

Mit Lärm gegen den Lärm

Lärm ist heute allgegenwärtig, ob auf Straßen, auf und an Flughäfen, Eisenbahnlinien, in Städten... Einigen speziellen Aspekten der Lärmbekämpfung besonders in Kraftfahrzeugen und im Luftfahrtbereich widmet sich unser Artikel. Dabei gehen heute Akustiker mit ausgefeilten elektronischen Methoden gegen den Lärm vor.

Lärm ist heute allgegenwärtig (Abbildung 1), und wer von uns hat nicht schon negative Auswirkungen von Lärm gespürt. Nervosität, Gereiztheit und Konzentrationsmangel sind erste Anzeichen eines beginnenden Dauerschadens für das Gehör und das Nervensystem.



Bild 1: Die Skala der im Alltag vorkommenden Schallpegel (Quelle: Sennheiser)

Noch eins drauf!

Mit noch mehr Lärm gegen den Lärm? Der Beantwortung dieser Frage liegt ein einfaches physikalisches Prinzip zugrunde, das darauf beruht, daß Geräusche durch identische, phasenverschobene Geräusche ausgelöscht werden können.

Diese Weisheit ist bereits seit vielen Jahren in der Akustik bekannt. Bereits 1933 erhielt der deutsche Physiker Lueg für sein „Gegenschallprinzip“ ein Patent.

Jedoch kann sich jeder ein wenig in Akustik und Niederfrequenztechnik Bewanderte leicht ausrechnen, welcher hohen Aufwand es erfordert, aus einem Geräuschgemisch, wie es das eines Fahrzeugmotors nun einmal ist, alle störenden Frequenzen herauszufiltern. Dazu kommt die Erfassung weiterer Geräuschquellen wie Fahrbahngeräusche, Reifengeräusche und deren Bewertung in Pegel und Frequenz.

Wie vielschichtig dieses Problem ist, zeigt weiter, daß es bestimmte Geräusche im Fahrbetrieb geben muß, die der Fahrer wahrnehmen muß, wie etwa Signale oder eben auch das Radioprogramm.

Im Fahrzeug stellt sich das Problem insgesamt wesentlich komplexer dar als z.B. in der Luftfahrt oder beim Arbeitsschutz. Denn auch dort kommen aktive Geräuschkompensationssysteme inzwischen zum Einsatz (Abbildung 2).



Bild 2: Geschlossene Kopfhörersysteme zur aktiven Lärmbekämpfung sind vor allem im Luftfahrtbereich bereits sehr verbreitet. Das hier gezeigte Sennheiser-Modell bewältigt bis zu 30 dB Dämpfung! (Bild: Sennheiser)

Kein Krach im Hörer

Doch hier ist das Problem insgesamt etwas einfacher zu lösen, da hier in aller Regel Kopfhörer oder Helme getragen werden, die für den daruntersteckenden Hörer ein akustisch bereits geschlossenes System darstellen, so daß etwa das Or-

tungssystem für Geräusche direkter und ohne Umwege beeinflusst werden kann. Dennoch muß auch hier der Mensch noch für andere ansprechbar bleiben, er muß Warnsignale wahrnehmen können.

Umgekehrt wieder hinein!

Technisch funktioniert dieses System aufgrund des Kopfhörerprinzips recht einfach. Ein Mikrofon im Kopfhörer erfaßt das Umgebungsgeräusch und gibt es an die Auswertelektronik weiter. Diese wiederum erzeugt ein exakt phasenverschobenes Signal, das in den Kopfhörer eingespeist wird und so eine fast perfekte Vernichtung des Störgeräusches ermöglicht.

Auf diesem Gebiet gibt es bereits sehr ausgefeilte und hochspezialisierte Lösungen, die ganz spezielle Zielgruppen ansprechen.

Sennheiser electronic etwa bietet spezielle Systeme gegen allgemeinen Umgebungslärm etwa in Werkhallen, gegen Fluglärm, sowohl für Passagiere als auch für Piloten an, die durch die Wiedergabe eines speziellen Audiosignals auf elektronischem Wege vor allem im besonders tieffrequenten Frequenzbereich den störenden Lärm kompensieren.

Aktiv gegen Fluglärm

Im Cockpit eines Linienjets treten z. B. Lärmpegel von ca. 80 dB (A) auf, in denen von Helikoptern gar ca. 90 dB (A). Um diesen Lärm zur Hälfte zu kompensieren, wird eine Absenkung von 10 dB im besonders störenden Frequenzbereich von 400 Hz bis 1000 Hz vorgenommen. Besonders geräuschkompensierte Mikrofon-Hörersysteme ermöglichen den Piloten eine einwandfreie Verständigung und einen sehr guten Gehörschutz. Ein besonders leistungsstarkes System in diesem Bereich bietet Sennheiser an, es reduziert den Lärmpegel im kritischen Bereich um etwa 70% (Bild 3, 4, 5).

Aber auch für Passagiere sind solche Lärmbekämpfungssysteme bereits im Einsatz. Sie reduzieren den Außenlärm besonders beim Starten und Landen erheblich und bieten zudem ausgezeichnete akustische Unterhaltungsmöglichkeiten (Bild 6).

Einen zwar im Prinzip ähnlichen, aber



Bild 3: Lärmkompensationssystem für Helikopterpiloten, im Helm integriert (Bild: Sennheiser)

vom beabsichtigten Effekt her doch abweichenden Trend verfolgen die Hersteller von Automobilen.

Hierbei gibt es derzeit 2 wesentliche Entwicklungsrichtungen.

Gegenhohlraum schluckt Schall

Bei BMW experimentiert man mit einem aktiven System zur Schalldruckabminderung der Hohlraumresonanzen des Fahrzeuginnenraums. Denn vor allem die recht großen Hohlräume von Fahrzeugen sorgen für die Weiterleitung von Motor- und Fahrgeräuschen in den Fahrzeuginnenraum. Die Vernichtung dieser Geräusche kann sowohl passiv als auch aktiv durch Anwendung eines Helmholtzresonators erfolgen.

Dieser besteht im wesentlichen aus einem „Gegenhohlraum“ zum schwingenden Hohlraum, der durch eine spezielle mechanische Auslegung den aus dem schwingenden Hohlraum kommenden Schall quasi „schluckt“, ihn absorbiert. Dadurch kann der Schall den Hohlraum, in dem er entstanden bzw. weitergeleitet worden ist, nicht mehr verlassen.

Da es sich auch im Automobilbereich bei den störenden Frequenzen besonders um tiefe Frequenzen in einem Frequenzbereich bis ca. 200 Hz handelt, werden bei passiven Systemen enorm große Resonanzräume benötigt, um diese großen Wellenlängen kompensieren zu können.

Ein praktisches, wenn auch in der Wirkung umgekehrt beabsichtigtes Beispiel, sind die enorm großen Tieftonlautsprecher

in den Kofferräumen von Autos bevorzugt jugendlicher Fahrer. Hier pflanzen sich die Schallwellen durch den großen Hohlraum des Kofferraums und die angrenzenden Hohlräume des gesamten Fahrzeugs so gut fort, daß man bei manchen vorbeifahrenden Fahrzeugen angesichts der bis in Gebäude hinein spürbaren Resonanzen eher an einen 40-Tonner denkt als etwa an einen Kadett.

Wie man sich leicht denken kann, ist der für einen idealen Helmholtzresonator benötigte Platz kaum in einem Fahrzeug vorhanden, will man nicht den gesamten Kofferraum dafür opfern.

Daher verfiel man bei BMW etwa auf die Idee, ein aktives System zu entwickeln, das der Wirkung des passiven Helmholtzresonators entspricht, zugleich aber nur wenig Platz beansprucht und zudem noch sehr dynamisch ist.

Getäuschter Schall

Ein durch einen geschlossenen Regelkreis angesteuerter Lautsprecher dient dazu, den Eindruck eines großen Volumens zu erwecken, das für die Tilgung der Schwingungen notwendig ist.

Aufgrund der eingebrachten Regelung ist es im Vergleich zur passiven Anordnung auch möglich, den aktiven Resonator in einem breiteren Frequenzbereich oder gleichzeitig in unterschiedlichen Frequenzbändern zu betreiben.

So konnte im Versuch gezeigt werden, daß spektrale Schallabminderungen in der Größenordnung von 6 bis 20 Dezibel im tieffrequenten Bereich der Rollgeräusche erzielt werden können. Solche Verbesserungen sind subjektiv deutlich spürbar (wir erinnern uns, eine Absenkung um 10 dB entspricht dem subjektiven Eindruck der Halbierung der Lautstärke) und führen zu einer deutlichen Verbesserung des Fahrkomforts, des Hauptziels der Fahrzeughersteller.

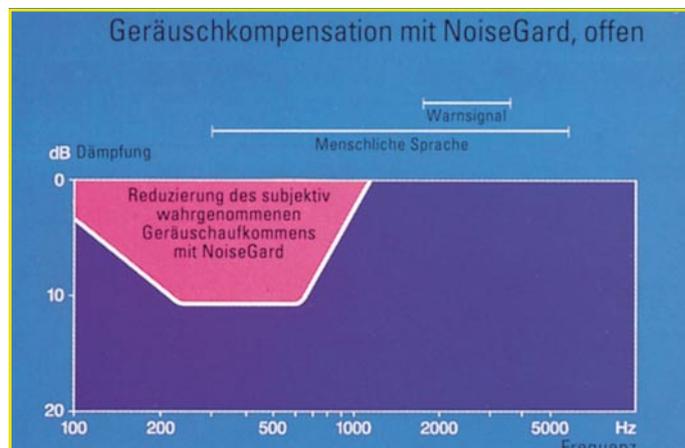


Bild 4: Die offenen Kopfhörersysteme zur Geräuschkompensation berücksichtigen sowohl den abzusenkenden Frequenzbereich als auch aus der Umgebung aufzunehmende Informationen (Grafik: Sennheiser)

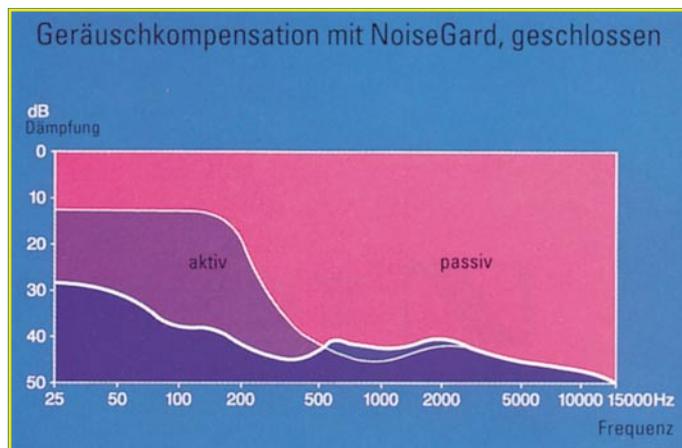


Bild 5: Werte bis zu 40 dB Dämpfung sind mit geschlossenen Geräuschkompensationssystemen zu erreichen (Grafik: Sennheiser)

Bild 6: HEMEC 45-KA/CA - mobil einsetzbare NoiceGard®-Hör/Sprechgarnitur für Piloten (Bild: Sennheiser)



Diese haben besonders in den letzten Jahren bereits nahezu alle Möglichkeiten der passiven Lärmpegelabsenkung wie Motorkapselung, veränderte Materialien, verbesserte Reifen usw. ausgeschöpft und widmen sich nun verstärkt dem verbesserten Fahrkomfort für die Insassen.

Besonders im Gespräch ist seit einiger Zeit die aktive Geräuschkompensation durch die Erzeugung von Gegenschall in genau definierten Dosen und Frequenzbereichen.

Vierzylinder auf Samtpfoten

Mercedes Benz hat sich diesem Thema besonders intensiv gewidmet und entwickelt ein System, das bereits bei den ersten Versuchen unbelasteten Mitfahrern in einem biederem Vierzylinder durchaus den Fahrkomfort und die Geräuschkulisse eines Oberklasse-Sechszylinders vermittelt.

Technisch realisierbar ist dies erst seit recht kurzer Zeit durch die rasante Entwicklung digitaler Signalprozessoren, denn nur mittels umfangreicher Mikrorechen-technik ist es möglich, die vielen Schallquellen innerhalb eines Fahrzeugs selektiv aufzunehmen, die Signale zeitgleich zu verarbeiten und den erforderlichen Gegenschall im richtigen Spektrum zu erzeugen.

An den richtigen Stellen angesetzt

Wie sieht das Ganze nun praktisch aus?

Im Fahrzeug werden an zuvor sorgfältig ausgetesteten Stellen Mikrofone angebracht, die sowohl den ursprünglichen Schall aufnehmen als auch den durch das Lärmkompensationssystem abgestrahlten Schall kontrollieren (Abbildung 7).

Über ebenso ausgeklügelte Lautspre-

chersysteme wird der zum störenden Schall passende Gegenschall abgestrahlt.

Die Mercedes-Entwickler betonen dabei aber, daß sie keine schalltote Limousine anstreben, denn dies würde für das Fahren wichtige Informationen, wie etwa Fahrbahnbeschaffenheit und die typischen Motorengeräusche, die auch im Zeitalter der Elektronik für einen Fahrer unverzichtbar sind, eliminieren.

Denn auch ein Mercedesfahrer möchte gern die erlernte akustische Rückkopplung zum Fahrzeug haben. Sie zu verlieren, ruft einen ähnlichen Effekt wie in früheren US-Fahrzeugen auf deutschen Straßen hervor:

Dank zu weicher Sitze, schwammiger Federung und zu leichtgängiger Lenkung verliert man den wichtigen körperlichen Kontakt zur Fahrbahn, das berühmte „Popometer“ signalisiert sich anbahnende Gefahrezustände nicht rechtzeitig.

BMW und zahlreiche Sportwagenhersteller verkaufen gar ihre Fahrzeuge mit dem Argument der kernigen Geräuschkulisse.

Es kommt also darauf an, nur die tatsächlich störenden Geräusche herauszufiltern und diese zu kompensieren (Abbildung 8).

Um die technische Realisierung zu erläutern, rufen wir uns an dieser Stelle noch einmal einige Eigenschaften des Schalls ins Gedächtnis:

Schall setzt sich aus einem ganzen Spektrum von Schwingungen verschiedener Frequenzen zusammen. Senden 2 Schallquellen gleichlaute Schwingungen derselben Frequenz, so addieren sich die Schwingungen, das Gesamtgeräusch wird lauter.

Sendet aber eine der beiden Schallquellen den gleichen Ton zeitversetzt um eine halbe Schwingung (phasenverschoben) aus, dann heben sich im Idealfall die Schwingungen des Schalls auf, es ist Ruhe.

Lösung durch Prozessoren

Ein lange unlösbares Problem stellte dabei die notwendige schnelle Reaktion auf das zu eliminierende Schallereignis dar, die fast zeitgleich erfolgen muß.

Das Problem stellt dabei nicht etwa die signalverarbeitende Elektronik dar, sondern vor allem die mechanischen Eigen-



Bild 7: Im Fahrzeug werden an zuvor sorgfältig ausgetesteten Stellen Mikrofone angebracht. Quelle: Mercedes Benz

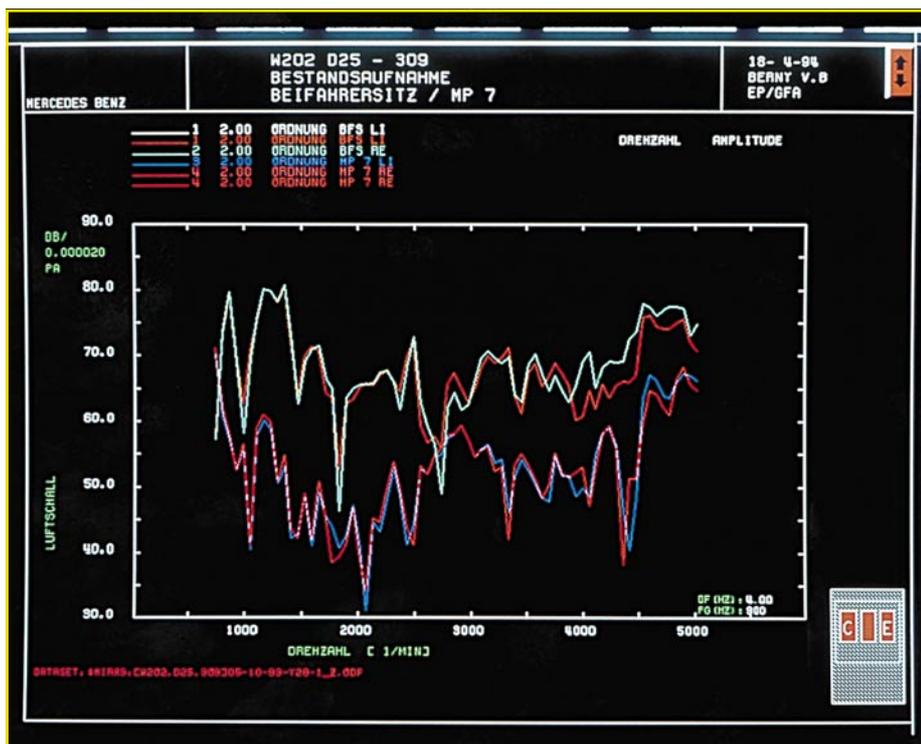


Bild 8: Das zu erfassende Geräuschspektrum im PKW ist sehr kompliziert aufgebaut, wie die „Bestandsaufnahme“ des Beifahrerdummys zeigt. Quelle: Mercedes Benz

schaften der aufnehmenden Mikrofone und die der abstrahlenden Lautsprecher, die immer eine gewisse Verzögerung hervorrufen.

Das zu löschende Geräusch muß zuerst analysiert werden, um dann die exakt passenden Gegentöne zu erzeugen. Wie gesagt, erst moderne Prozessoren ermöglichen es, alle Parameter zu erfassen und synchron zum Störgeräusch das dazu „passende“ Gegengeräusch mit der exakt gleichen Frequenz, nur entgegengesetzter Phasenlage zu erzeugen.

Ganz so einfach, wie beim Kopfhörerprinzip geschildert, ist die technische Umsetzung im Fahrzeuginnenraum indes nicht. Kopfhörer verbieten sich aus sicherheitstechnischen Gründen.

Dazu kommt erschwerend hinzu, daß das gesamte System sehr dynamisch arbeiten muß, um die ständig wechselnden Fahrzustände und die damit verbundenen Geräusche berücksichtigen zu können. Schließlich arbeitet ein Fahrzeugmotor im Gegensatz zum Flugzeug mit ständig wechselnden Drehzahlen, die Fahrbahnbeschaffenheit ändert sich und, und...

Motorenorchester

Den Schwerpunkt setzen dabei die Mercedes-Techniker auf die Kompensation von unangenehmen Motorengeräuschen. Diese setzen sich zum größten Teil aus Kom-

ponenten zusammen, deren Frequenzen bestimmte Vielfache der Drehzahl darstellen. Zu jedem dieser Grundtöne gesellen sich wie bei einem Orchesterinstrument Obertöne, die als „Harmonische“ bezeichnet werden. Erst diese Obertöne beeinflussen den Gesamtklang erheblich.

Bei einem Vierzylinder-Motor fällt besonders die zweite Harmonische auf, die besonders für das störende Brummen des Motors verantwortlich ist. Hervorgerufen wird dies durch Zündvorgänge im Motor und die unausgeglichen wirkenden Massekräfte in der Motormechanik und im gesamten Fahrzeug. Eine von Haus aus zufriedenstellende Laufruhe stellt aufgrund der ausgeglicheneren Massekräfte im Motor (z.B. Kurbelwellenlagerung) erst ein Sechszylindermotor dar, der dazu idealerweise noch in Fahrzeuggängsachse angeordnet ist (Reihenmotor, wie z.B. bis heute bei Mercedes und BMW üblich).

Die Mercedes-Forscher bekämpfen mit ihrem „Active-Noise-Cancellation“ genannten Geräuschkompensationssystem deshalb gezielt den Bereich dieser zweiten Harmonischen, um dem Vierzylindermotor das Geräuschniveau eines Sechszylinders anzuerziehen.

Dies geschieht im Innenraum des Fahrzeugs mit bis zu sechs verschiedenen Lautsprechersystemen, die speziell auf die einzelnen Sitzplätze im Fahrzeug abgestimmt sind. Die Signalprozessorelektronik sorgt dabei für die ständige Anpassung an den aktuellen Geräuschpegel, an die Innenraumakustik (bekanntlich ist diese bei einem vollbesetzten Fahrzeug wesentlich anders als bei einem nur mit dem Fahrer besetzten) und an sonstige Einflußfaktoren

und Geräuscherzeuger (Radio, Telefon, Gespräche).

Auf welche Töne die Elektronik reagieren muß, registrieren 8 im Dachhimmel eingebaute Mikrofone.

Diese geben ihre Signale an die bereits mehrfach erwähnten Signalprozessoren ab, die z. B. vor allem als genau auf die zweiten Harmonischen in allen Drehzahlbereichen des Motors abgestimmte Digitalfilter arbeiten.

Störer halbiert

Der dabei zu erfassende Frequenzbereich hängt von verschiedenen Faktoren wie etwa dem Anbringungsort der Lautsprecher ab. Schließlich sollen allein die Ohren der Insassen zeitgenau erreicht und nicht der gesamte Innenraum diffus beschallt werden. Der Frequenzbereich bewegt sich dabei etwa zwischen 40 und 250 Hz. Damit kann etwa bei den Mercedes-Vierzylindern der gesamte Drehzahlbereich um bis zu 12 dB abgesenkt werden, also um mehr als die Hälfte des subjektiven Schallpegels!

Daß ein solch ausgeklügeltes System auf Dauer nicht nur im Fahrzeug, sondern auch „rund um das Fahrzeug“ arbeiten kann, liegt klar auf der Hand.

Ruhige Perspektiven?

Man stelle sich dazu nur einmal den Ausblick auf die Lärmkompensation ganzer Verkehrsstraßen wie etwa vielbefahrene Stadtrassen, Autobahnen, Einflugschneisen vor! Welch enormer Aufwand an Lärmschutzwällen und -wänden wäre einsparbar! Mit Sicherheit werden die Techniker bald auch dieses Problem lösen, denn nach Ansicht von Verkehrsexperten stellen etwa Reifengeräusche heute den Hauptanteil am Autoverkehrslärm dar. Hier wären ganz ähnliche Systeme wie oben beschrieben denkbar, denn auch hier handelt es sich wie beim Fluglärm um relativ eng begrenzte Frequenzbereiche.

Letztendlich wird das Ganze nur noch eine Frage des Aufwands, High-Tech-Unternehmen halten den Schlüssel zur Lösung schon in der Hand.

In den USA z. B. sind derartige aktive Lärmkompensationssysteme schon etwa in den Sesseln von Flugzeugpiloten und -insassen im Einsatz, auch in zahlreichen Anwendungen wie etwa Funkgeräten mit Freisprecheinrichtungen werden solche selektiven Geräuschkompensationssysteme bereits breit eingesetzt, wobei all diese Systeme vielfach aufgrund des relativ eingeschränkten Frequenzbereiches der Störgeräusche wesentlich einfacher ausfallen können als in dem beschriebenen Fahrzeugprojekt.

ELV