

Moderne Verfahren zur Schallquellenortung mit Arraysystemen

Christoph Hundeck, Radevormwald

Zusammenfassung Mittlerweile gibt es mehrere Schallquellenortungstechniken, die zur Lösung von Schall- und Schwingungsproblemen (NVH) zum Einsatz kommen. Die Auswahl der richtigen Technik hängt sowohl von der Anwendung als auch von den benötigten Informationen ab. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Schallquellenortungsverfahren und einige Anwendungsbeispiele für die unterschiedlichen Techniken.

Modern noise source location techniques using array systems

Summary There are several noise source location techniques available to engineers working on Noise, Vibration and Harshness (NVH) problems. Choosing the right technique depends on the application as well as the information required. This article reviews for noise source location algorithms and some applications examples for the different technique.

Vom Auto bis zum Düsenflugzeug, von der Waschmaschine bis zum Haartrockner – alle wünschen sich leisere und umweltfreundlichere Maschinen. Die Hersteller wissen, dass die von ihren Maschinen emittierten Schallpegel ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal für Produkte darstellen. Häufig beruhen die Kaufentscheidungen auf dem von einem Produkt erzeugten Geräusch.

Schallpegel werden häufig durch gesetzliche Vorschriften festgelegt. Beispielsweise stellen die Vorschriften für den Vorbeifahrtpegel von Fahrzeugen hohe Forderungen an die Hersteller, insbesondere bei Lkw und Hochleistungsfahrzeugen. In den USA beispielsweise stellen Bremsengeräusche ein wichtiges Garantieproblem dar und bei den Automobilherstellern gehen Reklamationen für hunderte Millionen Dollar ein, während sich in Deutschland mehr als 60 % der Beschwerden über neue Autos auf Lärm und Vibrationen beziehen (**Bild 1**).

Kriterien zur Auswahl des geeigneten Schallkartierungsverfahrens

Örtliche Auflösung und Frequenzbereich

Ein entscheidendes Kriterium für eine gute Schallquellenortung ist die örtliche Auflösung. Es stellt sich also die Frage, wie weit zwei Schallquellen auseinander liegen dürfen, sodass sie noch als zwei Quellen zu unterscheiden sind und sich nicht zu einer Quelle vereinigen. Die örtliche Auflösung ist stark von der verwendeten Technologie und dem ausgewählten Frequenzbereich abhängig. Holografieverfahren liefern eine gute Auflösung über den gesamten Frequenzbereich, während Beamforming-Verfahren bei tiefen Frequenzen eine schlechte örtliche Auflösung liefern. Bei hohen Frequenzen wird die Auflösung jedoch immer besser.

Schallfeldgrößen

Typische Größen in der Schallquellenortung sind der Schalldruckpegel und der Schallintensitätspegel. Mithilfe des Schallintensitätspegels ist die Bestimmung der Gesamt- und Teilschallleistungen möglich. Dies ist für die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Objekten, aber auch für eine Bewertung der Einzelschallquellen eines Objekts sehr wichtig. Eine kleine sehr starke Quelle kann die gleiche Schalleistung abstrahlen wie eine große, schwächere Quelle. Ohne die Schalleistung ist eine Beurteilung fast nicht möglich.

Schallfeld

Die Umgebungsbedingungen sind für eine aussagekräftige Schallfeldkartierung nicht zu vernachlässigen. Die meisten Verfahren gehen von Freifeldbedingungen oder nahezu Freifeldbedingungen aus. Starke Reflexionen oder der Schalleinfall aus einer anderen als der Hauptausrichtung können zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Daher ist die Wahl des entsprechenden Verfahrens sehr

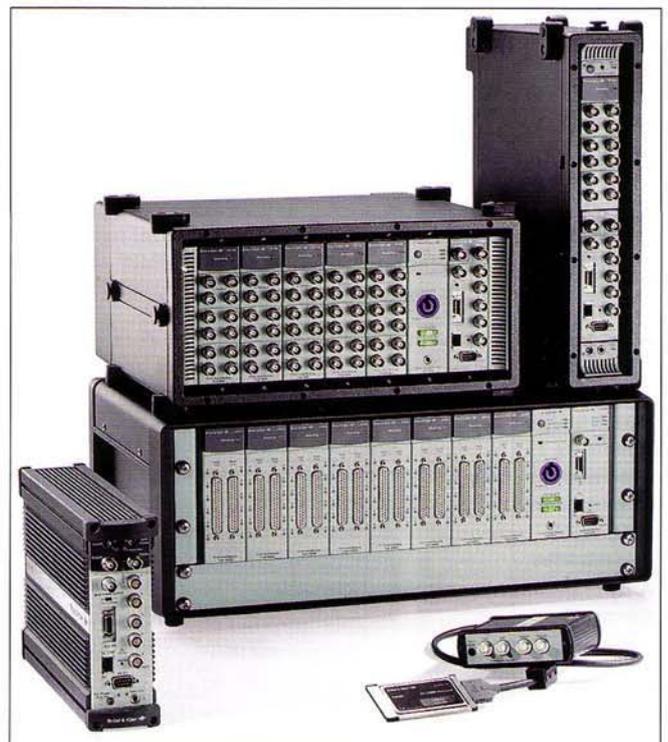


Bild 1 PULSE-Mehrkanalanalysesystem für allgemeine Schall- und Schwingungsmessungen und Schallquellenlokalisierung.

Übersicht der Schallkartierungsverfahren.

	Schalldruckkartierung	Schallintensitätskartierung	STSF	NS-STSF	Conformal Mapping	Comboarray	Beamforming	Spherical Beamforming
Algorithmus	Schalldruckmessung	Intensitätsmessung	Akustische Nahfeld-Holografie (NAH), Helmholtz-Integralgleichung, Statistisch optimierte akustische Nahfeld Holografie (SONAH)	Akustische Nahfeld-Holografie (NAH), Statistisch optimierte akustische Nahfeld-Holografie (SONAH)	Statistisch optimierte akustische Nahfeld-Holografie (SONAH)	Delay and Sum, Statistisch optimierte akustische Nahfeld-Holografie (SONAH)	Delay and Sum	Spherical Harmonics, Beamforming
Schallfeldgrößen	Schalldruck	Schalldruck, Schallintensität, reaktive Intensität, Partikelschnelle	Schalldruck, Schallintensität, reaktive Intensität, Partikelschnelle	Schalldruck, Schallintensität, reaktive Intensität, Partikelschnelle, Partikelauflenkung	Schalldruck, Schallintensität, Partikelschnelle	Schalldruck (am Array), Schallintensität (am Array), Schallintensität, Partikelschnelle	Schalldruck (am Array), Schallintensität (am Array)	Schalldruck (am Array), Schallintensität (am Array), Schallintensität
Darstellung	2D-Kontur, 3D-Kontur, Spektrum	2D-Kontur, 3D-Kontur, Spektrum, Schalleistungsspektrum	2D-Kontur, 3D-Kontur, Spektrum, Schalleistungsspektrum	2D-Kontur, Spektrum, Schalleistungsspektrum, Profil, Drehzahl, Winkel	3D-Kontur, Spektrum, Schalleistungsspektrum	2D-Kontur, 3D-Kontur, Spektrum, Schalleistungsspektrum, Profil, Drehzahl, Winkel	2D-Kontur, 3D-Kontur, Spektrum, Schalleistungsspektrum, Profil, Drehzahl, Winkel	Theta/Phi (360° x 180°), Kugel
Frequenzbereich in Hz	20 bis 20 000	50 bis 10 000	50 bis 8 000	50 bis 5 000	100 bis 5 000	50 bis 20 000	700 bis 20 000	300 bis 8 000
Örtlich Auflösung	schlecht	mittel	sehr gut	gut	sehr gut	gut	mittel	mittel
Messobjektgröße	mittlere Größe	mittlere Größe	limitiert	limitiert	klein bis mittlere Größe	mittlere Größe	klein bis sehr groß	mittlere Größe bis sehr groß
Verhalten der Quelle	stationär	stationär	stationär	transient	stationär	stationär, quasi stationär, transient	stationär, quasi stationär, transient	stationär
Mittelungsarten	Zeit	Zeit	Zeit	Zeit, Drehzahl, Drehwinkel (360° und 720°), ohne Mittelung	Zeit	Zeit, Drehzahl, Drehwinkel (360° und 720°), getriggert, ohne Mittelung	Zeit, Drehzahl, Drehwinkel (360° und 720°), getriggert, ohne Mittelung	Zeit
Filterung	Frequenz	Frequenz	Frequenz	Frequenz, Ordnung	Frequenz	Frequenz	Frequenz	Frequenz
Umgebungsbedingungen	Freifeld	Freifeld	Freifeld, Freifeld mit reflektierendem Boden	Freifeld, Freifeld mit reflektierendem Boden	Freifeld	Freifeld	Freifeld	Freifeld, Reflexionen
Korrelation mit Referenzsignalen	physikalisch	physikalisch	physikalisch, virtuell	physikalisch	physikalisch	physikalisch	physikalisch	nein
Schalleistungsberechnung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Anhören der Eingangsdaten	nein	nein	nein	ja	nein	ja	ja	ja
Anhören der Ergebnisdaten	nein	nein	nein	ja	nein	ja	ja	nein
Array Geometrie	Messmikrofon	Intensitäts-sonde	einzelne Messmikrofon, Linienarray, Arrayraster, Sektor Wheel Array	Arrayraster, Sektor Wheel Array	einzelne Messmikrofon, handgehaltenes Array, Arrayraster	Wheel Array, Half-Wheel Array, Sektor Wheel Array	Wheel Array, Half-Wheel Array, Sektor Wheel Array	Spherical Array
Roboterunterstützung	ja	ja	ja	nein	ja	nein	nein	nein
Messdauer	sehr lang	sehr lang	lang	kurz	mittel	kurz	kurz	kurz

wichtig. Hier wird häufig nach Verfahren für Messungen außerhalb und innerhalb von (Fahrzeug-)Innenräumen unterschieden.

- Außerhalb des Objekts: Intensitätskartierung, Nahfeldholografie mit Single Layer Array, planares Beamforming,
- Innenraum: Conformal Mapping mit Double Layer Array, Spherical Beamforming

Die **Tabelle** zeigt einen Überblick über die verschiedenen Schallkartierungsverfahren.

Schalldruckkartierung

Die einfachste Schallquellenortungsmethode ist die Schalldruckkartierung. Bei dieser Technik wird der örtlich Schalldruckpegel $L_p(x,y)$ ermittelt. Dies kann sowohl schmalbandig mit FFT-Analysen, mit 1/n-tel Oktavanalysen oder auch als breitbandiger Gesamtschalldruckpegel erfolgen. An jedem Punkt werden über eine gewisse Zeit die Schalldruckpegel/Schalldruckspektren gemittelt und gespeichert. Die Daten können anschließend als Linien gleichen Schalldruckpegels in Form einer Konturkarte angezeigt werden.

Vorteile:

- Geringe Kosten der Messausrüstung,
- einfach zu handhabende Messtechnik,
- der Frequenzbereich wird nur vom verwendeten Messmikrofon bzw. Analysator begrenzt.

Nachteile:

- Lange Messzeiten,
- skalare Messgröße, d. h. keine Informationen über den Energiefluss,
- Messungen können nicht im Nahfeld durchgeführt werden,
- der aufgenommene Schalldruck ist die Summe der von der zu messenden Quelle abgestrahlten Schallenergie plus weiteren Quellen, die Anteile liefern können (Reflektionen, Hintergrundgeräusch usw.),
- ein stationäres Verhalten der zu kartierenden Quelle ist notwendig

Intensitätskartierung

Die Schallintensitätsmessung ist seit vielen Jahren eine bewährte Technik, die sich außer zur Schalleistungsbestimmung auch hervorragend zur Schallkartierung eignet. Ein Vorteil der Schallintensität ist die Bestimmung des akustischen Energieflusses, wodurch sie nicht nur Informationen über die jeweilige Amplitude, sondern zusätzlich eine Richtungsinformation liefert. **Bild 2** zeigt eine typische Intensitätssonde nach dem Face-to-Face-Prinzip. Hierbei sind zwei Mikrofone in einem definierten Abstand gegenüberliegend angeordnet.

Die Schallintensität ist als

$$\vec{I}_r = \overline{p(t) \cdot \vec{v}_r(t)} \text{ in } \frac{W}{m^2} \quad (1)$$

definiert. Der Schalldruck p kann direkt von einem Mikrofon gemessen werden, die Partikelschnelle v muss jedoch aus den beiden Mikrofonensignalen berechnet werden. Die Partikelschnelle v berechnet sich mithilfe der eindimensionalen thermodynamischen Euler-Gleichung als

$$v = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_1 - p_2}{\Delta r} dt \quad (2)$$

Der Schalldruckgradient wird in der Euler-Gleichung durch das Verhältnis der Druckdifferenz und dem Abstand von Mikrofon zu

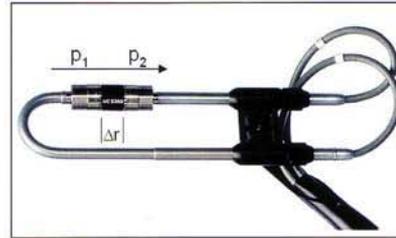


Bild 2 Schallintensitätssonde.

Mikrofon angenähert. Hierbei ist darauf zu achten, dass diese Annäherung für tiefe Frequenzen (lange Wellenlängen) gültig ist, aber bei hohen Frequenzen (kurze Wellenlängen) zu Fehlern führen kann.

$$\frac{\partial p}{\partial r} \approx \frac{\Delta P}{\Delta r} \quad (3)$$

Da die Partikelschnelle aus der Phasendifferenz der beiden Messmikrofone ermittelt wird, ist eine Phasenabstimmung sowohl für die Intensitätssonde als auch der nachfolgenden Datenerfassungseinheit notwendig. Eine präzise Phasenabstimmung kann mithilfe von integrierten Phasenkorrektureinheiten innerhalb der Mikrofone erreicht werden.

Der mittlere Schalldruck zwischen den beiden Mikrofonen ergibt sich zu

$$p = \frac{p_1 - p_2}{2} \quad (4)$$

Die Intensität kann somit aus den Schalldrucksignalen anhand der Gleichung

$$I = -\frac{p_1 + p_2}{2\rho\Delta r} \int p_2 - p_1 dt \quad (5)$$

berechnet werden. Im Multianalysesystem PULSE von Brüel & Kjaer wird die Intensität als „aktive Intensität“ ermittelt, d. h. dem Anteil der Intensität, der dem akustischen Nettoenergiefluss entspricht. Nur dieser Anteil trägt auch zu einer Schallausbreitung im Fernfeld bei.

Die Schallintensitätskomponente I wird aus dem komplexen einseitigen Kreuzspektrum zwischen den beiden Mikrofonen, dem Abstand zwischen den Mikrofonen und der Dichte der Luft berechnet:

$$I_r = -\frac{1}{\omega\rho\Delta r} \Im\{G_{xy}(\omega)\} \quad (6)$$

wobei ω die Kreisfrequenz, ρ die Dichte des akustischen Mediums und G_{xy} das Kreuzspektrum zwischen den beiden Mikrofonensignalen ist. **Bild 3** zeigt eine typische Darstellung eines Intensitätsspektrums (1/3-Oktav) mit positiven und negativen Richtungsanteilen.

Bei der Schallintensitätspegelkartierung wird, ähnlich wie bei der Schalldruckpegelkartierung, an unterschiedlichen diskreten Punkten eines Rasters die Schallintensität über einen gewissen Zeitraum gemittelt und anschließend abgespeichert. Die Schallintensität kann, im Gegensatz zum Schalldruck, im Nahfeld gemessen werden, d. h. durch den deutlich geringeren Abstand zum Messobjekt ergibt sich eine wesentlich bessere örtliche Auflösung. Vorteile:

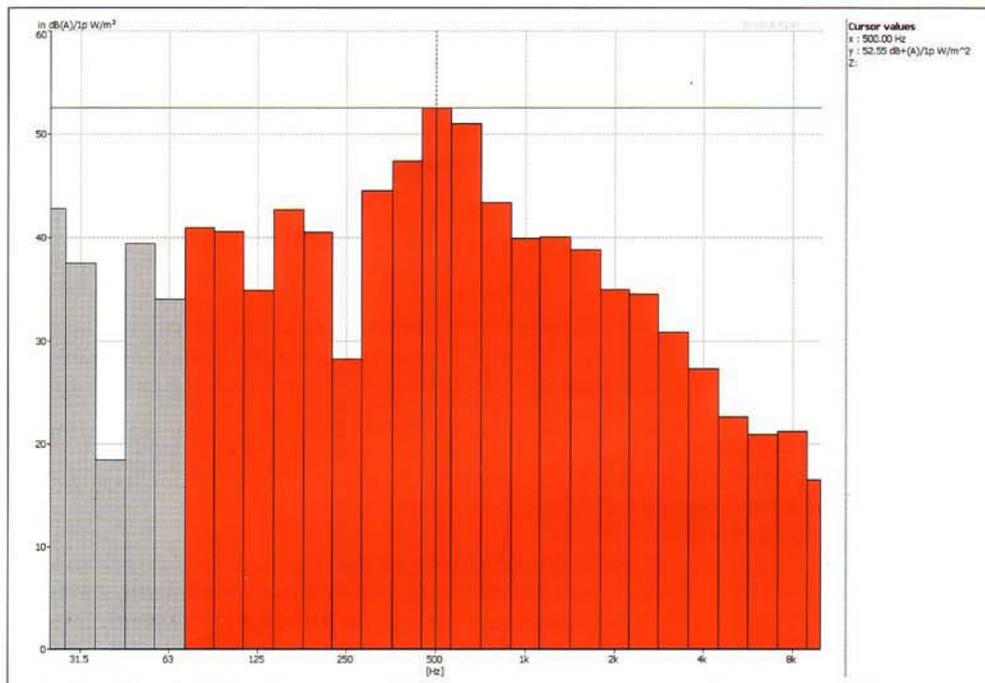


Bild 3 1/3-Oktav-Schallintensitätsspektrum.

- Die Intensität als Vektorgroße liefert neben der Amplitude auch eine Richtungsinformation,
- die echte Schallabstrahlung wird durch die Messung des akustischen Energieflusses angezeigt,
- Berechnung der Schalleistung aus der Intensitätsmessung,
- In-Situ-Messungen (Messprinzip ist relativ tolerant gegen Hintergrund- und nicht korrelierte Geräusche).

Nachteile:

- Eingeschränkter Frequenzbereich durch die Approximation des Schalldruckgradienten (bestimmt durch den Mikrofonabstand): Bis etwa 10 kHz mit dem kleinsten Mikrofonabstand,
- relativ lange Messzeiten,
- hochwertige Messausrüstung ist erforderlich: Akkurat aufeinander abgestimmtes Messmikrofonpaar und Messdatenerfassung,
- stationäres Verhalten der zu kartierenden Quelle notwendig.

Selektive Intensität

Intensitätsmessungen und -kartierungen sind ein effizientes Werkzeug zur Bestimmung des Ortes, der absoluten Schalleistung und des relativen Beitrags von Quellen, die sich an der Oberfläche eines Objekts befinden (Hot-Spot-Analyse). Soll jedoch die interne Ursache für den abgestrahlten Schall gemittelt werden, geht dies nur teilweise über indirekte Indikatoren, wie die spektralen Anteile des Schallspektrums (z. B. Motordrehzahl, Zahneingriffsfrequenzen eines Getriebes und deren Harmonische). Die selektive Intensität ist eine direkte Methode zur Messung und Kartierung der Schallanteile, die durch ein spezifisches Bauteil oder eine Bauteilgruppe hervorgerufen werden.

Die selektive Intensitätstechnik berechnet den Anteil der Schallintensität, die mit einem Referenzsignal korreliert. Diese Referenzaufnehmer können Mikrofone, Beschleunigungsaufnehmer oder auch andere Sensoren sein, die am Ort der eigentlichen Schallquelle platziert werden. Mithilfe eines Kunstkopfs ist es so z. B. auch möglich, den Teil einer Quelle zu messen und zu kartieren, der einen Schallanteil am Ohr (z. B. des Fahrers) verursacht.

Zusätzliche Vorteile:

- Bestimmung der Schallintensität, die kohärent zu einem Referenzsignal ist,
- präzisere Ortung der Schallquellen,
- gleichzeitige Messung der traditionellen und der selektiven Intensität.

Beamforming

Die Beamforming-Methode arbeitet ähnlich dem Prinzip einer Parabolschüssel. Durch Fokussieren der Parabolschüssel auf eine Anzahl von Punkten würde man eine Lärmkarte erhalten, aber es gibt hier einige schwerwiegende praktische Begrenzungen.

Beim Beamforming wird die Parabolschüssel durch ein Mikrofonarray ersetzt. Ist der Abstand von jedem Arraymikrofon zu jedem Punkt auf der Schallquelle bekannt, lassen sich die Länge des Übertragungswegs und damit die Übertragungszeit berechnen. Durch die Verwendung von individuellen Laufzeiten, abhängig vom Abstand des jeweiligen Messpunkts von der Schallquelle, erfassen alle Messmikrofone die gleiche Wellenfront und das Array wird dadurch auf diesen Punkt der Quelle fokussiert. Durch Ändern der Signallaufzeiten lässt sich bestimmen, wo das Array „hinschaut“, und eine Fläche kann kartiert werden, ohne das Messarray physikalisch verschieben zu müssen.

Dieses Verfahren gehört zu den wenigen Methoden, die eine Schallquellenkartierung von Objekten erlauben, die deutlich größer als das Messarray oder weit entfernt sind. Die Effektivität der Methode hängt stark vom geometrischen Aufbau des Mikrofonarrays, dem Messabstand und dem Frequenzbereich ab. Arrays mit geometrisch regelmäßiger Mikrofonanordnung (Gitterarray oder Kreuzarray) erzeugen bei bestimmten Frequenzen starke Geisterbilder, d. h. es werden Quellen angezeigt, die nicht vorhanden sind. Arrays mit unregelmäßiger Mikrofonanordnung eliminieren diesen Effekt und ermöglichen die Nutzung dieser Technologie zu sehr hohen Frequenzen hin.

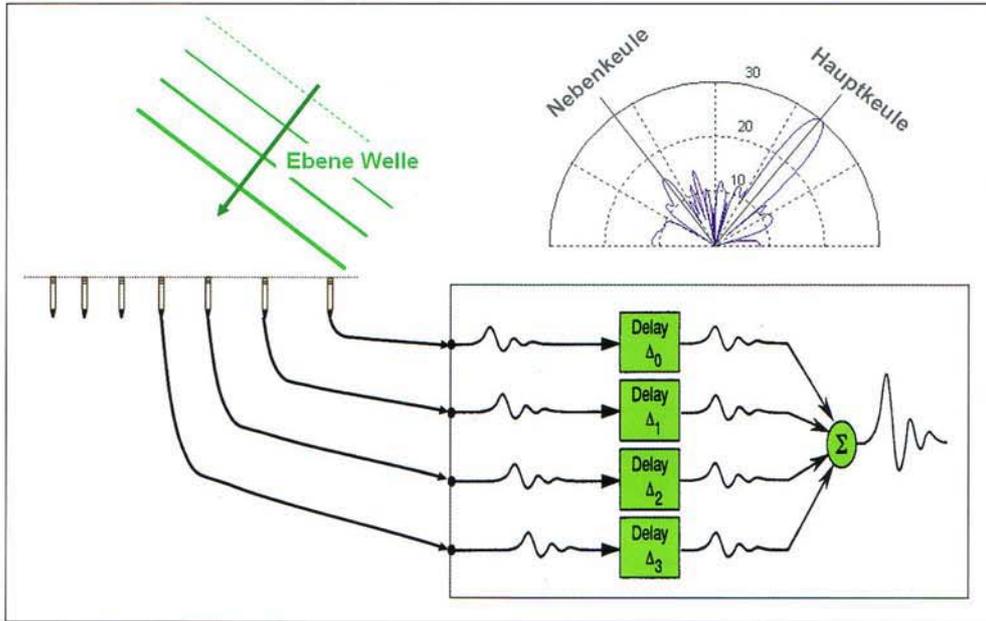


Bild 4 Individuelle Verzögerungszeiten Δ_m werden so eingestellt, dass die Signale der ebenen Wellen aus der gewählten Richtung kohärent aufaddiert werden.

Theoretischer Hintergrund

Wie in **Bild 4** gezeigt, wird ein ebenes Array mit Mikrofonen an den Positionen r_m ($m=1,2,\dots,M$) angenommen. Verwendet man ein solches Mikrofonarray mit dem Delay-and-Sum-Beamforming-Algorithmus, werden die gemessenen Schalldrucksignale p_m individuell verzögert und anschließend aufsummiert:

$$z(\vec{\kappa}, t) = \sum_{m=1}^M p_m(t - \Delta_m(\vec{\kappa})) \tag{7}$$

Die individuellen Verzögerungszeiten Δ_m werden so gewählt, dass sich eine selektive gerichtete Empfindlichkeit in eine bestimmte Richtung ergibt. Dies wird durch den Einheitsvektor κ gekennzeichnet. Ziel ist es, die Verzögerungszeiten so anzupassen, dass die einer ebenen Welle zugehörigen Signalanteile aus einer Richtung κ vor dem Summieren zeitlich aufeinander abgestimmt werden. Aus der geometrischen Anordnung ergibt sich:

$$\Delta_m = -\frac{\vec{\kappa} \cdot \vec{r}_m}{c} \tag{8}$$

Hierbei ist c die Schallgeschwindigkeit. Signalanteile aus anderen Richtungen werden vor der Summation nicht aufeinander abgestimmt und somit auch nicht kohärent addiert. Die Gleichung für den Delay-and-Sum-Beamformer im Frequenzbereich ergibt:

$$\tilde{Z}(\vec{\kappa}, \omega) = \sum_{m=1}^M P_m(\omega) e^{-j\omega\Delta_m(\vec{\kappa})} = \sum_{m=1}^M P_m(\omega) e^{j\frac{\omega}{c}\vec{\kappa} \cdot \vec{r}_m} \tag{9}$$

wobei $k = \kappa k$ den Wellenzahlvektor für die aus der Richtung κ , in die das Array fokussiert ist, einfallende ebene Welle beschreibt. Die Wellenzahl k ergibt sich aus ω/c . Durch die Wahl der Zeitverzögerungen $\Delta_m(\kappa)$ oder äquivalent dem bevorzugten Wellenzahlvektor $k = -\kappa k$ wird der Beamformer in die entsprechende Richtung im Fernfeld ausgerichtet. Idealerweise sollte nun der Schallanteil, der aus der ausgewählten Richtung kommt, einen Beitrag zur Schallkartierung liefern. Um herauszubekommen, wie viel „Verschmie-

ren“ durch Schallanteile von ebenen Wellen aus anderen Richtungen entsteht, geht man vom Einfall einer ebenen Wellen mit einem Wellenzahlvektor k_0 aus, der sich vom bevorzugten $k = -\kappa k$ unterscheidet. Der gemessene Schalldruck dieser Mikrofone ist dann:

$$P_m(\omega) = P_0 \cdot e^{-j\vec{k}_0 \cdot \vec{r}_m} \tag{10}$$

Dies ergibt als Ausgangsgröße für den Beamformer mithilfe von Gl. (11)

$$\tilde{Z}(\vec{\kappa}, \omega) = P_0 \sum_{m=1}^M e^{j(\vec{k} - \vec{k}_0) \cdot \vec{r}_m} = P_0 W(\vec{k} - \vec{k}_0) \tag{11}$$

Hierbei ist die Funktion W

$$W(\vec{k}) \equiv \sum_{m=1}^M w_m e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_m} \tag{12}$$

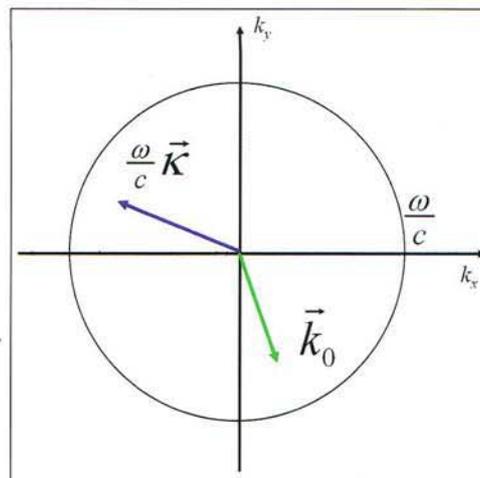


Bild 5 Projektion der Wellenzahlen auf die (k_x, k_y) -Ebene.

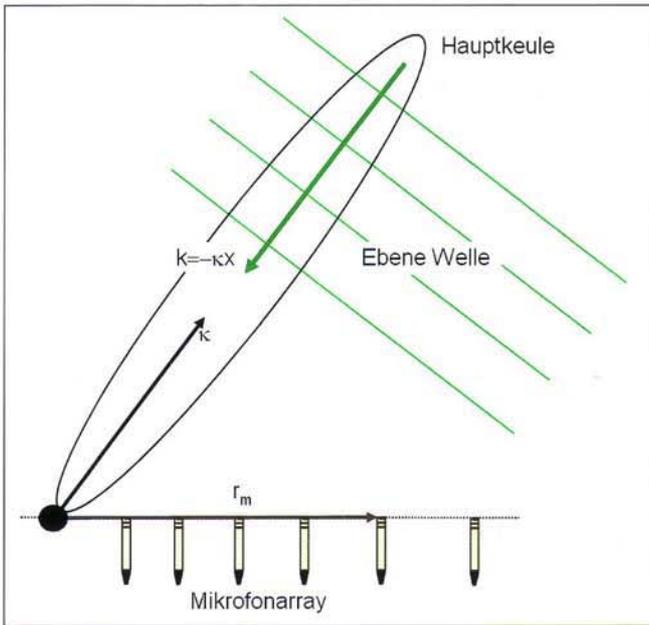


Bild 6 Beschreibung eines Phased Mikrofonarrays. Die richtungsabhängige Empfindlichkeit wird durch die Hauptkeule gebildet.

das sog. Array Pattern, das vollständig aus der Arraygeometrie zustande kommt. Es hat die Form einer allgemeinen örtlichen DFT (Diskrete Fourier Transformation) einer Gewichtungsfunktion, die gleich 1 über der Arrayfläche und gleich 0 außerhalb der Arrayfläche ist. Da die z-Koordinaten der Mikrofonpositionen r_m gleich 0 sind, ist das Array Pattern unabhängig von K_z . Daher soll nur das Array Pattern W in der (k_x, k_y) -Ebene betrachtet werden, z. B. die Projektion des Wellenzahlvektors auf dieser Ebene (**Bild 5**).

W hat einen Bereich mit sehr hohen Werten, um den Ursprung mit einem Spitzenwert von M bei $(k_x, k_y) = (0, 0)$. Gemäß Gl. (11) repräsentiert dieser Spitzenwert die hohe Empfindlichkeit für ebene

Wellen, die aus der Richtung von κ kommen. **Bild 6** illustriert diesen Spitzenwert, auch Hauptkeule genannt. Andere richtungsabhängige Spitzenwerte (Nebenkeulen) bedeuten für Wellen aus deren Richtungen einen zusätzlichen fehlerhaften Beitrag für die Messung in der Hauptkeulenrichtung. Dies erzeugt falsche Werte und Bilder für die Schallkartierung (Geisterbilder). Ein gutes Phased Array Design kann daher durch das Verhältnis der möglichst niedrigsten Seitenkeulen (MSL Maximum Sidelobe Level) im Verhältnis zur Hauptkeule charakterisiert werden. In Bezug auf Gl. (11) haben beide Vektoren k und k_0 eine Länge gleich der Wellenzahl k , und sie können in entgegengesetzte Richtungen zeigen, beispielsweise in positive und negative x-Achsen-Richtung oder so, dass $|k - k_0| \leq 2k$ ist. Daher ist für die gegebene Frequenz ω nur der Bereich $|K| \leq K_{\max} = 2 \omega_{\max}/c$ des Array Patterns sichtbar. Hat das Array einen niedrigen MSL für $|K| \leq K_{\max} = 2 \omega_{\max}/c$, wird die Beamforming-Berechnung akkurate Schallkartierungen mit sehr wenigen fehlerhaften Bildern bis zu einer Frequenz von $\omega_{\max} = 0,5 K_{\max} c$ liefern. Wenn der Beamformer auf Richtungen κ , die nicht mehr als 30° von der Hauptachse abweichen, fokussiert wird, dann ist die Projektion des Wellenzahlvektors $k(\kappa) - k_0$ auf der Arrayebene $< (3/2)k$. Daher ist nur der Bereich $|K| \leq (3/2)k = (3/2)\omega/c$ sichtbar, wodurch die obere Grenzfrequenz $\omega_{\max}(30^\circ) = (2/3)K_{\max}/c$ ergibt.

Die Breite der Hauptkeule des Array Patterns kann aus der Ähnlichkeit von Gl. (11) und einer 2D DFT einer rechteckigen Art von örtlicher Fensterung, die das gesamte Array abdeckt, bestimmt werden. Die Breite der Hauptkeule ist antiproportional zum Durchmesser D des Arrays. Die erste „NULL“ ist bei etwa $|K| = K_{\min} = 2\pi/D$.

Optimale Arraygeometrie

Die Qualität eines Beamformingsystems bestimmt sich aus der Fähigkeit, die auftretenden Seitenkeulen in Verhältnis zur Hauptkeule zu unterdrücken (die Möglichkeit des Systems zu fokussieren). Die größte Herausforderung im Array Design ist somit, einen minimalen MSL im geforderten Frequenzbereich zu realisieren, und damit fehlerhafte Kartierungen zu vermeiden.

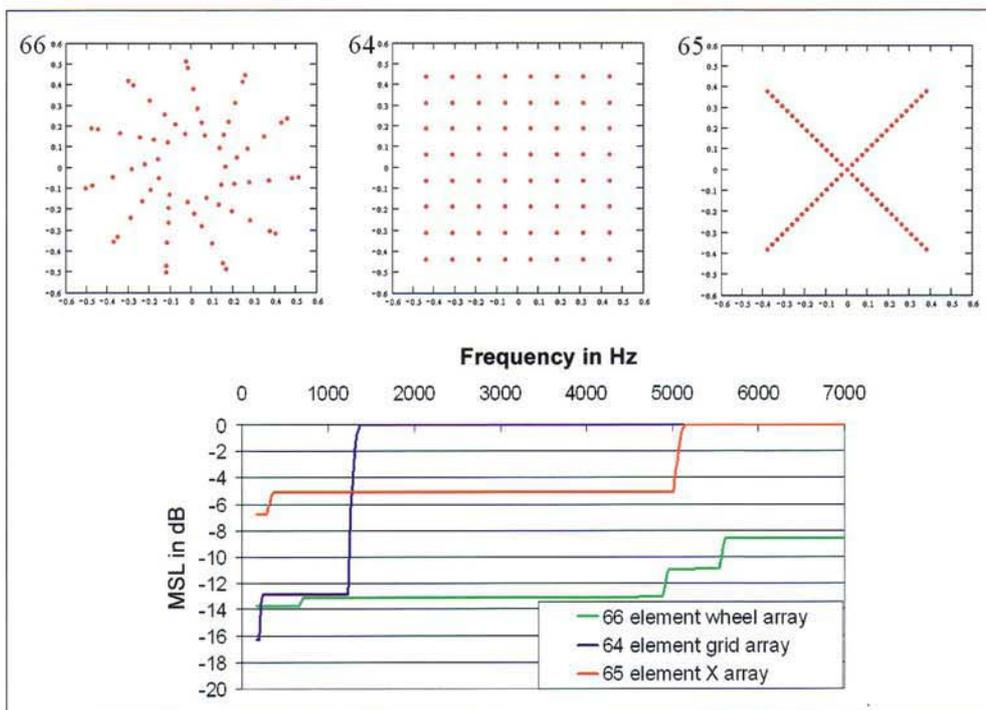


Bild 7 Vergleich dreier Array-Designs.

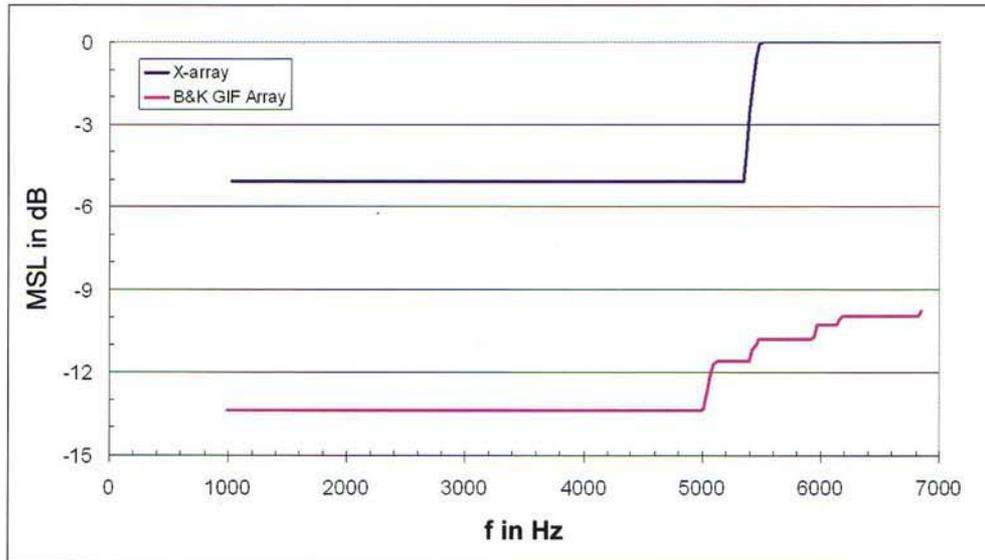


Bild 8 Vergleich der Maximum Side Lobe Levels für ein X-Array und ein Ghost Image Free Array (GIF) von Brüel & Kjaer.

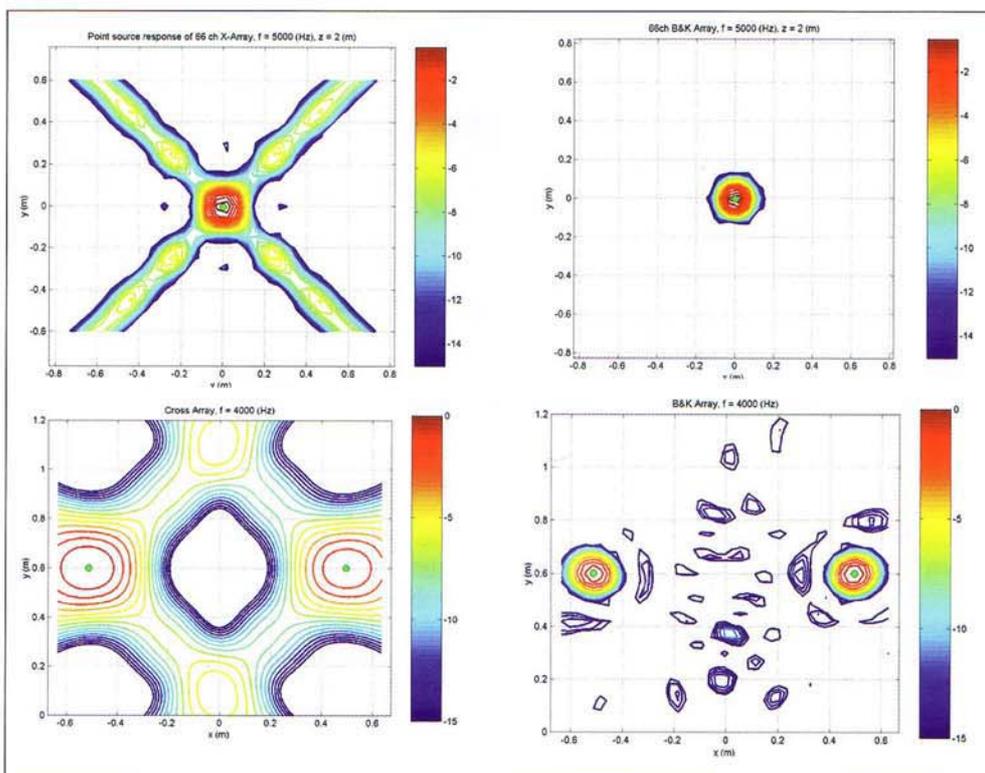


Bild 9 Hohe Seitenkeulen-Interferenzen beim X-Array verglichen mit dem GIF-Design.

Drei verschiedene Array-Designs werden in **Bild 7** verglichen. Es ist klar zu erkennen, dass das 66-Kanal-Wheel Array (ca. 1 m Durchmesser) die niedrigsten MSL-Werte über den gesamten Frequenzbereich ermöglicht (**Bild 8**). Arrays mit regelmäßiger Mikrofonanordnung erzeugen starkes örtliches Aliasing. Diese Aliasing-Probleme sind als Geisterbilder der gemessenen gerichteten Schallquellen deutlich zu erkennen und machen eine präzise und eindeutige Lokalisation der Schallquellen unmöglich.

Der in **Bild 9** gezeigte Vergleich des GIF (Ghost Image Free) Arrays von Brüel & Kjaer mit dem X-Array zeigt einmal eine einzelne Schallquelle in Höhe der Arraymittelpunkte. Das GIF-Array ist in der Lage, die Quelle ohne störende Geisterbilder darzustellen. Das nahezu gleiche Verhalten ist im zweiten Beispiel mit zwei un-

korrelierten komplexen Schallquellen sichtbar. Der Effekt der hohen Seitenkeulen ist beim X-Array deutlich zu erkennen.

Bild 10 zeigt ein patentiertes Wheel Array, bestehend aus einer ungeraden Anzahl von kleinen identischen Linienarrays, die als Speichen mit identischem Winkelabstand zueinander angeordnet sind.

Anwendungen

Eine der möglichen Anwendungen besteht in Messungen an Objekten im Windkanal. **Bild 11** zeigt das Ergebnis eines Fahrzeugs im Windkanal, wobei die Windgeschwindigkeit etwa 130 km/h betrug. Der Test wurde mit einem 90-Kanal-Wheel Array parallel zur Fahrzeugseite in einem Abstand von 3,3m durchgeführt. Deutlich sind die Abrissgeräusche im Bereich des Radkastens, des Außen-

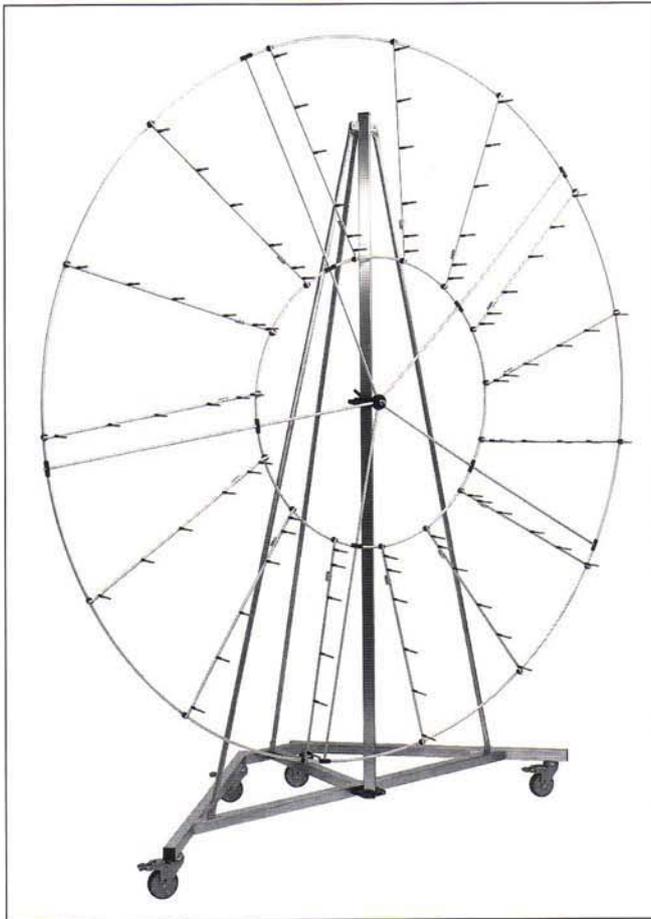


Bild 10 Beispiel eines 90-Kanal-Beamforming Wheel Array von Brüel & Kjaer. Das Array besteht aus 15 identischen Speichen mit sechs Mikrofonen und integrierter Verkabelung. Der Durchmesser des Arrays beträgt 2,43 m.

spiegels und der Türgriffe zu erkennen. Da das Array außerhalb des Windstroms steht, entstehen an den Messmikrofonen keine störenden Strömungsgeräusche.

Die Beamforming-Technologie bietet sich auch hervorragend für Objekte an, die größer als das verwendete Array sind. Da das System ähnlich einer optischen Kamera einen Öffnungswinkel von $\pm 30^\circ$ hat, können mit entsprechendem Abstand auch Objekte mit großen Abmessungen, wie gesamte Fahrzeuge, große Baumaschinen, Industrieanlagen oder auch Flugzeuge gemessen werden.

Auch Messungen an Verbrennungsmotoren liefern zusammen mit der erfassten Drehzahl interessante Möglichkeiten, die Schallabstrahlung der Maschine bei höheren Frequenzen in Abhängigkeit von der Drehzahl oder Kurbelwellenposition zu kartieren. Hierbei profitiert die Beamforming-Technik von der guten örtlichen Auflösung bei hohen Frequenzen.

Spherical Beamforming

Das Spherical Beamforming basiert auf einem kugelförmigen Array. Durch die kugelförmige Symmetrie des Mikrofonarrays ergibt sich keine Vorzugsrichtung für den einfallenden Schall und somit können Quellen überall um die Kugel herum lokalisiert werden. Die Schlüsselfunktionen sind die Harmonischen der Kugelfunktion. Vorteil dieser Technik ist die Schallkartierung kompletter Innenräume in sehr kurzer Zeit.

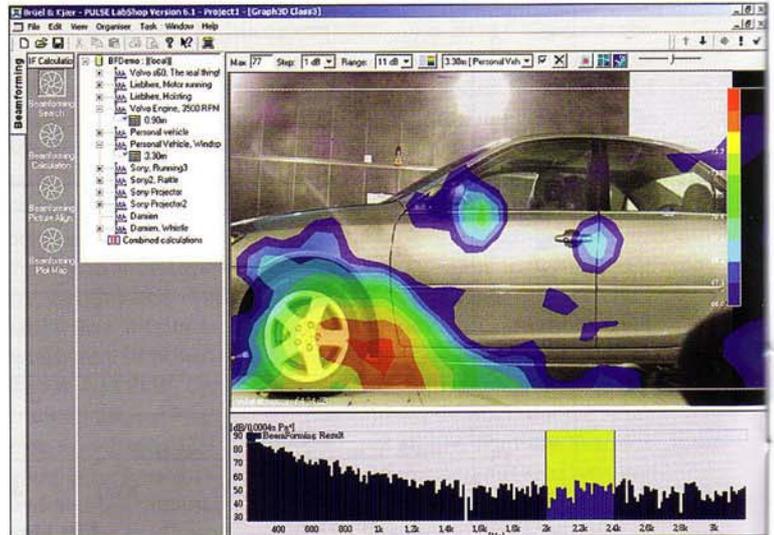


Bild 11 Ergebnis einer Beamforming-Messung mit einem 90-Kanal-Beamforming Array im Windkanal. Der obere Teil des Bildes zeigt die Schallquellenverteilung. Im unteren Teil wird das Spektrum für einen ausgewählten Punkt dargestellt.



Bild 12 Spherical Beamforming Array mit 40 Mikrofonen und zwölf Kameras inkl. PULSE Messsystem.

Bild 12 zeigt ein Kugel-Array mit 40 eingebauten Mikrofonen und zusätzlichen zwölf Kameras zur Erfassung des umgebenden Raums. Nach der Berechnung der einfallenden Schallanteile für die Richtungswinkel Theta und Phi, ist eine $360^\circ \times 180^\circ$ Schallquellenkartierung möglich. **Bild 13** zeigt die Kartierung eines Fahrzeuginnenraums mit zwei Quellen jeweils im Fußraum auf der Fahrer- und Beifahrerseite. Eine zusätzliche Quelle ist im Bereich der Heckablage zu erkennen.

NAH – Akustische Nahfeldholografie STSF – Spatial Transformation of Sound Fields

Mithilfe gemessener Kreuzspektren in einer Messebene können mit dieser Technik alle akustischen Parameter in weiteren Ebenen berechnet werden. Das Schallfeld kann mittels der akustischen Nahfeldholografie (NAH)-Technik oder der Helmholtz-Integralgleichungstechnik, die auch Anwendung bei der Lösung der homogenen Wellengleichungen im Fernfeld findet, berechnet werden.

Diese Technik kann mit der optischen Holografie, in der die Stärke und Phasenlage des kohärenten Lichts auf Film gebannt wird, verglichen werden. Bei der akustischen Holografie werden die Amplitude und Phasenlage (relativ zu einer Referenz) des Schalldruckfelds in einer Messebene aufgenommen. Diese Technik verwendet ein Array aus Messmikrofonen, das eine zu kartierende Region abscannt sowie Referenzsensoren an festen Positionen berücksichtigt (**Bild 14**).

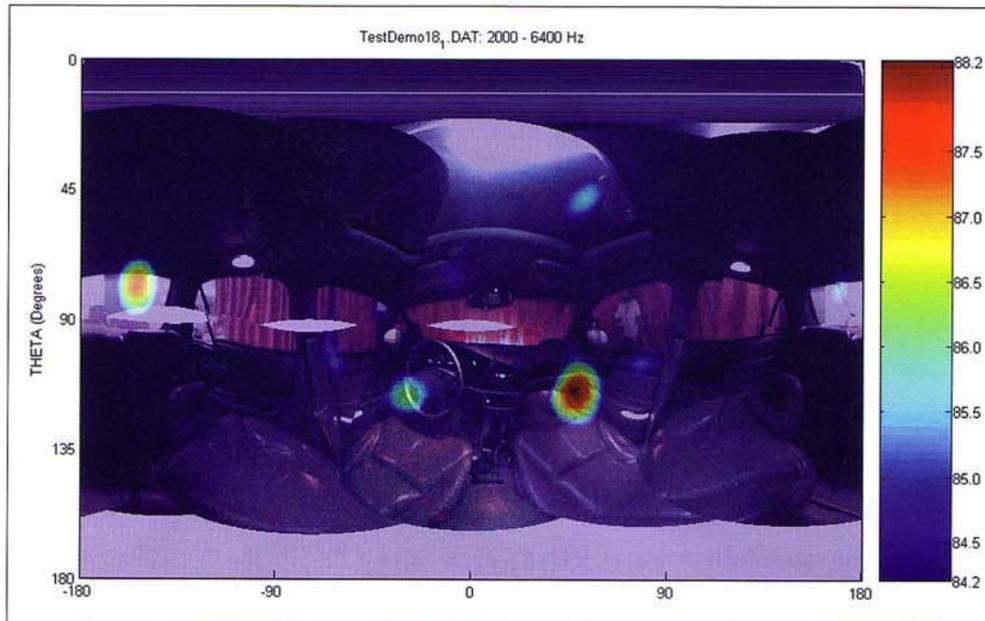


Bild 13 Schallkartierung eines Fahrzeuginnenraums mit Lautsprechern als Schallquellen.

Theoretischer Hintergrund

Die akustische Nahfeldholografie ermöglicht Untersuchungen der örtlichen spektralen oder auch zeitlichen Abhängigkeiten des akustischen Schallfelds. Anstatt alle räumlichen Punkte in einem Raum direkt zu messen, werden mit der Nahfeldholografie die Größen des Schallfelds ober- und unterhalb der gemessenen Hologrammebene rekonstruiert. Dies führt zu einer deutlich kürzeren Datenerfassung.

Die Theorie der Nahfeldholografie basiert auf der Helmholtz-Integralgleichung und der zweidimensionalen örtlichen Fourier-Transformation. Der komplexe Schalldruck auf einer Ebene parallel zur Messebene wird mittels der inversen 2D FFT aus dem Produkt der gemessenen Spektren und einer modifizierten Greenschen Funktion berechnet. Der Vektor der Partikelschnelle wird anschließend mithilfe der Euler-Gleichung ermittelt. Aktive und reaktive Intensitätsvektoren ergeben sich aus dem Real- und Imaginärteil aus dem Produkt des berechneten komplexen Schalldrucks und der konjugierten Partikelschnelle.

Die dreidimensionale Wellengleichung kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ ist der Laplace-Operator, der die skalare Divergenz des komplexen Schalldrucks (partielle Ableitungen in Bezug auf die Koordinaten x, y und z) abbildet. r ist die Position im Raum und c ist die Schallgeschwindigkeit. Die Darstellung dieser Wellengleichung ist auch im Frequenzbereich, unter der Annahme sinusförmiger Wellenkomponenten und Einführung der Wellenzahl k , möglich:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (14)$$

mit

$$k = \frac{d}{c} \quad (15)$$

Die Helmholtz-Integral-Gleichung (HIE) kann aus der Wellengleichung abgeleitet werden und das Wellenfeld kann damit an einer Position außerhalb der geschlossenen Oberfläche, die die Quelle umgibt, ausgedrückt werden. Die häufigste allgemeine Form dieses Kirchhoff-Helmholtz-Integrals ergibt sich zu

$$p(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \iint_S \left[G(\vec{r}|\vec{r}_0) \nabla p(\vec{r}_0) - p(\vec{r}_0) \nabla G(\vec{r}|\vec{r}_0) \right] \cdot n dS \quad (16)$$

Wobei G die Greensche Funktion, definiert als

$$G(\vec{r}|\vec{r}_0) = \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}_0|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}_0|} \quad (17)$$

ist.

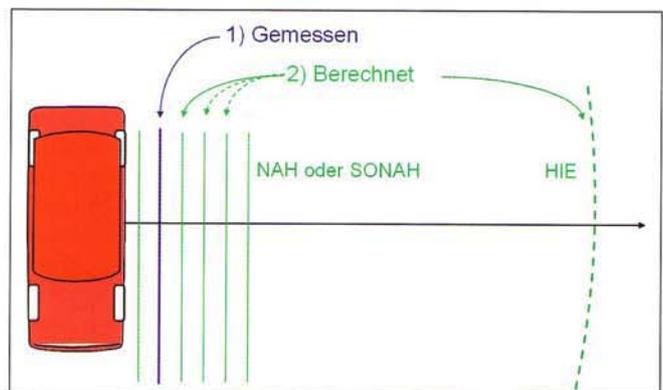


Bild 14 STSF-Prinzip.

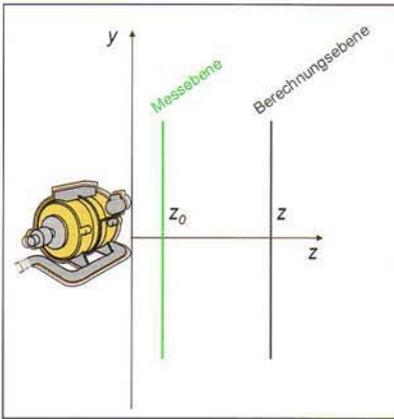


Bild 15 Koordination Konvention für Holografie-messungen.

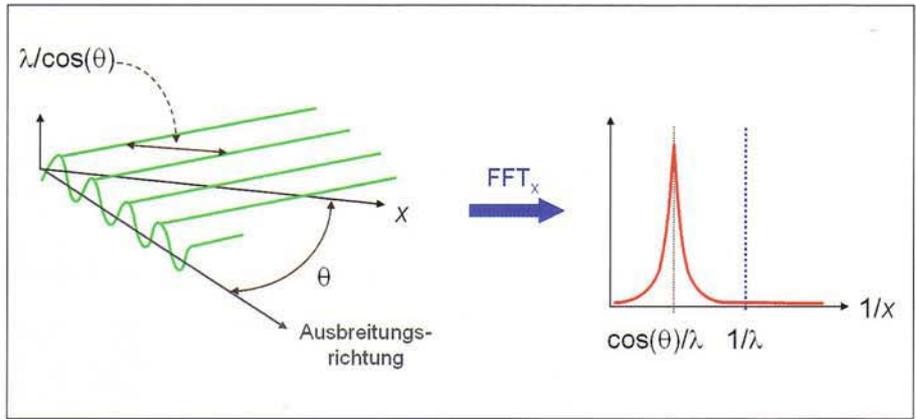


Bild 16 Örtliche Fourier-Transformation eines Schallfelds.

Einführung der örtlichen Fourier Transformationsgleichung:

$$H(K_x, K_y, z - z_0) = e^{-jk_z(z-z_0)} \quad (20)$$

$$\begin{cases} P(K_x, K_y, z, \omega) \equiv \iint P(x, y, z, \omega) e^{-j(K_x x + K_y y)} dx dy \\ p(x, y, z, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint P(K_x, K_y, z, \omega) e^{-j(K_x x + K_y y)} dK_x dK_y \end{cases} \quad (18)$$

All diese Formulierungen nutzen das in **Bild 15** dargestellte konventionelle Koordinatensystem.

Die Gleichung kann in folgender Form geschrieben werden:

$$\begin{aligned} p(x, y, z) &= h(x, y, z - z_0) \otimes p(x, y, z_0) \text{ für } z \geq z_0 \\ &\downarrow \\ &\text{Örtliche 2D - Fourier Transformation} \\ &\downarrow \\ P(K_x, K_y, z) &= H(K_x, K_y, z - z_0) \cdot P(K_x, K_y, z_0) \end{aligned} \quad (19)$$

mit der Transferfunktion:

Bild 16 erklärt anhand der örtlichen Fourierzerlegung, wie die örtlichen Frequenzen mit der Ausbreitungsrichtung und der Wellenlänge zusammenhängen.

Der FFT-Prozess ist in **Bild 17** dargestellt. Die neue Ebene wird mithilfe der HIE berechnet. Es zeigt ein Blockdiagramm des Berechnungsprozesses der STSF, wobei der Schalldruck weiter von der Quelle entfernt mit einem zweidimensionalen Ausbreitungskern berechnet wird. Jede Ebene wird für jede individuelle Frequenz berechnet. Hierbei ist darauf zu achten, dass das Abtastintervall zur Vermeidung von örtlichen Aliasing-Produkten hoch genug ist.

Die Wellenzahl k_z kann mittels der drei anderen Wellenzahlen folgendermaßen dargestellt werden:

$$k_z^2 \equiv k^2 - k_x^2 - k_y^2 \quad (21)$$

Zwei Fälle können in Abhängigkeit vom Wert der Wellenzahl k_z auftreten: Der Fall für

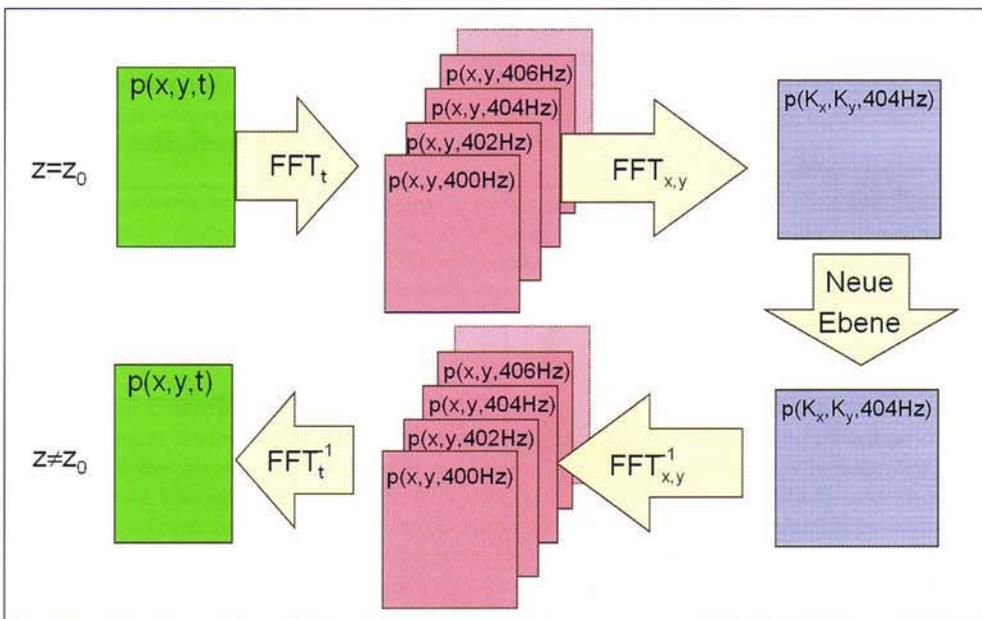


Bild 17 Holografie-Berechnungsprinzip.

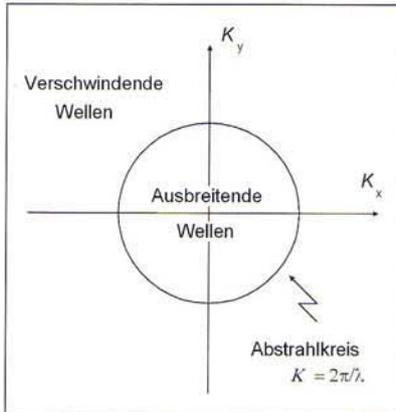


Bild 18 Abstrahlkreis.

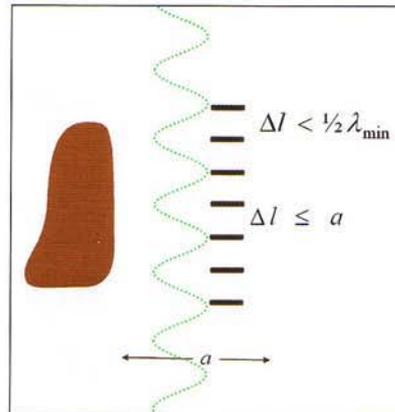


Bild 19 Rasterabstand und Auflösung bei STSF-Messungen.



Bild 20 STSF-Array mit Roboter.

- sich ausbreitende Wellen:

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad \text{für } k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \quad (22)$$

-verschwindende Wellen:

$$k_z = -j\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2} \quad \text{für } k_x^2 + k_y^2 > k^2 \quad (23)$$

Abhängig von der Wellenzahl k_z breiten sich die ebenen Wellen aus oder klingen exponentiell ab. Die verschwindenden Wellen breiten sich in der x-y-Ebene aus, klingen jedoch in z-Richtung (Ausbreitungsrichtung) exponentiell ab. Das Ausklingen nimmt zu höheren örtlichen Frequenzen hin zu.

Bild 18 zeigt eine geometrische Darstellung für diese beiden Fälle. Die Grenze zwischen sich ausbreitenden Wellen und abklingenden Wellen wird Abstrahlkreis genannt.

Messtechnik

Die minimale Ausrüstung für eine STSF-Messung besteht aus einem Referenzsensor, einem Scanning-Mikrofon, einem Analysator, der Kreuzspektren berechnen kann und einem Rechner zur Darstellung der entsprechenden Kartierungen. Dies wird auch an sehr kleinen Objekten wie Hörgeräten durchgeführt. Ein Sondenmikrofon wird als Scanning-Mikrofon verwendet, das Referenzsignal ist das elektrisch eingespeisten Nutzsignal bzw. das mit einem Kuppler aufgenommene Drucksignal. Diese Technik ist aber für viele Anwendungen zu zeitintensiv. Heute eingesetzte Systeme verwenden eine gewisse Anzahl von Referenzsensoren, ein Array von Scanning-Mikrofonen, ein Positioniersystem (z.B. einen Roboter) und ein Mehrkanal-Analysesystem einschließlich Rechner. Durch die Anwendung der zweidimensionalen FFT werden die Messpunkte auf einem rechteckigen äquidistanten Raster angeordnet.

Die erreichbare örtliche Auflösung zeigt **Bild 19**. Wenn λ_{\min} die Wellenlänge der höchsten Frequenz in der Analysis ist und örtliches Aliasing vermieden werden soll, sollte der Abstand zwischen den Messpunkten

$$\Delta l \leq \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad \text{und } \Delta l \leq a \quad (24)$$

betragen. Hierbei ist a der Abstand zwischen der abstrahlenden Quelle und den Array-Mikrofonen.

Eine wichtige Voraussetzung für die STSF-Technik ist, dass alle Berechnungen der Auto- und Kreuzspektren wiederholbar sind. Diese Voraussetzung ist gegeben, wenn das Verhalten der Quelle als stationär bezeichnet werden kann und ein ausreichendes Bandbreiten-Zeitblock-Produkt für die Analyse besteht.

Anwendungen

Die STSF-Technik ist für alle Objekte mit einer stationären Schallabstrahlung einsetzbar. In vielen Fällen wird das Scanarray mit einem XY-Roboter verfahren, wodurch eine große Anzahl von Messpunkten mit geringem personellem Aufwand möglich wird. **Bild 20** zeigt ein Beispiel aus der Automobiltechnik: Der Fahrzeuginnenraum wird über eine Schallquelle mit weißem Rauschen angeregt. Außerhalb des Fahrzeugs wird das Schallfeld mit dem Mikrofonarray abgescannt.

Die Referenz bildet das Generatorsignal für die Rauschquelle, wodurch störende Nebengeräusche eliminiert werden. Aus der Darstellung der Schallquellenverteilung in **Bild 21** sind Leckagen im Bereich des Außenspiegels, der oberen Türdichtung und des Türschlosses deutlich zu erkennen.

NS-STSF – Non Stationary Spatial Transformation of Sound Fields

Für zeitlich veränderliche (nichtstationäre) Signale gibt es eine Methode, bei der die Berechnungen mittels Holografie (TDH – Time Domain Holografie) erfolgen. Wie bei der stationären Holografie lassen sich auch hier alle Schallfeldparameter in jeder beliebigen Ebene parallel zur Messebene berechnen. Da es sich bei der TDH um eine Analysetechnik für nichtstationäre Signale handelt, müssen die Messwerte an allen Messpunkten gleichzeitig erfasst werden. Die NS-STSF liefert alle Schallfeldgrößen (Schalldruck, Partikelschnelle, Aktive und Reaktive Intensität usw.) als Funktion der Zeit, Drehzahl oder auch des Drehwinkels (**Bild 22**).

Das Ergebnis einer NS-STSF-Berechnung liefert eine Abfolge von Schallfeldkartierungen eines akustischen Parameters in einer Berechnungsebene parallel zur Messebene. Die örtliche Auflösung der Kartierung wird durch den Abstand der Messmikrofone zueinander bestimmt, die zeitliche Auflösung ergibt sich aus der verwendeten Abtastrate des A/D-Wandlers in der Datenerfassungseinheit.

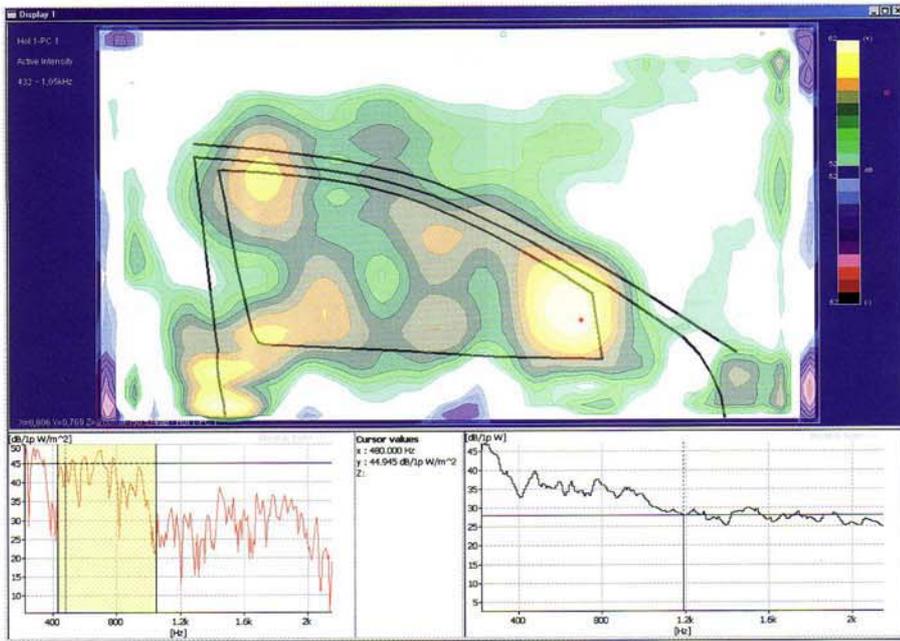


Bild 21 STSF-Kartierung einer Pkw-Seitenscheibe bei Schallanregung mit weißen Rauschen im Fahrzeuginnenraum.

Theoretischer Hintergrund

Unter Verwendung der gleichen Konventionen für das Koordinatensystem wie in Bild 15 dargestellt, kann folgendes Paar örtlicher und zeitlicher Fourier-Transformationsgleichungen eingeführt werden:

$$P(K_x, K_y, z, \omega) \equiv \iiint p(x, y, z, t) e^{j(K_x x + K_y y - \omega t)} dx dy dt \quad (25)$$

$$p(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint P(K_x, K_y, z, \omega) e^{-j(K_x x + K_y y - \omega t)} dK_x dK_y d\omega \quad (26)$$

Fügt man dieses Fourier-Transformationspaar in die Wellengleichung ein, ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_z^2 \right] P(k_x, k_y, z, \omega) = 0 \quad (27)$$

mit

$$k_z^2 \equiv k^2 - k_x^2 - k_y^2 \quad (28)$$

Eine vollständige Lösung von Gl. (27) kann mithilfe der inversen Fourier Transformation als

$$p(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(k_x, k_y, z, \omega) e^{-j(K_x x + K_y y - \omega t)} dk_x dk_y d\omega \quad (29)$$

geschrieben werden.

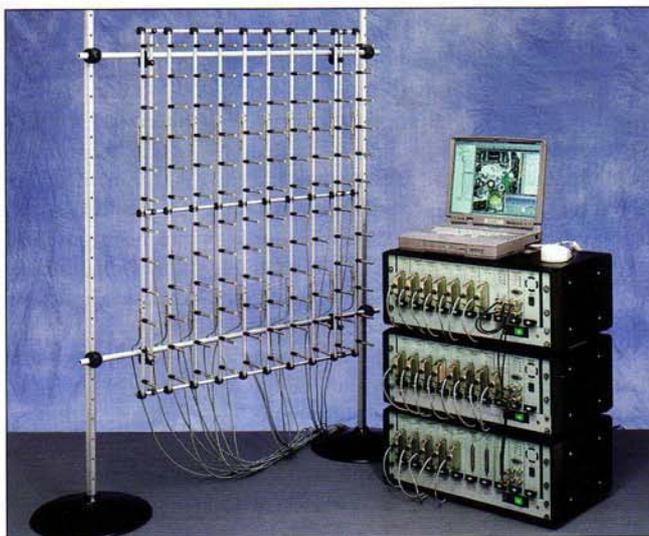


Bild 22 NS-STSF-System mit Full-Size-Array.

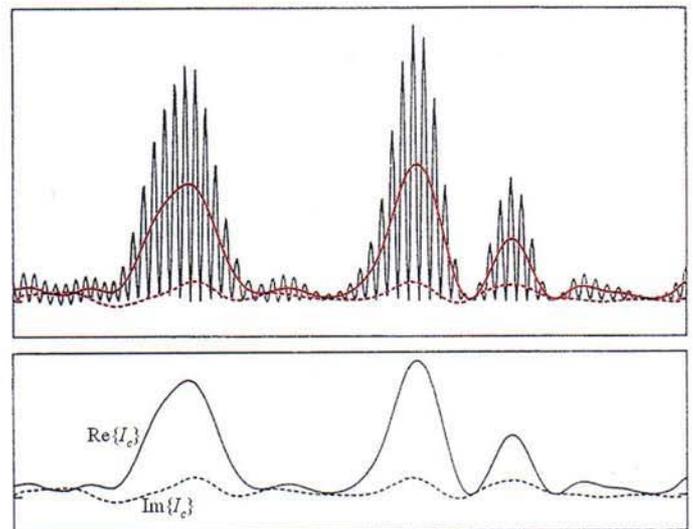


Bild 23 Momentane Intensität, aktiver Anteil (rot, durchgezogene Linie), reaktiver Anteil (rot gestrichelt).

Wellen außerhalb des Abstrahlkreises verschwinden mit exponentiell abfallender Amplitude bei zunehmendem Abstand z (steigende Entfernung von der Quelle), während Wellen innerhalb des Abstrahlkreises sich weiter ausbreiten.

Mithilfe des Massenerhaltungssatzes für nicht viskose Flüssigkeiten

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p \quad (30)$$

kann die Partikelschnelle als

$$v(x, y, z, t) = \frac{1}{\rho c (2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(k_x, k_y, k_z, \omega) \frac{\vec{k}}{k} e^{-j(K_x x + K_y y - \omega t)} dk_x dk_y d\omega \quad (31)$$

ausgedrückt werden. Hierbei ist $\vec{k} \equiv \{k_x, k_y, k_z\}^T$ der normalisierte Wellenzahlvektor und ρc die Impedanz von Luft (**Bild 23**).

Der Augenblickswert des Intensitätsvektors kann als Produkt des Schalldrucks und der Partikelschnelle berechnet werden. Dieser momentane Intensitätsvektor besteht aus der Hüllkurve des aktiven und reaktiven Anteils. Der reaktive Anteil beschreibt örtlich oszillierende Energie, die nicht zu einem Energiefluss beiträgt. Der aktive Anteil ist die Energie, die einen Beitrag zum Schall im Fernfeld liefert. Die Hüllkurven der aktiven und reaktiven Intensität könnten mittels der Hilbert-Transformation aus dem Schalldruck und der Partikelschnelle berechnet werden. Die entsprechenden analytischen Signale ergeben sich folgendermaßen:

$$p_c(\vec{r}, t) = p(\vec{r}, t) + j\tilde{p}(\vec{r}, t) \quad (32)$$

$$\vec{v}_c(\vec{r}, t) = v(\vec{r}, t) + j\tilde{v}(\vec{r}, t) \quad (33)$$

Die komplexe Intensität bestimmt sich aus dem Produkt der beiden Signale und führt zu den Ausdrücken für die aktiven und reaktiven Komponenten der Intensität (Real- und Imaginärteil).

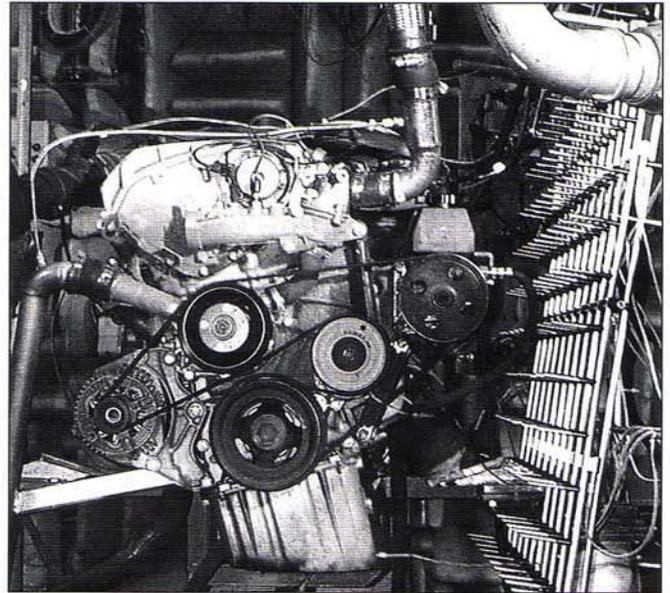


Bild 24 Messaufbau einer NS-STSF-Messung an einem Verbrennungsmotor.

$$\vec{I}_c(\vec{r}, t) \equiv \frac{1}{2} \cdot (p_c(\vec{r}, t) \cdot \vec{v}_c(\vec{r}, t)^*) \quad (34)$$

$$\begin{cases} \vec{I}_{\text{active}}(\vec{r}, t) \equiv \frac{1}{2} \cdot (p(\vec{r}, t) \cdot \vec{v}(\vec{r}, t) + \tilde{p}(\vec{r}, t) \cdot \tilde{\vec{v}}(\vec{r}, t)) \\ \vec{I}_{\text{reactive}}(\vec{r}, t) \equiv \frac{1}{2} \cdot (\tilde{p}(\vec{r}, t) \cdot \vec{v}(\vec{r}, t) - p(\vec{r}, t) \cdot \tilde{\vec{v}}(\vec{r}, t)) \end{cases} \quad (35)$$

Anwendung

Für NS-STSF-Messungen wird ein ausreichend großes Mikrofonarray (typisch >90 Kanäle) benötigt. **Bild 24** zeigt den Messaufbau für die Front- und Seitenansicht eines Verbrennungsmotors.

Die NS-STSF-Technik ist in der Lage, über bestimmte Kurbelwellenwinkelbereiche zu mitteln. Die **Bilder 25** und **26** zeigen die aktive Intensität des 1-kHz-Terzbandes über einen

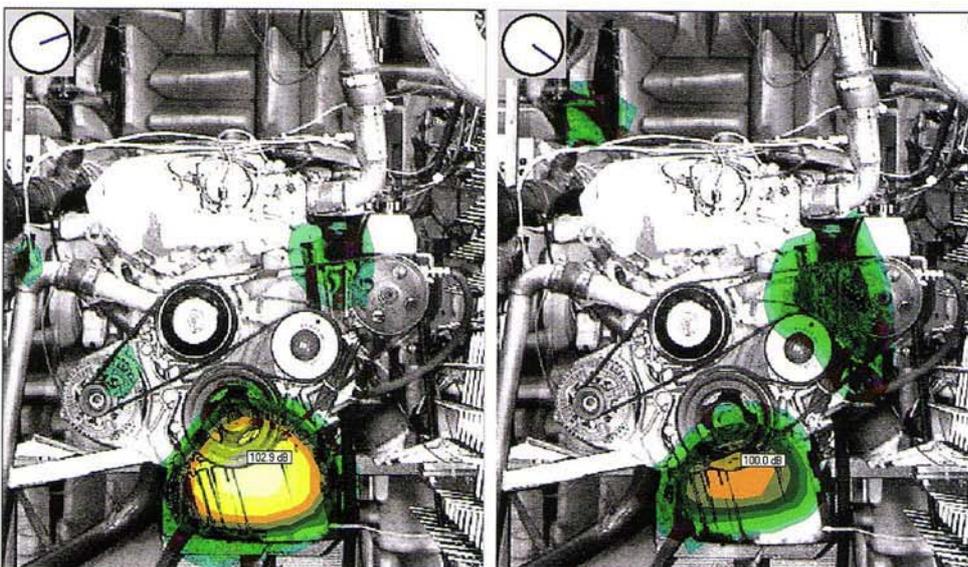


Bild 25 Über 10° Kurbelwellenwinkel gemittelte aktive Intensität (1 kHz Terz) bei etwa 80° und 120°.

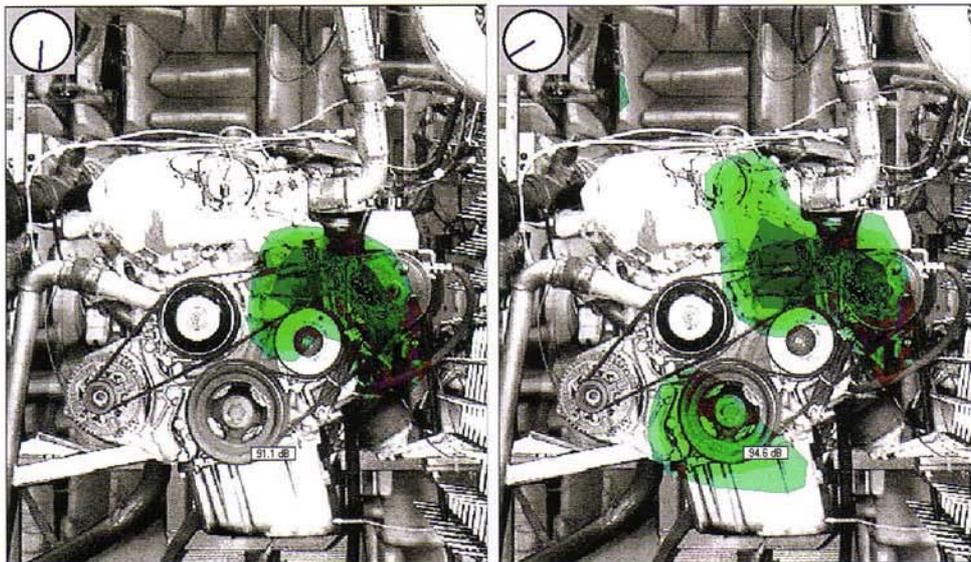


Bild 26 Über 10° Kurbelwellenwinkel gemittelte aktive Intensität (1 kHz Terz) bei etwa 180° und 240°.

Winkelbereich von 10° gemittelt. Die Drehzahl ist konstant bei 4 000 U/min. Die vier Grafiken zeigen die Schallintensitätsverteilung mit fortschreitendem Kurbelwellenwinkel (Intervall ca. 55°). Die Winkelposition ist in der linken oberen Ecke dargestellt.

Der Impuls unterhalb der Kurbelwellen-Riemenscheibe geht der Schallabstrahlung am und um die Lüfterriemenscheibe herum voraus. Dieser Impuls wird durch die Befuerung des ersten Zylinders ausgelöst. Der Druck wird durch die Kurbelwelle in den Motorblock übertragen und von dort abgestrahlt. Anschließend breitet sich die Abstrahlung auf andere Teile der Maschine aus. Die hohe Abstrahlung nahe der Lüfterriemenscheibe kann durch die Transmission über den Steuerriemen entstehen. Durch die Verbindung

der momentanen Schallkartierungen mit den Winkelpositionen der Kurbelwelle ist eine Ursachenforschung für Schallabstrahlungsphänomene leicht zu visualisieren.

SONAH

Die in holografischen Systemen wie STSF und NS-STSF verwendete Berechnungsmethode der akustischen Nahfeldholografie (NAH), besitzt drei wesentliche Begrenzungen:

1. Zur Vermeidung räumlicher Fenstereffekte muss die Messfläche die gesamte Schallquelle plus etwas zusätzliche Fläche abdecken.
2. Das Messgitter muss regelmäßig und rechteckig sein, um räumliche FFT-Berechnungen zu unterstützen.
3. Die Berechnung und Kartierung von tiefen Frequenzen erfordert eine große Messfläche.

Die Statistisch Optimierte NAH (SONAH) ist eine von Brüel & Kjaer entwickelte Berechnungsmethode, die diese Einschränkungen aufhebt. SONAH steht sowohl für die STSF als auch für die NS-STSF zur Verfügung. Dies hat zur Folge, dass Messungen mit kleinen Arrays an Teilquellen und auch zu tiefen Frequenzen hin möglich sind. Speziell für die NS-STSF ist dies ein großer Vorteil, da hier alle Punkte gleichzeitig gemessen werden müssen.

Combo Array

Da SONAH unregelmäßig verteilte Messpositionen handhaben kann, lassen sich SONAH-Messungen mit einem Array ausführen, das auch für Beamforming-Messungen optimiert ist (**Bild 27**).

SONAH erfordert nur, dass die Messpositionen relativ gleichmäßig über der Messfläche verteilt sind. Ein solches Combo Array wird dann für SONAH-Messungen in der Nähe der Quelle verwendet, was eine gute örtliche Auflösung im tieffrequenten Bereich ermöglicht und ebenso größeren Abstand für Beamforming-Messungen, um die hohen Frequenzen zu erfassen. Auf diese Weise wird mit geringem Messaufwand eine Schallquellenlokalisierung über den gesamten Frequenzbereich möglich.

Conformal Mapping

Klassische Array-Techniken haben generell Ebenen parallel zur Messebene kartiert, d. h. dass von Vektorgrößen wie Schallintensi-



Bild 27 60-Kanal-Combo-Sektor-Wheel-Array für Beamforming und SONAH Messungen.

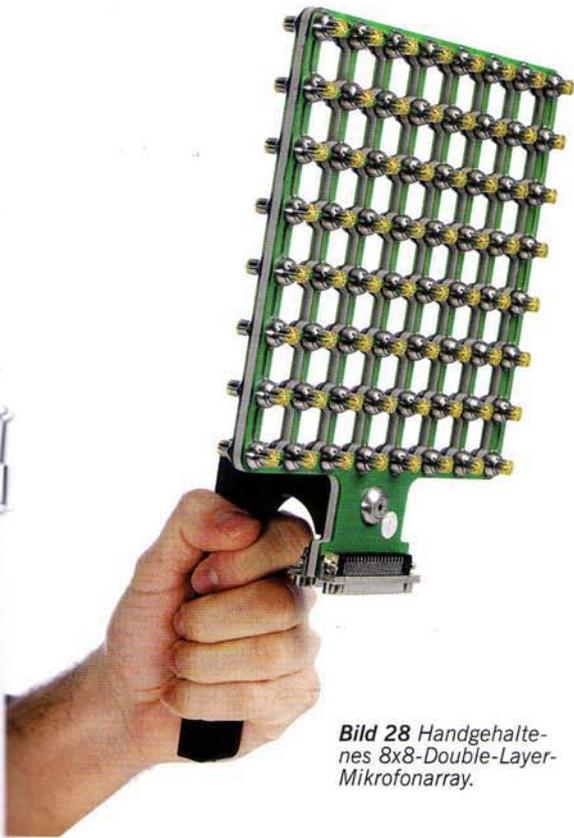


Bild 28 Handgehaltene 8x8-Double-Layer-Mikrofonarray.



Bild 29 Datenerfassung im Fahrzeug und Kartierung der Mittelkonsole.

tät oder -schnelle stets der Anteil dargestellt wird, der in Richtung der Flächennormalen verläuft. Die Umsetzung der akustischen Nahfeldholografie – Spatial Transformation of Soundfields (STSF) – von Brüel & Kjaer bietet die Möglichkeit, die Partikelschnelle an jeder Position im Raum zu kartieren, aber diese bezieht sich immer nur auf eine ebene Repräsentation des Testobjekts. Kurz gesagt können heute die meisten Schallkartierungsprogramme nur 2D-Flächendarstellungen, die parallel zur Messebene angeordnet sind, berechnen. Hierbei ist es gleichgültig, wie die Geometrie des Messobjekts aussieht.

Bei der Verwendung der akustischen Holografie besteht die Möglichkeit, den Schalldruck, die Schallintensität und die Partikelschnelle anzuzeigen. Wenn die Messebene mit der Oberfläche des Messobjekts korrespondiert, zeigt die Partikelschnelle die Oberflächenschnelle des schallabstrahlenden Objekts an. Dies kann leicht von den Oberflächenschnellen abweichen, die mit einem Laser-Dopplervibrometer gemessen werden. Bei der Lasermessung werden die Wellenanteile mit einbezogen, die mit zunehmendem Abstand zur Objekt Oberfläche schnell abfallen und keinen Anteil zur Schallabstrahlung liefern. In vielen Fällen ist jedoch nur der Teil der Schwingungen interessant, der auch zu einer Schallabstrahlung im Fernfeld einen Beitrag leistet. In den Fällen, in denen die gesamte Oberflächenschwingung interessiert, kann der verschwindende Wellenanteil zusätzlich rekonstruiert werden. Dies ist zwar eine leistungsstarke Technik, aber es bleibt eine 2D-Repräsentation eines 3D-Problems. Der Nutzen in jenen Anwendungen, bei denen die Vibrationen von Oberflächen, die nicht eben sind, untersucht werden sollen, ist somit limitiert.

Um eine echte 3D-Repräsentation zu bekommen, muss eine konforme Abbildung durchgeführt werden, wobei annähernd parallel zu allen Oberflächen des Testobjekts gemessen werden muss. Dies ist eine enorme Herausforderung, da ein konformes Array gebaut werden muss, das quasi der Oberfläche des Messobjekts folgt. Hierbei ist zu beachten, dass das Array

noch akustisch transparent bleibt. Berechnungsmethoden wie IBEM (Inverse Boundary Element Method) werden für die Berechnung der Oberflächenschnelle benötigt, was eine hohe Anzahl von Messpunkten und die Erfassung des gesamten Messobjekts erfordert, auch wenn nur einzelne Teilflächen interessieren.

Messung

Wie zuvor erwähnt, ist es keine einfache Aufgabe, mit einem Array konform der einzelnen Oberflächen eines Objekts zu messen. Der Ansatz von Brüel & Kjaer vereinfacht dies durch die Verwendung eines einfachen ebenen handgehaltenen Arrays mit einem speziellen Positionier-/Orientierungssensor im Handgriff (**Bild 28**).

Dieser Handgriff mit Positionserfassung kann entweder mit dem Array oder einem Zeigergerät zur Geometrierfassung verwendet werden. Es ermöglicht dabei, die Position und die Orientierung des Arrays sehr genau zu erfassen. Die Messungen werden hierdurch auf ein einfaches Positionieren des Arrays oberhalb der zu kartierenden Oberfläche reduziert. Die Position und Orientierung des Arrays werden zusammen mit den gemessenen Mikrofonsignalen automatisch erfasst. Das System verwaltet die gemessenen Oberflächen und gibt an, ob genügend Messungen zur Kartierung des gesamten Objekts durchgeführt wurden.

Technik und Anwendung

Die zur Berechnung der Oberflächenschnelle verwendete Technik ist der SONAH-Algorithmus (Statistically Optimised Nearfield Acoustic Holography). Diese Technik von Brüel & Kjaer hat substantielle Vorteile gegenüber der klassischen akustischen Nahfeldholografie (**Bild 29**).

Die bei der konformen Abbildung verwendete Patch-Holografie ermöglicht das Erfassen von Teilflächen einer stationären Schallquelle nacheinander und das anschließende automatische Zusammenfügen zu einer kompletten Kartierung des Messobjekts.

Geometrie

Die berechneten Oberflächenschnellen werden auf das Oberflächen-Geometriemodell des Testobjekts projiziert. Einerseits kann das Geometriemodell aus CAD-Daten stammen, die mittels des IGES-Formats eingelesen werden. Allerdings sind CAD-Modelle vielfach zu detailliert und eine Datenreduktion und Vereinfachungen des Modells sind notwendig. Andererseits kann ein passendes Oberflächenmodell auch mit dem integrierten Geometriegenerator erfasst werden. Hierfür kann der Handgriff des Arrays mit dem Zeigergerät als Digitizer verwendet werden. Es werden einzelne Punkte auf der Oberfläche ermittelt und zu Linien verbunden, die einzelnen Linien bilden anschließend die Flächen. Die entstehenden Oberflächen werden dann mit dem integrierten Rastergenerator diskretisiert und als Geometriemodell für die konformen Abbildungen genutzt.



Dipl.-Ing. **Christoph Hundeck**, Brüel & Kjaer GmbH, Application Specialist Multi-channel Systems.

Literatur zum Thema

- Hald, J.: STSF – a unique technique for scan-based Near-field Acoustic Holography without restrictions on coherence. Brüel & Kjaer Technical Review (1989) Nr. 1.
- Ginn, K. B.; Hald, J.: STSF – Practical instrumentation and application. Brüel & Kjaer Technical Review (1989) Nr. 2.
- Hald, J.: Spatial transformation of sound fields in the automotive industry. Brüel & Kjaer Technical Review (1995) Nr. 1.
- Hald, J.: Non-stationary STSF. Brüel & Kjaer Technical Review (2000) Nr. 1.
- Christensen, J. J.; Hald, J.: Beamforming. Brüel & Kjaer Technical Review (2004) Nr. 1.
- Hald, J.: Combined NAH and beamforming using the same array. Brüel & Kjaer Technical Review (2005) Nr. 1.
- Hald, J.: Patch near-field acoustical holography using a new statistically optimal method. Brüel & Kjaer Technical Review (2005) Nr. 1.
- Hald, J.: Planar near-field acoustical holography with arrays smaller than the sound source. Proceedings of ICA 2001
- Array-based Noise Source Identification Solutions: PULSE Beamforming Type 7768, STSF Type 7780, Non-stationary STSF Type 7712 and Conformal SONAH Type 8602.
www.bksv.com/pdf/bp2144.pdf
- Batel, M.; Marroquin, M.; Hald, J.; Christensen, J. J.; Schuhmacher, A. P.; Nielsen, T. G.: Noise source location techniques – simple to advanced applications. Sound & Vibration 37 (2003) Nr. 3, S. 24-38.
- Schirmer, W.: Technischer Lärmschutz. Berlin: Springer Verlag 2006.
- Haddad, K.; Marroquin, M.; Frazer, T.; Newton, G.: In-vehicle panoramic noise source mapping. SAE International 2007.
- Hald, J.; Morkholt, J.; Gomes, J.: Efficient interior NSI based on various beamforming methods for overview and conformal mapping using SONAH holography for details on selected panels. SAE International 2007.