

Schalldruckkartierung mit der Akustischen Kamera

Mit den Augen hören – Schallquellenortung im akustischen Fernfeld

Dr. Ralf Schröder

Das Interesse an akustischen Messungen wächst in letzter Zeit kontinuierlich. Dabei ist die Vielfalt der Einsatzbereiche bemerkenswert. Das Spektrum reicht vom Umwelt- (Lärm als Umweltverschmutzung) und Artenschutz (z.B. bei der Ortung von Fledermäusen), über Untersuchungen zur Geräuschkürzung von Fahrzeugen, Maschinen und Produktionsanlagen, den Einsatz zur Produktentwicklung bis hin zur Qualitätssicherung in Produktionszyklen.

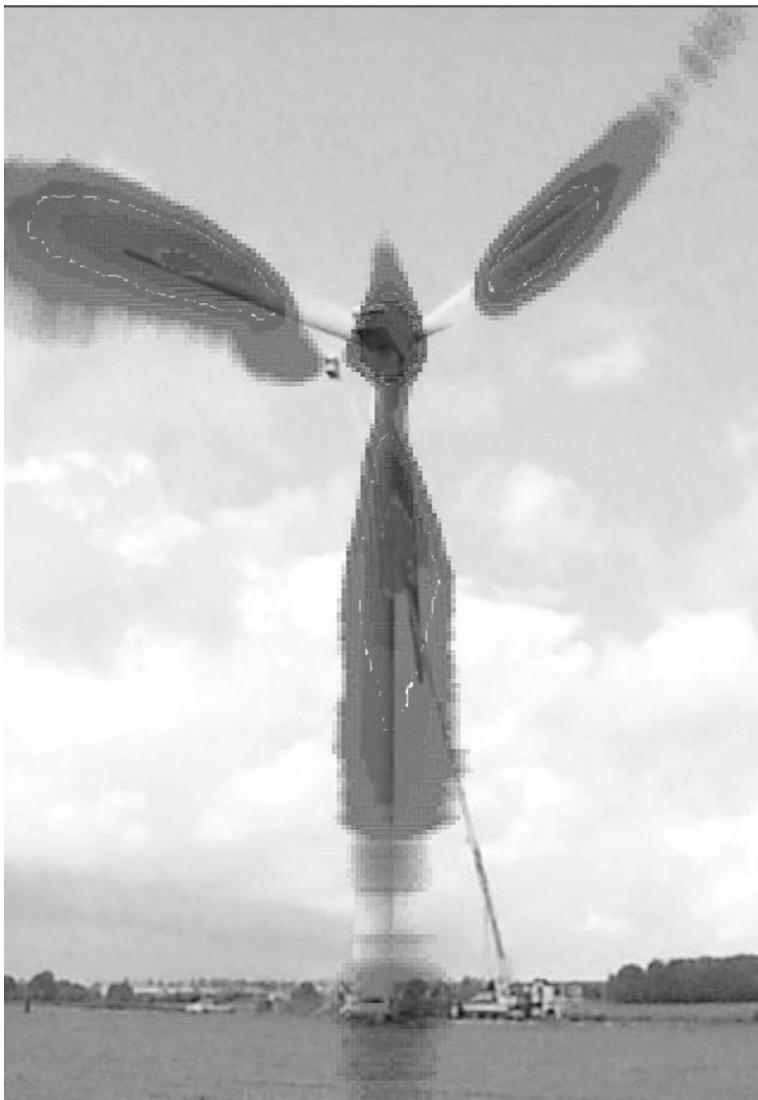


Bild 1: Aufnahme einer Windkraftanlage

Neben bekannten, klassischen Methoden, die Aussagen zur Schallintensität, Schalleistung sowie detaillierte Untersuchungen im Frequenzbereich ermöglichen, gewinnen Methoden zur Ortung von Schallquellen an Bedeutung. Eine der neuesten Entwicklungen in dieser Richtung ist die Akustische Kamera der GFaI (Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik) aus Berlin. Dieses System visualisiert, wie von einer Kamera erwartet, die Schallemissionen des Messobjektes. Mittels einer Falschfarbenpalette wird der effektive Schalldruck ähnlich wie

bei Infrarotwärmebildkameras kartiert. Bei Verwendung der Standardeinstellung werden laute Bereiche rot und leise Bereiche blau dargestellt. Gebiete, in denen der Schalldruck kleiner als ein einstellbarer Schwellwert ist, werden nicht eingefärbt, sie bleiben durchsichtig. Die Schallkarte, auch als Akustisches Foto bezeichnet, wird mit einem gleichzeitig aufgenommenen optischen Foto einer Videokamera überlagert. Im Resultat erhält der Anwender ein anschauliches Bild der Schalldruckverteilung während der Messung. Bild 1 zeigt ein typisches Akustisches Foto, bei dem die verschiedenen Quellen, die am Aufnahmeort zu hören sind, visualisiert werden.

Delay-And-Sum-Beamforming im Zeitbereich

Grundlage des Verfahrens ist das Delay-und-Sum-Beamforming im Zeitbereich. Bei dieser Methode werden die Laufzeitunterschiede von einem Schallereignis zu jedem der Mikrofone des Arrays ausgewertet (siehe Bild 2).

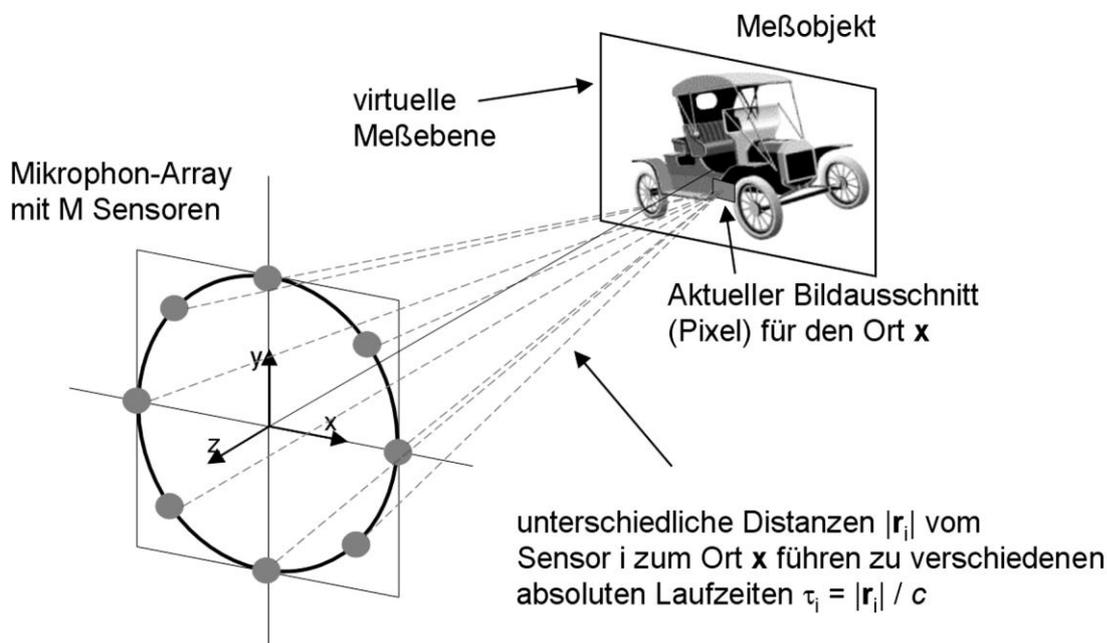


Bild 2: Quellortung mit der Akustischen Kamera

Ein Ereignis am Orte r wird wegen der endlichen Übertragungsgeschwindigkeit des Signals (hier die Schallgeschwindigkeit, bei Normaldruck und 20°C rund 343 m/s) zu unterschiedlichen Zeiten t_i (i nummeriert die Mikrofone) die Mikrofone erreichen und aufgezeichnet. Ist die Position jedes Mikrofons im Array und die Entfernung der Messebene bekannt, dann können die Laufzeitunterschiede (die Delays) zwischen den Mikrofonen berechnet und berücksichtigt werden. Aus den aufgezeichneten Messwerten für jedes Mikrofon kann dann für jeden Pixel und jeden Zeitpunkt der entsprechende Schalldruck genommen, eine Mittelung über die Mikrofone (Sum) durchgeführt und anschließend für die Berechnung des Effektivwertes verwendet werden. Bei der Berechnung eines Akustischen Fotos wird dieses Verfahren für jedes Pixel des Bildfeldes durchgeführt. Im Ergebnis erhält man die Kartierung des effektiven Schalldrucks für den ausgewählten Zeitbereich. Sehr wichtig ist, dass dieses Verfahren vollständig im Zeitbereich durchgeführt wird. Zu keiner Zeit wird per Fouriertransformation in den Frequenzbereich gewechselt. Die dargelegte Berechnung im Zeitbereich ist erst durch die sehr leistungsfähigen Computer der letzten Jahre möglich geworden. In die Auswertung gehen alle Frequenzinformationen der aufgezeichneten Schallereignisse ein und werden berücksichtigt. Kartiert wird der effektive Schalldruck am

Immissionsort (am Array), d.h. im Fernfeld, bei dem sich entsprechend dem Huygensschen Prinzip resultierende Wellenfronten herausgebildet haben. Dies unterscheidet alle Beamformingsysteme von z.B. der akustischen Holographie, die das akustische Nahfeld untersucht und nur über Modellannahmen Aussagen über das akustische Fernfeld ermöglicht. Die akustische Nahfeldholographie weist jedoch den Nachteil auf, dass zur Erreichung einer gewünschten Auflösung entweder sehr viele Mikrofone in einem engen Raster über der Objektoberfläche benötigt werden oder ein Array mit wenigen Mikrofonen für das Abscannen der Oberfläche verwendet werden muss, was aber den Positionieraufwand und die Messzeiten stark erhöht. Außerdem können mit Beamformingsysteme im Unterschied zur akustischen Holographie auch zeitlich beliebig veränderbare Schallfelder (instationäre Signale) analysiert und kartiert werden. Besonders gut kartieren beim Beamforming impulsartige, spektral breitbandige Quellen, während tonale, sinusartige Anregungen nur unter idealen Bedingungen geortet werden können.

Die Akustische Kamera

Mit der Akustischen Kamera wurde ein sehr robustes System zur akustischen Quellortung geschaffen, das auch unter rauen Industriebedingungen eingesetzt werden kann. Im Allgemeinen werden für aussagefähige Messungen nicht unbedingt die besonderen Bedingungen von akustischen Laboratorien bzw. schalltoten Räumen benötigt, was die Investitionen für den Einsatz akustischer Untersuchungen deutlich senkt und sie auch für KMU erschließt. Bild 3 zeigt beispielhaft einige Anwendungen.

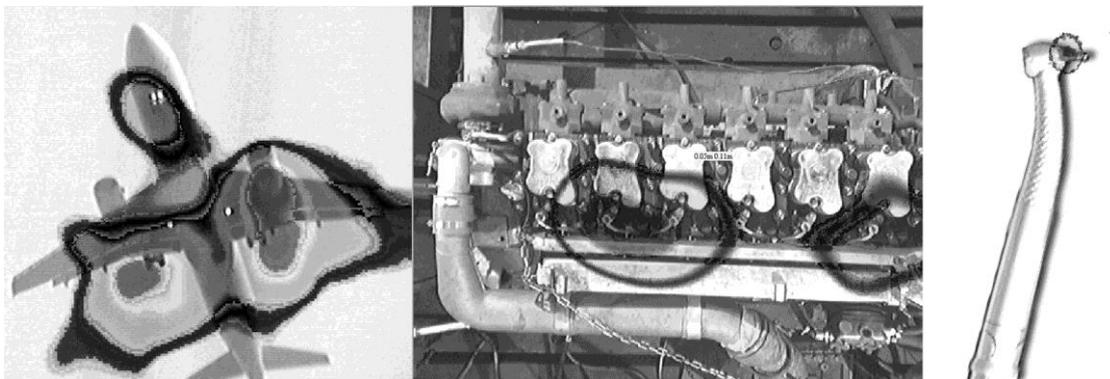


Bild 3: Einsatzbeispiele der Akustischen Kamera

Die Akustische Kamera deckt fast die gesamte Einsatzbreite akustischer Messungen ab. Das bisher größte vermessene Objekt war eine Industrieanlage, die aus über 300 m Entfernung aufgenommen wurde. Bild 3 zeigt im linken Teil ein Düsenflugzeug kurz vor der Landung. Sehr schön ist neben den Triebwerken auch der Beitrag des ausgefahrenen Bugfahrwerkes zu sehen. Am weitesten verbreitet ist die Akustische Kamera im Bereich der Motorentwicklung für Kraftfahrzeuge. Porsche, Daimler-Crysler, BMW, VW, MAN, Scania, Mazda, Suzuki, Hyundai – ein bedeutender Teil der Automobilindustrie setzt die Akustische Kamera erfolgreich ein. Bild 3 zeigt in der Mitte beispielhaft die Kartierung eines Motors auf einem Prüfstand. Aber auch sehr kleine Strukturen können akustisch vermessen werden. Der speziell für die Akustische Kamera entwickelte Datenrekorder erlaubt Aufnahmen mit einer Abtastrate von bis zu 192 kHz und somit die Auswertung auch sehr hochfrequenter Emissionen. Im Bild 3 ist rechts das Akustische Foto eines Zahnarztbohrers zu sehen. Die Aufnahme zeigt, dass auch Quellauflösungen im Millimeterbereich möglich sind. Etwas exotisch erscheint der Einsatz der Akustischen Kamera für die Ortung von Fledermäusen. Es

können auch hinreichend breitbandige Ultraschallquellen bis in den Bereich von 50-70 kHz geortet werden.



Bild 4: Akustische Kamera bestehend aus Array, Rekorder und Auswerterechner

Die Akustische Kamera (Bild 4) besteht aus einem Mikrofonarray, dem Datenrekorder und einem Notebook für die Auswertesoftware NoiseImage. Bei der Entwicklung des Systems wurde besonderer Wert auf Mobilität, sicheren und schnellen Aufbau und einfache Handhabbarkeit gelegt. Die Mikrofone des Arrays müssen nicht einzeln gesteckt werden. Sie sind in einem Stecker zusammengefasst, der den Anschluss an einen MikBus im Datenrekorder ermöglicht. Damit wird die Fehlerwahrscheinlichkeit beim Stecken der Mikrofone gegenüber anderen Vielkanalsystemen deutlich verringert und die Aufbauzeiten des Systems gesenkt. Der Datenrekorder wird per EPP-Schnittstelle an das Notebook angeschlossen. Für den Aufbau des Gesamtsystems werden weniger als 15 Minuten benötigt.

Je nach Einsatzgebiet kann zwischen entsprechenden Arrays gewählt werden. Für Messungen an kleinen Strukturen ist der Miniring, bestehend aus 36 Mikrofonen, verteilt auf einem Karbonring mit einem Durchmesser von 35 cm, bestimmt. Ein Aluminiumring mit 32 Mikrofonen und 75 cm Durchmesser ist das Standardarray, das bei den meisten Messungen eingesetzt werden kann. Für beide Ringarrays können die Mikrofonkoordinaten besonders genau bestimmt werden, was für die exakte Berechnung der Laufzeitunterschiede von großer Bedeutung ist. Das größere Standardarray erlaubt Messungen in Entfernungen von 0,75 m bis zu mehreren Metern. Für Messungen im Fahrzeuginnenraum ist ein Kugelarray mit 36 Mikrofonen und einem Kugeldurchmesser von 30 cm bestimmt. Diese kugelsymmetrischen Arrays werden benötigt, um 3D-Aufnahmen von Räumen durchführen zu können. Speziell für Messungen großer Objekte bei großen Abständen wurde das Sternarray mit 36 Mikrofonen auf 3 klappbaren Stangen entwickelt. Mit diesem Array wurden z.B. die Messungen an Industrieanlagen bzw. der Überflüge vorgenommen. Jedes Array besteht neben den

Mikrofonen noch aus einer Videokamera, mit der die optischen Fotos für die Schallkartierung aufgenommen werden. Diese Kameras werden über USB an den Auswerterechner angeschlossen.

Der Datenrekorder stellt Schnittstellen für den Anschluss von bis zu 36 Mikrofonen, 3 analogen Sonderkanälen und bis zu 16 Digitalkanälen bereit. Alle Kanäle können gleichzeitig mit jeweils maximal 192 kHz abgetastet werden. Damit können Signalformen mit 20 kHz sicher rekonstruiert werden. Auf den entsprechenden AD-Karten befindet sich Speicher für 1MSample je Kanal. Bei einer Samplebreite von 16 Bit und einer Abtastrate von 192 kHz können über 5 Sekunden je Messung aufgenommen werden. Bei einer Abtastrate von 48 kHz stehen über 20 Sekunden zur Verfügung.

Akustische Fotos und Filme

Zur Kartierung stationärer Geräusche steht die Funktion „Akustisches Foto“ zur Verfügung. Dazu wird der gewünschte Zeitbereich in den Kanaldaten markiert. Für diese Messpunkte wird für jedes Pixel des Bildes der gemittelte, effektive Schalldruck berechnet und das Pixel entsprechend der gewählten Falschfarbenpalette eingefärbt. Die Berechnungszeit für ein Akustisches Foto liegt im Bereich weniger Sekunden. Angezeigt werden die im selektierten Zeitbereich ermittelten Schallquellen. Die oben gezeigten Bilder sind Beispiele für Akustische Fotos. Diese Funktion ist die Grundlage für alle weiteren Kartierungen.

Für die Analyse instationärer, transienter Signale wurde die Funktion „Akustisches Movie“ implementiert. Dabei handelt es sich, genau wie bei optischen Movies, um eine Sequenz aufeinander folgender Akustischer Fotos. Verknüpft werden die akustischen Fotos mit dem optischen Bild, das von der Videokamera zum Triggerzeitpunkt aufgenommen wurde. Die Untersuchung instationärer Geräusche mit der Akustischen Kamera ist möglich, weil durch die konsequente Berechnung im Zeitbereich stets die volle Information über Zeit, Ort und Frequenz zur Verfügung steht. Die Güte eines „Akustischen Movies“ hängt wesentlich davon ab, ob die einzelnen Akustischen Fotos quasistationäre Zustände beschreiben. Dazu kann die Anzahl der Fotos je Sekunde (frames per second) verändert werden. Theoretisch sind 192000 Bilder je Sekunde möglich. Praktisch finden Bildraten von einigen 10000 Bildern je Sekunde Anwendung, z.B. bei der Aufnahme transienter Ereignisse (z.B. Knackgeräusche) oder der Analyse der sich herausbildenden stehenden Welle in einem Metallstab. Gerade diese Funktion ist eine der Stärken der akustischen Kamera. Es bestehen kaum Begrenzungen bezüglich des zeitlichen Signalverhaltens.

Für die Frequenzanalyse können die Kanaldaten in einem Spektrogramm dargestellt werden. Im Spektrogramm kann ein bestimmter Frequenz- und Zeitbereich markiert werden. Mit diesen gefilterten Daten können dann akustische Fotos oder Movies berechnet werden. Damit können die Orte gefunden werden, die diese Frequenzen emittiert haben. Die Funktion „Spektral Frames“ erlaubt eine ortsselektive Frequenzanalyse (siehe Abbildung 9). Dabei wird in einem zweigeteilten Fenster im oberen Teil ein akustisches Foto und im unteren Teil die per FFT ermittelten Frequenzen dargestellt. Im akustischen Foto werden die Quellorte des selektierten Frequenzbandes angezeigt. Auch eine Terzanalyse kann ausgeführt werden.

Das System der Zukunft

Die nächste Generation der Akustischen Kamera wurde im August auf der Internoise in Rio, Brasilien, vorgestellt und wird ab 1. Quartal 2006 verfügbar sein. Auf der Basis einer compactPCI-Plattform wurde ein modularer, skalierbarer und offener Datenrekorder entwickelt. Dieser kann bis zu 10 spezielle Mikrofonkarten aufnehmen, die jeweils 24 Kanäle bereitstellen. Damit können an einem Rekorder bis zu 240 Mikrofonkanäle betrieben werden. Die maximale Messzeit wurde auf über 40 Sekunden vergrößert. Der Datenrekorder wird über GB-Ethernet an den Auswerterechner angeschlossen. Damit konnte die Übertragungsrate der Messdaten an den Rechner um den Faktor 20 vergrößert werden. Zur Unterdrückung von Umgebungsstörungen auf den Mikrofonkanälen wurden differentielle Mikrofone entwickelt. Für akustische Movies werden optische Videos aufgezeichnet. Damit sind echte akustische Movies möglich, bei denen akustische Fotos synchron auf die entsprechenden optischen Einzelbilder des Videos kartiert werden. Mit 3D-Kartierungen wird eine sehr wichtige Funktion für akustische Messungen in geschlossenen Räumen, z.B. im Fahrzeuginneren, implementiert. Außerdem wird mit einer ortsselektiven Ordnungsanalyse eine bisherige Lücke in der Frequenzauswertung geschlossen.

Weitere Informationen stehen unter www.acoustic-camera.com zur Verfügung. Anfragen können an info@acoustic-camera.de gerichtet werden.

Zur Person



Dr. Ralf Schröder ist promovierter Physiker. Er arbeitet seit 3 Jahren in der GFaI und ist seit Anfang des Jahres Leiter des Bereiches Signalverarbeitung, in dem die Akustische Kamera seit den 90-er Jahren entwickelt wurde.

- Bild 1 Windkraftanlage (/Bilder/windkraft_bw.jpg)
- Bild 2 Quellortung mit der Akustischen Kamera (/Bilder/Messprinzip.jpg)
- Bild 3 Duesenflugzeug, Motor auf Prüfstand, Zahnbohrer (/Bilder/Beispiele_AC.jpg)
- Bild 4 System Akustische Kamera (/Bilder/AK_System.jpg)
- Portrait /Bilder/schroeder_bw.jpg