

16.4 Akustik-Kamera

Eine Kamera, die Geräusche sichtbar macht.

Beschreibung der
Funktionsweise:

Eine Digitalkamera bildet ein schall-erzeugendes Objekt ab. Zugleich nimmt eine Anordnung von Mikrofonen die Schallwellen auf. Eine eigens entwickelte



Software errechnet daraus eine Schallkarte und verknüpft das akustische und optische Abbild der Schallquelle. Laute Bereiche werden rot, leise Bereiche blau eingefärbt. Die relevanten Quellen für hohe Schallpegel sind jetzt schnell erkennbar. Das ist neu, denn Schallkarten konnten bislang nur bei stationären Geräuschen ohne Foto-Überlagerung erstellt werden.

Unerklärliche Geräusche im Fahrzeuginnenraum?



acoustic
camera

- Einzigartige 3-D-Kartierung von akustischen Emissionen auf ein CAD-Modell
- Akustisch transparente Mikrofon-Arrays für höchste Messgenauigkeit
- Auswertbarer Frequenzbereich von 100 Hz bis 70 kHz
- Zeitliche Auflösung kleiner als 1 ms
- Anwendungsspezifisch konfigurierbares System mit schnellen Aufbauzeiten



www.acoustic-camera.com

gfaitech GmbH, Rudower Chaussee 30, D-12489 Berlin

Akustik Kamera Wirkprinzip



Zwischen einer Schallquelle und einem Mikrofon werden Schallwellen verzögert. Im Falle der akustischen Kamera (Schalldrücke bis 130 dB, Fernfeld) genügt die Annahme eines linearen Zusammenhangs (Geschwindigkeit) zwischen Abstand und Laufzeit. Bei Annahme eines kartesischen Koordinatensystems kann die Laufzeit hinreichend mit der pythagoräischen Abstandsformel bestimmt werden. Anders ausgedrückt, jeder Ort im Bildfeld besitzt zu Mikrofonen einen typischen Satz von Verzögerungszeiten, die ihn eindeutig kennzeichnen.

16.4.1 Bildgebende Analyseverfahren der Akustik

gfai Anfang (siehe Autorenverzeichnis)

Akustisches Beamforming

In den letzten Jahren haben Mikrofonarraysysteme zur Lokalisierung von Schallquellen vermehrt in den industriellen Anwendungen Einzug gehalten. Eine der ersten praxistauglichen mobilen Entwicklungen dieser Art ist die Akustische Kamera der GFaI⁴ bzw. gfai tech GmbH⁵ aus Berlin. Anwendungsgebiete sind in der Technik vorrangig die akustische Fehlerdetektion und die Nutzung während der Produktentwicklung. Dabei ist das bisher abgedeckte Einsatzspektrum außerordentlich vielfältig und reicht von der kleinen elektrischen Zahnbürste über Messungen an Werkzeugen und Haushaltsgeräten, an Kraft- und Schienenfahrzeugen, Motoren, Maschinen und Aggregaten bis hin zu großen Windkraft- und Industrieanlagen.

Das hier vorgestellte System ist portabel ausgelegt und besteht aus dem Mikrofonarray, einem hochkanaligen Datenrekorder zur zeitsynchronen Aufzeichnung und Zwischenspeicherung aller Messdaten sowie einem Rechner mit Auswertesoftware (Abbildung 117). Wahlweise sind für verschiedene

Objektgrößen, Messabstände und Frequenzbereiche unterschiedlich große Mikrofonarrays verwendbar, welche über einen einheitlichen Bus mit nur wenigen Steckern (24 Kanäle je Stecker) kontaktiert werden können.



Abbildung 117: Messung mit der Akustischen Kamera

Mit dem im Zeitbereich arbeitenden GFaI-System können akustische Fotos und Filme der interessierenden Objekte relativ einfach und schnell erstellt werden. Diese Bilder geben Auskunft über die örtliche Lage der Hauptschallquellen am Objekt. Die graphische Darstellung erfolgt, ähnlich einem Wärmebild, als Überlagerung des kantenextrahierten optischen Bildes mit der berechneten Farbdarstellung der Schalldruckverteilung. In der aktuellen Version der Auswertesoftware („NoiseImage 3“) sind nun auch dreidimensionale Kartierungen möglich. Hier erfolgt die Überlagerung des farbigen Schalldruckbildes nicht mehr mit einem zweidimensionalen Photo, sondern mit einem vom Anwender gelieferten 3D-Modell des Objektes. Diese Auswertungsmöglichkeit ist vor allem für Untersuchungen von Objekten auf Shakern von Interesse.

Die zeitliche Abtastrate des GFaI-Systems ist mit 192 kHz je Kanal sehr hoch und erlaubt genaue Kartierungen über den gesamten interessierenden Audiofrequenzbereich, wobei die untere Grenzfrequenz durch den maximalen Mikrofonabstand

⁴ GFaI – Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V.

⁵ gfai tech GmbH – Herstellung und Vertrieb der in der GFaI entwickelten Akustischen Kamera

im Array begrenzt ist. Mit dem System sind neben akustischen Kartierungen stationärer Quellen erstmalig auch transiente Ereignisse und instationäre Signalverläufe in zeitlich sehr hochaufgelösten (theoretisch bis zur Abtastfrequenz, praktisch bis etwa 50000 Bildern je Sekunde) akustischen Filmen (Movies) visuell anschaulich darstellbar. Die Kanaldaten aller Mikrofone stehen nach der Messung weiterhin in voller zeitlicher Auflösung zur Verfügung und können in interaktiven Auswertungen für übliche akustische Berechnungen verwendet werden, dazu gehören z.B. verschiedene Norm-Filterungen und spektrale Analysen, wobei letztere auch ortsselektiv möglich sind. Auf diese Weise kann der Anwender sich sehr schnell einen Überblick über die zeitlichen, örtlichen und spektralen Verteilungen der Hauptschallquellen seines Messobjekts verschaffen.

Funktionsprinzipien der Akustischen Kamera

Die Funktion der Akustischen Kamera beruht auf der Auswertung der relativen Laufzeiten von den Punkten einer Bildebene bzw. der 3D-Objektoberfläche zu den einzelnen Mikrofonen des Arrays. Die Rekonstruktion der Zeitfunktion für einen Ort

$\mathbf{x} = (x', y', z')^T$ in der Bildebene wird dabei nach folgender Beziehung vorgenommen:

$$\hat{f}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i(t - \Delta_i) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet t die Zeit, M ist die Anzahl der Mikrofone im Array, die f_i sind die aufgezeichneten Zeitfunktionen der einzelnen Mikrofone an den Positionen \mathbf{x}_i , und die f_i sind die entsprechenden relativen Zeitverzögerungen (also Laufzeitdifferenzen), welche aus den absoluten Laufzeiten τ_i gemäß $\Delta_i = \tau_i - \min(\tau_j)$ berechnet werden. Die absoluten Laufzeiten τ_i ergeben sich trivial aus der Beziehung $\tau_i = |\mathbf{r}_i|/c$, wobei c die Schallgeschwindigkeit in Luft ($c \approx 344$ m/s bei 20°C) ist und $|\mathbf{r}_i| = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}|$ den geometrischen Abstand von Mikrophon Nummer i zum gerade berechneten Quellort \mathbf{x} in der Bildebene

bezeichnet. Die einzelnen Mikrophon-Zeitfunktionen π_i werden also erst laufzeitkorrigiert und dann zeitkohärent aufaddiert. Das so verstärkte Signal wird danach wieder auf die Anzahl M der Sensoren normiert, um ein Ergebnis zu erhalten, welches vom energetischen Gehalt dem der Zeitfunktion eines einzelnen Mikrofons entspricht (Abbildung 118).

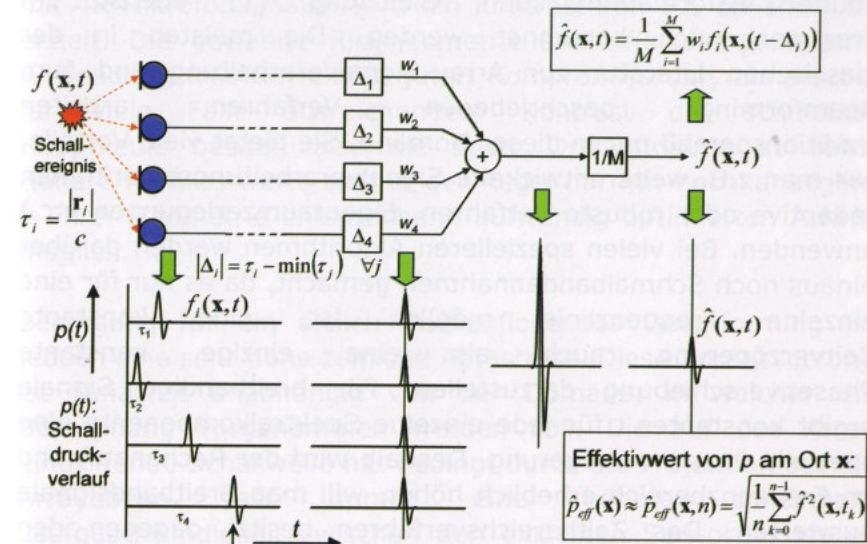


Abbildung 118: Funktionsprinzip der Akustischen Kamera

Die Gleichung (1) ist (mit zusätzlichen Wichtungen w_i der f_i) in der Literatur [1] unter der Bezeichnung „Time Domain Delay-and-Sum-Beamforming“ bekannt. Aus der so rekonstruierten Zeitfunktion $y = \hat{f}(\mathbf{x}, t)$ wird nun die Schätzung des Effektivwertes des Schalldruckes am Ort \mathbf{x} über eine endliche Anzahl von n zeitdiskreten Abtastzeitpunkten t_k berechnet:

$$\hat{p}_{\text{eff}}(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \hat{f}^2(\mathbf{x}, t_k)} \quad (2)$$

Die einzelnen Effektivwerte aller Orte \mathbf{x} nach (2) werden abschließend entsprechend einer vorgegebenen Skala

farbkodiert und wie oben beschrieben als akustische Karte am Bildschirm dargestellt. Dieses Prinzip lässt sich unverändert auch auf nicht planare Arrays anwenden.

Auswertung im Zeit- und Frequenzbereich

Unter Nutzung des Verschiebungssatzes der Fouriertransformation kann Gleichung (1) ebenso im Frequenzbereich berechnet werden. Die meisten in der klassischen Literatur zur Array-Signalverarbeitung und zum Beamforming beschriebenen Verfahren arbeiten traditionsgemäß nur in dieser Domäne. Sie bietet viele Vorteile, will man z.B. weiterentwickelte Signalverarbeitungsalgorithmen (adaptive oder robuste Verfahren, Eigenraumzerlegungen etc.) anwenden. Bei vielen spezielleren Algorithmen werden darüber hinaus noch Schmalbandannahmen gemacht, da es nur für eine einzelne Frequenzlinie möglich ist, eine konstante Zeitverzögerung auch als eine einzige konstante Phasenverschiebung darzustellen. Für breitbandige Signale ergibt konstantes t für jede einzelne Spektralkomponente eine spezielle Phasenverzögerung. Deshalb wird der Rechenaufwand im Frequenzbereich erheblich höher, will man Breitbandsignale auswerten. Das Zeitbereichsverfahren besitzt dagegen den Vorteil, dass es explizit bereits ein Breitbandverfahren ist, da immer alle Frequenzkomponenten im Signal enthalten sind. Hinzu kommt, dass es besondere Vorteile besitzt, wenn die Signale stark impulshaltig und transient sind. Beim Übergang in den Frequenzbereich geht im Prinzip die Zeitinformation verloren, was über Kurzzeit-FFT nur beschränkt ausgeglichen werden kann, da immer eine zeitliche Mittelung erfolgt.

Diese Vorteile werden ergänzt durch weniger örtliche Aliasing-Probleme als bei Schmalbandbetrachtungen. Unter Aliasing versteht man das Auftreten von signalfrequenzabhängigen Nebenmaxima (auch als Nebenkeulen oder „Sidelobes“ bezeichnet) um den Ort der eigentlichen Quelle. Die genaue Ausprägung dieser Aliasing-Muster ist dabei eine komplizierte Funktion, welche vorrangig von der Arraygröße und geometrie

sowie der Kanalzahl abhängig ist. Eine wichtige Kenngröße ist hier der so genannte Arraykontrast, welcher die Differenz zwischen der Hauptkeule des Arraymusters und dem Maximum der ersten Nebenkeule angibt. Für ein rein hypothetisches Ringarray mit unendlich vielen Mikrofonen liegt diese Kontrastgrenze theoretisch bei $-7,9$ dB, siehe hierzu auch [2]. Mit dem von der GFaI standardmäßig eingesetzten Ringarray mit 48 Mikrofonkanälen wird ein Kontrast von 6,5 dB bis 7 dB erzielt. Die gewählte Ringgeometrie stellt für die praktische Anwendung insofern einen guten Kompromiss dar, als sie bei für viele Fälle ausreichendem Kontrast die schmalste Hauptkeule besitzt, also die beste Ortsauflösung aufweist. Höhere Kontrastwerte sind in der Regel nur mit hochkanaligen, in ihrer Geometrie entsprechend aufwendig optimierten Arrays möglich.

Bedingung für ein örtlich hochauflösendes Beamforming ist jedoch eine sehr hohe zeitliche Abtastrate. Diese Voraussetzung ist zunächst unabhängig von der Domäne, in welcher die Berechnung vorgenommen werden soll. Die auf das Array eintreffende Schallwelle hat bedingt durch die Projektion auf die Arrayebene fast immer eine höhere scheinbare Laufgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Sensoren, als es ihrer tatsächlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit entspricht. Somit müssen extrem kurze absolute Laufzeitdifferenzen detektierbar sein, um die durch die Diskretisierung bedingten relativen Laufzeit- bzw. Phasenfehler klein zu halten. Nimmt man die Abtastung der einzelnen Mikrofonkanäle hier nur mit der für das Quellsignal nach Nyquist unbedingt nötigen Rate vor, würde das zu sehr schlechten Winkel- bzw. Ortsauflösungen und sehr stark frequenz- und winkelabhängigen, instabil schwankenden und analytisch nicht eindeutig bestimmbar Aliasingmustern und damit zu erheblich verschlechtertem Signal-Störabstand in den akustischen Bildern führen. Die diskrete Zeitauflösung der Einzelkanäle muss bei Rechnung im Zeitbereich für eine möglichst gute Ortung wesentlich (ca. Faktor 10) höher sein als die oberste im Signal zu kartierende Grenzfrequenz.