

Schall orten - verschiedene Lokalisierungstechniken im Vergleich

Gerd Heinz, GFaI Berlin, heinz@gfai.de

Werkzeuge zur Lokalisierung von Geräuschquellen gewinnen über die Jahre immer mehr an Bedeutung. Heutige NVH¹⁾ Ingenieure haben eine Vielzahl verschiedener Techniken zur Geräuschquellenlokalisierung verfügbar. Leider ist nicht immer klar, welche Technologie für welchen Zweck die geeignete ist. Der Aufsatz präsentiert einige populäre Tools mit deren spezifischen Möglichkeiten. [MM2003].

Prinzipiell gibt es sehr verschiedene Herangehensweisen bei der Problemanalyse:

1. Man tastet die Objekt Oberfläche sehr nah ab (Stethoskop, Mikrophon) und notiert Druck und Spektren der einzelnen Orte (Kap.2, 3)
2. Mit bestimmten Methoden können Intensitäten in der Wirkung auf gedachte, ferne Flächen errechnet werden (Kap.1, 4)
3. Wir können die Bewegungsgeschwindigkeiten der Oberfläche sehr genau protokollieren (Kap.5, 6), diese haben aber i.a. wenig mit Emissionswerten zu tun.
4. Mit der akustischen Kamera (Kap.8) wird eine direkte Ermittlung von Quellen aus ferner Sicht möglich. Neuerdings überträgt man diese Idee auch auf ältere Techniken (Kap.7).

1. Klassische Methoden

In den letzten Jahren wurde eine differentielle Mikrophanordnung zur Messung der Sound Intensity recht populär. Wird der Pegel zweier, eng benachbarter Mikrophone subtrahiert, so erhalten wir die Möglichkeit einer Phasendetektion, die eine Richtung zur Quelle anzeigt. Ist die Quellstruktur allerdings sehr komplex, lohnt sich ein Rückgriff auf das gute, alte Stethoskop, oder auf dessen elektronischen Ersatz bestehend aus Mini-Datenrekorder und Mikrophon, der eine vom Ste-

thoskop bekannte Arbeitsweise nachzubilden gestattet.

Mit diesen Möglichkeiten gewappnet sind wir zwar schon recht gut in der Lage, stationäre Quellen zu bewerten. Allerdings nur aus nächster Distanz. Das generelle Problem aller Nahfeld-Messungen ist, daß man nur schwer ermessen kann, wie stark eine Emission in das Fernfeld reicht: Je nach Strahlertyp nimmt die Emission sehr stark (Kugel $1/r^2$), weniger stark (Zylinder $1/r$) oder gar nicht ab (Platte). Dazu kommen noch Einflüsse der Schwingungsrichtung (Dipol) und des Feldes (Maxwell, Wellengleichung, Fernfeld/Nahfeld). Jeder reale Strahler hat für jede Frequenz eine andere Ortskurve - und genau die gilt es, schnell für unser Objekt zu finden. Dabei ist dem realen Objekt selten anzusehen, welchen Teil jeder einzelne Quellort zur Gesamtemission beiträgt und wie stark dieser Teil mit wachsender Entfernung abnimmt. Wir wissen nicht, wie dieser in die Ferne wirkt, entdecken wir ihn dort nicht anhand eines charakteristischen Frequenzverlaufes.

Auch ist die Analyse sporadischer, instationärer Geräuschquellen kaum möglich, da wir mit einem Mikrofon nicht gleichzeitig eine Vielzahl von Orten beobachten können.

2. Schalldruckkartierung mit einem Einzelmikrophon

Angenommen, wir haben stationäre Quellen zu kartieren. Mit einem einzelnen Mikrophon können wir über dem Objekt ein gedachtes, virtuelles Gitter abtasten. Für jeden Meßpunkt können wir zugehörige dB-Werte, Frequenz- oder Zeitfunktionen aufzeichnen.

Diese Methode erscheint einfach, hat aber ihre Tücken. Im Falle einer dreidimensionalen Oberfläche variiert die Lautstärke in Abhängigkeit vom jeweiligen Abstand zur Hüllfläche, auf der wir unser Mikrophon bewegen. Das Ergebnis unserer Untersuchung variiert folglich mit der Wahl der Hüllfläche oder der Meßpunkte gravierend.

Und in den meisten Fällen ist ganz und garnicht klar, welchen Einfluß diese Variation auf das Ergebnis hat. So mißt der Akustiker aus der Nähe

¹⁾ NVH: Noise-Vibration-Harshness

niemals die Emission des Objekts allein, stets hat die Wahl des Abstands der Meßpunkte zur Maschine (die bei einer Änderung an der Maschine oft neu festgelegt werden müssen), sowie die Wahl der Hüllfläche einen gravierenden Einfluß auf das Ergebnis.

Wird noch dazu in einem Raum gemessen, der Reflektionen, Beugungen oder Raumresonanzen nicht ausschließt, bekommen die Ergebnisse oft einen zweifelhaften Wert. Auch wird das Ergebnis immer ungenauer, je weiter wir die Mikrofone vom Objekt entfernen.

Um eine Reproduzierbarkeit zu erhöhen, ist es oft sinnvoll, einen XY-Scanner zu benutzen, der automatisch das Meßgitter abfährt.

*Wesentlicher Vorteil dieser Methoden ist ein
+ ultimativ geringer Preis*

Nachteile sind:

- ⊃ *hoher Zeitaufwand*
- ⊃ *teils unsichere Ergebnisse*
- ⊃ *nur für stationäre Geräusche geeignet*
- ⊃ *Objektstand beeinflusst das Ergebnis*
- ⊃ *begrenzte Ortsauflösung*

Um einen Einzelvorgang zu kartieren, reicht diese Technik meist nicht zu, es sei denn, eine Synchronisation mit dem zu beobachtenden Ereignis kann vorgenommen werden.

Praktisch ist die Anwendbarkeit damit auf ideal stationäre Ereignisse (Windkanal, Motoren, Getriebe) beschränkt.

Legen wir die Meßpunkte auf eine Kugel oder Halbkugel rund um das Objekt, so ist die heraus tretende Schalleistung bestimmbar.

3. Nahfeld-Mapping mit Mikrophon-Arrays

Um *instationäre Geräusche* zu kartieren, ist es insbesondere bei sporadisch auftretenden Einzelereignissen erforderlich, an vielen interessierenden Orten gleichzeitig aufzunehmen. Aber auch Meßzeit kann damit gespart werden, ein Vorteil dort, wo Meßobjekte nur kurz zur Verfügung stehen. Man benötigt für jeden Meßort einen Mikrophonkanal. Auch hier wird das Ergebnis immer

ungenauer, je weiter wir die Mikrofone vom Objekt entfernen.

Zeichnen wir den Schalldruck, die Zeitfunktion oder die Frequenzfunktion aller Mikrophone auf, so lassen sich daraus die verschiedensten Analysen erstellen. Abhängig von der Berechnungsmethode sind Schalldruckkarten oder Intensitätsplots üblich, die aus der Array-Ebene auf die Maschine projiziert werden. Auch kann eine Schallleistungsapproximation unter Annahme eines Strahlermodells (Monopol, Dipol...) erfolgen, wenn hinreichend viele Kanäle hinreichend dicht das Meßobjekt umlagern, und der umgebende Raum reflektionsarm ist. Bei komplexen 3D-Objekten ist es oft üblich, ein Modell der Hüllfläche der Meßpunkte entsprechend der Lautstärke einzufärben.

Befinden sich die Mikrophone hinreichend dicht am Objekt, können auch korrelierte Quellen (Displays, Transformatoren, Brems scheiben, Musikinstrumente) erfasst werden. (Entfernen wir uns weiter vom Objekt, so verschmelzen korrelierte Wellenzüge oft, und ergeben gebeugte Wellenfronten, die abenteuerlich kartieren). Allerdings sind korrelierende Signalquellen meist stationär: ein spannendes Einzelmikrophon würde dafür (vom erhöhten Zeitaufwand abgesehen) das Gleiche leisten.

Der Preis für die Zeitersparnis ist vergleichsweise sehr hoch. Wir benötigen spezifisch an das Objekt angepasste Arraykonstruktionen. Verschiedene Maschinen benötigen verschiedene Arraygrößen. Eine Videokamera kann i.a. nicht ins Array integriert werden, weil es zu dicht am Objekt angebracht ist.

Positiv:

- + *instationäre Geräusche*
- + *Zeitersparnis gegenüber Einzelmikrophon*
- + *korrelierte Schallquellen*

Negativ:

- ⊃ *keine Video-Überlagerung denkbar*
- ⊃ *Meßabstand geht in Ergebnis ein*
- ⊃ *teuer und aufwändig*
- ⊃ *unflexible, feste Arraygrößen*
- ⊃ *große Datenmengen fallen an*
- ⊃ *begrenzte Ortsauflösung*

4. Nahfeld-Holography

Die Ortsauflösung eines Arrays läßt sich steigern, wenn die Laufzeit- oder Phaseninformation jedes Signals berücksichtigt wird. Mittels Nahfeld-Holographie lassen sich Schalldruck, Teilchengeschwindigkeit oder Schallintensität für parallele Ebenen zur Meßebeine bestimmen. Mittels Helmholtz-Integraltransformation ist die Emissionswirkung auf eine gedachte Hülle im Fernfeld berechenbar [JH95].

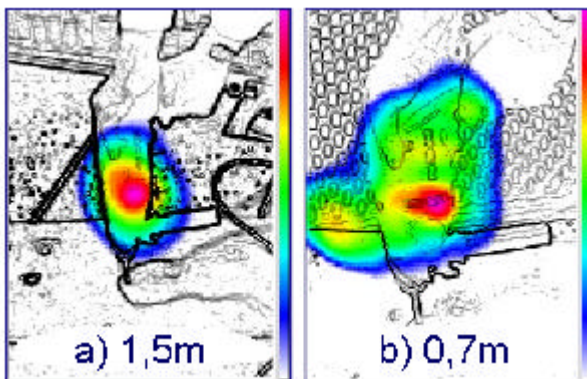


Fig. 1: Dipolartige Emission einer Bohrmaschine. a) aus 1,5 Meter Entfernung, b) aus 0,7 Meter Entfernung kartiert

Zur Nutzung der Phaseninformation werden in sich *kohärent wirkende Quellen* vorausgesetzt. Wir erwarten, daß eine Quelle zur selben Zeit direkt auf alle Mikrophone einwirkt (Huygensches Prinzip). Das kann leider bei vielen Maschinen nicht vorausgesetzt werden, da 3-dimensionale Strukturen stets einige Mikrofonkanäle abschatten oder reflektieren oder beugen. Die Folgen sind Laufzeitfehler, diese führen zu Amplitudenfehlern im Bild und schlimmstenfalls zu Emissionsflecken im leeren Raum, siehe Fig.1.

Wenn eine Quelle dipolartige, anti-phasische Informationen an verschiedene Mikrofone liefert, versagen phasen- oder laufzeitgebundene Rekonstruktionsverfahren völlig. Ein Algorithmus kann nicht wissen, ob eine Quelle koherente Signale an die verschiedenen Mikrophone abgibt.

Leider schwingen reale Objekte oft dipolartig: während sie auf der einen Seite saugen, drücken sie auf der anderen Seite. Das eine Mikrophone empfängt dann ein positives, das auf der anderen Seite liegende Mikrophone ein negatives Signal.

Praktisch besitzen alle rohrförmigen Quellen einen mehr oder minder starken Dipol- oder Drehpol-Charakter. Wenn deren Größe kleiner als die Arraygröße ist, kartieren diese matschig: Motorgehäuse, Elektromotoren, Getriebegehäuse, Schalldämpfer, Turbo, Auspuffrohre, Pumpen etc.. Sie sind deshalb für phasenbezogene Auswertungen im Nahfeld nicht geeignet.

Man kann die Dipoleigenschaft bei einer Schlagbohrmaschine erkennen. Diese kartiert aus einer Entfernung von 1,5 m (Fig.1a) sehr scharf. Verringert man den Abstand (Fig.1b), verschmiert die Emission mehr und mehr in horizontaler Richtung.

Praktisch hat jede Maschine verschiedene dipolartige Quellen. Deshalb liefert Nahfeldholographie die besten Ergebnisse für Monopole (Lautsprecher). Bei realen Quellen versagte die Technik in Vergangenheit zu oft.

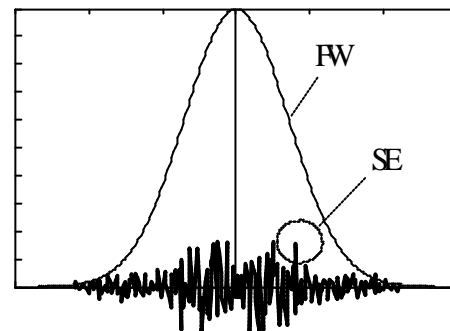


Fig. 2: Einzelemission SE in einem großen, integrierend wirkenden Fourierfenster FW

Hatten wir ursprünglich das Mikrophonarray eingeführt, um auch *instationäre Quellen* kartieren zu können, so hat die Nahfeldholographie einen weiteren Nachteil: Deren Berechnung findet im Fourierbereich statt. Jeder Fourierkoeffizient wird dabei von einem Zeitfenster FW integriert, welches in Abhängigkeit von der Länge des Zeitintervalls und der Zahl der Stützstellen instationäre Ereignisse SE mehr oder minder *hinwegglättet* und deren zeitliche Zuordnung unschärfer macht, Fig.2. Der Umweg über die Fouriertransformation vermindert also zumindest teilweise die Zeitauflösung und die Ortungsqualität.

Verursacht durch den theoretischen Hintergrund, wie auch durch praktikable Bauausführung sind übliche Verfahren zudem meist auf *ebene* Array-Anordnungen beschränkt.

Positiv:

- + *gutes Mapping für Monopole (z.B. Lautsprecher)*
- + *Korrelierte Schallquellen können optimal getrennt werden*

Negativ:

- ⊖ *keine Dipole oder Multipole*
- ⊖ *keine Videobild-Überlagerung*
- ⊖ *Array von Objektgröße abhängig*
- ⊖ *ebene Arrays*
- ⊖ *keine 3dimensionalen Objekte*
- ⊖ *rechenzeit-intensive Algorithmen*

5. Laservibrometrie

Im Unterschied zu schallaufnehmenden Systemen nehmen Laservibrometer die Bewegung eines Punktes einer Oberfläche als Zeitfunktion $x(t)$ auf. Leider aber ist eine Beziehung zwischen einer einzelnen Bewegungs- Zeitfunktion $x(t)$ und dem entstehenden Schalldruck $p(t)$ ohne Kenntnis des gesamten Feldes, des Strahlertyps oder der Geometrie des Strahlers nicht herstellbar.

Wird eine XY-Ablenkeinheit benutzt, lassen sich *stationäre oder synchronisierbare Geräusche* auf ganzen Oberflächen scannen. Diese Methode ist insbesondere dort bestens geeignet, wo korrelierte Wellen erzeugt werden, deren Wellenlänge größer ist als der Abstand der erzeugenden Orte: so z.B. bei Körperschalluntersuchungen an Bremsscheiben oder Motorgehäusen.

Geeignet für:

- + *korrelierte Wellen*
- + *Körperschalluntersuchung*
- + *beeinflusst nicht die Quelle*

Negativ:

- ⊖ *nur für stationäre Geräusche*
- ⊖ *Bewegungsverlauf statt Schallemission*
- ⊖ *der maximale Gradient dx/dt ist begrenzt*

6. Laservibrometrie-Arrays

In Analogie zur Mikrophon-Diskussion ist das Signal zur Lokalisierung *instationärer Geräusche* gleichzeitig an vielen Punkte abzutasten und

aufzuzeichnen. Dafür wird ein teures Vibrometer-Array benötigt, mit dem parallel mehrere Punkte der Oberfläche abgetastet werden.

Geeignet für:

- + *instationäre Signale*
- + *korrelierte Wellen*
- + *Körperschalluntersuchung*
- + *beliebige Flächen scanbar*

Negativ:

- ⊖ *teuerste Technologie*
- ⊖ *Oberflächenbewegung statt Schall*
- ⊖ *der maximale Gradient dx/dt ist begrenzt*

7. Fourierbasierte Fernfeldanalyse - (Inverses) Beamforming

Problem bei allen Nahfelduntersuchungen ist der Einfluß des Meßabstandes auf das Ergebnis. Entfernt man sich weiter vom Objekt, geht die bauliche Tiefe des Objekts immer weniger in das Ergebnis ein, die Quellen erscheinen kohärenter. Sämtliche Mikrophone erhalten ungebeugte Signale.

Allerdings verschmelzen Wellenfronten (frequenzabhängig) umso mehr miteinander, je weiter entfernt wir beobachten - dies gilt insbesondere für zueinander *korrelierte Signale*. Auch "sehen" wir dann zusätzliche Reflexionen, Beugungen oder Brechungen.

Fernfeldmessungen besitzen damit eine *neue Qualität*: *Der Mikrophonabstand ist jetzt so groß, daß sich Tiefenstrukturen des Objekts praktisch nicht mehr negativ bemerkbar machen* - die große Unbekannte der Nahfeldmessungen ist weitgehend eliminiert.

Auch können wir jetzt von der Position aus messen, die für den Lärmkonsumenten eigentlich relevant ist: Maschinen können aus der Sicht des Bedieners kartiert werden, Fahrzeuge aus Sicht der Fußgänger etc..

Wir verlassen nun also die Position der Bestimmung der Quellen am Objekt und "sehen" das Objekt fortan aus der Sicht des Imittenden, des Schall-Konsumenten: Wie nimmt der den Schall eigentlich wahr?

Der Name Beamforming (*in frequency domain*) entstand mit den verschiedenen Phased Arrays (RADAR, SONAR). Diese werden durch Phasendifferenzen eines an den verschiedenen Aktoren liegenden Sinussignals gesteuert. Man bildet so einen Strahl (Beam). Kehren wir dieses Prinzip um (Inverses B.), und nutzen schmalbandige Filter (Fourierkoeffizienten), um die Phaseninformation zu extrahieren, so können wir daraus wieder die Richtung bestimmen, aus der das Signal kam.

Interessanterweise wird diese Technik, wie auch die Holographie, aktueller denn je, seit die Erfolgsgeschichte akustischer Kameras, einer dem Beamforming ähnlichen Technologie, 1996 mit ersten akustischen Bildern begann.

Problem des Beamforming ist *für niedrige Kanalzahlen* (Systempreis) der pro Kanal auf $0^\circ \dots 360^\circ$ eingeschränkte Phasenhub ϕ , der sich in einem adäquaten, begrenzten Schwenkwinkel des Strahls (Beam) dokumentiert, siehe Fig.3. Damit entsteht eine Abhängigkeit zwischen Wellenlänge, Bildgröße oder Schwenkwinkel α und Arraygröße. Die Arraygröße muß bei geringer Kanalzahl künstlich in der Dimension der Wellenlänge gehalten werden, um für jede Frequenz einen identisch großen Schwenkwinkel zu erhalten.

Problematisch sind insbesondere hohe Frequenzen, hier wird der mögliche Schwenkwinkel sehr klein. (Beispiel: Zu ortende Frequenz 10 kHz, Wellenlänge 3,4 cm, Arraysize 34 cm: maximaler Schwenkwinkel um $\pm 3^\circ$, Bildfeld ca. 6 cm auf 20 cm Entfernung).

Bei eingeschränktem Wellenlängenbereich (z.B. bei Ultraschall-Geräten und Phased Array Antennen) spielt dieses Problem keine Rolle. Sollen hingegen Geräteemissionen im Bereich zwischen 100 Hz (3,4 m) und 100 kHz (3,4 mm) analysiert werden, wird der maximale Mikrofonabstand d zwischen Millimetern und Metern liegen müssen, um für alle Frequenzen denselben Schwenkwinkel α zu erhalten. Zunächst wurde dieses Problem so gelöst, daß für jeden Frequenzbereich Mikrofontypen geeigneten Abstands gewählt werden, so wählt man bei großen Wellenlängen beispielsweise nur jedes n -te Mikrofon, um d zu erhöhen. Dabei wird eine Anzahl von Mikropho-

nen nicht effizient genutzt (Constant Directivity Beamforming) [WD01].

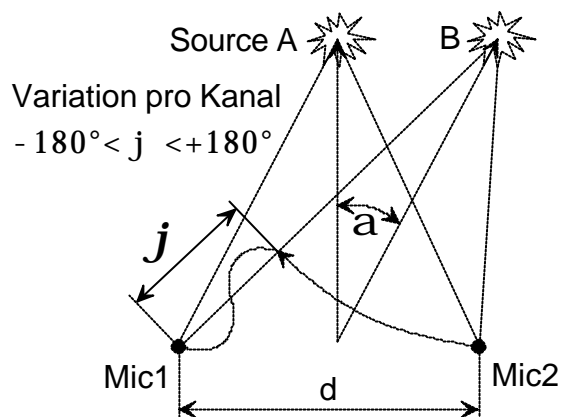


Fig. 3: Bei Wellenlängen im Bereich von 3,4 Meter bis 1,7 Zentimeter (100 Hz bis 20 kHz) werden Bildöffnung a und Mikrofonabstand d frequenzabhängig

Bei den sog. Superdirectivity-Verfahren und Optimum-Beamformers [VT02] wird das Problem durch Verzicht auf eindeutige Zuordnung des Quellorts gelöst. Es entstehen im Prinzip *mehrdeutige Emissionen als zusätzliche, vermeidbare Fehlerpattern des Arrays*, die in einem Folgeschritt wieder beseitigt werden müssen.

Der Übergang in den Frequenzbereich bereitet hier ebenfalls das Problem der *tauschbaren Unschärfe* zwischen Zeit und Frequenz bei der Analyse instationärer Signale, die Zeitauflösung bleibt begrenzt.

Spricht man heute von "(inverse) beamforming in time domain" so ist meist die im folgenden erläuterte Interferenztransformation gemeint.

Positiv:

- + *Einfluß der Objektiefe und -gestalt wird verringert bei 3D-Oberflächen*
- + *unterschiedliche Objektgrößen können mit einem Array analysiert werden*
- + *dipolartige Quellen*
- + *Video-Überlagerung möglich*

Negativ:

- *beschränkter Frequenzbereich oder*
- *beschränkte Zeitauflösung*
- *keine Einzelemissionen*
- *hohe Kanalzahl*
- *keine korrelierten Quellen*

8. Interferenztransformation "Acoustic Camera"

Die der akustischen Kamera zugrunde liegende Technologie lieferte 1996 als sog. H-Interferenztransformation (HIT) erste Schallbilder von unbeweglichen Objekten. Vorher gab es bereits akustische Abrollbilder z.B. von an Stab-Arrays vorbeifahrenden Zügen.

Unabhängig von akustischen Methoden im Bereich des Neurocomputing geboren, liefert die Methode maximale Zeitauflösung für jede Entfernung zwischen Fernfeld und Nahfeld. Dies war wohl die Ursache für den Durchbruch dieser Technik. Obwohl 1996 nur 16 Mikrofone zur Verfügung standen, wurden damit die ersten, akustische Bilder und Filme geschaffen.

Die Methode wird inzwischen von Mitbewerbern kopiert und unter dem Begriff (*inverse*) *beamforming in time domain*²⁾ vermarktet (1996, als die Methode entstand, erschien dieser Begriff bereits belegt).

Um die Probleme von Beamforming und Holographie zu überwinden - eventuelle Restriktionen des zu kurz integrierenden Fourierfensters, die hohe Kanalzahl, das Problem der Dipole, der Fehlerpattern des Arrays oder der ineffizient nutzbaren Mikrophone und um einen Zugang zu bewegten Schallfilmen zu schaffen - arbeitet sie³⁾ *als erstes System weltweit im Zeitbereich*.

Erst damit rentiert sich der Übergang vom Einzelmikrophon zum Array, erst mit der akustischen Kamera können *instationäre Geräusche* ohne jegliche Einschränkung analysiert werden, können beliebige Bildfeldgrößen ohne jegliche Einschränkung gerechnet werden, entfällt ein Zusammenhang

zwischen Kanalzahl, Arraygröße, Frequenz und Schwenkwinkel. Dabei wird ein Algorithmus genutzt, der auf der Heinz'schen Interferenztransformation (HIT) aufbaut.

Algorithmische Idee ist es, ein pseudoinverses Wellenfeld zu konstruieren, dessen Interferenzintegrale die Quellenkartierung maximal gut approximieren. Der Algorithmus realisiert eine zeitnegative Rekonstruktion bei gleichzeitig zeitpositiver Arbeitsweise. Er kann als eine idealisierte, optische Projektion angesehen werden. Approximierte Ergebnisse werden auf sog. Äquivalenten Schalldruck (*Equivalent Noise Pressure - ENP*) ausgegeben, die Farbe im Bild entspricht dem Schalldruck einer Punktquelle im reflexionsfreien Raum.

Das Verfahren kommt aus einer dreidimensionalen Umgebung, entsprechend können Mikrophon-Array, aber auch Zieltargets dreidimensional gestaltet sein.

Eine interessante Eigenschaft der Methode besteht darin, daß Interferenzintegrale nicht zwischen Photo und Wellenfeld unterscheiden. So ist es möglich, Photos oder Zeitlupenfilme des pseudoinversen Wellenfeldes bis zur Abstrakte der Zeitfunktionen (momentan 192.000) zu machen. Dazu ist lediglich die Angabe der Bildzahl pro Sekunde sowie eine Integrationszeitangabe erforderlich.

Um einen A-bewerteten Film oder ein Photo zu machen, sind keinerlei Fouriertransformationen vorzunehmen, damit wird viel Rechenzeit gespart. Aus algorithmischer Sicht werden Frequenztransformationen erst nach der Orts-Rekonstruktion ausgeführt. Verglichen mit Beamforming realisiert die Technik durch fehlende, algorithmische Schwachstellen mit weniger Kanälen i.a. vergleichbare Ergebnisse, die noch dazu beliebig zeitlich auflösbar sind.

So existieren eine Reihe von 30- bis 36-Kanal Aufnahmen (Windkraftwerke, Großbagger, Flugzeuge - siehe Homepage), deren Qualität bis heute von keinem konkurrierenden Beamforming-System (bis zu 160 Kanäle) gezeigt wurde.

²⁾ im-pulse, B&K Österreich, Febr. 2004, S.5: PULSE -Beamforming: "Beamforming oder auch in manchen Kreisen akustische Kamera genannt"

³⁾ www.acoustic-camera.com - the term "Akustische Kamera" was 1997 introduced for the machine, that creates worlds first acoustic images - for our new GfAI-technology by the science reporter of the "Berliner Zeitung", Dr. Michael Ochel, [BZ97]

Insbesondere die vergleichbar *geringe Kanalzahl* birgt für den Anwender eine Reihe von Vorteilen: Rechenzeit wird gespart, die Zuverlässigkeit steigt, Gewicht, Volumen und Kosten des Datenrecorders und des Arrays sinken.

Auch die Filmberechnung selbst wird einfacher. Im Vergleich zu Beamforming oder zu Holographie erhalten wir große Rechenzeiteinsparungen - ein entscheidender Faktor für die Anwendbarkeit der Technik.

So war die Technik seit 2000 als erste in der Lage, Berechnungen eingeschränkt in Realzeit durchzuführen. Dieser Umstand ist für Schulungskurse nützlich: life kann mit Raumresonanzen, Reflektionen oder Beugungen experimentiert werden, ein bislang unbekannter, akustischer Horizont eröffnet sich.

Die eingebaute Videokamera und der automatische Überlagerungsalgorithmus machen die Bildaufnahme fast zum Kinderspiel.

Schlußendlich sollte nicht vergessen werden, daß es diese Technik war, mit der 1996 (weltweit) die ersten akustischen Standbilder und die ersten Movies produziert wurden [Hz96]. Auch konnten damit erste Schallreflektionen visualisiert werden [B737].

Der Begriff "Akustische Kamera" wurde übrigens von einem Wissenschaftsjournalisten geprägt: 1997 verwendete der BZ-Reporter Dr. Ochel diesen Begriff erstmalig [BZ97]. Die Zielrichtung "Akustische Photo- und Kinematographie" wurde für die GfAI-Technik 1999 erstmals angegeben [ASA99].

Zur Hannover Industrie-Messe 1999 wurde weltweit erstmals eine *automatische Videoüberlagerung* vorgeführt, die seither zur Standardausrüstung zählt [HI99].

Wie bereits im Abschnitt Beamforming erwähnt, verschmelzen korrelierte Wellenfelder in wachsender Entfernung, die Information geht auf dem Weg verloren (Displays, Transformatoren,

Bremsscheiben). Auch die Akustische Kamera kann hier nur bedingt abhelfen, eine Kartierung kann z.B. dadurch erfolgen, daß Objektteile abgedeckt werden, um korrelierte Signalteile abzutrennen.

Die weltweit patentierte Technologie ist das erste System, für welches Arrays für praktisch alle relevanten Industrieobjekte angeboten werden. Um sehr unterschiedliche Größen zwischen Rasierapparat und ICE untersuchen zu können, stehen derzeit *fünf unterschiedliche Arrays* in unterschiedlichen Entfernung- und Objektgrößenbereichen zur Verfügung, alle mit integrierter Video-Kamera und einfachstem Interface (MicBus/USB):

- *Disc32* *10 cm...1,5 m (reflexiv)*
- *Cube32* *30 cm...1 m (3D)*
- *Ring32* *1...3 m*
- *Portable32* *1...3 m (reflexiv)*
- *Star36* *10...300 m*

Eine Reihe interaktiver Tools gestattet eine aufregend neue Vielfalt von Interaktionen zwischen Zeit, Raum und Frequenz, wie z.B. ein virtuelles Geräuschlabor, Live Preview, Lokale Dekomposition, Bild-Spektrum-Interaktion, Zeit-Film-Interaktion etc.

In den letzten Jahren versuchen Beamforming-Teams, die Begriffe "Akustische Kamera" oder "akustische Photographie" zu vereinnahmen ^{4) 5) 6)}. Auch nutzen praktisch alle Teams für Beamforming in Time Domain eigentlich die Interferenztransformation in rekonstruktiver Art (unter diesem Begriff wurde das Verfahren 1996 erstmals veröffentlicht).

Positiv:

- + *Einzelereignisse erstmals voll auflösbar*
- + *keine Einschränkungen im Zeitbereich*
- + *keine Einschränkungen im Frequenzbereich*
- + *keine Einschränkungen in der Geometrie der Arrays*
- + *beliebig großer Öffnungswinkel (3D)*

⁴⁾ <http://www.tpd.tno.nl/smartsite463.html>

⁵⁾ <http://www.eurekalert.org/features/doi/2001-08/dnnl-nac062002.php>

⁶⁾ http://www2.dlr.de/EN-AT/Das_Institut.htm
http://213.198.75.194/de/html/ueber_uns/mobilitaet/drehscheibe/aktiverschallschutz/,
http://www.zeit.de/archiv/2002/52/T-Flugl_8arm

- + *vollautomatische Video-Überlagerung*
- + *kleinste Kanalzahlen (32...36)*
- + *geringster Preis, Gewicht, Volumen*
- + *schnellste Bildberechnung*
- + *eingeschränkte Echtzeitberechnung*
- + *reale Quellen*
- + *Arrays für viele Applikationen und Objektgrößen*
- + *3D-Koordinaten inherent*
- + *keine Fourier-Probleme*
- + *schnellste Array-Technologie*
- + *wenig Probleme mit räumlich tiefen Objekten*
- + *flexible Objektgrößen*
- + *Frequenzbereich⁷⁾ 100 Hz bis 90 kHz*

Negativ:

- ⊖ *aufgrund der physikalischen Feldverschmelzung nur bedingt für korrelierte Quellen geeignet*

Literatur

- [ASA99] Heinz, G., 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. Abstract in: Acta Acoustica, p. S363, paper 4pPAa12, S. Hirzel Verlag, Suppl. 1, Jan/Feb. 1999, Vol. 85. ISSN 1436-7947
- [B737] <http://www.acoustic-camera.com/presse/contents/geo.htm>
- [BZ97] <http://www.acoustic-camera.com/presse/contents/bz.htm>
- [HI99] http://www.acoustic-camera.com/presse/contents/dirk_99.jpg
- [Hz96] <http://www.acoustic-camera.com/historie.htm>
- [JH95] Hald, Joergen: Spatial Transformation of Sound Fields (STSF) Techniques in the Automotive Industry. B&K Technical Review No.1 –1995. pp.1-23
- [MM03] Maroquin, Marc: A Comparison of Seven Different Noise Identification Techniques. B&K North America, 2003-01-1690
- [VT02] Van Trees, H.: Optimum Array Processing. Wiley, 2002
- [WD01] Brandstein/Ward: Microphone Arrays. Springer 2001

⁷⁾ Frequenzbereich ist Array-spezifisch definiert