

(Aus dem Psychologischen Institut der Universität Berlin.)

Über Höhenänderungen bei Schwebungen.

Von

Margarete Eberhardt.

Mit 2 Textabbildungen.

Inhalt.

- a) Nachprüfung der *Helmholtz*schen Theorie am Tonstärkemesser von *Lewin* (S. 336).
- b) Über Höhenänderungen bei subjektiven Schwebungsbeobachtungen (S. 342).
 - 1. Bisherige Beobachtungen (S. 342).
 - 2. Neue Untersuchungen (S. 342).

a) Nachprüfung der *Helmholtz*schen Theorie am Tonstärkemesser von *Lewin*.

Die Superposition von zwei Sinuswellen sehr wenig verschiedener Frequenz ergibt eine Schwebungskurve, in der die Amplitude sich nur langsam ändert und größere Strecken des Verlaufes von der Sinusform sehr wenig abweichen. Die verschiedenen Strecken dieser resultierenden Welle haben jedoch verschiedene Schwingungszahl. Bei *Helmholtz*¹⁾ findet sich zuerst eine Berechnung dieser Zahl für zwei ausgezeichnete Stellen des Verlaufs, nämlich das Maximum und das Minimum der Resultierenden. Soweit handelt es sich um eine rein mathematische Angelegenheit²⁾. Daß irgendein physischer Gegenstand genau auf die Schwebungswelle als eine einzige und gemäß ihren Eigenschaften reagiert, ist bisher — wie es scheint — experimentell nicht nachgewiesen worden³⁾.

Die Nachprüfung des *Lewin*schen Apparates zur Messung von Tonintensitäten bot mir den Anlaß zu einer solchen Untersuchung⁴⁾. Ob

¹⁾ Lehre von den Tonempfindungen⁴, S. 654f.

²⁾ Die von *Helmholtz* gegebene mathematische Ableitung wird in neuerer Zeit vielfach abgelehnt; vgl. *Waetzmann* in *Zeitschr. f. Physik* 1911 oder *Physikal. Zeitschr.* 18, 560f. 1917; ferner *Busse* in *Aberhaldens Handbuch d. biolog. Arbeitsmethoden* Abt. V, Teil 7, H. 1, S. 183. 1920.

³⁾ *S. Taylor*, *Phil. Mag.* (4), 44 (1872) weist darauf hin, daß die mit dem Phonoautographen von *König* aufgenommenen Schwebungskurven (vgl. *König*, *Quelques expériences d'acoustique* 1882) der *Helmholtz*schen Rechnung entsprechen.

⁴⁾ Siehe *Lewin*, Über einen Apparat zur Messung von Tonintensitäten, in diesem Band S. 317 ff.

die Membran dieses Apparates die Amplituden verschieden starker Schallwellen proportional wiedergibt, sollte dadurch festgestellt werden, daß bei Erregung durch zwei Sinuswellen von eng benachbarter Schwingungszahl die Amplitude im Schwebungsmaximum und im Minimum, außerdem die Amplitude jeder der beiden Sinuswellen für sich gemessen wurde. Wir erwarteten (unter Voraussetzung proportionalen Reagierens der Membran) die Minimumamplitude gleich der Differenz der beiden Einzelamplituden und den Maximausschlag ihrer Summe gleich zu finden. *Lewin*¹⁾ hat berichtet, wie sich diese Erwartung bei geeignetem Verfahren bestätigte. Aber, solange die Schwebungsmessungen ohne besondere Vorsichtsmaßregeln angestellt wurden, wichen ihre Ergebnisse beträchtlich von dem Erwarteten ab. Diese Abweichungen wurden aufgeklärt durch die Annahme, daß die Membran bei langsamen Schwebungen auf die annähernd sinusförmige Resultierende der beiden Sinuswellen und nicht auf eine jede von ihnen für sich, daher auch beim Maximum und beim Minimum (also verschiedenen Schwingungszahlen der Resultierenden) verschieden empfindlich reagiere.

Helmholtz berechnet speziell den Fall, wo die schwebenden Töne von ungleicher Amplitude A und B und wenig verschiedener Frequenz m und n sind, und wo überdies $m - n$ eine im Vergleich zu m und n kleine Größe ist. Er erhält als Schwingungszahl des resultierenden schwebenden Tones im Maximum:

$$\frac{mA + nB}{A + B} = n + \frac{(m - n)A}{A + B},$$

im Minimum:

$$\frac{mA - nB}{A - B} = n + \frac{(m - n)A}{A - B}^2,$$

und folgert daraus:

„Im Maximum liegt die Tonhöhe des veränderlichen Tones zwischen denen der beiden einzelnen Töne. Während des Minimums der Tonstärke dagegen ist sie höher als beide Einzeltöne, wenn der stärkere Ton gleichzeitig der höhere ist, dagegen tiefer als beide, wenn der stärkere Ton der tiefere ist.“

¹⁾ Siehe *Lewin* a. a. O. S. 323.

²⁾ In bezug auf die Lage des Maximum- und Minimumtones (diese Bezeichnung möge für den schwebenden Ton im Stadium seiner größten und geringsten Intensität gestattet sein) sind auch andere Forscher zu den gleichen Ergebnissen wie *Helmholtz* gekommen; vgl. *S. Taylor*, *Phil. Mag.* (4), 44 (1872) und *Terquem et Boussinesq*, *Journ. de Phys.* 4 (1875); hingewiesen sei auf die Tabelle der Maximum- und Minimumtöne bei *Auerbach*, *Akustik*, S. 613 und besonders auf die graphische Darstellung ebendort S. 614, welche die Lage der Maximum- und Minimumtöne zueinander bei verschiedenem Intervall und Amplitude der Primärtöne veranschaulicht.

Aus den *Helmholtz*schen Formeln lassen sich somit die folgenden Sätze ableiten:

1. Die Minimumfrequenz der Resultierenden liegt nie zwischen den beiden Primärtönen, sondern stets außerhalb derselben auf der Seite des lautereren Tones.

2. Die Maximumfrequenz liegt stets zwischen beiden Primärtönen und ebenfalls dem lautereren Primärtöne näher.

Ich zeige zunächst an einem Beispiel, wie die Resonanz der Membran auf die Schwebungsergebnisse der Amplitudenmessung im Minimum beeinflussen muß:

Liegen die beiden Primärtöne auf derselben Seite des Membraneigentones und der stärkere weiter von dem Eigenton entfernt, so liegt der „Minimumton“ außerhalb der Primärtöne auf der Seite des stärkeren und deshalb weiter vom Eigenton entfernt als beide (vgl. die folgende Abb.).

Wenn nun die Membran nicht auf die beiden Einzeltöne, sondern auf die Resultierende als einheitliche Welle reagiert, so muß es sich im Ergebnis der Amplitudenmessung geltend machen, daß die Schwingungszahl dieser Resultierenden — im eben besprochenen Fall der Minimumton — weiter als die beiden Primärschwingungen von der Eigenfrequenz der Membran entfernt liegt: Die Amplitude muß zu klein ausfallen.

Wird das Intensitätsverhältnis der Primärtöne vertauscht, so daß der dem Membraneigentone näher liegende der stärkere wird, so muß der Minimumton nach *dieser* Außen-



Abb. 1.

seite „hinüberspringen“ und dann dem Eigenton der Membran näher liegen als die beiden Primärtöne: Die Messung der Minimumamplitude muß zu große Werte ergeben. Liegen die beiden Primärtöne auf verschiedenen Seiten des Membraneigentones, so ergeben sich je nach dem Intensitätsverhältnis der beiden Primärtöne Verhältnisse, die man nach dem Gesagten ohne weiteres ableiten kann.

Aus Kurven, wie sie in der Schrift von *Lewin* abgebildet sind, geht hervor, in welchem hohem Grade die Ausschläge der Membran in der Nähe ihres Eigentones von selbst kleinen Frequenzunterschieden einwirkender Wellen (und also auch von der verschiedenen Lage des Minimumtones) abhängig sind. Die Resonanz ist außerordentlich scharf¹⁾, wie das starke Abfallen der Resonanzkurven zu beiden Seiten des Resonanzmaximums zeigt.

Die folgenden Messungen, bei denen die Intensität²⁾ des zuerst sehr viel stärkeren Tones 2 allmählich herabgesetzt wurde, lassen deutlich

¹⁾ Die auf S. 341 mitzuteilenden Ergebnisse sind bei einer Resonanzscharfe der Membran gewonnen, bei der auf 1 Schwingung Abstand vom Eigentone der Ausschlag von 494 mm um 80 mm zurückging.

²⁾ Strenggenommen bezieht sich die *Helmholtz*sche Formel auf die Amplituden der erregenden Wellen, nicht auf die der reagierenden Membran. Da nun die beiden Primärtöne ein wenig verschieden zu der Eigenfrequenz der Membran liegen, so gibt das Verhältnis der Membranamplituden (welche in der folgenden Tabelle stehen) nicht genau das Verhältnis der einwirkenden Amplituden wieder. Da

die wechselnde Außenlage des Minimumtones dadurch erkennen, daß die gemessenen Minima, welche anfangs hinter den errechneten zurückstehen (negative Differenzwerte), sofort zu hohe Beträge zeigen (positive Differenz gegenüber den errechneten Beträgen), sobald (im 3. Versuch) der anfangs stärkere Ton 2 der leisere wird

Ton 1	Ton 2	Minimum:		Differenz
		gemessen	errechnet	
mm	mm	mm	mm	mm
136	329	147	193	— 46
101	195	71	94	— 23
94	62	40	32	+ 8
97	36	64	61	+ 3
101	20	84	81	+ 3

Die Zahlen geben bei diesen wie bei allen weiteren Meßergebnissen den Ausschlag nach Abzug der Spaltbildbreite an; sie sind das Mittel aus drei Messungen. Bei den obigen Messungen betrug die mittlere Variation (m. V.) weniger als 1%. Die Schwebungsfrequenz war 0,3 bis 0,6 pro Sekunde¹⁾.

Die obigen und die nächstfolgenden Messungen wurden gemacht, ehe das Erklärungsprinzip — Resonanz der Membran auf die Resultierende — gefunden war, und daher unterblieb leider die genaue Bestimmung des Membraneigentones und der Primärfrequenzen; deren Wert für die Deutung der Meßergebnisse erkannte ich erst später. Der Verlauf der Meßreihen ist jedoch so streng gesetzmäßig, daß man umgekehrt aus ihnen alles Notwendige über jene Daten entnehmen kann.

Ton 1	Ton 2	Maximum:		Differenz	Minimum:		Differenz
		gemessen	errechnet		gemessen	errechnet	
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
387	29	404	416	— 12	385	358	+ 27
386	37	399	423	— 24	383	349	+ 34
387	47	397	434	— 37	378	340	+ 38
384	52	399	436	— 37	372	332	+ 40
389	71	406	460	— 54	370	318	+ 52
366	87	387	453	— 66	349	279	— 70
371	103	397	474	— 77	346	268	+ 78
369	113	403	482	— 79	347	256	+ 91
372	127	404	499	— 95	342	245	+ 97
372	128	402	500	— 98	344	244	+ 100

(m. V. weniger als 1%; Schwebungsfrequenz 0,3 bis 0,6 pro Sekunde.)

Da die Minimausschläge stets zu große Beträge ergeben und Ton 1 durchweg stärker ist als Ton 2, so muß Ton 1 dem Membraneigentone näher liegen als

es aber in den folgenden Überlegungen nur auf recht grobe Amplitudenverhältnisse ankommt, so dürfte einem „stärker“ oder „schwächer“ der Membranamplituden in jedem Falle das gleiche Verhältnis für die Erregeramplituden entsprechen haben.

¹⁾ Vgl. Lewin a. a. O. S. 320f. über Leitungsanordnung, Psychotechnik des Messens usw.

Ton 2, und der Minimumton näher als beide Primärtöne, zwischen Ton 1 und dem Membraneigentone (vgl. die Abb. 2).

Dann ergibt sich aus der *Helmholtz*schen Formel, daß bei Annäherung der Intensität von Ton 2 an die von Ton 1 der Minimumton sich allmählich von 1 fortbewegen und noch mehr an den Membraneigentone annähern, daß also der jeweils gemessene Minimumausschlag den errechneten Betrag in immer höherem Maße übertreffen muß. Die Tabelle zeigt dies deutlich in dem gesetzmäßigen Ansteigen der positiven Differenzen für die Minimumausschläge¹⁾.

Aus derselben relativen Lage der Primärtöne zum Eigentone ergibt sich auch das Verhalten der Maximumamplituden. Der Maximumton muß zwischen Ton 1 und 2, näher an Ton 1 liegen. Da der Maximumton dem Eigentone ferner liegt als der sehr starke Primärtone 1, so wird die Resonanz der Membran zu klein ausfallen. In der Tat sind in der Tabelle die Maximumdifferenzen stets negativ. Wird der Ton 2 allmählich verstärkt, so verschiebt sich der Maximumton nach Ton 2 hin, d. h. von Ton 1 und damit auch vom Eigentone weiter fort. Die Maximumamplituden müssen nach und nach in immer höherem Grade zu klein ausfallen; auch dies wird durch die Messungen bestätigt.

Bei den folgenden Meßreihen blieb die Intensität der Primärtöne angenähert konstant, während ihre Schwingungszahl um kleine Beträge

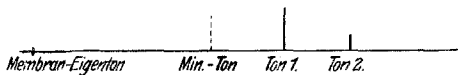


Abb. 2.

geändert wurde²⁾. Da der Eigentone der Membran genau festgestellt war — er lag 2,5 Schwingungen unter g^2 — und auch die Frequenzen

der Primärtöne genau bekannt sind, so kann man sich (wie ich wohl nicht näher auszuführen brauche) leicht klarmachen, daß die Ergebnisse der Minimummessungen mit dem Erklärungsprinzip übereinstimmen. Auch das Verhalten der Maximumdifferenzen ist in den Hauptzügen der Theorie gemäß, wenn man nur berücksichtigt, daß Ton 1 sehr viel lauter ist als Ton 2 und bei reiner Superposition deshalb die resultierende Amplitude zum größeren Teil bestimmt.

Ton 1	Ton 2	Maximum	Diff.	Minimum	Diff.
mm	mm	mm	mm	mm	mm
372 (1,0 Schw. unter g^2)	148 (2,1 über g^2)	439 (520)	— 81	322 (224)	+ 98
322 (3,9 Schw. unter g^2)	129 (5,0 unter g^2)	364 (451)	— 87	249 (193)	+ 56
297 (4,3 Schw. unter g^2)	91 (7,0 unter g^2)	341 (388)	— 47	242 (206)	+ 36
214 (6,6 Schw. unter g^2)	117 (6,0 über g^2)	352 (331)	+ 21	80 (97)	— 17
174 (8,0 Schw. unter g^2)	157 (2,0 über g^2)	372 (331)	+ 41	11 (17)	— 6
148 (mehr als 10 Schw. unter g^2)	148 (2,1 über g^2)	336 (296)	+ 40	0 (0)	0

(m. V. etwa 2%; Membraneigentonehöhe 2,5 Schw. unter g^2 .)

¹⁾ Wäre Ton 2 noch weiter verstärkt worden, so hätte der Minimumton schließlich den Membraneigentone überschreiten und jenseits von ihm fortrücken, die positiven Differenzen hätten allmählich wieder kleiner und schließlich sogar negativ werden müssen.

²⁾ Die Amplitudenangaben in dieser Tabelle dürfen also nicht mißverstanden werden; der Wechsel dieser Werte rührt daher, daß die Primärtöne bei konstant gehaltener Intensität ihre Lage zum Membraneigentone änderten.

Auch die nächste Tabelle gibt Messungen wieder, während welcher die Intensitäten der Primärtöne angenähert konstant blieben, die Frequenz von Ton 1 dagegen durch kleine Verstellungen der betreffenden Pfeife (*Edelmann*) variiert wurde und die Schwingungszahl von Ton 2 sich kaum verschob¹⁾. Beim Durchdenken der Einzelergebnisse und ihrem Vergleich untereinander ergibt sich auch hier eine befriedigende Übereinstimmung mit dem Erklärungsprinzip (besonders in der ersten Hälfte der Maximumergebnisse — abrupter Vorzeichenwechsel der Maximumdifferenz im 4. Versuch, wo der erste Primärton die Eigenfrequenz der Membran erreicht — und im Wechsel der Vorzeichen bei den Minimumdifferenzen).

Ton 1		Ton 2		Maximum	Diff.	Minimum	Diff.
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
72 (ca. 9 Schw. unter g^2)	115 (ca. 0,1 Schw. unter g^2)	330 (287)	+ 43	41 (57)	--- 16		
77 (7,0 Schw. unter g^2)	121 (ca. 0,1 Schw. unter g^2)	503 (428)	+ 75	97 (186)	— 89		
84 (6,4 Schw. unter g^2)	124 (ca. 0,1 Schw. unter g^2)	557 (468)	+ 89	140 (220)	— 80		
92 (3,5 Schw. unter g^2)	109 (ca. 0,1 Schw. über g^2)	547 (621)	— 74	312 (403)	— 91		
97 (2,2 Schw. unter g^2)	132 (ca. 0,2 Schw. unter g^2)	464 (499)	— 35	310 (235)	+ 75		
92 (1,9 Schw. unter g^2)	136 (ca. 0,2 Schw. unter g^2)	434 (498)	— 64	315 (226)	+ 89		
91 (1,3 Schw. unter g^2)	144 (ca. 0,22 Schw. unter g^2)	419 (475)	— 56	262 (187)	+ 75		
97 (ca. $\frac{1}{4}$ Ton über g^2)	144 (ca. 0,22 Schw. unter g^2)	341 (341)	0	19 (53)	— 34		

(m. V. weniger als 1%; Membraneigentonhöhe ca. 3,5 Schwingungen unter g^2 .)

Die mitgeteilten Ergebnisse bestätigten sich, als durch den weiteren Ausbau des *Lewinschen* Tonstärkemessers eine zweite Apparateichung nötig wurde. Von einer Wiedergabe dieser Messungen sehe ich ab; sie stimmen völlig mit den bisherigen überein. Trotz veränderter Belastung der Membran (und damit gleichfalls geänderter Resonanzbreite) folgte ihre Reaktion auf Schwebungen in der Nähe des Eigentones dem *Helmholtz'schen* Prinzip, freilich bei der nunmehr *sehr* geringen Resonanzbreite²⁾ nur solange, als die beiden Primärtöne weniger als einen Vierteltonschritt von dem Membraneigenton entfernt lagen.

Ich betone zum Schluß, daß durch die vorstehenden Messungen der Beweis für die objektive Wirksamkeit der von *Helmholtz* errechneten resultierenden Frequenzen nur für den Fall erbracht worden ist, auf den auch *Helmholtz* seine Rechnung einschränkte, daß nämlich die Schwebungszahl $m - n$ klein gegenüber m und n ist³⁾.

¹⁾ Siehe Anm. 2, S. 340.

²⁾ Resonanzbreite von reichlich einer großen Sekunde Umfang bei mittelstarken Tönen gegenüber einem Umfang von fast einer Quarte beim ersten Modell des Tonstärkemessers.

³⁾ Auch *Waetzmann* (siehe Zeitschr. f. Physik 1911, S. 236) weist darauf hin, daß die *Helmholtz'schen* Berechnungen in diesem Falle dem entsprechen, was „aus der Form der Resultierenden über die Größe der Tonhöhenschwankungen bei Schwebungen zu ersehen sei“, lehnt sie aber im übrigen als „rohe Annäherungen“ ab.

b) Über Höhenänderungen bei subjektiven Schwebungsbeobachtungen.

1. Bisherige Beobachtungen.

Helmholtz selbst fügte der zunächst rein mathematischen Bestimmung der Frequenzänderungen bei Schwebungen die Bemerkung hinzu, daß man bei Verwendung gedackter Pfeifen diese Unterschiede der Tonhöhe gut höre, ebenso bei Benutzung von Stimmgabeln, wenn man abwechselnd die höhere oder tiefere der Resonanzröhre näher bringe und dadurch verstärke¹⁾.

*S. Taylor*²⁾ hat die Höhenänderung bei tiefen Orgeltönen ebenfalls wahrgenommen. — *Stumpf*³⁾ hingegen hört bei geringer Schwebungsfrequenz nur einen der Höhe nach konstanten Ton und diesen schwebend. Er schreibt neuerdings⁴⁾ über diesen Ton: „Von welcher Theorie man auch ausgehe, man wird immer erwarten, daß er seiner Höhe nach im allgemeinen zwischen den beiden Einzel-tönen, und daß er bei gleicher Stärke derselben ungefähr oder genau in der Mitte, bei ungleicher aber dem stärkeren näher liege. Im ganzen bestätigt dies die Beobachtung. Doch schien sie mir in bezug auf die genaue Mittellage stets nicht leicht zu sein“. — *F. Krueger*⁵⁾ gibt als Resultat sehr ausgedehnter Untersuchungen an Stimmgabeln für etwa gleich starke Töne der zweigestrichenen Oktave an: „Solange die Zweiheit der Primärtöne völlig unerkant bleibt, liegt der gehörte Ton ausnahmslos dem tieferen Primärtone näher. Mit der Erweiterung des Klanges rückt er allmählich in die Höhe, scheint aber bis etwa zur kleinen Sekunde dem Grundton näher zu bleiben.“ — *Terquem* und *Boussinesq*⁶⁾ fanden schon 1875, daß der schwebende Ton beim Maximum auch dem Gehör nach der errechneten Höhe entspreche, während sie die Außenlage des Minimumtones subjektiv nicht feststellen konnten, wiewohl auch sie dieselbe theoretisch errechneten. Sie führten die schwebenden Primärtöne in getrennten Schlauchleitungen dem Ohre zu und bewirkten Intensitätsabstufungen dadurch, daß sie bald den einen, bald den anderen Schlauch mehr oder weniger zupreßten. (Auf diese Untersuchungen möchte ich besonders hinweisen, da sie in ihren Ergebnissen mit meinen eigenen völlig übereinstimmen.) — Auch *Max Meyer*⁷⁾ urteilt auf Grund seiner Schwebungsuntersuchungen: „Die Höhe des Zwischentones hängt nach meinen Beobachtungen ab von dem Stärkeverhältnis der Primärtöne; der Zwischenton liegt nur dann, wenn die Primärtöne gleich stark sind, etwa in der Mitte zwischen beiden, bei ungleichen Primärtönen näher an dem stärkeren. — Erwähnt seien schließlich die *Baleyschen* Untersuchungen über dichotisches Hören⁸⁾, da sie in bezug auf Mehrheitsschwelle usw. den Ergebnissen meiner Untersuchungen entsprechen.

2. Neue Untersuchungen.

Der Gedanke lag nahe, die Abweichungen in den vorstehend angeführten Ergebnissen könnten darauf zurückzuführen sein, daß die verschiedenen Schwebungsbeobachtungen unter nicht genau bekannten Be-

¹⁾ Vgl. Lehre von den Tonempfindungen⁴ S. 655.

²⁾ Vgl. *S. Taylor*, Phil. Mag. (4), 44 (1872).

³⁾ Vgl. Tonpsychologie II, S. 478f.

⁴⁾ Zeitschr. f. Psychol. 75, 346. 1916.

⁵⁾ Phil. Stud. 16, 347.

⁶⁾ Journ. de Phys. 4. 1875.

⁷⁾ Zeitschr. f. Psychol. 16, 12.

⁸⁾ Beiträge zur Akustik und Musikwiss. 7, 69.

dingungen hinsichtlich der Intensität angestellt worden seien. Ich ließ daher die Tonhöhe von Schwebungen reiner Töne in einem Frequenzgebiet beurteilen, in welchem ich das Intensitätsverhältnis der Primärtöne mit Hilfe des *Lewinschen* Apparates objektiv feststellen konnte.

Die entscheidenden Versuchsreihen sind von den Herren stud. mus. Gehlhoff und stud. mus. Keßler, zahlreiche Kontrollversuche von Herrn stud. phil. Mintz und mir selbst durchgeführt worden. Ganz besonders dankbar bin ich Herrn Geheimrat Stumpf dafür, daß er durch eigene Beobachtungen die wichtigsten Versuchsergebnisse bestätigte.

Benutzt wurde die schon bei den objektiven Schwebungsmessungen bewährte Leitungsanordnung¹⁾. Als Klangquelle für die Primärtöne dienten zwei Edelmann-Pfeifen; ihre sämtlichen Obertöne waren ausgelöscht. Während einer Beobachtungsreihe blieb die Intensität des einen Primärtones konstant, die des zweiten — und zwar bald die des oberen, bald die des unteren — wurde geändert. Der Vp. wurden die schwebenden Primärtöne während einer Zeitdauer von 4 bis 7 Sekunden dargeboten und nach einer Pause von $\frac{1}{2}$ Sekunde ein reiner Vergleichston während 2 bis 3 Sekunden. Als Vergleichston diente in den Anfangsversuchen abwechselnd bald einer der Primärtöne, bald ein dritter, zwischen ihnen gelegener Ton. Um jedoch die Möglichkeit auszuschließen, daß die verschiedene Intensität der zum Vergleich dargebotenen Töne das Höhenurteil nachteilig beeinflusse, ist bei allen späteren Versuchen, wo eine genaue Höhenbestimmung des gehörten Zwischentones vorgenommen wurde, die Klangquelle des jeweils lautereren Primärtones in etwas abgeänderter Frequenzeinstellung als Vergleichston benutzt worden. Auf diese Weise blieb innerhalb einer Versuchsreihe sowohl die Schwebungsfrequenz konstant (trotz wechselnder Intensität eines der Primärtöne), wie auch — zumindest sehr angenähert — die Intensität des Vergleichstones (trotz wechselnder Höhe).

Das Ergebnis aller Untersuchungen mit den verschiedenen Vpn. lautete unter diesen Bedingungen: Bei Schwebungen von Primärtönen bis zu 8 Schwingungen Abstand wird nur *ein* der Höhe nach konstanter Ton gehört, der zwischen den beiden Primärtönen liegt. Sind letztere gleichstark, so liegt er ziemlich in der Mitte; sind sie intensitätsungleich, so liegt er stets dem lautereren näher, und zwar entspricht seine Lage der nach der *Helmholtz*schen Formel für den Maximumton zu errechnenden Frequenz.

Nur bei ganz langsamen Schwebungen (0,2 bis 0,6 pro Sekunde) glaubte Herr Keßler vereinzelt, auch Höhenänderungen des schwebenden Tones feststellen zu können; doch erschien dabei der Minimumton stets als der höhere ohne Rücksicht auf das Intensitätsverhältnis der Primärtöne; das Ergebnis stimmte also nicht mit der Theorie überein.

Herr Geheimrat Stumpf hat die folgenden Beobachtungen bei einer von der oben beschriebenen etwas abweichenden Darbietungsart der schwebenden Primärtöne und des Vergleichstones gemacht, da er durch direkten Vergleich beurteilte, ob der gehörte Zwischenton dem oberen oder unteren Primärton näher liege. In unmittelbarer Folge wurden die schwebenden Primärtöne (2 Sekunden Dauer) und nach kürzester Pause der erste Primärton (2 Sekunden Dauer), dann wiederum die schwebenden Primärtöne (2 Sekunden) und der zweite Primärton dargeboten. Innerhalb einer Versuchsreihe wurde bei gleichbleibender Schwebungsfrequenz die

¹⁾ Vgl. *Lewin* a. a. O. S. 320.

Intensität eines der Primärtöne verändert, so daß er zunächst schwächer, dann gleich, schließlich stärker als der andere war. Bei der ersten Versuchsreihe war der tiefere Ton von konstanter Intensität, bei der zweiten der höhere.

Die Versuche hatten folgendes Ergebnis:

I. Reihe	Die nach der <i>Helm-</i> <i>holtz</i> schen Formel errechn. Frequenz des Max.-Tones	Urteil
1. Pr.-T. n. = 653	} 647,9	dem tieferen Primärton deutlich näher.
2. Pr.-T. n. = 645		
1. Pr.-T. n. = 653	} 649,9	dem höheren Primärton näher.
2. Pr.-T. n. = 645		
1. Pr.-T. n. = 653	} 649,1	gleich weit von beiden Primärtönen entfernt; wenn verschieden, so höchstens dem höheren näher.
2. Pr.-T. n. = 645		
II. Reihe		
1. Pr.-T. n. = 645	} 641,9	dem tieferen Primärton deutlich näher.
2. Pr.-T. n. = 640		
1. Pr.-T. n. = 645	} 642,4	gleich, höchstens dem tieferen Primärton näher.
2. Pr.-T. n. = 640		
1. Pr.-T. n. = 645	} 643,2	dem höheren Primärtone deutlich näher.
2. Pr.-T. n. = 640		

Diese Beobachtungen von Herrn Geheimrat Stumpf bestätigen die übrigen Versuchsergebnisse für schwebende Primärtöne von 5 bis 8 Schwingungen Differenz, wonach die Höhe des gehörten Zwischentones gesetzmäßig abhängt von dem Intensitätsverhältnis der beiden Primärtöne. Vielleicht lassen sich die (eingangs angeführten) wenigen abweichenden Ergebnisse anderer Forscher dadurch erklären, daß deren Untersuchungen unter sehr viel ungünstigeren Bedingungen, vor allem ohne Kenntnis des genauen Intensitätsverhältnisses der Primärtöne und größtenteils nicht an reinen Tönen gemacht worden sind.

Weitere Schwebungsuntersuchungen führten zu Ergebnissen, auf welche in der Literatur noch nicht hingewiesen zu sein scheint. Bei zunehmendem Abstand der Primärtöne über 8 Schwingungen hinaus hörten die Vpn. *einen* Zwischenton, solange einer der Primärtöne den anderen an Intensität *stark* übertraf, aber — bei derselben Schwebungsfrequenz — *zwei* Töne, sobald der Intensitätsunterschied zwischen den Primärtönen weniger groß wurde. In diesem Fall hörten jedoch die Vpn. nicht etwa die beiden Primärtöne selbst; der eine Ton kam zwar an Höhe dem jeweils lauterem Primärton gleich, aber der andere lag von diesem um 2 bis 5 Schwingungen (je nach Intensität und Abstand der Primärtöne) entfernt zwischen den beiden Primärtönen.

In der Mehrzahl der Fälle schienen beide Töne gleichzeitig hörbar, ohne daß man ihren Höhenabstand unmittelbar hätte genauer angeben können. Stellte man diesen jedoch fest, indem man jeden der beiden Zwischentöne mit Hilfe eines Vergleichstones in der oben beschriebenen Weise bestimmte, so ergab sich ein Abstand von wenigen Schwingungen. — Auch in Fällen, wo beide Töne nicht streng gleichzeitig nebeneinander gegeben zu sein schienen, konnten sie häufig abwechselnd herausgehört werden; ebenso kamen Übergangsstufen zwischen beiden Arten des Gegebenseins vor¹⁾. — Durch Berechnung ergab sich, daß der nicht in Primärtonhöhe gelegene Zwischenton annähernd mit dem nach der Theorie

¹⁾ Vgl. die schon angeführten Untersuchungen von *Baley*.

zu erwartenden Maximumton übereinstimmte. Herr Keßler bezeichnete ihn als „Schwebeton“, da er ihm nach Höhe und Intensität einen weniger einheitlichen Eindruck machte als der in Primärtonhöhe gelegene.

Diese Erscheinungen traten in dem hier untersuchten Tongebiet um e^2 an schwebenden Primärtönen von etwa 8 bis 15 Schwingungen Differenz bei den Vpn. Gehlhoff, Keßler, Mintz und Eberhardt konstant auf. Zwei weitere Vpn. konnten bei diesem Abstand der Primärtöne nicht zwei Töne von bestimmter Höhe feststellen. Ihnen erschienen die Bezeichnungen „beginnende Zweiheit“, „Unreinheit“ dem Gehörten entsprechender. Es liegen also beträchtliche individuelle Verschiedenheiten vor.

Sobald beide Primärtöne etwa gleichstark gegeben wurden, hörten die Vpn. etwas von dem bisherigen Abweichendes: nämlich zwei Töne, die der Höhe nach weder mit einem der Primärtöne noch mit dem Maximumton übereinstimmten; sie lagen deutlich zwischen den beiden Primärtönen, etwa gleich weit von der Mitte entfernt. Je größer der Abstand der Primärtöne wurde, um so weiter rückten die beiden Zwischentöne vom Mittelpunkt fort, bis schließlich die Primärtöne selbst zu hören waren.

Bei einem 15 Schwingungen übersteigenden Abstand der Primärtöne habe ich nur einige orientierende Untersuchungen angestellt und gefunden, daß die Höhenlage der beiden Zwischentöne bei ungleicher Intensität der Primärtöne gesetzmäßig von dem Intensitätsverhältnis der Primärtöne abhängig bleibt.

Die bisherigen Versuchsergebnisse sind mit der Annahme spezifischer Energie in der Fassung, welche *Helmholtz* diesem Prinzip gegeben hat, jedenfalls unvereinbar. Schon *Stumpf*¹⁾ hat als Ergänzung das Prinzip der Beeinflussung benachbarter schwingender Teilchen hinzugefügt. *Köhler*²⁾ hat auf Grund biologischer Überlegungen die Ansicht vertreten, daß die Basilmembran nicht ein zum Zweck der Analyse äußerst fein abgestuftes Resonatorensystem darstelle, sondern in breiteren Bändern mitschwinde, in welchen den Einzelfasern keine gesonderte Resonanzbedeutung zukomme. Reagiert aber die Basilmembran schon auf eine einzelne Sinusschwingung mit mehr oder weniger breiten Zonen, so kann man zur Deutung der vorliegenden Versuchsergebnisse annehmen, daß auch bei schwebenden Primärtönen bis zu 8 Schwingungen Abstand etwa eine Zone als ganze auf die Schwebungswelle als ganze reagiert (ähnlich wie die Membran des Tonstärkemessers). Impulse, welche dem beständigen Wechsel zwischen Maximum- und Minimumfrequenz entsprechen, würden in zentrale Gebiete weitergeleitet werden, aber nur die starken Impulse von Maximumfrequenz dort das Korrelat der Tonhöhe bestimmen. Aus derselben Grundvorstellung dürften sich die übrigen mitgeteilten Beobachtungen verständlich machen lassen, wenn man berücksichtigt, daß bei größerem Abstand der Primärtöne zwei verschiedene Membranzonen mitschwingen werden.

¹⁾ Tonpsychologie II, S. 489.

²⁾ Akustische Untersuchungen III. Zeitschr. f. Psychol. 72, S. 139 f.