



*MEMS (Micro Electro Mechanical System) Mikrofonarray (rechts) und Kunstkopf im Hintergrund*

© EDAG Group

Objektive Beurteilung von Soundkomponenten und Schallfeldern in Fahrzeugkabinen

# Messtechnische Klangabstimmung im Fahrzeug

Die Klangqualität eines Soundsystems ist von vielen Faktoren abhängig. Die verbaute Hardware, bestehend aus Verstärker und Lautsprechern, bildet das Grundgerüst. Durch mikroprozessorgesteuerte Signalverarbeitung entsteht aus den einzelnen Schallquellen im Fahrzeug ein abgestimmtes Gesamtsystem.

**Thomas Baumgartner**

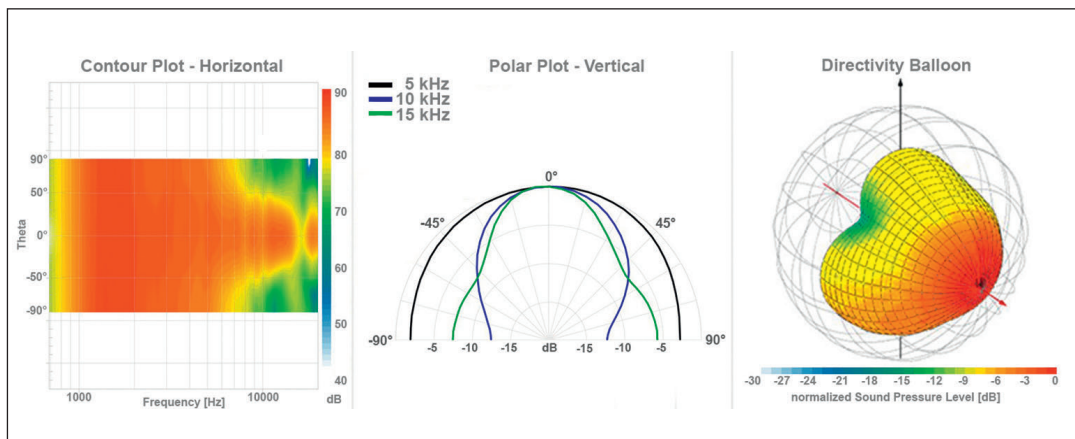
**B**is zum klanglich perfekt abgestimmten Soundsystem vergehen viele Monate: angefangen bei der Konzept- und Funktionsentwicklung über Prototypenproduktion und deren Validierung bis hin zum fertigen Endprodukt. Während der Fahrzeugentwicklung müssen dabei bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt sämtliche Steuergeräte (ECUs) im virtuellen Fahrzeug positioniert werden. Die stetig steigende Anzahl an ECUs – aufgrund von immer höheren Ansprüchen an Sicherheit, Komfort, Entertainment, etc. – erfordern dabei eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen Bauteilverantwortlichen, Konstrukteuren, Designern und Zulieferern. Für die Soundsystementwicklung bedeutet das, dass im besten Falle schon vor der Produktion der Prototypen detaillierte Aussagen über die optimale Einbauposition (**Bild 1**) und der resultierenden Performance des Systems getroffen werden sollten. Bei Neuteilen kann man hierbei auf simulierte Daten setzen, wohingegen bei bereits vorhandenen Komponenten (Carry-over-parts, COP) in der Regel schon sehr viele Daten vorliegen. Bei Lautsprechern sind hier vor allem der Fre-

quenzgang, also der frequenzabhängige abgestrahlte Lautstärkepegel, die entstehenden Verzerrungen sowie das Abstrahlverhalten wichtig.

## Ausgangslage

Als Ausgangspunkt für die nachfolgenden Betrachtungen dient hier ein System mit 14 Lautsprechern und einem Verstärker. Dieses Setup kann dem Premium Sektor zugeordnet werden, trotzdem ergeben sich bei einem Blick auf die genauen Einbaupositionen der Schallwandler sofort mehrere Problemstellen. Im Vorderwagen werden häufig 3-Wege-Systeme, bestehend aus einem Tief- und einem Mitteltöner in den Türen und Hochtönern in den A-Säulen oder I-Tafeln, verbaut. Der Subwoofer findet meistens im Kofferraum seinen Platz. Dieses Setup ist an sich ein guter Ausgangspunkt. Die Sitzposition ist jedoch nicht mittig im Fahrzeug und daher aus akustischer Sicht nicht optimal. Hier kommt der Center-Lautsprecher im Dashboard ins Spiel. Damit lässt sich für Fahrer

**Bild 2: Contour Plot vom horizontalen Abstrahlverhalten, vertikales Abstrahlverhalten bei verschiedenen Frequenzen und 3D-Balloondarstellung der Schallabstrahlung eines Hochtöners bei 15 kHz © EDAG Group**



und Beifahrer eine ordentliche Bühnendarstellung, also eine gute Platzierung der Instrumente und der Gesangsstimme, erreichen. In den hinteren Türen verzichtet man häufig auf die Mitteltöner. Der Abstand der verbauten Mitteltöner (falls vorhanden) und vor allem der Tweeter zum (Bei-)Fahrer ist zudem deutlich geringer als zu den hinteren Passagieren. Ohne Klangabstimmung sind diese Lautsprecher vorne sitzend daher zu stark wahrnehmbar. Die Voraussetzungen variieren dabei von Fahrzeug zu Fahrzeug und je nach Lautsprecherkonfiguration sehr stark. **Bild 2** zeigt das Abstrahlverhalten eines Hochtöners. Durch sinnvolle Ausrichtung können die Pegeldifferenzen zwischen linkem und rechtem Tweeter alleine dadurch bis zu einem gewissen Grad angeglichen werden.

Solche detaillierten Richtdiagramme und 3D-Balloondaten können entweder in einem reflexionsarmen Raum oder mittels Messungen im Nahfeld des Lautsprechers und anschließender Extrapolation in Freifelddaten ermittelt werden. Diese Daten können zudem auch der Ausgangspunkt für aufwendige Simulationen sein.

Die Auslegung des Systems und dessen Abstimmung wird bei High-End-Systemen noch komplexer und zeitintensiver. Entsprechende Systeme arbeiten inzwischen mit ca. 30 bis 40 Lautsprechern, um 3D-Sound und andere Algorithmen möglichst detailgetreu wiedergeben zu können.

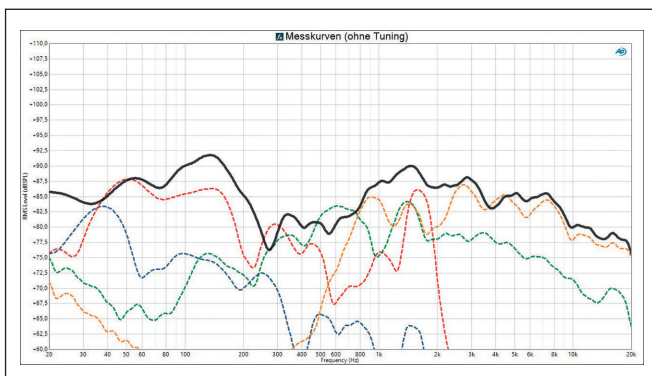
### Ausgangssituation im Fahrzeug

**Bild 3** zeigt die Frequenz-Amplituden-Verläufe der einzelnen Lautsprechergruppen und den Gesamtfrequenzgang, also die Summe aller Schallquellen, gemessen auf dem Fahrerplatz. Die im Fahrzeug erhobenen Kurven stimmen nicht mehr im Ansatz mit den Daten aus der Entwicklungsphase überein. Hier wird stets darauf geachtet, dass die Messung unter Freifeldbedingungen, also ohne nennenswerte Reflexionen und auf Achse in einem Meter Abstand gemessen wird. Dennoch sind diese Messdaten wichtig, um Vergleichbarkeit und gleichbleibend hohe Qualität zu garantieren. Der Einbauort, die Einbaubedingungen, raumakustische Einflüsse sowie die Sitz- und Mikrofonpositionen bilden im Fahrzeug ein schwieriges akustisches Szenario.

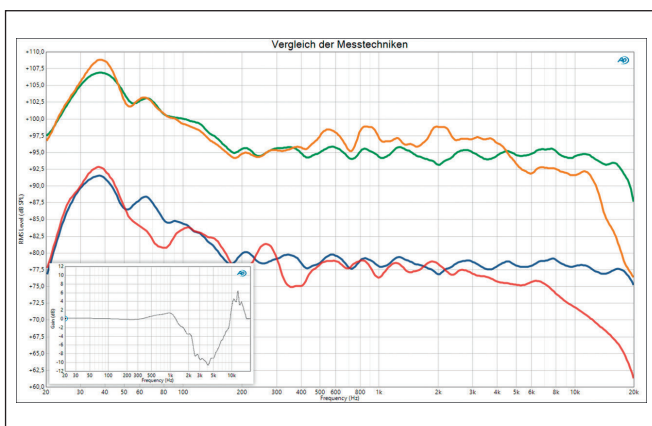
Am Anfang der Klangabstimmung steht das Equalizing der einzelnen Lautsprecher. Dazu zählt das Hoch- und Tiefpassfiltern sowie das Egalisieren von Überhöhungen oder Einbrüchen im Frequenzgang. Hat man nicht die Möglichkeit, die Lautsprecher selbst zu vermessen, finden sich die wichtigsten Chassis-Daten in den Prüfberichten der Lautsprecher-Entwicklungsabteilung oder im Datenblatt der Hersteller. Die Thiele-Small-Parameter, die Messungen der Verzerrungsprodukte sowie die Großsignalparameter geben Aufschluss über die zu wählenden Übergangsfrequenzen (Crossovers).



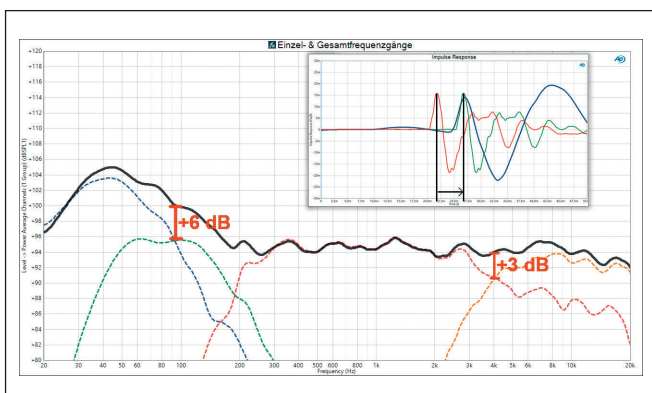
**Bild 1: Die Positionierung der Mikrofone spielt bei den Messungen im Fahrzeug eine wichtige Rolle. © EDAG Group**



**Bild 3: Einzelkurven der Lautsprechergruppen und deren Summe ohne Soundtuning** © EDAG Group



**Bild 4: grün: Messung mittels 6er Array und Sinus Sweep; orange: Kunstkopf mit Sweep; blau: Array mit Rauschen; rot: bewegtes Einzelmikrofon mit Rauschen; kleines Fenster: HRTF-Entzerrung** © EDAG Group



**Bild 5: Einzelkurven der Lautsprecher und deren Summe während des Optimierungsprozesses, Laufzeitkorrektur im kleinen Fenster** © EDAG Group

**Datenerhebung und messtechnisch unterstützte Klangabstimmung**

Es gibt dabei verschiedene Möglichkeiten, die einzelnen Lautsprecher(-gruppen) im Fahrzeug zu vermessen. Ein einzelnes Mikrofon, ein Kunstkopfsystem oder Mikrofon-Arrays haben jeweils ihre Vor- und Nachteile. Als Messsignale werden entweder Rauschsignale (Pink- oder White Noise) oder logarithmische Sinus Sweeps verwendet. Die über die Mikrofone aufgezeichneten Impulsantworten werden dabei mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) in kurze Ausschnitte zerlegt und in den Frequenzbereich übersetzt. Der sinusförmige Frequenzhochlauf bietet sich aus mehreren

Gründen als Messsignal an: Die Messdauer kann mit weniger als einer Sekunde sehr kurz gehalten werden. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist sehr gut, weil jede Frequenz mit maximaler Amplitude angeregt wird und die entstehenden Verzerrungsprodukte sowie das zeitliche Verhalten der Lautsprecher ebenfalls gleich mitanalysiert werden können.

Bei Messungen mit einem einzelnen Mikrofon lassen sich reproduzierbare Resultate erzielen, indem man ein Rauschsignal abspielt und das Mikrofon dabei langsam um das Gesicht bewegt. Während der Messdauer von ca. 10 bis 15 Sekunden werden sehr viele Daten erhoben und zum Beispiel mittels Real Time Analyzer (RTA) über die Zeit gemittelt dargestellt. Die stationäre Verwendung eines Einzelmikrofons ist bei der Frequenzganganalyse nicht zu empfehlen. Geringe Positionsänderungen führen oberhalb von ca. 300 Hz zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Die Abweichungen zwischen den Messungen können selbst bei einer geglätteten Darstellung (1/3 Oktave) bis zu 8 dB SPL erreichen.

Kunstköpfe kommen immer dort zum Einsatz, wo die Psychoakustik eine wichtige Rolle spielt. Diese beschäftigt sich mit der Wahrnehmung und dem Empfinden von Geräuschen und Klängen. In NVH-Abteilungen (Noise-Vibration-Harshness) werden beispielsweise durch Vibrationen hervorgerufene, störende Geräusche aufgezeichnet und anschließend analysiert. Soll eine normale Mikrofonaufzeichnung nachgestellt werden, muss die Kunstkopfaufnahme entzerrt werden. Hierbei werden die an Kopf- und Schulterpartie auftretenden Schallreflexionen und -beugungen ebenso ausgeglichen wie die Pegelüberhöhung im Bereich um 4 kHz und weitere Feinheiten, die durch die Ohrmuschel und Hörkanaltrichter hervorgerufen werden. Diese Außenohrübertragungsfunktion (Head related transfer function, HRTF) ist individuell sehr unterschiedlich, Kunstköpfe bilden sie aber recht gut nach. Der große Vorteil dieser Aufnahmetechnik ist dadurch, dass die Richtungsinformationen bei der Wiedergabe über einen ebenfalls entzerrten Kopfhörer sehr gut dargestellt werden. Bis zu einem gewissen Grad kann also das im Fahrzeug verbaute System auch am Schreibtisch angehört und bewertet werden.

Bei Klangabstimmungen wird häufig auf Mikrofonarrays mit sechs oder mehr Mikrofonen zurückgegriffen, um einen größeren Aufnahmebereich mit einer Messung abzudecken. Die einzelnen Messkurven werden dabei gemittelt, wodurch die großen Unterschiede der Einzelmessungen oberhalb von etwa 300 Hz geglättet werden. Diese Messung ist damit schon recht gut an das Auflösungsvermögen des menschlichen Gehörs angepasst. Mehrere Arrays werden auf den verschiedenen Sitzen platziert, um gleichzeitig Daten über das gesamte Schallfeld im Fahrzeug zu bekommen. Soll der Klang für alle Fahrzeuginsassen gleichzeitig optimiert werden, ist das äußerst wichtig, weil sich alle Schallquellen im Fahrzeug gegenseitig beeinflussen.

**Bild 4** zeigt vier Messtechniken im Vergleich. Die Messung mittels Array- und Sinus-Sweep zeigt eine Bassrampe und ansonsten einen sehr linearen Verlauf. Die Kurve mit Rauschen ist nahezu identisch. Die Messung mittels Kunstkopf und Sinus Sweep zeigt eine Erhöhung um ca. 2 dB über beinahe den kompletten Mittenbereich und einen

deutlichen Pegelverlust bei hohen Frequenzen. Vor allem am linken Mikrofon liegen hier nur sehr geringe Pegel an. Der linke Tweeter strahlt hier sozusagen vorbei (Stichwort Richtcharakteristik) und die Schallanteile vom rechten Tweeter werden vom Kopf zu großen Teilen reflektiert und absorbiert. Die Messung mit dem bewegten Einzelmikrofon (rot) weist einen ähnlichen Verlauf bei den hohen Frequenzen auf. Trotz einer Messdauer von 15 Sekunden, kann es aber auch im tieffrequenten Bereich zu Abweichungen kommen. In diesem Fall fehlen im Bereich zwischen 60 und 90 Hz in etwa 3-dB-Pegel, was letztlich zu einer etwas basslastigeren Abstimmung führen würde.

Soll das System auf allen Sitzen ähnlich klingen (All-Tuning) muss besonders auf die stehende Welle (oder auch Raummode) geachtet werden. Diese liegt abhängig von der Fahrzeuggröße zwischen ca. 60 und 80 Hz. Auf den hinteren Sitzplätzen werden bis zu rund 12 dB höhere Pegel erreicht als vorne. Durch die geschickte Abstimmung des Zusammenspiels von Subwoofer und Türwoofern kann eine gute, aber natürlich auch kompromissbehaftete tonale Ausgewogenheit für alle Plätze erreicht werden. Legt man den Fokus nur auf die vorderen/hinteren oder sogar nur auf einen einzelnen Sitzplatz, vereinfacht sich die Abstimmung und damit der Zeitaufwand sehr deutlich.

Für die Messung der Impulsantworten zur Laufzeitkorrektur ist die Verwendung eines einzelnen Mikrofons im Zusammenspiel mit einem Sinus Sweep als Messsignal optimal. Hierbei werden die einzelnen Lautsprecherkanäle im Digital-Signal-Processor (DSP) so verzögert, dass der abgestrahlte Schall zeitgleich am Gehör ankommt.

In **Bild 5** ist diese Korrektur am Beispiel eines Türwoofers dargestellt (kleines Fenster). Der entsprechende Kanal wurde verzögert und an das Subwoofer-Signal angepasst. Liegen die gemessenen Impulsantworten zeitlich gesehen übereinander, erhält man die optimale Quellenaddition zweier Schallquellen. Gemessen mit einem Array bedeutet das im tieffrequenten ein Plus von 6 dB und im hochfrequenten Bereich ca. +3 dB. Die geringere Summe bei 4 kHz lässt sich dabei durch die kurze Wellenlänge bei hohen Frequenzen erklären. Diese Anpassung muss für alle Kanäle durchgeführt werden. Laufzeitunterschiede führen sowohl zu einer schlechten Bühnendarstellung, als auch zu tonalen Verfälschungen. Oft werden sie auch als Druck auf den Ohren wahrgenommen.

## Fazit

Die Abstimmung anhand einer Frequenzgang-Zielkurve liefert eine sehr gute Basis für alle weiteren Feinheiten. Durch passende Gain-Verhältnisse und Laufzeiten zwischen den einzelnen Lautsprechern kann rein messtechnisch ein gutes Ergebnis erreicht werden. Sowohl im privaten Umfeld als auch für professionelle Audioingenieure hilft die Messtechnik bei der Beantwortung vieler Fragen. Stimmt das Verhältnis von tiefen zu hohen Frequenzen? Kommt der Schall von den einzelnen Lautsprechern zum richtigen Zeitpunkt beim Gehör an? Kommt es bei höheren Lautstärken zu Verzerrungen? Im professionellen Umfeld bietet das messtechnische Tuning weitere Vorteile. Neben

der Zeitersparnis ist die Dokumentation ein sehr wichtiger Punkt. Die Systeme können noch in der Produktionsstraße gemessen und anhand der Tuning-Messkurven verifiziert werden. Des Weiteren bilden die Kurven und Einzahlwerte stets die Grundlage für (teil-)automatisierte oder auch virtuelle Klangabstimmungen.

Auch wenn ein System mit 12 Lautsprechern in einem Kleinwagen nie genau so klingen kann, wie ein 40-Kanal System in einem großen SUV, kann und soll die Basis die Gleiche sein. Wie gezeigt, spielen hier die Messungen eine sehr wichtige Rolle. Surround- oder 3D-Effekte werden jedoch sehr subjektiv empfunden und sind durch Messkurven bisher noch nicht optimal beschreibbar. Dieses Feintuning wird daher noch häufig in längeren Hörsessions durchgeführt. Abgesehen davon ist die Messtechnik in vielerlei Hinsicht eine große Hilfe im kompletten Entwicklungsprozess. ■ (eck)

[www.edag.com](http://www.edag.com)



**Thomas Baumgartner** ist Fachexperte im Bereich Sound & Akustik bei der EDAG Engineering GmbH. © EDAG Group



**UNSERE MOBILITÄT VERÄNDERT SICH.  
WIR TESTEN IHRE TECHNOLOGIEN.**

Unsere flexiblen Testlösungen sorgen für die Sicherheit Ihrer Produkte. **Von der Validierung bis zur Produktion.**



**Electronica  
München**

15.–18. Nov. 2022  
Halle A3  
Stand 425

**ADAS. E-MOBILITY. CONNECTIVITY.**