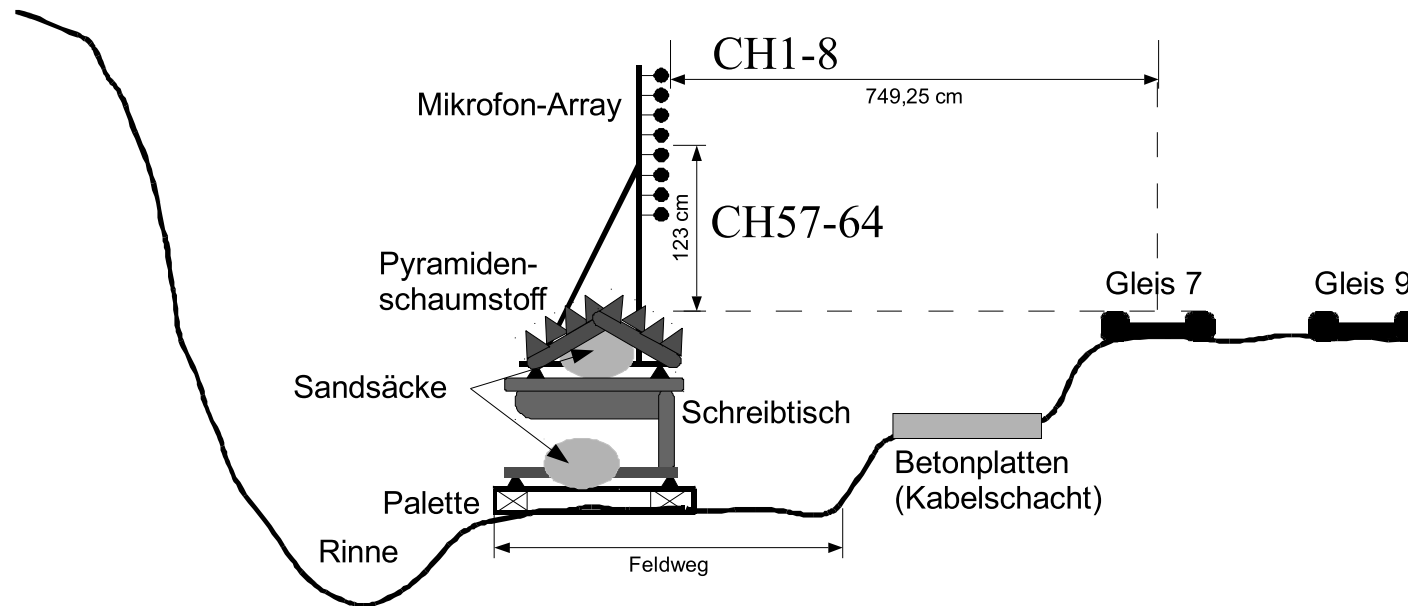
Begleitstraße 2090 (LH123) hinter
Grasdamm parallel zu Bahnstrecke

Messungen im Tullnerfeld – Querschnitt

Messort Tullnerfeld – Querschnitt

(Nicht maßstabgetreu)

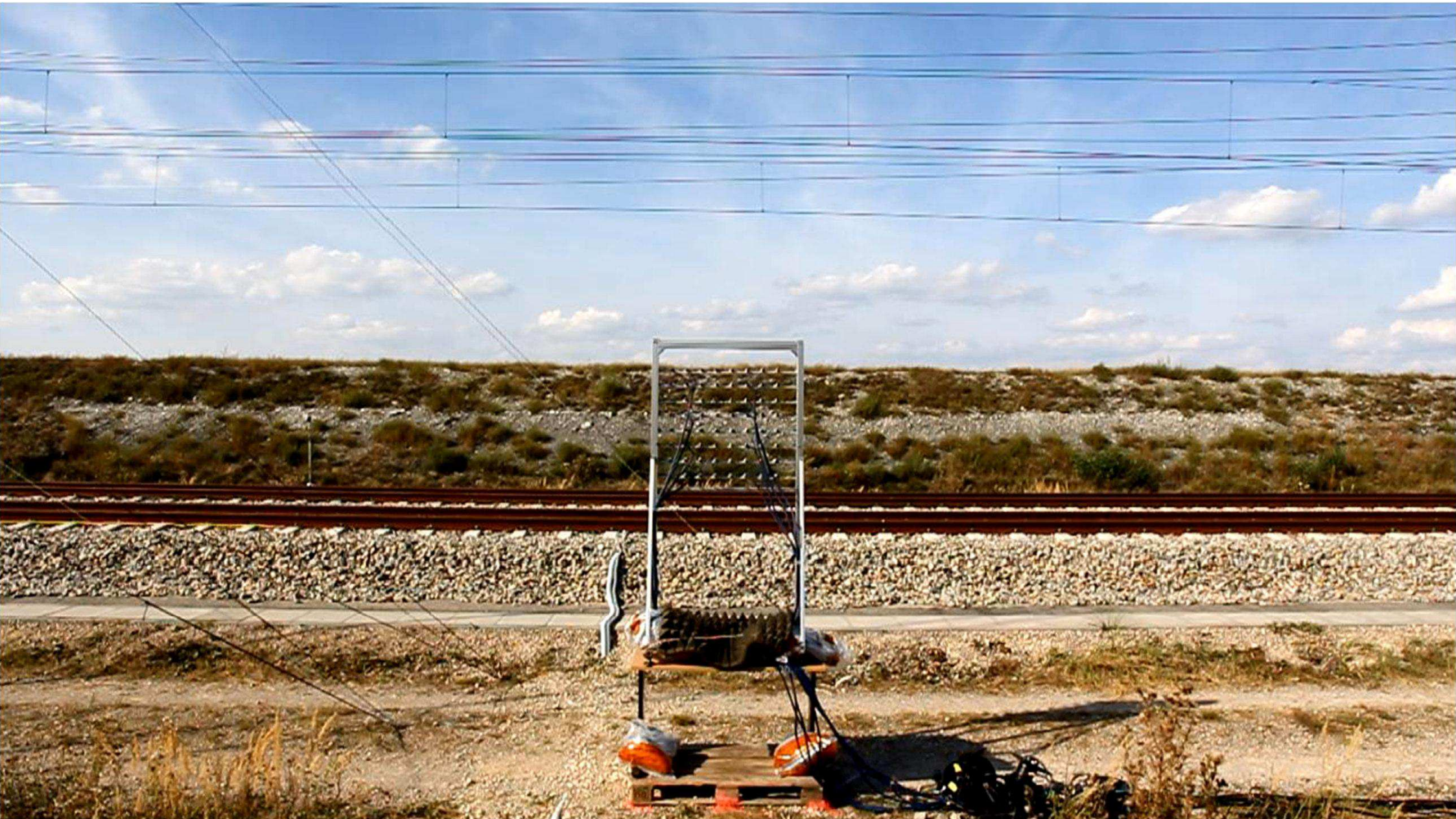
Michael Mihocic
Institut für Schallforschung
Öst. Akademie der Wissenschaften
Letzte Änderung: 20.08.2012



Beam Forming Methode

- Anwendung auf Zugvorbeifahrten
 - Messung mit Mikrophon-Array mit 10,4 m Abstand
 - Railjet und ICEs mit Geschwindigkeiten bis zu 320 km/h
 - Railjet mit 230 km/h
 - ICEs mit 320 km/h
 - Detektion von Lärmquellen am fahrendem Zug
 - Focus auf Normale $x=0$ in verschiedenen Höhen
 - Kein Doppler Effekt in der neutralen Achse
 - Amplituden eines Bandpasses von 500 Hz bis 2000 Hz





Akustische Holographie

- Fourier Integraltransformation in Raum und Zeit

$$\hat{p}(k_x, y, k_z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y, z, t) e^{-j(k_x x + k_z z + \omega t)} dx dz dt$$

- Wellenzahlgleichung $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$

- Bestimmung der Wellenzahl k_y : $k_y = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 - k_z^2}$

- Auswahl des positiven Vorzeichens, wenn die Quelle auf der positiven y Seite liegt

Akustische Holographie

- Schalldruck im Abstand y von dem Mikrophonarray ($y_0=0$)
 - Das Mikrophonarray liegt in der x - z Ebene

$$\hat{p}(k_x, y, k_z, \omega) = \hat{p}(k_x, y_0 = 0, k_z, \omega) e^{+jk_y y}$$

- Herleitung der Schallschnellen (und Intensitäten)

$$\hat{u}_x(k_x, y, k_z, \omega) = \frac{jk_x}{\rho\omega^2} \hat{p}(k_x, y, k_z, \omega)$$

$$\hat{u}_y(k_x, y, k_z, \omega) = \frac{j\sqrt{\omega^2/c^2 - (k_x^2 + k_z^2)}}{\rho\omega^2} \hat{p}(k_x, y, k_z, \omega)$$

$$\hat{u}_z(k_x, y, k_z, \omega) = \frac{jk_z}{\rho\omega^2} \hat{p}(k_x, y, k_z, \omega)$$

Akustische Holographie

- Projektion an die Oberfläche eines Körpers

$$k^2 - k_x^2 - k_z^2 > 0: k_y = +\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_z^2}, \quad k = \frac{\omega}{c}$$

$k^2 - k_x^2 - k_z^2 < 0$: Nahfeldkomponenten werden vernachlässigt

$p(y) = p(y=0)e^{jk_y y}$, y Abstand des Mikrophonarrays vom Körper

Akustische Holographie

- Bewegte Quelle

$$f(x, t) = A \delta(x - vt) e^{j\Omega t}$$

$$\hat{f}(k_x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-jk_x x} dx e^{-j\omega t} dt = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - vt) e^{-jk_x x} dx e^{-j(\omega - \Omega)t} dt$$

$$\hat{f}(k_x, \omega) = A \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_x vt} e^{-j(\omega - \Omega)t} dt = A \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega - \Omega + k_x v)t} dt = A \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\zeta t} dt = 2\pi A \delta(\zeta)$$

$$\zeta = \omega - \Omega + k_x v$$

$$\hat{f}(k_x, \omega) = 2\pi A \delta(\omega - \Omega + k_x v)$$

- Der feste Beobachter bemerkt eine Frequenzverschiebung: $\omega = \Omega - k_x v$

Akustische Holographie

- Interpolation in ω für den bewegten Beobachter mit Ω
 $\omega = \Omega - \mathbf{k}_x \mathbf{v}$
- Inverse Fourier Transformation in z und x
 - FFT oder Filon Methode

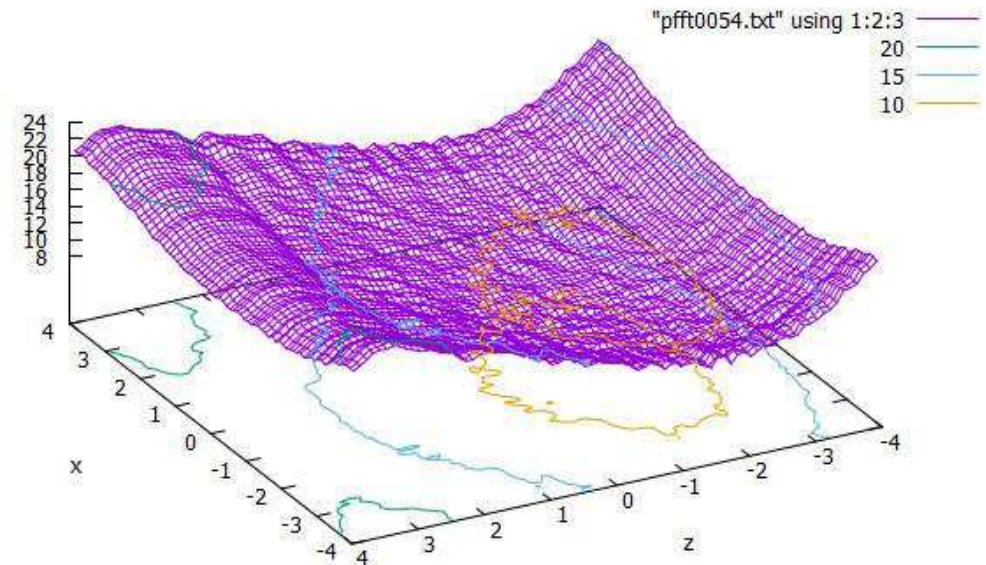
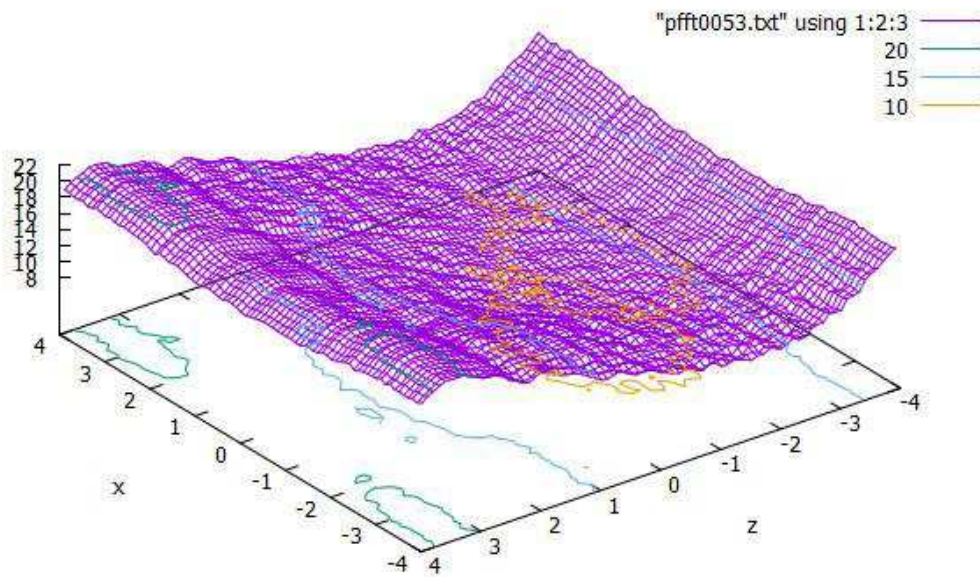
$$\hat{f}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(k_x, y, k_z, \omega) e^{j(k_x x + k_z z)} dz dx$$

Messungen im Tullnerfeld

- Microphonarray mit 64 Mikrofonen
 - 8 x 8 Mikrophone in x und z Richtung
 - Konstantes Raster mit 0.1 m Abstand
 - Vergrößerung auf 80 x 80 Punkte mittels räumlicher Interpolation in k_x , k_z
Wellenzahl Domäne mit dem Faktor 10
 - Spektraler Bandpass von 500 Hz bis 2000 Hz

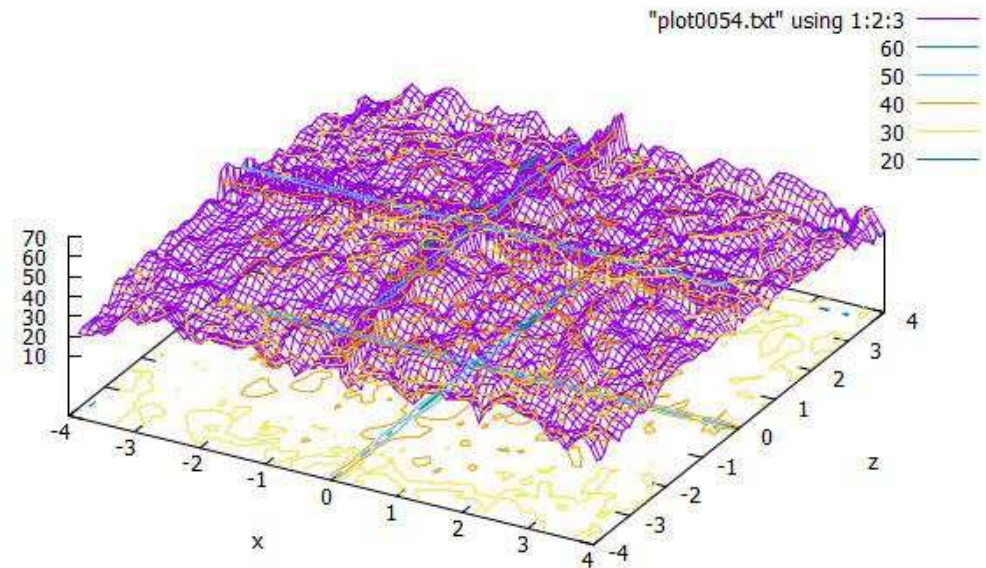
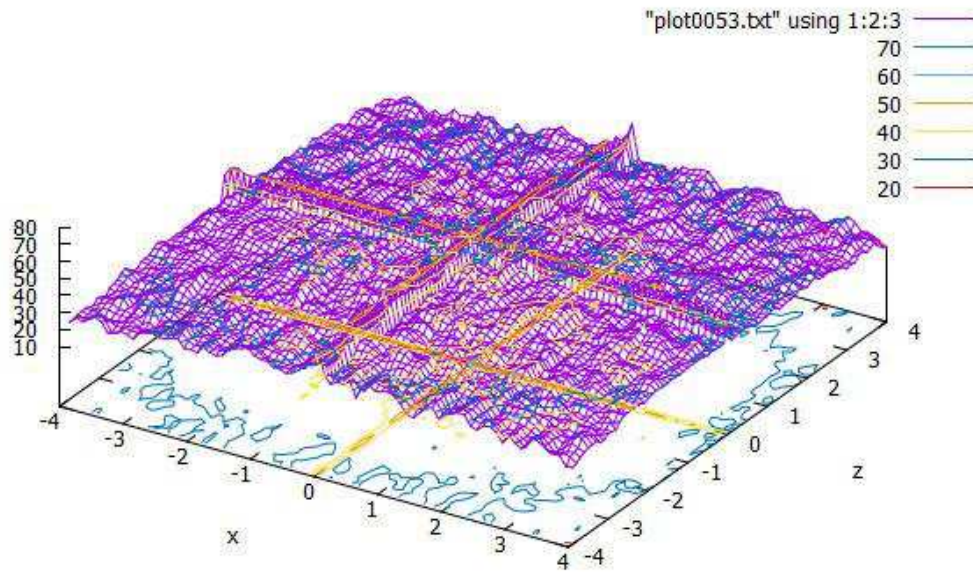
Akustische Holographie - FFT

Amplitude (Filter 500 Hz-2000 Hz)



Akustische Holographie – Filon Methode

Amplitude (Filter 500 Hz-2000 Hz)



2 D BEM

- Greensche Funktion in 2D

- Differentialgleichung zur Bestimmung der Greenschen Funktion 2D

$$\left(\nabla^2 + k^2\right)G = -\delta(\vec{x} - \vec{y}) \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$$

- Greensche Funktion in 2D

$$G = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(kr)$$

2.5 D BEM

- BEM in 2.5D

- 2.5D BEM erfordert einen konstanten Querschnitt des Objektes in Bewegungsrichtung x
- Repräsentation in der Wellenzahl-Frequenz Domäne
- Sequenz an 2D Berechnungen mit einer modifizierten Wellenzahl
 - Wellenzahl wird imaginär für $k_x > k$

$$\hat{k} = \sqrt{k^2 - k_x^2} \quad , \quad k = \frac{\omega}{c} \quad \quad G = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(\hat{k}r)$$

- Inverse Fourier Transformation der Schnellen und Schalldrücke erforderlich

2.5 D BEM

- BEM in 2.5D mit bewegter Quelle

$$f(x, t) = A \delta(x - vt) e^{j\Omega t}$$

$$\hat{f}(k_x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{-jk_x x} dx e^{-j\omega t} dt = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - vt) e^{-jk_x x} dx e^{-j(\omega - \Omega)t} dt$$

$$\hat{f}(k_x, \omega) = A \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_x vt} e^{-j(\omega - \Omega)t} dt = A \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega - \Omega + k_x v)t} dt = A \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\zeta t} dt = 2\pi A \delta(\zeta)$$

$$\zeta = \omega - \Omega + k_x v$$

$$\hat{f}(k_x, \omega) = 2\pi A \delta(\omega - \Omega + k_x v)$$

- Fester Beobachter hört Ton mit modifizierter Frequenz $\omega = \Omega - k_x v$

$$G = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(\hat{k}r)$$

$$\hat{k} = \sqrt{k^2 - k_x^2}$$

$$k = \frac{\Omega - k_x v}{c}$$

$$k = \frac{\Omega}{c} - k_x M$$

$$M = \frac{v}{c}$$

2.5 D BEM

- BEM in 2.5D mit bewegter Quelle

$$G = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(\hat{\mathbf{k}}r) \quad \hat{\mathbf{k}} = \sqrt{k^2 - k_x^2} \quad , \quad k = \frac{\omega}{c}$$

- Frequenzänderung in Folge der Bewegung

$$\omega = \Omega - k_x v$$

- Inverse Fourier Transformation über k_x für jedes Ω mit
 - interpoliertem $\omega = \Omega - k_x v$

2.5 D BEM

- Simulation der Zugvorbeifahrt
 - Annahme eines konstanten Querschnitts über die Zuglänge
 - Die Oberfläche des Schotterbettes und der Boden sind im Modell berücksichtigt
- Vorteil der 2.5D BEM
 - Reflexionen werden in der Simulation berücksichtigt

2.5 D BEM

- Simulation mit BEM
 - Postprozess: Für jedes Element (jede Unbekannte) auf der Oberfläche des Objektes wird der Schalldruck an den Mikrofonpositionen bestimmt.
 - Das Reziprozitäts-Theorem (Theorem von Maxwell Betti) besagt, dass man invers rechnen kann.
 - Es werden die Quellen an den Mikrofonpositionen angesetzt und die Schallschnellen auf der Oberfläche bestimmt.
 - Deutlich geringerer Aufwand, da nur 8 virtuelle Quellen im Wellenzahlraum vorhanden sind.
 - Kein Postprozess erforderlich
 - Ergebnis: Transfermatrix von den Oberflächenschnellen zu den Mikrophonschalldrücken.

Regularisierung

- Inverse der Transfermatrix
 - Das Gleichungssystem besitzt viel mehr Unbekannte als Gleichungen (8) vorhanden sind
 - Es handelt sich um ein (inverses) schlecht gestelltes Problem
 - Regularisierung ist erforderlich
 - Tikhonov Regularisierung mit L-Kurven Methode

Regularisierung

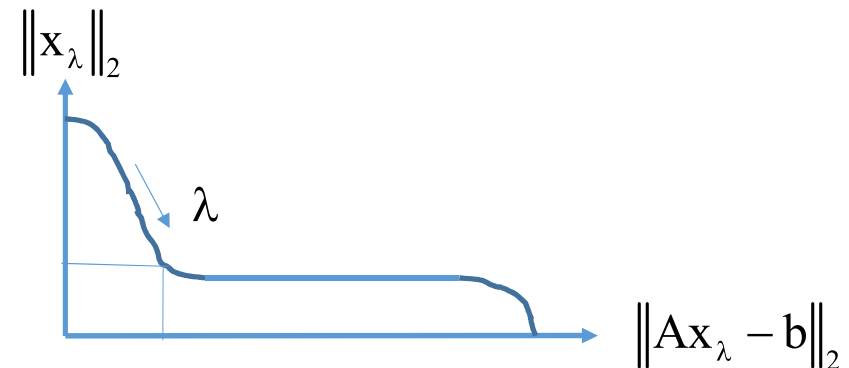
- Tikhonov Regularisierung
 - Singulärwertzerlegung SVD
 - Hinzufügen eines Parameters λ auf allen Singulärwerten.
 - L-Kurven Methode zur Bestimmung von Lambda λ
 - Parameter hebt kleine Werte an
 - Die Invertierung vergrößert die kleinen Werte nicht mehr so stark.

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

$$\text{SVD: } \mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H, \quad \Sigma_{ii} = \sigma_i$$

$$\text{Regularisierung: } \mathbf{D}_{ii} = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2}$$

$$\text{Invertierung: } \mathbf{x}_\lambda = \mathbf{VDU}^H \mathbf{b}$$



Zusammenfassung

- Beam Forming ist die robusteste Methode zur Quelllokalisierung
 - Unterscheidet nicht zwischen Nah- und Fernfeldkomponenten
 - Kann Reflexionen nicht erfassen
 - Kann nur den Quelltyp detektieren der angenommen wurde (Monopol)
- Akustische Holographie
 - Kann die Quellverteilung erfassen
 - Kann Nah- und Fernfeldkomponenten erfassen
- Inverse BEM
 - Kann Reflexionen erfassen
 - Kann die Schnelleverteilung am Objekt bestimmen

Danksagung

- Das DACH Projekt “LION” wird unterstützt vom FWF in Österreich
Projekt Nummer I 4299-N32

Danke für Ihre Aufmerksamkeit