

Eine Einführung in die akustische Photo- und Kinematographie

Gerd K. Heinz, GFal Berlin

Im Aufsatz soll über eine neue Art intelligenter Messtechnik berichtet werden, von einem akustischen Interferenzmessplatz. Ein Prototyp dieser Technik wurde auf der Cebit'97 als zeitinvers arbeitender, akustischer Interferenzmessplatz vorgestellt - dort erfand ein Reporter sogleich die neue Bezeichnung "Akustische Kamera". Wir behielten diesen Begriff bei, um das Grundanliegen der Entwicklung akustischer Bilder besser zu vermitteln. Vollautomatisch belichtet entstehen mit wenigen Handgriffen akustische Bilder, Movies oder Spektralbilder - natürlich mit überlagertem Videobild und auf äquivalenten Schalldruck berechnet. Sowohl ein neues Verfahren zur Berechnung von Schallkarten, eine automatische Videoüberlagerung als auch ein intelligenter Ansatz zur Datenanalyse finden sich vereint unter einer Windows-Oberfläche. Der Nutzer erlernt die Oberfläche in gewohnter Weise intuitiv. Vorbei sind die Zeiten, in denen Schallkammern aufgeklappt wurden, um die Fernabstrahlung eines Motors zu untersuchen. Die vorgestellte Technik ist derzeit weltweit noch recht einmalig¹. Insbesondere die Zeitauflösung des Systems - es können akustische Filme mit Bildraten bis zur Abtastfrequenz der Zeitfunktionen der Mikrofonkanäle gemacht werden, gestattet erstmals die Zeitlupeauflösung akustischer Vorgänge. So sieht eine Reflektion eines Klicks an einer Wand mit 5.000 Bildern pro Sekunde (i/s) so aus, wie wir diese intuitiv erwarten würden: Erst leuchtet die Quelle, diese verlischt, dann erscheint die Reflektion an der Wand und erlischt - war da früher mal ein Problem?

Motivation

Lärmbekämpfung beginnt häufig bei der (Un-)Möglichkeit, den Entstehungsprozess effizient analysieren und lokalisieren zu können. Eine zuverlässige Erfassung, Analyse oder Ortung von Lärmquellen war und ist eine der steten Herausforderungen. Insbesondere in die Ferne tragende Wellenfronten sind oft Gegenstand lebhaften Bemühens. So entstand in der Vergangenheit eine Vielfalt von Verfahren zur Quellenortung mit ganz spezifischen Vorzügen und Nachteilen.

Neben klassischen Fensterwandverfahren haben sich insbesondere optische Verfahren zur Analy-

se von Oberflächenbewegungen eines Objekts (insbes. die Laser-Vibrometrie) einen sicheren Platz erarbeitet. Oberflächenbewegungen können punktuell-matrixartig vermessen werden. Probleme allerdings bestehen in der Umdeutung von Bewegungsamplituden in Druckschwankungen sowie in begrenzenden Transienten (ds/dt).

Verfahren der Finite- Elemente- Modellierung (FEM) zur simulativen Analyse von Objekten versuchen ebenfalls Fuß zu fassen. Noch sind Rechenleistungen aber zu gering um die hohe Komplexität geforderter Gitterauflösungen zu beherrschen. Dies beschränkt FEM-Verfahren zumeist auf die Analyse elementarer Strukturen.

Daneben entwickeln sich Verfahren der akustischen Ortung mit Mikrofonarrays weiter. Gedanklich stehen dahinter zu bestimmende Trajektorien komplexwertiger Wellenfunktionen. Wissenschaftliche Wurzeln reichen u.a. über Helmholtz (Integralgleichung, Wirkungsprinzip), Jacobi, Lagrange und Newton bis auf Maupertius "kleinste Aktion" zurück [Lübbig].

Arraytechniken

Derzeit finden unterschiedliche Methoden zur Quellenzuordnung Anwendung. Allen gemein ist der theoretische Hintergrund der Beschreibung einer Welle als (lineare) Superposition von Huygenschen Elementarwellen und der Versuch, diesen kompositorischen Weg zu invertieren. Das mathematisch-harte Problem besteht darin, dass nicht annähernd so viele Bestimmungsgleichungen zur Verfügung stehen, wie Variablen zu bestimmen wären. So wurde eine Vielzahl von approximierenden Verfahren entwickelt.

Korrelative Verfahren sind aus der Sprecherverfolgung in der Beschallungstechnik bekannt. Es werden jeweils Paare von Zeitfunktionen von Mikrofonen korreliert. Die hyperbolischen Kurven der Paar-Permutationen können übereinander gelegt werden und ergeben eine Karte von Quellorten. Allerdings ist keine Rückrechnung auf Schalldruck bekannt, da es sich um ein multiplikativ- nichtlineares Rechenschema handelt.

Auf dem Fourier-Ansatz beruht auch die sog. *akustische Holographie*. Man approximiert durch dicht angeordnete Mikrofone die 2-dim. Ortsfunktion des Wellenfeldes und versucht diese Ortsverteilung auf die Ursprungsebene holographisch zurück zu transformieren [Hald95]. Das Wellenzahlspektrum in der Vorlagenebene kann aus dem der gemessenen Ebene oder Hülle durch Multiplikation mit einem komplexen Exponentialterm der Form $\exp(-j k_z \Delta z)$ bestimmt werden. Durch Fourier-Rücktransformation wird der Ortsverlauf am interessierenden Quellort rekonstruiert. Diese Verfahren hatten im letzten Jahrzehnt praktisch eine Endzeit-Situation geschaffen: Bislang konnten nur wenige, wirklich über-

¹siehe <http://www.acoustic-camera.com> -> Presse

zeugenden Ergebnisse gezeigt werden. Man glaubte Mitte der `90er nicht mehr an bessere Array-Verfahren. Emissionsorte außerhalb von Quellen erweisen sich als hohe Hürde bei einer Markteinführung. Vermutungen über Ursachen der Probleme gehen einerseits in Richtung einer unzureichenden, linearen Wellenfeldapproximation durch Anwendung der Eulerformel auf Kugelfelder. Da man sehr nahe an der Maschine misst, erweisen sich andererseits auch Abschattungen, Reflexionen und Beugungen bei Tiefenstrukturen und Drehpole als extrem problematisch. Praktische Erfordernisse verhindern zudem eine geschlossene Hülle, man benutzt aber große, quadratische Arrays mit bis zu 144 Kanälen, die dicht über das Objekt gehalten werden [Hald95]. Abschattungen von Mikrofonkanälen durch Objektgeometrien lassen sich zudem generell in äußerster Nähe nicht vermeiden, so dass Fehlerbilder vorbestimmt sind. Auch sind Störungen und Reflexionen aus dem Außenbereich prinzipbedingt kaum von inneren Quellen zu unterscheiden.

Bei *Blind-Separation-Methoden* versucht man ausgehend von wenigen Kanälen Quellen nach statistischen Merkmalen, wie z.B. Mustern im Spektrum zu separieren. Im Kern stehen hier ICA-Verfahren (Independent Component Analysis) [Jutten88]. Man versucht, mehrdimensionale Punktwolkenhaufen durch geeignete Transformationen derart zu separieren, dass deren statistische Unabhängigkeit maximiert wird. Kerne gestatten dann Zuordnungen zu Quellen, siehe Überblick in [Hyv99].

In den letzten Jahren haben *Beamforming-Algorithmen* [Brandst01] an Bedeutung gewonnen. Bekannt wurden die Ansätze in der Antennentechnik und bei Ultraschall-Arrays. Hier steuert man einen Strahl (Beam) mit Phasendifferenzen zwischen Partialwellen vieler Antennen. Je nach Wellenlänge kann eine resultierende Wellenfront (Beam) mehrerer Quellen durch Phasendifferenzen gesteuert (ausgelenkt) werden. Bei Anordnungen ungleichförmig angeordneter Quellen können in verschiedensten Modifikationen konstante, räumliche Strahlmuster erreicht werden [Ishim92].

Beim *inversen Beamforming im Frequenzbereich* wird dieses Prinzip umgekehrt. Schmalbandgefilterte Zeitfunktionen werden in der Phase verglichen, damit heben sich Quellorte ab. Probleme bereiten zwei Einschränkungen: (1) die Schmalband-Annahme: Das Ortungsverfahren ist an Wellenzahlen gekoppelt und funktioniert nur mit schmalbandigen Signalen; (2) die Fernfeld-Annahme: Üblicherweise wird mit ebenen Wellenfeldern gearbeitet. Insbesondere die Schmalband-Annahme führt zu Einschränkungen, die weiter unten noch diskutiert werden: so "beamt" ein Array umso genauer, je schmaler die Fre-

quenzintervalle gewählt sind. Schmale Frequenzbänder aber korrespondieren mit stärksten Fremdinterferenz-Fehlerbildern. Einerseits ergeben sich dadurch zwangsläufig hohe Kanalzahlen, andererseits steigen Rechenzeiten, zusätzlich senken Intervall-Fensterungsprobleme mögliche Zeitaufösungen von Signalen. Auch wird Rauschen zum Problem: Schmalbandgefiltertes Rauschen erzeugt stets nur Frequenzen im Nutzbereich.

Mit dem *inversen Beamforming im Zeitbereich* [Johnson93] werden Probleme dieser Art überwunden. Mittels *Delay-and-Sum-Adder* werden die Zeitfunktionen der Pixel rekonstruiert. Anschließend wird über verschiedene Ausbreitungsmodelle (spherical, cylindrical, flat) auf die emittierte, flächenbezogene Schalleistung (Power Density) gefolgert.

Mit *Time-Reversal-Mirrors* zeigt Fink [Fink97], dass anstelle einer Dekomposition oder einer korrelativen Analyse eines Wellenfeldes unter bestimmten Bedingungen auch ein zweites Wellenfeld benutzt werden kann, dessen Interferenzkarte dem des originalen Wellenfeldes ähnlich gestaltet werden kann.

Aber nicht zuletzt auch die *Entwicklung von Mikrofonarrays* ist problematisch: Ein weiter, zu überstreichender Wellenlängenbereich von 3,4 Meter bei 100 Hz bis 3,4 mm bei 100 kHz erfordert theoretisch adäquate Mikrofonabstände im Bereich von Metern bis Millimetern - in einem einzigen Array. Ein mit endlicher Kanalzahl kaum zu lösendes Problem. Während tiefe Frequenzen große Arrays erfordern, fordern hohe Frequenzen winzig kleine Arrays. Hinzu kommt der Teufelskreis der *Optimalgeometrie der Arrays* bei geringen Kanalzahlen. Um ein geeignetes Array entwickeln zu können, benötigt man nach vielen Simulationen irgendwann reale Daten vom noch nicht vorhandenen Array.

Interferenztransformation

Eine akustische Messung soll stets entfernungsunabhängige Ergebnisse liefern. Speziell gilt es, flächenbezogene Leistungsdichten zu berechnen. Klassische Verfahren, wie *Holographie* oder *Beamforming* zielen stets auf dieses Feature. In der Praxis allerdings zeigen sich schnell die Grenzen: die Strahlercharakteristiken realer, emittierender Objekte sind i.a. unbekannt. Damit sind Modellannahmen über die Strahlercharakteristiken unumgänglich (die unzutreffend sein können). Wir entfernen uns vom Begriff der „Messung“.

Mit der damals so bezeichneten *Interferenztransformation* (HIT) des Autors wurde 1993 (unabhängig von Johnson) ein neuronaler Ansatz verallgemeinert, der eine Kartierung auf sog. *äquivalenten Schalldruck* (Equivalent Noise Pressure

ENP) liefern konnte und der eine dramatische Vereinfachung des Johnson-Ansatzes darstellt. Wir sehen im Bild der akustischen Kamera den Schalldruck (Farbe des Pixels), den eine Punktquelle im schalltoten Raum im gleichen Abstand liefern würde. Diese Kartierung auf Schalldruck hat zwar den Mangel, dass sie aus unterschiedlichen Entfernungen unterschiedliche Pegel und verschiedene akustische Bilder liefert – aber genau dies ist auch deren Vorzug. Wir finden nämlich heraus, dass sich dominante Quellen vieler realer Objekte (Maschinen, Fahrzeuge etc.) aus unterschiedlichen Entfernungen unterscheiden. So sehen wir in der Nähe oft verursachende Baugruppen mit Kugelstrahler-Charakteristik, aus der Ferne finden wir ganz andere Baugruppen mit Flächenstrahler-Wirkung.

Mit der Methode gelang es überraschend 1995/96, erste akustische Bilder und Filme, auch weit entfernter Objekte (bis 170 m) in hoher Qualität und mit winzig kleiner Kanalzahl (16) zu machen. 1997 konnte erstmals eine Schallreflektion gezeigt werden (Boeing 737²). Ein nichtlinearer Operator wirkte als Kontrastverstärker – ein Trick aus der Neuro-Kiste.

Der Ansatz zeichnet sich durch große Einfachheit und Flexibilität aus. Aus einer *Delay-and-Sum-Adder* Ausgabe wird ohne den Umweg über Strahlercharakteristiken punktgenau der Schalldruck abgeleitet.

Ein Vorteil der Rekonstruktion auf ENP besteht darin, dass keine Modellannahmen (z.B. für Strahlercharakteristiken) benötigt werden. Sieht man vom Array-Pattern ab, kann die Methode als Messverfahren bezeichnet werden.

Die akustischen Karten werden in interferenzieller Rekonstruktion im Zeitbereich berechnet und einem Videobild automatisch überlagert. Dazu wird die Fotografie automatisch in den virtuellen, physikalischen Berechnungsraum eingepasst.

Es erscheint als Vorzug der Interferenztransformation³, dass ohne weitere Modellannahmen direkt auf Schalldruck bezogene Ergebnisse erzeugt werden können. Ein weiter entferntes Objekt erscheint somit auch in der Farbskala des akustischen Bildes leiser als ein näher herangerücktes Objekt. Sofern die Mikrofonkoordinaten stimmen, liefert die akustische Kamera direkt den *Schalldruck einer äquivalenten Schallquelle in gleicher Entfernung*. Praktisch allerdings ist der Amplitudenkontrast (dB-Auflösung) durch Kanalzahl und Array-Geometrie begrenzt. Insbesondere

re ein Überstrahlen tieffrequenter Wellen mit Wellenlängen größer der Array-Geometrie ist zu beachten, siehe Bilder.

Die Transformation selbst betrachtet Zeit und Raum vorzeichenbehaftet. Rekonstruktion des Originals und spiegelverkehrte Projektion werden durch das Vorzeichen der Zeitfunktionen entschieden: Vorwärtsgerichteter Zeitlauf des pseudo-inversen Wellenfeldes erzeugt eine spiegelverkehrte, *interferenzielle Projektion*, rückwärts gerichteter Zeitlauf entsprechend eine (ungespiegelte) *interferenzielle Rekonstruktion*. Während die reale Welt nur den vorwärtsgerichteten Zeitlauf kennt, kann die Feldberechnung per Computer genauso gut zeitinvers erfolgen. Obwohl wir uns dabei in einer virtuellen Welt befinden, zeigen sich reale, unumstößliche Gesetzmäßigkeiten. Die Rekonstruktion erzeugt eine Kartierung, die dem Original stets seitenrichtig folgt, die Projektion erzeugt (optikgleich) eine spiegelverkehrte Kartierung. Während die Projektion alle von der optischen Linse bekannten Nachteile der Überbestimmtheit im achsfernen Raum mitbringt, kann der Rekonstruktion ein beliebig großer Öffnungswinkel nichts anhaben.

Unter Berücksichtigung der Wellenbewegungs-dynamik wurden weitere Gesetzmäßigkeiten beobachtet: Die Rekonstruktion generiert bei zeitlich vorwärts abgespieltem Movie impandierende (sich zusammenziehende) Wellen mit innenliegender Wellenfront(!), während die Projektion bei zeitlich vorwärts abgespieltem Movie expandierende Wellen mit außenliegender Wellenfront erzeugt. Bezieht man zusätzlich die Möglichkeit der zeitlichen Inversion der Abspielrichtung des Movies mit ein, wird die Situation zwar noch unübersichtlicher, aber eine Eselsbrücke erscheint: Eine Rekonstruktion läuft dabei mit expandierenden Wellen und hinten liegender Wellenfront bei inverser Zeit, eine Projektion dagegen läuft mit expandierenden Wellen und vorn liegender Wellenfront bei vorwärtslaufender Zeit. Erst der Computer erlaubt uns dieses phantastische Spiel mit virtuellen Wellen in inverser Zeit, bei dem wieder klassische Physik zutage tritt.

So macht es einen Unterschied, ob ein Movie mittels HIT erst berechnet wird, und danach mit inverser Zeitachse rückwärts abgespielt wird, oder ob die Zeitachse vor der Rechnung invertiert und damit ein Movie berechnet wird. Während im ersten Fall eine scheinbar vorwärts laufende Rekonstruktion mit expandierenden Wellen und innenliegender Wellenfront entsteht, entsteht im letzteren Fall eine scheinbar rückwärtslaufende Projektion mit impandierenden Wellen und innenliegenden Wellenfronten!

Bereits 1994 [Heinz96] gelang es dazu, mit zwei zeitlich zueinander inversen Zeitfunktionsquartets ein Beispiel zu konstruieren (Abb.1).

² <http://www.acoustic-camera.com/historie.htm>

³ Derzeit beginnen Arbeiten an einem Springer-Buch mit dem Arbeitstitel "Akustische Photo- und Kinematographie". Dort soll die Interferenztransformation mit ihren Eigenschaften detailliert im nötigen Umfang dargestellt werden.

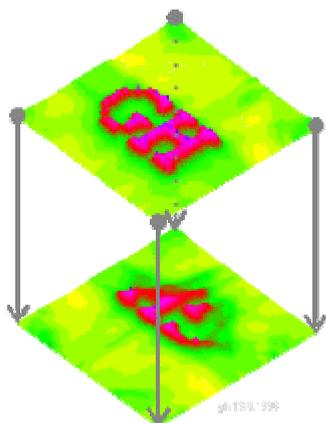


Abb.1 Vierkanalige Interferenzintegrale als Projektion (unten) und als Rekonstruktion (oben) berechnet [Heinz96]. Der Unterschied zwischen beiden besteht nur im Vorzeichen der Zeitachse $f(t) \rightarrow f(-t)$

Wir können uns zwei Teichoberflächen vorstellen, die sensorisch über vier Kanäle gekoppelt sind. Die Zeit läuft in positiver Richtung von oben nach unten. Speisen wir die Kanäle zwischen beiden Teichen aus unsichtbarer Quelle, so sehen wir oben Interferenz bei rückwärtslaufender Zeit, unten bei vorwärts laufender Zeit. Man beachte, dass es somit mindestens drei völlig verschiedene Wellenfelder gibt, deren Interferenzintegrale irgendwie mit "abbildenden" Karten zu tun haben, deren Wellenfelder aber vollkommen verschieden sind:

1. das *primäre, generierende Feld* (hier nicht dargestellt),
2. das *zeitlich rückwärts laufende, rekonstruierende Feld* (Abb.1 oben),
3. das *zeitlich vorwärts laufende, projizierende Feld* (Abb.1 unten).

Eine weitere Grundidee der Interferenztransformation ist die aus einer Beobachtung optischer Abbildungen gewonnene Erkenntnis, dass primäres und sekundäres Wellenfeld (z.B. vor und hinter einer Linse) völlig verschieden voneinander sind, dass ihre Interferenzintegrale aber denselben Abbildungskern (spiegelverkehrt) beherbergen können.

Man erkennt an Abb.1, dass die Berechnung des Interferenzintegrals für rückwärtsgerichtete Zeit (Rekonstruktion, oben) und für vorwärtsgerichtete Zeit (Projektion, unten) wesentliche Unterschiede zeigt. Während die Projektion alle Eigenheiten der optischen Projektion wie (Axialnähe, Kissenverzerrung) darstellt, zeigt die zeitinverse Rekonstruktion diese Probleme nicht.

Der HIT-Algorithmus gestattet die Entwicklung von Filmen bis zur Samplingrate. Zu beachten ist, dass bei Verkürzung der Integrationszeiten pro Bild der integrale Eindruck allmählich einem Wellenfeldeindruck weicht. Dieses Wellenfeld (2)

aber hat – außer der Ähnlichkeit der Interferenzorte - nicht das Geringste mit dem Originalwellenfeld (1) zu tun. Sowohl die Bewegungsrichtung der Wellen, als auch Quellorte der Wellen sind verschieden vom aufgenommenen Wellenfeld. Somit kann unsere Software „Noiselmage“ zwar Movies bis zur Samplerate der Zeitfunktionen auflösen (192.000 Bilder), aber das rekonstruierte Wellenfeld ist falsch, nur eine integrale Betrachtung (Overlap $\gg 1$) macht Sinn.

1994 wurde erkannt, dass Kanalzahl n und räumliche Dimension D analog zu mechanischen Konstruktionen im Verhältnis stehen. Für überbestimmte *Projektionen* gilt

$$n \geq D + 1$$

Besondere Bedeutung erlangte diese Formel zum Verständnis von Transformationen, die vor der HIT lagen. So genügt es nicht, viele Kanäle zu nutzen, wenn diese ein überbestimmtes, interferenziell nicht abgeglichenes System definieren (z.B. beim ursprünglichen, Hardware- Beamforming). Eine hohe Kanalzahl erhöht die Abbildungsqualität nur, wenn partielle Zeitfunktionen punktgenau und zeitgenau interferieren.

Im Nervensystem, wo hochkanalig übertragene Datenströme über dutzende oder hunderte von Leitbahnen interferieren, wird z.B. die Kanalzahl u.U. sehr schnell viel größer als drei. Entstehende Abbildungen sind überbestimmt (axialnah), holographisch Anteile entfallen (Lashleys Rattenexperimente) und die Dimension des Raumes muss zwangsläufig steigen ($D = n - 1$)! Wie aber? Offenbar erfand die Natur verwundene Leitbahnen (Nervenfilz) und inhomogene, dickenproportionale Leitgeschwindigkeiten zur Lösung dieses Problems.

Zwischen zwei Extremen

Im Unterschied zu anderen Transformationen geht in die Qualität von Wellenabbildungen der Zeitfunktionstyp ein. Es existieren zwei Extreme: Geringste Fremdinterferenz verursacht bei gleicher Kanalzahl die Interferenz von *Dirac*-Impulsen (Nervensystem). Maximale Fremdinterferenzen hingegen bildet der *Sinus* aus. Alle anderen Zeitfunktionstypen liegen zwischen beiden Extremen. Abbildungen werden demnach generell und unabhängig vom gewählten Rekonstruktionsverfahren um so schlechter, je schmalbandiger (sinusförmiger) die beteiligten Zeitfunktionen sind - ein Aspekt, der nicht für Ansätze des Frequency- Domain- Beamforming [Brandst01] spricht. Um schmalbandige Abbildungen zu verbessern, helfen nur höhere Kanalzahlen, diese verteuern ein Gerät aber erheblich. So ist Abb.1 vierkanalig nur mit Dirac- Funktionen herzustellen, sinusförmige Zeitfunktionen würden eine vielfache Kanalzahl benötigen um zu einem ähnlichen Rauschabstand zu kommen.

Betrachten wir Fourierkoeffizienten als schmalbandige, sinusförmige Signale im Zeitbereich, wird klar, dass eine vor die Ortszuordnung geschaltete Fouriertransformation (Euler-Satz) für die Realisierung von Abbildungen gefährlich ist. Auch wenn sich Spezialfälle konstruieren lassen, hilft der Verweis auf 1:1-Orthogonalität der Fouriertransformation hier nicht nennenswert weiter: wir betrachten nicht eine einzelne Zeitfunktion, sondern viele Frequenzfunktionen im Raum, deren Fensterbreiten sich zwangsläufig unterscheiden. Um qualitativ gleichwertige Bilder zu erhalten, sind zwingend „stationäre“ Signale gefragt.

Somit wird vielleicht verständlich, unter welchen Bedingungen extrem geringe Kanalzahlen möglich sind: bei breitbandigen Signalen oder Transformation mit geeigneten Zeitfunktionen. Eine Transformation mit diracartigem Wavelet wiese nicht diese Probleme der Fouriertransformation auf. Möglicherweise wird die akustische Bildgebung zu einem ungeahnten Siegeszug der Wavelets über die FFT führen. Entsprechend wurde mit der HIT zunächst ein Ansatz im Zeitbereich (ohne Umweg über FFT und sinusförmige Basisfunktionen) implementiert.

Eine ungleich kompliziertere Situation finden wir vor, wenn zur Erhöhung des Rauschabstands das Array-Pattern entfernt werden soll. Hier bietet der Zeitbereich schlechte Karten, ein Übergang in den Frequenz- (oder Wavelet-) Bereich scheint momentan noch unverzichtbar.

Verändertes Abtasttheorem

Die Arbeit mit Zeitfunktionen bringt die Möglichkeit, problemlos zeitaufgelöste, schnelle Bildfolgen zu berechnen. Praktisch können Bildraten weit über die halbe Samplingrate hinaus gewählt werden - das Nyquist/Shannon-Kriterium gilt hier offenbar nicht mehr.

Derzeitige Spitzenleistung sind Filme von Ultraschallobjekten mit 192.000 Bildern pro Sekunde, wobei die Zeitfunktionen ebenfalls nur mit 192 kS/s gesampelt wurden. Um nicht das reine Wellenfeld zu erhalten, wird über eine Anzahl von Samples integriert. Werden aus diesen Filmen punktuell Frequenzfunktionen extrahiert, zeigen sich i.a. keine spektralen Spiegellinien. Wie ist das möglich?

Wird angenommen, dass Aufnahmeorte der Zeitfunktionen *deutlich* verschieden und stochastisch „idealverteilt“ sind, so ist der theoretisch maximale Informationswert f_x einer Aufnahme mit k Kanälen und mit Samplerate f_s :

$$f_x = k f_s$$

Spektrale Spiegelungen treten in Analogie zu Nyquist ab $f_m < f_x / 2$ auf. Entsprechend beginnt

Bandspiegelung bei multikanaligen Aufnahmen abhängig von der räumlichen Anordnung spätestens bei der Frequenz f_m

$$f_m < k f_s / 2$$

Anders ausgedrückt: Bandspiegelung tritt spätestens ab einer Frequenz auf, die Kanalzahl mal halber Abtastrate entspricht.

Beispiel: Derzeitige Spitzenleistung sind Movies einer Ultraschallabstrahlung mit 192.000 Bildern pro Sekunde, wobei die Zeitfunktionen ebenfalls nur mit 192 kS/s gesampelt sind. (Um nicht das pseudo-Wellenfeld zu erhalten, wird über eine Anzahl von Samples integriert). Bandspiegelung ist bei 32 Kanälen zu erwarten ab

$$f_m = 192 \text{ kS/s} * 32 / 2 = 3,07 \text{ MHz}$$

Dementsprechend können im Beispiel theoretisch Bildraten bis zu 3 MHz berechnet werden.

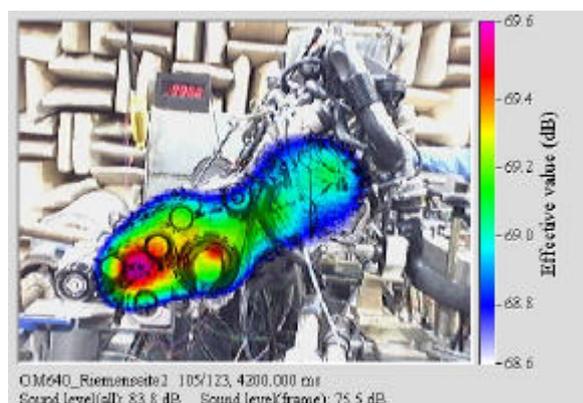


Abb.2 Motoraufnahme mit Ring32

Bedingt durch Gleichlauffehler der Kanäle und durch nichtideale Kanalanordnung wird dieser Wert praktisch aber nicht erreicht.

Praktische Ausführung, Aufbau

Praktische Belange bedingen Kleinheit, Handlichkeit und Zuverlässigkeit von Messgeräten. Da Gewicht, Volumen, Preis und Zuverlässigkeit direkt zur Kanalzahl proportional sind, liegen praktikable Lösungen im Bereich geringer Kanalzahlen. So konzentrierte sich das Augenmerk praktisch vorrangig auf die Ermittlung der unteren Kanalzahl-Grenze und eine sinnvolle Größenstufelung von Array-Grundkonstruktionen. Die Fragestellung problemangepasster Arraygrößen erleichterte die Entscheidungen: in den Innenraum eines PKW passt z.B. auch theoretisch kein 4-Meter Array hinein.

Von diesen Gesichtspunkten ausgehend wurde der gesamte Einsatzbereich zwischen Rasierapparat und Industrieanlage zwischen drei modifi-

zierbaren Grundtypen von Arrays (Cube, Ring und Star) aufgeteilt, Abb.3. Alle Arrays besitzen identische Steckverbinder und eine fest eingebaute Videokamera.

Die Grundausrüstung einer Akustischen Kamera besteht dabei aus dem Array mit Videokamera und Stativ, einem Datenrecorder, einem Notebook der Spitzenklasse, Transportkoffern und Kabelmaterial.

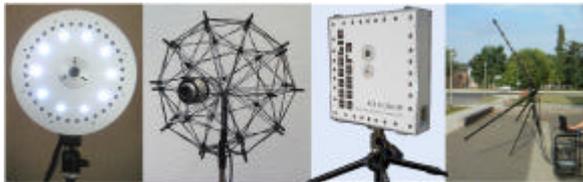


Abb.3 MicBus-Arrays: vlnr. Disc32, Cube32, Portable32, Star36

Cube, Ring und Star sind akustisch transparente Systeme. Star und Cube besitzen eine Rückwärtsdämpfung: hier durch sphärische Mikrofonanordnung erzielt. Hingegen "hört" der Ring nach vorn und hinten gleichgut. Dennoch stellt dieser aus Gründen guter Handhabbarkeit und maximaler Bildqualität das favorisierte Modell der Kunden dar.

Eine Ringanordnung in reflektierender Wand wird als sog. *Disc* angeboten. Durch den Wandeinbau wird das rückwärtige Feld gestört. Reflexive Systeme eignen sich für raue Industrieumgebungen, wie z.B. enge Gänge zwischen Verpackungsanlagen (Portable). Sie besitzen aber den Nachteil der Druckverdopplung bei hohen Frequenzen. Ergebnisse müssen von deren Frequenzgang befreit werden.

Das 32-Kanal System mit 35 cm Durchmesser ist für Rundum- Innenraummessungen auf kurze Distanz in PKW, aber auch in Kühlschränken oder anderen Geräten verwendbar. Es ermöglicht z.B. Knack- und Knaranalysen. Grenzen in der Anwendbarkeit bei der PKW-Innenraumakustik werden durch Innenraumresonanzen verursacht, die teils bis 2 kHz dominant sind. (Das Array sieht die Resonanzen statt die Quellen).

Ring & Disc

Auf einem Stativ stehend kann das leichte System mit 70 cm Durchmesser z.B. über einen Motor geschwenkt werden. Aufgrund akustischer Transparenz und Aliasing-Armut der Anordnung ist es praktisch qualitativ kaum zu übertreffen, siehe Abb.2. Typische Objektstände liegen im Bereich von ein bis drei Metern. Ein Nachteil der Ringanordnung ist, dass sie im Spiegel-Bildfeld liegende, rückwärtige Emissionen oder Reflektio-

nen als Quellen ansieht. Eine Ausführung auf reflexiver Platte (Disc) wird im PKW- Innenbereich eingesetzt, Abb.3.

Portable

Das 80 x 80 cm System stellt quasi einen Ring mit in der Ebene der Mikrofonmembranen liegender Reflexionsfläche dar. Es weist eine leichte Druckerhöhung um 5 dB im Bereich zwischen 1 kHz und 3 kHz auf. Durch die Reflexionsfläche wird das von hinten kommende Schallfeld stark gestört und spielt praktisch keine Rolle mehr. Das System ist vorzüglich für raue Industrieumgebungen geeignet, siehe Abb.4. In der Portable-Variante mit integriertem Datenrecorder ist vor Messbeginn nur die Verbindung zum Notebook und zum 230V-Netz herzustellen.

Star

Mit drei zwei Meter langen Armen ist dieses zusammenfaltbare System für Messungen über viel Dutzend Meter geeignet (Abb.3 und 5). Eine patentierte, räumliche Anordnung der Mikrofone dämpft das rückwärtige Feld um bis zu 21 dB, das System lauscht nach vorn. Da Sternanordnungen stets Fremdinterferenzen (Aliasing) betonen, wurde die Anordnung konservativ auf erkennbare, punktfreie Aliasingfiguren ("Sternstrahlen") optimiert. Es ist für den Außenbereich konzipiert. Einsatzschwerpunkt liegt bei Großmaschinen, Industrieanlagen, Zügen oder Flugzeugen, siehe auch die Presseseite⁴.



Abb.4 Filmausschnitt einer Geldsortiermaschine (C-Bewertung, Portable). Zu erkennen ist eine Emission von Münzen, die in den Geldbeutel fallen, sowie eine Emission am vorderen Aussortierkasten

Mikrophone

Wurden in der Startphase Messmikrofone be-

⁴www.acoustic-camera.com -> Presse

nutzt, so werden inzwischen speziell angefertigte, auf 0,5 dB vorselektierte, äußerst lineare Studiomikrofone (Frequenzgang 30 Hz bis 20 kHz +/- 1db, Dynamikbereich 35...130 dB) einer Markenfirma eingesetzt. Diese besitzen neben geringem Gewicht und Volumen eine Reihe praktischer Vorteile. So werden alle Kanäle z.B. über ein einziges, gemeinsames Kabel ("MicBus") versorgt. Optional können die Systeme in der Low Noise- Variante (LN) auch mit rauscharmen Kapseln bestückt werden, deren Linearität allerdings bescheidener ausfällt. Applikationen liegen zwischen (leisen) Kühlschränken und Windkraftwerken.



Abb.5 Windkraftanlage ebenerdig aus etwa 100 Metern Entfernung aufgenommen. Wir stehen im Wind hinter der Anlage. Der jeweils abwärts laufende Flügel „leuchtet“ an der Spitze stärker (A-Bewertung, max. 34 dB)

Mit den Standardkapseln ist es mit dem Ring32 bei Nachkalibrierung z.B. möglich, weit über die Spezifikation der Kapseln (max. 20 kHz) hinaus zu messen. So gelingt es noch, auf drei Meter Entfernung Ultraschallemissionen von PKW-Einparkhilfen bei 60 kHz aufzunehmen und in Ultraschalllupe aufzulösen.

Der Übergang zu Studiomikrofonen war von zwei Erkenntnissen begleitet:

a) Stabilität: Es gilt als Know-how-Domäne der Messmikrofonhersteller, die Kennempfindlichkeit durch spezielle Voralterung der Membranen zu stabilisieren. Beim Einsatz von Studiomikrofonen

entsteht ein schwer abwägbares Stabilitätsrisiko. Die Auswahl unserer Kapseln erfolgte deshalb in dieser Zielrichtung. Für die verwendete Kapsel lagen bei einer Schweizer Firma Testreihen vor, die über zwei Jahre eine nicht nachweisbare Alterung unter schwierigen Klimabedingungen bescheinigten. Dennoch muss mit dem Risiko der Alterung gerechnet werden. Die Software des Zeitfunktionsfensters zeigt deshalb auch die Effektivwerte der Zeitfunktionen an, somit besteht für den Kunden jederzeit die Chance, gemessene Schalldrücke mit einem zertifizierten Pegelmessgerät zu vergleichen. Im Falle von Abweichungen kann das System eingeschickt und neu kalibriert werden.

b) Handhabbarkeit: Als das erste System (Juni 2001) bestellt wurde, existierte nur ein mit Messmikrofonen bestückter Ring. Der Anschluss an den Datenrecorder erfolgte über Lemo-Stecker, die an die richtigen Positionen zu stecken waren. Dieser Aufwand wurde vom Erstkunden als unakzeptabel eingeschätzt. Daraus entstand die patentierte MicBus- Lösung, bei der alle Mikrophone über einen Stecker unverwechselbar gesteckt werden. Die Lösung forderte zwangsläufig den Übergang zu Studiokapseln heraus.

Datenrecorder

Die Summenabtastrate des Datenrecorders beträgt derzeit bei 40 Kanälen 123 Mb/s. Ein gleitender Trigger kann jede Aufnahme starten oder stoppen. Aufnahmen können per Knopfdruck gestartet oder gestoppt werden - dies ist wichtig, wenn nicht vorhersehbare Ereignisse kartiert werden sollen (z.B. Knacken eines Kühlschranks). Dafür werden die Daten zwischengepuffert in dRAMs zu 1 Megasample pro Kanal. Je nach eingestellter Samplerate von 192 kS/s bis 12 kS/s sind Abtastzeiten von 5 bis 83 Sekunden möglich. Die Verstärkung kann in 7 dB-Schritten über 112 dB gestellt werden. Abgespeichert werden 16 Bit pro Kanal. Ein spezielles Kalibriersystem sorgt für extreme Phasen- und Amplitudengenauigkeit bei allen Verstärkungen und Frequenzen. Eine Überprüfung des Datenrecorders kann mit einem Kurzschlußstecker an der Mikrofonschnittstelle erfolgen: dabei wird eine definierte Meßspannung an alle Eingänge parallel angeschaltet. Das Aufnahme-Fenster der Software lässt sich zwischen Schalldruck und Eingangsspannung umschalten, so kann die korrekte Funktion aller Kanäle einfach überprüft werden. Der Datenrecorder ist modular auf höhere Kanalzahlen erweiterbar, siehe auch Abb.6.

Videokamera

Alle Arrays besitzen eine automatisch bei jeder Aufnahme auslösende Videokamera. Verschiedene Kameras mit Bildraten bis zu 30/sec und

einstellbarer Auflösung zwischen 320x240 und 1280x1024 stehen zur Verfügung. Im Grundsystem inbegriffen ist eine VGA-Farbkamera mit 640x480 Bildpunkten. Die Software ist mit der Apertur der Kamera gekoppelt, im Standardfall werden akustische Bilder direkt auf die Bildöffnung der Kamera gerechnet.

Dabei entdeckten wir, dass die unterschiedlichen Arrays am besten die gleiche Kameraöffnung haben sollten. Bei einem 1:1 Kameraöffnungswinkel kartiert z.B. der Cube bei 50 cm Abstand Objekte von 50 cm Breite optimal. Diese haben meist eine höherfrequente, spektrale Verteilung, die zu den geringen Laufzeitdifferenzen passt. Mit dem Ring misst man auf Entfernungen im Meterbereich Objekte im Meterbereich optimal. Und mit dem Stern können es schon einige Dutzend Meter sein, entsprechend größer können die zu kartierenden Objekte und Wellenlängen sein. Dieser äußerst günstige Umstand wurde zwar erhofft, indes erwies sich sein Eintreffen als glückliche Fügung.

Kalibrierung

Mikrofon-Koordinaten und -Achsrichtungen sämtlicher Systeme sind Handvermessen. Es kommen auf 0,5 dB selektierte, spezielle Studiomikrofone mit extrem linearem Frequenzgang von 100 Hz bis 20 kHz zum Einsatz - eine Forderung zur Vermeidung von Phasenfehlern. Langzeitstabilität und Hochdruckverhalten von Messmikrofonen wurden höherer Flexibilität von Studiokapseln geopfert - ein gangbarer Kompromiss, wenn man voraussetzt, dass ein Akustiker bereits einen geeichten Schalldruckmesser besitzt, bevor er eine akustische Kamera kauft.

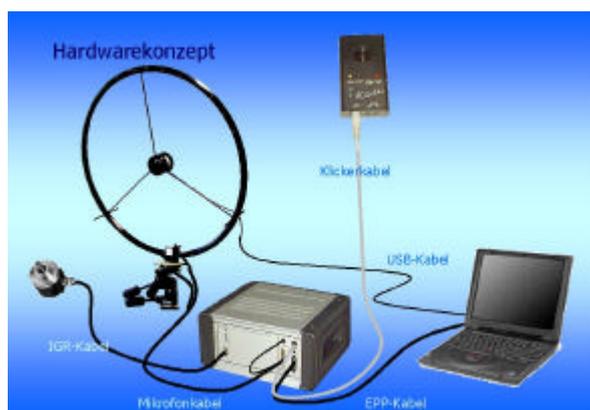


Abb.6 Gesamtsystem "Akustische Kamera" mit Ring32-Array

Alle Mikrofonparameter werden in einem Parameterfile gespeichert. Zusammen mit den Daten der Videokamera ist jedem Array ein solches File zugeordnet.

Für den Datenrecorder wurde ein spezifischer DSP-gestützter Messplatz entwickelt, der in zwei Stunden von allen Verstärkungsstufen im gesamten Frequenzbereich z.B. Phasenfehler und Offset protokolliert. Die Daten werden in einem Parameterfile gespeichert, sie dienen bei Aufnahme der Kompensation.

Softwarearchitektur

Ziel der Softwaregestaltung war eine einfache, intuitiv erlernbare Windows-Oberfläche sowie eine Auswertbarkeit aufgenommener Daten ohne Zusatzinformationen. Die Software unter Windows 2000/XP gliedert sich in Funktionen für Aufnahme und Berechnung. Alle notwendigen Informationen sind in einem File (*.chl) gespeichert. Dieses enthält Zeitfunktionen aller Kanäle, Mikrofon- und Kamerakoordinaten, Verstärker-, Kamera- und Mikrofonparameter, Messabstand sowie Videobild(er). Es wird nach Aufnahme gewöhnlich sofort auf der Festplatte des Auswerterechners gespeichert - steht damit für Nachrechnungen jederzeit zur Verfügung. Beim Laden eines chl-Files erscheint ein Zeitfunktionenfenster, welches zum Spektrogramm umgeschaltet werden kann. Interessiert z.B. ein Detail im *Spektrogramm*, so kann dieses mit einem Mauszug in Zeit- (dx) und Frequenzintervall (dy) selektiert werden.

Unter der rechten Maustaste stehen dann die Analysearten akustisches Bild, Movie, Spektralbild und Abrollbild zur Verfügung. Automatische Belichtungseinstellung (besser "Beschallungseinstellung") sorgt automatisch für plausible Bilder. So dauert eine Aufnahme nur wenige Sekunden. Der Nutzer kümmert sich weder um die Zuordnung des Videobildes noch um Probleme der Darstellung der Überlagerung von Video und akustischer Karte. Automatische Kantenextraktion, Filterbänke und A-Bewertung vervollständigen das System. Um ein Movie zu entwickeln, hat man lediglich Zeit- und Frequenzbereich im Zeitfunktionenfenster zu selektieren und Bildrate und Integrationsdauer pro Bild einzustellen (max. 192.000 Bilder pro Sekunde).

Für *spektrale Auswertungen* steht ein Spektralbild-Mode „Spectral Frames“ zur Verfügung. Hier interagieren zwei Fenster miteinander: Wird im (akustischen) Bildfenster ein Ort gewählt, erscheint im Komplementärfenster die zugehörige Frequenzfunktion, wird dort aber ein Frequenzbereich selektiert, erscheint im anderen Fenster das zugehörige Bild.

Sowohl *Filme* als auch *Spektralbildsequenzen* werden im AVI-Format gespeichert. Photos oder andere Bilder (auch Spektren) können als BMP oder JPG gespeichert werden. Rekonstruierte Zeitfunktionen von Orten lassen sich als WAV speichern. Interferenzwertmatrizen berechneter Sequenzen (Photo, Movie, Spektralbild) lassen

sich in speziellen Formaten speichern, so wird es möglich, z.B. ein Movie, welches lange rechnet, abzuspeichern und später wieder zu laden. Für Excel-Freunde können Interferenzwertmatrizen auch als ASCII-Files exportiert werden.

Für *Schulungszwecke* ist eine Live-Vorschau Option verfügbar. Samples werden zyklisch aufgenommen, an den Rechner übertragen und zum Bild verarbeitet. Damit können einfache Beugungs- und Reflektionsexperimente gemacht werden. Insbesondere Feldverschmelzungen bei unterschiedlichen Signaltypen oder Raumresonanzen, bei denen herumspringende Flecken zu beobachten sind, können studiert werden.

Messungen in der Praxis

Um eine neue Technik einführen zu können, bedarf es zahlreicher Messreihen. Aufgrund der regen Resonanz unter Wissenschaftsredakteuren ergab sich die Kundennachfrage nahezu von selbst. Seit 1998 wurden mehrere hundert Industriaufträge bearbeitet. Das dabei entstandene Datenmaterial wurde 2002 bereits auf 100 GB geschätzt, derzeit liegen weltweit Terrabyte an Daten vor. Die meisten Kunden legen Wert auf vertrauliche Behandlung der Daten, für die Öffentlichkeit steht deshalb wenig Material zur Verfügung. Auf der Homepage (acoustic-camera.com) sind deshalb auch nur bescheidene, eigene Ergebnisse zu finden. Mit den Kundendaten konnte die Ausrichtung der Entwicklung auf tatsächliche Bedürfnisse fokussiert werden.

Zum Vorgehen

Komplexe Maschinen besitzen komplizierte Ortskurven der Schallabstrahlung in den umgebenden Raum. So ist es wichtig, Aufnahmen stets aus unterschiedlichen Richtungen zu machen und auch mögliche Decken- und Bodenreflektionen in Erwägung zu ziehen. Bedienerpositionen sollten berücksichtigt werden. Die Software stellt eine spezielle Option bereit, mit der verschiedene (vorgerechnete) Schallbilder dadurch verglichen werden können, dass sie auf gleiche Druckskalen normiert werden. Am Beispiel des Baggers (Abb.7) ist zu erkennen, dass vier Ansichten sehr verschiedene Problemzonen erkennen lassen. Insbesondere die Rückansicht zeigt eine vergleichsweise starke Bodenreflektion, die in den Halbraum-Leistungspegel genauso wie andere Emissionen eingeht. Die vier Aufnahmen zeigen sofort Prioritäten der Produktweiterentwicklung. Man beginnt mit den lautesten Emissionen, in diesem Falle empfiehlt sich eine kritische Hinterfragung der unteren Motorverkleidung und des Motoreinbaus zur Reduktion der Bodenabstrahlung. Weitere, begleitende Aufnahmen können den Prozess erheblich verkürzen, oft erwiesen sich komplizierte, die Kosten-

rechnung des Produkts belastende Zusatzkonstruktionen als unwirksam oder sogar destruktiv.

Virtuelles Geräuschlabor

Hat man z.B. eine Zigarettenmaschine zu analysieren, die beim Akustiktest tausende Zigaretten pro Minute als Abfall produziert, wird Messzeit sehr kostbar. In diesem Fall wird man jede aufgenommene Zeitfunktion zunächst auf der Festplatte sichern. Oft beginnt die Auswertung erst am nächsten Tag, wenn die Erinnerungen bereits verblasen. Um eine Zuordnung zwischen bildlichen und akustischen Eindrücken zu bekommen, kann ein akustisches Bild deshalb abgelascht werden. Ein Lautsprecher-Icon gestattet ein "Hineinhören" in Bilder oder Movies. Für jeden mit der Maus gestreiften Bildpunkt wird live die Zeitfunktion rekonstruiert. So entsteht ein virtuelles Geräuschlabor. Insbesondere dort, wo eine Maschine nur kurze Zeit laufen kann, ist diese Option von unschätzbarem Wert.

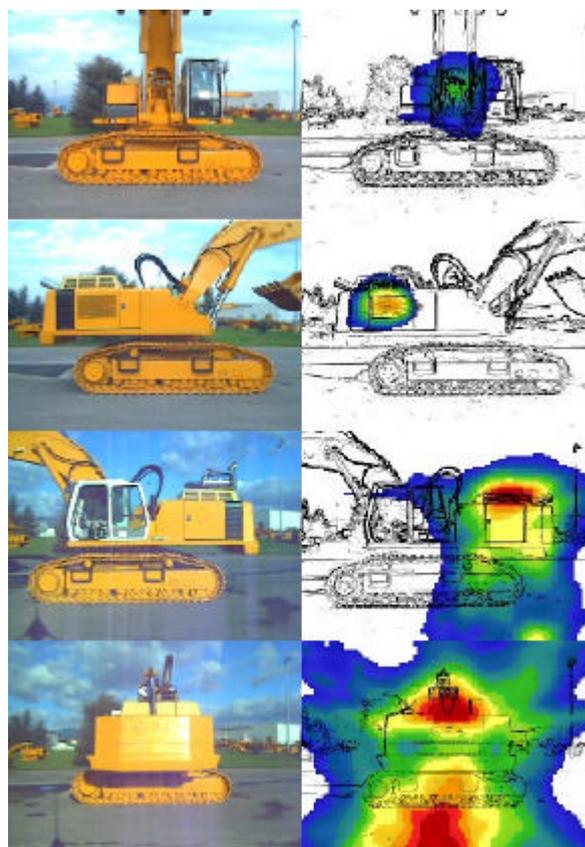


Abb.7 Vier A-bewertete, auf gleiche Schalldruckskala normierte Baggeraufnahmen. Man erkennt eine starke Bodenreflektion in der Ansicht von hinten (Star30, 7 m, 1 s)

Einsatz in der Produktentwicklung

Am Beispiel einer Geldsortiermaschine (Abb. 4)

konnte exemplarisch gezeigt werden, wie effizient der Prozess der Lärmreduktion forciert werden kann. An einem ersten Messtag wurde der Ist-Zustand von allen Seiten zunächst erfasst. Ausgehend von den Ergebnissen wurden etwa zwanzig konstruktive Änderungen vorbereitet. Drei Monate später wurden diese überprüft. Die Maschine wurde an diesem zweiten Messtag pausenlos umgebaut, Messreihen wurden aufgenommen um die effektivsten und kostengünstigsten Maßnahmen an verschiedene Problemstellen herauszukristallisieren. Nur drei Modifikationen hatten Bestand und flossen in die Serie ein. An einem dritten Messtag wurde der serienreife Prototyp abschließend überprüft. Die Emissionen waren je nach Richtung zwischen 8 und 12 dB(A) gesunken und lagen um ein bis zwei dB besser als die Zielvorgaben. Ein vierter Messtag konnte damit sogar entfallen. Die Messreihe zeigte, dass Lärmreduktion fortan wesentlich systematischer und gezielter erfolgen kann denn je zuvor.

Produktverbesserung

Wir erleben, dass für Maschinen teure Schallverkleidungen ohne nachweisbaren Effekt entwickelt werden. In einem Falle war eine Maschine mit chic designer Schallschutzhaube sogar lauter als vorher. Meist sorgt Körperschall-Anregung der Verkleidung für mehr Lärm. In jedem Falle sind Wirkungen in Schallbildern schnell zu erkennen.

Akustische Qualitätssicherung

Zulieferer stellen Komponenten für Endabnehmer bereit. Eine zu laute Komponente wird zumeist nur qualitativ mit dem Gehör erfasst. Stethoskop oder Pegelmessgerät helfen kaum weiter. Akustische Wechselwirkungen zwischen Komponente (z.B. Ölpumpe) und Gerät (Motor) wirken erschwerend. Forderungen an Zulieferer können mit subjektivem Empfinden oft nicht durchgesetzt werden. Mit akustischer Kamera können Bilder der Komponenten als Gütekriterium verwendet werden. Differenzbilder zwischen Soll und Ist können weiterhelfen. Je nach Problem können diese auch spektral bewertet werden. Die Motivation beim Zulieferer kann mit einem per Email versendeten Differenzbild erheblich forciert werden. Da automatisch auf das Kamerabild gerechnet wird, lassen sich sogar die Schalldruckskalen der Bilder vergleichen.

Problemzonen

Die Entwicklung der Technik brachte vollständig auf Anhieb geglückte Messreihen eher als Ausnahme. Akustische Phänomene wie Dipolstrahlung, Reflektion, Beugung, Raumresonanz oder Körperschall sind zwar im Prinzip bekannt, aber niemand kann im Voraus die Wirkung auf akustische Bildgebung einschätzen. Dazu helfen einzig

und allein praktische Versuchsreihen bei Mithilfe der ersten Kunden. Vielen Dank an Liebherr, an Porsche, an die BSHG und an die vielen Helfer der ersten Stunde. Kurz einige Impressionen:

☒ dB-Kontrast: Praktikabilität zwingt zu Kompromissen. So ist ein 70-cm-Array klein gegen eine 100 Hz Schwingung mit einer Wellenlänge von 3,4 Metern. Entsprechend gering sind die einkommenden Phasendifferenzen bei langen Wellen. Bei Betrachtung der Beispielbilder fällt oft eine sehr geringe Differenz zwischen Maximum und Minimum der Farbtabelle auf („Kontrast“). In diesen Fällen genügt ein Blick auf die Zeitfunktion der Signale: Wir bemerken dann, dass alle Kanäle auf einer einhüllenden, tieffrequenten Welle laufen. Mit anderen Worten: hier schieben tieffrequente Schwingungen großer Amplitude, deren Wellenlänge viel größer als die des Arrays ist, das Minimum der Farbtabelle nach oben.

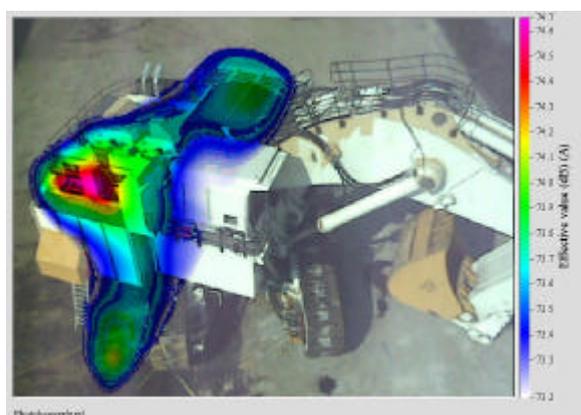


Abb.8 Akustisches Bild eines Großbaggers aus 22 Metern Höhe mit Bodenreflektion (Star36, A-Bewertung, eine Sekunde)

☒ Dipolstrahlung: alle Ortungsverfahren implizieren eine Korrelation der Elementarwellen in sich. Nun hatten wir eine Schlagbohrmaschine vor der Kamera. Aus 1,5 Meter kartiert der verwendete Ring32 sehr gut, allerdings füllte die Maschine nicht das Bildfeld. Also wurde der Messabstand verkürzt. Bei 75 cm verschmieren die Emissionen der Maschine plötzlich seitlich. Offenbar strahlt sie als "Drehpol", die Emission nach rechts besitzt in Bezug zur linksseitigen Emission entgegengesetzte Phase. Bei Annäherung reicht das Array relativ weiter um die Maschine herum und empfängt einen höheren Anteil decorrelierter Emissionen. In der Schulung lehren wir seither, bei Problemen den Abstand zum Objekt zu vergrößern!

☒ Reflektion (Abb.8): Die Geschichte der akustischen Photographie begann mit einer merkwürdigen Begebenheit. Wir suchten ein interessantes Objekt mit zum vorhandenen Array pas-

sender Wellenlänge und fanden eine Boeing 737. Bei bis zu 143 dB wurden die Aufnahmen gemacht, wir mussten uns vom Flugzeug weiter entfernen, weil Kanäle übersteuerten. Erst zuhause wurden die Bilder entwickelt, damals brauchte ein Photo noch Stunden Rechenzeit. Die meisten Aufnahmen waren trotzdem übersteuert. Eine Aufnahme war allerdings ungestört. Sie zeigte zwei Emissionen übereinander statt nebeneinander. Wir suchten eine Woche lang den Fehler in Algorithmus und Software: ohne Erfolg. Schließlich rief ich bei der Fluggesellschaft nochmals an, um die gute Qualität dieser einen Aufnahme zu hinterfragen. Man teilte mir mit, dass bei dieser Messung nur das linke Triebwerk lief.

☒ Beugung: Lauscht man mit einem 70 cm-Ring in einen schmalen Kühlschrank hinein, so werden die äußeren Mikrofone partiell durch die seitlichen Wände abgeschattet. Die Folge sind kurios im Movie herumwirbelnde Emissionsflecken. Der von hinten kommende Schall wird einerseits um die Seitenwände herumgebeugt, andererseits noch an der Gegenwand reflektiert. Erst nach Abschaltung der verdeckten, äußeren Mikrofonreihen gelangen solche Aufnahmen.

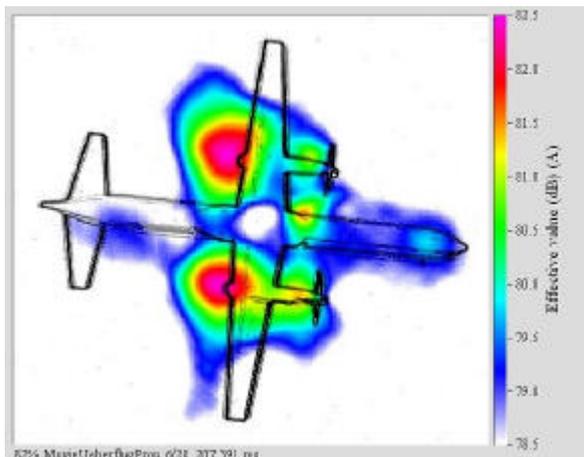


Abb.6 Verkehrsflugzeug in der Einflugschneise Berlin-Tegel beim Landeanflug (Star36, Hochpaß 500 Hz)

☒ Raumresonanz: Unterbodenuntersuchungen sind bei PKW-Herstellern ein Dauerthema. Der Ring scheint einen besonderen Reiz auszuüben. Schon mehrmals waren wir gehalten, solche Aufnahmen zu machen. Kein Widerspruch hilft dann. Unser Wissen sagt uns, dass man mit einer Spiegelreflexkamera keine Aufnahmen in der Ölwanne eines laufenden Motors machen würde. Leider wissen wir noch nicht, was akustische Bildgebung leistet. Gewöhnlich findet sich eine Grube mit einer Lambda-Resonanzstelle um 390 Hz. Die Resonanz der Grube kann von irgendwo gepumpt werden - das mit der Kamera

zu fotografierende Stehwellenfeld aber steht unverrückbar zwischen den Wänden der Grube. (Anstriche Raumresonanz-2 und Raumresonanz-3 würden kleine, schallharte Experimentallabors und Säle mit schwingendem Spezialboden erörtern).

☒ Körperschall: Die meiste Zeit verbringen wir mit dessen Beseitigung. Ein zu kartierendes Objekt zeigt dabei keine Emissionen. Dafür aber Blechwände der Hilfsantriebe, Kompressoren oder Lüfter, die sich am Bildrand rund um das zu untersuchende Objekt befinden. Nachdem diese Quellen in stundenlanger Arbeit abgedeckt sind, findet man interpretierbare Ergebnisse. Allerdings auf einem ganz anderen Pegelniveau.

Serviceinformationen

Unsere Aufmerksamkeit gilt dem Aufbau eines weltweiten Vertriebs- und Servicenetzes. Dazu sind qualifizierte Spezialisten auszubilden und Infrastrukturen zu schaffen. Auf der Homepage sind Dienstleistungszentren zu finden. Hier erhalten Sie fachlich fundierte Auskünfte sowie Dienstleistungsangebote.

Nachwort

An dieser Stelle meinen Dank allen Helfern, vorrangig aber denen, die schon in der Zeit vor dem Erfolg halfen. Vielen Dank an die Mitarbeiter, die großes leisteten, die Damen und Herren der ersten Stunde: Sabine Höfs, Carsten Busch, Mark Zöllner, Tan Nguyen, Dirk Döbler, Swen Tilgner, Patrick von Pflug. Die Entwicklung der Technologie wurde mit Mitteln des BMWi für marktvorbereitende Industrieforschung sowie für industrielle Gemeinschaftsforschung sowie von vielen Firmen gefördert. Besonderer Dank an die Mitarbeiter der Porsche-AG und der Liebherr-AG für vielfältige Unterstützungen der Arbeiten. Nicht zuletzt Dank der Geschäftsführung und dem Vorstand der GFal und meiner Frau Gudrun, die doppelt half und hilft.

Gerd Heinz, Berlin im Januar 2003

(Aktualisiert und ergänzt im Mai 2005)

Literatur

- [Brandst01] M. Brandstein, D. Ward: *Microphone Arrays*. Springer-Verlag, 2001, ISBN 3-540-41953
- [Fink97] M. Fink: Time reversed acoustics. *Physics today*. Am. Inst. of Physics. March 1997, pp. 34-40
- [Hald95] J. Hald: Use of spatial transmission of sound fields techniques in the automotive industry. Brüel&Kjaer, Technical review no. 1-1995
- [Johnson93] D.H. Johnson and J.E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, Prentice Hall, 1993
- [Heinz93] G. Heinz: Neuronale Interferenzen. Manuskript, 1993-96, 300 S.
- [Heinz96] G. Heinz: [Hei et al. 97] Heinz, G., Höfs, S., Busch, C., Zöllner, M.: Time Pattern, Data Addressing, Coding, Projections and Topographic Maps between Multiple Connected Neural Fields - a Physical Approach to Neural Superimposition and Interference. *Proceedings BioNet'96*,

- GFaH-Berlin, 1997, pp. 45-57, ISBN 3-00-001107-2
- [Heinz99] G. Heinz, Döbler, D., Nguyen, T.: Acoustic Photo- and Cinematography basing on the H-Interference Transformation (HIT). ASA'99: 137th meeting of the Acoustical Society of America, 2nd Conv. European Acoustics Ass. and 25th German Acoustics and DAGA Conference at TU Berlin, Germany, March 14-19, 1999
- [Heinz00] Heinz, G.: Space-time Relations in Wave Interference Systems with Attention to Nerve Networks. Regular paper #1402-028 for the Second International ICSC Symposium on Neural Computation NC'2000, May 23-26, 2000 at the Technical University of Berlin
- [Heinz01] Heinz, G.: Abstraction Levels in Neuro- Computation - from Pattern Processing to Wave Interference. Invited plenary lecture and regular paper #1504-436 for the International ICSC Symposium on BIOLOGICALLY INSPIRED SYSTEMS (BIS'2000) as part of the ICSC Congress on Intelligent Systems and Applications (ISA'2000) December 11-15, 2000, University of Wollongong, Australia
- [Heinz02] Heinz, G.: Introduction to Interference Networks. Invited plenary speech and regular paper. First International ICSC Congress on NEURO FUZZY TECHNOLOGIES. January 16-19, 2002, Havana, Cuba
- [Heinz02b] Heinz, G.: Akustische Photo- und Kinematographie. Hermann von Helmholtz-Symposium 2002 „Fühlen oder messen?“, PTB, Braunschweig, 29. Oktober 2002, Eingeladener Vortrag.
- [Hyv99] A. Hyvärinen: Survey on Independent Component Analysis. Neural Computing Surveys (2) 1999, ICSI Berkeley, pp. 94-128
- [Ishim92] A. Ishimaru: Theory of Unequally Spaced Arrays. IRE Trans. Antennas Propagat. vol. AP-10, Nov. 1992, pp. 691-702
- [Jutten88] Jutten, X.C., Herault, J., Guerin, A.: An Independent Components Analyser Based on Adaptive Neurometric Network. AI and Cognitive Sciences, Manchester Press, 1988
- [Lashley] K. S. Lashley: In Search of the Engram. Soc. of Exp. Biol. Symp., no.4, Cambridge University Press, 1950, pp. 454-480
- [Lübbig] H. Lübbig: The Inverse Problem. Akademie-Verlag Berlin, 1995, ISBN 3-05-501689-0

Autor:

Dr. G. Heinz, GFaI, Rudower Chaussee 30, 12489 Berlin

Tel: (030) 6392-1652/ -1600, Fax: -1602

heinz@gfai.de <http://www.acoustic-camera.com>