

# Von der aktiven Geräuschminderung zum Active Sound Design

Rolf Schirmacher  
Müller-BBM GmbH, Planegg

## 1 Einleitung

Die aktive Schwingungs- und Geräuschminderung im heutigen Sinne wurde erstmals 1933 in einem Patent von Paul Lueg vorgestellt. Abbildung 1 zeigt dieses Prinzip anhand der Fig.1 der korrespondierenden amerikanischen Patentanmeldung von 1936.

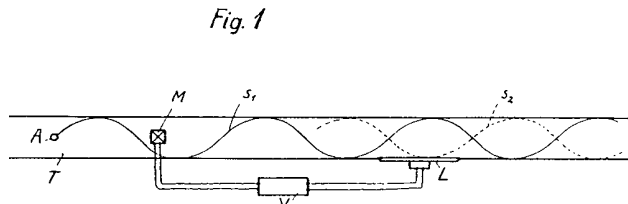


Abb. 1. Prinzip der aktiven Geräuschminderung [1].

Die Grundidee bildet dabei die gegenphasige Nachbildung  $S_2$  eines Ausgangstones  $S_1$ , sodass die Summe aus beiden Tönen Null ergibt. Dazu wird der Ausgangston mit dem Mikrofon M aufgenommen, Amplitude und Phase über das Filter V angepasst und ein entsprechend eingestellter Ton über den Lautsprecher L abgestrahlt. Dieses Konzept bildet auch heute noch die Grundlage vieler Systeme zur aktiven Geräuschminderung.

Schon früh wurde die Umsetzbarkeit dieser Idee mit großer Skepsis betrachtet. Eine sehr frühe Darstellung der praktischen Probleme findet sich in einer ablehnenden Antwort des Heereswaffenamtes vom 23.02.1934 auf eine Anfrage von Lueg: „Eine praktische Verwendung im Heeresbetrieb, insbesondere zur Vernichtung von Flugzeugschall, des Auspuffgeräusches von Motoren und des Mündungsknalles von Feuerwaffen kommt wegen der Kompliziertheit, der leichten Verletzbarkeit der Einrichtung, des zu erwartenden erheblichen Gewichtes und Raumbedarfes sowie der Schwierigkeit, mit Lautsprechern die erforderliche große Lautstärke zu erzeugen, leider nicht in Frage.“ [zitiert nach 2].

Auch heute noch findet sich die aktive Geräuschminderung in diesem Spannungsfeld. Einerseits ist sie eine konzeptionell einfache und faszinierende Idee, andererseits stellt die praktische Umsetzung in zuverlässige und kostengünstige Anwendungen nach wie vor eine große Herausforderung dar und auch das obige Urteil von 1934 ist noch weit verbreitet. Dass es so pauschal nicht (mehr) zutrifft, soll nachfolgend anhand praktischer Beispiele gezeigt werden.

Doch zunächst einmal zum Grundprinzip der aktiven Schwingungs- und Geräuschminderung. Wie schon beschrieben, besteht die Kernaufgabe darin, an (zumindest) einem Ort zu allen Zeiten das vorhandene Schallfeld gegenphasig „nachzubauen“, sodass sich aus der Überlagerung beider Schallfelder in der Summe Null, d.h. Ruhe, ergibt. Dies bedeutet aber auch, dass diese Nachbildung rechtzeitig zu geschehen hat, also zeitlich kausal sein muss. Weiterhin muss sie sehr genau sein, d.h. bei spektraler Betrachtung (beziehungsweise Betrachtung eines Einzeltons) darf der Phasenfehler für eine gute Reduktion nur einige Grad und der Amplitudenfehler nur Bruchteile eines dB betragen. Abbildung 2 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Wenn man dann auch noch bedenkt, dass diese Genauigkeit an allen Raumpunkten der Minderung erfüllt sein muss, wird die ganze Komplexität der Aufgabe deutlich.

Was unterscheidet denn nun die „aktive“ Akustik von klassisch akustischen Betrachtungsweisen, besonders im Lärmschutzbereich? Zunächst einmal gilt es bei aktiven Systemen „Zeitbereichsakustik“ zu treiben, die genaue Kenntnis und

Nachbildung des akustischen Zeitsignals ist wichtig und (akustische) Laufzeiten spielen eine entscheidende Rolle.

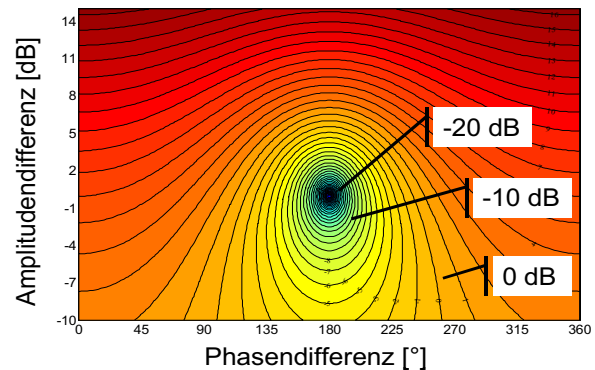


Abb. 2. Genauigkeitsanforderungen für die aktive Schwingungs- und Geräuschminderung, hier als Gesamtpegeldifferenz über Phase und Amplitudendifferenz zweier Töne.

Und der zweite wesentliche Aspekt ist eng damit verknüpft: „aktive“ Akustik ist immer Akustik kohärenter Quellen und beruht auf der Wechselwirkung kohärenter Quellen. Energetische Mittelungen mehrerer Quellen sind hier gerade nicht zulässig und bei spektralen Betrachtungen sind Schmalbandspektren und Phaseninformationen relevant, Bandpegel jedoch nicht ausreichend.

Die aktive Geräuschminderung ist ein sehr interdisziplinäres Arbeitsgebiet. In ihm fließen neben der eigentlichen Akustik (ohne die zu beherrschen kein akustisch sinnvoller und damit praktisch umsetzbarer Ansatz für aktive Systeme gefunden werden kann), vor allem die Aktor-Technik, also die Fähigkeit, geeignete Quellen für die „Gegenschallfelder“ bauen zu können, sowie die Systemtheorie, Signaltheorie bzw. Regelungstechnik und die Umsetzung entsprechender Konzepte in harten Echtzeit-Systemen ein.

Doch zurück zum akustischen Teil der Aufgabenstellung. Wie Jessel und Mangiante [3, ausführlich auch in 4, Kapitel 9] gezeigt haben, folgt aus dem Huygens'schen Prinzip, dass von einer Hüllfläche umschlossene Quellen in dem Gebiet außerhalb der Hüllfläche durch eine (kontinuierliche) Monopol-Quellverteilung nachgebildet werden können. Besteht die Hüllfläche aus einer (kontinuierlichen) Monopol- und Dipolverteilung, so kann diese Nachbildung rückwirkungsfrei erfolgen, das heißt, ohne dass im Inneren der Hüllfläche das ursprüngliche Schallfeld beeinflusst wird. Theoretisch ist die Aufgabe damit gelöst und diese theoretische Lösung hat auch zu zahlreichen Arbeiten der aktiven Geräuschminderung beigetragen. Auch die Fragen der Diskretisierung der Hüllfläche, also die Anwendung realer Lautsprecher, wurde vielfach untersucht. Es zeigt sich [4, Abschnitt 9.14], dass der maximale lineare Abstand zweier Monopol/Dipol-Quellen auf der Hüllfläche  $\lambda/2$  nicht übersteigen darf. Dies bedeutet im Luftschall bei 1 kHz einen Abstand der Quellen von maximal 17 cm, alle 17 cm ist also ein Lautsprecherpaar (!) erforderlich. Für ernsthafte Anwendungen im dreidimensionalen Raum und bei mittleren Frequenzen ist also ein recht hoher Aufwand erforderlich – und zwar nicht (nur) im Sinne der benötigten Rechenleistung zur optimalen Ansteuerung, sondern an unabhängigen Schallquellen (Lautsprechern) und zugehörigen Leistungsverstärkern. Und bei diesen klassischen Hardwarekomponenten sehen die Kostensenkungspotentiale leider lange nicht so günstig wie bei der Rechenleistung aus, wes-

halb der Aufwand auch künftig für entsprechende praktische Anwendungen prohibitiv sein dürfte.

Betrachtet man also die praktische Anwendbarkeit aktiver Systeme in der Akustik, so zeigt sich, dass sie entsprechend auf „akustisch einfache“ Fälle beschränkt ist. „Akustisch einfach“ heißt in diesem Zusammenhang „einfache“ Schallfelder oder Randbedingungen, die ein Erfüllen der Anforderungen (zeitliche Kausalität, hohe Nachbildungsgenauigkeit im gesamten Raum zu allen Zeiten) erleichtern. Entsprechend der genannten theoretischen Lösung kann man „akustisch einfach“ auch so verstehen, dass sich entsprechend einfache, leicht diskretisierbare Hüllflächen zwischen Geräuschquelle und Immissionsort finden lassen. Beispiele dafür sind

- Wellenausbreitung, beispielsweise in Kanälen,
- Verhinderung der Abstrahlung ausgedehnter Quellen,
- kleine Räume (geringe Modendichte).

Diese Fälle sollen nachfolgend anhand von Beispielen und Anwendungen betrachtet werden.

## 2 Konzepte zur aktiven Geräuschminderung

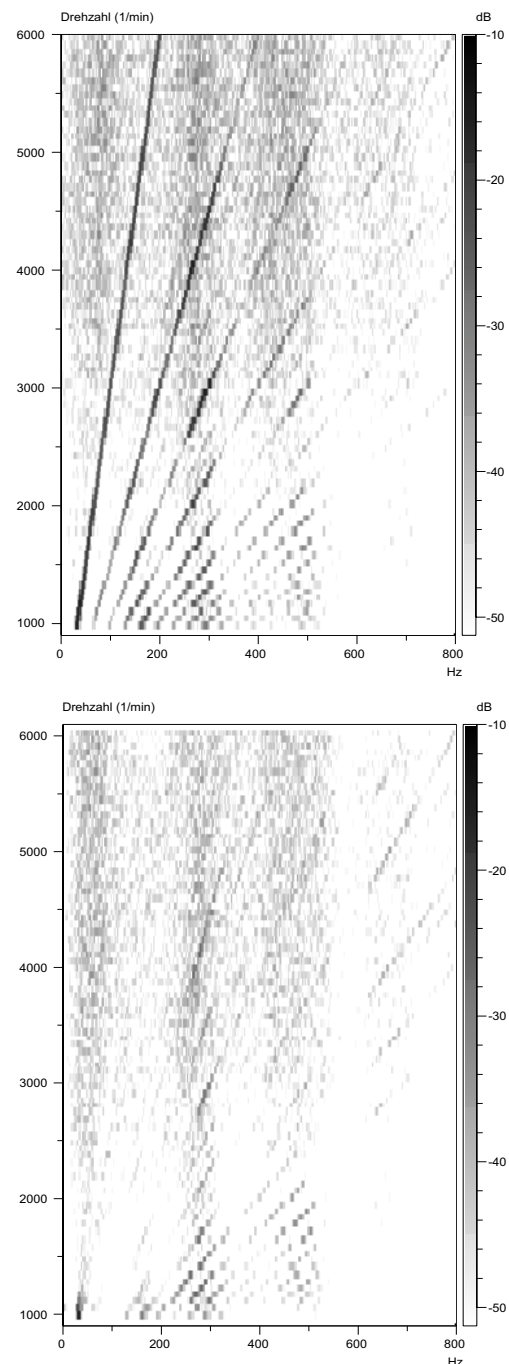
### 2.1 Wellenausbreitung

Die Grundidee bei der aktiven Unterdrückung der Wellenausbreitung in niedrigdimensionalen Wellenleitern liegt darin, dass ein aktives System nur die ausbreitungsfähigen Moden reduzieren muss und damit die Freiheitsgrade des Systems (Anzahl der erforderlichen Lautsprecherkanäle) recht gering sein kann. Bei der Ausbreitung ebener Wellen in Kanälen (Lüftungsanlagen, Fahrzeug-Abgasanlagen, etc.), wie sie unterhalb der Grenzfrequenz der ersten höheren Mode ausschließlich auftritt, genügt an einer Grenzfläche (also einer Stelle des Kanals) schon ein einziger Monopol zur aktiven Reflexion, und mit zwei Lautsprechern (Monopol und Dipolquelle) lässt sich eine aktive Absorption darstellen [5 und zahlreiche später folgende Arbeiten]. Für praktische Anwendungen wird meist ein Monopol-/Reflexionssystem verwendet. Wie funktioniert nun ein solches System akustisch? Schalldruck Null an einer Grenzfläche entspricht einer Unterbrechung der Schallausbreitung. Schalldruck Null bei beliebigem Volumenfluss (den dann eine Monopolquelle aufnehmen muss) bedeutet entsprechend eine schallweiche Reflexion. Diese setzt voraus, dass die Monopolquelle wirklich den gesamten von der Ursprungsquelle erzeugten Volumenfluss „kraftlos“ aufnimmt, wobei zu beachten ist, dass der von der Ursprungsquelle erzeugte Volumenfluss von ihrer Strahlungsimpedanz abhängt. Diese ändert sich aber durch den aktiven Reflektor auf eine schallweich reflektierende Randbedingung. Entsprechend kann für praktische Realisierungen auch die Monopolquelle ausgelegt werden, indem zunächst das akustische System mit der „idealisierten“ Randbedingung „schallweiche Reflexion“ berechnet wird und dann der sich so ergebende Volumenfluss an der Position des Lautsprechers als Anforderung an den Lautsprecher verwendet wird.

Eine zwar akademische, aber sehr illustrative Anwendung für die akustische Funktion eines aktiv reflektierenden Systems stellt ein „1-dimensionaler aktiver Hallraum“ dar, der auf beiden Kanalenden durch einen aktiven schallweichen Reflektor abgeschlossen wird [6].

Als praktisches Anwendungsbeispiel sei das Ansaugsystem eines Verbrennungsmotors betrachtet [7]. Dieses stellt einen typischen luftführenden Kanal mit hohen Schallpegeln und im interessierenden Frequenzbereich im wesentlichen ebener Wellenausbreitung dar. Gleichzeitig sind die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Medien, etc.) für serienmäßige Umsetzungen wesentlich leichter handhabbar als bei der öfter diskutierten Abgasanlage. Im Ansaugsystem kann man den benötigten Lautsprecher beispielsweise im ohnehin vorhandenen (und auch akustisch notwendigen) Luftfiltervolumen unterbringen, womit bei gleichem Bauraum eine deutlich verbesserte akustische Wirkung einhergeht. Dabei kann ein

normaler, handelsüblicher Lautsprecher verwendet werden; typische Tiefmittelton-Lautsprecher wie sie in PKW-Audiosystemen eingesetzt werden reichen hierzu vollkommen aus. Abbildung 3 zeigt die mit einem solchen System in einem Demonstrationsfahrzeug erzielten Ergebnisse. Deutlich erkennbar ist, dass die dominierenden Motorordnungen (Zündfrequenzharmonischen) im Arbeitsfrequenzbereich bis ca. 600 Hz praktisch im Hintergrundgeräusch verschwinden und dabei um deutlich mehr als 20 dB abgesenkt werden. Das mit diesem System ausgestattete Demonstrationsfahrzeug ist mittlerweile ca. 2 Jahre in Betrieb und es ergaben sich in dieser Zeit keine Probleme mit dem aktiven Geräuschminderungssystem.



**Abb. 3.** Schalldruckpegel im Ansaugsystem eines 1,8l 4-Zylinder-Motors, oben im Ausgangszustand, unten mit aktivem System zur Minderung des Ansaugeräusches (Rollprüfstandshochlauf, Teillast, elektrischer Mikrofonpegel in dB re 1V)

## 2.2 Abstrahlungsunterdrückung einer Struktur

Die Idee hinter dem Ansatz, die Schallabstrahlung einer Struktur zu reduzieren statt die Schwingungen der Struktur selber, beruhen auf der einfachen Annahme, dass die Schwingung der Struktur selbst zunächst nicht wichtig ist. Beschränkt man sich jedoch auf die Abstrahlungsreduzierung, so zeigt sich, dass oft ein geringerer Systemaufwand (gemessen in der Anzahl der benötigten Aktoren und Fehlersensoren) bei gleichem akustischen Ergebnis ausreicht. Dies liegt darin begründet, dass es zur Abstrahlungsunterdrückung ausreicht, die Amplituden der Strukturmoden mit hohem Abstrahlgrad zu reduzieren beziehungsweise die Modenformen der Struktur so zu verändern, dass diese einen geringeren Abstrahlgrad aufweisen. Als zusätzliche Schwierigkeit ergibt sich allerdings die Bestimmung geeigneter Aktor- und Fehlersensorpositionen.

Die entsprechenden grundlegenden Arbeiten wurden wesentlich von Fuller [8] geprägt und das Konzept ist unter dem Begriff Active Structural Acoustic Control oder ASAC in die Literatur eingegangen.

Bei praktischen Anwendungen trifft man jedoch häufig auf Strukturen, deren Komplexität deutlich über der einfacher, analytisch beschreibbarer Platten oder Zylinder liegt. Dann werden meist aktive Systeme aufgebaut, die mehrere theoretische Konzepte wie diskrete Lagerpunkte und ASAC verbinden, ohne dass ein detailliertes analytisches Verständnis des vibroakustischen Systems im gesamten interessierenden Frequenzbereich vorliegt. Dabei haben sich zwei wesentliche Grundregeln für den Systementwurf herausgebildet:

- Aktoren sollten an einer möglichst „einfachen“ Schnittstelle (Lagerpunkte, etc.) wirken (Ansatz: niedrigdimensionale Ausbreitung) und
- Es sollten möglichst viele Fehlersensoren im Zielgebiet verwendet werden, um die Abstrahlung möglichst vollständig zu erfassen.

Diesen Grundsätzen entsprechend wurde von uns ein aktives System zur Minderung des „100 Hz-Brummens“ in ICE 1-Mittelwagen aufgebaut [9]. Dieses Brummen entsteht im Rad-Schiene-Kontakt vor allem durch die im Betrieb entstehenden Unrundheiten der Räder, aber auch durch die Impedanzwechsel zwischen Schwelle und Schwellenfach, und ist dementsprechend tonal und fahrgeschwindigkeitsabhängig. Diese Anregung wird durch das bei den Wagen verwendete Drehgestell MD 530 in den Wagenkasten (leichte Aluminium-Strangpressprofil-Struktur) übertragen und von dort (einschließlich der Einbauten wie beispielsweise Wagenboden, die wiederum deutliche eigene Resonanzen aufweisen können) in den Innenraum abgestrahlt.

Als Gegenmaßnahme wurde ein Systemkonzept zur aktiven Vibrationsminderung erarbeitet, bei dem die Kompensationskräfte an der Drehgestellwiege unterhalb des Wagenkastens aufgebracht werden (Abb. 4). Damit soll die Vibrationsanregung des Wagenkastens gemindert werden, der sich hier an nur 4 Punkten je Drehgestell abstützt. Als zu minimierende Fehlergröße wurde aber nicht ein Beschleunigungspegel am Wagenkasten ausgewählt, sondern der über 6 Mikrofone gemittelte Schalldruckpegel im Fahrzeuginnenraum.

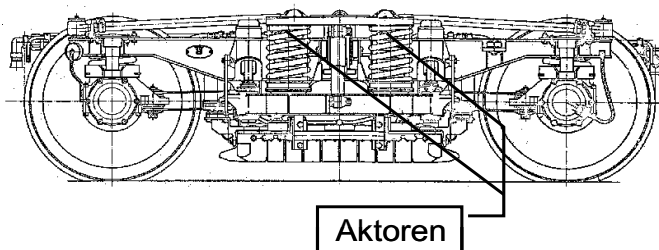


Abb. 4. Drehgestell MD 530 mit Aktorposition zur aktiven Innengeräuschminderung in den Sekundärfedern (je 2 ineinandergestellte Flexicoil-Schraubenfedern als Federsatz).

Um in den sehr beengten Einbauverhältnissen im Drehgestell hinreichend kräftige Aktoren in der Nähe der Drehgestell-Wagenkasten-Schnittstelle unterbringen zu können, war es erforderlich, diese hängend in den Flexicoil-Sekundärfedern (2 ineinanderstehende Federn) zu montieren. Da die Federn nicht nur in der Vertikalen, sondern auch in der Horizontalen erhebliche Relativwege aufnehmen (einige 10 mm), galt es, eine Verbindung der Drehgestellwiege mit dem Federträger zu vermeiden. Daher wurde ein Reaktionsmasse-Aktorsystem entwickelt, das sich allein dynamisch auf der Massenimpedanz der zugehörigen Aktormasse abstützt (auch als „aktiver Tilger“ bezeichnet). Abbildung 5 zeigt ein solches Aktorsystem mit piezokeramischem Stapelantrieb mit  $140 \mu\text{m}_{\text{pp}}$  Auslenkung und 11 kg Bleimantel als Reaktionsmasse, wobei die Aktorformgebung dem garantierten lichten Raum in den Federn folgt. Im Arbeitsfrequenzbereich um 100 Hz kann ein solcher Aktor dynamische Kräfte von  $100 \text{ N}_{\text{rms}}$  erzeugen. Zur Ansteuerung wird ein Hochspannungs-Leistungsverstärker mit 100 W Ausgangsleistung eingesetzt. In einem Drehgestell werden 4 dieser Systeme verwendet.

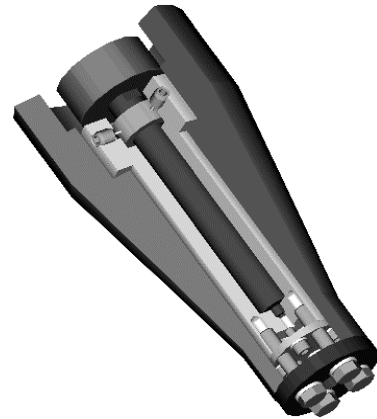


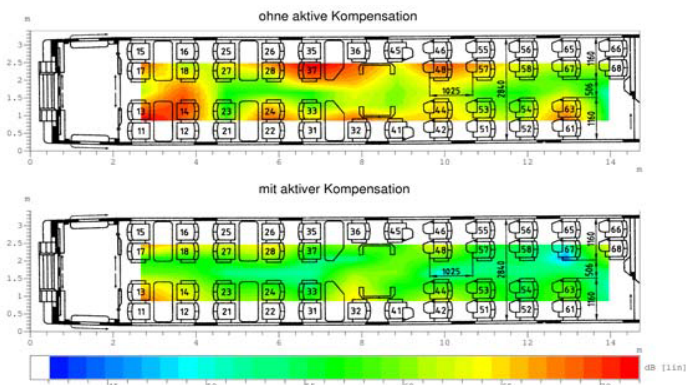
Abb. 5. Aktorsystem mit piezokeramischem Stapelantrieb ( $140 \mu\text{m}_{\text{pp}}$  Hub) und 11 kg Bleimasse, Formgebung entsprechend des lichten Raumes in den Sekundärfedern zur hängenden Montage (CAD-Schnittmodell).

Entsprechend des Anregungsmechanismus wurde zur Ansteuerung der Kompensationsaktoren ein adaptives Verfahren eingesetzt, das auf den gemessenen Raddrehzahlen beruht und als Fehlerkriterium den im Wageninneren gemittelten Schalldruckpegel verwendet. Die Abbildung 6 zeigt die damit erzielten Ergebnisse für eine 200 km/h – Messfahrt auf dem Rollprüfstand in München-Freimann. Dargestellt ist der Bandpasspegel von 95 bis 100 Hz. Es ist klar erkennbar, dass im gesamten Großraumbereich mit den eingesetzten 4 Aktoren am Drehgestell eine deutliche Pegelreduktion erzielt wird. Das System wirkt also global, obwohl es eine vergleichsweise sehr geringe Kanalzahl aufweist.

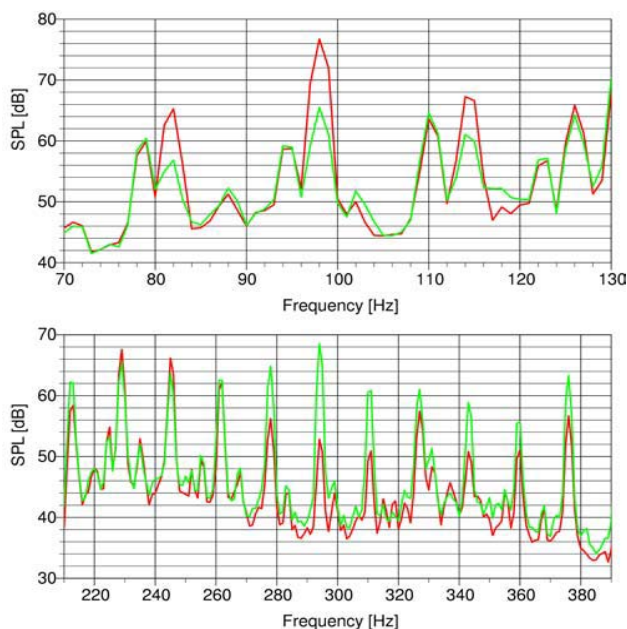
Abbildung 7 zeigt die über 6 Messpositionen gemittelten Schmalbandspektren einer Prüfstands-Messfahrt mit 160 km/h im Arbeitsfrequenzbereich (oben) sowie bei der dreifachen Arbeitsfrequenz (unten). Auch diese Ergebnisse belegen die globale Wirkungsweise des aktiven Systems durch die Pegelabnahme der dominierenden Radsatzharmonischen um 12 dB.

Ergänzend wird ein Effekt deutlich erkennbar, der die hier eingesetzten piezokeramischen Aktoren für diese recht hochfrequenten Hochlast-Applikationen praktisch nicht benutzbar macht: die Nichtlinearitäten des aktiven Materials. Diese Nichtlinearitäten beruhen sowohl auf der Hysterese des Materials als auch auf der Abhängigkeit des elektromechanischen Koppelungstensors vom (sich hier dynamisch ändernden) mechanischen Spannungszustand des Materials, das Kriechen des Materials ist bei Arbeitsfrequenzen um 100 Hz im dynamischen Betrieb hingegen eher vernachlässigbar. Abhilfe lässt sich hier prinzipiell durch eine zusätzliche Positionsregelung für die Keramik oder durch modellbasierte Kompensationsverfahren in der Ansteuerung schaffen [10],

jedoch waren beide Verfahren zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Arbeiten für die hier benötigten Frequenzen in ausreichender Qualität nicht verfügbar.



**Abb. 6.** Schalldruckpegelverteilung im ICE1-Grossraumbereich, Bandpegel 95 - 100 Hz (5. Raddrehzahlharmonische), oben ohne und unten mit aktiver Geräuschminderung bei 200 km/h auf dem Rollprüfstand in München gemessen.



**Abb. 7.** Schalldruckpegel im ICE1-Grossraumbereich, energetisch über die Plätze 12, 16, 22, 35, 42 und 65 gemittelt, bei Rollprüfstandsmessungen mit  $v=160$  km/h. Rot ohne, grün mit aktiver Kompensation. Oben: Arbeitsfrequenzbereich von 80 bis 120 Hz, unten: zugeordneter Bereich des 2. Obertones mit Verschlechterung aufgrund der Aktor-Nichtlinearitäten.

### 2.3 Räume geringer modaler Dichte

Betrachtet man Schallfelder in Räumen geringer modaler Dichte, so ergibt sich durch die modale Beschreibung des Schallfeldes oft eine deutliche Reduktion der Freiheitsgrade des Systems. Für die aktive Geräuschminderung bietet es sich nun an, auf eine solche modale Beschreibung aufzusetzen und einzelne Moden bzw. modale Amplituden aktiv zu beeinflussen. Derartige Konzepte eignen sich beispielsweise für den Luftschall in gering bedämpften kleinen Räumen.

Allerdings ist diese theoretische Beschreibung als Frequenzbereichsbeschreibung konzeptionell auf periodische Geräusche und stationäre Zustände beschränkt. Alle Laufzeiteffekte, die für die bei aktiven Systemen erforderliche zeitliche Kausalität ja entscheidend sind, kommen in einer modalen Betrachtung nicht vor.

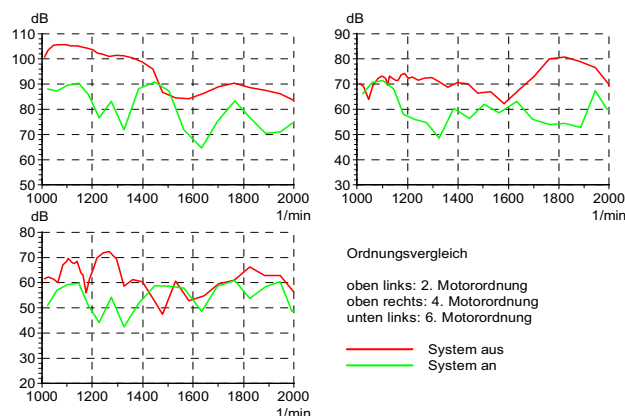
Bei praktischen Anwendungen kommen oft zwei weitere, wichtige Punkte hinzu. Einmal ist für reale Probleme die genaue Modenstruktur oft nicht bekannt (und bei Serienprodukten mit entsprechender Streuung auch nicht mit vernünftigem Aufwand bestimmbar). Außerdem sind Räume, zumindest bei mittleren Frequenzen, oft stärker bedämpft, sodass die Ausbreitungsdämpfung von einem Kompensationslautsprecher zum Zielort, die ja im Modenbild nicht berücksichtigt wird, nicht vernachlässigt werden kann.

Damit ergibt sich beim praktischen Einsatz, beispielsweise in PKW-Innenräumen, wiederum ein theoretisch nicht leicht kategorisierbares Vorgehen, dass darauf beruht, eine grössere Fehlersensozahl (zumindest gleich der Aktorzahl) mit einem Abstand klein gegen die Wellenlänge im Zielbereich (Fahrgäste) einzusetzen. Damit entsteht ein System, dass im so erfassten Raumgebiet mit hinreichender Interpolation zwischen den Sensoren das Geräusch mindert, wobei sich die obere Frequenzgrenze für eine „globale“ Minderung durch die Schallwellenlänge ergibt.

Ein breites Anwendungsgebiet für aktive Geräuschminderungssysteme nach diesem Ansatz findet sich im Fahrzeuginnengeräusch von PKW, vor allem dem Motorgeräusch in Innenen. Dieses ist vor allem durch die Zündfrequenz (bei 4-Zylinder-Motoren mit dem typischen Drehzahlbereich 900 1/min bis 6000 1/min liegt diese bei 30 Hz bis 200 Hz) und ihre Obertöne bestimmt. Besonders ausgeprägt ist das Innengeräusch, wenn eine solche Anregung auf eine wesentliche Fahrzeug- oder Innenraumresonanz trifft.

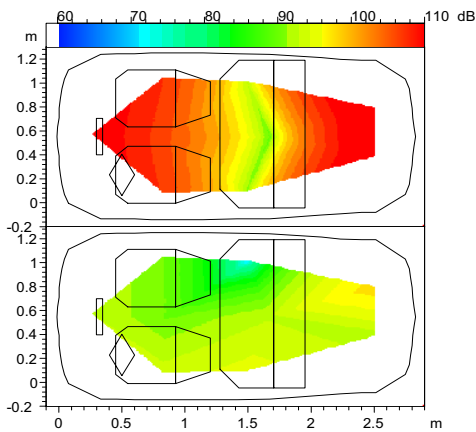
Im Zündfrequenzbereich von 4- und 6-Zylindermotoren lässt sich für den Passagierbereich typisch ein global wirkendes System mit den vorhandenen 4 – 6 Audio-Lautsprechern eines Fahrzeugs aufbauen. Damit lassen sich die kritischsten motorerregten Resonanzen im Innengeräusch deutlich reduzieren. Als Fehlersensoren verwenden wir dabei meist 6 Mikrofone im Dachhimmel, die für die Steuerung benötigte Drehzahlinformation lässt sich als analoges Pulssignal oder von den in neueren Fahrzeugen typisch vorhandenen Controller Area Network (CAN)-Bussystemen der vernetzten Steuergeräte lesen.

Abbildung 8 zeigt die mit einem solchen System in einem aktuellen Kombi-Modell mit ausgeprägter „Brummeignung“ gegenüber dem Serienzustand gemessenen Verbesserungen als Ordnungspegelverläufe, die Abbildungen 9 bis 11 die dazugehörigen Schallfeldverteilungen für ausgewählte Betriebsparameter. Dabei zeigt sich deutlich, wie sehr das Schallfeld bei tiefen Frequenzen um 40 Hz durch seine erste Längstmode (Druckknoten über der Rückbank) geprägt ist, während schon bei 120 Hz komplexere Verteilungen auftreten, die jedoch ebenfalls noch globale Reduktionen mit in diesem Fall 5 unabhängigen Lautsprecherkanälen erlauben.

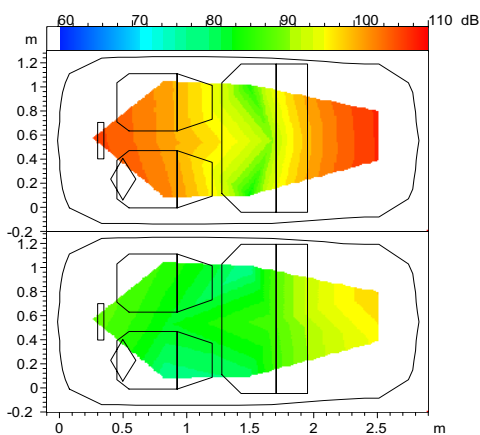


**Abb. 8.** Schalldruckpegel in einem PKW (Kombi) mit 4-Zylinder-Motor bei Vollastbeschleunigung im unteren Drehzahlbereich, gemessen zwischen Fahrer- und Beifahrerplatz in Wagenmitte. Rot: Serienzustand, grün: Aktive Minderung.

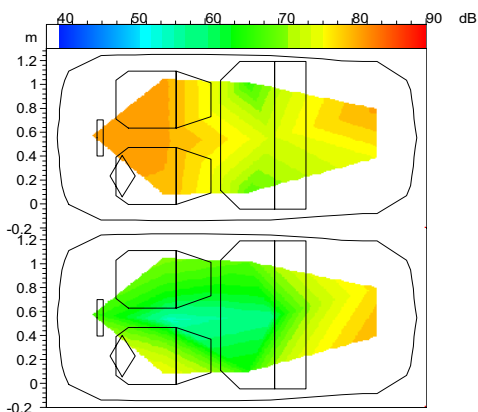




**Abb. 9.** Schalldruckpegelverteilung der 2. Motorordnung in einem PKW (Kombi) mit 4-Zylinder-Motor bei Vollastbeschleunigung, 1100 1/min (entsprechend 37 Hz). Oben: Serienzustand, unten: Aktive Minderung.



**Abb. 10.** Schalldruckpegelverteilung der 2. Motorordnung in einem PKW (Kombi) mit 4-Zylinder-Motor bei Vollastbeschleunigung, 1300 1/min (entsprechend 43 Hz). Oben: Serienzustand, unten: Aktive Minderung.



**Abb. 11.** Schalldruckpegelverteilung der 4. Motorordnung in einem PKW (Kombi) mit 4-Zylinder-Motor bei Vollastbeschleunigung, 1800 1/min (entsprechend 120 Hz). Oben: Serienzustand, unten: Aktive Minderung.

### 3 Anmerkungen zur Signalverarbeitung

Bislang wurde die Frage der aktiven Geräuschminderung vorwiegend aus akustischer Sicht, d.h. aus Sicht der akusti-

schen Möglichkeiten und Grenzen diskutiert. Wie aber bereits in der Einführung erwähnt, spielen Fragen der Signalverarbeitung und Steuerungs- und Regelungstechnik, oder allgemeiner, der Bereitstellung eines optimalen Ansteuersignals für die vorhandenen Aktoren, eine entscheidende Rolle beim Aufbau eines funktionsfähigen und praxistauglichen aktiven Systems.

#### 3.1 Zeitliche Kausalität

Um die erforderlichen Genauigkeiten bei der inversen Schallfeldnachbildung auch unter veränderlichen Randbedingungen zu gewährleisten, ist eine Regelung zur Erzeugung des Kompensationssignals erforderlich. Bei dem Begriff der Regelung denkt man zunächst unweigerlich an eine einfache, rückgekoppelte Regelschleife. Entsprechende Ansätze wurden auch für die aktive Geräuschminderung häufiger eingesetzt ([11] für ein historisches Beispiel, [12, 13] für ein umfangreicheres, neueres Forschungsprojekt), stoßen jedoch aufgrund der geringen Schallgeschwindigkeit schnell an ihre Grenzen. Durch diese geringe Schallgeschwindigkeit ergibt sich zusätzlich zu den unvermeidlichen Phasen eines elektro-mechanischen Systems eine erhebliche laufzeitbedingte Phase in der Regelschleife. Damit muss aus Stabilitätsgründen die Schleifenverstärkung schon bei recht geringen Frequenzen und Aktor-Sensor-Entfernungen so klein gewählt werden, dass keine nennenswerte Kompensation mehr möglich ist.

Angesichts dieser Einschränkungen sind andere Ansätze zum „austricksen“ der Laufzeit bzw. Phase erforderlich. Schon Lueg hat hierzu das akustische Signal vor der Kompensationsquelle gemessen und durch die schnellere elektrische Signalausbreitung „Zeit“ (genauer wohl: Phase) gewonnen. Genau diese Idee, das Ausnutzen der verschiedenen Signalgeschwindigkeiten, stellt die Grundidee bei den sogenannten „Feed-Forward“-Systemen (im deutschen mit Steuerung nicht ganz genau übersetzt, da hier meist adaptiv) dar. Durch die Verwendung von mit dem Störsignal kohärenten a-priori-Informationen, beispielsweise durch ein Mikrofon gewonnen, aber auch durch einen Drehzahlsensor bei Rotationsmaschinen, kann gegenüber dem langsamen akustischen Signal hinreichend Phase gewonnen werden, um eine elektronische / digitale Signalverarbeitung sowie auch ggf. Wandlerlaufzeiten und akustische Ausbreitungswege zuzulassen und trotzdem die zeitliche Kausalitätsbedingung einzuhalten.

Die zweite grundlegende Möglichkeit, die Systemlaufzeit „auszutricksen“ besteht im Ausnutzen statistischer Signaleigenschaften zur Prädiktion des Störsignals. Da reale Störgeräusche häufig kein weißes Rauschen darstellen, sind sie mehr oder weniger gut präzifizierbar. Dies gilt beispielsweise für Resonanzüberhöhungen, bei denen man zwar nicht die oft stochastische „Ursprungsanregung“ präzifizieren kann, sehr wohl aber deren (schwach) bedämpftes Ausklingen. Noch besser geeignet sind Prädiktionsverfahren für periodische Signale, bei denen man aus einer Periode theoretisch alle Perioden bis in ewige Zeiten genau vorhersagen kann. Die Möglichkeit der Signalprädiktion ist einer der wesentlichen Gründe dafür, dass aktive Systeme für periodische oder stark eingefärbte Störgeräusche leichter einsetzbar sind als für breitbandige Rauschsignale mit flachem Spektrum.

#### 3.2 Algorithmen für adaptive Digitalfilter

Die Aufgaben der Signalprädiktion, der Laufzeitnachbildung, der Betrags- und der Phasen Anpassung lassen sich mathematisch durch ein Filter beschreiben, wie es beispielsweise als Element V schon bei Lueg (Abb. 1) erscheint.

Prinzipiell lässt sich ein solches Filter mit analoger Elektronik realisieren und bei aktiven Systemen mit einfachen geschlossenen Regelschleifen wird dies auch heute noch so eingesetzt. In diesen Fällen ist der Geschwindigkeitsvorteil gegenüber der Digitalelektronik (A/D-Wandlung, Rechnung, D/A-Wandlung sowie jeweils analoge Tiefpassfilter vor/nach den Wandlern) neben Kostengründen ausschlaggebend.

Für alle anderen Systeme, vor allem für Feed-Forward-Systeme und prädiktionsbasierte Systeme, kommen digitale Filter, meist auf Signalprozessoren, zum Einsatz. Um für solche

Systeme die erforderliche Nachbildungs-genauigkeit zu erreichen, werden adaptive Filter eingesetzt. Diese bieten den Vorteil, dass sie sich entsprechend dem gemessenen Restfehlersignal automatisch optimieren. Dabei werden praktisch ausschließlich Algorithmen eingesetzt, die ein lineares Systemmodell (Filter) entsprechend eines quadratischen Fehlerkriteriums adaptieren. Die Grundlage für alle entsprechenden Filter stellt wohl das Wiener'sche Optimalfilter [14] dar, wonach, etwas vereinfacht gesagt, der optimale Filterkoeffizientenvektor eines FIR-Filters (die Impulsantwort des optimalen Filters) gleich dem Produkt der inversen Eingangssignal-Autokorrelationsmatrix mit dem Kreuzkorrelationsvektor des Eingangs- und Zielsignals ist. Diese Lösung minimiert den Erwartungswert des quadratischen Restfehlers.

Praktischen Echtzeitberechnungen stehen hierbei zwei Dinge entgegen, der Rechenaufwand (Matrix-Inversion) und die fehlende, genaue Kenntnis der (in Realität meist nicht-stationären) Signalstatistik. In der Praxis hat sich daher der sogenannte Least Mean Square (LMS) Algorithmus von Widrow weitestgehend durchgesetzt [15], der ein stochastisches Gradientenverfahren darstellt, bei dem die aktuellen Signalwerte als Schätzer der unbekanntesten statistischen Größen verwendet werden. Damit ergibt sich ein numerisch sehr robustes Verfahren mit sehr geringer numerischer Komplexität.

Einen anderen Ansatz verfolgt die Familie der Recursive Least Squares (RLS) Algorithmen, die aufbauend auf der bislang gemessenen Statistik der Signale eine rekursive, exakte Lösung der obigen Optimalfiltergleichung berechnen. Zur Einführung in die damit verbundenen Konzepte der adaptiven Signalverarbeitung sei auf [16] verwiesen. Es sei lediglich noch erwähnt, dass es sogenannte „schnelle“ RLS-Algorithmen gibt, deren numerische Komplexität wie beim LMS nur linear mit der Filtergröße wächst und 2-3 mal über der des LMS liegt, womit der Ansatz auch für Echtzeitanwendungen interessant geworden ist.

Weitere Details der einzelnen Algorithmen würden hier zu weit führen, dazu sei beispielsweise auf [17,18] und die dort zitierte Literatur verwiesen.

Praktisch wichtig ist jedoch folgendes Resümee: Es gibt keinen für alle Aufgabenstellungen idealen Algorithmus. Es gibt die prinzipielle Möglichkeit, Adaptionsgeschwindigkeit und Rechenleistungsbedarf gegeneinander auszutarieren und zusätzlich bei bekannter Signalstatistik weitere gut geeignete Lösungen, deren Auswahl jedoch von der konkreten Aufgabenstellung abhängen sollte.

### 3.3 Systemintegration der adaptiven Digitalfilter

Im Gegensatz zu reinen Systemerkennungsanwendungen oder auch der Ecounterdrückung in der Telekommunikation ist es für Anwendungen in der aktiven Geräuschminderung notwendig, die Übertragungsfunktion zwischen Aktoren (Lautsprechern) und Sensoren (Mikrofonen) zu berücksichtigen. Dazu gibt es entsprechende Ergänzungen zu den adaptiven Filteralgorithmen. Für den LMS-Algorithmus ist dies meist der Filtered-X-Algorithmus, der allerdings implizit eine langsame Konvergenz des adaptiven Filters voraussetzt.

Für schnell konvergierende Filter, beispielsweise aus der RLS-Familie, ist er daher nicht einsetzbar. Mit FASPIS [19, 18] steht aber auch für diese Fälle ein geeignetes Integrationskonzept zur Verfügung, dessen Idee auch auf andere Anwendungen wie beispielsweise Feed-Back-Regler [20] anwendbar ist.

## 4 Active Sound Design

Obwohl es oft sehr erwünscht ist, Geräusche zu reduzieren, ist dies nicht immer die optimale Lösung. Diese recht banal klingende Aussage ist nicht neu und inspirierte sogar schon Comic-Autoren zu recht amüsanten, wenn auch für die Akustiker nicht immer vorteilhaften Werken [21]

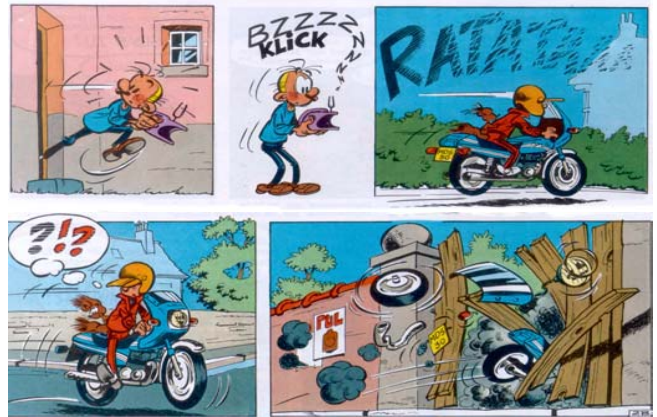


Abb. 12. Plakatives Beispiel für die Bedeutung der akustischen Maschinenüberwachung und des Sound Design [21].

Die Beurteilung von Produkten aller Art findet, oft unbewusst, immer auch über den Klang statt. Dabei sind zumindest 3 Aspekte zu trennen.

Der erste Aspekt ist die Produktbeurteilung beim Kauf. Das klassische Beispiel hierzu ist der Staubsauger, der in einer oft lauten Verkaufsumgebung bei kurzzeitigem Betrieb noch den Eindruck „kräftig“ vermitteln soll (also auch hier deutlich hörbar sein muss, damit aber im Haushalt mit weniger Hintergrundgeräusch zu laut sein wird), aber nicht „billig“ (also beispielsweise keine deutlich hörbaren tonalen Komponenten des Lüfters abstrahlen soll). Ein anderes Beispiel ist, dass uns unsere Alltagserfahrung lehrt, dass schwere und damit oft robuste Produkte eher tiefe, „satte“ Geräusche erzeugen. Damit ist beispielsweise der Zielklang für ein hochwertiges Türschließgeräusch schon zu großen Teilen gefunden.

Der zweite Aspekt ist die Benutzerschnittstelle eines Produktes. Wir erwarten von Produkten oft akustische Rückmeldungen (die wir in unserem Erfahrungsschatz gelernt haben). Beispiele hierfür sind das Blinker-Relais-Klacken im Auto oder die Nachbildung eines mechanischen Verschlussgeräusches bei modernen Digitalkameras ohne bewegliche Teile, die dann über einen extra eingebauten Lautsprecher erfolgt, um zu signalisieren, dass gerade ein Foto abgespeichert wurde.

Der dritte Aspekt ist die Produktüberwachung. Wir wollen ein Produkt hören, um die Funktionsrückmeldung und die Rückmeldung über den o.k.-Zustand zu bekommen, da Fehler oder Defekte meist mit anderen oder auch keinen (Produktausfall) Geräuschen verbunden sind.

Zusätzlich zu diesen Aspekten bleibt zu berücksichtigen, dass die subjektive Belästigung durch ein Geräusch nicht immer direkt dem Gesamtpegel des Geräusches entspricht und auch von daher eine Reduktion bestimmter Geräuschkomponenten zwar zu einem geringeren Pegel, aber auch einem unangenehmer wahrgenommenen Geräusch führen kann.

Die gezielte Gestaltung eines Klanges vor dem hier nur skizzierten Hintergrund wird als Sound Design bezeichnet und ist eine wesentliche Aufgabe der produktbezogenen Akustik.

### 4.1 Sound Design in der Automobilindustrie

Eine besonders deutliche Rolle spielt das Sound Design in der Automobilindustrie. Dies ist insofern leicht verständlich, da es sich bei Automobilen um sehr emotionale Produkte handelt und besonders die Produktdifferenzierung auf der emotionalen Ebene stattfindet. Hierzu ist die Akustik, der Klang eines Autos sehr gut geeignet, da die akustische Wahrnehmung nicht „abschaltbar“ ist und sich dadurch für die unbewusste, emotionale Ansprache des Kunden gut eignet. Ein Kunde kann ein Auto nicht „nicht hören“, er nimmt es immer akustisch wahr und beurteilt diese Wahrnehmung.

Um diese unterschwellige Wahrnehmung bewusst einzusetzen, werden die Fahrzeugklänge gestaltet. Dabei gibt es im Auto keine unwichtigen Geräusche bzw. Klänge. Allerdings lassen sich schon bestimmte Prioritäten erkennen.

Zunächst einmal ist das Innengeräusch wichtiger als das Außengeräusch, da der Kunde (um dessen Kaufentscheidung es ja geht) meist im Fahrzeug sitzt und dort positive Emotionen vermittelt bekommen soll. Allerdings gibt es sehr wohl auch Fahrzeuge (meist die akustisch auffälligeren), bei denen die Außengeräuschwirkung sehr wesentlich ist, um beispielsweise die Selbstdarstellung des Fahrers gegenüber seiner Umwelt zu unterstützen (beispielsweise sehr sportliche oder offene Fahrzeuge).

Eine zweite Priorisierung ergibt sich für den Motor und den Antriebsstrang. Besonders der Motor gilt als automobiler Kernkompetenz der Fahrzeughersteller und soll Emotionen wecken. Größer motorisierte Fahrzeuge mit ihren höheren betriebswirtschaftlichen Deckungsbeiträgen sind in besonderem Maße auf eine emotionale Motivation im Verkaufsprozess angewiesen.

Diese Zusammenhänge führen dann zu Aussagen wie „Was unsere Triebwerke auszeichnet, hört man sofort: Jeder herkömmliche Motor macht ein Geräusch – ein BMW-Motor hat einen Klang“ [22], vielleicht die schönste und knappste Zusammenfassung des hier dargestellten.

Beim Sound-Design im Antriebsstrang wird mit passiven Maßnahmen in drei Stufen vorgegangen. Das einfachste und klassischste Vorgehen ist die Abstimmung passiver Bauelemente wie der Motorlager, der Ansaug- oder der Abgasanlage. Die zweite Stufe stellt die gezielte Gestaltung der Übertragungswege in den Innenraum dar. Im Rahmen des allgemeinen Bestrebens, das Innengeräusch zu senken, wurde beispielsweise die Spritzwanddämmung zwischen Motorraum und Innenraum so verbessert, dass das Motorengeräusch als nicht mehr hinreichend hörbar beurteilt wird. Daher werden inzwischen sogar teilweise serienmäßig gezielt gute Ankopplungen an das Innengeräusch, beispielsweise durch Positionierungen der Ansaugöffnungen oder sogar zusätzliche resonanzverstärkte „Soundleitungen“ aus dem Ansaugsystem zum Innenraum geschaffen. Die dritte Stufe stellen gezielt einstellbare passive akustische Systeme dar, die entsprechend der jeweiligen Betriebssituation den Klang des Fahrzeugs verändern. Auch diese Systeme wie schaltbare Abgasanlagen werden zwischenzeitlich serienmäßig eingesetzt.

Eine solche Abstimmung mechanischer Komponenten ist in der Entwicklung aufwändig, Klangtests sind schwer durchzuführen (mechanische Änderungen am Fahrzeug erforderlich, für den Vergleich mehrere Fahrzeuge zum Tauschen) und für einen Serieneinsatz lassen sich Gleichteilkonzepte für verschiedene Klänge schlecht umsetzen.

Außerdem ist passives Sound Design sehr eng an die Akustik gebunden, da es nur die Schallübertragung, nicht aber die Quelle ändern kann. Eine Resonanz wird beispielsweise je nach Drehzahl von verschiedenen Motorordnungen angeregt, womit auch unerwünschte Verstärkungen auftreten. Auch lassen sich zusätzliche Ordnungen, die für einen bestimmten Klangeindruck benötigt werden, nicht einfach erzeugen.

#### 4.2 Funktionsweise von Active Sound Design

Zum Verständnis der Funktionsweise der Aktiven Klanggestaltung (Active Sound Design, ASD) sei zunächst noch einmal eine Konzeptdarstellung eines ANC-Systems betrachtet, wie es oben für den Einsatz im Fahrzeuginnenraum vorgestellt wurde (Abbildung 13). Hier ist besonders wichtig, dass die Minimierung des Mikrophon-Fehlersignals implizit ein Zielsignal von Null, d.h. möglichst großer Pegelreduktion bedeutet. Entsprechend ist das Zielsignal Null in der Abbildung explizit eingezeichnet.

Speist man dasselbe System (mit denselben adaptiven Filteralgorithmen, etc.) mit einem expliziten, von Null verschiedenen Zielsignal, so stellt das ANC-System dieses Zielsignal im Sinne kleinster quadratischer Abweichung am „Fehlersensor“ ein. Das Mikrofonsignal (Ist-Signal) ist dann aber nicht mehr das direkte Fehlersignal für die adaptive Signalverarbeitung. Auf diese Weise ist aus einem ANC-System ein ASD-System geworden (Abbildung 14).

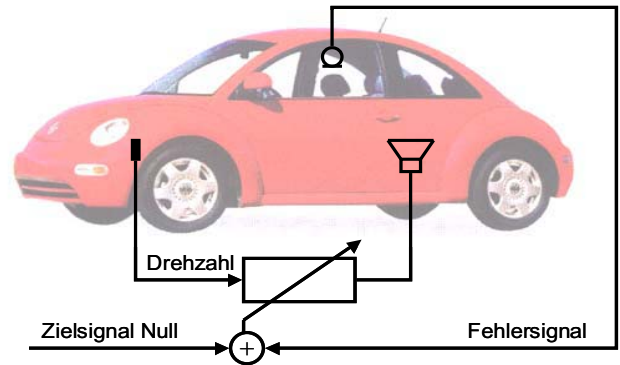


Abb. 13. Prinzipschaltbild eines ANC-Systems.

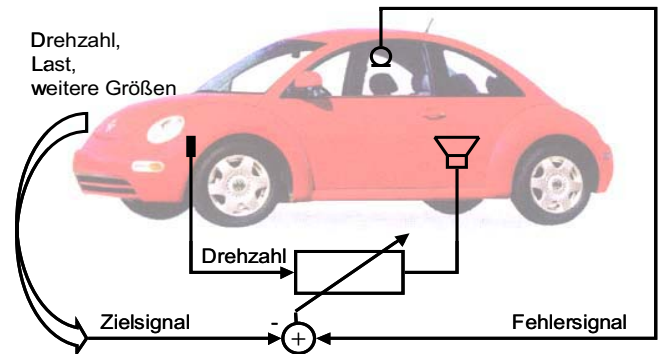


Abb. 14. Prinzipschaltbild eines ASD-Systems.

Das Zielsignal selbst kann nun auf vielfältige Weise von verschiedenen Parametern abhängen. Im Auto ist dies, entsprechend dem klassischen akustischen Verhalten des Motors und Antriebsstrangs, die Drehzahl und in geeigneter Weise die Motorlast. Weitere sinnvolle Parameter können die Fahrgeschwindigkeit oder auch der gewählte Gang sowie ein möglicherweise vorhandener „Sport“-Schalter für eine Getriebeautomatik-Schaltcharakteristik sein.

Konzeptionell stellt also ein ASD-System nichts anderes als ein ANC-System mit zusätzlichem, unabhängigem Zielsignal-generator dar. Der in der Umsetzung akustisch anspruchsvollste Zielklang ist dabei die Geräuschminderung, der für eine Anwendung gewünschte kann davon deutlich abweichen.

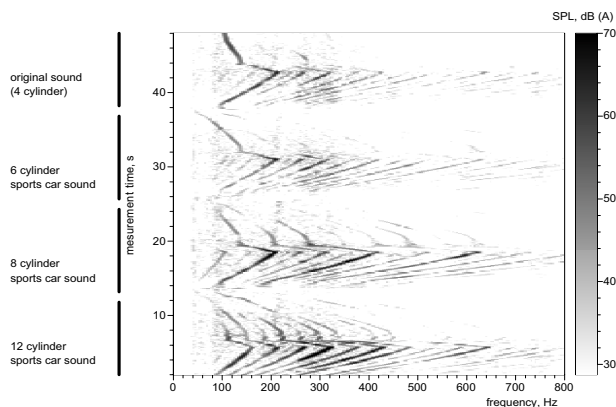
Abbildung 15 zeigt beispielhaft 4 vollkommen verschiedene Klangcharakteristika in einem sportlichen PKW mit 4-Zylinder-Motor. Dabei wurde ein 12-Zylinder-, ein 8-Zylinder- und ein 6-Zylinder-Klang nachempfunden. Die Darstellung zeigt die Innengeräuschspektren über der Messzeit, jeweils für einen Beschleunigungsvorgang, anschließend wird auf den nächsten Klang umgeschaltet. Deutlich erkennbar ist, dass sich der Klang im Fahrzeug und damit auch die subjektive Wahrnehmung des Fahrzeugs in weiten Bereichen verändern lässt. Derartige Klangveränderungen sind natürlich nicht nur, wie gezeigt, im Innengeräusch, sondern auch im Fahrzeugausgangsgeschwindigkeit, beispielsweise über das Ansaug- oder Abgasanlagengeräusch, möglich [7].

Im Vergleich zum oben beschriebenen passiven Sound-Design ergibt sich mit ASD die grundlegende Möglichkeit, den Klang und die akustikrelevante Konstruktion der Bauteile zu trennen. ASD kann als Quelle unabhängig vom mechanischen Aufbau wirken, der mechanische Aufbau dementsprechend nach anderen Kriterien (beispielsweise Thermodynamik im Motorenbereich, Gleichteilkonzepte bzgl. Produktionskosten) optimiert werden.

Die leichte Modifizierbarkeit des Klanges über die Zielsignalgenerierung (bis zum „Drag and Drop“ am Laptop im Fahrzeug) macht ASD zum idealen Entwicklungswerkzeug und gestattet auch Klangdifferenzierungen für Sondermodelle oder lokalisierte Kleinserien. Die für die Klangdefinition geeig-



neten Parameter stehen in modernen Fahrzeugen über die Steuergerät-Bussysteme wie CAN leicht und kostengünstig zur Verfügung. Auch für die Fehlersignalerfassung und die Lautsprecher-Ausgabe ist die Mitnutzung vorhandener digitaler Audiokomponenten im Fahrzeug möglich. Damit lassen sich ASD-Systeme relativ leicht und kostengünstig in moderne PKW integrieren, der Aufwand wird durch die fortschreitende Digitalisierung in den Fahrzeugen immer geringer.



**Abb. 15.** A-bewerteter Schalldruckpegel am Fahrerohr in einem sportlichen 4-Zylinder-Fahrzeug mit ASD-System bei Beschleunigungsvorgängen auf der Straße. 4 Vollast-Hochläufe vom Leerlauf bis ca. 6000 1/min mit jeweils verschiedenen Zielklängen. Von unten: nachempfunderer 12-Zylinder, 8-Zylinder und 6-Zylinder; 4-Zylinder-Ausgangsklang [23].

### 4.3 Status von ASD

Gegenwärtig wird ASD von Fahrzeugherstellern und Zulieferern als Entwicklungswerkzeug entdeckt und von einigen bereits in der Serienentwicklung zur Definition von Zielgeräuschen eingesetzt.

Damit verbindet sich auch das Entdecken der neuen Möglichkeiten. ASD liefert viele neue Gestaltungsspielräume für den Klang im Fahrzeug, die bislang passiv nicht erreichbar waren. Auch die Frage nach einem „authentischen“ Motorenklang stellt sich neu: Bislang war jeder Klang eines Motors per Definition authentisch, nun muss dieses nicht mehr der Fall sein. Dies betrifft vor allem die Abhängigkeit von Parametern, also beispielsweise von der Last. Die künftige Gestaltung neuer Fahrzeugklänge, aber auch schon die vollständige Bestandsaufnahme aktueller Geräusche über die Vollastbeschleunigung und den Schubtrieb hinaus stellen damit neue Aufgaben für die Fahrzeugakustik dar.

Parallel dazu laufen Arbeiten, die auf einen Serieneinsatz zielen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Aktive Schall- und Schwingungsminderung ist, trotz der Einfachheit der Grundidee, nur in „akustisch einfachen“ Fällen praktisch einsetzbar. Allerdings fallen eine ganze Reihe praktischer Probleme wie gezeigt in diese Kategorie. Entsprechend lassen sich für reale Probleme umsetzbare technische Lösungen aufzeigen. Dies betrifft besonders den tieffrequenten Bereich, der zwar „akustisch einfach“, bei passiven Lösungen aber nur mit großem Aufwand beruhigbar ist. Insofern stellen aktive Maßnahmen eine gute Ergänzung zur bekannten passiven Lärminderung dar.

In Ergänzung zur Geräuschminderung gestatten aktive Systeme konzeptionell sehr einfach eine Veränderung und Gestaltung des Klanges. Dieses eröffnet zahlreiche neue Möglichkeiten für die Klanggestaltung, das sogenannte Sound Design. Der Einsatzbereich hierfür liegt derzeit vorwiegend in der Automobilindustrie, prinzipiell ist die Technologie jedoch auch für andere Produkte anwendbar.

Damit führen die aktiven Systeme nicht nur zu einem besseren Verständnis der physikalischen Akustik eines Systems, wie es zum Entwurf eines guten aktiven Minderungssystems erforderlich ist, sondern darüber hinaus auch zu einem besseren Verständnis der subjektiven Akustik, des vom Menschen erwarteten, guten Klanges eines Produktes und seiner Wahrnehmung.

## 6 Literatur

- [1] Lueg, P., Process of silencing sound oscillations. US Patent No. 2,043,416., erteilt 9. Juli 1936.
- [2] Guicking, D., Paul Lueg – der Erfinder der aktiven Lärmbekämpfung, *Acustica* 71(1990), 64-68.
- [3] Jessel, M.J. und Mangiante, G.A., Active Sound Absorbers in an Air Duct, *JSV* 23 (1972), 383-390.
- [4] Nelson, P.A. und Elliott, S.J., *Active Control of Sound*, Academic Press, London, 1992.
- [5] Swinbanks, M.A., The Active Control of Sound Propagation in Long Ducts, *JSV* 27 (1973), 411-436.
- [6] Wicker, K., Schirmacher, R. und Guicking, D., One-dimensional active noise control in two directions. *Acustica* 82 (1996), 667-670.
- [7] Pricken, F., Active Noise Cancellation in Future Air Intake Systems, SAE Paper No. 2000-01-0026
- [8] Fuller, C.R., Elliott, S.J und Nelson, P.A., *Active Control of Vibration*, Academic Press, London, 1995.
- [9] Schirmacher, R., The Use of Active Vibration Control for the Reduction of ICE Interior Noise, *ZAMM* 81 (2001), Supplement, 41-43.
- [10] Krejci, P. und Kuhn, K., Inverse Control of Systems with Hysteresis and Creep, *IEE Proc. Control Theory and Applications* 148 (2001), 185-192.
- [11] Olson, H.F. und May, E.G., Electronic Sound Absorber, *JASA* 25 (1953), 1130-1136.
- [12] Lippold, R., Untersuchung hybrider Absorberkassetten zum Einsatz in Schalldämpferkanälen, Dissertation, Dresden, 1995.
- [13] Krüger, J., Berechnung und praktischer Einsatz aktiv absorbierender Schalldämpfer, Dissertation, Stuttgart, 1999.
- [14] Wiener, N., *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*, The Technology Press of M.I.T. and Wiley & Son, 1950.
- [15] Widrow, B. et al., Adaptive Noise Cancelling: Principles and Applications. *Proc. IEEE* 65 (1975), 1692-1716.
- [16] Haykin, S., *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, 1986.
- [17] Schirmacher, R., Algorithmen und Modellierungskonzepte zur aktiven Schallfeldbeeinflussung mit Feed-Forward-Systemen, *DAGA* 1996, 116-117.
- [18] Schirmacher, R., Schnelle Algorithmen für adaptive IIR-Filter und ihre Anwendung in der aktiven Schallfeldbeeinflussung, Dissertation, Göttingen, 1995.
- [19] Schirmacher, R. und Guicking, D., Theory and implementation of a broadband active noise control system using a fast RLS algorithm, *acta acustica* 2 (1994), 291-300.
- [20] Auspitzer, T., Adaptive Feedback-Regler mit effizienten Optimierungsalgorithmen und ihr Einsatz in der aktiven Schallfeldkontrolle, Dissertation, Göttingen, 1996.
- [21] Cauvin und Nic, Spirou und Fantasio: *Der Lärmschlucker*, Carlsen Verlag, Hamburg, 1990.
- [22] Bayerische Motorenwerke, BMW 5er touring, Produktkatalog, 2001, S. 28
- [23] Schirmacher, R. und Lippold, R., Designing vehicle sound by the use of ANC and active sound design – theory, application and practical experiences, *IMEchE Paper C577/035/2000*.