

# Zur Physik bildgebender Rekonstruktion akustischer Bilder und Filme im Zeitbereich

Gerd Heinz

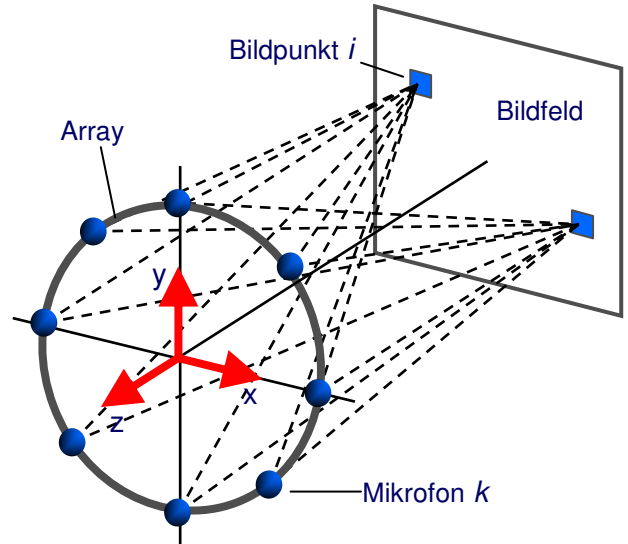
Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik (GfAI) Berlin, heinz@gfai.de

## Einleitung

Eine Analyse von Interferenzsystemen [H93] führte zum bislang bestgehüteten Geheimnis der Akustischen Photo- und Kinematographie [H05] seit 1993 [H94]: zur *Interferenzrekonstruktion* (auch *Maskenalgorithmus*), welche hier erstmals vorgestellt werden soll.

Neben dem *Otto-von-Guericke-Preis 2001* und dem *Berlin-Brandenburgischen Innovationspreis 2003* erhielt die Entwicklung der Akustischen Kamera [AK1] eine Nominierung für den *Deutschen Zukunftspreis 2005*.

Zwischen 1994 und 1996 entstanden damit erste akustische Standbilder und Filme. Die Begriffsprägungen ‚akustische Kamera‘ und ‚akustische Photo- und Kinematographie‘ gehen auf diese Entwicklung zurück. Weltweit finden inzwischen akustische Kameras flächendeckend in der KFZ-Industrie Anwendung.



**Abbildung 1:** Jeder Bildpunkt  $i$  besitzt verschiedene Verzögerungen zu verschiedenen Mikrofonpositionen. Diese charakterisieren die Delay-Maske  $M_i$  des Ortes  $i$

## Signalverzögerung

Zwischen einer Schallquelle  $i$  und einem Mikrofon  $k$  werden Schallwellen verzögert. Im Falle der akustischen Kamera (Schalldrücke bis 130 dB, Fernfeld) genügt die Annahme eines linearen Zusammenhangs (Geschwindigkeit  $v$ ) zwischen Abstand  $r_{ik}$  und Laufzeit  $\tau_{ik}$ . Bei Annahme eines kartesischen Koordinatensystems kann die Laufzeit hinreichend mit der pythagoreischen Abstandsformel bestimmt werden

$$(1) \tau_{ik} = \frac{r_{ik}}{v} = \frac{1}{v} \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}$$

Anders ausgedrückt, jeder Ort  $i$  im Bildfeld besitzt zu  $n$  Mikrofonen (Index  $k$ ) einen typischen Satz von  $n$  Verzögerungszeiten, die ihn eindeutig kennzeichnen. Wir wollen diese  $n$  Verzögerungszeiten als Verzögerungsvektor (Spalten- oder Zeilenmatrix) oder Maske  $M_i$  des Ortes  $i$  bezeichnen,  $M_i = (\tau_{i1}, \dots, \tau_{in})$ , siehe Abb.1.

Für ein typisches akustisches Bild der Auflösung 200\*140 Pixel sind zum Beispiel 28000 Masken mit Mikrofonanzahl Delays zu bestimmen.

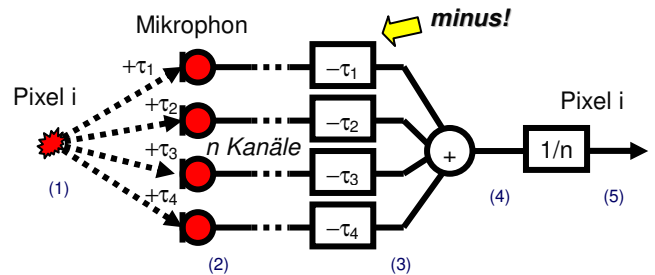
Betrachten wir ein gewöhnliches Verzögerungsglied  $+\tau$ , so verschiebt es das Argument einer Zeitfunktion bei einer Verzögerung um  $+\tau$  zu  $f(t-\tau)$  und visa versa,

$$(2) f(t+\tau) \rightarrow \boxed{+\tau} \rightarrow f(t) \rightarrow \boxed{+\tau} \rightarrow f(t-\tau)$$

An einem Mikrofon  $k$  kommt das Quellsignal einer punktförmigen Schallquelle  $f_{ik}$  folglich als verzögerte Zeitfunktion  $f_{ik}(t-\tau_{ik})$  an.

## Interferenzrekonstruktion

Die zentrale Idee der Interferenzrekonstruktion besteht darin, die  $\tau_{ik}$  durch eine geeignete Kompensation rückgängig zu machen, um die *Zeitfunktion am Quellort* zu approximieren. Delays aller verzögerten Pfade  $f(t-\tau)$  können so Stück für Stück etwa in der Form  $f(t-\tau+\tau) = f(t)$  kompensiert werden.



**Abbildung 2a:** Prinzip der Interferenzrekonstruktion am Beispiel eines Bildpunktes (Pixel  $i$ ). Zur zeitrichtigen Kompensation werden negative Delays  $-\tau$  benötigt.

Stetig wachsende CPU-Geschwindigkeiten machten ab 1993 die Realisierung *negativer Delays*  $-\tau \sim f(t+\tau)$  in Software zunächst auf Parallelrechnern (8-Knoten Transputer T805 sowie 16-Knoten Parsytec PowerXplorer) und ab 1995 unter Windows95 auf Intel i486/ Intel Pentium gangbar.

Eine auf dem Weg von der Quelle (1) zum Mikrofon (2) verzögerte Zeitfunktion wird anschließend per Software rückverzögert (3). Addition aller Kanäle (4) und Division durch die Kanalzahl (5) liefert eine Approximation der ursprünglichen Zeitfunktion (1). Als Formel ausgedrückt erhalten wir die (approximierte) Ergebniszeitfunktion  $p_i(t)$  für jeden Ort (Bildpunkt  $i$ ) als auf die Kanalzahl  $n$  normierte

Summe der um die Laufzeit  $\tau_{ik}$  zurück verschobenen Zeitfunktionen der Mikrophone  $p_k(t)$ .

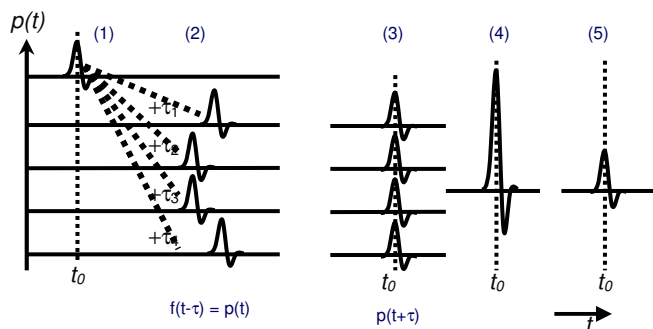


Abbildung 2b: Die Zeitfunktionen zu Abb. 2a)

$$(3) \quad p_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n p_k(t + \tau_{ik}) \quad (\text{Interf.-Rekonstruktion})$$

↑  
**plus!**

Der Effektivwert (akustisches Bild) wird in numerischer Form auf Ebene der Abtastwerte  $t$  gebildet durch

$$(4) \quad e_i(t) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{p_{it}^2}$$

Analytisch könnte man diesen Interferenzintegral nennen

$$(5) \quad e_i(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{p_i^2(t)} d\tau \quad (\text{Interferenzintegral}).$$

Zeigen wir den Effektivwert  $e_i(t)$  farblich, so entsteht je nach Integrationszeit ein Wellenfeld oder ein akustisches Bild. Die approximierte Zeitfunktion jedes Pixels (Glg. 3) lässt sich in *NoiseImage* mit der Maus auf dem Bildfeld abhören. Das kürzeste Interferenzintegral stellt mit der Länge  $T=1$  das Wellenfeld selbst dar.

## Besonderheiten

Formel (3) zeigt ein Pluszeichen (negatives, nichtkausales Delay). Als Vorteil gegenüber Interferenz-Projektionen (*Beamforming in Hardware*) der Form  $f(t-\tau)$  [J94] wird *axialferne Überbestimmtheit und Spiegelung* vermieden.

Vorteil gegenüber *Beamforming in Software* ist die *zeitrichtig auf den Quellort bezogene Approximation*. Damit werden Abhörbilder und akustische Radiergummis möglich.

Heisenberg-Unschärfe sowie Wellenzahl-Überlauf beim Übergang in den Bereich komplexer Zahlen (FFT) entfallen durch eine Lösung ausschließlich im Zeitbereich.

Neben diesem Ansatz sind mir unter vielen Arbeiten nur drei ähnliche Ansätze bekannt: Brühl und Schmitz [B93] sowie Michel [M97] nutzten ebenfalls einen kompensatorischen Ansatz der Form  $f(t+\tau)$ , allerdings im Frequenzbereich. Fink [F96] erreicht ähnliches mit inverser Zeitachse  $f(t,-t)$ .

## Wellenfeld-Eigenschaften

Charakteristikum der Interferenzrekonstruktion ist ein sekundäres Wellenfeld, das bei vorwärtslaufender Zeit entgegengesetzt zu unserem Verständnis von Physik einwärts läuft bei innenliegender Wellenfront, siehe Abb.3.

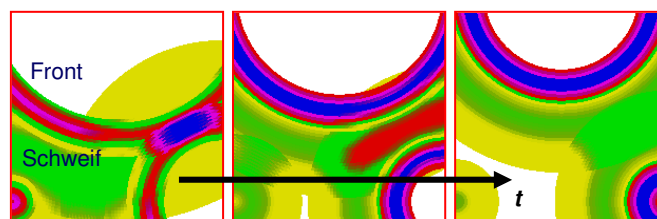


Abbildung 3: Im Gegensatz zum Beamforming zeigt die Interferenzrekonstruktion ein einwärts laufendes Wellenfeld mit innenliegender Wellenfront, (PSI-Tools)

## Sonstiges

Der bis zu dieser Veröffentlichung geheim gehaltene Algorithmus war Basis aller Schallbild-Softwareversionen der GFaI seit 1993: Erste akustische Standbilder entstanden mit *Bio-Interface* (1994-1995), mit *PSI-Tools* (1995-1999) wurden erste Filme möglich, und mit der Software *NoiseImage* gelang es ab 1999 zusätzlich, der Schallkarte automatisch das Bild einer USB- Kamera zu überlagern.

Versuchte Erstveröffentlichungen meines Algorithmus durch [D05] und [J06] erfassen die Grundidee leider falsch.

## Literatur

- [AK1] Presseaufsätze zur Akustischen Kamera siehe <http://www.gfai.de/~heinz/publications/presse/index.htm>
- [B93] Brühl, S., Schmitz, K.-P.: Noise Source Localization on Highspeed Trains using Different Array Types. *Internoise1993*, Leuven, Aug. 24-26, 1993
- [D05] Döbler, D., Heilmann, G.: Perspectives of the Acoustic Camera. *Internoise, Rio2005*, 7.-10.8.2005, Rio de Janeiro, Brasilien
- [M97] Michel, U.: On the Usability of Signal Processing in the Frequency Domain for the Mapping of Moving Sound Sources with Microphone Arrays. *Bericht DLR-IB 92517-97/B3*, 12 S.
- [F96] Fink, M.: Time reversal in acoustics. *Cont. Phys.*, 1996, vol.37, no.2, p.95-109
- [H93] Heinz, G.: Neuronale Interferenzen. Autor gleich Herausgeber. Persönliche Kommunikation, 30 Exempl., 1993, 300 S.
- [H941] Heinz, G.: Relativität elektrischer Impulsausbreitung als Schlüssel zur Informatik biologischer Systeme. 39. *Int. Wiss. Koll. TU Ilmenau* 27.-30.9.1994, Band 2, S. 238-245
- [H94] Heinz, G., u.a.: Verfahren und Prototyp zur Rekonstruktion neuronaler Interferenzräume (NEURO3D). *Jahresbericht der GFaI* 1994, S. 63-72
- [H05] Heinz, G., Krechberger, W., Schumann, G. u.a.: Einsatz einer akustischen Kamera zur NVH-Optimierung von Motor und Triebstrang. 26. *Internationales Wiener Motorensymposium*, 28.-29.4. 2005, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 595, Bd. 2, S. 270-279
- [J94] Johnson, D., Dudgeon, D.: *Array signal processing*. Prentice Hall, 1993, S.113, eqn.4.1
- [J06] Jaekel, O., Schröder, R.: *Beamforming – Zeitbereich versus Frequenzbereich*. DAGA06, Braunschweig, 2006

(Überarbeitete Version mit Ergänzungen und Korrekturen)