

Endlich ist es mucksmäuschenstill

Ungewöhnlicher, aber sehr wirksamer Lärmschutz bei Rechnern

Um Ruhe vor dem Lärm der Lüfter und Festplatten zu haben, wählen wir geräuscharme Varianten aus, bauen Dämmplatten ein und vieles Andere mehr. Doch letztlich bleibt der Erfolg mäßig. Dennoch gibt es zumindest theoretisch etwas Einfacheres und Wirksameres. Nur Insidern sind hierzu Arbeiten von PAUL LUEG ab etwa 1932 bekannt. Doch in der Praxis sieht es deutlich anders aus. Fast alle Akustik-Literatur schweigt sich zu diesem Thema aus. Kein übliches Fachbuch enthält hierzu Aussagen. Doch wer in entsprechenden Diskussionsforen des Internet nachschaut, findet nur Begeisterung. Die Rede ist vom Antischall, der den störenden Schall ganz „einfach“ kompensiert. Doch als ich kürzlich zum ersten Versuch einen NoiseGard®-Kopfhörer von Sennheiser zu Hause „anprobierete“, da waren die Geräusche meines Rechners unvermittelt verschwunden. Damit hatte ich überhaupt nicht gerechnet. Denn eigentlich wollte ich das Gerät nur dazu benutzen, um endlich beim Lesen in Bahn, Bus usw. nicht mehr von den sich lautstark selbstdarstellenden „Persönlichkeiten“ und von den Handy-Gesprächen gestört zu werden. Dies stellte sich jedoch erst später als wesentlich schwieriger heraus. Doch für tief- bis mittelfrequenter Störschall ist die Technik so wirksam, dass sie hier, insbesondere für Rechner, nur empfohlen werden kann. Ja selbst in der Umgebung vieler Rechner, z.B. in Serverräumen oder wenn für komplexe Aufgaben mehrere Nachbarn endlos Filme rendern, ist die Wirkung hervorragend. Hinzu kommt, dass zusätzlich in das Gerät Signale eingeschleust werden können – und wer während der Arbeit am Rechner mit einem Kopfhörer Musik hört, wird doppelt erfreut sein. Einmal besitzt das Sennheiser-System eine hervorragende Klangqualität und außerdem verschwindet der meiste Störschall, sodass sich ein wesentlich besseres Hörerleben einstellt. Schließlich braucht auch die Musik nicht mehr so laut gestellt zu werden.

Was ist Lärm?

Lärm ist lauter Schall, der uns stört und belastet. Er kann durchaus gesundheitsschädlich sein. Dabei leidet nicht nur unser Gehör. Er wirkt auch auf das vegetative Nervensystem ein. Müdigkeit, schlechte Konzentration, Nervosität und Gereiztheit bis zu anhaltenden psychischen Störungen sind die Folge. Nach den Hauterkrankungen sind in Deutschland Lärmschäden die zweithäufigste Berufskrankheit [Matschke]. Doch nicht immer ist lauter Schall auch Lärm². Besonders hoher Lärm tritt in den Cockpits von Hubschraubern sowie Militär- und Zivilflugzeugen (Jets) auf. Dauerbelastungen von 80 bis 100 dB(A) sind hier üblich. Da auch noch eine Verständigung mittels Funksprechverkehr notwendig ist, liegen die Belastungen noch höher. Weitere hohe Belastungen ruft das Baugeschehen und der Verkehr hervor. Nicht von ungefähr werden Siedlungsgebiete an Autobahnen und Eisenbahnlinien durch besondere Schallwände geschützt.

Beim Lärm sind – wie generell beim Schall – drei Orte zu unterscheiden. Erstens geht er immer von Schallquellen aus. Dann breitet er sich mit Schallgeschwindigkeit aus und wird dabei in Räumen teilweise reflektiert, durch Resonanzen verstärkt bzw. von Stoffen absorbiert. Schließlich gelangt er zu unserem Ohr.

Neben dem geschilderten Luftschall gibt es auch Körperschall. In Gebäuden und Wohnungen breitet er sich insbesondere über Wasserleitungen, Heizkörperrohre und das Mauer- bzw. Betonwerk aus. Besonders störend ist er, wenn z.B. ein Nachbar mit dem Schlaghammer (-bohrer) Löcher bohrt. Vielfach ist Körperschall nicht sehr laut. Er ist aber dennoch stark störend. Dies ergibt sich u.a. daraus, dass es für ihn keine hörbar lokalisierbare Schallquelle gibt. Außerdem kann er, wie bei Kompressoren usw., einen lang anhaltenden, tiefen Dauerton hervorrufen, der zuweilen noch durch Raumresonanzen verstärkt wird. Doch auch lautstarkes Fernsehen und Feiern von Nachbarn überträgt sich vor allem als Körperschall. Dann ist die Schalldämmung der Wand nicht ausreichend. Wegen seiner vorwiegend flächenhaften Abstrahlung ist Körperschall schwerer als Luftschall zu bekämpfen.

Wie kann Lärmschutz realisiert werden?

Dem Lärm kann man an den drei o.g. Orten entgegenwirken. Dadurch ergeben sich auch drei grundsätzlich unterschiedliche Maßnahmen, die im **Bild 1** zusammen- und gegenübergestellt sind. Bei Geräten und Einrichtungen, die als *störende Schallquelle* auftreten, ist es zunächst immer sinnvoll zu versuchen, ihre

¹ Diese Version wurde einigen Computer-Verlagen angeboten, aber nicht übernommen, deshalb steht sie hier zur freien Verfügung.

² Es gibt einige Hinweise darauf, dass dies auch von unserer Einstellung zum jeweiligen Schall als auch von der Dauer seiner Einwirkung ab. So sind z.B. Musiker und Dirigenten von Symphonieorchestern kurzfristig sehr hohen Lautstärken (über 130 dB(A)) ausgesetzt. Da hier der *kurzzeitig* hohe Schalldruck von ihnen aktiv und absichtlich produziert und bewusst (angenehm) erlebt wird, hat er nur relativ geringe schädigende Auswirkungen. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, dass unter diesen Musikern nur selten eine überdurchschnittliche hohe Schwerhörigkeit auftritt.

Schallentstehung und -abstrahlung zu reduzieren. Dies ist jedoch oft nur im sehr begrenzten Umfang möglich. Bei Lüftern kann man z.B. zwar alle Lagergeräusche usw. stark verringern, jedoch durch den geforderten Luftstrom muss immer rein funktionell ein gewisses Rauschen auftreten. Es ist besonders laut, wenn die Luft durch enge Öffnungen oder gar Röhren strömen muss. Hier kann es außerdem Resonanzen anregen. Auch eine Abschirmung nach Außen ist dabei nur teilweise möglich, denn eine Luftumwälzung, die nur im Gehäuse stattfindet, bringt nicht die notwendige Kühlung zustande. Durch Öffnungen muss kalte Luft ein- und warme Luft ausströmen. Durch jede dafür notwendige Öffnung dringt aber automatisch der interne Schall, der z.B. von Festplatten ausgeht, auch nach Draußen. Hierbei sind sogar kleine Öffnungen recht wirksam. Z.B. dringt durch das klassische Schlüsselloch einer Tür genauso viel Schall, wie er durch Anregung der Türfläche übertragen wird. Hier zeigt sich erneut der Widerspruch von Lüfterrauschen (möglichst großes Loch) und austretendem internen Schall (kein noch so kleines Loch). Da hilft es nur noch, eine möglichst wirksame Schallabsorption im Innern des Gehäuses zu schaffen. Für Frequenzen oberhalb von etwa 1000 Hz ist dies mit hochporigem Schallabsorbermaterial relativ leicht möglich. Doch für tiefere Frequenzen gibt es kaum brauchbare Lösungen. Hierzu müsste die Masse und das Volumen der Absorber weitaus größer sein. Daher strahlt ein Rechner in den tieferen Frequenzbereichen stets erheblichen Schall ab. Nebenbei sei nur erwähnt, dass sich auch hier bereits Lösungen zu aktiven Absorbieren (Fraunhofer Institut für Bauphysik) mit hohem Absorptionsgrad, jedoch noch nicht für Rechner, abzeichnen [1]. Ein Mikrofon nimmt den Störschall auf und steuert dazu gleichphasig eine große Membran an. Um 100 Hz wird dabei z.B. eine zusätzliche Dämpfung von ca. 20 dB erreicht.

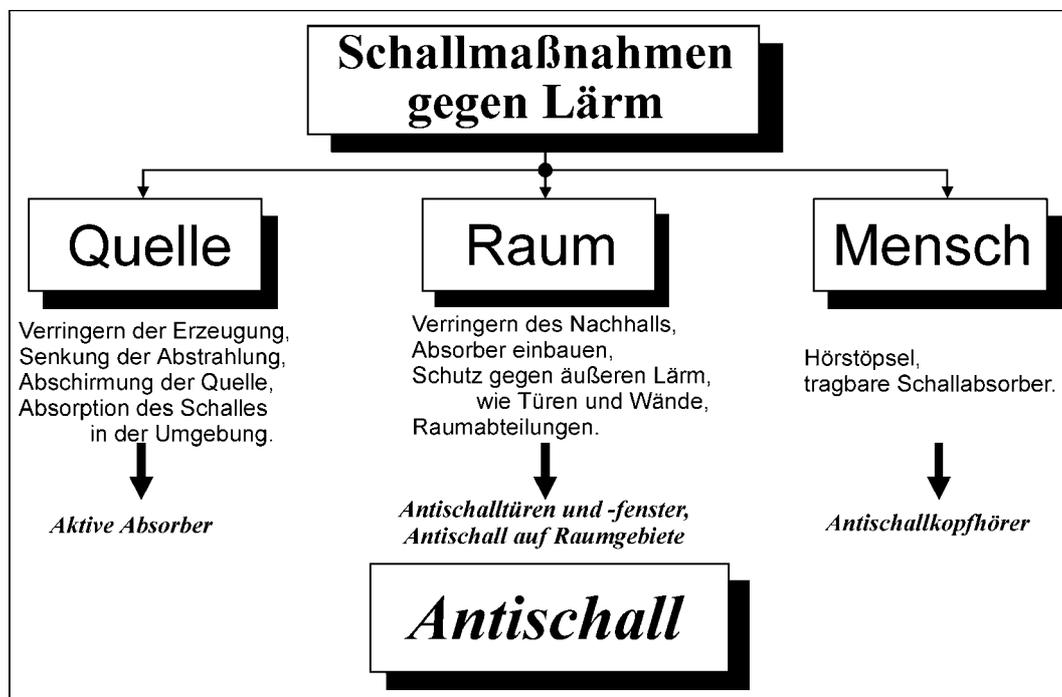


Bild 1. Maßnahmen zur Reduzierung von störendem Schall mit besonderer Berücksichtigung von aktivem Antischall.

Die zweite Maßnahme zur Senkung des Lärms betrifft den **Raum**. Hier ist insbesondere seine Nachhallzeit in Sekunden wichtig, in der ein im Raum kurzzeitig vorhandener Schall auf $1/1000$ -stel seiner Amplitude abklingt. Gleich intensiver Schall erscheint uns in Räumen mit langer Nachhallzeit immer deutlich lauter als in jenen mit kurzer. Die Nachhallzeit kann durch zusätzliche Absorber (Schallschluckstoffe), wie Teppiche, Vorhänge, Postermöbel usw., gesenkt werden. Doch auch sie wirken erst bei Frequenzen oberhalb von ca. 500 Hz. Für tiefe Frequenzen sind besonders große, massive und aufwändige Absorber erforderlich. Weiter müssen Reflexionen an größeren Flächen und damit Raumresonanzen vermieden werden. Sie entstehen hauptsächlich an parallel gegenüberstehenden schallharten Flächen, die Spiegeln beim Licht entsprechen³. Mit etwas Erfahrung lassen sich Nachhallzeit und stärkere Reflexionen grob durch einmaliges kurzes, aber lautes Händeklatschen abschätzen. In Wohnräumen sind akustische Veränderungen meist recht schwierig oder aus ästhetischen Gründen unerwünscht. Dennoch bestehen einige Möglichkeiten zum aktiven Schallschutz, insbesondere gegenüber von Außen kommendem Schall, z.B. mittels akustisch aktiver Fenster und Türen. So wirbt z.B. ein

³ Für Spiegel müssen die Unebenheiten kleiner als $\lambda/10$ sein. Daher wirken bei Schall von etwa 1 kHz Oberflächen mit cm-Unregelmäßigkeiten immer wie exakte Spiegel. Bei tieferen Frequenzen sind entsprechend größere Werte zulässig. Schallhart sind alle Materialien, die an der Oberfläche keine Poren, Lufteinschlüsse usw. besitzen und auch nicht wie z.B. dünne Platten mit dem Schall mitschwingen. Typisch schallhart sind z.B. dickeres Holz, massiver Kunststoff oder dickeres Metall.

Prager Hotel damit, dass es Türen mit aktiven Antischall eingebaut hat [1]. Ansonsten ist es möglich, kleine Bereiche zu schaffen, in denen der im Raum vorhandene, störende Schall kompensiert wird. Bei Luxusautos ist es so sogar möglich, Antischall für die einzelnen Sitzplätze zu realisieren [Lagö]. Diese Methode leitet unmittelbar zur dritten Variante über, bei der Antischall auf den einzelnen Hörer bezogen wird.

Der Mensch kann sich durch vielfältige Methoden gegenüber Lärm schützen. U.a. verhindern Ohrstöpsel und Ohrbügel den Zutritt des **Schalls zum Ohr**. Dann wird aber genauso vermindert jener Schall wahrgenommen, der nutzbringend ist oder gar dringend benötigt wird. Dies ist gewiss ein wichtiger Grund dafür, warum viel zu selten Gehörschutzmittel getragen werden. Daher wäre aktiver Schallschutz vorteilhaft, der nur gezielt den Störschall am Arbeitsort kompensiert. Doch die aufwendige und relativ große Variante mit Lautsprecher, speziell aufgestelltem Mikrofon und genau eingeregelter Verstärker ist gewiss keine besonders attraktive Lösung. Zumal sich hier der Mensch immer innerhalb des eng vorgegebenen, festen Raumabschnittes befinden muss. Doch mit Kopfhörern lässt sich getrennt **für jedes Ohr** eine übersichtliche Lösung realisieren, die zudem auch eine Bewegung im Raum ermöglicht. Doch damit eine wirklich tragbare Variante entsteht, sind u.a. mikroelektronische Schaltkreise, kleinste Mikrofone und stromsparender Batteriebetrieb notwendig. Dies ist aber erst in den letzten Jahrzehnten entstanden. Genau deshalb entstanden auch erst in den letzten Jahren technisch brauchbare Lösungen mit Antischallkopfhörern, z.B. zu mehreren Varianten von NoiseGard® durch Sennheiser. Auf sie wird unten kurz eingegangen.

Schaut man sich die **Geschichte** an, so ist diese späte technische Entwicklung geradezu unwahrscheinlich spät erreicht worden. Bereits LEONARDO DA VINCI (1452 - 1519) zeigte auf, wie sich Wasserwellen von zwei Kanälen im Zusammenfluss auslöschten. Um 1930 entwickelt COANDA Ideen zur einer aktiven Lärmbehebung, die er in der französischen Patentschrift Nr. 722 274 niederlegt und 1932 publiziert wurden [Lagö]. Als Anfang für den Antischall werden jedoch meist die davon unabhängigen Arbeiten von PAUL LUEG genannt. Sein erstes deutsches Patent stammt von 1932. Im USA-Patent von 1936 werden bereits drei typische Anwendungen zum aktiven Antilärm behandelt [Lueg]. Bei der Unterdrückung von Lärm in Röhren ist es sehr einfach, Mikrofon und Lautsprecher um $\lambda/2$ bezüglich der auszulöschenden Welle zu versetzen. Dann genügt die richtige Einstellung der Verstärkung. Als zweite Variante wird die eng lokale Schallauslöschung für einen ausgewählten Ort genannt. Dann folgen Vorschläge für geschützte „Zonen der Ruhe“. Leider sind jedoch die meisten Arbeiten von LUEG inzwischen verloren gegangen.

Aktiver Antischall bei Kopfhörern

Bezüglich der Schallübertragung zum Ohr sind zwei Hauptvarianten von Kopfhörern, nämlich der geschlossene und offene Typ, zu unterscheiden. Die Schallkapsel des offenen Kopfhörers liegt über einem lockeren Schaumstoff lose auf der Ohrmuschel (**Bild 2a**). Hierdurch gelangen die Schallschwingungen von der Kapsel und von der Umgebung nahezu gleich gut zum Gehörgang. Wir können mit diesem Typ beim (nicht zu lauten) Musikhören noch gut die Umweltgeräusche wahrnehmen und uns durchaus mit Mitmenschen unterhalten. Wie berichtet wird, ist diese Variante fast nebenbei durch Zufall gefunden worden. Beim geschlossenen Typ (Bild 2c) umschließt ein ziemlich schalldichter Schaumstoff vollständig die Ohrmuschel. Dadurch kann der Umweltschall nur stark abgeschwächt den Gehörgang erreichen. Wir hören praktisch nur noch den Schall vom Kopfhörer. Zwischen beiden Extremen gibt es den halboffenen Hörer, der den Umweltschall nur noch deutlich, aber auf keinen Fall vollständig reduziert.

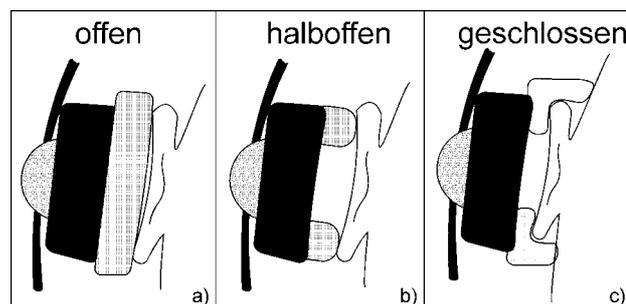


Bild 2. Die Hauptarten der Schallübertragung durch Kopfhörer.

Für die aktive Schallkompensation müssen diese Verhältnisse und Varianten berücksichtigt werden. Dazu sei vom allgemeinen **Bild 3a** ausgegangen. Der Direktschall gelangt mit der frequenzabhängigen Dämpfung $D_{\text{Direkt}}(f)$ des jeweiligen Kopfhörers zum Gehörgang. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass der Aktivschall des Kopfhörers ungedämpft und frequenzunabhängig zum Gehörgang vordringt. Damit der Direktschall unhörbar wird, muss dem Kopfhörer ein elektrisches Signal zugeführt werden, das die gleiche Schallamplitude, jedoch mit entgegengesetzter Phase als der Direktschall am Eingang des Gehörganges erzeugt. Das Signal hierfür muss aus dem Direktschall abgeleitet werden.

Für die weiteren Betrachtungen sind zunächst einige Aussagen über die Wellenlänge λ der Schallschwingungen erforderlich. Zur Vereinfachung sei angenommen, dass für den gesamten Bereich der interessierenden Schallausbreitung die Schallgeschwindigkeit von Luft mit $v \approx 340$ m/s gilt. (Für fast alle Schaumstoffe ist dies mit guter Näherung erfüllt). Aus der Schallfrequenz f berechnet sich dann die Wellenlänge gemäß $\lambda = v/f$. Sie beträgt bei 100 Hz ca. 3,4 m, bei 1 kHz etwa 34 cm und bei 10 kHz nur 3,4 cm. Diese Größen sind nun in Beziehung zur Differenz d zwischen den sich kompensierenden Schallwegen zu setzen. Bei tiefen Frequenzen sind kaum Probleme zu erwarten. Zur Vereinfachung der Rechnung sei angenommen, dass $d \ll \lambda$ gelte. Dann kann die unerwünschte Restamplitude A_R (im Vergleich zur Störampplitude) leicht näherungsweise mit der Additionsformel für Winkel unter dem Sinus bestimmt werden. Sie ergibt sich zu $A_R \approx 2 \cdot \pi \cdot d / \lambda$. Soll hierbei noch eine Dämpfung von 20 dB erreicht werden, so darf $A_R \approx 0,1$ betragen. Für die zulässige Differenzlänge gilt dann ungefähr $d \leq 0,017 \cdot \lambda$ bzw. $\lambda \geq 60 \cdot d$. Wird eine Wegdifferenz von nur $d = 5$ mm angenommen, so gehört dazu $\lambda \geq 30$ cm bzw. $f \leq 1$ kHz. Deshalb liegt für die aktive Schalldämpfung bereits rein theoretisch die obere Grenzfrequenz bei etwa 1 kHz. Höherfrequenter Schall ist aktiv kaum mit Kopfhörern zu kompensieren!

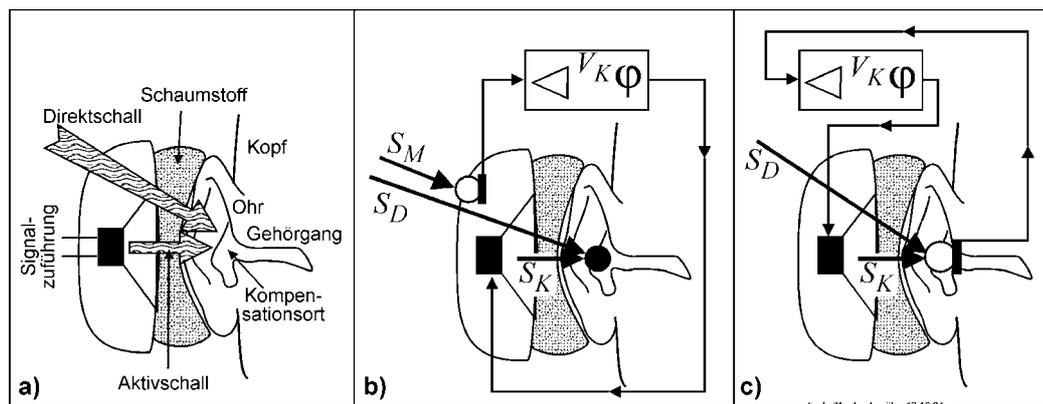


Bild 3. Zur Bestimmung der Betriebsarten und -eigenschaften für Antischall bei Kopfhörern.

Die Schallkompensation kann formal regelungstechnisch betrachtet werden. Die Regelung bzw. Steuerung soll bewirken, dass am Eingang des Gehörganges die Schallsumme zu Null wird. Das **Steuerungsprinzip** entspricht dem Schema von Bild 3b. Das Mikrofon nimmt den Störschall S_M auf. Dessen Signal gelangt über den Verstärker zum Kopfhörer. Beim Verstärker werden der Verstärkungsfaktor und die Phase so eingestellt, dass am Höreingang der Schall S_K vom Kopfhörer dem dort vorhandenen Schallanteil von S_D entgegengesetzt gleich groß ist. Bezüglich der Intensität muss die Dämpfung beider Schalle berücksichtigt werden. Die Phase wird durch die unterschiedlichen langen Wege Mikrofon \rightarrow Höreingang und Kopfhörermembran \rightarrow Höreingang bestimmt. Dadurch entsteht wiederum die mögliche obere Grenzfrequenz von rund 1 kHz. Einen halboffenen Kopfhörer nach diesem Prinzip zeigt **Bild 4**. Die Wirksamkeit der Steuerung lässt sich leicht am Ein- und Ausschalten der Elektronik erkennen – weißer Schalter neben grüner Anzeige-LED (weitere Details s.u.). Die richtige Funktion lässt sich dadurch stören, dass man den äußeren Schall abschirmt. Hierzu legt man z.B. die Hand über das Mikrofon. Infolge der so bewirkten Rückkopplung von S_M kann das System zu Eigenschwingungen in Form von Pfeifen (Phasenverschiebung über Laufzeit) angeregt werden.

Bild 4. Offener Kopfhörer mit Antischall nach dem Steuerungsprinzip (Sennheiser HDC 451). Der Pfeil zeigt zum Mikrofon, das sich nahe der Oberfläche der Hörerkapsel befindet. An der anderen Kapsel ist analog ein zweites Mikrofon vorhanden. Das rechteckige Gehäuse enthält bei diesem Hörer nur die Batterien.



Beim **Regelungsprinzip** wird das Mikrofon möglichst nahe an den Eingang des Gehörganges gelegt (Bild 3c). In der Praxis befindet es sich aber im Schaumstoff der Kopfhörer, also etwas entfernt vom Beginn des Gehörganges. Es nimmt dann gleichermaßen den Störschall S_D und den zur Kompensation einwirkenden Kopfhörerschall S_K auf. Der Verstärker muss nun in Phase und Amplitude so eingestellt werden, dass am Mikrofon möglichst kein Signal auftritt. Rein theoretisch sollte dieses Prinzip bis zu beliebig hohen Frequenzen funktionieren. Doch einmal funktioniert jede Regelung notwendigerweise immer nur mit einer gewissen Abweichung vom Sollwert (hier Summenschall = 0). Außerdem setzen die stets vorhandenen Frequenz- und Phasengänge des Mikrofons und Kopfhörers zusätzliche Grenzen. Praktisch ist daher keine wesentlich bessere

Schallminderung als mit dem Steuerungsprinzip zu erreichen. Schließlich ist bei beiden Methoden zu beachten, dass prinzipiell an der unteren und der oberen Grenzfrequenz Phasenverschiebungen vorhanden sind, die sich nachteilig und begrenzend auswirken. Aus den genannten Gründen sind daher insgesamt nur reichlich 20 dB zu erreichen. Einen besonders angenehmen zu tragenden, kleinen, gut transportablen, zusammenklappbaren Kopfhörer nach dem Regelungsprinzip zeigt **Bild 5**.

Es sei noch erwähnt, dass bei beiden und auch den folgenden Typen erwünschte Schallsignale, z.B. Musik eingeblendet werden kann. Diese Signale werden so eingeschleust, dass sie die Kompensation unterlaufen. Das erfordert insbesondere beim Regelungsprinzip einige Tricks. Denn schließlich muss hierbei die hohe Klangqualität der Hörer eingehalten werden.



Bild 5. Antischallkopfhörer nach dem Regelungsprinzip und dazugehöriges Gehäuse für Elektronik und Batterien. Der Hörer ist zusammengeklappt dargestellt.

Anderer Schallschutz und Kombinationen

Die üblichen Schallschuttmittel sind Schallstöpsel unterschiedlicher Art und Hörschutzbügel. Die Vielfalt der Schallstöpsel ist groß. Einen Überblick enthalten u.a. [2] und [3]. Infolge der schwierigen Schalldämmung bei tieferen Frequenzen sind sie überwiegend nur bei hohen Frequenzen wirksam. **Bild 6** gibt dazu einen Überblick. Die Darstellung wurde dabei bewusst abweichend von der üblichen Form gewählt. Da es hier um Schallschutz geht, muss eine bessere Dämpfung anschaulich durch einen höheren Wert (nach oben) gezeigt werden. Auf einen Nachteil solcher Schallschuttmittel ist bereits oben hingewiesen. Es kommen noch weitere hinzu, wie Jucken, Drücken, schlechter Tragekomfort usw. Doch hier ist zu betonen, dass ihre schlechte Wirksamkeit bei den tiefen Frequenzen hervorragend durch die aktive Schallkompensation ergänzt werden kann. Auf dieser Grundlage beruhen die beiden Systeme von **Bild 7**. Sie sind natürlich deutlich schwerer und haben geringeren Tragekomfort. Das gilt insbesondere für die hochschalldichte Variante von Bild 7b, die insbesondere in den Cockpits bei Flugzeugen zum Einsatz kommt, und daher auch mit einem speziellen Mikrophon gekoppelt ist. Das kann übrigens auch bei der leichteren Variante von Bild 7a angebracht werden. Wodurch sich dann dieser Hörer am Computer besonders bei Spracheingabe auszeichnet. Einen Vergleich der Wirksamkeit der vier abgebildeten aktiven Hörer zeigt noch Bild 8.

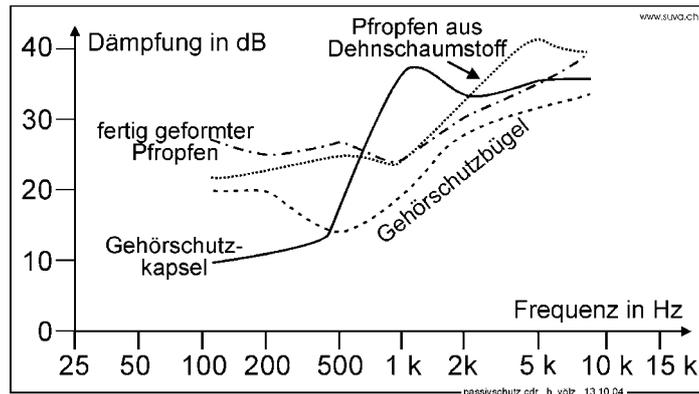


Bild 6. Schalldämpfungen von passivem Hörschutz, geändert nach [3].



Bild 7. Zwei aktive, geschlossene Kopfhörertypen mit zusätzlichem passiven Lärmschutz (Details im Text).

Einige Erfahrungen

Die subjektive Wirkung der einzelnen Kopfhörer ist erstaunlich hoch, jedoch zwischen den Typen recht unterschiedlich. Gemäß der Frequenzkurve von Bild 8a unterscheiden sich die beiden Typen von Bild 4 und 5 bezüglich ihrer Schallkompensation nur unwesentlich. Erheblich ist jedoch der Unterschied im subjektiv verschieden empfundenen Tragekomfort und in der Transportabilität. Beide Typen wurden vom Autor längere Zeit in Computerräumen, Fern- sowie Berliner S- und U-Bahnen und in verschiedenen Bussen erprobt. In jedem Fall wurde das Grundgeräusch subjektiv viel mehr abgesenkt, als aus der Kurve zu erwarten ist. Die erreichte Wirkung wird dann besonders deutlich bemerkt, wenn nach einiger Benutzungszeit, der aktive Hörschutz abgeschaltet wird. Erst dann merkt man, wie viel störender Umweltschall eigentlich immer vorhanden ist. Schließlich adaptieren wir uns ja an ihn. Das merkt man oft erst dann, wenn so ein Störschall plötzlich aufhört. Dann fragen wir uns, da war doch etwas? Dies bedeutet, unser Ohr wird ständig mit mehr Störschall belastet als uns eigentlich bewusst wird. Besonders angenehm wurden beide Hörer empfunden, wenn zusätzlich Musik eingeschleust wird. Die Musik kann beim Betrieb des aktiven Systems deutlich leiser gestellt werden und dennoch ist das Klangbild – wohl wegen fehlender Adaption – deutlich runder, ausgeglichener. Das gilt vor allem für den mitteltiefen Frequenzbereich. Da der Störschall weitgehend wegfällt, kann auch eine höhere Wiedergabedynamik genutzt werden. Ein Tragen des Hörers über mehrere Stunden bereitet dabei keine Probleme. Leider bleibt bei diesem Kopfhörer störendes und unerwünschte „Geschwätz“ anderer nahezu vollständig erhalten. Es wird z.T. wegen der fehlenden Allgemeingeräusche leider sogar verständlicher. Hier hilft nur eine Version nach Bild 7a oder b. Doch andererseits hat dieses Umwelthören auch Vorteile, wenn es sich dabei um notwendigen oder nützlichen Schall handelt. Dies ist der Grund dafür, dass ein Tragen dieser Hörer am Steuer im öffentlichen Straßenverkehr zulässig ist. Hierfür gibt es sogar die Unbedenklichkeitsbescheinigung des Deutschen Kraftfahrzeug-Überwachungsvereins (DEKRA) sowie die FAA-Zulassung der Luftfahrtbehörde. Da der Autor nicht selbst Auto fährt, kann er hierzu nur Aussagen aus Foren des Internets übernehmen. Insbesondere die Lastkraftwagenfahrer schwärmen geradezu von den Kopfhörern nach Bild 4 und 5. Sie hören die Motor- und Fahrgeräusche gerade noch im notwendigen Umfang und beschweren sich, über die z.T. langen Lieferzeiten der Geräte. Einige weisen darauf hin, dass ein wenig Gewöhnung notwendig sei. Sie glauben zunächst einen Druck auf den Ohren zu haben, der aber durch Gewöhnung schnell vergeht. Dies hängt offensichtlich mit dem Phänomen des schalltoten Raumes zusammen, in

dem man ja auch keinen reflektierten Schall empfängt. Der Autor konnte dies nur bei den beiden Hörern von Bild 7 nachvollziehen. Er ist aber an schalltote gewöhnt.

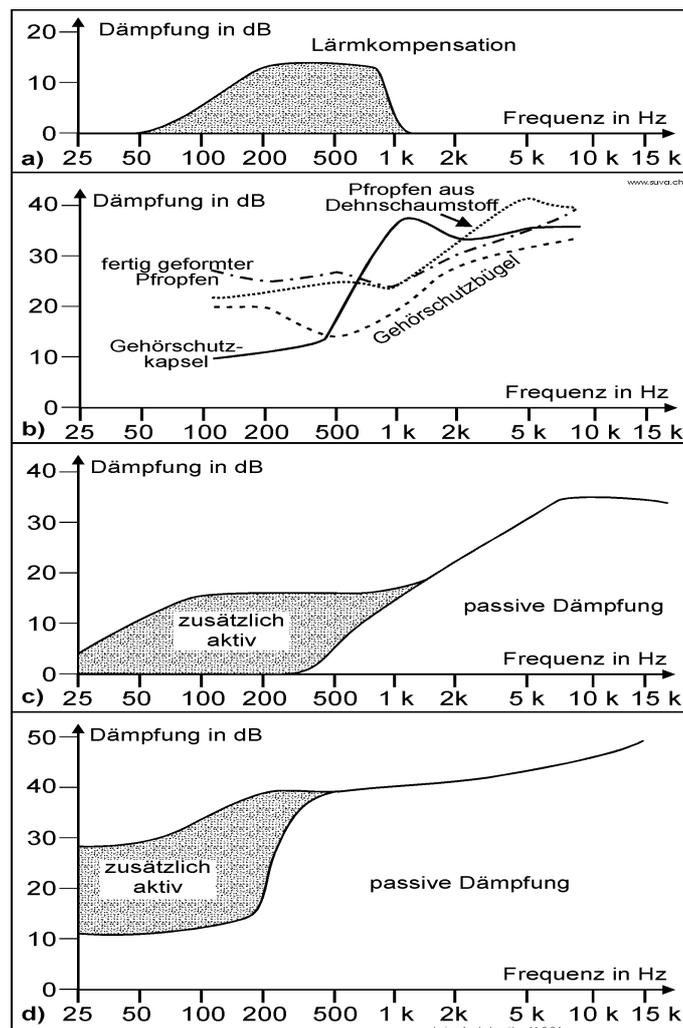


Bild 8. Schallminderung mit aktiven Kopfhörern. Die Kurve a) gilt für die Hörer von Bild 4 und 5; b) gilt für Bild 7a und c) für Bild 7b. Alle Kurven sind in gleichen Maßstab und in der gleichen geänderten Darstellung gemäß Bild 6 skaliert. Dadurch ist die vorteilhafte Kombination von aktivem und passivem Hörschutz deutlich zu erkennen (geändert nach [4]).

Literatur:

- [Lueg] LUEG, P.: Process of silencing sound oscillations. US Patent No. 2 043 416 von 1936
- [Lagö] LAGÖ, TH. L.: Industry overview of aktive control methods and applications, Vortrag Adaptronic Congress 23-24.4. 2002, (als PDF von Jonkoping University, Embedded Systems Lab herunter ladbar)
- [Matschke] MATSCHKE, R. G., u.a.: Schutz vor Lärmschwerhörigkeit durch aktive Schutzsysteme, Laryngo-Rhino-Otol. **70**(1991) 586 - 593
- [1] www.hotelcity.cz/dindex.htm (7.10.04)
- [2] www.hno-praxis-suederelbe.de/modernergerhoerschutz.htm (7.10.04)
- [3] www.suva.ch. PDF-Datei von der Suva (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt): „Der persönliche Gehörschutz“
- [4] „Sound of Silence“. Katalog der Fa. Sennheiser 2003/4.

Ergänzend seien genannt

- GUICKING, D.: Paul Lueg – der Erfinder der aktiven Lärmbekämpfung. *Acustica* 71 (1990) 64 - 68.
- VEIT, I.: Aktive Lärmkompensation mit akustisch offenen und geschlossenen Kopfhörern. *Fortschritte der Akustik DAGA '89 Bad Honnef* (1989) 643 - 646 (*nicht gelesen*)

MATSCHKE, R. G. u. PÖSSELT, CH.: Schallmessungen am Arbeitsplatz bei Piloten der Bundesmarine. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 34 (1987) 67 - 74

BIERMANN, J.-W. U. JANOWITZ, T: Lärminderung im Arbeitsschutz durch Antischall, ISBN 3-89429-920-7, 1995, 144 S., 76 Abb., 5 Tab. EUR 14,00, zu beziehen: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Postfach 101110; D-27 511 Bremerhaven (*nicht gelesen*)

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. (Bundesimmissionsschutzgesetz – BImSchG), Fassung vom 14. Mai 1990 (BGBl. 1990 I S. 880)

<http://www.geers.de/> (Arztüberblick)

<http://www.peltor.se/>; Firma: Peltor Alert (Lärmschutzmittel 7.10.04).

http://www.headwize.com/tech/anr_tech.htm (guter Überblicksartikel von Chu Moy; 7.10.04)

bzw. [/projects/noise_prj.htm](http://www.headwize.com/projects/noise_prj.htm)

<http://www.ibp.fhg.de/rata/de/aktiv1.html> (Über aktive Absorberwände 7.10.04)

Begriffe: Antischall, Aktive Lärmkompensation, Gehörschutz, Gehörschützer, Lärmschutz, NoiseGard®