

sensor *report*

Organ des AMA Fachverband für Sensorik e.V.

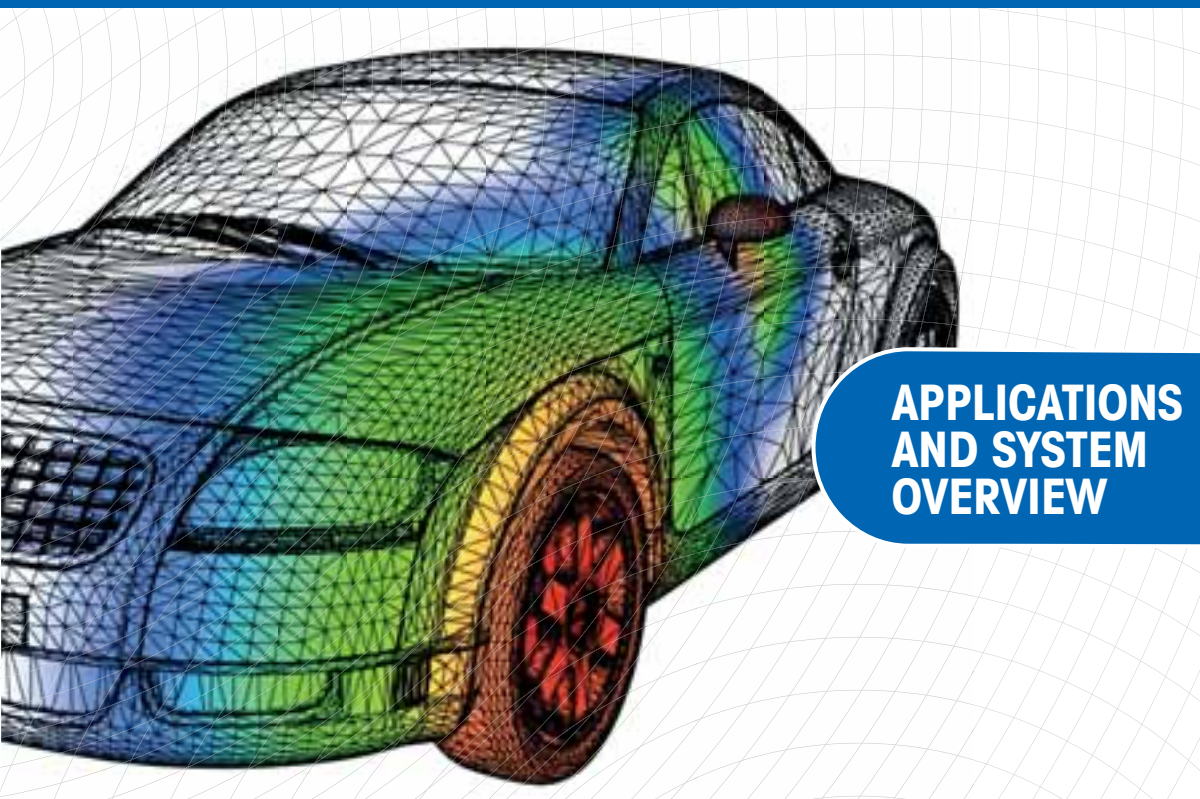
Sensorik

Messtechnik

Bildverarbeitung

Fabrikautomation

1-3/2007 Mai www.sensorreport.de



APPLICATIONS AND SYSTEM OVERVIEW

AKKUSTISCHE KAMERA



- Teil 1:
Bildgebende Analysemethoden in der Akustik- Stärken und Grenzen des akustischen Beamformings
- Teil 2:
Einsatz in der Praxis
- Part 3:
Application in practice

LISTENING WITH YOUR EYES

acoustic
camera

An intelligent
solution to locate
sources of noise

■ Sonderdruck aus
sensor report 1-3/2007

Die Akustische Kamera

Teil 1: Bildgebende Analysemethoden in der Akustik – Stärken und Grenzen des akustischen Beamformings

In den letzten Jahren haben Mikrofonarraysysteme zur Lokalisierung von Schallquellen vermehrt in industriellen Anwendungen Einzug gehalten. Eine der ersten praxistauglichen mobilen Entwicklungen dieser Art ist die Akustische Kamera der GFaI¹ aus Berlin. Anwendungsgebiete sind in der Technik vorrangig die akustische Fehlerdetektion und die Nutzung während der Produktentwicklung, aber auch das Gewinnen umweltbezogener Aussagen anhand von Messungen lärmemittierender Objekte aller Art. 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 (Bild 1) und besteht aus dem Mikrofonarray, einem hochkanaligen Datenrekorder zur zeitsynchronen Aufzeichnung und Zwischenspeicherung aller Messdaten sowie einem Rechner mit Auswertesoftware («NoiseImage»). 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.

Mit dem 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 Schall-

druckverteilung. 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 (Bild 2).

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 im Array begrenzt ist. Mit dem System sind neben akustischen Kartierungen stationärer Quellen erstmalig auch transiente Ereignisse und instationäre Signalverläufe in zeitlich sehr hoch aufgelösten (theoretisch bis zur Abtastfrequenz, praktisch bis zu etwa 50.000 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 Mikro-

¹GFaI – Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V.



Bild 1: Typische Szene für eine Messung mit der Akustischen Kamera unter Verwendung eines ringförmigen Mikrofonarrays

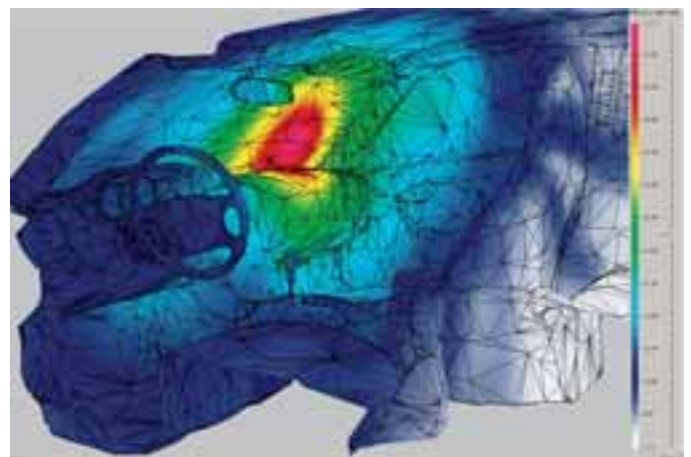


Bild 2: Akustisches Foto am Beispiel einer 3D-Innenraumkartierung

fonen des Arrays. Die Rekonstruktion der Zeitfunktion für einen Ort $\mathbf{x} = (x', y', z')$ in der Bildebene wird dabei nach folgender Beziehung vorgenommen:

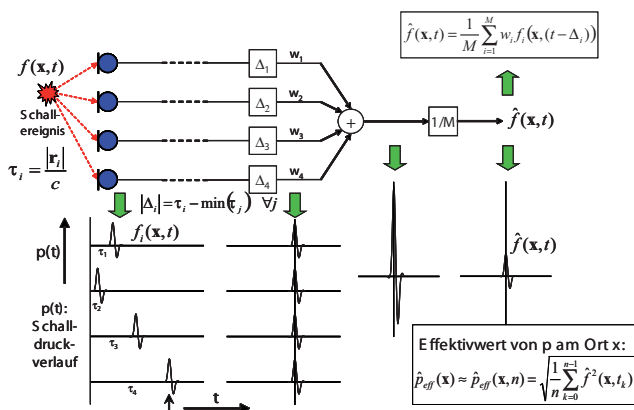
$$\hat{f}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i(t - \Delta_i) \quad (1)$$

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 Δ_i sind die entsprechenden relativen Zeitverzögerungen (also Laufzeitdifferenzen), welche aus den absoluten Laufzeiten τ_i gemäß $\Delta_i = \tau_i - \min(\tau_i)$ 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 Mikrofon Nummer i zum gerade berechneten Quellort \mathbf{x} in der Bildebene bezeichnet. Die einzelnen Mikrofon-Zeitfunktionen f_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 (Bild 3).

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 nichtplanare Arrays anwenden.



AUSWERTUNG IM ZEIT- UND FREQUENZBEREICH.

Unter Nutzung des Verschiebungssatzes der Fourier-Transformation 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. Die Mikrofonsignale sind im Frequenzbereich nur noch über einfache komplexe Multiplikationen und nicht mehr über Faltungen wie im Zeitbereich mit der Ortsinformation verknüpft. 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 Δt für jede einzelne Spektralkomponente eine spezielle Phasenverzögerung. Deshalb wird der Rechenaufwand im Frequenzbereich erheblich höher, will man Breitbandsignale auswerten. Der Aufwand wächst außerdem im Zeitbereich nur linear mit der Mikrofonzahl, im Frequenzbereich dagegen quadratisch, bedingt durch die Verwendung komplexer Kreuzspektralmatrizen. Beide Effekte zusammen geben der direkten Implementierung im Zeitbereich einen erheblichen Effizienzvorteil, welcher bei der Akustischen Kamera der GfA gerade bei hochkanaligen Messungen deutlich zum Tragen kommt. Das Zeitbereichsverfahren besitzt außerdem den Vorteil, dass es explizit bereits ein Breitbandverfahren ist, da immer alle Frequenzkomponenten im Signal enthalten sind. Vorheriges Herausfiltern störender, vorrangig tiefer Frequenzen und nachträgliches Beamforming im Zeitbereich sind einfach und ohne Veränderung des Rechenalgorithmus realisierbar. 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 sogenannte 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]. Das bisher an der GfA standardmäßig eingesetzte Ringarray mit 32 Kanälen erreicht diese Grenze nicht, hier tritt praktisch bereits ab $5,5$ dB bis 6 dB Aliasing auf. Beim künftig eingesetzten neuen Standardring mit 48 Mikrofonkanälen wird sich dieser Kontrast-Wert auf etwa $6,5$ dB bis 7 dB steigern lassen. 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. Da die Schallquelle selbst in den meisten Fällen ortsfest ist (ihre Lage ist nicht abhängig von der Fre-

quenz), die Aliasing-Muster aber ihre Lage im Bildfeld frequenzabhängig verschieben, mitteln sich die Aliasing-Figuren breitbandiger Signale annähernd aus. Lediglich bei den tiefen Frequenzen ist damit eine Verschlechterung des Bildkontrastes verbunden. Grundsätzlich empfiehlt es sich deshalb, die für die gegebene Arraygröße zu tief liegenden Störfrequenzen vor der Berechnung der akustischen Karten herauszufiltern. Die Rechnung im Zeitbereich besitzt immer dann besondere Vorteile, wenn die Signale stark impulshaltig und transient sind. Transiente Signale lassen sich zwar grundsätzlich einfach lokalisieren, im Frequenzbereich wird hier jedoch aus einem einfachen Problem ein unnötig kompliziertes gemacht. Zunächst müssen willkürlich Zeitabschnitte und Überlappungsbereiche für die Kurzzeit-Fourier-Transformationen festgelegt werden, welche die erreichbare Zeitauflösung begrenzen. Die Signale sind mit entsprechenden Fensterfunktionen zu wichten, was ihren tatsächlichen Energiegehalt verringert, und anschließend in den Frequenzbereich zu transformieren. Kreuzspektralmatrizen müssen aus den Daten geschätzt werden. Da diese Schätzung aber insbesondere bei kurzem Zeitintervall nicht konsistent ist, ist eine Mittelung über mehrere Zeitabschnitte erforderlich, was wiederum die Detailinformation in den Pegeln sowie die erreichbare Zeitauflösung noch weiter reduziert und gewisse Stationaritätsannahmen voraussetzt, welche aber gerade bei den gesuchten Transienten meist nicht gegeben sind. Die spektrale Breitbandigkeit erfordert das aufwendige Analysieren sehr vieler Spektrallinien bzw. die Zusammenfassung der Daten mehrerer Frequenzbänder. In Verbindung mit niedrigen Abtastraten führen diese Frequenzbereichsverfahren für transiente Signale oft nicht zum gewünschten Ergebnis. Auch sind die Emissionen vieler technischer Geräte und Anlagen überwiegend breitbandig und eher selten nur aus ganz wenigen tonalen Komponenten zusammengesetzt, so dass ein reines Zeitbereichsverfahren zur Schallquellenlokalisierung auch hier sehr vorteilhaft einsetzbar ist.

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 Ortszuordnung wesentlich (ca. Faktor 10) höher sein als die oberste im Signal zu kartierende Grenzfrequenz.

ANWENDUNGSBEISPIELE. Die Möglichkeit der Analyse sehr kurzer Impulse im Zeitbereich eröffnet neue, z.T. exotisch erscheinende Anwendungsfelder für die Technik der Akustischen Kamera. So zeigt Bild 4 das Spektrogramm eines Mikrofonkanals einer Aufnahme einer ägyptischen Grabfledermaus.

Erkennbar sind extrem breitbandige und hochfrequente Emissionen in verschiedenen Teilbändern, welche dem Tier offenbar zu unterschiedlichen Erkennungs- und Klassifikationszwecken dienen. Die Chirps besitzen eine Zeitdauer von nur etwa 5 bis 10 ms. Die akustische Kartierung im Zeitbereich (über alle enthaltenen Frequenzen) zeigt eine sehr präzise Ortung der Schallquelle (Bild 5 Mitte). Die Aufnahme des Tieres (Bild 5 links) erfolgte in einem Innenraum aus einem Meter Entfernung mit dem klassischen Standard-Ringarray (s. Bild 1, 32 Mikrofone und 72,5 cm Durchmesser) bei einer Abtastrate von 192 kHz. Wertet man nur das untere Frequenzband um 15 kHz aus, tritt verstärktes Aliasing auf (Bild 5 rechts). Ein ähnliches Ergebnis würde man auch bei geringerer Systemabtastrate (48 kHz) erhalten. Eine Auswertung dieser niederfrequenten Chirp-Pulse mit Beamforming im Frequenzbereich wäre aber mit einer FFT-Länge von 512 ebenfalls noch möglich.

Die Möglichkeiten der enormen zeitlichen Auflösung, die mit der Auswertung im Zeitbereich verbunden sind, verdeutlicht ein Beispiel aus dem Technikbereich. Dabei wurde ein Feld von Zündkerzen (Bild 6), mit dem die Möglichkeiten der zeitgenauen Zündung demonstriert werden können, mit der Akustischen Kamera (Konfiguration wie im ersten Beispiel) aufgenommen.

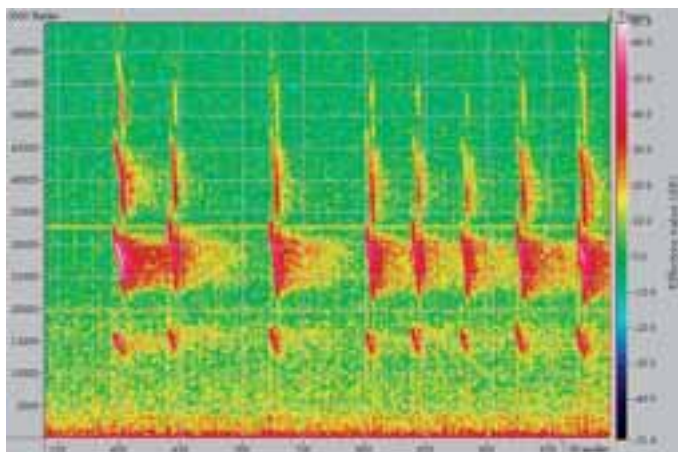


Bild 4: Spektrogramm der Chirpsignale einer ägyptischen Grabfledermaus. Auffällig sind die Emissionen in mehreren getrennten Frequenzbändern.

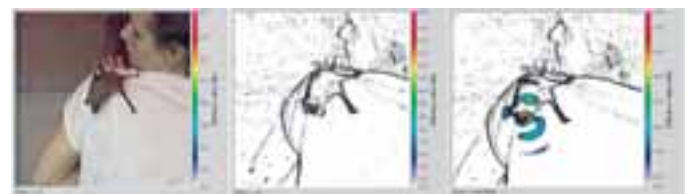


Bild 5: Akustische Bilder einer ägyptischen Grabfledermaus (links), Auswertung über alle Frequenzen (Mitte) und gefiltert von 14 kHz bis 18 kHz (rechts). Die Schmalbandauswertung zeigt deutlich stärkeres Aliasing bei gleichem Bildkontrast von jeweils 7dB.



Bild 6: Zündkerzenfeld mit Ansteuerung jeder einzelnen Zündkerze

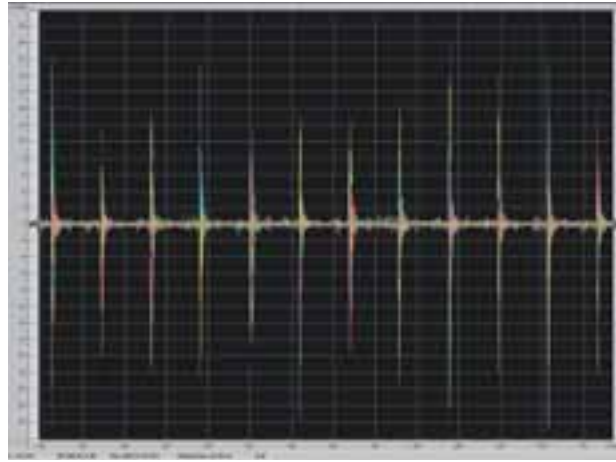


Bild 7: Daten der 32 Mikrofone (Ausschnitt über 12 Zündungen)

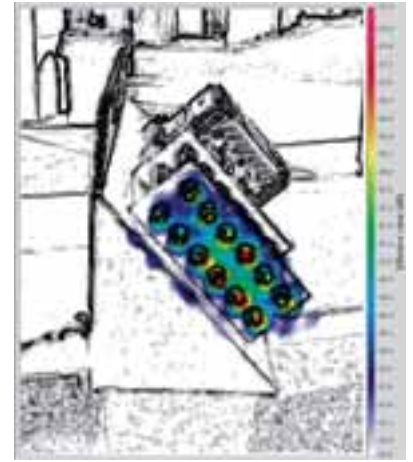


Bild 8: Akustisches Foto über den im Bild 7 markierten Bereich

Bild 7 zeigt einen Ausschnitt aus den aufgezeichneten 32 Mikrofonkanälen (genau 12 Zündungen, je Zündkerze eine Zündung). Markiert ist ein Zeitbereich über 68,8 ms, für den ein Akustisches Foto (Bild 8) errechnet wurde.

Für einen besseren Bildkontrast wurde das akustische Foto auf ein per Kantenextraktion bearbeitetes Bild der Messszene projiziert. Sehr schön sind alle zwölf Emissionen bei einem Kontrast von 5 dB zu erkennen. Selbst eine Reflexion an einer Montagekante wird deutlich.

Im Bild 9 wird das Signal gezeigt, dass von einem Mikrofon für eine Zündung aufgezeichnet wurde. Die Ursprungsanregung (der markierte Bereich) ist nur 0,18 ms lang. Durch Laufzeitunterschiede wird dieser Bereich auf 0,31 ms (bei der Berücksichtigung aller Mikrofone) verlängert.

Das Akustische Foto einer einzelnen Zündung zeigt Bild 10 (berechnet über 0,31 ms). Bei einem Kontrast von 5 dB tritt noch kein Aliasing auf. Dieses Beispiel zeigt eindrucksvoll die Stärken der Akustischen Kamera bei der Ortung transienter akustischer Ereignisse.

Weitere Beispiele für die Funktionalität und den technischen Einsatz der Akustischen Kamera sollen in einem Folgebeitrag im Sensor Report 2/2007 vorgestellt werden.

✂ Dr.-Ing. Olaf Jaeckel und Dr. Ralf Schröder ✂ LO71121

www.gfai.de

AUTOREN. Dr. Ralf Schröder ist promovierter Physiker. Er arbeitet seit 2003 in der GFaI und ist seit Anfang 2005 Leiter des Bereiches Signalverarbeitung, in dem die Akustische Kamera seit den 90-er Jahren entwickelt wurde.

Dr.-Ing. Olaf Jaeckel ist seit 1999 an der GFaI und seit 2003 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Signalverarbeitung tätig. Er ist vorrangig für die Betreuung verschiedener Forschungsprojekte zur Akustischen Kamera verantwortlich.

LITERATUR.

- [1] Johnson, D.H.; Dudgeon, D.E.:
Array Signal Processing. Concepts and Techniques.
PTR Prentice Hall 1993.
- [2] Van Trees, H.L.:
Optimum Array Processing.
J. Wiley & Sons 2002.

FORTSETZUNG (TEIL 2). In sensor report 2/2007. Sichern sie sich ihr persönliches Exemplar: leser-service@sensorreport.de

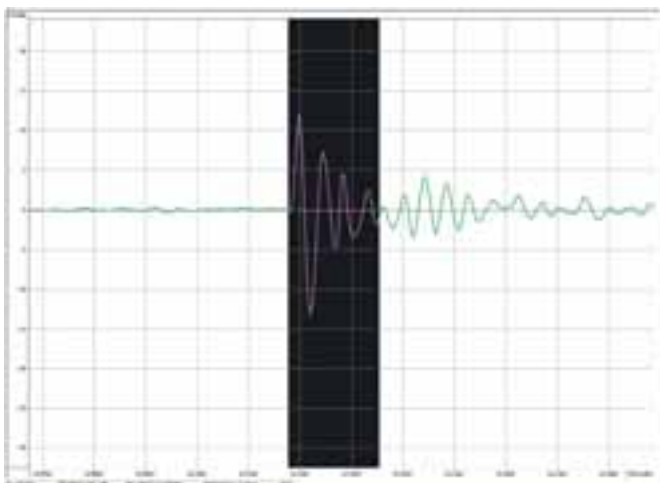


Bild 9: Signal eines Mikrofans (Zündung genau einer Kerze)

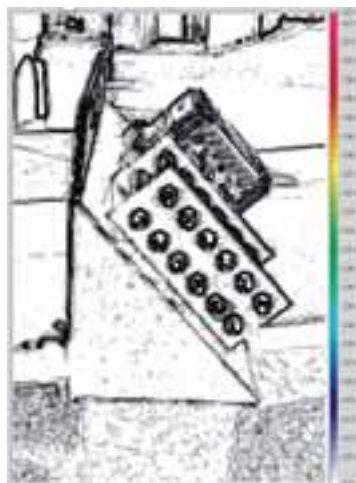


Bild 10 Akustisches Foto einer Zündung

Die Akustische Kamera

Teil 2: Einsatz in der Praxis

Im ersten Teil (Sensor Report 1/2007) wurden die Grundlagen der Ortung von Schallquellen mit Hilfe des Beamformings im Zeitbereich, wie es in der Akustischen Kamera der GFaI¹ eingesetzt wird, dargelegt. Der zweite Teil widmet sich dem Praxiseinsatz an Hand von Beispielen. Diese Beispiele können naturgemäß nur einen sehr unvollkommenen Überblick über die Einsatzvielfalt und den Funktionsumfang der Akustischen Kamera liefern. Sie veranschaulichen aber die enorme Breite der untersuchbaren Objekte und die Robustheit der Analysemethode. Doch vorher soll kurz auf die Akustische Kamera eingegangen werden.

DATEN DER AKUSTISCHEN KAMERA. Das Messsystem Akustische Kamera besteht aus einer Mikrofonanordnung (Sensor), einem Datenrekorder und einem Auswerterechner mit der Software NoiseImage.

Für verschiedene Messaufgaben werden unterschiedliche Mikrofonarrays eingesetzt. Dabei hat sich das Ringarray (Bild 1/1) mit einem Durchmesser von 75 cm und 48 Mikrofonen als das Standardarray für viele Anwendungen herausgestellt. Dieser Sensor besitzt eine sehr schmale Hauptkeule (Mainlobe) der Empfindlichkeitsverteilung, so dass eine gute Ortsauflösung erreicht werden kann. Der Arraykontrast (Abstand zwischen Mainlobe und Sidelobs, siehe Teil 1) beträgt 6 bis 7 dB.

Aufgrund des Durchmessers (gleich dem größten Abstand zwischen den Mikrofonen im Array) können Emissionen ab 400 Hz kartiert werden. Die hohe Fertigungsgenauigkeit erlaubt eine sehr gute Bestimmung der Mikrofonpositionen, wodurch, in Verbindung mit der linearen Kennempfindlichkeit der Mikrofone, Messungen bis hin zu 20 kHz möglich sind. Ist der absolute Schalldruckwert für die Messung nicht so interessant wie die Ortsbestimmung, dann ist auch die Ortung von Objekten mit Frequenzen bis zu 70 kHz möglich. Optimale Ergebnisse werden bei einer Entfernung vom Array zum Messobjekt von 1 bis 10 m erreicht. Für Messungen von kleineren Objekten in Bereichen oberhalb 1,5 kHz ist ein Miniring mit einem Durchmesser von 35 cm bestimmt (Bild 1/2). Für die Vermessung von Innenräumen (Fahrzeuge, Gebäude etc.) und die Kartierung auf 3-dimensionale Objektmodelle sind die Kugularrays mit 48 oder 120 Mikrofonen optimiert (Bild 1/4, 120 Mikrofone). Das Sternarray (Bild 1/5) wurde für Messungen an Großmaschinen und -anlagen, Schallschutzwänden etc. vor allem im Freifeld entwickelt. Wegen des Maximalabstandes von bis zu 3,40 m zwischen den Mikrofonen können auch Quellen lokalisiert werden, die in Frequenzen ab 100 Hz abstrahlen. Die optimale Messentfernung liegt bei 10 bis 300 m. Alle in den Arrays eingesetzten Mikrofone besitzen einen Vorverstärker, der ein symmetrisches Mikrofonsignal liefert.

¹ GFaI – Gesellschaft zur Förderung der angewandten Informatik



Bild 1: Hardware-Komponenten (Arrays und Datenrekorder) der Akustischen Kamera (Bilder: GFaI)

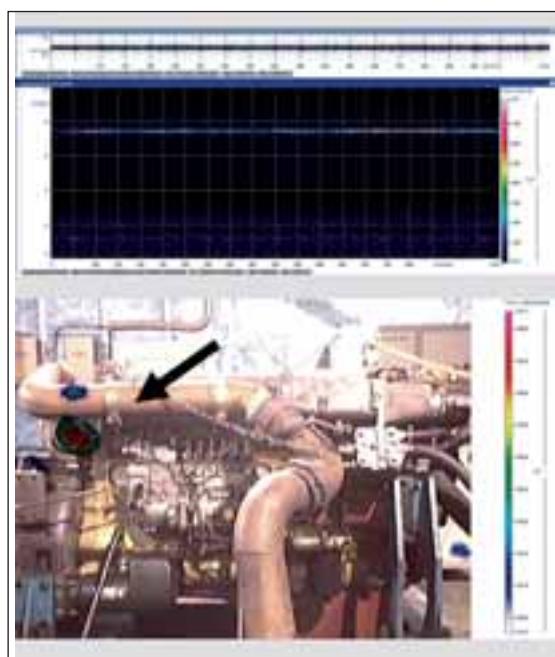


Bild 2: Messungen an einem Turbodiesel auf einem Prüfstand; oben Mikrofondaten und Spektrogramm; unten Akustisches Foto des Turbodiesels (Bilder: GFaI)

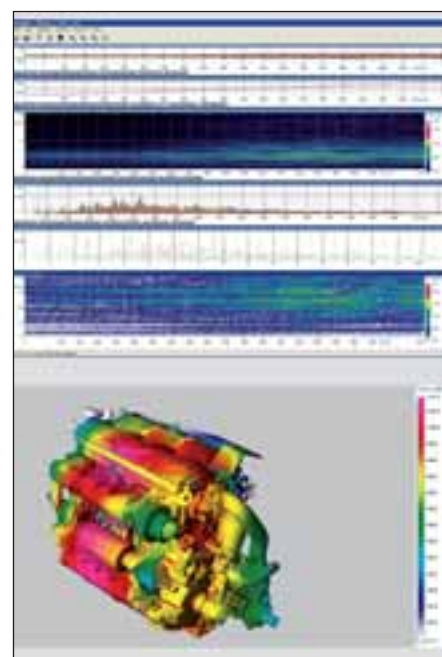


Bild 3: Drehzahl, Ordnungsanalyse und spektrale Tools (oben); Akustisches Foto auf ein 3D-Motormodell (Bilder: GFaI)



Bild 4: Filmausschnitt aus einem "Akustischen Movie" einer Vorbeifahrt eines Mischers (Bilder: GFal)



Bild 5: Vorbeifahrt, Akustisches Movie eines Traktors (Bilder: GFal)

Wegen der damit verbundenen längeren Übertragungswege, kann der Datenrekorder aus der unmittelbaren Messumgebung entfernt werden, was vor allem für Messungen in schalltoten Räumen oder in Produktionsumgebungen (hohe Störfaktoren, Arbeits- und Brandschutz) sehr wichtig ist.

DER DATENREKORDER. (Bild 1/3) verfügt als compact PCI-Gerät über eine eigene CPU und ist somit praktisch ein selbständiger Rechner, auf dem ein embedded Windows XP installiert ist. Die Mikrofone werden an Einsteckkarten über mit jeweils bis zu 24 Kanäle umfassende Stecker angeschlossen. Die über die Mikrofone an den Datenrekorder gelieferten analogen Schalldruckwerte werden je nach Einstellung mit einer Frequenz von 48 kHz, 96 kHz oder 192 kHz abgetastet, über 24-Bit A/D-Wandler digitalisiert und auf den compactPCI-Karten des Datenrekorders als 16-Bit-Wert gespeichert. Jede Karte kann bis zu 24 Mikrofonkanäle aufzeichnen und verfügt über einen Speicher von 8 MSamples je Kanal. Insgesamt können im Standardgehäuse bis zu 6 Karten (d.h. bis zu 144 Mikrofonkanäle) parallel betrieben werden, im 19"-Rack sogar bis zu 10 Karten (d.h. bis zu 240 Mikrofonkanäle). Außerdem ist es möglich, bis zu 5 Datenrekorder miteinander zu verbinden und somit bis zu 1200 Mikrofonkanäle zeitsynchron aufzuzeichnen. Neben den Mikrofonkarten zum Anschluss der Arrays stehen Karten mit digitalen Eingängen, analogen Eingängen (z.B. für Schwingungs-aufnehmer), aber auch High End-Analogkarten für stromgespeiste Sensoren (Mess-mikrofone, Beschleunigungsmesser etc.) zur Verfügung.

Die bei einer Messung aufgezeichneten Daten werden über eine GigaBit-Ethernet-Verbindung an den Auswerterechner übertragen und stehen dann unter NoiseImage 3 zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung. Diese Auswertung kann Akustische Fotos, Akustische Movies, 3D-Akustische Fotos, Spektrale Fotos, Ordnungsanalysen etc. umfassen.

Verbrennungsmotoren auf Motorprüfständen

Eines der häufigsten Einsatzgebiete der Akustischen Kamera ist der Test von Motoren auf Prüfständen sowohl bei der Motorentwicklung als auch als Teil der Fehlersuche bei der Produktion.

Zur spektralen Untersuchung steht als ein sehr hilfreiches Tool, das Spektrogramm, zur Verfügung (Bild 2, links unten). Hier ist sehr schön die Emission des Turboladers bei 7,5 kHz als dominierendes Element zu sehen. Bild 2, rechts zeigt nun

das Akustische Foto mit direktem Blick auf den Turbolader, der sich sehr schön als wichtigste Schallquelle dokumentiert. Dieser ist rot eingefärbt als Zeichen dafür, dass dies der lauteste Punkt im Bildfeld ist. Er ist so dominant, dass nicht einmal alle anderen, störenden Geräusche herausgefiltert werden mussten. Ein Turbolader, der ja in einem relativ hochfrequenten Band emittiert, ist nicht immer so gut zu lokalisieren. Diese hochfrequenten Strahler besitzen sehr oft eine ausgeprägte Richtungscharakteristik, wodurch die Primärstrahlung nur dann vom Mikrofonarray erfasst wird, wenn ein direkter Blick auf das Objekt möglich ist, da diese hochfrequenten, schmalbandigen Emissionen oft eine sehr schmal Richtcharakteristik besitzen. Ansonsten erfasst das Array vor allem Reflexionen, Brechungen und Beugungen. Aufgrund der hohen Frequenzen spielen dann schon oft starke Aliasingfiguren (Grating Lobes, [1]) eine dominierende Rolle, wodurch die Quelle nicht sicher bestimmt werden kann.

Als zweites Beispiel für die Analyse von Motoren wurde im Bild 3 eine Messung ausgewählt, wobei neben den akustischen Signalen auch eine Drehzahl über einen digitalen Kamera aufgenommen wurde. Der obere Teil von Bild 3 zeigt die Auswertemöglichkeiten in einem solchen Fall. Von oben nach unten: als zeitlichen Anhaltspunkt dient, ähnlich entsprechender Audiotools, die Tonspur der 48 Mikrofone. Darunter wurde der Verlauf des Drehzahlsignals eingeblendet (im Bereich von 5300 bis 5600 U/Min). Leider war das Signal nicht ideal, es schwankt sehr stark und muss für die folgenden Ordnungsuntersuchungen geglättet werden, wodurch deren Aussagen stärker fehlerbehaftet werden. Darunter wird das Spektrogramm der Messung dargestellt. Schön zu sehen sind die starken Störungen im oberen Drehzahlbereich. Darunter wird das zugehörige Spektrum eingeblendet. Die stark verschmierenden Bereiche zeigen, dass es sich dabei um drehzahlabhängige Emissionen handelt, die sich im Ordnungsspektrum als deutlich schmale Linien dokumentieren müssten. Im Bild darunter wird das Ordnungsspektrum eingeblendet, das sich erwartungsgemäß als ausgeprägtes Linienspektrum darstellt. Wie vorhergesagt erscheinen die einzelnen Emissionen als schmale Linien, was darauf hinweist, dass sie stark mit der Drehzahl korreliert sind. Im unteren Teil des Bildes ist das Ordnungsdiagramm dargestellt, das deutlich ausgeprägte, lineare, nicht ansteigende Linien besitzt. Diese Linien sind eindeutige Ordnungen, d.h. Vielfache der Drehzahl. Diese Linien nehmen deutlich im höheren

Drehzahlbereich zu, lassen aber auch hier eine eindeutige Zuordnung zu bestimmten Motorordnungen zu.

Der untere Teil in Bild 3 zeigt ein Akustisches Foto, das auf ein 3D-Modell des zu messenden Motors projiziert wurde. Eindrucksvoll ist die Detailvielfalt, die dabei erreicht werden kann.

MESSUNGEN VON VORBEIFAHRTEN. Ein weiteres Beispiel für den Einsatz der Akustischen Kamera aus dem Automobilbereich soll ebenfalls eine, interessante Funktionalität dokumentieren. Diese ist aber auf keinen Fall nur für den hier geschilderten Fall einsetzbar. Alle Automobilhersteller müssen für die Zulassung und Klassifizierung ihrer Fahrzeuge einen so genannten «Pass-By»-Test absolvieren, der per Norm fest vorgeschrieben ist. Dabei werden über Einzelmikrofone die Schallemissionen in einem bestimmten Abstand vom vorbeifahrenden Fahrzeug aufgezeichnet und anhand des Schallpegels die Erfüllung der Norm festgestellt. Leider kann dabei nicht ermittelt werden, wer der eigentliche «Krachmacher» ist. Die Akustische Kamera eröffnet hier nun bisher nicht mögliche Analyseverfahren, indem das eigentliche Akustische Movie auf die Bilder des gleichzeitig aufgezeichneten optischen Filmes projiziert werden ([2])

Die beiden folgenden Beispiele zeigen die Potenz, die in dem Auswertetool Akustisches Movie auch für viele andere Anwendungen mit instationären Vorgängen liegt.

BETONMISCHER. In Bild 4 wird ein Ausschnitt aus einem Akustischen Movie gezeigt. Diese Messung wurde im Freifeld mit einem Sternarray aus 7,5 m Abstand aufgenommen. Um eine eindeutige Emission für die Bewertung des Filmes zu haben, wurde der Betonmischer mit Wasser ausgespült, und das Wasser mit hinreichendem Druck auf den Boden gespritzt, was das dominierende Geräusch war. Dabei ist schön zu sehen, wie diese Emission dem vorbeifahrenden Mischer folgt.

TRAKTOR. Auch das folgende Beispiel ist von der Auswertung recht einfach (Bild 5). Die wichtigsten Emissionen eines vorbeifahrenden Traktors werden sauber erfasst und an den zu erwartenden Positionen dargestellt. Der nicht akustisch gedämmte Motor ist fast genau so laut wie die Auspuffgeräusche am Traktor. Verwunderlich ist in diesem Zusammenhang, warum der Auspuff nicht so angebracht wird, dass die Fahrerkabine nicht in unmittelbarer Nähe dieser sehr dominanten Emission liegt.

Die hier als Beispiel für Akustische Movie gewählten Anwendungen zeigen recht langsam ablaufende Prozesse. Wegen der Implementierung im Zeitbereich ([1]) können extrem schnell ablaufende Prozesse, vor allem Kurzzeitgeräusche bzw. Breitbandemissionen, praktisch mit Framerates von bis zu 50.000 Bildern/Sekunde aufgelöst werden. Um diese Vorgänge auch optisch verfolgen zu können, werden aber Highspeed-Kameras mit einer extremen Ausleuchtung benötigt. ↪ LO72137

FORTSETZUNG (TEIL 3). In sensor report 3/2007. Sichern Sie sich Ihr persönliches Exemplar: leser-service@sensorreport.de

[1] O. Jaeckel, R. Schröder, Die Akustische Kamera - Teil I, Sensor Report 1(2007)

[2] InterNoise 2005

[3] BeBeC, 2006

[4] der fellner, Newsletter, 2/2005

AUTOREN. Dr. Ralf Schröder ist promovierter Physiker. Er arbeitet seit 2003 in der GFaI und ist seit Anfang 2005 Leiter des Bereiches Signalverarbeitung, in dem die Akustische Kamera seit den 90-er Jahren entwickelt wurde.

Dr.-Ing. Olaf Jaeckel ist seit 1999 an der GFaI und seit 2003 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Signalverarbeitung tätig. Er ist vorrangig für die Betreuung verschiedener Forschungsprojekte zur Akustischen Kamera verantwortlich.

The Acoustic Camera

Part 3: Application in practice

In the first part (Sensor Report 1/2007) the basics of the localization of sound sources by means of beamforming in the time domain – which is the underlying concept of the Acoustic Camera made by GFal – have been presented. The second part has been dedicated to practical application examples (Sensor Report 2/2007). In the present third and last part some further examples for measurements with the Acoustic Camera will be demonstrated.

MAPPING ONTO 3-DIMENSIONAL OBJECTS. The following examples will give a more detailed explanation of the possibilities of the mapping of acoustic images onto 3-dimensional objects, as has already been shown for the case of the analysis of motors ([1]). This function is mainly of interest for measurements in arbitrary interior rooms ([2]). Everyone knows about the problem to locate a creaking noise inside a driving car. Which direction does it come from: From behind, from the front, from right or left? Here, the imperfection of the human ear becomes obvious because it was not adapted

to this type of localization task during the evolution process. Therefore, GFal has developed special 3-dimensional spherical microphone arrays with 48 (\varnothing 35 cm, for smaller interiors of passenger cars) or 120 (\varnothing 60 cm, for bigger cavities in buses, airplanes, etc.) microphones. These microphone arrays provide equivalent acoustic information about all sound events which have taken place in arbitrary directions around the array (approximately omni-directional characteristics). This type of data is required ([2]) in order to construct 3-dimensional acoustic photos for which acoustic maps will be projected onto the surface of a 3-dimensional CAD-model.

The sub-pictures in figure 1 show the results of various measurements on a Mercedes Benz B-Class car. For these measurements a rental car of the B-Class and an associated 3D-model have been used. In the first example (picture 1, above) the left blinker and the right woofer have been activated. The microphone array has been placed onto the front passenger's seat. The acoustic information has been mapped onto the 3D-

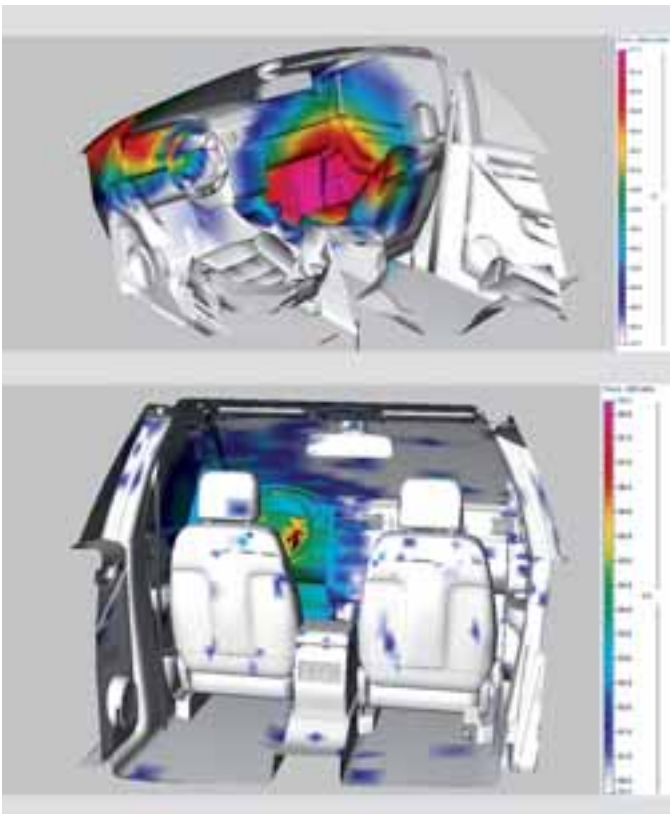


Figure 1: Blinker and music from the right sound speaker (above); rattling of an ignition key in the lock (below) [(c) GFal]

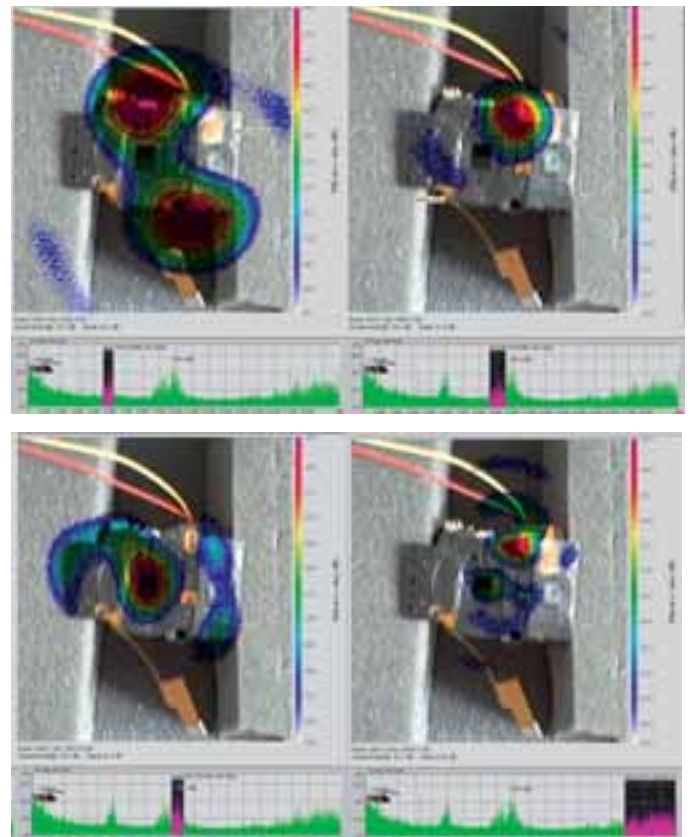


Figure 2: Acoustic Photos and spectra of a zoom lens [(c) GFal]



Figure 3: Waste separation plant and photos of noise exposure ((c) GFal)

model of the car interior. Both sound sources can easily be seen. In the second example, measurements have been conducted during a test run. One of the most distinctive features of the Acoustic Camera is its high mobility. The camera can be powered by the onboard supply system and is operable during the ride. On a quieter part of the road the rattling of the ignition key could be determined as a dominating sound source. Basically, the lower cut-off frequency for the applica-

tion of our 3-dimensional array for the localization of sound sources is about 1 to 1,5 kHz. Certainly, it is also possible to analyze signals of lower frequency content with corresponding methods (spectrum, spectrogram, order spectrum, ordergram).

ACOUSTIC EVALUATION OF MIDGET OBJECTS. So far, examples with sufficiently large geometrical dimensions from the automotive industry have been shown. But the applicability of the Acoustic Camera is not limited hereon. Therefore, an example of the measurement of very small objects and the feasible spatial resolution will be given. For a manufacturer of zoom lenses for photo cameras, the following analyses have been performed. As analytic method the function spectral photo has been used. Even though the over-all dimensions of these types of motors are already very small the manufacturers are still interested in a further reduction of the noise emission levels because the camera is operated very close to the ear.

The diameter of the lens module is about 5 cm. It consists of a multitude of components. Some of these components emit in various frequency bands. The operation mode spectral photo (see figure 2) allows for the frequency dependent localization of emission sources (the respective emissions are marked in black). The pictures shown are comprehensible even without comments. In this context attention shall be drawn to a very important and useful utility of the measurement system: by means of spectral separation, sound sources can be found which have sound levels far below the level of the main emission. Consequently, it is possible to locate sources that are below the intrinsic dB-contrast of the array. For that purpose the non-interesting frequencies are filtered out and only the remaining frequencies are analyzed. In case of the lens actuator, sound sources can be localized that are lying up to 25 dB below the sound pressure maximum of the recording.

In addition, measurements of other small objects like dental drills, shaving machines and even orthopedic articulations and other devices have been very successful. This kind of measurements become possible because all of those objects exhibit a distinct portion of high frequency emissions. These high frequency parts allow for the high spatial resolution ([1],[3]).

ENVIRONMENTAL MEASUREMENTS. An essential application area of the Acoustic Camera has not been touched so far: The measurement of noise as one of the most central and most harmful environmental toxins. On behalf of the enormously diversified range of applications in this domain, an example of localizing annoying noise from a waste separation plant in the picturesque Austrian Loacker [4] (see figure 3 above and in middle) will be given. The waste recycling plant was exemplarily constructed, however, in spite of a sound insulating wall 15 meters high and 400 meters long there were constant complaints from residents.

Reasons for this phenomenon were completely clarified using the Acoustic Camera (measurement distance to the sound insulating wall was 180 m): the picturesque, forested mountain, in the lower picture on the right, was reflecting the sound ex-

citation which was actually coming from the left (figure 3 below: Acoustic Photo, mountain left) in particular always shortly after the original excitation into the direction of the measurement position (figure 3, below). The afforestation was - in opposition to all expectations - not sufficient for an effective attenuation of the sound reflection. What had to be done was clear: Either the mountain would have to be removed (luckily this was impossible due to the fact that the mountain is part of a nature reserve) or another sound insulating wall had to be built up between plant and mountain in a way that the sound emissions are no longer affecting the residents.

More examples are given on www.acoustic-camera.com. The Acoustic Camera by GFaI as described in Sensor Report is the first commercial implementation of beamforming for locating sound sources. In a very short period of industrial application, this imaging method has established itself not only in the acoustic laboratories of leading automotive producers but also among many other users. Even before and also still up to now there have been many self-constructed systems (at German Aerospace Center DLR, at Deutsche Bahn, in the domain of academic studies) which are supposed to analyze air plane noise (fly over, aero acoustics) and train construction. At present the Acoustic Camera is mainly in use for developing purposes. However, interest for applications i.e. in the field of quality control in automated production environments is constantly growing. In order to make measurements more objective and to simplify the analysis, increasing efforts are made in order to improve the dB contrast of the arrays. The integration of methods that have been elaborated during theoretical analysis and in the academic domain in order to eliminate aliasing takes places with the same objective. Finally it becomes obvious that the application of beamforming systems in practice is still in early stages and there is much potential for growth. ✎ LD731

schroeder@gfai.de

LITERATURE.

- [1] O. Jaeckel, R. Schröder, Die Akustische Kamera - Teil II, Sensor Report 2(2007)
- [2] A. Meyer, D. Döbler, Noise source localisation within car interior using 3D-microphone arrays, Berlin Beamforming Conference, 2006
- [3] O. Jaeckel, Strengths and weaknesses of calculating beamforming in the time domain, Berlin Beamforming Conference, 2006
- [4] der fellner, Newsletter, 2/2005

AUTHORS. Dr. Ralf Schroeder is postdoctoral physicist. He works at GFaI since 2003 and has been the director of the department of signal processing in which the Acoustic Camera has been developed since the nineties since 2005.

Dr.-Ing. Olaf Jaeckel works at GFaI since 1999. Since 2003 he is a research associate in the department of signal processing. He is mainly responsible for the supervision of different research projects for the Acoustic Camera.

COMPANY PROFILE

The Society for the Promotion of Applied Computer Science (GFal), in which the **acoustic camera** was designed, was founded in 1990 with its head-quarter in Berlin. The institution offers R&D services and the realisation of research projects. The list of references of successful cooperation ranges from small and medium sized enterprises to research establishments and major corporations.

The gfai tech GmbH as a 100% subsidiary of the GFal is responsible for the production process and the marketing of the GFal product line. A solutions-driven approach guides our team through the understanding of our customers' needs and goals. Our team

of experts is committed to be world-class. The production force and the technical support guarantee innovativeness, immediate action and desired customization. The sales team ensures flexibility and collaboration in order to deliver the utmost to our clients.

GFAI TECH – GOING FOR ADVANCED INNOVATION TECHNOLOGIES!

acoustic
camera

www.acoustic-camera.com

INTERNATIONAL SALES AND MARKET DEVELOPMENT

Phone: +49/(0)30-6392-1624

Fax: +49/(0)30-6392-1630

acousticcamera@gfai.de

SALES MANAGER GERMANY

Phone: +49/(0)30-6392-1624

Fax: +49/(0)30-6392-1630

acousticcamera@gfai.de

Rudower Chaussee 30
D-12489 Berlin
Germany



For more information about national distributors please visit us at www.acoustic-camera.com