



Destruktive Interferenz

Akustik-Serie Teil 11

Von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mithilfe von Antischall

Wenn man von Schallschutz spricht, meint man meist den Schutz vor „Lärm“, ein Begriff, der wiederum etwas zu tun hat mit dem Schutz vor lästigem oder im Extremfall sogar „ohrenbetäubendem Krach“, wie er früher oft in Verbindung gebracht wurde mit Kriegsgeschrei. Das Wort selbst hat nämlich seine Wurzeln im italienischen „all'arme“ (zu den Waffen, Alarm!). Gemäß unserer heute gängigen Definition wird Lärm als unerwünschter Schall (oder Geräusch) bezeichnet, der „Nachbarn oder Dritte stören, gefährden, erheblich benachteiligen oder erheblich belästigen kann“.

Schädlicher Lärm

Noch kurz vor seinem Tod im Jahre 1910 hat der bekannte Bakteriologe Robert Koch (1843–1910) prophezeit, dass der Mensch eines Tages den Lärm genauso „unerbittlich bekämpfen“ wird, wie einst die Cholera und die Pest. Wie wahr. Heutzutage gehört der Lärm, quasi als „hörbarer Müll“, zu den markantesten Abfallprodukten unserer modernen Industriegesellschaft. Lärm kann krank machen. Es gibt inzwischen den Begriff der Lärmerkrankung. Lärm kann zu Schlafstörungen, zu körperlicher Unruhe und Gereiztheit führen. Eine weitere Folge kann hoher Blutdruck sein, der langfristig zur Verengung der Herzkranzgefäße und schließlich zum Herzinfarkt führen kann.

Dieser Entwicklung musste auch der Gesetzgeber Rechnung tragen. Und so begannen die zuständigen Stellen bereits vor Jahrzehnten mit der Erarbeitung und Schaffung von gesetzlichen Regelungen und Richtlinien für einen ausreichenden persönlichen

Schallschutz, z. B. die VDI-Richtlinie 2560 (Persönlicher Schallschutz). Ferner entstanden die für die Bundesrepublik Deutschland maßgebende Unfallverhütungsvorschrift „Lärm“ sowie die entsprechende EG-Richtlinie 2003/10/EG „Lärm“, die am 6. März 2007 auch in nationales Recht umgesetzt wurde.

Für den Lärmschutz am Arbeitsplatz gibt es gemäß dieser Richtlinie zwei Grenzwerte, bei deren Überschreitung bestimmte Maßnahmen einzuleiten sind. Es handelt sich dabei um sogenannte Auslösewerte und Expositionsgrenzwerte. Einzelheiten dazu findet man in der genannten EG-Richtlinie.

Zwei wichtige Grenzwerte zum Schutz der Gesundheit von Arbeitnehmern vor einer Gefährdung durch Lärm sind Expositionspiegel $L_p A_{Ex}$, 8 h mit Werten von 80 dB(A) und von 85 dB(A). Die Angabe 8 h im Index bedeutet, dass der vor Ort gemessene Schalldruckpegel L_p über einen achtstündigen Arbeitstag gemittelt wurde.

Zu den Zahlenwerten selbst: Erreicht oder überschreitet der Expositionspiegel einen Wert von 80 dB(A), so liegt bereits ein „Lärmbereich“ vor und der Arbeitgeber ist verpflichtet, Mittel für den persönlichen Schallschutz anzubieten. Erreicht oder überschreitet dieser Pegel einen Wert



Zur Information:

In leicht verständlicher Form vermitteln wir eine **Einführung in die Arbeitsgebiete der technischen Akustik – einschließlich Schwingungstechnik – und der Elektroakustik.**

Themengebiete:

- Akustische Grundbegriffe – Schallfeldgrößen, Pegel, Resonatoren (ELVjournal 2/2019)
- Schallausbreitung – Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption (ELVjournal 3/2019)
- Elektromechanische Analogien – Analogie erster und zweiter Art, Ersatzschaltbilder (ELVjournal 4/2019)
- Elektroakustische Wandler – Wandlerprinzipien und ihre Gesetze (ELVjournal 5/2019)
- Mikrofone – vom Studiomikrofon bis zum Subminiaturmikrofon (ELVjournal 6/2019)
- Kopfhörer – elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer (ELVjournal 1/2020)
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox (ELVjournal 2/2020)
- Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler (ELVjournal 4/2020)
- Raum- und Bauakustik – Sabine'sches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche (ELVjournal 4/2020)
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie (ELVjournal 5/2020)
- **Persönlicher Schallschutz – von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mittels „Antischall“**
- Akustische Messräume – reflexionsarme Räume, Messboxen und Hallräume
- Körperschall und Vibrationen – Accelerometer und Ladungsverstärker
- Wasserschall – Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks
- Ultraschall und Infraschall – natürliche und industrielle Quellen

Theoretische Zusammenhänge werden nur so weit vertieft, wie es für das Verständnis des Stoffs notwendig ist. Auf mathematische Ausdrücke (Gleichungen, Formeln) wird im Text so weit wie möglich verzichtet. Anschauliche Illustrationen unterstützen diese Beiträge. Autor dieser Serie ist Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit.

von 85 dB(A), so handelt es sich dort um einen kennzeichnungspflichtigen Lärmereich. In diesem Fall muss der betreffende Arbeitsplatz mit einem Gebotsschild „Gehörschutz benutzen“ gekennzeichnet werden (Bild 1) und der Gehörschutz muss auch getragen werden, es besteht Tragepflicht.



Bild 1: Gebotsschild zur Gehörschutz-Tragepflicht in Lärmereichen

Persönlicher Schallschutz – passive Mittel

Zu den passiven Mitteln für den persönlichen Schallschutz gehören alle die Mittel, die das Gehör vor Lärm schützen ohne Zuhilfenahme elektronischer Mittel. Das sind im Wesentlichen:

- Gehörschutzstöpsel (dazu gehören auch spezielle Otoplastiken)
- Kapselgehörschützer, auch solche mit Helmbefestigung (siehe Bild 2 und 4)
- Gehörschutzhelme (Bild 4 unten rechts)
- Schallschutzanzüge

Die Anforderungen an beziehungsweise Vorschriften für passive Gehörschutzmittel findet man sehr ausführlich dokumentiert in der Europäischen Norm EN 352, Teil 1–4:

- Teil 1 – Kapselgehörschützer
- Teil 2 – Gehörschutzstöpsel
- Teil 3 – Kapselgehörschützer mit Helmbefestigung
- Teil 4 – Elektroakustische Systeme

Gehörschutzstöpsel und Kapselgehörschützer gibt es heute in sehr unterschiedlichen Formen und auch in sehr ansprechenden Ausführungen von einer Vielzahl von Herstellern. Stöpsel gibt es in individuell angepasster Form, sie sind aber auch als Einweg-Schallschutzmittel aus weichem Schaumstoff mit einer mittleren Schalldämmung von bis zu 30 dB (SNR) und mehr erhältlich. Die in den Herstellerangaben zu findende Bezeichnung SNR bedeutet Single Number Rating oder ganz einfach Dämmwert.

Ohrstöpsel können ihre volle Dämmwirkung allerdings nur dann erreichen, wenn sie korrekt in den Gehörgang eingesetzt sind. Dazu werden Schaumstoffstöpsel vor dem Einsetzen zwischen Daumen und Zeige-/Mittelfinger so zusammengedrückt (siehe Bild 3), dass sie sich danach langsam wieder ausdehnen und sich so der Kontur des äußeren Gehörgangs optimal und akustisch dicht anschmiegen.



Bild 2: Beispiele für Gehörschutzstöpsel und deren Einsatz im äußeren Gehörgang. Die beiden Ausführungen auf der linken Bildseite (oben und unten) bestehen aus ganz bestimmtem Schaumstoff, den man in zusammengedrückter Form in den Gehörgang einführt, wo er sich nach kurzer Zeit wieder ausdehnt und sich so der Kontur des Gehörganges optimal anpasst.

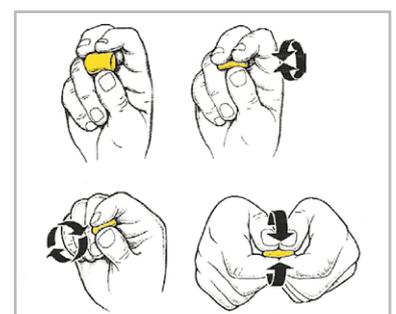


Bild 3: Vorbereitungen zum richtigen Einsetzen eines Schaumstoff-Gehörschutzstöpsels in den äußeren Gehörgang.



Bild 4: Passive Mittel für den persönlichen Schallschutz
 Oben: Kapselgehörschützer – allein und mit Helmbefestigung;
 daneben: Schallschutzhelm
 Unten: Verschiedene Ausführungen von Kapselgehörschützern,
 getragen am Kopf (Zeichnungen: Ivar Veit)

Die Zeichnung im Bild 4 oben rechts zeigt einen Schallschutzhelm. Auch dafür gibt es wichtige Einsatzfälle, nämlich in extrem lauter Umgebung. Wir wissen, dass an unserer Hörwahrnehmung neben dem Luftschall auch die Knochenschalleitung ihren Anteil hat. Je nach Frequenzbereich kann der Abstand zwischen der Wahrnehmung auf dem Luftschallwege und dem Wege über die Knochenschalleitung ungefähr 40 dB betragen. Nehmen wir in unserer Umgebung einen Schalldruckpegel von beispielsweise 130 dB an, so lässt der in unserem Ohr eine Hörwahrnehmung entstehen, die einem Luftschallpegel von $130 - 40 = 90$ dB entspricht. erinnert man sich an den weiter oben genannten Wert von 85 dB, der im Mittel

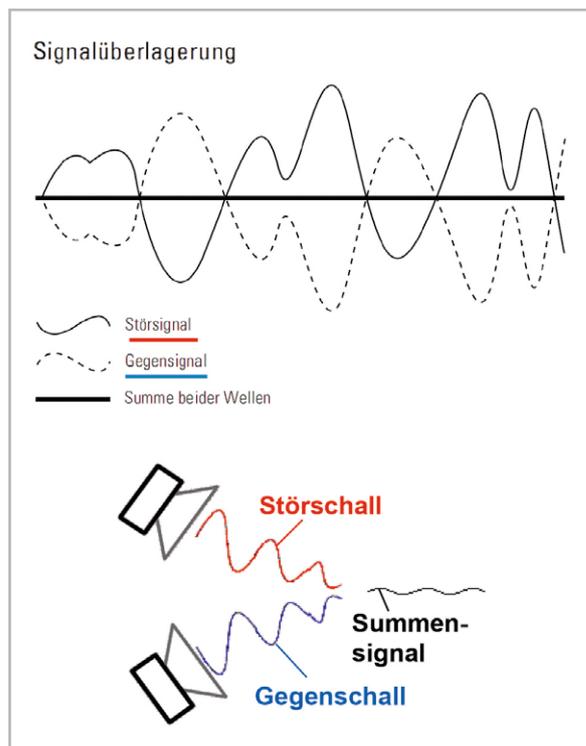


Bild 5: Grundprinzip des aktiven Schallschutzes durch Gegenschall oder Antischall: Die Überlagerung von zwei Schwingungen gleicher Frequenz, gleich großer Amplitude, aber entgegengesetzter Phase führt resultierend zu einer gegenseitigen Auslöschung (= destruktive Interferenz).

während eines achtstündigen Arbeitstages nicht überschritten werden darf, so wäre in so einem Falle das Tragen eines Schallschutzhelmes angezeigt. Der Helm wirkt der Aufnahme und Einleitung von Knochenschall in den Schädelknochen entgegen.

Der gleiche Funktionsmechanismus spielt auch beim Vergleich der Dämmwirkung von a) Gehörschutzstöpseln mit b) Kapselgehörschützern eine prinzipielle Rolle. Vergleicht man nämlich Stöpsel mit Kapseln, deren Wirkung, gemessen an einem objektiven Messplatz, die gleiche ist, so ist die vom Ohr wahrgenommene Dämmwirkung im Allgemeinen nicht die gleiche. Kapselgehörschützer verringern nämlich infolge ihrer größeren Auflagefläche, mit der sie die Kopfoberfläche bedecken, die Aufnahme von Knochenschall und ergeben somit eine größere Dämmwirkung für das Ohr.

Auch akustisch geschlossene Kopf„hörer“ haben hinsichtlich des Schallschutzes eine ähnliche Wirkung wie Kapselgehörschützer. Sie umschließen mit ihrem festen Gehäuse und dem daran befestigten Ohrpolster das gesamte Ohr und sie erzielen auf diese Weise eine spürbare Schalldämmung. Nur bei sehr tiefen Frequenzen hat ihre Dämmwirkung, genauso wie bei den Kapselgehörschützern, eine prinzipielle Grenze, was physikalische Gründe hat. Da halfen auch die eine zeitlang verwendeten, flüssigkeitsgefüllten Ohrpolster prinzipiell nicht weiter. Eine echte Abhilfe brachte die Entwicklung und Schaffung persönlicher Gehörschützer,

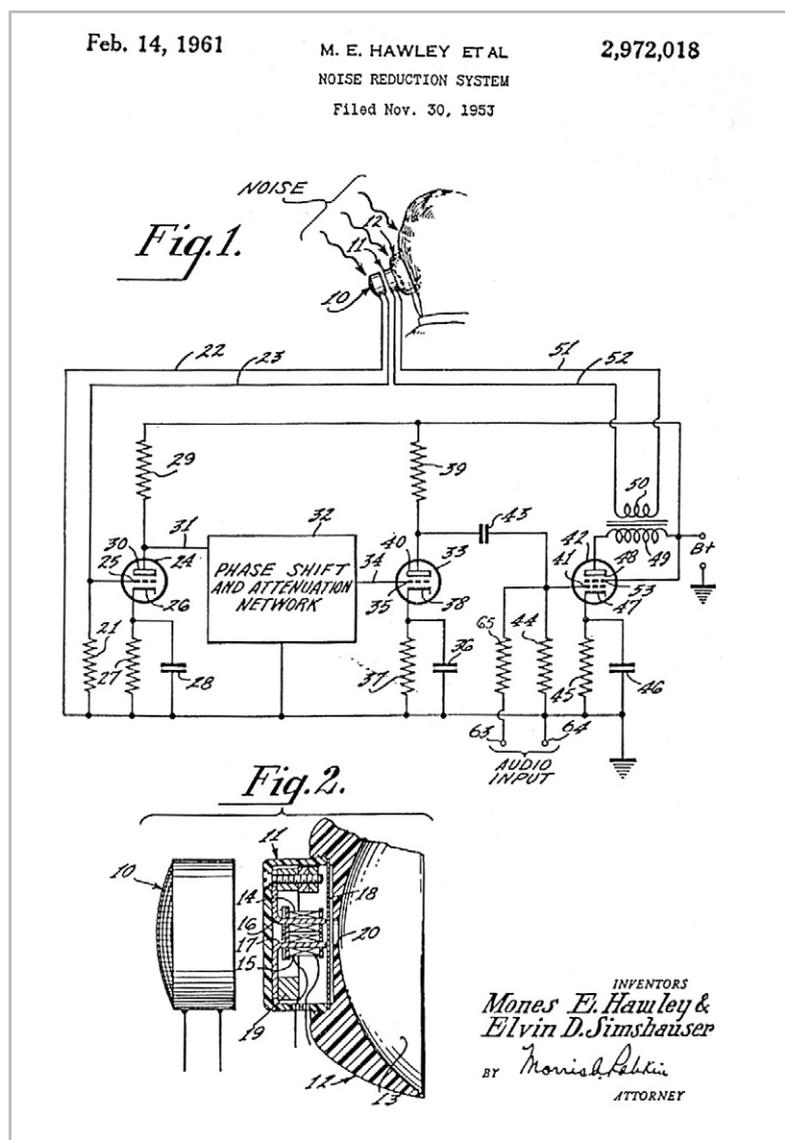


Bild 6: Patentierte Verfahren zur aktiven Geräuschkompensation (noise compensation system) aus dem Jahre 1961 mittels Antischall, angemeldet von Mones E. Hawley et al. Der im Patent gezeigte Vorschlag verwendet noch Elektronenröhren und einen elektromagnetischen Kopfhörer. Auch das Mikrofon (10) zur Aufnahme des zu kompensierenden Geräusches ist dort noch sehr groß und unförmig im Vergleich zu den heute verfügbaren Miniatur-Elektretmikrofonen.



die mit einer aktiven, elektronisch arbeitenden Schalldämmung mittels Antischall ausgestattet waren. Mehr darüber im folgenden Abschnitt.

Die Dämmwirkung von Mitteln für den persönlichen Schallschutz ist generell frequenzabhängig. Bei hohen Frequenzen ist sie relativ hoch, sie kann dort Werte von 40 dB und mehr erreichen. Zu tiefen Frequenzen hin lässt die Wirkung nach, und sie kann auf Werte von 20 dB und weniger absinken.

Zum Abschluss des ersten Teils dieses Beitrags noch ein Hinweis auf die Herkunft des weiter oben genannten Expositionspegels $L_{pAEx, 8h}$ mit einem Wert von 85 dB(A) für einen achtstündigen Arbeitstag. Dieser Wert hat damit zu tun, dass unser Gehör nach einer längeren Beschallung, z. B. während eines achtstündigen Arbeitstages, mit höheren Pegeln (> 90 dB) eine zeitlich begrenzte Anhebung seiner Hörschwelle zeigt. Diese Anhebung kann 10–12 dB und mehr betragen. Praktisch entspricht das zunächst einer vorübergehenden Hörminderung, die nach einer bestimmten Erholungszeit wieder verschwindet. Diese Hörschwellenanhebung wird auch als TTS (Temporary Threshold Shift) bezeichnet. Reicht die anschließende Erholungszeit bis zur nächsten Intensivbeschallung, z. B. bis zum Beginn der nächsten Arbeitsschicht, aus, damit sich das Hörvermögen wieder normalisiert, droht dem Gehör kein Schaden. Reicht die Erholungszeit nicht aus, so kann nach einer sehr langen, sich immer wiederholenden Intensivbeschallung eine bleibende Hörschwellenverschiebung (auch PTS, Permanent Threshold Shift) einstellen. In diesem Falle behält das Gehör eine bleibende Schädigung. Aus Untersuchungen dieser Art hat man den oben genannten Expositionspegel mit einem Wert von 85 dB(A) ermittelt.

Persönlicher Schallschutz – aktive Mittel, Antischall

Der erste Vorschlag zur Umsetzung des aus der Physik bekannten Interferenzeffekts zur Lärminderung mit elektronisch generiertem Gegenschall (Antischall, siehe Bild 5) geht auf Paul Lueg zurück, der dieses Verfahren bereits im Jahre 1933 zum Patent anmeldete und 1937 als Patent erteilt bekam. Einer der ersten, der dieses Prinzip praktisch umsetzte, war Bruno Retlau, ein Freund und Nachbar von Conrad Zuse, dem Entwickler des ersten Computers. Retlau schuf seinen sogenannten Tonneutralisator. Damit sendete er Bierkutschern der in seiner Nachbarschaft befindlichen Schultheiß-Brauerei geeignet aufbereiteten Antischall entgegen und erreichte damit tatsächlich eine Geräuschminderung [1].

Dennoch war die Zeit zur Umsetzung der luegschen Idee in Hardware damals technologisch noch nicht reif. 24 Jahre später, d. h. im Jahre 1961, meldeten Mones E. Hawley und Elvin D. Simshauser ihr Verfahren als US-Patent an, das im Prinzip ebenfalls auf der Anwendung von Antischall basierte, aber im Unterschied zum Lueg-Patent bereits einen konkreten Vorschlag zur Umsetzung in Hardware enthielt, wenn auch noch mit Elektronenröhren, aber schon mit

- „Eine Hör-/Sprechgarnitur mit aktiver Lärmkompensation“, Z. f. Lärmbekämpfung (1988), S.24
- „Gehörschutz-Kopfhörer – Elektronik kontra Lärm“, Funkschau (1988), S. 50
- „A lightweight headset with an active noise compensation“, Inter-Noise'88, Avignon 1988, Proceedings, Volume 2, p. 1087
- „Elektronische Lärmkompensation zur Verbesserung des Sprachverständnisses bei Luftfahrzeugführern“, Laryng. Rhinol. Otol, (1989), S. 101, (Co-Autoren: R.G.Matschke, et al.)
- „Aktive Lärmkompensation mit akustisch offenen und geschlossenen Kopfhörern“, DAGA 1989, Fortschritte der Akustik, DPG-GmbH, S. 643, Duisburg
- „Headphone systems with active noise compensation“, 8. Symposium of Environmental Acoustics 1989, Zaragoza, Proceedings, C.4.1., p. 111
- „Headsets with active noise compensation for sound engineers and cameramen“, 86-th AES-Convention, Hamburg 1989, Preprint Nr. 2809 (J-4)
- „Hör-/Sprechgarnitur für die Telekommunikation mit aktiver Lärmkompensation“, 2. Übertragungstechnisches Symposium, Steinfurt 1990, Tagungsband, S. 49, TELEKOM
- „Schutz vor Lärmschwerhörigkeit durch aktive Gehörschutzsysteme“, Laryng. Rhinol. Otol, (1991), S.586, (Co-Autoren: R.G.Matschke, et al.)
- „In-Situ Messung der Wirkung eines aktiven Lärmkompensationssystems für den Einsatz in Flugzeugen“, DAGA 1991, Fortschritte der Akustik, Teil B, S. 841 (Co-Autoren: R.G.Matschke, et al.)
- „Welchen Schutz vor Lärm bieten aktive Kompensationssysteme“, Wehrmedizin. Monatsschrift, (1992), Nr. S.284 (Co-Autoren: R.G.Matschke et al.)

Bild 7: Veröffentlichungen über „aktive Lärmkompensation mittels Antischall“, ab 1988, von Ivar Veit, dem Autor dieses Beitrags

einem Kopfhörer (Bild 6). Erst nach einem weiteren Vierteljahrhundert kam der eigentliche Durchbruch; siehe dazu auch die Arbeiten des Autors dieser Akustik-Beitragsreihe Ivar Veit (Bild 7). Die Technik war inzwischen so weit fortgeschritten, dass sehr kleine Bauelemente zur Verfügung standen, z. B. Transistoren, integrierte Schaltkreise, ferner sehr kleine und hochwertige Schallwandler, z. B. Elektretmikrofone und hochwertige elektrodynamische Kopfhörer. Damit konnten endlich elektronisch arbeitende Mittel für den aktiven persönlichen Schallschutz industriell realisiert werden. Es war damit möglich, einen sehr effektiven persönlichen Schallschutz auch im tieffrequenten Bereich zu realisieren, herunter bis zu 20–30 Hz.

Die physikalischen Grundlagen für den aktiven Schallschutz mittels Antischall bildet der Interferenzeffekt. Die Funktion dieses Effekts ist im Bild 8 noch einmal sehr anschaulich dargestellt. Diesen Effekt kann man auch optisch sehr gut demonstrieren an einer zuvor glatten Wasseroberfläche, auf der das Wasser an zwei nicht allzu weit voneinander entfernten Orten zur gleichzeitigen Aussendung konzentrischer Wellen angeregt wird, siehe dazu auch die rechte Darstellung im Bild 8.

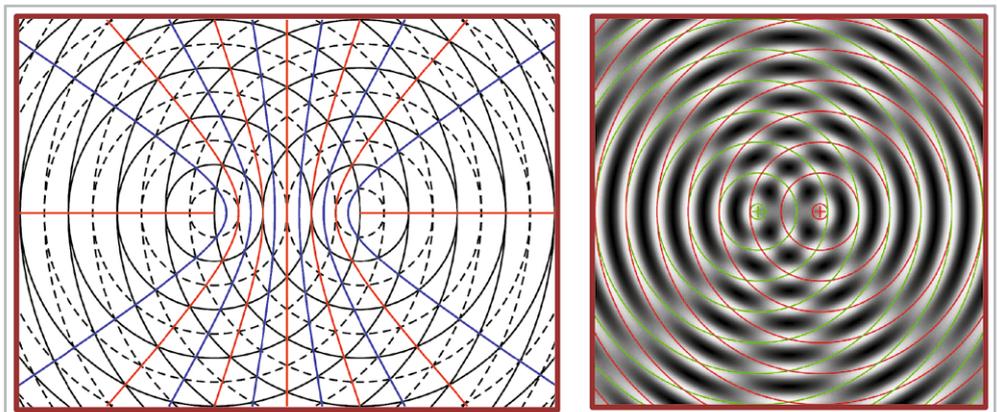


Bild 8: Links: Interferenz von zwei konzentrischen Wellengruppen gleicher Wellenlänge und Amplitude. Die durchgezogenen Kreise stellen die Maxima der jeweiligen Wellenzüge dar, während die unterbrochenen Kreise die Minima der dazugehörigen Wellenzüge darstellen. Bei der Überlagerung beider Wellenzüge kommt es durch Interferenz zu lokalen Abschwächungen oder sogar Auslöschungen (destruktive Interferenz) und zu lokalen Verstärkungen (konstruktive Interferenz) der beiden Wellenzüge. Die dabei entstehenden Minima und Maxima liegen alle auf einer Hyperbelschar, deren Brennpunkte identisch sind mit den Quellenorten der Wellen. Beim aktiven Schallschutz nutzt man die destruktive Interferenz aus. Blaue Kurven: Wellenminima infolge destruktiver Interferenz, rote Kurven: Wellenmaxima infolge konstruktiver Interferenz. Rechts: Hier sind die Quellenorte durch zwei Kreuze, ein grünes und ein rotes, kenntlich gemacht. An den jeweils grauen Stellen herrscht destruktive Interferenz, im Extremfall Auslöschung.

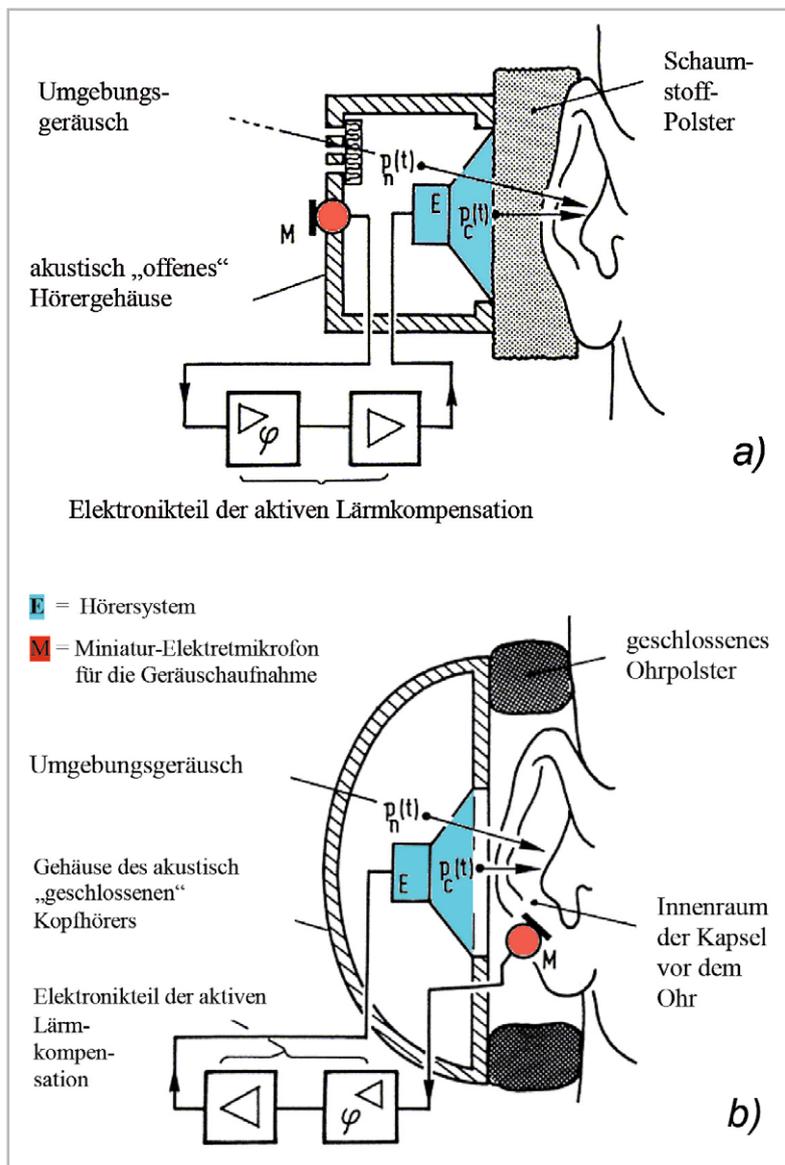


Bild 9: Kopfhörerkapseln (im Schnitt) a) akustisch offen und b) akustisch geschlossen, beide ausgestattet mit einem Hörsystem E, einem Miniatur-Elektretmikrofon M für die Aufnahme von störenden Umgebungsgeräuschen sowie der dazugehörigen Elektronik (Verstärker, Phasenumkehr). Die Überlagerung der beiden Schalldruckpegel $p_n(t)$ und $p_c(t)$ führt infolge ihrer Gegenphasigkeit zu einer deutlichen Verringerung des störenden Umgebungsgeräuschs vor dem Gehörgang.

Auf diesem Effekt basiert auch die Geräuschminderung mittels Antischall, egal ob es sich um eine einzige periodische Schwingung oder um ein breitbandiges Geräusch handelt. Den prinzipiellen Aufbau einer der ersten praktischen Ausführungen von akustisch offenen und akustisch geschlossenen Kopfhörern mit aktiver Geräuschkompensation zeigt das Bild 9. In beiden Varianten wird der von außen ankommende und mit einem sehr kleinen Elektret-Mikrofon M aufgenommene Stör Schalldruck $p_n(t)$ verstärkt und mit gleich großer Amplitude, aber entgegengesetzter Phase als Schalldruck $p_c(t)$ vom Hörsystem E vor dem Gehörgang abgestrahlt, wo es infolge Überlagerung beider, wenn schon nicht zu einer völligen Auslöschung, so doch zu einer sehr starken Reduzierung des noch verbleibenden Rest-Störgeräuschs kommt. Selbst bei sehr tiefen Frequenzen kann das zu einer Pegelminderung um bis zu 20 dB und mehr führen.

Akustisch offene Kopfhörer haben den Vorteil, dass ihre Träger sich nicht ganz von ihrer Umwelt isoliert und abgeschlossen fühlen. Beim Überqueren einer verkehrsreichen Straße hören sie herannahende Fahrzeuge besser und fühlen sich so sicherer. Bei diesem Kopfhörertyp ist der passive Schallschutz allerdings geringer als beim geschlossenen Hörertyp. Für den aktiven Schallschutz bedeutet das, dass das geräuschaufnehmende

Mikrofon M den Stör schall nicht unmittelbar vor dem Gehörgang aufnehmen kann, sondern, dass das außen vor dem Hörergehäuse geschieht (Bild 9a).

Einen besonders guten passiven Schallschutz bieten geschlossene Hörerkapseln (Bild 9b). Im Bereich der mittleren und hohen Frequenzen erreicht man als Folge der geschlossenen Kapsel allein schon eine sehr hohe passive Schalldämmung, während der elektronisch generierte Gegenschall die Dämmwirkung zu den tieferen Frequenzen hin merklich erweitert. Durch das Zusammenspiel von aktiver und passiver Schalldämmung bekommt man eine relativ ausgeglichene Schalldämmung über den gesamten Hör-Frequenzbereich. Wie bereits erwähnt, besitzen geschlossene Hörschutzkapseln allein durch ihre Konstruktion eine gute passive Schalldämmung für hohe und mittlere Frequenzen. Der aktive Dämmungsteil mittels Antischall übernimmt den Bereich der tiefen Frequenzen.

Einer der ersten praktischen Einsätze von lärmkompensierten Kopfhörern bzw. Hör-/Sprechgarnituren erfolgte bei Piloten der zivilen Luftfahrt, siehe (Bild 10). Fluglärm kennt man meist nur als lästiges und, je nach Wohngebiet, oft schwer erträgliches Geräusch draußen, aber nicht innerhalb eines Flugzeugs oder gar im Cockpit. Die Lärmeinwirkung auf Cockpitbesetzungen war vor Jahren noch beachtlich. Sei es durch Triebwerksgeräusche, Fluggeräusche und nicht zuletzt auch zusätzlich noch durch den Sprechfunkverkehr, insbesondere während der Start- und Landephase. Um eine ausreichende Verständlichkeit des Sprechfunks zu gewährleisten, muss der Sprachschallpegel mindestens 10 dB über dem Geräuschpegel innerhalb des Cockpits liegen. Die herkömmlichen Hör-/Sprechgarnituren boten keinen genügenden Schutz vor dem gesamten Geräuschaufkommen innerhalb des Cockpits, insbesondere im tieffrequenten Bereich. Die aktive Lärmkompensation darf allerdings die Übertragung von gewünschten Signalen, d. h. vom Sprechfunk, nicht beeinträchtigen. Zu diesem Zweck wird das Sprechfunksignal ebenfalls der Elektronik zugeführt (Bild 11), wo es vom gegenphasigen Kompensationssignal getrennt wird. Der Sprechfunk mit dem jeweiligen Tower darf auf keinen Fall mitkompensiert werden. Bild 12 zeigt eine moderne Ausführung eines Piloten-Headsets mit aktiver Geräuschkompensation. Mit Antischall geräuschkompensierte Kopfhörer bzw.



Bild 10: Praktische Ausführung einer Hör-/Sprechgarnitur mit aktiver Geräuschkompensation im Cockpit-Einsatz (Typ HME 45 aus der Anfangszeit dieser Technik). Es handelt sich hier um eine akustisch offene Kopfhörerkapsel, an der man deutlich das Mikrofon zur Geräuschaufnahme erkennt. (Foto: Sennheiser electronic)

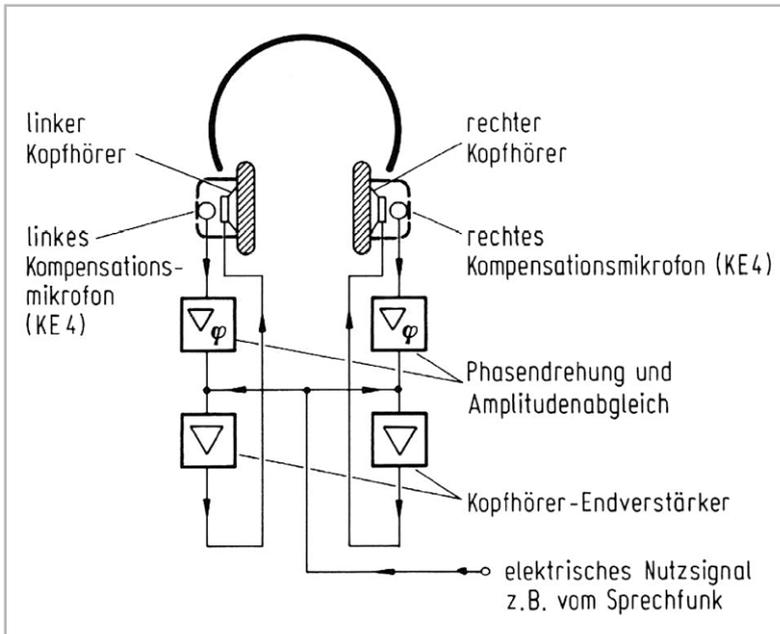


Bild 11: Blockschaltbild der aktiven Lärmkompensation im Zusammenwirken mit einem beidseitig offenen Kopfhörer. Die von den beiden Kompensationsmikrofonen aufgenommenen Störgeräusche werden über einen eigenen Phasen- und Amplitudenabgleich schließlich verstärkt dem seitengerichteten Hörsystem zugeführt. Das über die beiden Hörerkapseln ebenfalls übertragene Sprechfunksignal muss aber von der Lärmkompensation unbeeinträchtigt mit unverminderter Lautstärke hörbar bleiben. Dazu wird das elektrische Nutzsignal vom Sprechfunk der Elektronik zugeführt, wo es vom gegenphasigen Kompensationssignal getrennt wird.

Hör-/Sprechgarnituren gibt es nicht nur für Piloten, sondern auch für andere sehr laute oder als solche ausgewiesene Lärmbereiche.

Die in der Anfangszeit entwickelten und geschaffenen Mittel für den lärmkompensierten Schallschutz mit Antischall arbeiteten zunächst noch mit Mitteln der analogen Elektronik. Inzwischen ist die diesbezügliche Elektronik digitalisiert. Dafür gibt es spezielle ANC-Prozessoren (ANC = Anti Noise Control) (Bild 13). Das von außen kommende Störgeräusch, vor dem das Ohr geschützt werden soll, wird dabei zunächst von einem Referenz- oder Bezugsmikrofon RM aufgenommen und als elektrisches Signal einem digitalen Signalprozessor ANC zugeführt. Dort wird es digitalisiert, adaptiv analysiert, verstärkt und anschließend einem als Gegenschallquelle arbeitenden Kopfhörersystem zugeführt. Ein zweites, im Kapselinneren befindliches „Error“- oder Fehlermikrofon EM nimmt den dort noch anzutreffenden Geräuschrest auf. Das von diesem Mikrofon abgegebene elektrische Signal wird ebenfalls dem Signalprozessor zugeführt, von wo aus es das bereits in den Hörer eingeleitete Signal nachkorrigiert. Auf diese Weise erreicht man eine optimale, aktive Kompensation des Störgeräusches. Eine Geräuschkompensation von bis zu 30 oder gar 40 dB, auch im Bereich tiefer Frequenzen, ist so erreichbar.

Ausblick

Der nächste Beitrag befasst sich mit akustischen Messräumen. Das sind im Wesentlichen reflexionsfrei ausgekleidete Messräume und Messboxen sowie Hallräume. In reflexionsarmen Messräumen, die in der Umgangssprache häufig auch als „schalltote“ Räume bezeichnet werden, können akustische Messungen durchgeführt werden, wie das sonst nur im Freien, d. h. ohne schallreflektierende Begrenzungen, möglich ist. Dazu gehört z. B. die messtechnische Bestimmung der Übertragungseigenschaften von Schallwandlern (Mikrofone, Lautsprecher), einschließlich deren Richtcharakteristiken. Des Weiteren verwendet man reflexionsarme Räume zur Prüfung von Gehör und Sprache, zur Messung von Kraftfahrzeug- und Maschinengeräuschen sowie für raum- und bauakustische Tests. Darin können auch Hörgeräte gemessen werden, wenngleich es speziell für Hörhilfen handlichere Messboxen gibt. Im Gegensatz zu reflexionsarmen Räumen gibt es noch eine andere Art von akustischen Messräumen,



Bild 12: Piloten-Headset, Typ HMEC 350 mit aktivem Gehörschutz und einer gleichmäßigen Lärmreduzierung von bis zu 40 dB im gesamten Hörbereich (Foto: Sennheiser electronic)

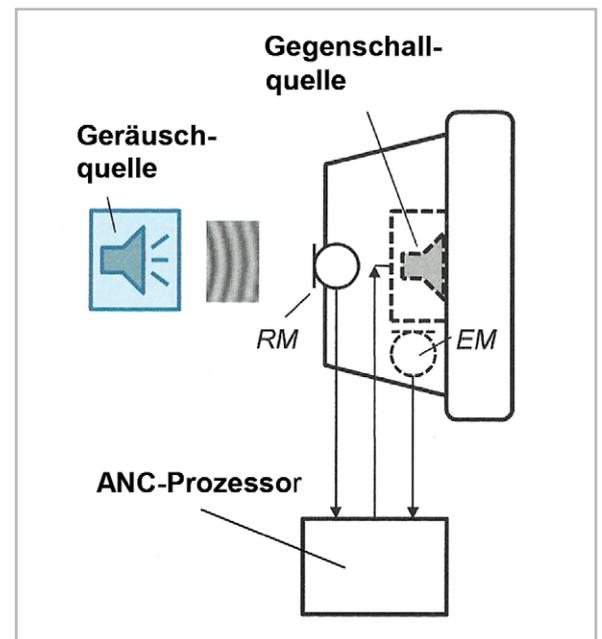


Bild 13: Aktiver persönlicher Schallschutz in digitaler Technik, eingebaut in einer Kopfhörerkapsel oder auch in einem Kapselgehörschützer mit einer möglichst großen passiven Dämmung im Bereich der hohen und mittleren Frequenzen. Die tiefen Frequenzen übernimmt die ANC.

RM = Referenz- oder Bezugsmikrofon
EM = „Error“-Mikrofon
ANC-Prozessor (ANC = Anti Noise Control)

und das sind Hallräume. Darin werden unter anderem Schalleistungen von diversen Schallquellen gemessen. Aber auch für bauakustische Prüfungen werden Hallräume benötigt. Über alle, hier genannten Messungen und Prüfungen wird im nachfolgenden Beitrag berichtet. **ELV**



Weitere Infos:

[1] Bruno Retlau und sein Tonneutralisator:
www.museumderunerhoertendinge.de/museum_de/dinge/erzaehlungen/retlau.html

Alle Links finden Sie auch online unter
de.elv.com/elvjournals-links