



# Schall im Ohr

## Elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer

Kopfhörer bilden heute einen nicht mehr wegzudenkenden Bestandteil vieler moderner Heim-Stereoanlagen und besonders für Smartphones sind sie inzwischen ein unverzichtbares Accessoire im täglichen Leben. Dabei sind die in verschiedensten Ausführungen erhältlichen Ohrhörer nicht nur zum Genuss von Musik geeignet, sondern helfen auch dabei, störende Umweltgeräusche weitestgehend auszublenden.

### Allgemeines

Ein Ur-Erfinder des Kopfhörers lässt sich bis heute leider nicht benennen – Kopfhörer bieten aber die beste Möglichkeit für eine unmittelbare, zweikanalige Schallübertragung bis hin zu unseren beiden Ohren. Die weitaus überwiegende Zahl unserer heutigen Kopfhörer, einschließlich der winzig kleinen Einsteckhörer, arbeitet nach dem elektrodynamischen Wandlerprinzip. Daneben gibt es auch noch die Klasse der ganz besonders hochwertigen und somit teuren Kopfhörer, die mit elektrostatischen Wandler-Systemen ausgerüstet sind. Beide Kopfhörerarten werden im nachfolgenden Beitrag ausführlich behandelt.

Wenn von Hörern die Rede ist, die am Kopf getragen werden, darf ein Hörertyp nicht ausgelassen werden, und zwar der Knochenleitungshörer. Dieser Hörer fand anfangs ausschließlich Verwendung in der Audiometrie sowie bei der Versorgung von Personen mit Hörschäden. Inzwischen gibt es aber auch schon Knochenleitungshörer für den Freizeitbereich. Knochenleitungshörer gehören im weiteren Sinne ebenfalls zur Familie der Kopfhörer. Daher soll auch über sie im Rah-

men dieses Beitrages berichtet werden. Die Funktionsprinzipien werden nachfolgend noch anhand älterer Hörermodelle erläutert, da diese oft „anschaulicher“ gestaltet sind.

Nicht unerwähnt bleiben soll auch noch ein Hörer, der in der Anfangszeit der elektroakustischen Nachrichtentechnik einseitig am Kopf oder genauer gesagt vor einem der beiden Gehörgänge getragen wurde. Das war der einfache Telefontörer. Die dort in den Handapparaten verwendeten Hörer arbeiteten anfangs noch nach dem elektromagnetischen Wandlerprinzip, siehe dazu auch [Bild 1](#). Im Laufe der Zeit wurden aber die Hörekapseln in den Handapparaten durch elektrodynamische Wandler-Systeme ersetzt.

### Elektrodynamische Kopfhörer

Das elektrodynamische Wandlerprinzip wurde bereits im [Teil 4](#) dieser Serie vorgestellt und erläutert, zumindest vom Grundsatz her. Im [Teil 5](#) wurden elektrodynamische Mikrofone behandelt. Vom Aufbau her haben elektrodynamische Kopfhörer eine große Ähnlichkeit damit. Während bei elektromagnetischen Schallsendern eine quadratische Beziehung zwischen der erzeugten Schwingungskraft  $F$  und dem erzeugenden Strom  $i$  besteht ( $F \sim i^2$ ), gilt für elektrodynamische Schallsender eine lineare Beziehung zwischen diesen beiden Größen ( $F \sim i$ ), was – zumindest vom Prinzip her – nichtlineare Verzerrungen ausschließt.



## 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**
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox
- Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler
- Raum- und Bauakustik – Sabine'sches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie
- 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.

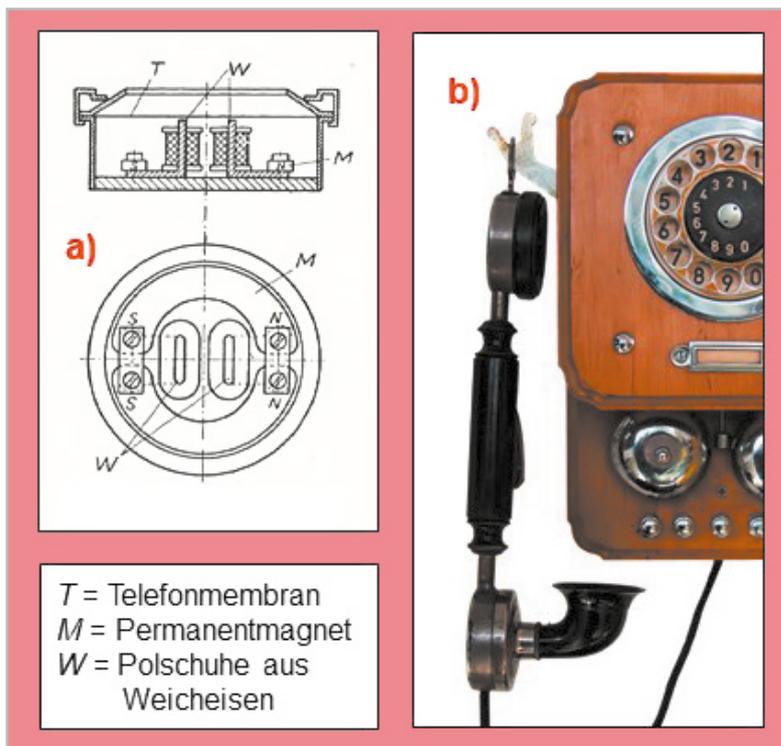


Bild 1: Telefon aus den Anfangsjahren  
 a) Aufbau einer Telefon-Hörer kapsel, damals noch mit elektromagnetischem Wandler system  
 b) Telefon mit Handapparat aus der ganz frühen Anfangszeit des Fernsprechens

Beispiele für den Aufbau von elektrodynamischen Kopfhörern zeigen die nächsten beiden Bilder. Zunächst zum Bild 2. Der darin abgebildete Hörer DT48 ist einer der ersten elektrodynamischen Kopfhörer, der 1937 von der Firma Beyer dynamik gebaut und auf den Markt gebracht wurde. Anfangs war dieser Kopfhörer als Headset für Telefon- und Funktechniker im Einsatz. Später wurde daraus der bekannteste Kopfhörer in der Audiometrie.

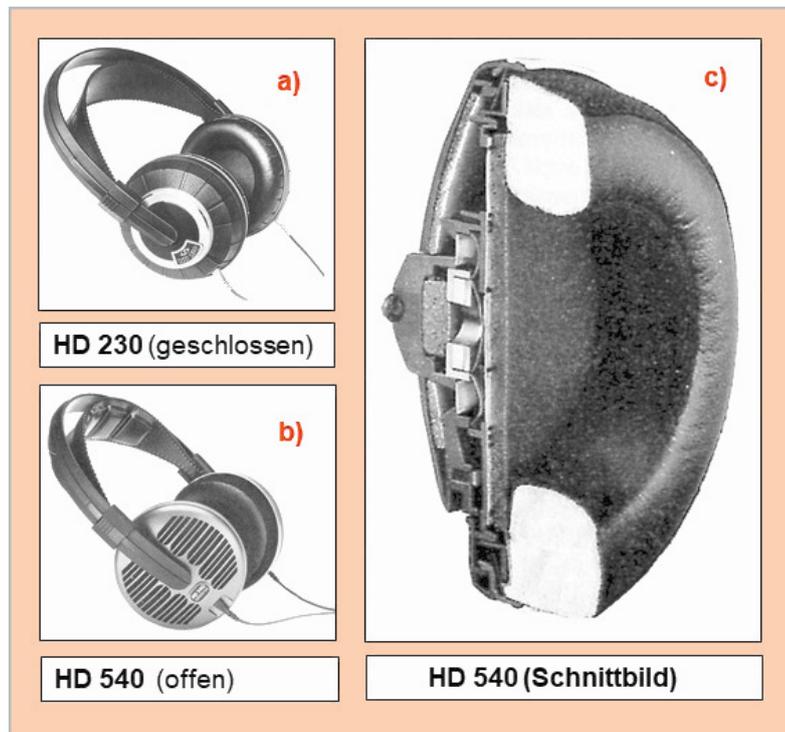


Bild 2: Kopfhörer DT48, einer der ersten elektrodynamischen Kopfhörer. Dieser Hörertyp wurde von der Firma Beyer dynamik erstmals im Jahre 1937 auf den Markt gebracht, ursprünglich nur für den Einsatz bei Funk- und Telefontechnikern. Später wurde daraus der meistverwendete Kopfhörer in der Audiometrie.

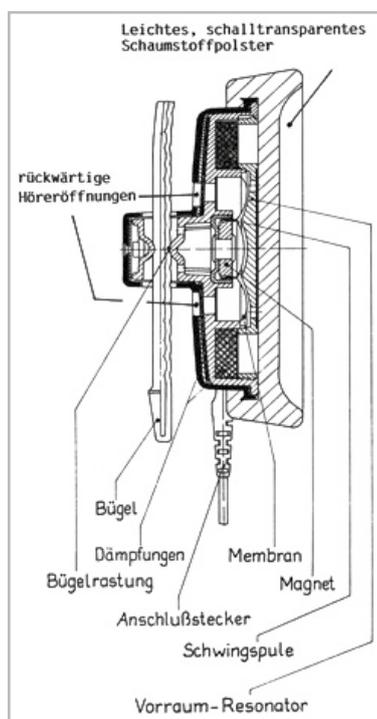


hörer für die Audiometrie, und das gilt auch noch bis heute. Der im **Bild 2** abgebildete Kopfhörer zeigt mit seinen Farben (rot für rechts und blau für links) das markanteste Kennzeichen eines Audiometrie-Kopfhörers.

Das **Bild 3** zeigt weitere Beispiele für elektrodynamische Kopfhörer, und zwar in geschlossener und in akustisch offener Bauweise. Es handelt sich dabei zwar um etwas ältere Modelle, an denen man aber diese beiden Bauweisen besonders deutlich erklären kann. Bei der geschlossenen Bauweise handelt es sich um einen Hörer, der durch seinen Aufbau die Ohren voll umschließt und sie somit vor der Außenwelt akustisch weitgehend



**Bild 3:** Elektrodyonische Kopfhörer  
a) in geschlossener und b) in akustisch offener Ausführung. Die Darstellung c) zeigt ein Schnittbild durch einen ohrmschließenden elektrodynamischen Hörer. Man erkennt darin die gewölbte Membran mit Schwingspule und Topfmagneten.



**Bild 4:** Schnittzeichnung durch einen offenen, ohraufliegenden Kopfhörer. Hier handelt es sich um einen der allerersten Hörer dieser Art (HD 414 SL von Sennheiser).

abschirmt. Dadurch gelangen Umgebungsgeräusche kaum oder nur stark gedämpft an die Gehörgänge. Das gilt natürlich auch umgekehrt für den vom Kopfhörer erzeugten Schall. Auch der dringt beim geschlossenen Hörer nur wenig nach außen. Bei vielen Benutzern geschlossener Hörer entstand dadurch das Empfinden, von der Außenwelt abgeschirmt zu sein. Das führte schließlich zum Wunsch nach „akustisch offenen“ Hörerkapseln, siehe dazu **Bild 3b** und **Bild 4**. Man wollte nicht mehr ganz isoliert sein von der Außenwelt.

Bei beiden Hörerarten – offen oder geschlossen – erkennt man hier sehr deutlich den Aufbau des elektrodynamischen Hörsystems. Genauso wie bei einem dynamischen Lautsprecher, der im nächsten Beitrag noch sehr ausführlich behandelt wird, entsteht beim elektrodynamischen Kopfhörer die Schallwandlung aus der Bewegung einer vom Tonsignal gespeisten und mit einer Membran verbundenen Schwingspule, die sich ihrerseits im Luftspalt eines Permanentmagneten befindet und dort bewegt wird. Die aus leichtem Material hoher Steifigkeit hergestellte, dünne Membran ist nicht eben, sondern meist gewölbt, um Partialschwingungen zu vermeiden. Im **Bild 4** erkennt man sehr deutlich die rückwärtigen Höreröffnungen, die aus einem Kopfhörer erst einen offenen Hörer machen.

Zu den wichtigsten Kenndaten eines jeden Kopfhörers, gleichgültig ob offen oder geschlossen, zählt neben dem Frequenzgang der sogenannte Kenschalldruckpegel. Darunter versteht man den in einem Messkuppel (**Bild 5**) gemessenen Schalldruckpegel bei einer Messfrequenz von 1 kHz und einer elektrischen



**Bild 5:** 6-cm<sup>3</sup>-Kuppler (B&K) zur Messung von Kopfhörern, bestehend aus einem Kondensatormikrofon und einem davor befindlichen Kupplervolumen (6 cm<sup>3</sup>). Der Hörer kann mit einer einstellbaren Andruckkraft von 2–10 N gegen den Kuppler gedrückt werden.

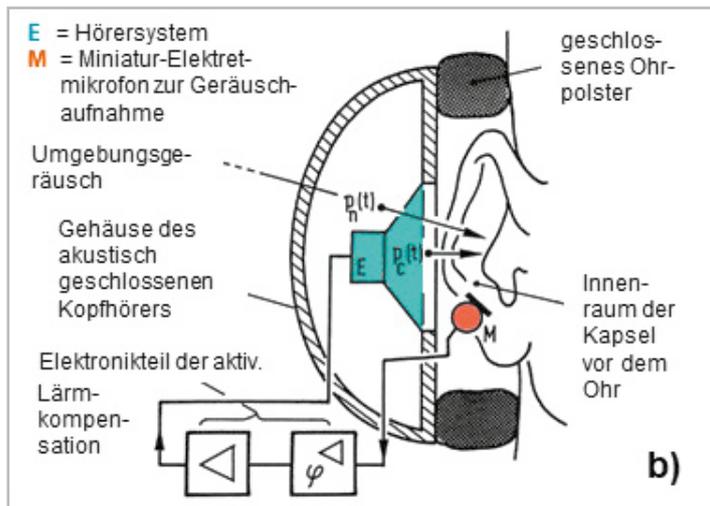
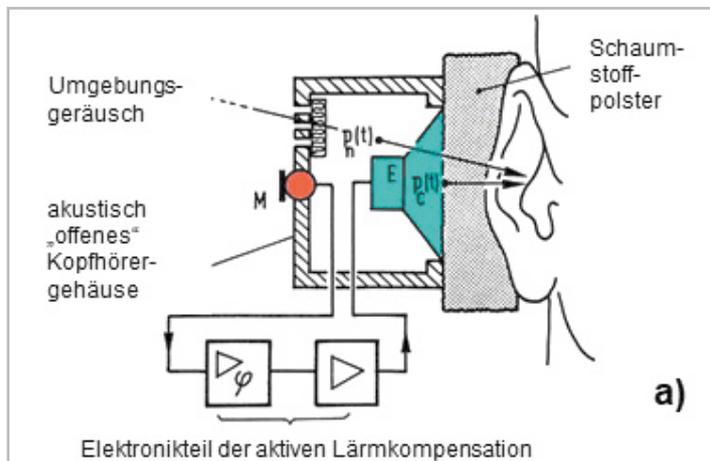


Bild 6: Kopfhörerkapseln (im Schnitt): a) akustisch offen und b) akustisch geschlossen, ausgestattet mit je einem Hörsystem E, einem Miniatur-Elektretmikrofon M für die Aufnahme von störenden Umgebungsgeräuschen sowie der dazugehörigen Elektronik (Verstärker, Phasenumkehr). Die Überlagerung der beiden Schallrückpegel  $p_n(t)$  und  $p_c(t)$  führt infolge ihrer Gegenphasigkeit im Ergebnis zu einer deutlichen Verringerung des störenden Umgebungsgeräuschs vor dem Gehörgang.

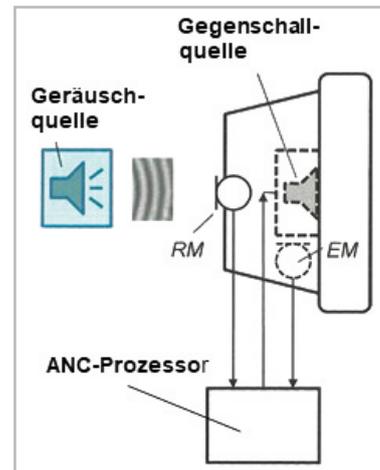


Bild 7: Aktiver persönlicher Schallschutz in digitaler Technik, eingebaut in einer Kopfhörerkapsel oder auch in einem Kapselgehörschützer mit einer möglichst großen passiven Dämmung im Bereich der hohen und mittleren Frequenzen. Die tiefen Frequenzen übernimmt der ANC-Prozessor (ANC = Anti Noise Control) RM = Referenz- oder Bezugsmikrofon, EM = „Error“-Mikrofon.



Bild 8: Piloten-Headset, Typ HMEC 350 (Sennheiser), mit aktivem Gehörschutz

Speisung, durch die der Hörer eine elektrische Leistung  $W_{el}$  von 1 mW (Milliwatt) erhält. Die dazu an den Hörer anzulegende Speisespannung  $u$  richtet sich nach der Höhe der elektrischen Hörerimpedanz  $Z_n$  ( $u = \sqrt{W_{el} \cdot Z_n}$ ). Als Ergebnis einer solchen Messung erhält man für die Datenblätter, quasi als Einzahlwert, entweder den Übertragungsfaktor  $T_s = p/u$  [Einheit: Pa/V] oder in logarithmischer Form, d. h. in Dezibel ausgedrückt, das sogenannte Übertragungsmaß  $G_s = 20 \cdot \lg T/T_0$  [Einheit: dB re Pa/V].  $T_0$  ist darin der Bezugs-Übertragungsfaktor mit einem Wert von 1 Pa/V.

### Anwendungsbeispiele für Kopfhörer

Die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten von elektrodynamischen Kopfhörern umfassend zu beschreiben würde den Rahmen dieses Artikels sprengen. Daher sollen von den verschiedenen Ausführungen und Verwendungsmöglichkeiten elektrodynamischer Kopfhörer nachfolgend nur zwei vorgestellt werden:

- Kopfhörer mit aktiver Lärmkompensation (ANC – anti noise control) – analog (Bild 6) und digital (Bild 7)
- Im-Ohr-(Kopf)Hörer – kabelgebunden (Bild 9) und drahtlos (Bild 10).

### Kopfhörer mit aktiver Lärmkompensation

Die physikalischen Grundlagen des aktiven Schallschutzes bildet der Interferenzeffekt, wonach es bei der Überlagerung von zwei Schwingungen



Bild 9: Beispiele für kabelgebundene Kopfhörer (Einsteckhörer), im Bild oben rechts eingesetzt im äußeren Gehörgang



gleicher Frequenz und Amplitude, aber entgegengesetzter Phase zu einer Auslöschung beider Schwingungen kommt. Das Verfahren, Lärm mittels elektronisch generiertem „Antischall“ zu bekämpfen, geht auf einen Denkansatz von Paul Lueg (1937) zurück, damals allerdings noch mittels Elektronenröhren. Für eine praktische Realisierung dieser Idee war die Zeit damals noch nicht reif. Erst in den 1980er Jahren, als es bereits sehr kleine und energiesparende Bauteile (Transistoren, ICs) gab, konnte der Autor dieses Beitrages mit der Umsetzung dieser Idee beginnen.

Den prinzipiellen Aufbau der ersten praktischen Ausführungen mit akustisch offenen und akustisch geschlossenen, geräuschkompensierten Kopfhörern zeigt das [Bild 6](#). In beiden Varianten wird der von außen ankommende und mit einem sehr kleinen Elektretmikrofon  $M$  aufgenommene Störschalldruck  $p_n(t)$  verstärkt und mit gleichgroßer Amplitude, aber entgegengesetzter Phase als Schalldruck  $p_c(t)$  vom Kopfhörersystem  $E$  vor dem Gehörgang abgestrahlt. Aus der Überlagerung beider Schallsignale kommt es, wenn schon nicht zu einer völligen Auslöschung, so doch zu einer sehr starken Reduzierung des noch verbleibenden Störgeräuschs. Insbesondere bei sehr tiefen Frequenzen kann auf diese Weise eine Pegelminderung um bis zu 20 dB und mehr erreicht werden.

Akustisch geschlossene, ohrumschließende Hörerkapseln haben infolge der geschlossenen Bauweise im Bereich der mittleren und hohen Frequenzen bereits eine hohe passive Schalldämmung. Der elektronisch generierte Gegenschall erweitert die Dämmwirkung auch noch nach tiefen Frequenzen. In der Anfangszeit der aktiv lärmkompensierten Kopfhörer und Hör-Sprech-Garnituren arbeitete der Elektronikteil noch mit analogen Mitteln. Die ersten praktischen Einsätze für Hör-Sprech-Garnituren gab es übrigens für Piloten von Verkehrsflugzeugen ([Bild 8](#)). Um die Übertragung von Funksignalen durch die Geräuschkompensation nicht zu beeinträchtigen, musste speziell für diesen

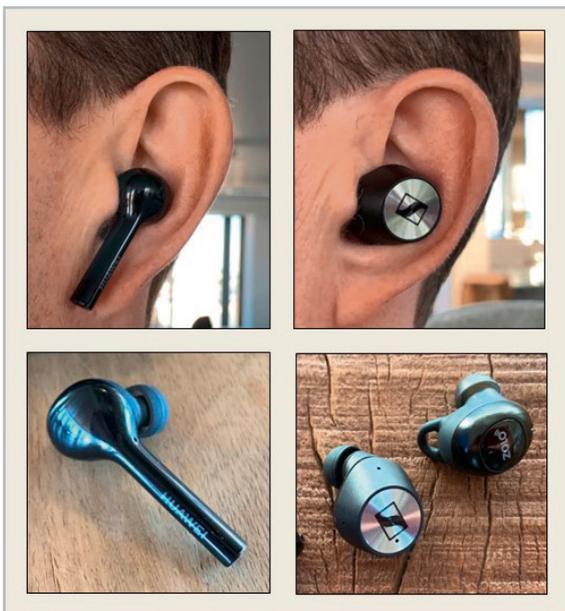


Bild 10: Beispiele für drahtlose (Bluetooth) In-Ear-Kopfhörer. Die oberen beiden Darstellungen zeigen die Hörer eingesetzt in den Gehörgängen.

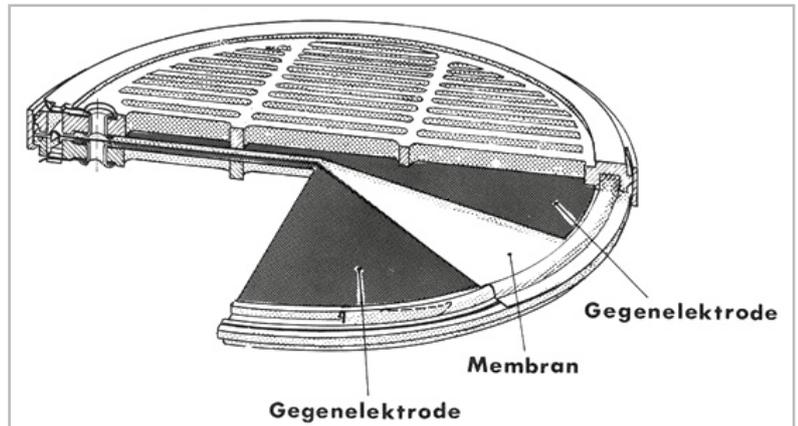


Bild 11: Prinzipieller Aufbau eines elektrostatischen Hörsystems. Das schallerzeugende System besteht aus einer symmetrischen Anordnung von „Gegenelektrode-Membranelektrode-Gegenelektrode“. Die extrem dünne, fast „masselose“, elektrisch leitende Membran befindet sich, mechanisch gespannt, genau in der Mitte zwischen den beiden Gegenelektroden.

Einsatz eine elektronische Trennung von Kompensationssignal und Funksprechsignal vorgesehen werden.

Die heutigen Mittel für den persönlichen Schallschutz arbeiten mit digitaler Elektronik. Dafür gibt es spezielle ANC-Prozessoren ([Bild 7](#)). Das von außen kommende Störgeräusch wird zunächst von einem Referenzmikrofon  $RM$  aufgenommen und einem Signalprozessor  $ANC$  zugeführt. Dort wird es digitalisiert, verstärkt und anschließend einem als Gegenschallquelle arbeitenden Kopfhörersystem zugeführt. Ein zweites, im Kapselinneren befindliches „Error“-Mikrofon  $EM$  nimmt den dort noch anzutreffenden Geräuschrest auf. Das von diesem Mikrofon aufgenommene Signal wird ebenfalls dem Signalprozessor zugeführt, von wo aus es das bereits in den Hörer eingeleitete Signal „nachkorrigiert“. Auf diese Weise kann eine Geräuschkompensation von bis zu 30 oder 40 dB erreicht werden.

### In-Ear-Kopfhörer

Neben den allgemein bekannten ohraufliegenden und ohrumschließenden Kopfhörern gibt es elektrodynamische Hörsysteme auch noch in Kleinausführung, sogenannte In-Ear-Kopfhörer, siehe dazu die [Bilder 9 und 10](#). Die darin abgebildeten Hörer zeigen verschiedene Ausführungsbeispiele, auch eingesetzt im äußeren Gehörgang. In-Ear-Kopfhörer sind heute ein nicht mehr wegzudenkendes Zubehör für unsere Smartphones. Das gilt sowohl für die drahtgebundenen als auch für die drahtlosen (Bluetooth-)Hörer. Bemerkenswert sind die in solchen Hörern enthaltenen Kleinst-Tauchpulsysteme.

### Elektrostatische Kopfhörer

Neben elektrodynamischen Kopfhörern gibt es noch eine weitere Art von Kopfhörern, die ihrer Qualität wegen sehr geschätzt, aber ihres höheren Preises wegen nicht so häufig in der Praxis anzutreffen sind wie dynamische Hörer. Das sind elektrostatische Kopfhörer. Diese Hörer arbeiten nach dem elektrostatischen Wandlerprinzip und benötigen daher eine sehr hohe Polarisations-Gleichspannung, um nichtlineare Verzerrungen vernachlässigbar klein zu halten.

Den grundsätzlichen Aufbau eines „Elektrostaten“ – aus der Anfangszeit – zeigt das [Bild 11](#). Genau in der Mitte zwischen zwei perforierten Gegenelektroden ist eine dünne, elektrisch leitfähige und fast „masselose“ Membran gespannt. Legt man an die Membran einerseits und an die beiden Gegenelektroden andererseits eine Tonfrequenz-Wechselspannung, so entstehen im Zusammenwirken mit dem elektrostatischen Feld anziehende und abstoßende Kräfte, durch die die dünne Membran im Rhythmus der Tonfrequenz Schwingungen ausführt. Die extrem dünne und leichte Membran gehorcht den auf sie einwirkenden Wechselkräften.



Bild 12: Elektrostatische Kopfhörer benötigen wegen des quadratischen Kraftgesetzes ( $F \sim u^2$ ) eine Polarisationsvorspannung. Dazu gab es anfangs zu jedem „Elektrostaten“ eine passende Hochspannungsversorgung. Das waren das „gewichtige“ Netzteile (siehe oben im Bild). Heute werden moderne Elektrostaten meist zusammen mit einem passenden Verstärker, oft röhrenbestückt, angeboten, der alles Erforderliche enthält (siehe unten im Bild).

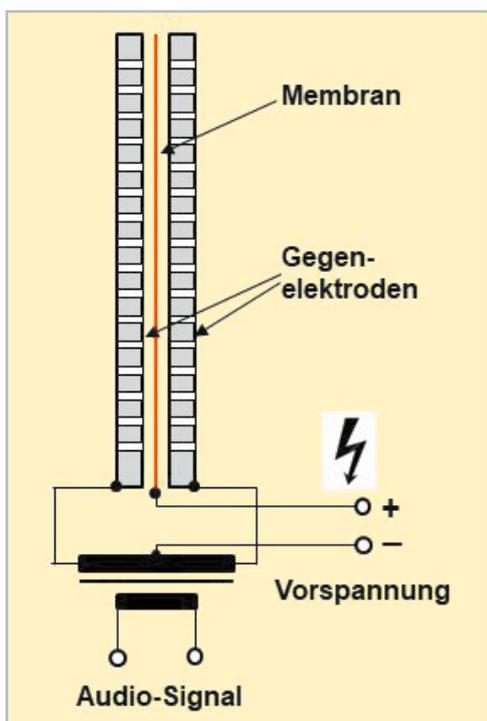


Bild 13: Schematische Darstellung eines elektrostatischen Kopfhörers mit den Anschlüssen für das Audiosignal und für die Vor- oder Polarisationsvorspannung, einer für den verzerrungsfreien Betrieb von elektrostatischen Schallsendern notwendigen, hohen Gleichspannung.

ten mit einer so großen Genauigkeit, dass der erzeugte Schall praktisch frei ist von (Impuls-)Verzerrungen. Die mit derartigen Kopfhörern erzielbare Hochtonauflösung ist exzellent. Elektrostatische Hörer besitzen innerhalb ihres gesamten Übertragungs-Frequenzbereichs eine sehr ausgeglichene Wiedergabekurve.

Als ein kleines Minus darf lediglich die Tatsache gewertet werden, dass elektrostatische Kopfhörer eine hohe zusätzliche Polarisationsvorspannung benötigen, für deren Bereitstellung anfangs recht „gewichtige“ Speisegeräte (Bild 12, oberes Bild) im Einsatz waren, um einen verzerrungsfreien Betrieb des Hörers zu gewährleisten. Das untere Bild zeigt einen moderneren Elektrostaten, zusammen mit einem dazugehörigen Verstärker. Im Bild 13 ist ein Prinzipschaltbild der elektrischen Versorgung eines elektrostatischen Kopfhörers dargestellt, und zwar zusammen mit den elektrischen Anschlüssen für das Audiosignal und für die Vorspannung.

Einer der hochwertigsten elektrostatischen Kopfhörer – HE 1 von Sennheiser – erreicht mit z. B. einem Klirrfaktor von nur 0,01 % bei einem Schalldruckpegel  $L_p = 100$  dB exzellente Daten.

### Knochenleitungshörer

Knochenleitungshörer wurden ursprünglich nur in der Audiometrie verwendet. Inzwischen kommen Knochenleitungshörer aber auch beim Sport oder beim Radfahren zum Einsatz, um dabei die Gehörgänge offen zu lassen für den Empfang von Luftschall und um somit Unfällen im Straßenverkehr zu entgehen. Insofern gehören Knochenleitungshörer im weiteren Sinne auch zu den „Kopf“hörern. Von ihrem Aufbau und ihrer Funktion her sind das allerdings elektromagnetische Wandler.

Doch zunächst zur Frage, was ist Knochenschall? Darunter versteht man Körperschall, der über den Schädelknochen an unser Innenohr gelangt. Die von einer Schallquelle abgestrahlte Energie kann unser Gehör auf zwei verschiedenen Wegen erreichen, nämlich auf dem Wege der Luftschalleitung und/oder auf dem Wege der Knochenschalleitung. Bei der Luftleitung gelangt der Schall durch den äußeren Gehörgang ans Trommelfell und von dort aus über die Gehörknöchelchen weiter bis zum Innenohr. Bei der reinen Knochenleitung dagegen umgeht der Schall das Mittelohr und erreicht auf direktem Wege das Innenohr. Von praktischem Nutzen kann die Knochenschalleitung z. B. für einen ganz bestimmten Kreis von Schwerhörigen sein, bei dem die Schallübertragung im Mittelohr gestört ist.

Im Jahre 1932 veröffentlichte G. v. Békésy die erste seiner zahlreichen Arbeiten über die Knochenleitung, worin er nachwies, dass trotz der unterschiedlichen Wege, die der Luftschall und der Knochenschall von der Schallaufnahme bis hin zur Innenohrschnecke zurücklegen, die Erregung der Schneckenendorgane in beiden Fällen die gleiche ist.

Interessant ist in dem Zusammenhang auch noch ein anderer Effekt: Der fehlende Knochenschallanteil in einer elektroakustischen Aufzeichnung der eigenen Sprache ist nämlich dafür verantwortlich, dass uns die abgespielte Aufzeichnung „fremd“ erscheint.

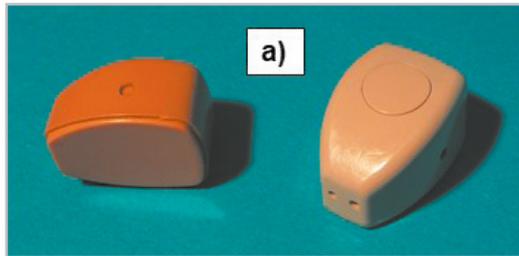


Bild 14: Knochenschallhörer

a) Der links dargestellte Hörer zeigt eine leicht konkav gewölbte Fläche, wodurch eine bessere Auflage des Hörers, beispielsweise auf dem Felsenbein (Mastoid), hinter der Ohrmuschel gewährleistet wird.  
b) Schnittzeichnung des Hörers aus der Darstellung a). Man erkennt darin sehr deutlich das elektromagnetische Wandler-system.

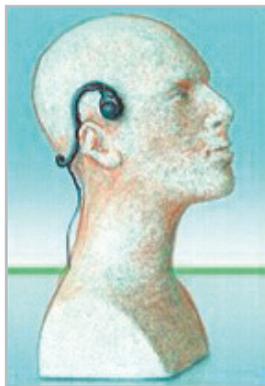
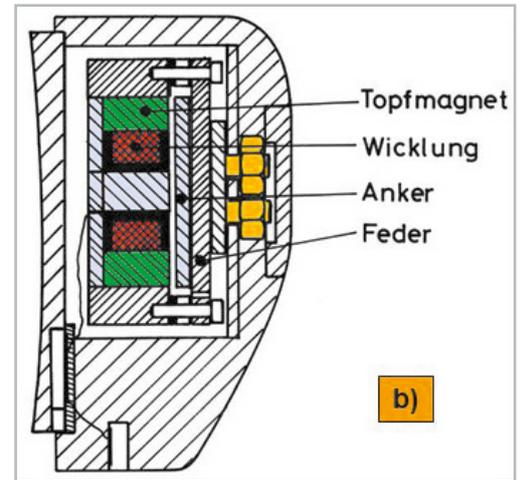


Bild 15: Knochenhörer mit Nackenbügel. Damit kann man via Knochenleitung z. B. Musik hören, ohne dabei die Gehörgänge zu verschließen und sich z. B. beim Überqueren einer verkehrsreichen Straße in Gefahr zu bringen.

Den grundsätzlichen Aufbau eines Knochenleitungshörers zeigt das Bild 14b. In der oberen Darstellung (Bild 14a) sind zwei Hörerexemplare zu sehen, wie sie bereits vor Jahren bei Personen mit Hörproblemen im Mittelohr zum Einsatz kamen.

Heute gibt es Knochenschallhörer nicht nur für Personen mit Hörproblemen, sondern auch für Normalhörende im täglichen Leben. Das kann beim Sport sein, beim Hören von Musik oder ganz einfach auch im Straßenverkehr, um das Gehör frei zu haben für die Wahrnehmung der akustischen Umwelt. Knochenhörer dieser Art gibt es heute in sehr modernem Design, siehe die Bilder 15 und 16.

### Ausblick

In den vorausgegangenen Beiträgen dieser Artikelserie wurden die Grundlagen der Akustik und der Elektroakustik behandelt. Es folgten Beiträge, in denen die Thematik der elektroakustischen Wandler das zentrale Thema bildeten, insbesondere Mikrofone und Kopfhörer. Der nächste, siebte Teil der Serie befasst sich mit Lautsprechern. Wir stellen die Entwicklung der Lautsprecher vor, und zwar angefangen bei den Freischwingern in den 30er-Jahren. Sehr ausführlich werden die heute vorwiegend verwendeten, elektrodynamischen Lautsprecher behandelt, deren Entwicklung sehr viel mit dem Aufkommen neuer Materialien zu tun hat. Das gilt insbesondere für die heute bekannten leistungsstarken Magnete. Auch in der Technologie der Herstellung neuer Membranmaterialie

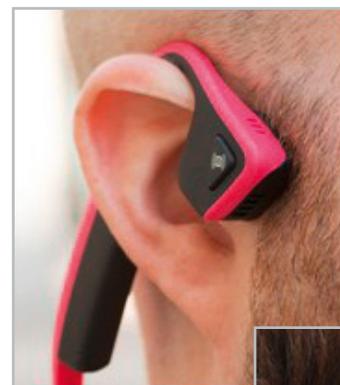


Bild 16: Knochenschallhörer mit Nackenbügel in farblich ansprechender Ausführung

hat sich im Laufe der Zeit viel verändert. All das und vieles mehr, z. B. Exponentiallylautsprecher, Gruppenanordnungen von Lautsprechern, Richtstrahler oder Bassreflexboxen, wird im nächsten Beitrag dieser Serie ausführlich behandelt.

ELV