

## Die Helmholtzsche Theorie des Hörens

Im Innenohr des Menschen ist ein dünnes Häutchen, die Basilarmembran, ausgespannt, die ungefähr 30 mm lang, an dem einen Ende etwa 0,5 mm und an dem anderen Ende etwa 0,05 mm breit ist. Helmholtz hatte sich vorgestellt, daß die Querfasern dieses Häutchens ähnlich den Saiten eines Klaviers abgestimmt sind, am breiten Ende auf die tiefsten und am schmalen Ende auf die höchsten hörbaren Frequenzen. Ein vom Ohr wahrgenommener Ton sollte nun seiner Frequenz entsprechend jeweils nur eine eng begrenzte Gruppe von Fasern zum Schwingen anregen können. Der Hörnerv stellt dann fest, welche Fasergruppe schwingt, und erkennt an ihrem Ort auf der Basilarmembran die Tonhöhe. Diese leicht einleuchtende Theorie entspricht leider nicht den wirklichen Verhältnissen, wie die sorgfältigeren Untersuchungen am Innenohr - vor allem von *Bekegy* seit 1930 - ergeben haben.

Auch die Ergebnisse der Untersuchungen von *Oetinger* widersprechen den *Helmholtz*schen Vorstellungen. Das sei nun näher erläutert:

Nach *Helmholtz* arbeitet das Innenohr im Prinzip wie ein Spektralapparat in der Optik. Dieser empfängt Licht, das eine Mischung von Wellenlängen bzw. Frequenzen eines mehr oder weniger ausgedehnten Spektralbereiches umfaßt, zerlegt diese Mischung und bildet die verschiedenen Frequenzbereiche mit ihren entsprechenden Intensitäten an verschiedenen Orten des Spektrums ab. Er verwandelt die Intensität als Funktion der Frequenz in die Intensität als Funktion des Ortes, wobei jedem Ort im Spektrum eine bestimmte Frequenz zugeordnet ist. Analoges geschieht nach *Helmholtz* im Innenohr: Die einzelnen Töne eines vom Ohr wahrgenommenen Tongemisches regen ihrer Intensität entsprechend die Fasern der Basilarmembran an verschiedenen Orten zu Schwingungen mit verschiedener Amplitude an. *Bild 3* gibt für unseren Bezugs- und Testton die Amplitudenverteilung in Abhängigkeit von der Frequenz wieder. Für diese Amplitudenverteilungen erhalten wir wieder Glockenkurven, die nach *Helmholtz* gleichzeitig die örtliche Amplitudenverteilung über die gespannten Fasern der Basilarmembran wiedergeben. Ein Instrument, das eine Frequenzmischung so zerlegt, daß man die Amplitudenverteilung in Abhängigkeit von der Frequenz angeben kann, nennt man einen *Fourier-Analysator*. Die Zerlegung bezeichnet man als *Fourier-Zerlegung*.

Nach *Helmholtz* könnte man das Ohr also als einen *Fourier-Analysator* ansehen. Er würde die beiden Spektren des Bezugs- und des Testtones gerade dann noch deutlich unterscheiden, wenn sich die Mittenfrequenzen, d. h. die Frequenzen, die zu den Maxima der Verteilungskurven in *Bild 3* gehören, etwa um die Breite  $\Delta f = f_1$  der beiden Spektren unterscheiden.

*Bild 3* zeigt die Lage der beiden Spektren in diesem kleinsten Abtand. Dieser Wert  $\Delta f$  wäre dann aber gerade der Wert, den *Oetinger* gemessen hat und der in *Bild 2* in Abhängigkeit von der Impulsdauer aufgetragen ist. Die Theorie zeigt nun, daß für die Impulsdauer  $t_1$  und die Breite  $f_1$  des Amplitudenspektrums unabhängig von der Frequenz immer die Beziehung  $f_1 \cdot t_1 = 1$  gültig ist. Damit gilt aber auch wegen  $f_1 = \Delta f$  immer die Beziehung  $\Delta f \cdot t_1 = 1$ . Ihr entspricht in *Bild 2* die gestrichelt eingezeichnete Gerade. Wäre das Ohr also nach *Helmholtz* ein *Fourier-Analysator*, dann müßte der soeben noch wahrnehmbare Frequenzunterschied in Abhängigkeit von der Tondauer aus der gestrichelten Geraden in *Bild 2* ablesbar sein. Die Messungen von *Oetinger* haben aber etwas ganz anderes ergeben: Das Frequenz-Unterscheidungsvermögen des Ohres ist für die gleiche Tondauer für verschiedene Frequenzen verschieden und es ändert sich - vor allem bei längeren Tondauern - viel weniger mit der Tondauer, als es aus der *Helmholtz*schen Theorie zu erwarten ist. Wir dürfen aus diesen Messungen folgern, daß die Gesetze, nach denen das Gehör die Tonhöhe kurzer Töne bestimmt, sich von denen eines *Fourier-Analysators* wesentlich unterscheiden. Das Gehör ist besonders bei kurzen Tönen mit Frequenzen von 1 kHz und darunter einem *Fourier-Analysator* weit überlegen. Es registriert schon zehnmal kleinere Frequenzänderungen.

S. 519

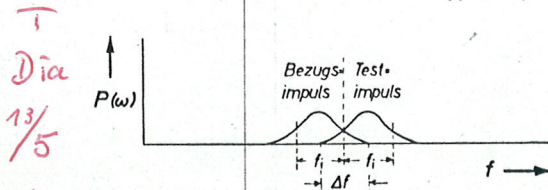


Bild 3: Die Amplitudenverteilung in Abhängigkeit von der Frequenz bei dem Bezugs- und Testimpuls. Die beiden Impulse sind hier in dem kleinsten Abstand gezeichnet, bei dem mit einem *Fourier-Analysator* die beiden Spektren gerade deutlich unterschieden werden können.

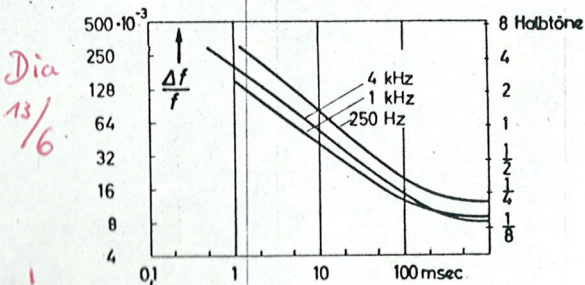


Bild 4: Der eben hörbare relative Frequenz-Unterschied  $\Delta f/f$  in Abhängigkeit von der Tondauer bei verschiedenen Frequenzen. Die rechte Ordinatenachse ist in Halbtonintervalle eingeteilt.

## Das Ohr beim Hören von Läufen in einem Musikstück

Wir wollen jetzt die Untersuchungen von *Oetinger* musikalisch interpretieren. Bekanntlich werden die Intervalle der Tonleiter durch relative Frequenzdifferenzen gebildet. Wir zeichnen zunächst *Bild 2* so um, daß wir nicht die absolute Frequenzdifferenz  $\Delta f$ , sondern die relative Frequenzdifferenz  $\Delta f/f$ , d. h. die Frequenzdifferenz, bezogen auf die Frequenz selbst, als Ordinate wählen (*Bild 4*). Die Werte für 250 Hz liegen nun höher als die für 1 kHz und 4 kHz, das Ohr nimmt bei 1 kHz kleinere relative Frequenzunterschiede wahr als bei 4 kHz und bei 4 kHz kleinere als bei 250 Hz. Noch anschaulicher werden die Ergebnisse, wenn wir die Ordinatenachse in *Bild 4* mit Halbtonintervallen beziffern. Einem Halbtonintervall entspricht in der temperierten Skala eine relative Frequenzdifferenz von  $59 \cdot 10^{-3}$ . Aus den Kurven von *Bild 4* lesen wir ab, daß bei einer Tondauer von 60 msec (Zweiunddreißigstel-Noten bei  $\text{♩} = 60$ ) die Unsicherheit in der Tonhöhen-Empfindung bei 250 Hz etwa einen halben Halbton, bei 1 und 4 kHz etwa einen viertel Halbton beträgt. Somit sind Zweiunddreißigstel-Noten bei dem angegebenen Tempo in den beiden Oktaven von  $c_1$  (262 Hz) bis  $c_3$  (1066 Hz), die die Sopranstimme umfaßt, eben noch sinnvoll, dagegen nicht in den beiden Oktaven von  $c_{-1}$  (65 Hz) bis zum  $c_1$  der Baßstimme. Hier erreicht und übersteigt die Unsicherheit der Tonhöhen-Empfindung das Halbtonintervall<sup>2)</sup>.

Um Mißverständnisse auszuschließen, müssen zu diesem Ergebnis noch Vorbehalte gemacht werden: nur wenn man auf Streichinstrumenten oder Holzblasinstrumenten schnelle Läufe spielt, entspricht die Dauer der Töne dem

<sup>2)</sup> Diese Überlegungen gelten für obertonarme Klänge. Meist helfen uns die Obertöne, die Tonhöhe tiefer Töne genauer zu erkennen.

Feldtkeller, Richard  
 Welche Tonhöhen-Unterschiede kann unser Ohr noch wahrnehmen?  
 1961 Umschau in Wiss. u. Techn. 61, 1961, S. 518-521