

Virtuelle Wellen und akustische Bildgebung

Gerd Heinz, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik (GFai) Berlin

Zusammenfassung

An der GFai wird seit 1994 eine Technik zur passiven, bildgebenden Darstellung von Schallquellen entwickelt. Damit konnten in den Jahren 1994 bis 1997 weltweit erste Schallbilder und Filme akustischer Objekte im Niederfrequenzbereich gezeigt werden. Seit 2001 sind akustische Kameras kommerziell verfügbar. Die als „akustische Kamera“ bezeichneten Systeme erfreuen sich insbesondere in der Motorentwicklung der Autoindustrie großer Beliebtheit. Inzwischen sind über 50 Systeme weltweit im Einsatz, Tendenz steigend. In Deutschland existiert ein Dienstleister- Netzwerk¹. Im



Beitrag werden kurz die Grundlagen des Verfahrens sowie Applikationen der mehrfach preisgekrönten Technik vorgestellt.

Abb.1: Blau gleich leise und rot gleich laut: Das Schallbild eines Windkraftwerkes zeigt aus einer Entfernung von 150 Metern nur noch die Schall-emission der Flügelspitzen. Mit den Ohren können wir aus dieser Entfernung kaum noch ein Geräusch wahrnehmen, die Emission liegt unter der Rausch-grenze.

Im Gegensatz zur traditionellen Akustik kam der hier dargestellte Ansatz als physikalische Interpretation neuronaler Netze daher (später wurden die physikalisch orientierten, neuronalen Netze in Interferenznetze umbenannt, um Verwirrung zu vermeiden). Daher erfolgt die Berechnung im Zeitbereich. Nichtlineare Transferfunktionen prägten den Beginn anstelle von Wellenzahlen. Dies erklärt die Überraschung, als ich 1994 mit acht Kanälen das erste akustische Standbild² unter ungünstigsten Bedingungen erhielt³. Da strikt im Zeitbereich gearbeitet wurde, konnten bereits 1996 erste, akustische Hochgeschwindigkeitsfilme (50.000 Bilder pro Sekunde) entstehen. Das sekundäre Wellenfeld konnte zeitaufgelöst betrachtet werden, was sich als enormer Vorteil herausstellte.

Auch bei MBB/Daimler und am Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gab es interessante Pionierarbeiten⁴ zu diesem Thema.

1. Prinzip der akustischen Bildgebung

Aus der Radar- und Ultraschalltechnik wie aus der Erderkundung sind ungezählte inverse Verfahren bekannt, deren Grundlage immer auf dem gleichen Prinzip beruht. Neben dem Global Positioning System (GPS) arbeiten Tsunami- oder Blitzwarnsysteme nach vergleichbaren Algorithmen.

¹ <http://www.acoustic-camera.com/service.htm>

² <http://www.gfai.de/~heinz/historic/akustik/radio/radio.htm>

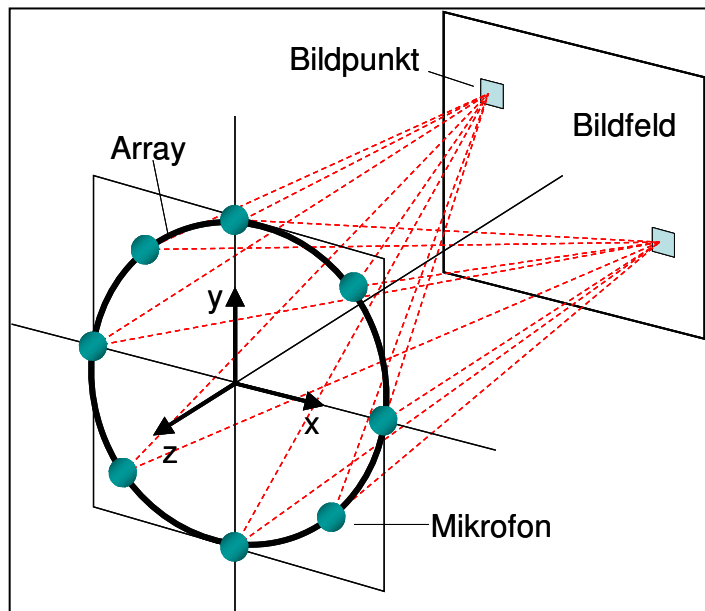
³ <http://www.gfai.de/~heinz/historic/history/index.htm>

⁴ http://www.gfai.de/~heinz/publications/papers/2005_Wien.pdf

Kennzeichen der GFal- Entwicklung ist die parallele Aufzeichnung der Zeitfunktionen mehrerer, in einem Array angeordneter Mikrofone (8...32, später bis 256), wobei die Mikrofone exakt vermessene Koordinaten haben. Die Berechnung des akustischen Bildes geschieht dann in PC.

Wellen breiten sich in homogenen Medien etwa kugelförmig aus. Treffen Schallwellen verschiedener Orte auf ein Mikrofon, so entsteht ein Ausgangssignal als Superposition (summative Interferenz) der verschieden verzögerten Wellen, siehe Abb.2.

Abb.2 Unterschiedliche Entfernungen r_{ik} zwischen Bildpunkten i und Mikrofonen k führen zu verschiedenen Verzögerungen, mit denen ein Signal eines Ortes (Bildpunktes) in unterschiedliche Kanäle eingeschrieben wird; Basis der Interferenztransformation.



Grundidee der akustischen Bildgebung ist es, diese Wellen zeitlich rückwärts zum Ausgangsort zu leiten, um sie dort wieder zur Interferenz zu bringen. 1993 führte ich für dieses Verfahren den Begriff der Interferenz-Rekonstruktion⁵ ein.

Wir alle kennen das Prinzip von einer optischen Abbildung: dort werden die Wellen von einer Linse laufzeitproportional verzögert. Wo die Linse am dicksten ist, entsteht die größte Verzögerung. Die Wellen interferieren zeitlich vorwärts und spiegelverkehrt auf einem Schirm. Die Abbildung entsteht dort, wo alle Wellen gleichzeitig, d.h. in Eigeninterferenz (gleicher Wellenindex) zusammentreffen.

Nun kann man dieses Prinzip umkehren: Man lässt die Wellen zeitlich rückwärts interferieren. Maximale Interferenz entsteht dann an den Quellorten (Fremdinterferenzen vernachlässigt).

Der Unterschied zwischen Rekonstruktion und Projektion wird deutlich: zeitlich vorwärts integriert (Optik, Beamforming, Ultraschalltomographie) entstehen *spiegelverkehrte* Abbildungen, zeitlich rückwärts integriert (virtuell) entstehen *seitenrichtige* Bilder oder Filme. Diese Abbildungsgesetze wurden 1993 entdeckt und parallel in die neuronale wie in die akustische Welt übersetzt.

2. Algorithmische Details: Interferenzrekonstruktion

Eine Zeitfunktion, die von einem Quellort hin zu verschiedenen Mikrofonen strebt, wird aufgrund verschiedener Weglängen bei diesen i.a. zu unterschiedlichen Zeiten ankommen. Jeder Quellort besitzt deshalb eine typische Maske (Interferenzvektor, Vektor der Verzögerungszeiten), mit der er in die aufgenommenen Kanäle schreibt. Wird hernach die Maske des Quellortes hergenommen und über die Kanäle geführt, so bemerken wir in der auf die Kanalzahl normierten Maskensumme die Zeitfunktion unseres Quellortes wieder.

⁵ <http://www.gfai.de/~heinz/publications/annualreports.htm>

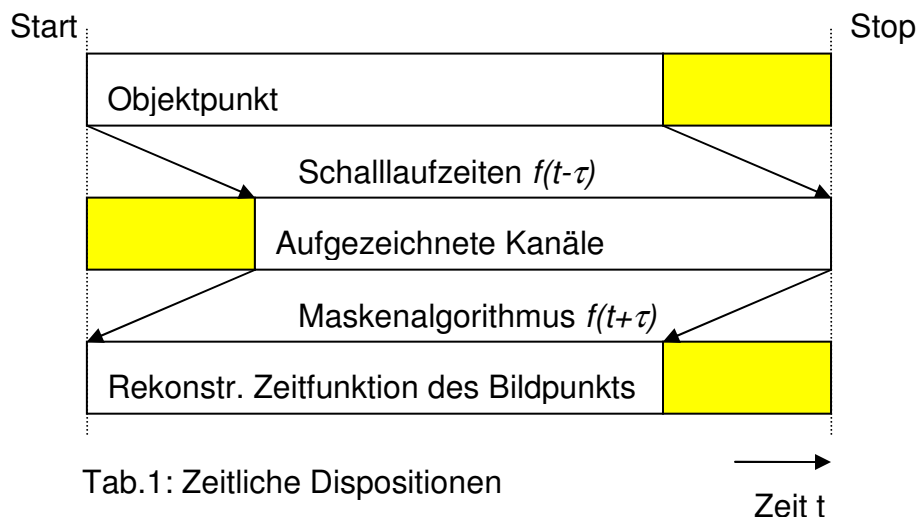
Der Momentanwert des Schalldrucks p_i eines Bildpunkts i wird bei der Kartierung auf äquivalenten Schalldruck (*Equivalent Noise Pressure, ENP*) mittels Interferenz-Rekonstruktion aus der Interferenzsumme der Schallpegel der Zeitfunktionen in Abhängigkeit vom sphärischen Abstand r_{ik} zwischen Bildpunkten i und Mikrofonen k gebildet, wobei Zeitfunktionen p_k als Abtastfunktionen vorliegen. Im Gegensatz zum Delay- and- Sum- Beamforming⁶ werden die aufgenommenen Zeitfunktionen mit Delays τ_{ik} kompensiert. Das heißt, sie werden nicht nach rechts, in Richtung der Zeitachse, sondern nach links, gegen die Zeitachse verschoben, so dass ein Ansatz der Form $p_k(t + \tau_{ik})$ entsteht:

$$(1) \quad p_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n p_k(t + \tau_{ik}) \text{ mit}$$

$$(2) \quad \tau_{ik} = \frac{r_{ik}}{v} = \frac{1}{v} \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}$$

Die Zeitfunktion eines einzelnen Quellortes wird folglich ideal rekonstruiert. Emittieren mehrere Quellorte, so ist die Approximation umso genauer, je mehr Kanäle benutzt werden. Wir bezeichnen (1), (2) und (4) als Kartierung auf äquivalenten Schalldruck, neudeutsch: *Equivalent Noise Pressure, ENP*.

Die Interferenzrekonstruktion entstand 1993 aus der Erkenntnis einer Schwachstelle des zeitlich vorwärts $[f(t-\tau)]$ definierten Beamforming: Die Interferenzrekonstruktion gestattet im Gegensatz zur Projektion (Beamforming) eine Rekonstruktion der Bildpunkte ohne Überbestimmtheit⁷, d.h. die Abbildung ist nicht nur in Achsnähe scharf. Es entsteht eine Addition statt einer Subtraktion im Argument von (1) mit der Folge, dass rekonstruierte Zeitfunktionen zeitgleich zum Original entstehen, obwohl die aufgezeichneten Kanäle bedingt durch die Schalllaufzeit zeitlich nachlaufen, Tab.1.



Tab.1: Zeitliche Dispositionen

Identische Koordinaten von Objektpunkt und Bildpunkt vorausgesetzt (das ist aufgrund einer Objektiefe nur bei 3d-Modellen, aber nur näherungsweise bei 2d-Fotos der Fall), garantiert die Interferenzrekonstruktion, dass auch sehr schnelle Abläufe bedenkenlos gefilmt werden können, die akustische Bewegung wird zeitlich exakt auf

⁶ Siehe Johnson, D.H.; Dudgeon, D.E.: Array Signal Processing. Prentice Hall, 1993, Glg. 4.1

⁷ Heinz, G.: Neuronale Interferenzen, 1993 siehe <http://www.gfai.de/~heinz/publications/NI/index.htm>

den laufenden Zeitlupenfilm abgebildet. Um Kanäle oder Bildpunkte frequenzbewertet darzustellen, werden folglich zentrierte Filter oder FFT-Varianten benötigt.

In Applikationen mit großen Distanzen (z.B. Fernaufnahmen, Geologie) wirken u.U. erhebliche Schalllaufzeiten. Um die Ergebnisse speicherplatzschonend abzulegen, können dort die rekonstruierten Zeitfunktionen der Bildpunkte p_i zeitlich verzögert (rechts verschoben) um eine mittlere Signallaufzeit τ_i gemittelt in den Ergebniskanal des Bildpunktes an die Stelle $p_i(t - \tau_i)$ geschrieben werden. Gleichung (1) lautet dann:

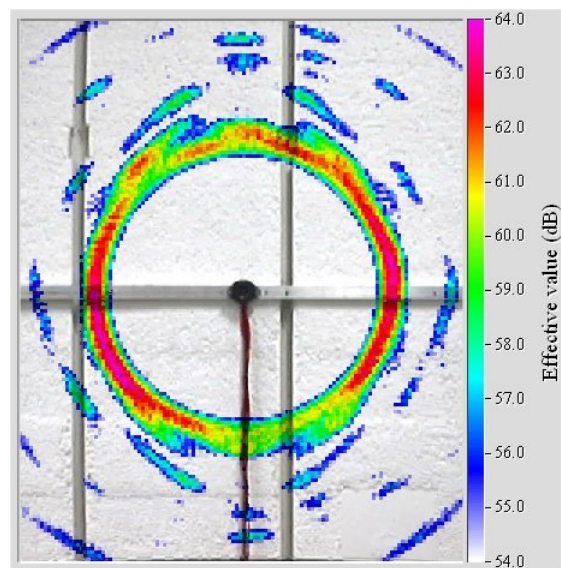
$$(3) \quad p_i(t - \tau_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n p_k(t + \tau_{ik}).$$

Notieren wir abschließend einige Eigenschaften. Die Bildpunkte modulieren bei der Interferenzrekonstruktion ein sekundäres Wellenfeld. Virtuelle Wellen laufen einwärts bei innerhalb der (Kugel-) Welle liegender Front.

Abb.3: Beispiel eines einwärts laufenden Wellenfeldes mit innenliegender Frontwelle

Der Zeitbezug des Momentanwerts des Schalldrucks ist für jeden berechneten Bildpunkt verschieden, Gleichzeitigkeit zwischen Bildpunkten im berechneten Schallbild oder Schallfilm (2d) ist aufgrund einer Tiefenstruktur des Objekts i.a. nicht vollständig erreichbar. Zeitliche Integration liefert den Effektivwert des Schalldrucks für jeden Bildpunkt im betrachteten Intervall T , das Interferenzintegral:

$$(4) \quad \tilde{p}_i(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sqrt{p_i^2(t)} d\tau.$$



Eine für sehr kurze Intervalle T im Film beobachtbare *Sekundärwelle* ist nicht zu verwechseln mit der ursprünglichen, vom Objekt kommenden *Primärwelle*. Nur die Interferenzintegrale beider Wellenfelder ähneln sich unter geeigneten Umständen (hohe Kanalzahlen). Dies gilt für (zeitprogressive, spiegelbildliche) Projektion wie für (zeitinverse) Rekonstruktion gleichermaßen, wobei bei der Projektion (Beamforming) das aus der Optik bekannte Phänomen der axialnahen Bildschärfe dadurch entsteht, dass die Abbildung nicht ohne Überbestimmtheit lösbar ist ($k = d+1$, d : Dimension, k : Kanalzahl). Folglich kann auch eine optische Projektion (ein Bild) nur als eine vergleichbare Approximation angesehen werden, auch hier steht nur das sekundäre, hinter der Linse entstehende Wellenfeld zur Verfügung, dessen Interferenzintegral gespiegelt erscheint. Bei der (zeitinversen) Interferenzrekonstruktion hingegen entsteht das Überbestimmtheitsproblem gar nicht erst. Hier kann bei beliebiger Kanalzahl sauber projiziert werden. Dies war die wesentlichste Idee, die 1994 zu einem ersten akustischen Bild, und folgend zu akustischen Filmen und zur Akustischen Kamera führte.

3. Modulare Technik

Von 100 Hz (3,4 m) bis 100 kHz (3,4 mm) umfasst der hörbare Akustikbereich eine große Varianz von Wellenlängen. Entsprechend sind an den Einsatzfall angepasste Arrays erforderlich. Modulare Arrays mit genormter Schnittstelle (MicBus) gestatten

den Einsatz der Technik für unterschiedlichste Belange der Technik mit Objektgrößen und Entfernungen im Bereich von 30 cm bis 300 m.

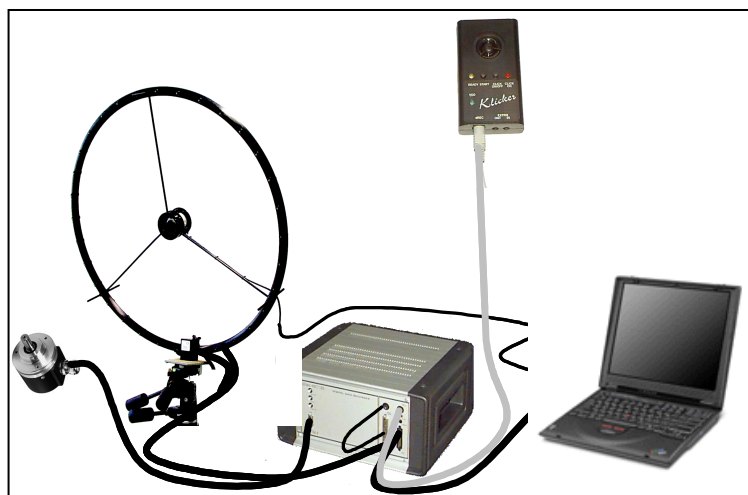
Eine 1999 eingeführte, automatische Bildüberlagerung der akustischen Karte auf das Kamerabild führt zu einer Besonderheit: Wir verwenden eine Videokamera mit Festobjektiv, Objektentfernung und Bildfeldgröße stehen damit in festem Zusammenhang. Damit ist es zur Gewinnung der physischen Koordinaten des Bildfeldes und der zu berechnenden Pixel nur nötig, die Objektentfernung manuell vorzugeben, der Rest geschieht automatisch. Entfernung und Objektgröße stehen dabei in festem und für die akustische Kartierung vorteilhaften Zusammenhang.



| Disc | Cube | Ring | Star |
|-----------------|---------------------|--------------------|------------|
| 32 Kanäle | 32...120 Kanäle | 28...120 Kanäle | 36 Kanäle |
| Ø 35 cm | Ø 35 cm | Ø 35...75...140 cm | Ø 3 m |
| d = 30...100 cm | 30...100 cm, 3-dim. | 1...3 m | 10...300 m |

Abb.3: Arrays stehen für unterschiedlichste Anwendungen und Entfernungen (d) zur Verfügung, alle verfügen sie über eine integrierte Videokamera und identische Schnittstelle (MicBus). Die Arrayspezifikation wird mit einem speziellen File geladen.

Bislang sind alle Systeme zunächst mit einem (akustisch offenen) Ringarray ausgeliefert worden. Die Mikrofone sind kreisförmig in einer Ebene angeordnet. Sie lauschen nach vorn und hinten gleichermaßen. Das von hinten kommende Schallbild wird zum von vorn kommenden addiert. Folglich sind für die Applikation des Rings



akustisch saubere Umgebungen ohne Reflektionen von hinten gefragt.

Abb. 4: Standard-System, bestehend aus Mikrofonarray, Datenrecorder, PC (Notebook) sowie Testschallgeber (Klicker). An einen digitalen Sondersignaleingang ist hier ein Drehgeber (IGR) angeschlossen.

Für akustisch brisante Umgebungen stehen reflexive Ar-

rays zur Verfügung, die das rückwärtige Schallfeld zerstören (Disc, Portable).

Eine Zwischenstellung nehmen offene Arrays mit sphärisch angeordneten Mikrofonen ein (Cube, Star). Hier wird die Rückwärtsdämpfung über die räumliche Anordnung erreicht.

Das Nebensprechen der Arrays ist auf den jeweiligen Einsatzfall optimiert. Die Mikrofonanordnung der Arrays definiert deren Fremdinterferenzverhalten (Nebenkeulen in der Ortskurve, Aliasing). Die hier entwickelten und patentierten Optimalformen (Ring, Star, Cube) bilden einen industrietauglichen Kompromiss zwischen guter Handhabbarkeit, geringem Aliasing und strahlenförmiger Geometrie der Ortskurve.

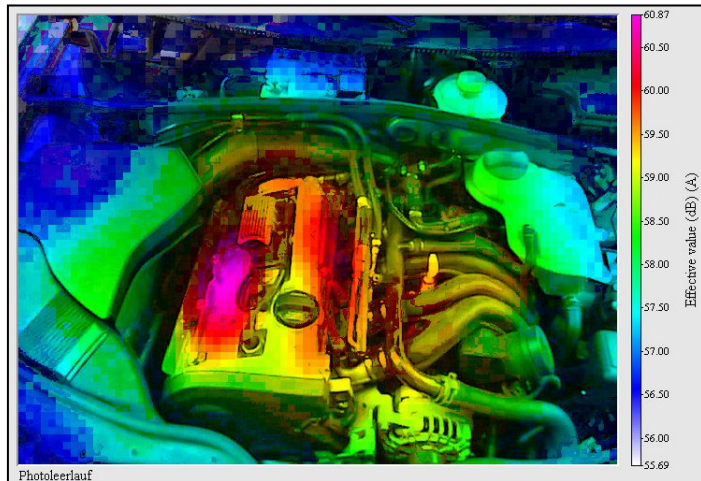


Abb.5: A- bewertetes Schallbild eines PKW-Motors. Man erkennt Orte mit hohen Emissionswerten.

Diesem in der Akustik kaum diskutierten Umstand kommt hohe, praktische Bedeutung zu, das Array sollte möglichst keine autonomen Flecken in der Ortskurve ausbilden. Diese können zu Fehlinterpretationen der Bilder oder Filme führen.

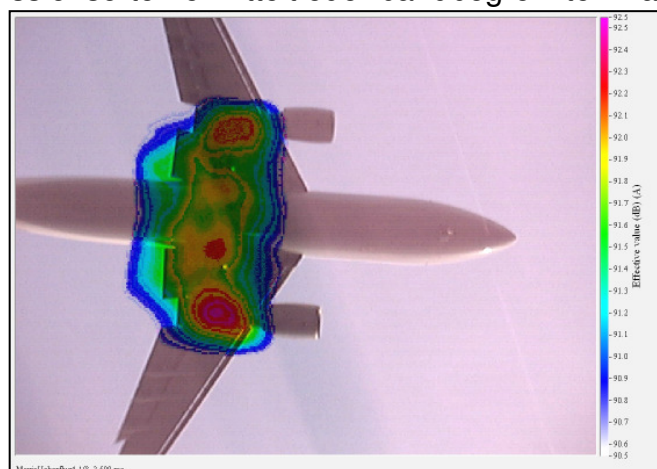
Besonderer Wert kommt im industriellen Einsatz auch der

schnellen Verfügbarkeit der Technik zu. Innerhalb von Minuten ist ein System aufgebaut, siehe Abb.4. Aufgenommen werden gewöhnlich nur wenige Sekunden, der abgespeicherte Datensatz (*.chl) enthält Videobild, Zeitfunktionen aller Kanäle, sämtliche Koordinaten von Mikrofonen und Videokamera sowie alle Initialisierungsparameter der Messung und des Recorders. Damit ist es ohne zusätzliche Angaben möglich, eine Aufnahme in Japan zu machen, per Email nach Deutschland zu senden und hier in allen Variationen fehlerfrei zu berechnen.

Die Software ‚Noiselmage‘ gestattet die Berechnung von Standbildern, Filmen, Vorbeifahrtbildern sowie von Spektrogrammen. Eine Vielzahl von Interaktionen zwischen Zeit, Frequenz und Raum eröffnet eine bislang unbekannte, neue Akustikwelt: in Sekundenschnelle sind Spektren von Emissionsorten ermittelt oder bandbegrenzte Analysen hergestellt. Für Echtzeitanwendungen steht eine Live-Preview Option zur Verfügung, mit der es unter eingeschränktem Funktionsumfang möglich ist, Schallereignisse in Echtzeit zu beobachten. Kantenextraktion der Videobilder geschieht auf Knopfdruck, Abb.7.

Abb.6: Schallbild eines landenden Flugzeugs. Man erkennt Geräusche der Landeklappen.

Für Auswertung und Dokumentation



werden oft A- bewertete Bilder⁸ bevorzugt. Hierfür werden die Zeitfunktionen gefiltert, die Bildgebung findet wieder im Zeitbereich statt.

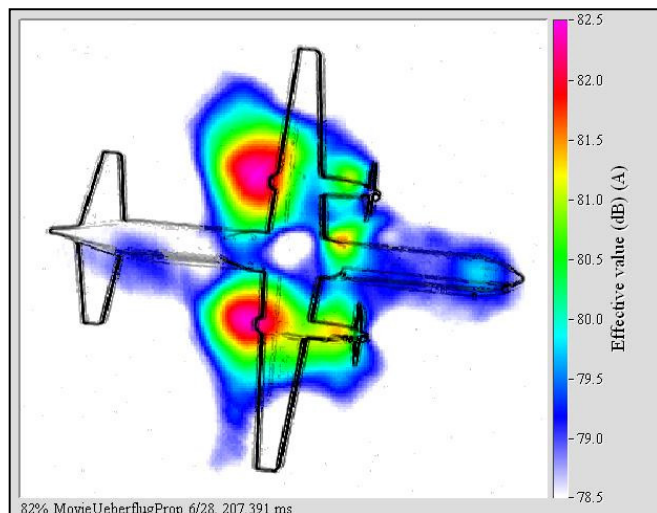
4. Applikationen

Haupteinsatzgebiete liegen in der Autoindustrie. Von der Motorentwicklung, über die akustische Qualitätssicherung bis zum Karosseriebau sind unterschiedlichste Einsatzmöglichkeiten adressiert. Aus dem Bereich der Baumaschinen stammen viele, spektakuläre Bilder, aber dieser Bereich wird ebenso wie der allgemeine Maschinenbau vorrangig von Dienstleistungen dominiert.

Eine Anzahl von Kameras befindet sich in der Konsumer- Elektronik im Einsatz. Hier werden Notebooks, Drucker oder Plasma- Displays akustisch optimiert. Hausgeräteindustrie und Werkzeugmaschinenbauer profitieren hingegen vornehmlich von Dienstleistungszentren. Obwohl kommerziell eher zweitrangig, gelangen mit dem Star- Array wohl die bislang bemerkenswertesten Aufnahmen. Flugzeuge, Hubschrauber, Züge oder Großbagger zählen zu den eindrucksvollsten Objekten.

heinz@gfai.de

Abb.7: Kantenextrahiertes Bild. Bei der Scheinmission seitlich am Rumpf handelt es sich wohl um eine Spiegelung der Druckwelle der Blätter der rechten Luftschraube.



⁸ ISO/DIS 10845, Akustik - Frequenzbewertung "A" für Geräuschmessungen. (Beuth Verlag Berlin)