

Über Variations- und Unterbrechungstöne in ihrer Beziehung zur Theorie des Hörens.¹

Von

KARL L. SCHAEFER.

Die Variationstöne und die Intermittenz- oder Unterbrechungstöne fallen in jenes Gebiet der physiologischen Akustik, welches ich in meinem Artikel „Gehörssinn“ in NAGELS Handbuch der Physiologie² als das der sekundären Klangerscheinungen bezeichnet habe. Es sind darunter diejenigen akustischen Phänomene zu verstehen, welche beim Zusammenklang zweier (oder mehrerer) einfacher Töne neben letzteren, den sogenannten Primärtönen, eben als Folge von deren Zusammenwirken, also sekundär, auftreten. Zu den sekundären Klangerscheinungen gehören aufer den hier in Rede stehenden Tönen noch die Schwebungen sowie die Kombinations-
töne, welche ihrerseits wieder in die Unterabteilungen Summations- und Differenz-
töne zerfallen.

In den grundlegenden und bahnbrechenden akustischen Untersuchungen, die HELMHOLTZ in seinem klassischen Werke „Lehre von den Tonempfindungen“ niedergelegt hat, sind zwar die Schwebungen und Kombinationstöne soweit behandelt, als sie dem großen Forscher für das Verständnis der Tatsachen des Hörens und namentlich für die Theorie der Konsonanz und Dissonanz wichtig erschienen, die Variationstöne aber nur gelegentlich gestreift und die Unterbrechungstöne ganz unbeachtet gelassen worden. Dagegen hat RUDOLF KOENIG, der rühmlichst

¹ Aus den Charité-Annalen, 34. Jahrgang (Jubiläumsband), 1910, abgedruckt.

² Band III. Braunschweig 1905.

bekannte, vor einigen Jahren verstorbene Pariser Akustiker und Instrumentenmacher, der letzteren Gruppe von Tönen besonderes Interesse zugewandt, und im Anschluß an seine Versuche ist es dann in den letzten Dezennien zur Entwicklung einer eigenen Literatur über diesen Gegenstand gekommen.

Die Unterbrechungstöne entstehen nur unter ganz speziellen Versuchsbedingungen, sozusagen in Ausnahmefällen. Ihre praktische Bedeutung ist daher gering. Um so wichtiger sind sie aber für die Theorie des Hörens geworden, insofern man bis vor wenigen Jahren ganz allgemein der Ansicht huldigte, daß ihre Existenz einen unlösbaren Widerspruch gegen die im übrigen so plausible, elegante und befriedigende HELMHOLTZsche Resonanzhypothese bedeute. Wenn eine n -mal pro Sekunde in regelmäßigen Zeitabständen erfolgende Unterbrechung eines einfachen Primärtones zu der Wahrnehmung eines sekundären Tones von der Schwingungszahl n Veranlassung gibt — dies eben ist der „Unterbrechungston“ —, dann ist damit bewiesen, so argumentierte man, daß die bloße Zerlegung eines Tones in periodische Abschnitte die Ursache einer neuen Tonempfindung werden kann, während der Resonanzhypothese zufolge das Ohr lediglich solche Töne wahrzunehmen vermag, welche als physikalische Komponenten, in Form von Pendelschwingungen, in der die Basilar-membran von außen her treffenden Klangwelle enthalten sind. So hat schon im Jahre 1876 RUDOLF KOENIG in seiner Abhandlung „Über den Zusammenklang zweier Töne“¹ auf Grund von Experimenten die Behauptung aufgestellt, daß periodische Intermissionen eines Tones bei genügender Frequenz und Stärke ganz ebenso wie primäre Impulse in einen Ton übergingen; es wären dazu nicht einmal vollständige Pausen nötig, vielmehr genüge schon ein gleichförmiges Auf- und Abschwanken der Intensität des primären Tones, um die Wahrnehmung eines „Intermittenztones“ hervorzurufen. Ganz ähnlich hat sich L. HERMANN später geäußert, der bekanntlich seine Vokaltheorie in Beziehung zu den Unterbrechungstönen bringt.² Ein Vokal ist nach HERMANN nur ein intermittierender oder oszillierender Mundton; erfolgt die Oszillation beispielsweise 131 mal in der Sekunde,

¹ *Poggendorffs Annalen* 157, S. 177 ff.

² Vgl. die verschiedenen Abhandlungen HERMANNs zur Lehre von den Vokalen in *Pflügers Archiv* 45 ff.

so hat der Vokal die Note c^0 . Das Wesentliche wäre also ein intermittierendes oder oszillierendes Anblasen des Mundtones durch die Stimme. HERMANN verkennt zwar die seiner Theorie entgegenstehende Schwierigkeit nicht, die darin besteht, daß wir beim Singen eines Vokals auf die Note c^0 den Ton c^0 bei weitem am stärksten hören, während er bei der Analyse des Vokalphonogramms „so gut wie vollkommen fehlt“, meint jedoch, seine Auffassung der Vokale sei leicht verständlich, „wenn das Ohr jede Art von Periodik mit einer Tonempfindung beantwortete, also auch das schwebungsartige Intermittieren eines Tones als einen Ton von der Schwingungszahl des Intermittierens hörte“. Und schließlic hat unter den Psychologen, die ja auch die Theorie der Gesichts- und Gehörswahrnehmungen wie der Sinnesempfindungen überhaupt als zum Bereiche ihrer Spezialwissenschaft gehörig betrachten, kein Geringerer als W. WUNDT neben anderen akustischen Erscheinungen gerade die Intermittenztöne zum Anlaß genommen, eine neue Theorie des Hörens aufzustellen¹, nach welcher jeder Ton, den unser Ohr empfängt, auf einem doppelten Wege ins Zentralorgan gelangt, indem er einmal ganz im Sinne der Resonanzhypothese auf das CORTISCHE Organ wirkt und zweitens überdies durch Knochenleitung direkt auf den Nervenstamm übertragen wird, wobei dann jede Akustikusfaser jeden beliebigen Ton weiter zu leiten fähig und das Entstehen von akustischen Interferenzerscheinungen noch innerhalb der nervösen Substanz möglich sein soll.

Merkwürdigerweise haben die hier genannten Autoren und ihre nicht wenigen Anhänger es immer stillschweigend für selbstverständlich gehalten, daß die Unterbrechungstöne als exquisit subjektive Töne erst im inneren Ohre oder gar erst in der nervösen Substanz entständen. Hätte gleich der erste Beobachter derselben sich unbefangen die Frage vorgelegt und zu beantworten versucht, ob die Intermittenztöne nicht etwa als regelrechte Teiltöne des Gesamtklanges bereits in der Luft nachweisbar oder sonst irgendwie mit der Resonanzhypothese in Einklang zu bringen seien, so würde man zweifellos schon damals ihre wahre Natur erkannt haben und gar nicht erst darauf gekommen sein, aus ihrer Existenz der HELMHOLTZSchen Resonanzhypothese sozusagen einen Fallstrick zu drehen.

¹ Ist der Hörnerv direkt durch Tonschwingungen erregbar? *Philosoph. Studien* 8. 1893.

Es ist aber einer Reihe von Untersuchungen, die ich vor etlichen Jahren im Psychologischen Institut der Berliner Universität in Gemeinschaft mit dem außergewöhnlich musikalischen und durch den Besitz des absoluten Tonbewußtseins zur Klanganalyse hervorragend befähigten sowie darin geübten Herrn Dr. OTTO ABRAHAM ausführen konnte, vorbehalten geblieben, den in vielen Fällen überaus einfachen Nachweis zu führen, daß die Unterbrechungstöne keinerlei Handhabe zu Angriffen gegen die HELMHOLTZsche Hörtheorie liefern, insofern sie teils rein physikalisch außerhalb des Ohres entstehen, teils gewöhnliche Differenztöne sind. Ja, man darf sagen, daß die Lehre von den Variations- und Unterbrechungstönen in ihrer gegenwärtigen Gestalt sogar in gewissen Punkten eine neue und feste Stütze der Resonanzhypothese darstellt. Um zu diesem Resultate zu gelangen, war es freilich unerläßlich, die verschiedenen Arten, in welche die Unterbrechungstöne nach ihrer Entstehungsweise zerfallen, einzeln aufs sorgfältigste vorurteilslos und systematisch zu untersuchen.

Die einfachste Methode, um Unterbrechungstöne zu erzeugen, dürfte die Benutzung der sogenannten SEEBECKSchen Sirene zu dem genannten Zwecke sein. Es ist dies eine dünne, kreisförmige Scheibe aus Holz, Metall oder Pappe, die vertikal auf einer durch ihren Mittelpunkt gehenden horizontalen Achse befestigt und mit mindestens einem Kreise von gleichgroßen, gleichweit voneinander abstehenden Löchern versehen ist. Wird die Scheibe mittels eines an der Achse angreifenden Schnurlaufes in Rotation versetzt und der Löcherkreis (dessen Mittelpunkt das Zentrum der Scheibe ist) dabei durch eine Röhre mit dem Munde oder sonst einer Blasevorrichtung angeblasen, so daß jedesmal, wenn eines der Löcher an der Röhrenmündung vorbeikommt, ein Luftstoß durch die Scheibe dringt, so hört man einen Ton, dessen Schwingungszahl gleich der Anzahl der in einer Sekunde stattfindenden Luftstöße oder, was auf dasselbe hinausläuft, gleich der Anzahl der pro Sekunde die Anblasröhre passierenden Löcher ist. Dieser Ton ist der Primärtön. Werden nun in regelmäßiger Anordnung eine Anzahl Löcher des Kreises verklebt oder verstopft, so daß Gruppen von offenen und verschlossenen Löchern miteinander alternieren, so entsteht beim Anblasen der rotierenden Sirene neben dem Primärtön ein mehr oder weniger lauter Unter-

brechungston. Ein Beispiel möge dies verdeutlichen. Nehmen wir an, der Kreis habe 300 Löcher, von denen immer 30 freie mit 30 verschlossenen abwechseln, so haben wir 5 Unterbrechungsperioden von 30 Löchern, und gesetzt den Fall, die Scheibe mache 5 Umdrehungen pro Sekunde, so hören wir einen Primärton von $5 \times 300 = 1500$ und einen Intermittenzton von $5 \times 5 = 25$ Schwingungen.

ABRAHAM und ich¹ haben nun in einer Reihe von Versuchen dieser Art, bei denen der Unterbrechungston allerdings zweckmäßigerweise erheblich höher genommen wurde als in dem eben gegebenen Beispiel, gezeigt, daß der Intermittenzton durch einen in das Ohr eingeführten kugelförmigen oder zylindrischen HELMHOLTZschen Resonator merklich verstärkt wird, also objektiv physikalisch in der Luft vorhanden sein muß. Die Zunahme der Intensität im Resonator war stets so erheblich, daß jede Täuschung ausgeschlossen war. Es wurde vielmehr wiederholt an dem plötzlichen Versagen des Resonators zuerst erkannt, wenn die Geschwindigkeit der Scheibe und damit die Höhe des Unterbrechungstones sich infolge der Schwankungen des treibenden Elektromotors hinsichtlich der Tourenzahl geändert hatte. Eine noch instruktivere und zugleich zur Demonstration vor einem größeren Auditorium geeignete Form des Versuches besteht darin, den Resonator des Unterbrechungstones der Anblaseröhre gegenüber dicht an die rotierende Scheibe zu halten. Der Unterbrechungston wird dadurch mächtig verstärkt. Diese Wirkung tritt andererseits nicht ein, wenn man einen falschen Resonator nimmt oder die Höhe des Unterbrechungstones wesentlich ändert.

RUDOLF KOENIG² hat bei seinen Versuchen über Intermittenztöne auch Sirenenscheiben benutzt, auf welchen die Löcher zwar gleichen Abstand untereinander hatten, aber periodisch an Größe zu- und abnahmen, so daß also ein Ton von periodisch wechselnder Intensität in das Ohr des Beobachters gelangte, wenn die Löcher mit einer Röhre von dem Durchmesser der größten Löcher angeblasen wurden. Es wurde hierbei neben dem Primärton noch ein Ton gehört, dessen Schwingungszahl mit der An-

¹ Studien über Unterbrechungstöne. Erste Mitteilung. *Pflügers Archiv* 83, S. 207 ff. 1901.

² Quelques expériences d'acoustique. Paris 1882. S. 140 f.

zahl der periodischen Intensitätsschwankungen in einer Sekunde übereinstimmte. Auch diese Art von Intermittenztönen ist rein physikalischen Ursprungs. Sie werden durch passende Resonatoren, wie ABRAHAM und ich a. a. O. nachgewiesen haben, aufs Deutlichste verstärkt.

Wie zur Tonbildung überhaupt, so kann man auch zur Erzeugung von Unterbrechungstönen Zahnräder benutzen. Es ist zu diesem Zwecke nur nötig, in regelmäßigen Abständen einzelne der Lücken durch Ausfüllen zu beseitigen oder eine Anzahl Zähne fortzunehmen. Wurde ein solches Rad auf einer elektrisch getriebenen Achse zentrisch befestigt und der Rand eines Kartenblattes, etwa einer gewöhnlichen Visitenkarte, während der Rotation gegen die Zähne gehalten, so erhielten ABRAHAM und ich¹ wiederum eine lebhafte Verstärkung des Unterbrechungstones durch seinen zugehörigen Resonator, die gelegentlich noch beträchtlicher war als bei den Löchersirenen. Man kann übrigens auch das Zahnrad in derselben Weise benutzen wie eine Löcherscheibe. Bläst man nämlich einen senkrecht zur Fläche des Rades gerichteten Luftstrom aus einer feinen Öffnung gegen den Zahnkranz, so wird ebenfalls der Primärton mit seinem Unterbrechungston, wenn auch leiser, gehört und durch den entsprechenden Resonator eine merkliche Intensitätszunahme des letzteren erzielt.

In der soeben zitierten zweiten Mitteilung über unsere Studien betreffs der Unterbrechungstöne haben ABRAHAM und ich auch die sogenannten Phasenwechseltöne untersucht. L. HERMANN hatte in einer Abhandlung „Beiträge zur Lehre von der Klangwahrnehmung“² über Experimente an Zahnrädern berichtet, die so geschnitten waren, daß sich die Phase des Primärtones in gewissen gleichen Zeitintervallen fortwährend umkehrte. Ein solcher Primärton wurde begleitet von einem tieferen Tone, dessen Schwingungszahl mit der Anzahl der in der Sekunde stattfindenden Phasenwechsel übereinstimmte. HERMANN selbst hat keine bestimmte Ansicht über den — für den Gang seiner Untersuchung übrigens auch gleichgültigen — Ursprung dieser Töne ausgesprochen. Wir haben die Versuche

¹ Studien über Unterbrechungstöne. Zweite Mitteilung. *Pflügers Archiv* 85, S. 536 ff. 1901.

² *Pflügers Archiv* 56, S. 489 ff. 1894.

wieder aufgenommen und dabei aufser Zahnrädern auch Lochscheiben benutzt, da sich mit Hilfe der letzteren die notwendigen Variationen in der Konfiguration der Löcherperioden bequemer herstellen lassen. Es ergab sich, daß die Phasenwechsel an und für sich keine Veranlassung zur Bildung eines besonderen Tones geben, der Name Phasenwechseltöne also ganz unberechtigt ist, und daß in solchen Fällen, wo ein phasenwechselnder Primärtön von einem zweiten Tone begleitet wird, dessen Schwingungszahl gleich derjenigen der Phasenumkehrungen ist, dieser letztere einen einfachen Unterbrechungston von physikalischer Herkunft darstellt.

Die bisher angeführten Methoden, Unterbrechungstöne zu erzeugen, haben das gemeinsam, daß die Unterbrechungstöne gleich den Primärtönen von der Klangquelle selbst hervorgerufen und durch die Luft auf das Ohr übertragen werden. Neben dieser Art von Intermittenztönen existiert nun noch eine zweite Gruppe, nämlich solche Unterbrechungstöne, welche nicht mittels Resonatoren als bereits in der Luft vorhanden nachgewiesen werden können, welche indessen alle Eigenschaften von Differenztönen besitzen, d. h. von Tönen, die nach neueren Untersuchungen von mir und anderen im Trommelfell oder vielleicht auch in den Kopfknochen entstehen, jedenfalls aber als objektive, pendelförmige Komponenten in der die Basilarmembran treffenden Schallwelle enthalten sind und somit für die Theorie des Hörens keinerlei Schwierigkeit bieten. Diese zweite Gruppe von Unterbrechungstönen steht in nahem Zusammenhange mit den Variationstönen, weshalb wir zunächst auf letztere etwas näher eingehen müssen.

Variationstöne treten dann auf, wenn die Amplitude eines einfachen Tones nicht konstant gehalten, sondern periodischen Schwankungen unterworfen wird. Schon im Jahre 1844 ist von SEEBECK in seiner Abhandlung über die Definition des Tones eine Überlegung darüber angestellt worden, was aus einem einfachen Tone von der Schwingungszahl n wird, wenn seine Amplitude, also seine Intensität, m -mal pro Sekunde pendelperiodisch auf und ab schwankt. SEEBECK kam zu dem Resultat, daß dann neben dem Tone n noch zwei Töne mit den Schwingungszahlen $n + m$ und $n - m$ auftreten müßten, verfolgte aber den Gegenstand nicht experimentell. Dies hat zuerst HELMHOLTZ getan,

der darüber folgendes mitteilt¹: „Der untere Kasten meiner Doppelsirene klingt stark mit, wenn die Gabel a^1 vor seine untere Öffnung gehalten wird und die Löcher alle gedeckt sind, nicht aber, wenn die Löcher einer Reihe offen sind. Läßt man nun die Sirenenscheibe rotieren, so daß die Löcher abwechselnd offen und gedeckt sind, so erhält man eine Resonanz der Stimmgabel von periodisch wechselnder Stärke. Ist n die Schwingungszahl der Gabel, m die Zahl, welche angibt, wie oft ein einzelnes Loch des Kastens geöffnet wird, so ist die Stärke der Resonanz eine periodische Funktion der Zeit, also im einfachsten Falle zu setzen gleich

$$1 - \sin 2 \pi m t$$

Die Schwingungsbewegung der Luft erhält also dann die Form² $(1 - \sin 2 \pi m t) \sin 2 \pi n t = \sin 2 \pi n t + \frac{1}{2} \cos 2 \pi (m + n) t - \frac{1}{2} \cos 2 \pi (n - m) t$ und man hört deshalb außer dem Tone n auch noch die Töne $n + m$ und $n - m$. Dreht sich die Sirenenscheibe langsam, so ist m sehr klein, und die genannten Töne sind einander sehr nahe, so daß sie Schwebungen geben. Bei rascher Drehung dagegen trennt sie das Ohr.“

Der Name „Variationstöne“ für solche Töne von der Form $n + m$ und $n - m$ stammt von dem bekannten älteren Akustiker RADAU³, der in ähnlicher Weise wie SEEBECK und HELMHOLTZ berechnete, daß der Ton einer rotierenden Klangplatte sich unter gewissen Bedingungen in einen höheren und einen tieferen spalten müsse. STEFAN⁴ bestätigte RADAUS rein theoretische Deduktion durch Versuche folgender Art. Dreht man eine tönende Klangplatte vor dem Ohre, so daß nacheinander ihre vier Abteilungen demselben gegenüber zu stehen kommen, so hört man den Ton bei jeder Umdrehung viermal anschwellen und verlöschen. Bei langsamer Drehung schwebt der Ton, bei schnellerer tritt allmählich die Spaltung ein. Dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn man eine Stimmgabel in eine Zentrifugalmaschine oder Drehbank einspannt, anstreicht und vor dem Ohre rotieren läßt. Desgleichen kann auch eine Glocke zu diesem Zwecke

¹ Lehre v. d. Tonempfindungen. 1. Aufl. 1863, S. 597. 4. Aufl. S. 661.

² Im Original steht irrtümlicherweise am Schlusse der Formel: $(m + n) t$.

³ Moniteur scientifique. 1865, S. 430 und 1866, S. 792.

⁴ Sitzungsber. d. Wiener Akademie, math.-naturw. Kl. Bd. 53 (2) 696 und Bd. 54 (2) 598. 1866.

benutzt werden. Die bequemste Methode zur Erzielung von Variationstönen ist aber ein ziemlich gleichzeitig von MACH und STEFAN¹ gefundenes und benutztes Verfahren, welches darin besteht, daß man vor einer tönenden Stimmgabel eine Scheibe mit einem Löcherkranz, also eine SEEBECKSCHE Sirene, rotieren läßt. Jedesmal, wenn eine der Öffnungen die Gabel passiert, wird deren Ton lebhaft verstärkt; eine Intensitätssteigerung, die auch eintritt, wenn man die Gabel bei ruhender Scheibe einem der Löcher nähert, und offenbar auf der Störung der bekanntlich bei allen freischwingenden Stimmgabeln auftretenden, die Tonstärke herabsetzenden Interferenzerscheinungen beruht. Rotiert die Scheibe vor der klingenden Gabel, so erhält man in der Sekunde so viele gleich Tonstößen wirkende Verstärkungen, wie Löcher an der Gabel vorübergehen, und kann also die Anzahl derselben durch Wechsel der Umdrehungsgeschwindigkeit leicht beliebig variieren.

Wenn die mathematische Ableitung der hier in Rede stehenden Variationstöne richtig ist, und man wird schwerlich daran zweifeln dürfen, so sind dieselben physikalisch bedingte, objektive Töne. In der Tat bringen sie denn auch Resonatoren zum Mittönen, wie schon von STEFAN und BEETZ in vereinzeltten Fällen und neuerdings in größerem Umfange von ABRAHAM und mir² gezeigt worden ist. Unter diesen Umständen haben die Variationstöne an sich keine besondere Bedeutung für die Theorie des Hörens; wohl aber gilt dies von jenen gewissen Tönen, welche die Variationstöne unter geeigneten Bedingungen im Gefolge haben und denen nach unserer oben gewählten Schwingungszahlenbezeichnung die Tonhöhe m zukommt.

Woher kommen diese Töne? Am nächsten liegt es meines Erachtens, sie als Kombinationstöne, genauer gesagt als Differenztöne, anzusehen. Sowohl der höhere Variationston $n + m$ und der Primärton n einerseits als auch der Primärton und der tiefere Variationston $n - m$ andererseits ergeben m als Differenz ihrer Schwingungszahlen und der Differenzton der beiden Variationstöne ist gleich $(n + m) - (n - m)$ oder $2m$. Wenn daher ein Primärton mit seinen beiden Variationstönen zusammen erklingt,

¹ A. a. O. (Anm. 4 auf nebenstehender Seite.)

² Studien über Unterbrechungstöne. Dritte Mitteilung. *Pflügers Archiv* 88, S. 482. 1901.

so wird man, der Differenztonbildung günstige Bedingungen selbstverständlich vorausgesetzt, geradezu mit Bestimmtheit erwarten müssen, daß der zweifach bedingte und eventuell durch seine Oktave $2m$ verstärkte Differenzton m hörbar sei; eine Auffassung, die auch bereits A. M. MAYER¹ gelegentlich bei Beobachtungen über intermittierende Gabelklänge ohne irgendwelche Bedenken vertreten hat.

Dagegen haben KOENIG und seine Anhänger, diese sozusagen natürlichste Erklärungsmöglichkeit übersehend oder ignorierend, Gewicht darauf gelegt, daß m gleich der Anzahl der Stöße pro Sekunde ist, in welche der Primärtone durch die Versuchsanordnung zerlegt wird, und den Ton m dahin interpretiert, daß er ein nach der HELMHOLTZschen Resonanzhypothese unmöglicher „Unterbrechungston“ sui generis sei.

R. KOENIG konstatierte², als er nacheinander verschieden hohe Gabeln vor eine rotierende Löcherscheibe hielt, daß der „Intermittenzton“ bei den tieferen Gabeln schwach war und neben den Variationstönen sehr zurücktrat, bei den höchsten und sehr starken Gabeln (c^4 und c^5) aber eine große Intensität hatte, während hier die Variationstöne kaum oder gar nicht hörbar waren. ABRAHAM und ich konnten die Richtigkeit dieser Beobachtung bestätigen.³ Dieselbe widerspricht auf den ersten Blick scheinbar der Auffassung des Tones m als eines Differenztones, aber auch nur scheinbar. Tiefe Gabeln geben nämlich entsprechend tiefe Variationstöne, und die Differenztöne tiefer Töne sind erfahrungsmäßig viel schwächer als solche hoher Primärtöne. Wenn also m bei der Anwendung tieferer Gabeln nur leise neben den relativ lauten Variationstönen gehört wird, so ist das gewiß kein Beweis gegen seine Differenztonnatur. Wenn andererseits die Gabeln c^4 und c^5 bei mäßiger Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe keine Variationstöne hören lassen, so kommt dies einfach daher, daß die Variationstöne dem Gabeltone zu nahe liegen, um durch das Ohr analytisch von ihm getrennt zu werden. Vorhanden sind sie darum doch, und dann ist kein Grund da, den hier kräftigen Ton m nicht als ihren Differenzton zu betrachten. Machen doch auch zwei gleich-

¹ *Amer. Journ. of Science and Arts.* April 1875.

² *Poggendorffs Annalen* 157, S. 228 ff. 1876.

³ *Pflügers Archiv* 88, S. 486. 1901.

zeitig klingende Gabeln von den Schwingungszahlen 3200 und 3800 oder ähnliche Tonpaare durchaus den Eindruck eines einzigen Tones, während man daneben sehr laut den Differenzton hört. Wäre m tatsächlich ein „Intermittenzton“, wirkte also mit anderen Worten jeder der m Tonstöße, in die der Ton n durch die periodischen Intensitätsschwankungen zerlegt wird, wie eine einzelne, das Ohr treffende Luftverdichtung, so sollte man erwarten, daß diejenigen Gabeln, welche die lautesten Tonstöße geben, auch die stärksten „Unterbrechungstöne“ produzierten. In Wirklichkeit ist indessen eher das Gegenteil der Fall. Gerade die tieferen Gabeln erfahren durch die vorüberpassierenden Löcher der rotierenden Scheibe die kräftigste Verstärkung, und gerade sie liefern die schwächsten „Intermittenztöne“. Demnach dürfte die Ansicht, daß die hier in Rede stehenden sogenannten Unterbrechungstöne faktisch Differenztöne sind, entschieden das Richtige treffen.

ABRAHAM und ich haben aber auch noch die Möglichkeit erwogen, daß der „Unterbrechungston“ m aus irgendeinem Grunde nicht bloß als physiologischer Differenzton, sondern nebenher zugleich als physikalischer, von der Klangquelle erzeugter Ton in die Erscheinung treten könnte, und die akustische Prüfung des Geräusches, welches die Scheibe an sich, also ohne Beteiligung einer tönenden Gabel, lediglich durch ihre Rotation hervorbringt, ergab, daß es sich wirklich so verhält. Denn wenn man, während die Scheibe gedreht wird, das freie Ende eines gegabelten, in beiden Ohren steckenden Hörschlauches in die Nähe der Löcherreihe bringt, so hört man einen Ton, dessen Schwingungszahl mit der Anzahl der in der Sekunde vor der Schlauchöffnung vorüberkommenden Löcher übereinstimmt. Wir haben diesen Ton als Scheibenton bezeichnet. Er ist im allgemeinen nur mittels des Schlauches und in nächster Nähe der Scheibe zu hören, kann aber dadurch auch gelegentlich für das bloße Ohr in größerer Entfernung vernehmlich gemacht werden, daß man während der Rotation einen Körper mit glatter Oberfläche der Löcherreihe möglichst nahe bringt. Wir haben hierzu beispielsweise eine große, massige Königsche Gabel mit Erfolg benutzt, wobei es gleichgültig war, ob sie tönte oder nicht. Wurde bei diesem Versuche die Gabel durch einen kräftigen Bogenstrich zu maximal lautem Erklingen gebracht, so hörte man den Scheibenton und den „Unterbrechungston“ trotz ihrer

gleich hohen Schwingungszahl nebeneinander. Sie ließen sich dadurch unterscheiden, daß die Klangfarbe des ersteren heller, die des letzteren dumpfer und weicher, sowie dadurch, daß ihre Lokalisation eine verschiedene war: der Scheibenton kam aus der Gegend der Scheibe, während der andere Ton von den Beobachtern in den eigenen Hinterkopf verlegt wurde, ein Umstand, der, nebenbei bemerkt, schon allein für die Differenztonnatur der die Variationstöne begleitenden vermeintlichen Unterbrechungstöne sprechen würde.¹

Gleichwie wir gesehen haben, daß bei den angeblasenen SEEBECKSchen Sirenen mit periodisch zu- und abnehmenden Lochdurchmessern und dementsprechend periodischem An- und Abswellen der Tonintensität eben durch diese Stärkeschwankungen ein physikalischer Unterbrechungston entsteht, mußte man ferner daran denken, daß auch die vor rotierender Löcherscheibe tönende Gabel unabhängig von Scheibenton und Variationstönen durch die bloßen Oszillationen der Intensität die Bildung eines physikalischen Tones von der Schwingungszahl m veranlassen möchte. Natürlich haben ABRAHAM und ich mit Hilfe von Resonatoren versucht, hierüber nach Möglichkeit Aufklärung zu schaffen; indessen ließ sich über die Existenz eines solchen Tones neben dem gleich hohen, selbst physikalischen und durch den zugehörigen Resonator deutlich lauter werdenden Scheibenton nichts sicheres ermitteln.

Noch eine andere Frage ist von EBBINGHAUS im Anschluß an unsere Studien über die Beziehung zwischen Variations- und Unterbrechungstönen aufgeworfen worden. EBBINGHAUS schreibt in seinem bekannten Werke „Grundzüge der Psychologie“²: „Allerdings ist durch die Untersuchungen von SCHAEFER und ABRAHAM nachgewiesen worden, daß diese Unterbrechungstöne in gewissen Fällen ihres Zustandekommens durch Resonatoren verstärkt werden, also objektiv vorhanden sind. In anderen Fällen, wo eine solche Verstärkung nicht festzustellen ist, können sie als Differenztöne anderer objektiv existierender Töne aufgefaßt werden. Wenn nämlich ein Ton von der Schwingungs-

¹ Vgl. KARL L. SCHAEFER, Über die Wahrnehmung und Lokalisation von Schwebungen und Differenztönen. *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane* 1, S. 81 ff. 1890.

² 2. Aufl., Bd. 1, S. 329 f. Leipzig 1905.

zahl p in gleichen Intervallen u -mal in der Sekunde unterbrochen oder abgeschwächt wird, so entstehen, wie Berechnung und Beobachtung übereinstimmend lehren, zwei neue objektiv nachweisbare Töne mit den Schwingungszahlen $p + u$ und $p - u$, die sogenannten Variationstöne. Jeder von diesen aber differiert von dem gegebenen Ton p um die Schwingungszahl u und muß also mit p den Differenzton u liefern, d. h. eben den Unterbrechungston. Natürlich ist aber damit noch nicht bewiesen, daß dieser nur auf solche Weise und nicht auch direkt durch die Einwirkung der Unterbrechungen auf das Ohr zustande komme. Eine gewisse Unabhängigkeit der Unterbrechungs- und Variationstöne voneinander scheint sogar dafür zu sprechen, daß es sich so verhält: Trotz größerer Deutlichkeit der Variationstöne ist nämlich unter Umständen der Unterbrechungston sehr schwach, dagegen bei sehr geringer Deutlichkeit der Variationstöne der Unterbrechungston oft verhältnismäßig stark.“

Schon vor der Veröffentlichung der zweiten Auflage seiner „Grundzüge der Psychologie“ hatte übrigens Herr Prof. EBBINGHAUS sich mir gegenüber in einer schriftlichen Mitteilung in ähnlicher Weise geäußert. Er meinte: „Zur vollen Klärung der Frage fehlt nun noch ein Versuch. Bei der u -maligen Unterbrechung des Tones durch eine Löcherscheibe müßten die Variationstöne $p + u$ und $p - u$ durch Interferenz ausgeschlossen und dann zugesehen werden, ob nicht, bei genügender Stärke von p , u doch auftritt. Ich zweifle nämlich nicht, daß das Ohr, wie es gleich anderen akustischen Apparaten Kombinationstöne mit seinen eigenen Mitteln erzeugt, so auch Unterbrechungstöne direkt bildet, unbeschadet ihrer gleichzeitigen Erzeugung durch geeignete Apparate.“ ABRAHAM und ich haben alsbald und gerne dieser Anregung Folge gegeben und Ende 1904 die gewünschten Versuche im Psychologischen Institut der Berliner Universität ausgeführt. Sie sind allerdings bisher nicht publiziert worden, da uns hierzu das Material zu geringfügig und die Fragestellung allzusehr spezialisiert erschien; doch dürfte nunmehr die vorliegende Abhandlung, insofern sie einen zusammenfassenden Gesamtüberblick über die Beziehung zwischen den Variations- und Unterbrechungstönen einerseits und der Theorie des Hörens andererseits geben soll, der geeignete Ort sein, die wichtigsten Beobachtungsergebnisse mitzuteilen.

Die Versuchsanordnung war die folgende: Im Hörsale des

genannten Institutes wurde eine groÙe Lchersscheibe aus Pappe ganz nahe der Wand vor der Öffnung einer von hier durch einen zweiten Raum hindurch in das Beobachtungszimmer führenden Röhre aufgestellt, welcher letzteren im Beobachtungszimmer ein Interferenzapparat vorgeschaltet war. Die den Primärton liefernde Gabel wurde vor der Rohrmündung im Saale so aufgestellt, daÙ die Zinkenenden von dieser nur durch die Scheibe getrennt waren. Sobald ein Loch der Scheibe vor der Rhrenffnung vorbeiging, drang der Ton direkt und voll in die Röhre und weiter in den Interferenzapparat, aus dem er dann in das Ohr des Beobachters gelangte. Beim ersten Versuche wurde die Scheibe mit der Hand so rasch gedreht, daÙ 200 Löcher pro Sekunde die Gabel passierten. Die Rotation lieÙ sich mit genügender GleichmÙigkeit erzielen, was durch öfter wiederholtes Anblasen der Löcherreihe und Vergleichen des dadurch entstehenden Tones mit einer Gabel von 200 Schwingungen kontrolliert wurde. Die Schwingungszahl des Primärtones war 1000. Der Interferenzapparat wurde auf Auslöschung der beiden Variationstöne 1200 und 800 und des Scheibentones 200 eingestellt. Alsdann vernahm man im Beobachtungszimmer, am Interferenzapparat horchend, weder etwas von den Variationstönen noch von dem „Unterbrechungston“, sondern nur das von der Scheibe herrührende unbestimmte sausende Geräusch und den Primärton, der sehr gedämpft und mit eigentümlich veränderter Klangfarbe zu hören war (eine Erscheinung, die sich dadurch erklärt, daÙ der Primärton hinsichtlich seiner Schwingungszahl ein ungerades Multiplum des Scheibentones darstellte und daher mit von der Interferenz geschwächt wurde). Mit der Möglichkeit rechnend, daÙ ein Unterbrechungston im Sinne von EBBINGHAUS trotz der Beseitigung der Variationstöne und des Scheibentones vorhanden und nur zu schwach sein möchte, um neben dem Primärton herausgehört zu werden, haben wir auch noch das übliche Mittel, allzu leise Töne durch eine „schwebende Hilfsgabel“ zu verstärken und so über die Schwelle der Empfindung zu heben, angewendet, jedoch auch damit keinen Erfolg erzielt. In einem anderen Versuche, bei dem wir als Schwingungszahl für den Primärton 1000 und für den Scheibenton 250 wählten, damit die Stärke des Primrtons nicht durch die Interferenz mit herabgesetzt würde, war ebenfalls im Beobachtungszimmer nach Auslöschung des Scheibentons

und der Variationstöne auf keine Weise etwas von einem „Unterbrechungston“ zu hören. Noch einige weitere Experimente gleicher Art, bei denen gelegentlich auch Herr Geheimrat STUMPF mit zu beobachten die Güte hatte, ergaben das gleiche Resultat, so daß wir also auf dem Standpunkt beharren müssen, daß die mit den Variationstönen verbundenen Unterbrechungstöne abgesehen von der Beimischung des Scheibentones — der ja übrigens in denjenigen Fällen, wo die Variationstöne mittels einer rotierenden Gabel, Klangplatte oder Glocke erzeugt werden, überhaupt fortfällt — reine Differenztöne sind.

Den Gedanken, Tonunterbrechungen und damit Unterbrechungstöne auf elektro-akustischem Wege hervorzurufen, hat ZWAARDEMAKER¹ in einer neueren Arbeit über Intermittenztöne verfolgt. Er verband ein BLAKESches Mikrophon mit einem oder zwei LECLANCHÉ-Elementen und der primären Spirale einer kleinen Induktionsspule zu einem Stromkreise, während die sekundäre Spirale zu einem Telephon führte. Diese sekundäre Kette konnte durch eine elektrisch getriebene Stimmgabel 64 mal in der Sekunde geöffnet und geschlossen werden. War sie dauernd geschlossen, während durch das Mikrophon ein Ton auf das Telephon übertragen wurde, so hörte man nur diesen Ton, den Primärton. Funktionierte aber während seiner Beobachtung die Unterbrechungsvorrichtung, so vernahm man „ungemein schön einen kräftigen Unterbrechungston“ von 64 Schwingungen. War die Unterbrechungsvorrichtung im Gange, ohne daß das Mikrophon erregt wurde, so war von dem Tone 64 so gut wie nichts zu hören. ZWAARDEMAKER ist nicht zu voller Klarheit darüber gelangt, ob sein „Intermittenzton“ physikalisch oder physiologisch bedingt war. ABRAHAM und ich² haben seine Versuche in größerem Umfange und teilweise in etwas veränderter Form wieder aufgenommen, wobei vor allem dafür gesorgt ward, daß die Schwingungszahlen der Primärtöne und die Frequenz der Unterbrechungen in möglichst weiten Grenzen variiert werden konnten. Es ergab sich, daß die Angaben ZWAARDEMAKERS ungenau sind und die Verhältnisse folgendermaßen liegen. Der Primärton wird durch die Intermittenzen im allgemeinen ge-

¹ *Archiv f. Anat. u. Physiol.*; Physiolog. Abteil. Supplementbd. 1900. S. 60.

² *Drudes Annalen d. Physik* 13, S. 996. 1904.

schwächt oder ganz zum Verschwinden gebracht und an seiner Stelle ein mehr oder weniger komplizierter Klang im Telephon gehört. Die Teiltöne dieses Klanges sind, wenn wir wieder die Schwingungszahl des Primärtones mit p , die Zahl der Unterbrechungen pro Sekunde mit u bezeichnen, von der Form: p , $p - u$, $p + u$, $p - 2u$, $p + 2u$, $p - 3u$, $p + 3u$ usw. Ein Ton von der Schwingungszahl u wird nur in ganz speziellen Fällen gehört, nämlich dann, wenn p gleich u oder gleich einem Multipolum von u ist, und zwar erweist er sich dann ausnahmslos ebenso wie auch jeder der Töne p , $p \pm u$, $p \pm 2u$, $p \pm 3u$ usw. als durch seinen Resonator deutlich verstärkbar, d. h. als physikalisch bedingter Ton.

Diese von ABRAHAM und mir zum ersten Male experimentell beobachteten Töne $p \pm n \cdot u$ sind als Variationstöne höherer Ordnung gegenüber den bisher allein bekannten Variationstönen erster Ordnung $p + u$ und $p - u$ zu bezeichnen, worauf vor kurzem F. A. SCHULZE¹ aufmerksam gemacht hat, indem er darauf hinwies, daß die mathematische Berechnung diese Töne ergibt, wenn man in der Formel für die Tonbewegung: $A \cdot \sin(2\pi pt + \epsilon)$ die Amplitude A als FOURIERSche Reihe von der Form

$$A = a_0 + \alpha_1 \sin(2\pi ut + \delta_1) + \alpha_2 \sin(2\pi \cdot 2ut + \delta_2) + \dots$$

ansetzt. Ist p gleich einem Vielfachen von u , etwa $p = m \cdot u$, so erhalten die Variationstöne die Form $m \cdot u \pm n \cdot u$, es entsteht dann also u nebst harmonischen Obertönen von u .

Mithin ist in solchen Fällen, wo die ZWAARDEMAKERSche Versuchsanordnung speziell den Ton u ergibt, dieser nichts weniger als ein mit der HELMHOLTZschen Resonanzhypothese unvereinbarer „Intermittenzton“. Vielmehr stehen, wie SCHULZE in der eben erwähnten Arbeit bis ins Einzelne nachweist, alle Befunde von ABRAHAM und mir so vorzüglich in Einklang mit der HELMHOLTZschen Theorie des Hörens, daß diese nicht nur nicht erschüttert sondern im Gegenteil gekräftigt aus dem Streite um die Unterbrechungstöne hervorgeht.

Das gilt auch für die Versuche mit den während der Rotation angeblasenen Löcherscheiben und den Zahnrädern. SCHULZE sagt hierüber wörtlich²: „Besonders hervorgehoben sei schliefs-

¹ *Annalen d. Physik* (4. Folge) 26, S. 217. 1908.

² A. a. O. S. 233.

lich noch, daß diejenigen „Unterbrechungstöne“, die bei rotierenden Lochscheiben oder Zahnrädern beobachtet werden, wenn in periodischer Weise einige von den Löchern verstopft oder Zahn­lücken ausgefüllt sind, nichts für die Ansicht beweisen, es ent­stehe subjektiv im Ohr bei Unterbrechungen eines gegebenen Tones in periodischer Weise der entsprechende „Unterbrechungs­ton“. Es ist ja dabei vermöge der getroffenen Anordnung die dem Ton u zukommende Zeit einer Schwingung die längste Periode des ganzen Schwingungsvorganges; es muß also nach der OHM-HELMHOLTZschen Theorie des Hörens und der Klang­analyse durch FOURIERSche Reihe in dem gehörten Klang der Ton u mit seinen harmonischen Obertönen enthalten sein. Sind z. B. 60 Löcher auf dem ganzen Scheibenumfang und werden immer nach 6 offengelassenen Löchern 6 darauffolgende ver­stopft, so bilden diese $6 + 6 = 12$ Löcher die Grundperiode, die sich immer wiederholt. Der entstehende Klang gibt also den Ton $60 : 12 = 5$ mit seinen harmonischen Obertönen, die objektiv in der Klangmasse vorhanden sind. Zu diesen gehört auch der Ton 60, der auch intermittierend von den 6 offenen Löchern erzeugt wird. Der Ton 5 kann offenbar dann nicht als Unter­brechungston bezeichnet werden. Es ist auch ohne weiteres klar, daß die offenen und verstopften Löcher nicht immer neben­einander zu liegen brauchen. Wenn nur immer nach je 12 von den 60 Löchern sich die Anordnung periodisch wiederholt, so muß stets der Ton 5 entstehen. . . Daß in der Tat bei allen diesen Anordnungen die Töne 60 und 5 objektiv im Klang ent­halten und durch Resonatoren nachweisbar sind, also 5 nicht als subjektiver Unterbrechungston zu bezeichnen ist, ist von K. L. SCHAEFER und O. ABRAHAM experimentell nachgewiesen. . .“

Vor einigen Jahren haben EWALD und JÄDERHOLM eine Unter­suchung publiziert¹, in der sie zu dem Resultat gelangten, daß auch alle Geräusche, wenn dieselben nach dem ZWAARDEMAKER­schen Verfahren intermittiert werden, „Intermittenztöne“ liefern. EWALD möchte dieses Ergebnis zugunsten seiner bekannten Schallbildertheorie und gegen HELMHOLTZ verwerten. Aber auf­fallenderweise hat er gleich RUDOLF KOENIG und den anderen Gegnern der Resonanzhypothese es unterlassen zu prüfen, ob die fraglichen Töne entotische oder ektotische sind. Nur im ersteren

¹ *Pflügers Archiv* 115. 1906.

Fälle würden sie natürlich überhaupt für die Theorie des Hörens in Betracht kommen. Ich bin bisher freilich noch nicht in der Lage gewesen, die Versuche zu wiederholen und die dabei auftretenden Schallerscheinungen mit Resonatoren analytisch zu studieren, halte es jedoch von vornherein für unbezweifelbar, daß die oben angeführten Darlegungen SCHULZES auch auf die EWALD-JÄDERHOLMSchen Unterbrechungen anzuwenden und die dabei entstehenden Unterbrechungstöne objektive Töne sind.

Um das Problem der Unterbrechungstöne nach allen Richtungen hin vollständig zu erörtern, bliebe schliesslich noch eine kritische Betrachtung der HERMANNschen Vokaltheorie übrig. Wie schon erwähnt wurde, fiel es HERMANN auf, daß der Grundton des Vokals, also die Note, worauf der Vokal gesungen wird, im Phonogramm außerordentlich schwach oder gar nicht zum Ausdruck kommt, für das Ohr aber sehr deutlich wahrnehmbar ist, und er suchte diese Erscheinung mit der Annahme zu erklären, daß der Grundton als subjektiver Unterbrechungston *sui generis* im Ohr entstände. Irgendeinen besonderen Beweis hierfür hat er nicht erbracht. Seine Annahme ist eine reine Hypothese, die zu einer Zeit, wo man allgemein an subjektive Unterbrechungstöne als Töne spezifischer Gattung zu glauben geneigt war, berechtigt sein mochte, gegenwärtig aber, nachdem alle anderen Arten von „Unterbrechungstönen“ sich als physikalisch erzeugte oder als Kombinationstöne erwiesen haben, schon aus diesem Grunde einiges Mißtrauen erwecken muß. Man wird sie getrost fallen lassen dürfen, sobald sich für das — nach neueren Untersuchungen anscheinend von HERMANN überschätzte — Mißverhältnis zwischen der Empfindungsstärke des Vokalgrundtones und seiner Amplitude in der Klangkurve eine andere, auf dem sichereren Boden der HELMHOLTZschen Resonanztheorie fußende Erklärungsmöglichkeit darbietet. Eine solche erblicke ich aber in dem Zusammentreffen der jederzeit mit größter Leichtigkeit festzustellenden Tatsache, daß der Grundton eines gesungenen Vokales gleichgestimmte Resonatoren oder auch Stimmgabeln auf Resonanzkasten zum Mitschwingen bringt, mithin mindestens zum Teil sicher objektiv ist, und des Umstandes, daß je zwei der Ordnungszahl nach aufeinanderfolgende harmonische Obertöne des Grundtones den letzteren als subjektiven Kombinationston ergeben müssen oder wenigstens ergeben können. Wieviel von der Empfindungsintensität des

Grundtones im einzelnen Falle auf Rechnung seiner objektiven und wieviel auf Rechnung seiner subjektiven Quote kommt, wird sich schwerlich genau bestimmen lassen, aber selbst bei erheblichem Überwiegen der letzteren dürfte zu ihrer Erklärung stets eine hinreichend große Zahl von Teiltonpaaren, die den Grundton als Differenzton liefern, vorhanden und daher die Zuhilfenahme eines hypothetischen Unterbrechungstones *sui generis* durchaus überflüssig sein.

Somit kommen wir denn, das Vorstehende zusammenfassend, zu dem Resultate, daß überhaupt nirgendwo auf dem Gebiete der sekundären Klangerscheinungen ein akzeptabler, geschweige denn zwingender Grund vorliegt, die Existenz derartiger „Unterbrechungstöne“ zu behaupten. Es wäre darum auch empfehlenswert, diese Bezeichnung aus der akustischen Nomenklatur gänzlich auszumerzen.
