

Über vier Funktionsprinzipien des menschlichen Mittelohrs

Herbert Hudde

Institut für Kommunikationsakustik, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland, Email: herbert.hudde@rub.de

Einleitung

Das menschliche Mittelohr besitzt wie alle Säuger-Mittelohren eine aus drei Knöchelchen bestehende Ossikelkette. Eine solche Anordnung ist deutlich komplizierter als etwa eine Columella, eine stabförmige Verbindung zwischen Trommelfell und Innenohrfenster, die bei Vögeln und Reptilien zu finden ist. Es ist bekannt, dass beide Mittelohrtypen niederfrequent den Schall etwa gleich gut weiterleiten können. Bei höheren Frequenzen ist jedoch die Ossikelkette überlegen. In der folgenden Abbildung ist nicht nur die Ossikelkette dargestellt, sondern es werden bereits die vier zu besprechenden Funktionsprinzipien genannt.

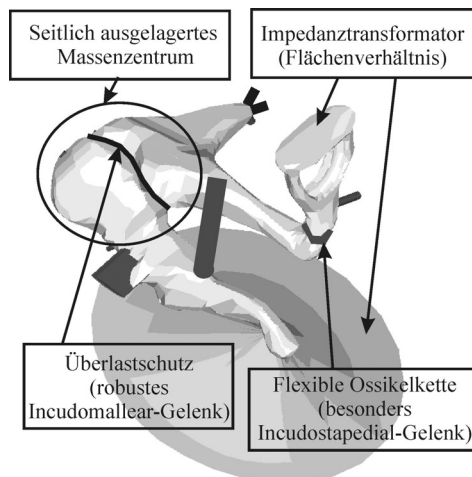


Abbildung 1: Vier Funktionsprinzipien der menschlichen Ossikelkette

Die Hauptaufgabenstellung, die beide Mittelohrtypen erfüllen müssen, ist grundsätzlich identisch. Die Innenimpedanz der am Eingang des Gehörgangs wirksamen äußeren Schallquelle und die hydroakustische Eingangsimpedanz in das Innenohr unterscheiden sich in der Größenordnung um den Faktor 10.000 (tatsächlich ist der Faktor frequenzabhängig). Um zu gewährleisten, dass trotzdem Schallenergie in das Innenohr eindringen kann, benötigt man einen Transformator (erstes Funktionsprinzip). Beide Mittelohrtypen realisieren ihn durch ein großes Flächenverhältnis zwischen Trommelfell und Stapes-Fußplatte. Allerdings wird der Transformator nur in einem mittleren Frequenzbereich wirksam [1].

Auch das zweite Funktionsprinzip der Ossikelkette ist seit langem bekannt: Malleus und Incus sind über ein Gelenk gekoppelt, dass bei größeren statischen Belastungen (z. B. beim Schnäuzen) makroskopische Verschiebungen zulässt, die eine Übertragung der Malleus-Bewegung auf den Incus verhindern. Es handelt sich also um einen Überlastschutz. Bei den viel kleineren Belastungen bei Schalleinwirkung gibt das Incudomalleolar-Gelenk vergleichsweise wenig nach. Anderenfalls würde es die Schallleitung des Mittelohrs nennenswert verschlechtern.

Bei Columella-Ohren existiert kein unmittelbares Gegenstück zum Incudomalleolar-Gelenk. Jedoch ist das übertragende Element auch hier in zwei Bestandteile aufgeteilt (Columella und Extracolumella). Die Kopplung der beiden Teile ist so elastisch - aber nicht gelenkig - ausgeführt, dass auch hier die Übertragung der Schwingungen herabgesetzt wird.

Um einen verlässlichen Überlastschutz zu gewährleisten, ist das Incudomalleolar-Gelenk sehr robust ausgeführt. Es hat eine Gelenkfläche, die größer ist als die Fläche der Fußplatte. Dies wird ermöglicht durch zwei erstaunlich große Massen auf beiden Seiten des Gelenks (Malleus-Kopf und Incus-Körper). Große Massen erscheinen zunächst ungünstig, weil sie aufgrund ihrer Trägheit bei höheren Frequenzen zu kleineren Schwingungsamplituden führen. Wie stark eine Masse wirkt, hängt allerdings nicht nur von der Frequenz der Schwingung, sondern auch von der Art der Bewegung ab. Bei rotatorischer Bewegung um eine Schwerachse ist die "effektive" Masse deutlich kleiner als die Wiegemasse.

Tatsächlich wurde die Bewegung der Ossikelkette lange Zeit als eine Rotation um das Hauptachsenband (vorderes Hammerband und hinteres Incusband) angenommen. Diese Achse fällt zwar nicht mit einer Schwerelinie durch die genannten Massen zusammen, liegt aber immerhin in der Nähe. Wir wissen jedoch heute, dass die "klassische" Rotationsbewegung um die Hauptachse nur bei niedrigen Frequenzen auftritt. Andererseits sind bei niedrigen Frequenzen die Trägheitskräfte generell weniger bedeutend. Das Rätsel des "Massenzentrums", bestehend aus Malleus-Kopf und Incus-Körper, ist also nicht mit dem Hinweis auf die Rotation um das Hauptachsenband zu lösen.

Im Folgenden werden zwei weitere Funktionsprinzipien der Ossikelkette durch Simulation der Schwingungsformen bei akustischer und mechanischer Anregungen unter normalen und verschlechterten "Betriebsbedingungen" herausgearbeitet. Dazu wird ein verallgemeinertes Netzwerkmodell [2] verwendet. Am besten geeignet ist die direkte Betrachtung der Schwingungen anhand von Animationen. Ersatzweise kann man die Schwingungsformen auch grafisch veranschaulichen, was hier aus Platzgründen entfallen muss. Einige grafische Darstellungen findet man in [1,3].

Schwingungen der Ossikelkette bei Schüttelanzregung

Es fällt auf, dass das genannte Massenzentrum seitlich ausgelagert ist, also nicht auf dem direkten Übertragungsweg vom Manubrium zum ovalen Fenster liegt. Dies hat nicht nur Vorteile bei Übertragung von Luftschall, sondern auch hinsichtlich einer Verbesserung der Isolation des Innenohrs gegenüber äußeren Kräfteinwirkungen und Knochenschall. Wir bezeichnen daher das seitlich ausgelagerte Massenzentrum als weiteres Funktionsprinzip.

Zunächst betrachten wird die Schwingungsübertragung bei mechanischer Anregung der gesamten Paukenhöhle (Schüttelanregung). Die Übertragung erfolgt über alle elastischen Elemente, die die Ossikelkette in ihrer Position halten inklusive des Trommelfells und des Ringbands im ovalen Fenster. Bei niedrigen Frequenzen folgt die Ossikelkette weitgehend der Anregung, während bei hohen Frequenzen die Ossikel aufgrund ihrer Trägheit zu Stillstand tendieren. Da für die Wahrnehmung nicht die absolute Ossikelbewegung, sondern die Relativbewegung zum ovalen Fenster maßgebend ist, erhält man infolgedessen bei niedrigen Frequenzen eine geringe Übertragung (gute Isolation), jedoch bei hohen Frequenzen unvermeidlich eine fast vollständige Schwingungsübertragung (schlechte Isolation). Das Verhalten kann man durch einen Hochpass mit einer bestimmten Grenzfrequenz beschreiben.

Bei mittleren Frequenzen führt das ausgelagerte Massenzentrum dazu, dass die Trägheitskräfte eine starke rotatorische Bewegung um das Incudostapedial-Gelenk erzeugen. Dadurch werden die Kräfte weniger als Anregung des Stapes wirksam, sondern gleichsam abgelenkt. Dies lässt sich als eine Anhebung der Grenzfrequenz des "Knochenleitungs-Hochpass" beschreiben. Gegenüber einer hinsichtlich der Luftschallübertragung gleich abgestimmten Columella hat der Hochpass bei der Ossikelkette trotz höherer Masse eine höhere Grenzfrequenz, also eine verbesserte Schwingungs-isolation.

Damit die genannte rotatorische Bewegung auftreten kann, ist ein weiteres Funktionsprinzip notwendig, nämlich eine große Flexibilität der Ossikelkette, damit überhaupt unterschiedliche Schwingungsformen auftreten können. Für die Ausgleichsbewegung ist offenbar ein rotatorisch besonders flexibles Incudomalleolar-Gelenk erforderlich. Sowohl das seitlich ausgelagerte Massenzentrum also auch die Flexibilität der Ossikelkette stellen auch für die Luftschallübertragung einen erheblichen Vorteil dar, wie im Folgenden gezeigt wird.

Schwingungen der Ossikelkette bei akustischer Anregung unter normalen und verschlechterten Übertragungsbedingungen

Bei akustischer Anregung durch einen Schalldruck am Trommelfell ist selbst niederfrequent, also im Fall der klassischen Rotation um das Hauptachsenband, bereits eine rotatorische Bewegung im Incudostapedial-Gelenk notwendig, um die eher rotatorische Bewegung von Malleus und Incus mit der eher kolbenartigen Bewegung des Stapes zu verbinden. Die klassische Bewegungsform wird oberhalb der Hauptresonanz des Mittelohrs bei 700 Hz allmählich aufgelöst [3]. Es entstehen verschiedenartige Schwingungsformen wie kreisende Bewegungen und Verschiebungen und Neubildungen von Rotationsachsen. Zu höheren Frequenzen gehen die Bewegungen immer mehr in gekoppelte rotatorische Bewegungen von Manubrium, langem und kurzem Incus-Fortsatz um den Mittelpunkt des Massenzentrums über. Dies zeigt: Das Mittelohr ist kein Uhrwerk. Vielmehr ändern sich Schwingungsformen erstaunlich stark. Möglich wird dies durch eine insgesamt sehr flexible Ossikelkette.

Zur Flexibilität tragen relativ nachgiebige Bänder und nicht ganz steife Ossikel bei. Entscheidend ist das rotatorisch sehr nachgiebige Incudostapedial-Gelenk.

Die hohe Beweglichkeit produziert - auch in scheinbar unnütze Richtungen - recht starke Schwingungen. Dies würde einen schlechten Wirkungsgrad bedeuten, wenn das System stark gedämpft wäre. Tatsächlich wird die Effizienz durch die "unnützen" Schwingungen nicht wesentlich verschlechtert, was sich darin zeigt, dass das Übertragungsverhalten nicht sehr stark von dem eines einfachen gedämpften Masse-Feder-Schwingers abweicht. Die Schwingungsformen lassen sich vielmehr dahingehend interpretieren, dass die Ossikelkette bei jeder Frequenz eine günstige Schwingungsform "findet", die nahe bei einer energieminimalen Eigenform (Mode) liegt. Das ausgelagerte Massenzentrum unterstützt dabei günstige rotatorische Schwingungen um sich selbst.

Die Flexibilität der Ossikelkette wirkt sich auch dann günstig aus, wenn die "Betriebsbedingungen" verschlechtert sind, sei es durch nichtoptimale Ausrichtung der Ossikel oder durch Versteifungen von Bändern und Gelenken. Es zeigt sich, dass partielle Verringerungen der Flexibilität oder ungünstigere Positionen das Übertragungsverhalten in einem weiten Frequenzbereich erstaunlich wenig verschlechtern, solange durch mehrfache Verschlechterungen die Flexibilität der Ossikelkette nicht weitgehend verloren geht. Durch die hohe Flexibilität ist das "System Mittelohr" damit allgemein recht unempfindlich gegenüber Parameteränderungen verschiedenster Art.

Schlussfolgerungen

Aufgrund der vier in Abb. 1 gezeigten Funktionsprinzipien besitzt das menschliche Mittelohr eine Vielzahl günstiger Eigenschaften, die in diesem Beitrag abgehandelt wurden. Es zeigte sich, dass die relativ großen Massen, die zur Realisierung eines robusten Überlastschutzes notwendig sind, die Übertragungseigenschaften nicht nur nicht verschlechtern, sondern sogar zu einer breitbandig guten und parameter-unempfindlichen Übertragung führen.

Auch beim Columella-Mittelohr wird eine gewisse Flexibilität bereitgestellt, nämlich durch die Extracolumella. Durch dieses relativ elastische Element wird die Übertragung höherer Frequenzen aber erwartungsgemäß verschlechtert, weil dies bei einem einfachen Masse-Feder-Schwinger unvermeidlich ist. Erst die Veränderung der Schwingungsformen mit der Frequenz bewirkt bei der Ossikelkette die Aufrechterhaltung einer guten Schallübertragung auch bei hohen Frequenzen.

Literatur

- [1] Hudde, H.: A functional view on the peripheral human hearing organ. *Communication Acoustics* (ed. J. Blauert). Springer (2005), 47-74
- [2] Hudde, H.: Verallgemeinerte Netzwerke: Erweiterung der elektromechanischen Analogie zur Behandlung dreidimensionaler Schwingungen". DAGA 2001.
- [3] Hudde, H., Weistenhöfer, Ch.: Key features of the human middle ear. *J. Oto-Rhino-Laryng.* 68 (2006), 319-323.