

XII. Ueber Combinationstöne; von W. Preyer.

(Aus den Verhandl. der Phys. Ges. zu Berlin vom 8. Februar 1889;
mitgetheilt vom Hrn. Verf.)

Aus früheren Untersuchungen¹⁾ über die Bedingungen, welche für die Hörbarkeit der Differenztöne und Summationstöne nothwendig sind, hatte sich ergeben, dass es mittelst der empfindlichsten Stimmgabeln und Resonatoren nicht gelingt, sie objectiv nachzuweisen. Es war bisher überhaupt nicht dargethan, dass solche Töne ausserhalb des Ohres entstehen. Dagegen fand ich, dass im Ohre der Differenzton erster Ordnung mit einer an dasselbe angelegten Stimmgabel von ± 2 Schwingungen Unterschied auch dann noch Schwebungen gibt, wenn die beiden erzeugenden objectiven Töne eben erloschen sind, und dass ein vorher an das Ohr applicirter Resonator von der Schwingungszahl des Differenztones mit einer solchen Gabel in der Luft Stösse gibt. Daraus folgt, dass dieselbe Luftmasse im Resonator, welche, vom Ohre getrennt, nicht durch den Differenzton zum Mittönen gebracht werden kann²⁾, unmittelbar vom Ohre aus in Mitschwingungen versetzt wird, falls der Differenzton darin hörbar ist.

Irgend ein Theil des Ohres, das Trommelfell oder die Gehörknöchelchen, oder auch ein Theil des inneren Ohres, muss demnach die Entstehung des Differenztones ermöglichen. Welcher Theil? Das lässt sich am unversehrten Ohr nicht leicht ermitteln. Ich überzeugte mich zwar, dass der Verschluss des äusseren Gehörganges mit dem Finger oder mit Watte die Wahrnehmung des Differenztones unmöglich macht, auch wenn die beiden primären Töne deutlich hörbar bleiben, aber dabei wird nothwendig die Intensität derselben erheblich geschwächt. Man könnte also einwenden, der Combinationston käme wegen zu geringer Intensität der erzeugenden Töne nicht zu Stande. Doch ist es bemerkenswerth, dass er auch bei den lautesten Pfeifen nicht wie deren Grundtöne durch Kopfleitung zur Perception kommt. Es

1) W. Preyer, Akustische Untersuchungen. Jena 1879.

2) Dieses bestätigt auch Bosanquet, Phil. Mag. June 1881. p. 430.

lag deshalb nahe, den Entstehungsort des Differenztones in dem Trommelfell und in der Paukenhöhle zu suchen, dagegen das innere Ohr als Entstehungsort auszuschliessen, weil dahin die Wellenzüge beider primären Töne auch bei verschlossenem Gehörgang gelangen und doch kein Combinationston gehört wird.

Die Untersuchung eines intelligenten sechzehnjährigen Jünglings mit angeborener Atresie beider Ohren, dem unzweifelhaft beiderseits das Trommelfell fehlte, der aber sämtliche Stimmgabeltöne von dem Subcontra-*C* bis zum achtgestrichenen *a* sicher erkannte und Englisch und Deutsch sprach, lieferte mir das unzweideutige Resultat, dass er keine Combinationstöne hörte.¹⁾ Schwebungen vermochte er zu hören, solange sie nicht frequent waren, Differenztöne aber unter keinen Umständen. Ich schloss hieraus, dass die letzteren im inneren Ohre nicht entstehen können, sondern im Trommelfell entstehen, welches bei angeborener Atresie des Ohres fehlt²⁾, und suchte nun an solchen Individuen, welche grössere und kleinere Defecte des Trommelfells auf einer Seite, auf der anderen aber ein normales Ohr haben, die Hörbarkeit der Differenztöne festzustellen.

Das sehr günstige Material, intelligente musikalische und unmusikalische Patienten und Patientinnen, hat mir Hr. Prof. Trautmann hier zur Verfügung gestellt, und ich spreche ihm dafür und für sein Entgegenkommen bei den Versuchen auch an dieser Stelle meinen besten Dank aus.

Es ergab sich für alle Fälle mit Defecten, bei denen die Luft von der Mundhöhle aus durchströmen konnte, dass zweifellos keine Combinationstöne gehört wurden, während das gesunde Ohr der anderen Seite verschlossen blieb. Dieses für sich liess jedesmal die Wahrnehmung des ersten Differenztones zu Stande kommen. Dabei handelt es sich, wie ich ausdrücklich hervorhebe, nur um reine Fälle, wobei der Entzündungsprocess völlig abgelaufen war, und die beiden

1) Ich theilte diese Thatsache Ende 1887 Hrn. Prof. Kessel mit. Correspondenzblätter des allgemeinen ärztlichen Vereins von Thüringen. 17. Jahrg. p. 279. Section für Heilkunde. Sitzung vom 19. Jan. 1888.

2) Joél, Arch. f. Augenheilk. 27. p. 82. 1888.

primären Töne auch durch das Ohr mit dem defecten Trommelfell sehr deutlich gehört wurden.

Es ist somit bewiesen, dass die Differenzttöne im Trommelfell entstehen. Ich konnte aber auch nachweisen, dass sie daselbst nicht ausschliesslich entstehen.

Dass nämlich das normale Trommelfell nicht unersetzlich ist, wird durch Fälle bewiesen, in denen der Defect durch Wucherung vernarbt ist. In einem Falle derart, wo der etwa zwei Drittel der Oberfläche betragende Defect durch neugebildetes Gewebe wieder geschlossen war, wurde der Differenzton gehört. Hr. Trautmann träufelte nun einige Tropfen Wasser in den äusseren Gehörgang derjenigen, welche mit perforirtem Trommelfell den Differenzton nicht hörten. Jetzt konnten sie ihn wahrnehmen. Also genügte schon der Ersatz des fehlenden Stückes durch eine dünne Wasserscheibe, um das Zustandekommen des Differenztones zu ermöglichen. Ebensoviel Wasser im gesunden Ohr hindert die Wahrnehmung der Combinationstöne mittelst desselben nicht.

Durch diese Thatfachen ist also bewiesen, dass auch andere empfindliche (belastete) Membranen als das Trommelfell für die Erzeugung des ersten Differenztones geeignet sind, und es ist nur noch eine technische Frage, wie solche ausserhalb des Ohres herzustellen sein werden.¹⁾

1) Erst nach Mittheilung der vorstehenden Versuche an die physikalische Gesellschaft wurde ich darauf aufmerksam gemacht, dass ein beachtenswerther Versuch die Combinationstöne mittelst des Mikrophons hörbar zu machen, bereits vorliegt. Hr. O. Lummer (Verhandl. der phys. Ges. 7. Juli 1886, p. 66) verwendete dazu einen Resonator, dessen eine Oeffnung mit einer dünnen Kautschukmembran verschlossen war und mittelst eines Mikrophons mit einem Telephon in Verbindung stand. Leider sind die auf diese Weise objectiv hörbar gemachten Töne nur aus dem Harmonium erhalten worden, wo die Tonquellen nicht getrennt sind. Ich habe stets ausser den starken Klängen der Harmoniumzungen mit ihren vielen Obertönen zur Erzeugung der Combinationstöne erster Ordnung stark schwingende Stimmgabeln und Pfeifen verwendet. Doch ist nun kaum noch zu bezweifeln, dass die Differenzttöne auch dann mittelst des Mikrophonresonators objectiv dargestellt werden können, da durch die Hörbarkeit derselben mittelst der Wasserschicht im perforirten Trommelfell ihre Objectivität erwiesen ist.

Was die Summationstone betrifft, so war es mir schon im Jahre 1869 aufgefallen, als ich sie in meinen Vorlesungen demonstrieren wollte, dass ich sie nur hörte, wenn ausser den zwei primären Tönen auch deren Obertöne deutlich hörbar waren. Bei hohen Tönen (mit wenigen oder schwachen Obertönen) hörte ich überhaupt keinen Summationston. Ich theilte diese Beobachtungen dem Akustiker G. Appunn in Hanau mit, von dem ich wusste, dass er ein vorzüglich geschultes Ohr hatte und zugleich die Arbeiten des Herrn v. Helmholtz, welcher 1856 diese Töne entdeckte, kannte. Er schrieb mir darauf sehr ausführlich, meine Beobachtung hätte er auch gemacht, er höre Summationstone nur in mittleren und tieferen Lagen, schon in der zwei- und dreigestrichenen Octave könne er trotz der angestrengtesten Aufmerksamkeit keinen Summationston hören; dagegen hörte er, wie ich, die Differenztöne gerade bei hohen Tönen sehr deutlich, die Summationstone nur bei tiefen Tönen deutlich, oft deutlicher als die Differenztöne. Er meinte damals, man könne sie nur bei Tönen mit vielen starken Obertönen wahrnehmen, und zwar seien sie die Differenztöne solcher, z. B. bei $c^0 = 128$ und $G^0 = 192$ sei der laute Summationston

$$320 = 5 \cdot 192 - 5 \cdot 128 = 960 - 640.$$

Dieselbe Auffassung vertrat, ohne von dem Appunn'schen Manuscript vom December 1869 etwas zu wissen, Hr. R. König in Paris 1876, welcher meinte, wo viele Obertöne seien, könnten diese ausreichen, allemal die Summationstone dadurch zu erklären, dass sich immer zwei Obertöne finden mit einer Differenz, die der Schwingungszahl des Summationstones gleich ist. Ich habe jedoch die Hypothese vollständig widerlegt, derzufolge die Summationstone hierdurch allein zu Stande kommen sollen, durch den Nachweis, dass man Summationstone hört, wo so hohe Obertöne, wie sie verlangt werden, gänzlich fehlen.

Für jedes beliebige Tonpaar ist zwar allemal:

$$(I) \quad (mb - na) = a + b,$$

aber in vielen Fällen auch bei kleinstem m und n das Theiltönepaar mb und na zu hoch oder zu schwach, um hörbar zu sein, während doch der Summationston deutlich ist. Vollends gilt dieses für den von Hrn. König allein angenom-

menen Fall, wo $m = n$. Dagegen kommt für jedes beliebige Tonpaar ausnahmslos in Betracht, die von mir (l. c.) zuerst ermittelte und näher begründete Relation:

$$(II) \quad nb - [(n-1)b - a] = a + b,$$

wo gleichfalls n die Ordnungszahl des Theiltones, weil hier nur der erste Oberton zur Erklärung des Summationstones erforderlich ist:

$$2b - (b - a) = (a + b).$$

Die Verstärkung des Summationstones in tiefen Lagen erklärt sich einfach nach (II) durch die wiederholte Beteiligung der Obertöne des b .

Solange man sich nun auf Intervalle innerhalb der Octave beschränkt, kommen andere Verstärkungen des Summationstones nicht vor. Wenn aber $b > 2a$ wird, dann ist, wie ich finde, noch der Differenzton dritter Ordnung:

$$(III) \quad (nb - (n-1)a) - [(n-1)b - na] = a + b$$

zu berücksichtigen, d. h. im Falle man sich auf das erste Obertönepaar beschränkt, nur der Ton:

$$(2b - a) - (b - 2a) = (a + b),$$

wo die einzelnen Glieder hörbar sind.

Da es früher weder mir noch anderen gelang, die Summationstöne zu hören, wenn nicht die ersten Obertöne sehr deutlich zugleich hörbar waren, lag es nahe, die Summationstöne nach (II) und (III) als Differenztöne aufzufassen.

Da aber der Helmholtz'schen Theorie der Combinationstöne zufolge die Summationstöne auf einer objectiven Addition der Schwingungen beruhen müssen, so bemühte ich mich aufs neue, und zwar an Stimmgabeln, deren harmonische Obertöne durch Kautschukringe gedämpft, und welche doch zum starken Tönen gebracht waren, die Summationstöne wahrzunehmen. Bei dem Gabelpaar von 192 und 256 ganzen Schwingungen wurde in der That der Summationston 448, auch wenn beide Gabeln gedämpft waren, noch deutlich gehört. Dass ausserdem von einem Beobachter der Ton 384, also $2a$, gehört wurde, kann die Schlussfolgerung zu Gunsten der objectiven Existenz des Summationstones nicht beeinträchtigen. Denn der erwähnten Theorie zufolge müssen die Obertöne $2b$ und $2a$ neben $(b - a)$ und $(b + a)$ mit geringer Intensität entstehen. Es

wurden auch die Töne 64 und 320 deutlich gehört, was verständlich ist, da $b - a = 64$ und $2b - a = 320$, abgesehen davon, dass auch $3a - 2b = 320$.

Da es sich bei diesen Versuchen um schwierige Wahrnehmungen mit äusserster Anspannung der Aufmerksamkeit handelt, so ersuchte ich die Herren Appunn in Hanau (den Sohn und den Enkel des obengenannten verstorbenen G. Appunn), welche ein sehr geübtes und feines Gehör haben, meine Beobachtungen zu wiederholen. Sie bestätigten dieselben schliesslich durchaus.

Das gesammte Ergebniss der Untersuchung steht somit im besten Einklang mit der Theorie des Hrn. v. Helmholtz, und es ist endlich der objective Nachweis der Combinationstöne in den schwierigeren Fällen geliefert, in welchen zwei ganz getrennte Stimmgabeln vorhanden und schon die ersten Obertöne jeder einzelnen Gabel auch für das geübteste Ohr durchweg unhörbar oder schwächer sind, als die Differenztöne erster und zweiter Ordnung und als der Summationston.

XIII. *Ueber ein neues Dilatometer;* *von Oskar Knöfler.*

(Auszug aus der Inauguraldissertation, bearbeitet vom Hrn. Verf.)

(Hierzu Taf. I Fig. 10.)

Alle chemischen und physikalischen Processe sind mit Volumenänderungen verbunden, die zum eingehenden Studium sowohl der Anfangs- und Endzustände als auch der Zwischenzustände benutzt werden können.

Man kann derartige Volumenänderungen in zweierlei Weise bestimmen, entweder ermittelt man das specifische Gewicht zu verschiedenen Zeiten, oder man verfolgt mittelst eines Dilatometers die Veränderungen eines bestimmten Anfangsvolumens. Da die letztere Art der Beobachtung ohne weiteres die gesuchte Grösse gibt und zugleich, wie weiter gezeigt werden soll, die genauere ist, so ist dieselbe, wo irgend möglich, in Anwendung zu bringen.

Dilatometer sind bekanntlich weite Gefässe, mit denen