

Die Sinus-Impuls-Analogie der Basilarmembran als Ursprung der Frequenzgruppen

Herbert Hudde

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

Einleitung

Als Frequenzgruppen (critical bands) werden Frequenzbereiche bezeichnet, innerhalb derer das Gehör die Lautheitsbildung von Schallsignalen annähernd energetisch zusammenfasst. Die Lautheit wird also wesentlich dadurch bestimmt, ob das Signal spektral nur in eine Frequenzgruppe fällt oder darüber hinausgeht [1]. In Modellen werden Frequenzgruppen meist durch psychoakustisch gewonnene "auditorische Filter" [2] repräsentiert, deren effektive Bandbreiten die Frequenzgruppen abbilden.

Obwohl kaum zu bezweifeln ist, dass der Ursprung der Frequenzgruppen in der Cochlea liegt, erscheint eine ins Detail gehende Erklärung für das Zustandekommen von Frequenzgruppen möglicherweise schwierig, weil bei der Lautheitsbildung vielfältige nichtlineare Mechanismen innerhalb der Cochlea und auf neuraler Ebene eine Rolle spielen. In diesem Aufsatz soll jedoch gezeigt werden, dass der Ursprung der Frequenzgruppen im Kern bereits mit einem seit langem bekannten einfachen linearen Modell [3] der Basilarmembran (BM) erklärt werden kann. Es kommt nicht einmal auf die Einzelheiten des Modells an, wenn nur die Abstimmung der BM grundsätzlich richtig nachgebildet wird.

Lineares Modell der Basilarmembran

Das verwendete Modelle von de Boer [3] enthält drei linearen Gleichungen: (1) die Eulergleichung für den Zusammenhang zwischen Schalldruck und -schnelle im Fluid, das die BM umgibt, (2) eine Kontinuitätsgleichung, die den Zusammenhang zwischen Fluid- und BM-Bewegung herstellt und (3) die Impedanzgleichung der BM zur Verkopplung der Druckdifferenz über der BM und der BM-Schnelle.

Um das Modell als Signalverarbeitungsmodell verwenden und um nichtlineare Elemente ergänzen zu können, wurde das Modell zeitlich und örtlich diskretisiert. Dies führt auf ein lineares Gleichungssystem, dessen Systemmatrix eine Tridiagonalmatrix ist, die zu jedem Zeitpunkt invertiert werden muss (was aufgrund der speziellen Form sehr zeiteffektiv möglich ist). Als Lösung erhält man zunächst die Fluidschnelle und daraus die BM-Bewegungen an allen diskreten Orten entlang der BM. Insbesondere lassen sich auf diese Weise die bekannten Wanderwellen simulieren.

Erregung der Basilarmembran bei Anregung mit Sinustönen und Schmalbandrauschen

Bei Anregung mit einem Sinuston liefert die Wanderwelle nach Abklingen der Einschwingvorgänge, also im stationären Zustand, den bekannten Erregungsverlauf mit einer maximalen Anregung am frequenzabhängigen charakteristischen Ort. Dieser örtliche Verlauf sei im Rahmen der Sinus-Impuls-Analogie mit "Sinusantwort" $v_{BM}(x)$ bezeichnet. Abb. 1 zeigt die Sinusantwort für eine Anregung bei 1500

Hz: es handelt sich um einen der Verläufe, die zusammenfassend mit der Bandbreite 0 - 101 Hz beschriftet sind.

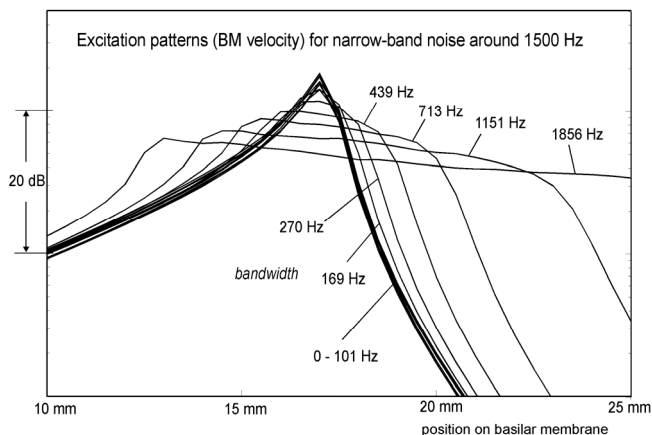


Abbildung 1: Verteilung der Schnelle (Betrag) entlang der Basilarmembran bei Anregung mit Schmalbandrauschen konstanter Energie bei einer Mittenfrequenz von 1500 Hz für verschiedene Bandbreiten. Die Abbildung enthält auch den Fall eines Sinustons (Bandbreite 0 Hz).

Erhöht man nun die Bandbreite, indem man Schmalbandrauschen verwendet, so ändert sich die örtliche Erregungsverteilung auf der BM nahezu nicht, wenn man dabei die Signalenergie konstant hält. Die geringen Unterschiede zwischen den Verläufen bei den zusammengefassten Bandbreiten 0 - 101 Hz sind vor allem darauf zurückzuführen, dass bei der Auswertung der stationäre Zustand nach Einschalten des Rauschens noch nicht vollständig erreicht war.

Erst deutlich oberhalb einer Bandbreite von 100 Hz verbreitert sich der Erregungsverlauf erkennbar, wobei gleichzeitig das Maximum am charakteristischen Ort der Mittenfrequenz absinkt. Die Besonderheit der Kurvenschar liegt darin, dass offenbar eine bestimmte (von der Mittenfrequenz abhängige) Bandbreite überschritten werden muss, damit die spektrale Verbreiterung der Anregung zu einer Verbreiterung der örtlichen Erregungsverteilung auf der BM führt.

Dies ist der entscheidende Effekt, der zur Bildung der Frequenzgruppen führt: solange eine bestimmte Bandbreite nicht überschritten wird, ist bei Konstanthaltung der Signalenergie der Betragsverlauf der BM-Erregung im stationären Zustand nahezu unabhängig von der Bandbreite. Wenn man annimmt, dass die Lautheitsbildung nur vom Betragsverlauf der Erregung abhängt, muss die Lautheit von Rauschsignalen tatsächlich unabhängig von der Bandbreite sein, solange die Grenzbandbreite (Frequenzgruppenbreite) nicht überschritten wird. Erst darüber ändern sich die Verhältnisse, was sich je nach Versuch in verschiedener Weise auswirkt.

Sinus-Impuls-Analogie der Basilarmembran

Die soeben dargestellte Erkenntnis beruht auf einem lange bekannten Modell. Es handelt sich also keineswegs um einen

neu entdeckten Mechanismus, sondern nur um eine hier hervorgehobene Eigenschaft des Modells. Das Ergebnis wird anschaulicher, wenn man eine Analogiebetrachtung für Pulsantworten im Zeitbereich durchführt.

In Abb. 2 sind die Antworten eines geeigneten Filters auf Eingangspulse variierender Breite dargestellt. Berechnet man - ausgehend von der Impulsantwort $h(t)$, also der Antwort auf einen Dirac-Stoß - die Antworten für zeitlich breitere Pulse, so ändern sich die Antworten bei Konstanthaltung der Fläche unter dem Pulsverlauf zunächst nahezu nicht. Erst ab einer gewissen Pulsbreite, die von der "Breite der Impulsantwort" abhängt, kommt es zu der in Abb. 2 gezeigten Verbreiterung der Pulsantworten.

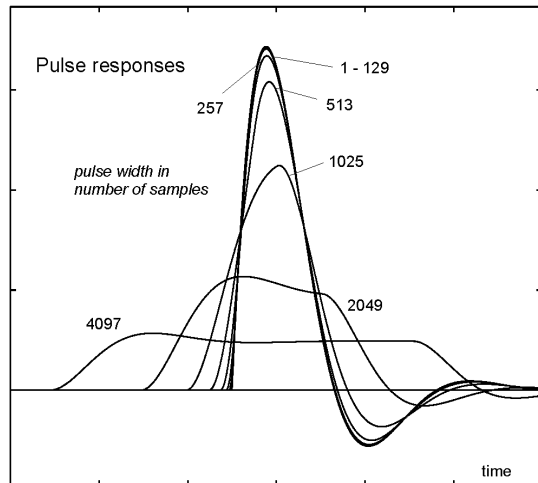


Abbildung 2: Pulsantworten eines Filters bei Variation der Pulsbreite. Die anregenden Pulse sind diskrete Pulsfolgen variierender Länge (Zahl der Einzelimpulse), bei konstanter zeitlicher Lage der Pulsmitte. Die Abbildung enthält auch die Impulsantwort des Filters (Anregung mit Einzelimpuls).

Die Analogie besteht also in Folgendem: Eine Verbreiterung der Pulsantworten eines Filters tritt bei Verbreiterung der Pulse unter Konstanthaltung des zeitlichen Integrals erst auf, wenn die Pulsbreite eine "charakteristische Breite" der Impulsantwort $h(t)$ überschreitet. Dem Impuls im Zeitbereich entspricht im Rahmen der Analogie eine einzelne Frequenzlinie im Spektrum, also ein Sinuston. Durch einen solchen Ton wird ein bestimmter Bereich auf der BM angeregt ("Sinusantwort"). Diese Sinusantwort $v_{BM}(x)$ bestimmt eine "charakteristische Erregungsbreite". In Analogie zu den Pulsantworten verbreitern sich die Erregungsantworten auf der BM erst, wenn die der Bandbreite entsprechende Erregungsbreite - wiederum unter Konstanthaltung der Energie - größer als die charakteristische Erregungsbreite wird.

Charakteristische Erregungsbreite

Physikalisch ergibt sich die charakteristische Erregungsbreite auf der BM durch die Wellenlänge der Wanderwelle am charakteristischen Ort. Die Wellenlänge und somit auch die charakteristische Erregungsbreite ist - außer bei niedrigen Frequenzen bzw. nah dem Apex - nahezu unabhängig von der Anregungsfrequenz (beim Menschen ca. 1 mm). Den konstanten Wellenlängen entsprechen aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit der Bestfrequenzen vom Ort jedoch unterschiedliche Frequenzverhältnisse. Zu gleichen

charakteristischen Erregungsbreiten an verschiedenen Stellen der BM gehören gleiche relative Bandbreiten der Erregung. Dies erklärt das gleichmäßige Anwachsen der Frequenzgruppenbreiten mit der Mittenfrequenz.

Die frequenzunabhängigen Wellenlängen bei exponentiell über dem Ort verteilten Bestfrequenzen drücken sich in einer Verschiebungsähnlichkeit der BM-Übertragungsfunktionen aus: setzt man eine sinnvolle Übertragungsfunktion vom Stapes zu einer Stelle auf der BM an, so erhält man Übertragungsfunktionen zu anderen Stellen durch einfache Verschiebung entlang der Ortsachse. Wenn die Entstehung der Frequenzgruppen nur von diesen speziellen Abstimmungseigenschaften hervorgerufen wird, müssten sich die Frequenzgruppen auch ohne das benutzte Modell ergeben. Zur Überprüfung dieser Annahme wurden die Übertragungsfunktionen nach Abb. 3 verwendet und die Erregungsverteilungen im Frequenzbereich berechnet. Tatsächlich ergeben sich auch auf diese Weise wieder in etwa Verläufe wie in Abb. 1.

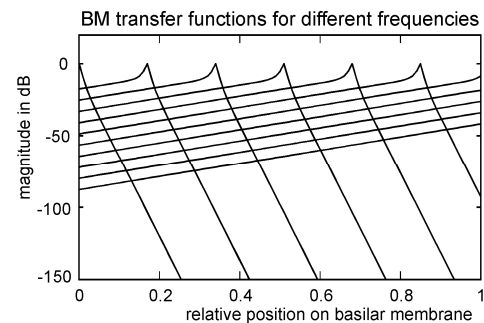


Abbildung 3: Verschiebungsähnliche Übertragungsfunktionen zu verschiedenen Stellen der Basilarmembran (Parameter: auf logarithmischer Skala äquidistante Frequenzen).

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die charakteristischen Abstimmungseigenschaften der BM führen unabhängig von genauen Modelldetails zu Erregungsverläufen wie in Abb. 1 (Sinus-Impuls-Analogie) und damit zu Frequenzgruppen. Darüber hinaus entsprechen die mit dem physikalischen Modell berechneten Erregungsverläufe überraschend gut Erregungsverläufen, die sich aus psychoakustisch gewonnenen auditorischen Filtern schätzen lassen.

Zur Erklärung des Zustandekommens von Frequenzgruppen benötigt man offenbar keine nichtlinearen Mechanismen wie z. B. Verdeckung, auch wenn die Begriffe Frequenzgruppen und Verdeckung meist in einem Atemzug genannt werden. Frequenzgruppen sind also primär keine Folge von Verdeckung. Sie treten aber bei Verdeckungsexperimenten besonders deutlich in Erscheinung, was zu der engen Verbindung der Begriffe geführt hat.

Literatur

- [1] Zwicker, E.; Fastl, H.: Psychoacoustics, Springer (1999)
- [2] Moore, B.C.J., Psychology of hearing, Academic Press (1997)
- [3] de Boer, E. (1980). "Auditory Physics. Physical principles in hearing theory. I.", Physics Reports **62**(2): 87-174.