

Zwicker, E., & Goldkeller, R.
Das Ohr als Nachrichteneempf.
Vorl.

1967 2. Aufl. Stgt.
92

VII. Skalen der Tonhöhe

Bild 35,1 zeigt oben die 32 mm lange Strecke der Basilarmembran und darunter eine lineare Skale, die die gleichmäßige Verteilung der Haarzellen auf der Basilarmembran andeutet. Die vierte Skale gibt die Beziehung zwischen der Frequenz eines Tones und dem Ort der Haupterregung an. Diese Skale ist unterhalb 500 Hz etwa linear und oberhalb 500 Hz etwa logarithmisch. Diese Skale gibt die Möglichkeit, die nächsten Skalen zu berechnen.

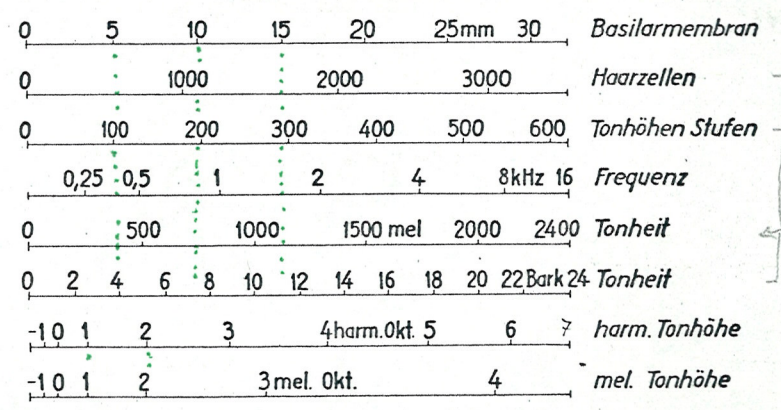


Bild 35,1 Die natürlichen Skalen der Basilarmembran.

Bild 24,4 gibt den eben wahrnehmbaren Frequenzhub als Funktion der Frequenz an. Unterhalb 500 Hz ist ein Frequenzhub Δf von 1,8 Hz eben hörbar, oberhalb 500 Hz ein relativer Frequenzhub von etwa 3,5‰. Die gesamte Schwankung der Frequenz ist jeweils doppelt so groß. Der doppelte Frequenzhub ist somit gleich der Breite einer Frequenzstufe. Unterhalb 500 Hz finden wir etwa 140 unterscheidbare Frequenzstufen und ebenso viel Tonhöhenstufen.

Zwischen 500 Hz und 16 kHz finden wir 480 unterscheidbare Frequenzstufen bzw. Tonhöhenstufen. Die Frequenzstufen sind unterhalb 500 Hz etwa gleich breit, oberhalb 500 Hz nimmt ihre Breite etwa proportional der Frequenz zu.

Berechnen wir mit Hilfe der Skale der Frequenz die Skale der Stufen, so finden wir eine lineare Skale. Die insgesamt 620 Stufen verteilen sich gleichmäßig auf die ganze Länge der Basilarmembran. Dabei hat jede Stufe eine

Breite von $\frac{32000 \mu\text{m}}{620} = 52 \mu\text{m}$. Somit kann eine Frequenzschwankung wahr-

genommen werden, wenn sich dabei der Ort der Haupterregung auf der Basilarmembran um $52 \mu\text{m}$ verschiebt. Dabei überstreicht die Haupterregung in jeder Haarzellenreihe etwa 6 Haarzellen, die je einen mittleren Abstand von

$\frac{32000 \mu\text{m}}{3500} = 9 \mu\text{m}$ voneinander haben.

Da die Haarzellen, mit denen das Gehör den Ort der Haupterregung feststellt, längs der ganzen Basilarmembran vom ovalen Fenster bis zum Cortischen Organ gleichmäßig verteilt sind, ist es verständlich, daß die Skale der

Frequenzstufen auf der Basilarmembran eine lineare Teilung hat. Damit wird rückwärts die Vermutung gestärkt, daß die Haupterregung dicht beim Ort maximaler Schwingungsamplitude liegt, und damit wird auch die Messung bzw. Berechnung des Ortes bestätigt, an dem ein Ton die Basilarmembran am stärksten zu Schwingungen anregt.

Die 5. Skale ist mit Hilfe von Bild 34,1 gewonnen und gibt an, wie das Gehör den Ort der Haupterregung der Basilarmembran in eine Tonhöhenempfindung umsetzt. Auch diese Skale, die den Bereich von 0 bis 2400 mel umfaßt, ist linear. Das heißt aber, daß sich der Abstand der Haupterregung vom Helicotrema halbiert, wenn die Tonheit auf die Hälfte absinkt. Das heißt aber auch, daß sämtliche Tonheitsstufen gleich groß sind, nämlich $\frac{2400 \text{ mel}}{620} = 3,9 \text{ mel}$. Gleichgroße Empfindungsstufen zu haben, ist eine bemerkenswerte Eigenschaft der Tonheit.

Da 100 mel = 1 Bark sind, hat auch mit dieser Einheit die Tonheit längs der Basilarmembran eine lineare Skale. Sie ist in Bild 35,1 als 6. Skale eingezeichnet. Wir hätten sie auch aus der Frequenzskale über die Breite der Frequenzgruppen gewinnen können. Eine Verschiebung der Frequenz eines Tones um eine Frequenzgruppe bewirkt eine Verschiebung der Haupterregung der Haarzellen längs der Basilarmembran um $\frac{32 \text{ mm}}{24} = 1,3 \text{ mm}$.

Die 7. und die 8. Skale geben die harmonische und die melodische Tonhöhe wieder.

Die Skale der harmonischen Tonhöhe bringt gegenüber der Skale der Frequenz nichts Neues. Die harmonische Tonhöhe ist der Logarithmus der Frequenz, und da in der 3. Skale die Frequenz bereits mit logarithmischer Teilung eingetragen ist, unterscheiden sich die Skalen der Frequenz und der harmonischen Tonhöhe nur durch die Bezifferung. Jede Oktave umfaßt ein doppelt so breites Frequenzband wie die vorhergehende Oktave. Das bedeutet, daß unterhalb 500 Hz jede Oktave auch doppelt soviel Tonheitsstufen umfaßt wie die vorhergehende, daß aber oberhalb 500 Hz jede beliebige Oktave etwa 100 Tonheitsstufen enthält.

Da die melodische Tonhöhe von der Tonhöhenempfindung abgeleitet worden ist, entspricht ein Melodiesprung um eine melodische Oktave abwärts einer Halbierung der Tonheit. Dabei umfaßt jede beliebige Oktave immer doppelt soviel Tonheitsstufen wie die nächst niedrige Oktave. Wenn die Intervalle gleichweit klingen, so gilt das für die harmonische Tonhöhe nur unterhalb 500 Hz. Mit zunehmender Frequenz werden die harmonischen Intervalle immer enger. Nur die Intervalle der melodischen Tonhöhen-skale werden unabhängig von ihrer Tonhöhe gleichweit empfunden. Die Frequenzen der Töne am Anfang und am Ende der höchsten hörbaren melodischen Oktave verhalten sich nicht wie 1 : 2, sondern wie 1 : 10.

Transponiert man eine Melodie aus tiefer Lage harmonisch korrekt in eine hohe Tonlage, so wird sie melodisch zu eng. Transponiert man sie aber melodisch korrekt, so wird sie harmonisch unbrauchbar. Diese Diskrepanz stört in

Dica
4/30

vgl. Tab.
S. 94

bei Dica 102

Zwicker, E., & Feldtkeller, R.
Das Ohr als Nachrichtempfänger.

Vorl.
1967 2. Aufl.

der Regel beim Musizieren nicht, weil Grundtöne weit oberhalb von 1 kHz nicht oder nur sehr selten verwendet werden.

Die folgende Tabelle 35,I enthält die Zusammenhänge zwischen den gefundenen Stufen und der Verschiebung der Haupterregung längs der Basilarmembran:

Tabelle 35,I

| | | | | | |
|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Gesamtlänge | ≈ 24 Bark | ≈ 32 mm | ≈ 620 Stufen | ≈ 2400 mel | ≈ 3500 Haarzellen |
| 1 Bark | ≈ 1,3 mm | ≈ 25 Stufen | ≈ 100 mel | ≈ 150 Haarzellen | |
| 1 mm | ≈ 20 Stufen | ≈ 75 mel | ≈ 110 Haarzellen | | |
| 1 Stufe | ≈ 3,9 mel | ≈ 5,5 Haarzellen | | | |
| 1 mel | ≈ 1,5 Haarzellen | | | | |

*vgl. Dia 4/30
[acus 2/1967 S.92]*

VIII. Eben wahrnehmbare Schallpegeländerungen

Kapitel IV enthält bereits eine Teilantwort auf die Frage, welche kleinsten Intensitätsänderungen im Innern der Hörfläche vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden können. Sie kommen dort durch das Hinzutreten eines Testtones zu einem vorhandenen Störschall zustande. Dabei werden Störschall und Testschall als inkohärent vorausgesetzt. Läßt man diese Voraussetzung fallen, so kommt man zu Intensitätsänderungen, die durch Vergrößern oder Verkleinern des Störschalles selbst zustandekommen. Der Testschall wird dabei entbehrlich.

Das folgende Kapitel gibt zunächst Aufschluß über die eben wahrnehmbaren Größen dieser Intensitätsänderungen und stellt dann die Beziehungen zwischen ihnen und den in Kapitel IV anhand der Mithörschwellen behandelten Intensitätsänderungen her.

36. Unterschiedsschwellen des Pegels von Tönen

Die meisten Töne, die wir hören, sind keine Dauertöne, sondern Töne, deren Frequenz und deren Amplitude Funktionen der Zeit sind. Die eben wahrnehmbaren Frequenzänderungen wurden in Abschnitt 24 beschrieben. Wie dabei sinusförmig in der Frequenz modulierte Töne untersucht wurden, sollen nun zur Bestimmung der eben wahrnehmbaren Schallpegeländerungen sinusförmig in der Amplitude modulierte Töne untersucht werden. Wieder müssen wir damit rechnen, daß die Antwort auf diese Frage von der Höhe der Frequenz und vom Schallpegel des untersuchten Tones sowie von der Modulationsfrequenz abhängt.

Wir wollen uns zunächst auf die Abhängigkeit vom Schallpegel konzentrieren und sehen, wie bei einer Trägerfrequenz von 1 kHz und einer Modulationsfrequenz von etwa 4 Hz die kleinsten wahrnehmbaren Amplitudenänderungen vom Schallpegel abhängen. In Bild 36,1 ist diese Abhängigkeit dargestellt. Wir sehen, daß der eben wahrnehmbare Modulationsgrad mit wachsendem Pegel sinkt, d. h. unser Gehör wird mit wachsendem Schalldruck

immer empfindlicher gegen Amplitudenänderungen von Sinustönen. Bei einem niedrigen Pegel von 20 dB liegt der eben wahrnehmbare Modulationsgrad bei einem Wert von etwa 10%. Bei einem Pegel von 100 dB erreicht er etwa den Wert von 1%. Innerhalb des Schallpegel-Bereiches von 20 dB bis etwa 100 dB sinkt demnach die eben wahrnehmbare Amplitudenschwankung von Sinustönen um den Faktor 10 ab. Das Gehör ist bei großen Pegeln also sehr empfindlich gegen Amplitudenschwankungen von Sinustönen.

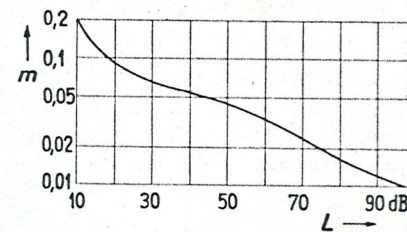


Bild 36,1 Der eben wahrnehmbare Modulationsgrad eines 1 kHz-Tones als Funktion des Pegels, Modulationsfrequenz 4 Hz.

Der typische Verlauf, wie er für den 1 kHz-Ton in Bild 36,1 angegeben ist, gilt im wesentlichen auch für andere Frequenzen. Wir können dies erkennen, wenn wir die eben wahrnehmbare Amplitudenmodulation in der Hörfläche als Amplitudenmodulationsschwellen darstellen, so wie wir in Kapitel V die Frequenzmodulationsschwellen dargestellt haben. Auch hierbei müssen wir uns auf eine Modulationsfrequenz festlegen und wählen wiederum eine Frequenz von 4 Hz. Wir verbinden diejenigen Punkte in der Hörfläche miteinander, an denen ein bestimmter Modulationsgrad eben hörbar wird. So entstehen die Modulationsschwellen, die Grenzkurven darstellen und Gebiete in der Hörfläche voneinander trennen, in denen die Modulation wahrnehmbar ist bzw. nicht wahrnehmbar ist. Bild 36,2 zeigt den Verlauf der Modulationsschwellen für verschiedene Modulationsgrade. Die Werte der Modulationsgrade sind an den Kurven als Parameter angeschrieben. Die Abhängigkeit des Modulations-

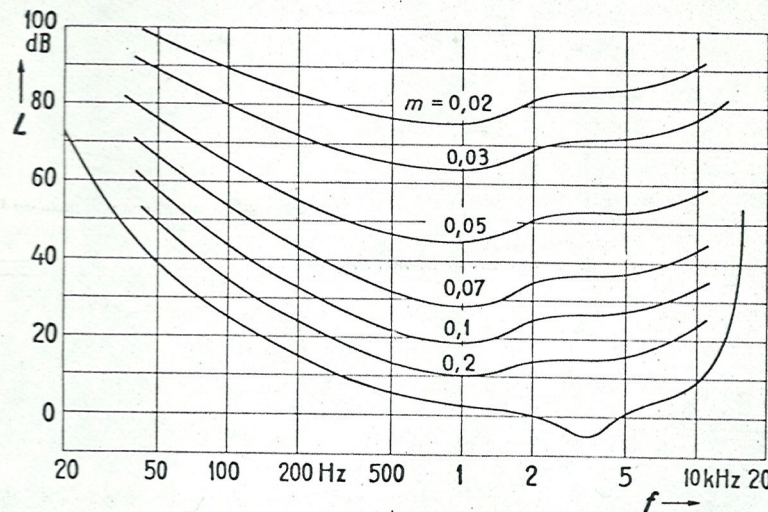


Bild 36,2 Amplitudenmodulationsschwellen in der Hörfläche, Modulationsfrequenz 4 Hz.

*Dia
4/102*