

Zur Physik bildgebender Rekonstruktion akustischer Bilder und Filme im Zeitbereich¹

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 *Interferenztransformation* (auch *Maskenalgorithmus*), welche hier erstmalig 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*.

Sowohl die Begriffsprägungen ‚akustische Kamera‘ als auch ‚akustische Photo- und Kinematographie‘ gehen auf diese Entwicklung zurück. Weltweit finden inzwischen akustische Kameras flächendeckend in der KFZ-Industrie Anwendung.

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 τ_{ik} . Bei Annahme eines kartesischen Koordinatensystems kann die Laufzeit hinreichend mit der pythagoräischen Abstandsformel bestimmt werden

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

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,

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

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

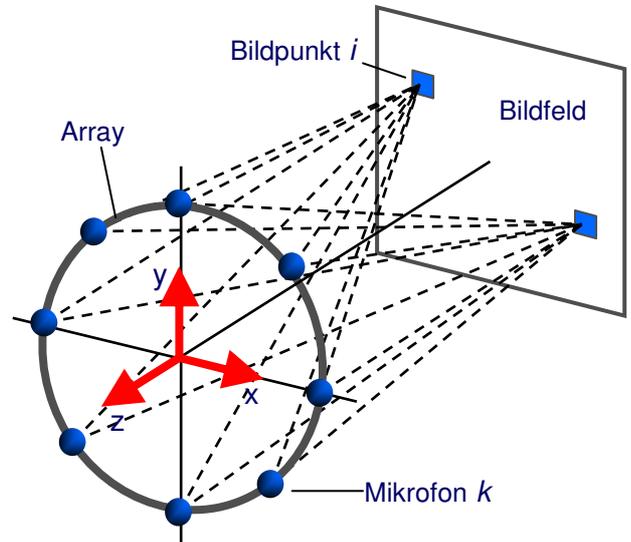


Abbildung 1: Jeder Bildpunkt i besitzt verschiedene Verzögerungen zu verschiedenen Mikrofonpositionen. Diese charakterisieren die Delay-Maske M_i des Ortes i

Interferenztransformation (-rekonstruktion)

Die zentrale Idee der Interferenztransformation besteht darin, diese τ_{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.

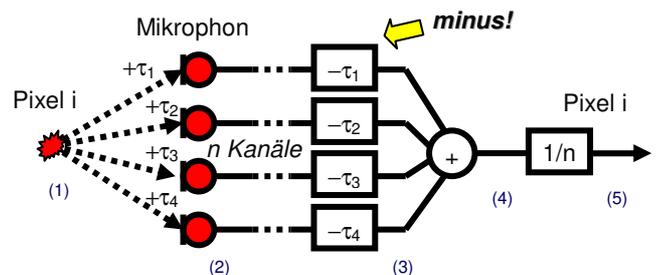


Abbildung 2a: Prinzip der Interferenztransformation am Beispiel eines Bildpunktes (Pixel i). Zur Kompensation werden negative Delays $-\tau$ benötigt.

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).

¹ Vortrag auf der 33. Deutsche Jahrestagung für Akustik, DAGA 2007, Uni Stuttgart, Vortrag 255, Mittwoch, 21.3.2007, 14.50 Uhr, Raum 57.03

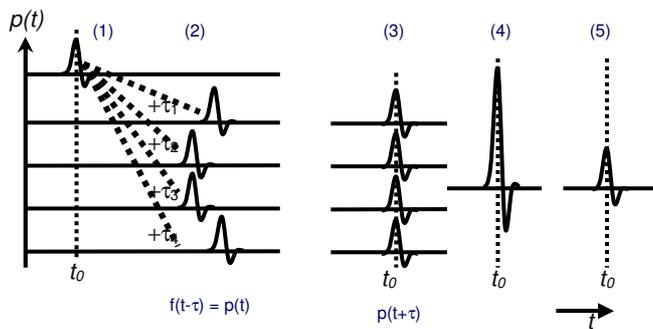


Abbildung 2b: Die Zeitfunktionen zu Abb. 2a)

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 τ_{ik} verschobenen Zeitfunktionen der Mikrophone $p_k(t)$.

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



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

$$(4) \quad e_i(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{j=1}^T p_{ij}^2} \quad (\text{Effektivwert})$$

Analytisch könnte man diesen Interferenzintegral nennen:

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

Zeigen wir den Effektivwert $e_i(t)$ farblich, so entsteht je nach Integrationszeit ein Wellenfeld oder ein akustisches Bild. Die entstehende 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.

Formel (3) zeigt ein Pluszeichen (negatives, nichtkausales Delay). Als Novum gegenüber Beamforming-Ansätzen (Interferenz-Projektionen) der Form $f(t-\tau)$ [J94] wird (axialferne) Überbestimmtheit vermieden. Heisenberg-Unschärfe sowie Wellenzahl-Überlauf beim Übergang in den Bereich komplexer Zahlen (FFT) entfallen.

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

Wellenfeld-Eigenschaften

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

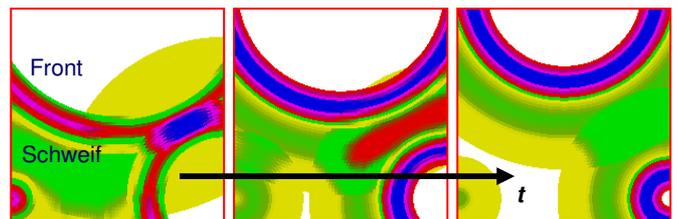


Abbildung 3: Im Gegensatz zum Beamforming $f(t-\tau)$ zeigt die Interferenzrekonstruktion $f(t+\tau)$ ein einwärtslaufendes Wellenfeld mit innenliegender Wellenfront.

Sonstiges

Kurioserweise war der ursprünglicher Zweck der Erfindung ein anderer. 1993 sollte ein Demonstrator gefunden werden, der die Identität von Hören, Fühlen und Sehen aus nervlicher Sicht (Zeitfunktionen) veranschaulichen kann, um gedankliche Irrwege im Neurocomputing zu glätten. Auch war an bio-technische Interaktionen gedacht in Form von Ein- und Ausgabegeräten, die über Kanäle (Fasern) mit dem Nervensystem kommunizieren. Leider aber fand sich kein Sponsor. So hieß die Software für das erste akustische Standbild noch *Bio-Interface* (1994-1995). Danach hieß sie *PSI-Tools*. Schlußendlich wurde die Schallkarte noch automatisch auf das Bild einer USB-Video-Kamera gelegt (Software *NoiseImage*, ab 1999).

Versuchte Erstveröffentlichungen meines Algorithmus durch [D05] und [J06] erfassen die Grundidee nicht vollständig.

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] Jaeckel, O., Schröder, R.: Beamforming – Zeitbereich versus Frequenzbereich. DAGA06, Braunschweig, 2006