

Dr. G. Heinz, Dipl.-Ing. G. Heilmann  
GFal e.V. Berlin  
Dr. H. Schulze, Dipl.-Ing. S. Brusius, Dipl.-Ing. W. Krechberger, Dipl.-Ing. G. Schumann  
DaimlerChrysler AG, Stuttgart

**"Einsatz einer akustischen Kamera zur NVH-Optimierung von Motor und Triebstrang"**  
**"Application of an Acoustic Camera for the NVH-Optimization of Engine and Powertrain"**

**Kurzfassung**

Die akustische Optimierung von Motor und Antriebsstrang ist zeitintensiv, sie erfordert von den Akustikingenieuren viel Erfahrung und handwerkliches Geschick. Eine große Herausforderung besteht in der Vermittlung dieser Ergebnisse an Mitarbeiter anderer Bereiche, wie Konstruktion und Versuch sowie an Entscheidungsträger und Zulieferer. Hierzu sind Tools, sowohl zur Analyse als auch zur optischen Darstellung von akustischen Ereignissen gefragt. Daimler Chrysler setzt unter anderem seit 2003 die akustische Kamera im Bereich NVH für Motor und Triebstrang ein. Im Vortrag sollen erste Anwendungserfahrungen anhand von praktischen Beispielen vermittelt werden. Vor- und Nachteile, Möglichkeiten und Grenzen dieser neuen Technik werden diskutiert. Einleitend wird die Historie der akustischen Bildgebung bei Daimler und bei GFal gestreift.

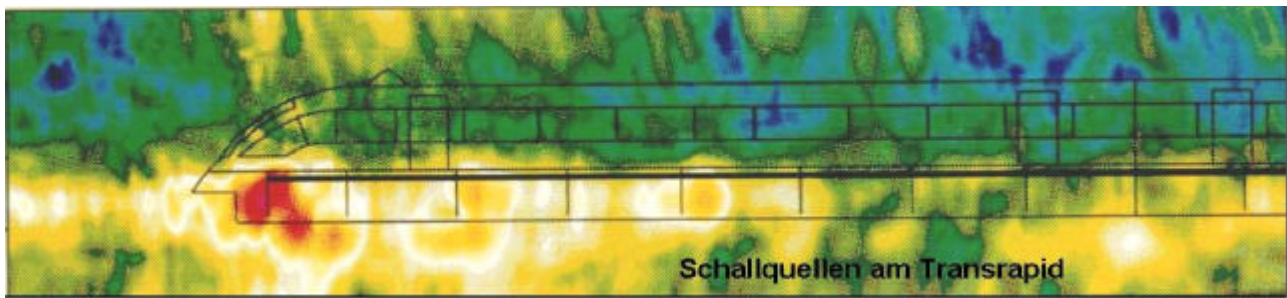
**Abstract**

The acoustic optimization of motor and power train requires much time and effort. Acoustic engineers need a lot of experience and ability in their respective fields of work. A great challenge lays it the delivery of the results on co-workers in other departments such as Construction, Design and Testing, as well as to final decision makers and component suppliers. Tools for analysis, including the visual depiction of acoustic results are needed. Since 2003 DaimlerChrysler uses acoustic camera equipment in the NVH motor- and power train department. The presentation will include the first experiences, impressions, and practical examples in respect to the use of Acoustic Cameras. Pros and cons, possibilities and short comings of this new method will be discussed. Introductory we discuss the history of acoustic imaging at Daimler and at the GFal.

**Historie akustischer Bilder bei Daimler**

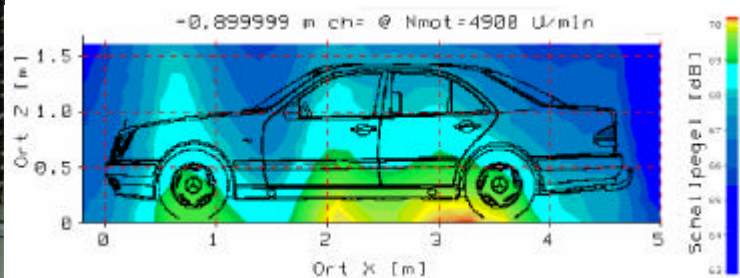
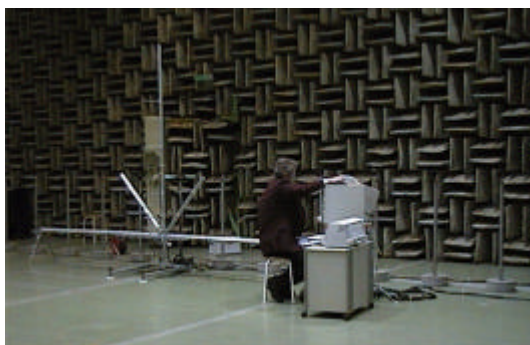
In den späten achtziger Jahren wurde mit 2D-Kartierungen an der Magnetschwebebahn Transrapid begonnen (damals gehörte das Forschungsteam um Dr. Brühl und Dr. Grünwald noch zu MBB, später zur DASA, dann zu Daimler). Anfangs stand ein 13-Kanal Linienarray und ein 14-Kanal Bandgerät von RACAL zur Verfügung. Ein Kanal wurde für Synchroninformationen von einer Lichtschranke genutzt. Über die Entwicklungsstufen „Triply Combined Linear Array“ mit 25 Kanälen und später „Cross Array“ mit 27+1 Kanälen (28 Kanal RACAL Bandgerät, VAX 785, Summenabtastrate 1 MS/s) konnten in Zusammenarbeit mit IABG erste

akustische Line Scans vom Transrapid hergestellt werden, siehe Bild1. Es wurde ein korrelativer Algorithmus genutzt<sup>1</sup>.



**Bild 1: MBB/DASA Messungen am Transrapid. „Cross-Array“ mit 27 Kanälen, 1993**

Das Verfahren wurde weiterentwickelt für verschiedene Bereiche. Im Rahmen des Forschungsprojekts DEUFRAKO II erfolgten Experimente einer Quellenkartierung mit Leistungsschätzung am ICE (Verfahren „Source Density Modelling“ - SDM). Applikationen für Windkanal (Projekt RAIN) und Überflug (Projekt SILENCER) erfolgten. Fahrzeuguntersuchungen gelangen zwischen 1990 und 1998 zur Messung bei beschleunigter Vorbeifahrt von Nutzfahrzeugen<sup>2</sup>. Ab 1998 begannen Experimente auf dem Pkw-Geräuschprüfstand. Aufgezeichnet wurden zusätzlich die Motordrehzahl, und die Geschwindigkeit von Rolle (Fahrzeug).



**Bild 2: Außengeräuschprüfstand bei DaimlerChrysler AG (EP/CSA) und akustisches Bild aus dem Jahre 1998**

## Historie der Akustischen Kamera an der GFal

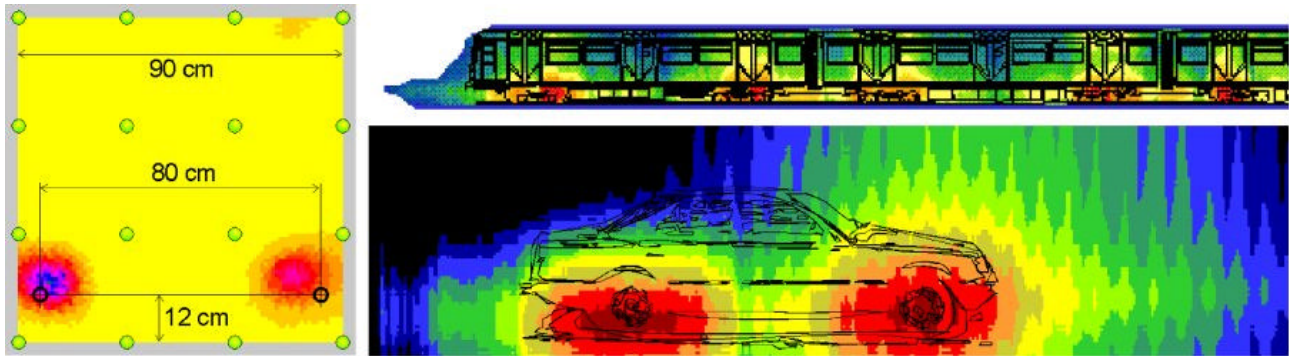
Im Gegensatz zu klassisch-akustischen Verfahren kommt die „Akustische Kamera“ der GFal aus dem Gebiet der Neuronalen Netze über den Zeitbereich. Eine Untersuchung über abbildende Eigenschaften so genannter Interferenznetzwerke<sup>3</sup> eröffnete einen Zugang auch zu akustischen Kartierungen. Eine Untersuchung zu Eigenschaften von Interferenzintegralen von primärem und sekundärem Wellenfeld offenbarte Kartierungseigenschaften in Relation zu

<sup>1</sup> Siehe dazu Brühl, S., Schmitz, K.-P.: Noise Source Localization on Highspeed Trains using Different Array Types. Intnoise1993, Leuven, Belgium, August 24-26 1993.

<sup>2</sup> Dr. Kerres, DaimlerChrysler interner Bericht, TB, 1991, Nr. 174 vom 17.7.1991

<sup>3</sup> Heinz, G.: Neuronale Interferenzen. Autor gleich Herausgeber. Persönliche Kommunikation, 30 Exempl., 1993, 300 S.

zeitlichen und geometrischen Proportionen, so z.B., dass breitbandige Signale besser kartieren, als schmalbandige. Mit einer Ausprägung der Heinz'schen Interferenztransformation (HIT) wurde ein zeitinverses Rekonstruktionsprinzip angewandt, welches auf äquivalenten Schalldruck approximiert. Die Idee dazu basierte zunächst auf einer zeitinversen, interferenziellen Rekonstruktion bei nichtlinearer Transferfunktion. Damit wurde es möglich, eine rechenzeitintensive, hochkanalige Korrelation (die für symmetrische Signale auf mehr als zwei Quellen als hyperbolische Permutation definiert ist) zu approximieren und zeitsparend zu berechnen.



**Bild 3: (vlnr.) Erstes akustisches Standbild: Lautsprecher eines Stereoradios aus 2,4 m Abstand (G. Heinz/S. Höfs, GFal Berlin, 15.3.1996); rechts: Abrollbilder<sup>4</sup>, gemacht mit reflexivem 16-Kanal-Array (1,2 x 1,2 m) 50 kS/s pro Kanal, Software „PSI-Tools“, 1998**

Im März 1996 gelang es, mit 16 Kanälen erste akustische Standbilder und Filme aus Entfernungen zwischen 2 und 200 Metern herzustellen<sup>5</sup>. Um eine Rückwärtsdämpfung zu erhalten, wurden die ersten Arrays reflexiv ausgeführt, siehe auch *Akustische Kamera*<sup>6</sup>.

Der Durchbruch gelang mit der Darstellung der ersten Schallreflexion. In einer 16-Kanal-Aufnahme einer Boing 737 aus 30 Metern Entfernung war die Schallspiegelung des Triebwerkslärms auf der Piste<sup>7</sup> zu erkennen. Wissenschaftsjournalisten wie Industrie (zunächst insbesondere die Verpackungsmaschinen und die Baumaschinenindustrie) zeigten sofort großes Interesse.

Aus einer finanziell schwierigen Situation heraus geboren, wurde die Technologie von Anbeginn auf industrielle Verwertbarkeit zugeschnitten. Da das Verfahren im Zeitbereich definiert ist, erschlossen sich neben *stationären* auch sofort *instationäre* Applikationen. Obwohl Akustik in einem sehr breiten Wellenlängenbereich stattfindet (100 Hz ~ 3,4 Meter bis 100 kHz ~ 3,4 mm) wurde bereits das erste Array (16 Kanäle) so klein ausgeführt, dass es in den Kofferraum eines PKW passte (1,20 Meter maximale Breite). Das wurde damals teilweise als Bruch zweier Tabus aufgefasst, man nahm Miniatur-Arrays nicht ernst, noch dazu, wenn sie reflexiv sind. Auch passte die Anordnung nicht recht zu damals üblichen Ansätzen der Art „Constant Directivity Beamforming (CDB)“<sup>8</sup>, bei der Arrays üblicherweise aus Subarrays zusammengesetzt wurden.

<sup>4</sup> [http://www.gfai.de/www\\_open/perspg/heinz.htm](http://www.gfai.de/www_open/perspg/heinz.htm)

<sup>5</sup> <http://www.acoustic-camera.com/historie.htm>

<sup>6</sup> <http://www.acoustic-camera.com/press.htm>

<sup>7</sup> [http://www.gfai.de/www\\_open/perspg/g\\_heinz/akustik/airplane/airplane.htm](http://www.gfai.de/www_open/perspg/g_heinz/akustik/airplane/airplane.htm)

<sup>8</sup> siehe dazu z.B. Brandstein, M., Ward, D.: *Microphone Arrays*. Springer-Verlag 2001, ISBN 3-540-41953-5



Es kam ein Zufall zu Hilfe: Wir entdeckten, dass partielle Abschattungen und räumliche Multipol-Dekorrelationen bei realen 3D-Objekten praktisch eine viel größere Rolle für störende Beugungseffekte spielen, als vormals angenommen. Für praktische Belange sollte der Öffnungswinkel, unter dem die Mikrophone auf einen Objektpunkt schauen, 30° nicht überschreiten. Arrays durften folglich nicht zu groß werden, CDB-Ansätze erwiesen sich als unpraktisch zur Kartierung von Maschinen oder Motoren. Dies erklärte, warum die damals auf Nahfeld-Experimente und große Arrays fixierte Wissenslandschaft in der Industrie nicht Fuß fasste: Man kämpft mit Bildstörungen, die durch eine zu große Apertur der riesigen Mikrofonarrays verursacht werden. Es war gerade die Miniaturisierung der Arrays, die anteilig zum GFal-Erfolg beitrug.

So konnten die Arrays weiter verkleinert werden, auch gibt es inzwischen Mitbewerber, die ebenfalls kleine Arrays bauen. Hintergrund der Verkleinerung war die Erkenntnis, dass sich mit kleiner werdendem Array und größer werdender Wellenlänge lediglich der Amplitudenkontrast (Differenz zwischen Maximum und Minimum im Bild), nicht aber der Maximum-Pegel der akustischen Karten verändert.

Aus der Orientierung auf industrielle Anwendbarkeit heraus entstand in gewisser Weise eine neue Sichtweise auf Akustik, siehe auch "Andere über uns" oder Historienseite der Homepage<sup>2</sup>:

- 1996 Akustisches Standbild (Stereoradio<sup>9</sup> in 2,4 m Abstand, G. Heinz/S. Höfs, GFal)
- 1996 Akustischer Film (fahrende Autos aus 200 Metern)<sup>10</sup>
- 1997 Zeitlupenaufnahmen eines Schallfeldes (Nadeldrucker)
- 1997 Erstes Bild einer Schallreflexion (Boing737-400, linkes Triebwerk läuft, 30 m)
- 1998 16-Kanal Ringarray
- 1999 Array-integrierte Videokamera und automatische Kantenextraktion des Videobildes
- 1999 Speicherung von Videobild, Zeitfunktionen und Messparametern in einem File (\*.chl)
- 2000 Automatische "Belichtung" der Schallbilder
- 2000 3D-Kartierung
- 2001 Akustisches Oszilloskop (Live Preview)
- 2002 "Abhörbare" Bilder (Abhören der rekonstruierten Zeitfunktionen der Pixel)
- 2002 Spektrogramm-Selektion (Zeit-Frequenzintervall zur Bilderzeugung)
- 2004 Movie on Movie (MoM) Aufnahme
- 2005 Einsatz von MoM und 3D in der Industrie (Planung)

Mitbewerber folgen in wesentlichen Fragen seit etwa 2001 unserer Entwicklung (Studiomikrophone, Movie, Rechnen auf Videobild, Kantenextraktion etc.).

Im November 2004 gelangen erste bewegte Karten auf bewegtem Video (Movie on Movie, MoM): Der vorläufig letzte Coup, welcher die Akustischen Photo- und Kinematographie<sup>11</sup>

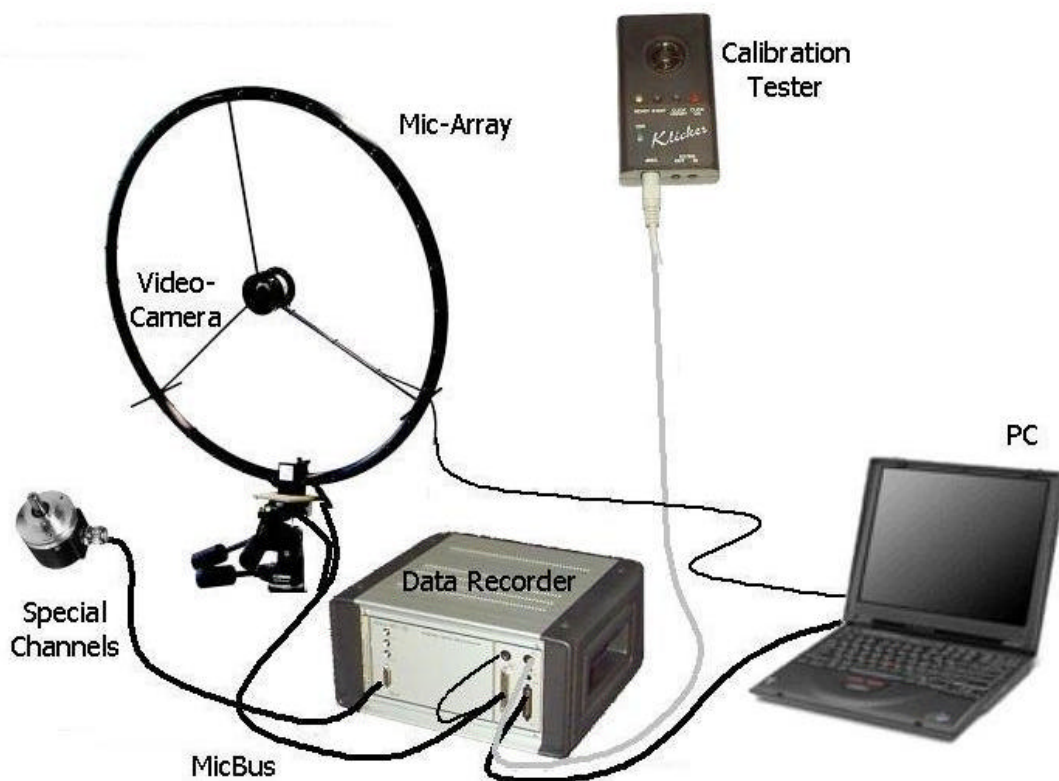
---

<sup>9</sup> [http://www.gfai.de/www\\_open/perspg/g\\_heinz/akustik/radio/radio.htm](http://www.gfai.de/www_open/perspg/g_heinz/akustik/radio/radio.htm)

<sup>10</sup> [http://www.gfai.de/www\\_open/perspg/g\\_heinz/akustik/strasse/outdoor.htm](http://www.gfai.de/www_open/perspg/g_heinz/akustik/strasse/outdoor.htm)

<sup>11</sup> Der Begriff "Akustische Photo- und Kinematographie" wurde 1997 als Zielstellung formuliert: Heinz, G.: "Akustische Photographie" Reihe KI-Kolloquien Prof. Hamann, 5.11.1997, 17.00 Uhr, TFH Berlin-Wedding, Haus Bauwesen, Raum D-234. 1999 folgte: Heinz, G., Nguyen, T., Doebler, D.: Acoustic Photo- and Cinematography basing on the HInterference Transformation (HIT). ASA'99: 137th meeting of the Acoustical Society of America, 2nd Conv. European Acoustics Ass. and 25th German Acoustics and DAGA Conference TU Berlin,

nachhaltig beeinflussen wird. Bislang war es nur möglich, akustisch bewegte Karten auf Video-Standbilder zu kartieren (Movie on Photo, MoP) oder mit Live-Preview zu arbeiten (ohne Speicheroption). Entsprechend waren bewegte Objekte (fliegende, fahrende, rotierende) nur mühsam akustisch analysierbar. Ein weiterer Meilenstein, der im Jahre 2005 zum Tragen kommen wird, sind 3-dimensionale, akustische Kartierungen z.B. von PKW-Innenräumen. Erste Bilder und Filme wurden vom Team bereits 2000 gezeigt. Ende 2005 soll nun eine Verkaufsversion eines 3D-Kartierungssystems angeboten werden. Käufer der Kamera schätzen die hohe Effizienz des Verfahrens zur schnellen Analyse und Dokumentation akustischer Probleme. In der Autoindustrie amortisieren sich Systeme häufig bereits mit den ersten, detektierten Fehlern, wenn z.B. Rückrufe vermieden werden können.



**Bild 4: Hardwarekonfiguration mit Ring32. Das Ring-Array hört nach vorn und hinten.**

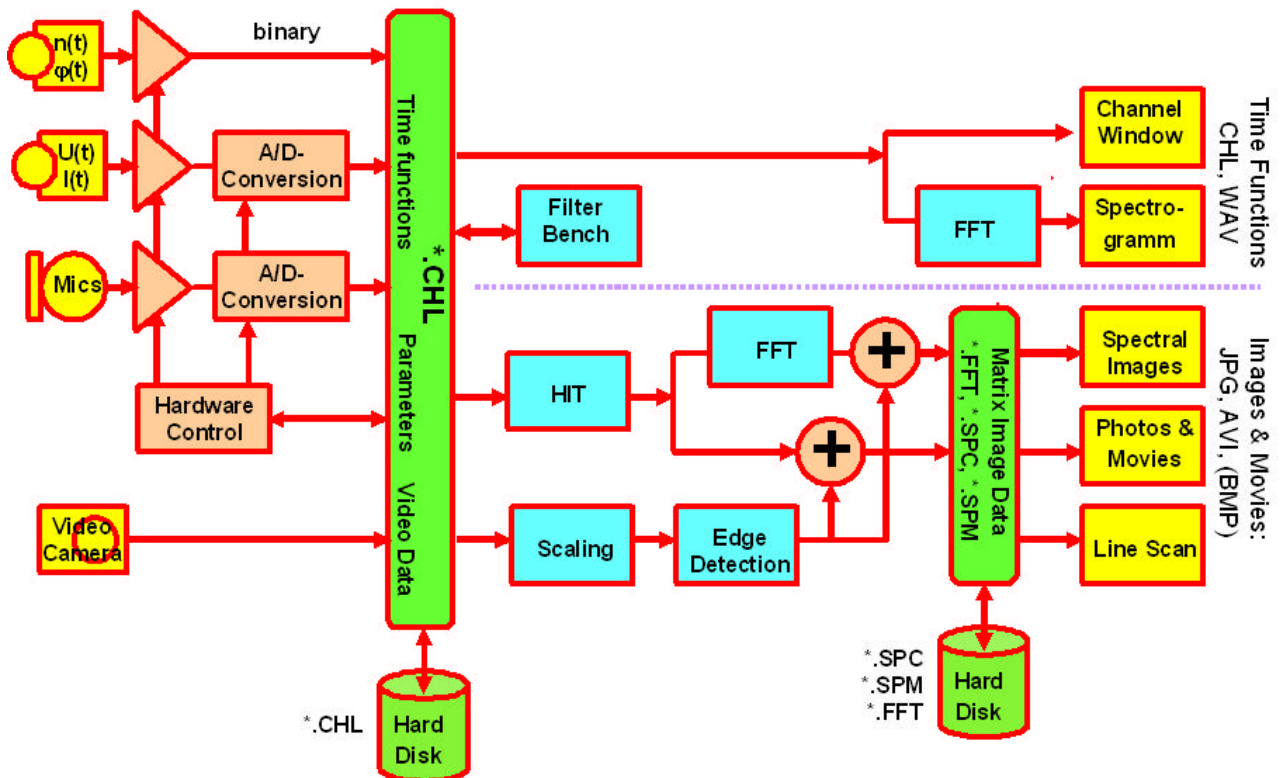
## Hardware

Die Grundausrüstung besteht aus dem Array mit Videokamera und Stativ, einem Datenrecorder, einem Notebook der Spitzenklasse, Transportkoffern und Kabelmaterial. Der Datenrecorder arbeitet bei 12 bis 192 kS/s im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 90 kHz. Eine gepufferte Architektur erlaubt Start- und Stop-Auslösung einer Aufnahme, unerlässlich zur Aufnahme spontaner Emissionen. Pro Kanal steht ein Zwischenspeicher von 1MS zur Verfügung (5 ... 83 Sekunden).



## Software

Für die Arbeit mit der Software „*NoiseImage*“ wurde ein komplexes, sehr einfach gehaltenes, intuitives Interaktionskonzept zwischen Raum, Zeit und Frequenz entwickelt. Um Modelannahmen über Feld- und Strahlerparameter zu vermeiden, wird auf „äquivalenten Schalldruck“ gerechnet, d.h. im akustischen Bild ist farblich der Wert codiert, der von einer im gleichen Abstand im reflexionsarmen Raum stehenden Punktquelle erzeugt wird.



**Bild 5: Datenstruktur der akustischen Kamera im Überblick**

Da das Verfahren aus dem Zeitbereich kommt, sind Bewertungen als A-, B-, und C-Filter implementiert, die auf die aufgenommenen Zeitfunktionen wirken. Eine universelle Filterbank gestattet spektrale Generalisierungen. Wird das Zeitfunktionenfenster auf *Spektrogramm*-Darstellung umgeschaltet, lassen sich auffällige Emissionen per Mauszug spektral und zeitlich wählen und sofort in ein entsprechendes Photo oder Movie umsetzen. Im Photo oder Movie kann die Zeitfunktion jedes Ortes per Mausklick als WAV-File gespeichert werden, sie kann als Spektrogramm oder als Spektrum ausgegeben werden. Alle Bilder lassen sich als JPG, alle Filme und Bildfolgen als AVI speichern, Spektren können auf Terzbewertung umgeschaltet werden etc. Ein Abhören der Zeitfunktion in Bild oder Movie ist per Mausberührung der Bildstelle möglich. Jahre alte Aufnahmen können somit jederzeit auch subjektiv wieder erlebt werden. Wird ein Film als AVI abgespeichert, kann der Stereoklang aus den aufgenommenen Zeitfunktionen, aber auch eine rekonstruierte Zeitfunktion des Bildes in den Film integriert werden, diese Stelle erhält dann kennzeichnend ein Mikrofon-Icon.

Werden stationäre Geräusche analysiert, steht mit „*Spectral Frames*“ zusätzlich ein Interaktionstool zwischen Bild und Spektrum zur Verfügung. Klickt man ins Bild, wird im Komplementärfenster das Spektrum des angeklickten Punktes angezeigt, selektiert man im Spektrum ein Band, erscheint das zugehörige Bild.

Wird eine hochkanalige Aufnahme abgespeichert, so wird ein File (Channel: \*.CHL) geschrieben, der sämtliche relevanten Daten enthält (Zeitfunktionen, Parameter der Verstärker, Datum, Distanz, Videobild(er), Kameraparameter, Array-Koordinaten, Kalibrierdaten). Im CHL-File werden nicht nur Zeitfunktionen aller Kanäle, sondern alle zur Messung gehörenden Parameter sowie Foto(s) und Meßanordnung abgespeichert. Motivation ist: Korrekt rechnen, egal ob die Messung vor einer Stunde oder einem Jahr erfolgte, ob ich selbst oder ein Unbekannter in Fernost die Daten aufnahm.



**Bild 6: (vlnr.) MicBus-Arrays: Leuchtende Disc32, Cube32, Ring32 low noise, Star36**

## **Kompatible MicBus-Arrays**

Industrielle Belange bedingen Handlichkeit und Robustheit. Gewicht, Volumen und Preis der Gesamtlösung steigen mit der Kanalzahl an. So liegen praktikable Lösungen vorrangig im Bereich kleiner Kanalzahlen. Da zudem die Bildqualität (dB-Kontrast) nur zur Wurzel aus der Kanalzahl steigt, erscheinen hohe Kanalzahlen nicht recht lukrativ. Unser Augenmerk konzentrierte sich deshalb auf die Ermittlung einer unteren Kanalzahl-Grenze und auf eine sinnvolle Größen- und Zweckstaffelung von Array-Grundkonstruktionen.

Es wurden problemangepasste Geometrien und Arraygrößen entwickelt, deren natürliches (unkompensiertes) Aliasing bei hoher, mechanischer Präzision relativ gering ist. Neben der Optimierung des „Cross Interference Beam Pattern“ wurde insbesondere Wert auf mechanisch stabile Konstruktionen gelegt.

Alle Arrays sind mit hochlinearen Studiomikrofonen (30 ...130 dB bei 100 Hz ... 20 kHz (100 kHz), +/- 1 dB) ausgerüstet, sie besitzen identische Steckverbinder (MicBus) und eine fest eingebaute VGA-Videokamera mit fester Apertur. Der Einsatzbereich wurde zwischen Rasierapparat und Industrieanlage auf modifizierbare Typen aufgeteilt:

Cube, typ. Ø 35 cm, Objektstand 30 cm bis 1 m, PKW Innenraum, 3D

Disc, typ. Ø 35 cm, Objektabstand 30 cm bis 1 m, PKW Innenraum, 2D  
Ring, typ. Ø 75 cm, Objektabstand 1 bis 3 m, Motor und Fahrwerk  
Portable, 80x80x25 cm, Objektabstand 1 bis 3 m, Fertigungslinien  
Star, Arme je 2 m, Objektabstand 3 m bis 300 m, Vorbeifahrt PKW und LKW

Cube, Ring und Star sind akustisch transparente Systeme. Star und Cube besitzen dennoch eine frequenzabhängige Rückwärtsdämpfung von bis zu 21 dB, die durch die sphärische Mikrofonanordnung erzielt wird. Hingegen "hört" der Ring nach vorn und hinten gleich gut, das sollte die Anwendung in schallharten Räumen ausschließen. Dennoch stellt dieser aus Gründen guter Handhabbarkeit das beliebteste Modell dar.

Portable32 (mit eingebautem Datenrecorder) und Disc32 sind akustisch reflexiv. Dadurch wird der Einfluss des rückwärtigen Schallfeldes reduziert. Die Reflexion bringt allerdings den Nachteil eines zwischen 1 und 3 kHz um ca. 5 dB ansteigenden Druckverlaufs. Es erschließen sich Anwendungen in rauer Umgebung, wie z.B. Messungen zwischen Produktionsanlagen oder im PKW-Innenraum bei Fahrt.

Zur Realisierung des MicBus-Konzeptes (ein Stecker für alle Mikrophone des Arrays) musste die Messmikrofonlinie verlassen werden. Zusammen mit Sennheiser wurden extrem phasengenaue Studiomikrophone für Arrays spezifiziert. Derzeit werden zwei Mikrofontypen angeboten: Die Standardkapsel ist extrem linear, daneben können Arrays mit Low Noise (LN) Kapseln konfektioniert werden.

Die obere Grenzfrequenz aller Systeme wird von deren mechanischer Steifigkeit und der erreichbaren Fertigungsgenauigkeit der Mikrofonkoordinaten bestimmt (Disc: 90 kHz, Ring: 20 kHz, Cube: 10 kHz, Star: 7 kHz). Abhängig von der Größe des Arrays bestimmt die untere Grenzfrequenz lediglich den dB-Kontrast. So erfolgten auch mit dem Ring bei extrem reduziertem Kontrast schon Aufnahmen im Band von 40 bis 100 Hz. Es gelingt sogar noch, die Raumresonanz schallgedämmter Räume zu visualisieren.

## **Anwendungsbeispiele**

Daimler verfügt neben Porsche derzeit über die breitesten Applikationserfahrungen mit akustischen Kameras weltweit. Neben den eigenen Systemen sind vier akustische Kameras der GFal im Einsatz. Das erste System wurde 2002 an den Bereich Produktbetreuung übergeben. Der Bereich der Qualitätssicherung hat eine enge Forschungs Kooperation zur GFal, hier sind bereits zwei Systeme im Einsatz (S.-Untertürkheim und B.-Marienfelde).

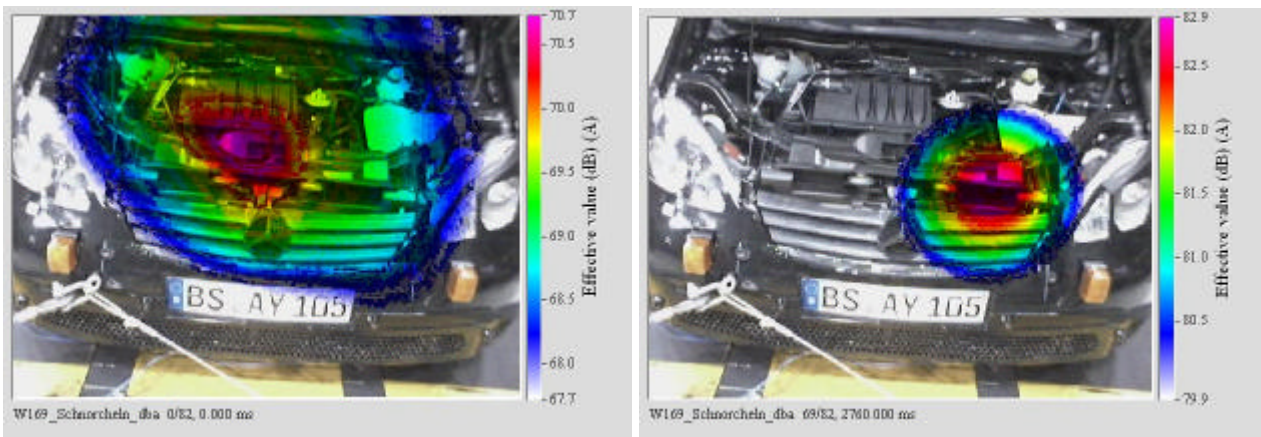
Seit 2003 verfügt auch der Bereich NVH über ein erstes System, welches hier vorrangig zur Aufklärung und Dokumentation komplexer, nicht ganz eindeutiger Schallemissionen während der Motorentwicklung genutzt wird. Auch spielt die Aufklärung von Vorgängen eine Rolle, die dem Ohr sowie klassischen Analysemitteln schwer zugänglich sind, z.B. spontane Pfeif-, Heul- oder Tickergeräusche, deren Herkunft oft nicht zweifelsfrei fixiert werden kann, insbesondere, wenn sie von anderen Geräuschen überdeckt werden.

Durch die Möglichkeit, Analyseergebnisse der akustischen Kamera als Bilder (JPG), Movies (AVI) oder Klänge (WAV) abzuspeichern, ergibt sich eine hervorragende, neue Möglichkeit einer verbesserten Kommunikation mit Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen, mit Zulie-

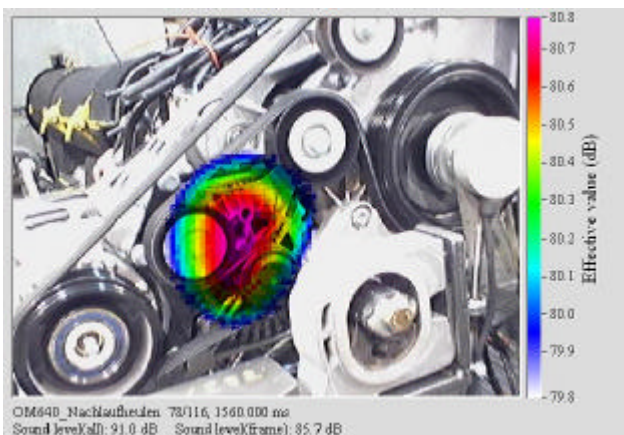


ferern und mit dem Management. Die Ergebnisse können in Bildform vergleichsweise schnell und transparent dargestellt werden. Mit Powerpoint lassen sich die Analyseergebnisse multimediaal vermitteln. Da Aufnahmen und Analysen i.a. Sekundenschnell erfolgen, erfreut sich das System zunehmender Beliebtheit.

*"Die akustische Kamera bekommt in unserer Firma immer mehr den Nimbus eines universellen Problemlösers - darunter leiden wir manchmal sogar schon".  
( NVH-Mitarbeiter eines großen Automobilherstellers)*



**Bild 7: Schallbilder: links Leerlaufgeräusch, rechts Schnorcheln beim Abtounen**



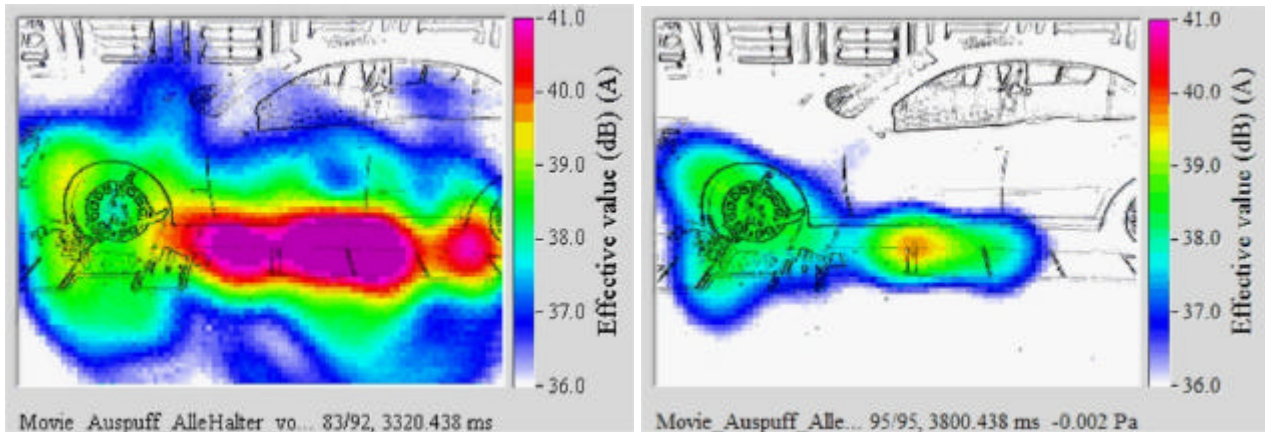
**Bild 8: Motorheulen beim Abtounen**

Bild 7 links zeigt ein Photo der Schallemission eines Fahrzeuges im Leerlauf in A-Bewertung. Während der Entwicklung zeigte der Motor beim Abtounen ein schnorchelndes Geräusch, Bild 7 rechts. Im akustischen Bild ist sofort erfassbar, von welchem Ort dieses Geräusch abgestrahlt wird. Würde man diesen Sachverhalt verbal oder schriftlich an eine Konstruktionsabteilung vermitteln wollen, wäre die Mühe fraglich. In Bildform aber versteht jedermann die Problematik.

Ebenso zeigte der Motor beim Abtounen ein relativ starkes, heulendes Geräusch, dessen Herkunft zunächst am Turbo vermutet wurde. Ein einziges akustisches Bild, in Sekunden ge-

macht, schafft Aufklärung: es war die Lichtmaschine, Bild 8. Der Motor besitzt einen Generator mit Freilauf. Die Turbo-Befürchtung konnte verworfen werden.

Bild 9 dokumentiert die Optimierung eines 6-Zylinder Dieselmotors (Leerlauf, A-Bewertung, Messabstand ca. 3 Meter). Durch eine Veränderung an der Abgasanlage konnte die Schallemission im Bereich 2-8 kHz deutlich gesenkt werden. Es ist zu erkennen, dass die Emission der Abgasanlage teils als Bodenreflexion erscheint.



**Bild 9: Optimierung der Leerlaufemission im Frequenzband von 2 bis 8 kHz; vor (links) und nach Optimierung (rechts)**

Schwierigkeiten bereitet lediglich die Vermittlung der zunächst ungewöhnlichen Physik. Man ist oft überrascht über akustische Phänomene, die aus der Optik zwar allzu gut bekannt sind, wie z.B. Beugung, Reflexion oder Resonanz, die man aber im Bereich der Akustik in oft sehr entstellter, kaum wiedererkennbarer Form findet. Da zur Zeit des technologischen Einstiegs von DaimlerChrysler noch keine Universität eine akustische Kamera besaß, kein Buch oder Aufsatz (außer dem GFaI-Schulungsmaterial) zu erhalten war und dieses neue Wissen schlicht fehlte, spielte die Qualifikation am Objekt – oft im Dialog und mit Unterstützung der Kollegen der GFaI – eine entscheidende Rolle. Um diesem Defizit zu entgehen, wird kein System ohne dreitägigen Schulungskurs ausgeliefert. Jährlich finden Anwenderseminare statt, bei denen Erfahrungen ausgetauscht werden.