

(Aus dem Psychologischen Institut der Universität Berlin.)

Über den Zusammenklang einer gröfseren Zahl wenig verschiedener Töne.¹

Von

Dr. STEFAN BALEY.

Wenn zwei Töne gleichzeitig erklingen, die in ihrer Höhe sehr wenig voneinander differieren, so hört man bekanntlich statt zweier Töne nur einen Ton, der seiner Höhe nach zwischen den beiden Primärtönen liegt (Zwischenton, STUMPF). Rücken die Töne weiter auseinander, so tritt ein neues Stadium auf, wo man beide Primärtöne schon getrennt hört und neben ihnen auch den Zwischenton. Schliesslich kommt das dritte Stadium, wo nur die Primärtöne wahrgenommen werden und der Zwischenton verschwindet.

Durch einen einfachen, von MELDE angegebenen Versuch lässt sich die Bildung des Zwischentones aus zwei Primärtönen demonstrieren. Man ziehe zwei benachbarte Knöpfe am Tonmesser heraus und lasse die ihnen entsprechenden Töne gleichzeitig erklingen. Man hört dann nur einen Ton; wenn nun einmal der dem tieferen und andermal der dem höheren Primärtöne entsprechende Knopf zurückgedrückt wird, so findet im ersten Falle eine Erhöhung und im zweiten eine Vertiefung des Tones statt. Es folgt also, dass der Zwischenton seiner Höhe nach zwischen den beiden Primärtönen liegt.

Als ich im Laufe der hier demnächst zu besprechenden Untersuchung über das dichotische Hören am Tonmesser arbeitete, bemerkte ich, dass der eben beschriebene Versuch auch dann zu gelingen scheint, wenn man anstatt zweier vier

¹ Aus der *Zeitschrift für Psychologie* mit einigen Korrekturen und einer Schlussbemerkung abgedruckt.

C. STUMPF.

benachbarte Tonmesserzungen zum Versuche heranzieht. Läßt man alle vier Zungen gleichzeitig erklingen, so scheint dabei nur ein Ton zu resultieren, und wenn man weiter entweder die zwei links oder die zwei rechts befindlichen Knöpfe zurückdrückt, so hört man die Erhöhung resp. die Vertiefung der Tonlage. Es ist so, als ob auch in diesem mehr komplizierten Falle sich aus dem Primärtönen etwas Zwischentonartiges bildete. Sogar mit sechs oder acht Zungen des Tonmessers scheint sich ein ähnliches Phänomen hervorrufen zu lassen, nur bekommt der resultierende Ton bei der immer weitergehenden Vergrößerung der Anzahl der Primärtöne einen mehr schreienden Charakter.

Einmal auf die Erscheinung aufmerksam gemacht, versuchte ich ihr weiter nachzugehen, da ich in ihr wenigstens eine partielle Lösung des Problems zu finden meinte, welches durch die theoretischen Erwägungen über den Zwischenton nahegelegt wird. Es seien zwei Töne a und b gegeben, deren Höhenunterschied die Unterschiedsschwelle für gleichzeitige Töne nicht überschreitet; sie ergeben also, wenn sie gleichzeitig erklingen, einen Zwischenton von einer gewissen Höhe m . Nun läßt sich aber leicht ein anderes Tonpaar $a'b'$ finden, welches beim Zusammenklingen ebenfalls den Zwischenton m bildet, wobei die Töne $a'b'$ auch die Bedingung erfüllen, daß sie in bezug aufeinander und auf die Töne ab unterhalb der Unterschiedsschwelle liegen. Es läßt sich vielleicht noch ein drittes Tonpaar $a''b''$ und ein viertes $a'''b'''$ ausfindig machen, welches zu den ersten Tonpaaren in dasselbe Verhältnis tritt, in welchem $a'b'$ zu ab stand. Wenn nun alle die Tonpaare für sich genommen denselben Zwischenton ergeben, so fragt sich, was sich herausstellen wird, wenn man sie alle gleichzeitig erklingen läßt. Vereinigen sie sich auch in diesem Fall zu einem Zwischenton m , oder kommt dabei ein einfacher resultierender Ton überhaupt nicht zustande?

Da man wenig Hoffnung haben kann, auf Grund bloß theoretischer Erwägungen eine sichere Lösung des Problems zu erlangen, so war es um so mehr geboten, es einer experimentellen Prüfung zu unterziehen. Von den Apparaten, an denen man die diesbezüglichen Versuche anstellen könnte, scheint von vornherein der Tonmesser das am meisten geeig-

nete Instrument zu sein. Gibt er doch die Möglichkeit, Töne, die um eine konstante, kleine Schwingungszahl differieren, in beliebiger Anzahl gleichzeitig erklingen zu lassen. Leider aber entsprechen wenigstens bei dem hiesigen Instrument die Töne der einzelnen Zungen den bei ihnen angegebenen Zahlen im allgemeinen nicht und geben keine genügend gleichförmigen Differenzen, weshalb er stets nur mit einer Korrektionsstabelle benutzt wird. Dadurch wurde er aber für exakte Durchführung der Versuche in unserem Falle unbrauchbar.

Ich versuchte also mit Stimmgabeln zu experimentieren, deren einige ich mittels Laufgewichten entsprechend stimmte. Bei dieser Anordnung konnte die Stimmung in beliebiger Weise exakt gemacht werden; es verklingen aber die Stimmgabeln zu rasch, auch ist es schwer, bei ihren Tönen die gleiche Intensität zu erreichen.

Weiter experimentierte ich auch auf Vorschlag des Herrn Geheimrat STUMPF mit Flaschen, die mittels passend angebrachter Mundstücke durch ein elektrisch getriebenes Gebläse zum Tönen gebracht wurden. Man stimmte sie, indem man Wasser in passender Menge hineingoss. Obwohl nun die auf solche Weise erzeugten Töne ziemlich obertonfrei waren und die jedesmal gewünschten Intervalle sich leicht herstellen ließen, so blieb während längerer Dauer infolge der Schwankungen des Luftstromes die Höhe der einzelnen Töne nicht so konstant, wie es für unsere Zwecke nötig wäre; und das war natürlich ein sehr störender Umstand.

Schließlich griff ich wieder zu einem Zungeninstrumente zurück und zwar benutzte ich diesmal ein zweites Exemplar, bei dem eine ganze Zungenreihe den Ton 600 mit minimalen zufälligen Differenzen gab¹; ich konnte sie nun, dank dem liebenswürdigen Entgegenkommen des Herrn Geheimrat STUMPF, in passender Weise abstimmen. So war es mir möglich, die nötigen Höhenabstufungen der Töne auf die Dauer herzustellen. Dafs es aber dabei unumgänglich war, an jedem Versuchstage die Stimmung nachzuprüfen und zu kor-

¹ Diese Einrichtung wurde früher zu Reinheitsversuchen von C. STUMPF benutzt; s. STUMPF u. M. MEYER, Mafsbestimmungen usw. *Z. f. Ps.* 18.

rigieren, ist selbstverständlich. Die Kontrolle wurde in der Weise durchgeführt, daß für jede zwei in der Reihe folgenden Töne diejenige Zeit, in welcher der beabsichtigten Stimmung gemäß eine gewisse Anzahl von Schwebungen erfolgen sollte, mit derjenigen Zeit verglichen wurde, welche zu ihrer Abfolge wirklich nötig war. Ich begnügte mich immer mit der Stimmung, wenn der Unterschied dieser Zeiten für 20 Sek. nicht mehr als $\frac{1}{2}$ Sek. betrug. Die kleinsten Höhenunterschiede, mit denen ich meistens arbeitete, waren zwei bis vier Schwebungen pro Sekunde. Somit ist nun auch die Genauigkeit der Abstimmung, mit der immer operiert wurde, angegeben.

In meinen Versuchen hatte ich die Absicht, den Zusammenklang mehrerer der Höhe nach einander nahestehender Töne in bezug auf seine Einheitlichkeitsbedingungen zu prüfen, ohne die dabei sich ergebenden Schwebungsverhältnisse näher zu verfolgen. Da aber diese für den qualitativen Charakter des Zusammenklanges von ausschlaggebender Bedeutung sind, so sind wir gezwungen, zunächst über sie einige Bemerkungen zu machen.

Wenn mehrere Töne (bei der hier immer festzuhaltenden Bedingung kleiner Höhendifferenz) zusammenklingen, so gilt im allgemeinen die Regel, daß im resultierenden Gehörs-eindruck alle die Schwebungsrhythmen herauszuhören sind, die je zwei beliebige von diesen Tönen miteinander kombiniert außerhalb des Zusammenklanges erzeugen würden. Das Gesetz der Erhaltung der einzelnen Schwebungsrhythmen im Zusammenklang scheint hier zu walten. Dennoch erleidet es manche Einschränkungen, von denen wir sogleich zwei besprechen müssen.

Nehmen wir zuerst den Fall, wo drei Töne *a*, *b*, *c* gleichzeitig gegeben sind (*b* mag dabei höher als *a* und tiefer als *c* sein). Dann läßt sich im Zusammenklang sowohl der den Tönen *ab*, wie auch der den Tönen *bc* und außerdem noch der den Tönen *ac* entsprechende Rhythmus vernehmen. Es lassen sich aber dabei durch Beobachtung folgende Tatsachen konstatieren:

1. Die Deutlichkeit, mit welcher die einzelnen Rhythmen hörbar sind, verändert sich sehr mit dem Standpunkte, den man der Tonquelle gegenüber einnimmt. Es gibt Stellen, die

der Wahrnehmung eines Rhythmus günstiger sind als des anderen. Es wird sogar an manchen Stellen nur ein einziger von den drei Rhythmen hörbar, während die anderen dabei unmerklich bleiben.

2. Die Stärke, mit welcher die einzelnen Rhythmen sich dem Ohre aufdrängen, ist weiter auch von der absoluten Frequenz der Schwebungen der Tonpaare ab , bc , ac abhängig. Beträgt der Unterschied der Töne ab z. B. vier bis sechs Schwebungen pro Sekunde und nähert sich der Unterschied bc der Doppelzahl davon oder geht er noch weiter darüber hinaus, so dringt im Gesamteindruck das dem Unterschied ab entsprechende Schwebungstempo am stärksten durch, und die Rhythmen bc , ac treten dabei zurück.

Bei diesem Verhältnis der Intervalle findet also Prävalenz des langsamsten Schwebungsrhythmus statt. Im allgemeinen sind die langsameren Schwebungen (bis zu einer gewissen Grenze) den rascheren gegenüber im Vorteil, indem sie leichter dem Ganzen ihren Rhythmus aufdrängen.

Alles, was wir über die Schwebungen dreier Töne gesagt haben, behält auch für mehr als drei gleichzeitige Töne seine Gültigkeit. Es wechselt auch hier das Hörbarwerden der einzelnen Rhythmen mit der der Tonquelle gegenüber eingenommenen Stelle. Auch hier kommt die relative Prävalenz der langsamsten Rhythmen zum Vorschein. Ein Spezialfall ist der, wo die zusammenklingenden Töne ihrer Schwingungszahl nach eine arithmetische Reihe bilden, wo also die Höhendifferenzen der nächsten Töne untereinander gleich sind; es schweben dann je zwei benachbarte Töne alle in demselben Rhythmus, der auf diese Weise im Zusammenklange mehrere Male sich wiederholt. Die Folge davon ist, daß dieser — der langsamste — Rhythmus verstärkt wird und in dem resultierenden Gehörseindruck mit um so größerer Eindringlichkeit sich bemerkbar macht. Das Ganze, aus einiger Entfernung gehört, scheint nur in diesem einzigen Rhythmus zu schweben.

Nach diesen Bemerkungen über die Schwebungen werden wir nun den eigentlichen Toneindruck ins Auge fassen, der bei dem mehrfachen Zusammenklange entsteht. Es muß hier zuerst konstatiert werden, daß die Gestaltung der Rhythmenverhältnisse dabei von ausschlaggebender Bedeutung ist. Jedem

im Zusammenklange enthaltenen Schwebungsrhythmus von zwei beliebigen Tönen entspricht ein Zwischenton, der eben durch diese Töne erzeugt wird. Und was vordem über die Schwebungsrhythmen galt, das gilt mit gewissen Einschränkungen von diesen Zwischentönen. Der Regel der Erhaltung der einzelnen Schwebungsrhythmen steht also innerhalb gewisser Grenzen die Regel der Erhaltung der einzelnen Zwischentöne zur Seite. Wie aber je nach der eingenommenen Stelle und nach dem Verhältnis der Intervalle bald dieser bald jener Rhythmus in den Vordergrund tritt, so ist es auch mit den im Zusammenklang enthaltenen Zwischentönen.

Man hört nicht alle die Zwischentöne zu gleicher Zeit, sondern je nach der Stellung, in der man sich befindet, nur gewisse von ihnen. Oft ist es nur ein Ton, der deutlich hervortritt; im Falle, wo zwei oder drei sich bemerkbar machen, können sie entweder nebeneinander bestehen oder sie wechseln in einem bestimmten Tempo ab. Wird die Zahl der Primärtöne immer mehr vergrößert, so bekommt dadurch der Zusammenklang einen immer mehr wirren Charakter, und es bildet sich neben dem deutlich auftretenden, in einem bestimmten Tempo schlagenden Zwischentöne (ev. einigen Zwischentönen) eine geräuschartige Klangmasse von schwer zu bestimmender Höhenlage.¹

Wir gehen nun zu dem interessantesten Fall über, und zwar zu dem, wo mehrere Primärtöne der Reihe nach um gleiche Schwingungszahl voneinander differieren. Bei ihrem Zusammenklingen kommt, wie wir schon früher dargelegt haben, der dieser Differenz entsprechende Schwebungsrhythmus zu einer bedeutenden Verstärkung, was dem Gesamteindruck eine verhältnismäßig große Einheitlichkeit verschafft. Denn dieser Rhythmus haftet dem Ganzen unverändert an, auch

¹ Obwohl nach dem bisher Gesagten eine Korrespondenz zwischen den im Zusammenklange heraushörbaren Rhythmen einerseits und den Zwischentönen andererseits zu bestehen scheint, so läßt sie sich nicht als eine ausnahmslose Regel statuieren. So hatte ich oft den Eindruck, daß im Falle des Dreiklangles *abc*, wo *bc* doppelt so groß war wie *ab*, an gewissen Stellen, an denen der Rhythmus *ab* prävalierte, er nicht die Höhe des ihm entsprechenden Zwischentones *ab*, sondern die Höhe des Zwischentones *bc* annahm.

während man seine Stellung zum Tonmesser ändert, was, wie wir wissen, bei anderen Arten von Zusammenklängen nicht der Fall ist. Diese Einheitlichkeit greift aber auch auf den qualitativen Charakter des Eindrucks über, nämlich auf seine Höhenlage. Wir müssen gemäß dem Prinzip der Erhaltung der Zwischentöne im Zusammenklang annehmen, daß auch in diesem Fall die einzelnen Zwischentöne irgendwie im ganzen eingeschlossen sind; und zwar scheinen wenigstens alle die, welche durch je zwei benachbarte Primärtöne gebildet sind, gleiches Recht auf das Gehörtwerden erheben zu können, da sie gleichzeitig gebildet werden und ihre Maxima und Minima zusammenfallen. Dennoch werden sie nicht alle gleichzeitig gehört. Es bekommen nämlich die mittleren Töne den äußeren gegenüber den Vorzug, auf Grund dessen sie in diesem Kampfe ums Dasein den Sieg davon tragen. Wenn man sich (bei sechs bis zehn gleichzeitig erklingenden Primärtönen) so aufstellt, um alle die Primärtöne möglichst gleich auf das Ohr wirken zu lassen, so hört man selbst der früher erwähnten geräuschartigen Masse von unbestimmten Charakter nur einen Ton, der in bezug auf die Primärtöne die mittlere Tonhöhe besitzt. Hört man ihm aus verschiedenen Entfernungen längere Zeit zu, so bemerkt man zwar Schwankungen der Höhe dieses Tones, was wohl damit zusammenhängt, daß die Stimmung keine absolute genaue ist und daß deshalb während einer Periode die Zeitpunkte der Maxima einzelner Zwischentöne sich etwas gegeneinander verschieben. Dieser Umstand macht die genaue Bestimmung der Höhe des resultierenden Tones schwer. Die überwiegende Anzahl der von mir daraufhin gemachten Schätzungen führt mich aber zur Überzeugung, daß er der Mitte der Primärtöne sehr nahe kommt. Bei gerader Anzahl von Primärtönen scheint er meistens mit dem durch die beiden mittleren Primärtöne erzeugten Zwischentone zusammenzufallen. Bei der ungeraden, wobei die Schätzung mir schwerer vorkam, scheint er dem in der Mitte stehenden Primärtone nahe zu liegen ev. mit ihm zusammenzufallen.

Wenn man sich von der Gültigkeit der hier ausgesprochenen Behauptung überzeugen will, so ist es gut, dabei in einer bestimmten Weise vorzugehen. Nachdem man eine Anzahl (sechs

bis zehn) aufeinanderfolgender Zungen des Zungenapparates der Reihe nach um gleiche Differenz (ungefähr 4 Schwingungen in der Sekunde) abgestimmt hat, lasse man zuerst die zwei mittleren gleichzeitig erklingen und achte genau auf den dadurch erzeugten Zwischenton. Dann lasse man, indem diese zwei Zungen weiter klingen, die zwei nächsten (eine rechts und eine links) gleichzeitig ertönen und höre weiter zu; dabei ist es gut, die frühere Stellung des Kopfes nicht zu ändern. Man bemerkt nun im Momente, wo die zwei neuen Zungen in Wirkung zu treten beginnen, einen gewissen Choc, es glättet sich aber der Eindruck bald aus, und man bemerkt, daß die Tonhöhe des Zusammenklanges der früheren gleich geblieben ist. Nun ziehe man, indem diese vier Zungen ertönen, noch die zwei weiteren hinzu: es wiederholt sich jetzt dasselbe, nur daß der „Choc“ jetzt auffallender wird und länger dauert. Man hat zuerst einen Augenblick den Eindruck, als ob die zwei neuen Töne sich nicht in das Ganze hineinfügen wollten und mit ihm dissonierten. Bald aber treten sie zurück in die den Ton begleitende „Masse“ und wieder konstatiert man das Gleichbleiben seiner Höhe. Dasselbe kommt auch wieder beim Hinzutreten des vierten und des fünften Paares der Primärtöne. Dann kehre man den Versuch um, indem man von den sechs bis zehn zusammenklingenden Primärtönen ausgeht und der Reihe nach immer je zwei äußerste zugleich zum Verstummen bringt. Man gewahrt auch in diesem Fall das Erhaltenbleiben der Tonhöhe. Die Einheitlichkeit des resultierenden Tones und die ihm zukommende Tonhöhe wird im allgemeinen auch dann aufrecht erhalten, wenn man beim Zuhören seinen Standpunkt der Tonquelle gegenüber ändert, dabei aber darauf acht gibt, alle Töne möglichst gleichmäÙig auf das Ohr wirken zu lassen.

Es muß aber dabei folgendes hinzugefügt werden: Nehmen wir an, man befinde sich in einer etwas größeren Entfernung (einige Meter) von dem Tonmesser und höre beim Ertönen des achtfachen Zusammenklanges einen einheitlichen Ton, der sich deutlich von der „Masse“ abhebt. Tritt man nun einige Schritte weiter vor oder wendet plötzlich den Kopf, dann nimmt man den früher erwähnten Choc wahr und die Höhe des Ganzen scheint sich zu verändern; wenn man aber auf der

neuen Stelle den Zusammenklang einige Zeit ruhig auf sich wirken läßt, dann glättet sich der Eindruck bald aus, indem sich wiederum die Trennung vollzieht in die der Höhe nach unbestimmte geräuschartige Masse und einen im bestimmten Tempo schlagenden Ton, dessen Höhe der früher angenommenen gleich sich zeigt. Obwohl ich hier den einheitlichen Charakter eines solchen Zusammenklanges konstatiere, so muß ich zugeben, daß man beim systematischen Beobachten an verschiedenen Stellen um den Tonmesser herum auch Standpunkte findet, wo die beschriebene Einheitlichkeit nicht so deutlich zutage tritt; so scheint sich an einzelnen Stellen das Ganze in zwei Töne zu zerlegen oder die Höhe des Zusammenklanges bleibt nicht seiner Mitte gleich, sondern sie wird höher geschätzt. Was den letzten Punkt anbetrifft, so kann die ungleiche Stärke der einzelnen Primärtöne und können vielleicht auch die reichen Obertöne der Zungen die Erscheinung bedingen. Da, wie wir es schon früher angenommen haben, der bei solchem Zusammenklange entstehende Eindruck, wenn er auch einheitlich erscheint, doch in der Wirklichkeit aus mehreren Zwischentönen besteht, so ist es natürlich, daß sich auch spezielle Bedingungen bilden können, die einzelnen von ihnen in diesem Kampfe ums Dasein zum Siege verhelfen. Es scheint mir aber eine unbestreitbare Tatsache zu sein, daß im allgemeinen die mittlere Partie der den Zusammenklang konstituierender Töne einen Vorrang hat, der ihr *ceteris paribus* leichter macht im Gesamteindruck sich geltend zu machen, ihn zu vereinheitlichen und ihm ihr Gepräge aufzudrücken.

Als Beispiel entnehme ich den Protokollen folgende vier Tabellen; jede von ihnen gibt die Höhe der Primärtöne an, die einer Reihe von Schätzungen zugrunde liegen und die angenäherte Höhenlage des resultierenden Tones. Diese wurde öfters so bestimmt, daß eine mit Laufgewichten versehene Stimmgabel auf den gehörten Ton abgestimmt wurde.

Tabelle I. (6 Töne).

$a = 610$	Diff. $ab = 3,06$
$b = 613,06$	" $bc = 3,00$
$c = 616,06$	" $cd = 3,13$
$d = 619,19$	" $de = 2,92$
$e = 622,11$	" $ef = 3,10$
$f = 625,21$	

Die Höhe des resultierenden Tones lag zwischen 616 und 619 Schw., d. h. innerhalb dieser Grenzen fielen die einzelnen an verschiedenen Stellen wiederholten Schätzungen der Tonhöhe.

An einzelnen Stellen (2—3 Meter vom Apparat) wurde der resultierende Ton auch höher als 619 geschätzt, aber tiefer als 622.

Tabelle II (6 Töne).

$a = 600$	
$b = 604,13$	Diff. $ab = 4,13$
$c = 608,23$	" $bc = 4,10$
$d = 612,23$	" $cd = 4,00$
$e = 616,29$	" $de = 4,06$
$f = 620,45$	" $ef = 4,16$

Der resultierende Ton: 608 bis 612.

Es kamen auch über 612 belaufende Schätzungen vor. An manchen Stellen schienen zwei Töne auseinandergehalten werden zu können; der höhere etwa 620, der tiefere wurde nicht genauer bestimmt.

Tabelle III (8 Töne).

$a = 600$	
$b = 604,13$	Diff. $ab = 4,13$
$c = 608,23$	" $bc = 4,10$
$d = 612,23$	" $cd = 4,00$
$e = 616,29$	" $de = 4,06$
$f = 620,39$	" $ef = 4,10$
$g = 624,35$	" $fg = 3,96$
$h = 628,51$	" $gh = 4,16$

Der resultierende Ton: 612 bis 618.

Die Einheitlichkeit war am deutlichsten an den vom Apparat weiter entfernten Stellen (8—10 Meter). An ungünstigen Stellen zwei Tonhöhen bemerkbar.

Tabelle IV (10 Töne).

Töne a, b, c, d, e, f, g, h , dieselben wie in Tabelle III; dazu

$i = 632,54$	Diff. $hi = 4,03$
$k = 636,64$	" $ik = 4,00$

Der resultierende Ton: 616 bis 620.

Auch hier die Einheitlichkeit bei größerer Entfernung deutlicher auftretend. An ungünstigen Stellen zwei oder drei Tonhöhen im Zusammenklange bemerkbar; davon die eine, und zwar die höhere, vorherrschend.

Dafs sich hier eine starke Tendenz zur Vereinheitlichung entwickelt, das ist eine Tatsache für sich, die auch dann bemerkenswert bliebe, wenn als Produkt ihrer Wirkung nicht immer dieselbe, das Ganze beherrschende Tonlage, sondern nach den Umständen einmal diese und ein andermal wiederum eine andere hervorträte. Denn 6—10 um je 4 Schwingungen differierende Töne der mittleren Region decken zusammen ein Intervall, das die Unterschiedsschwelle für gleichzeitige Töne weit überholt und bis zum Umfang eines Halbtones reicht. Die Töne 600 und 620 Schwingungen pro Sekunde ergeben beim Zusammenklingen eine Dissonanz, in der beide Primärtöne deutlich auseinander gehalten werden können. Fügt man aber zu diesen Tönen noch die dazwischenliegenden 604, 608, 612, 616 hinzu, so schwindet die Zweiheit, um einer Einheit Platz zu machen. Es schwindet dabei auch die Dissonanz und an ihre Stelle tritt die Geräuschmasse. Es ist so, als ob durch die dazwischentretenden Töne eine Brücke zwischen den beiden äufseren Tönen geschlagen würde, die sie zu einer Einheit verbindet. Wie wir sehen, kann solche Brücke auch zwischen zwei um einen Halbton differierenden Tönen mit Erfolg geschlagen werden.

Etwas paradox klingt das Ergebnis, dafs die Dissonanz bzw. Unreinheit des aus zwei Tönen bestehenden Klanges durch die eingefügten weiteren Töne nicht vergrößert, sondern im Gegenteil verringert oder aufgehoben wird. Es ist dem aber wirklich so, auch dann, wenn die neuen Töne das frühere Intervall nicht in gleiche, sondern in beliebige Abstände teilen. Ich will dabei nicht behaupten, dafs der Eindruck dadurch in jedem Fall angenehmer gemacht wird. Je mehr Töne hinzukommen, desto wirrer und geräuschartiger und insofern auch unangenehmer wird der Eindruck, die eigentliche Dissonanz ev. Unreinheit tritt aber dabei zurück.

Was zunächst die Dissonanz betrifft, so begreift sich dies aus dem Umstand, dafs zur Wahrnehmung einer Dissonanz

ebenso wie einer Konsonanz die Unterscheidung der beiden Töne gehört (STUMPF, Kons. u. Diss., *Beiträge* I, 93, Kons. u. Konkordanz *daselbst* VI, 125). Schalte ich aber zwischen *c* und *des* eine Anzahl von Tönen ein, so werden *c* und *des* selbst nicht mehr deutlich auseinandergehalten. Aber auch der blofse Eindruck der Unreinheit wird verringert oder (bei kleinerem Abstand der äufseren Töne) aufgehoben, weil man auch die blofse Unreinheit aus Erfahrungsmotiven als gestörte Einheit oder beginnende Einheit aufzufassen geneigt ist, durch den überaus kräftigen Zwischenton aber (bei konstanten Differenzen) ein einheitlicher Charakter hineinkommt, oder (bei ungleichen Differenzen) die Mannigfaltigkeit der ausstehenden Schwebungsrhythmen und wechselnden Zwischentöne die Aufmerksamkeit von der Erfassung der Tonhöhe überhaupt abzieht.

Die Frage der Unreinheit ist der Punkt, wo unser Problem auch mit der musikalischen Praxis eine Fühlung bekommt. Wenn mehrere Instrumente „unisono“ spielen sollen, so läfst sich dies natürlich nur mit einer gewissen Annäherung durchführen. (Im Orchester, wo z. B. mehrere Violinen „denselben“ Ton nehmen, ist das Unisono physikalisch sicherlich oft ziemlich weit von der Exaktheit.) Je mehr Instrumente dabei beteiligt sind, desto weiter werden dann die Grenzen sein, innerhalb welcher alle die Töne ihrer Höhe nach zu liegen kommen. Es werden also auch die Chancen der Unreinheit dadurch scheinbar gröfser. Da aber das dissonierende Intervall geteilt ist, so entsteht dadurch ein Moment, welches nach dem Vorhergesagten im entgegengesetzten Sinne wirkt. Dauert auferdem der Zusammenklang nur eine kurze Zeit, und befindet sich der Zuhörer in einer ruhigen Lage, so sind auch Chancen vorhanden, dafs die eventuellen Fluktuationen, denen der Zusammenklang periodisch unterliegt, dem Ohre vorenthalten bleiben. Auf diese Weise kann die theoretisch im „Unisono-Klange“ bestehende Unreinheit dem Zuhörer verdeckt sein.

Es fragt sich nun, wie das hier besprochene Phänomen der Vereinheitlichung, welcher der mehrfache Zusammenklang beim geringen Höhenunterschiede der Primärtöne unterliegt, erklärt werden kann.

Was zunächst die physikalischen Verhältnisse betrifft, so

hatte Herr Geheimrat Dr. M. PLANCK die Güte, mir folgende Berechnung zur Verfügung zu stellen:

„Wenn eine beliebige Anzahl z von gleichstarken Tönen, deren Schwingungszahlen eine konstante Differenz aufweisen, mit gleicher Phase zusammenklingen, so wird die resultierende Schwingung durch folgenden Ausdruck dargestellt:

$$\underbrace{a \sin 2 \pi n t}_1 + \underbrace{a \sin 2 \pi (n + d) t}_2 + \underbrace{a \sin 2 \pi (n + 2 d) t}_3 + \dots \\ + \underbrace{a \sin 2 \pi (n + (z - 1) d) t}_z$$

Hier bedeutet t die Zeit, a die Amplitude, n die Schwingungszahl des tiefsten Tones, d die Differenz der Schwingungszahlen zweier benachbarter Töne.

Dieser Ausdruck ist mathematisch gleich dem folgenden:

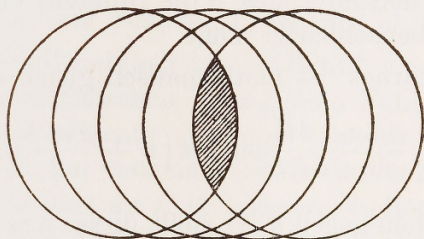
$$\left(a \cdot \frac{\sin z \pi d t}{\sin \pi d t} \right) \cdot \sin 2 \pi \left(n + \frac{z-1}{2} d \right) t$$

Ist nun d klein gegen n , so stellt dieser Ausdruck einen einzigen Ton dar mit der Schwingungszahl $n + \frac{z-1}{2} d$, d. h. dem arithmetischen Mittel aller z Schwingungszahlen. Die Stärke dieses resultierenden Tones, dessen Amplitude durch den eingeklammerten Ausdruck gegeben wird, variiert periodisch, und zwar gibt es in der Zeiteinheit d Maxima der Stärke (Schwebungsstöße), deren Intensität proportional dem Quadrat von z ist, also mit wachsendem z stark zunimmt.“

Dieses physikalische Verhalten stimmt, wie man sieht, mit der Beobachtung, oder die Beobachtung mit jener ziemlich gut überein. Aber man würde doch nicht ohne weiteres aus dem einen auf das andere schließen dürfen. Denn dazwischen liegen die Vorgänge in der Schnecke und im Nervensystem. Dafs überhaupt Schwebungen gehört werden, muß, da im allgemeinen Analyse in Sinusschwingungen durch das Ohr stattfindet, schon auf besonderen physiologischen Gründen beruhen. HELMHOLTZ hat es aus dem gemeinschaftlichen Mitschwingen der durch beide Töne miterregten Fasern erklärt. Durch weiteres Verfolgen des Prinzips hat STUMPF auch den

Zwischenton verständlich gemacht. Ist nun hiernach der Vorgang unter den benachbarten Schneckenfasern dem physikalischen bei der Kombination der Luftschwingungen analog, so findet auch die PLANCKSche Ableitung hier Anwendung. Insofern können meine Beobachtungen als eine weitere Bestätigung der Resonanzhypothese angesehen werden; ja man könnte versuchen, daraus Schlüsse über den Umfang des Mitschwingens bei den Schneckenteilchen zu ziehen.

Auch direkt läßt sich in folgender Weise durch Fortsetzung der STUMPFschen Überlegungen aus dem Mitschwingen entfernterer Teilchen die Entstehung des gemeinschaftlichen Mitteltones begreifen:



Wenn jeder dieser sich schneidenden Kreise die Breite des Mitschwingens der Schneckenteilchen für einen der benachbarten Töne bedeutet, so sieht man, daß die mittleren Fasern der ganzen erregten Region, die dem schraffierten Teil entsprechen, von sämtlichen Tönen, also am stärksten erregt werden, daß also ihr Ton prävalieren muß. Vorausgesetzt ist nur eben, daß der Erregungsprozeß überhaupt in einem Mitschwingen besteht und daß eine nicht unerhebliche Breite des Mitschwingens der Resonatoren stattfindet.

Es ist einleuchtend, daß die Ursachen, welche die Prävalenz der mittleren Fasernregion bei gleichen Abständen der Primärtöne bewirken, zum Teil auch dann tätig sein müssen, wenn die Abstände zwar nicht ganz gleich sind, aber auch nicht so verschieden, daß eine gleichmäßige Zusammenwirkung der Primärtöne ganz unmöglich gemacht wird. Es wird auch in diesem Fall die mittlere Region der äußeren gegenüber einen Vorzug aufweisen. Auf diesem Grunde scheint es zu beruhen, daß, wenn man an einem nicht speziell zum Versuchszwecke

genauer abgestimmten Tonmesser (also bei ziemlich grober Annäherung der Tonhöhedifferenzen an die Gleichheit) 10—20 Zungen zusammen erklingen läßt, sich trotz der Schwankung eine überwiegende Höhenlage des Zusammenklanges bemerkbar macht, welche den mittleren Primärtönen nahe liegt. Es läßt sich dies auch wohl aus dem Grunde erwarten, daß auch eine genauere Abstimmung schliesslich nur eine angenäherte sein wird. Was also bei genauerer Stimmung deutlicher auftritt, wird wahrscheinlich auch bei einer weniger genauen ver-spürbar sein.

Fassen wir jetzt das Ergebnis der Untersuchung kurz zusammen, so würde es, abgesehen von den die Schwebungen betreffenden Bemerkungen, folgendermaßen lauten:

Mehrere, um kleine, gleiche Schwingungsanzahlen voneinander differierende Töne haben beim Zusammenklingen die Tendenz, im subjektiven Eindruck zu einem einzigen Tone zusammenzufließen. So können acht bis zehn Töne, die sich über das Intervall eines Halbtones erstrecken, einen einzigen resultierenden Ton ergeben.

Die Höhe des resultierenden Tones entspricht beim gleichmäßigen Affiziertsein der Ohren durch alle Primärtöne dem arithmetischen Mittel ihrer Schwingungszahlen oder liegt diesem nahe.

Das Phänomen des Zusammenfließens stellt sich im Fall einer größeren Anzahl von Primärtönen erst nach einem Momente ruhigen Zuhörens deutlich ein. Es ist auch an die Stellung des Zuhörers der Tonquelle gegenüber in dem Maße gebunden, als es auch Stellungen gibt, wo dieses Zusammenfließen nicht vollkommen zustande kommt. Aber auch dann wird im Eindruck eine geringere Anzahl von Tonhöhen auseinander gehalten werden können, als sie objektiv vorhanden sind.

Bei kleinen Intervallen wird durch das Hinzutreten neuer, innerhalb seiner Grenzen gelegenen Töne der Eindruck der Unreinheit nicht vergrößert, sondern vermindert oder aufgehoben; das Unangenehme des Eindrucks liegt dabei mehr an der Wirrheit und Geräuschartigkeit des Zusammenklanges als an der Dissonanz.

Das hier angegebene Resultat gilt vorläufig nur für die Töne der Zungeninstrumente von ca. 600 Schwingungen pro Sekunde und für Höhenunterschiede von 3—4 Schwingungen. Die Gestaltung des Phänomens für andere Tonhöhen und andere Arten von Tönen wäre noch zu erforschen.

Man könnte eine Einschränkung der Ergebnisse auch daraus herleiten wollen, daß die Zungen des Tonmessers alle auf einem gemeinsamen Windkasten sitzen. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, daß sie beim Zusammenklingen einander beeinflussen, indem sie ihre Schwingungsphasen gegenseitig regulieren und angleichen. Die Folge davon wäre, daß die nebeneinander bestehenden Schwebungsrhythmen gleichzeitig einsetzten und die gleich raschen auch völlig zusammenfielen. Die Herausbildung eines gemeinsamen Grundrhythmus bei gleichen Differenzen der Primärtöne, womit die Entstehung des Mitteltons zusammenzuhängen scheint, könnte auf diese Weise zustande kommen. Es wäre also die Frage, ob sich die Erscheinung auch bei getrennter Erregung der Klangquellen einstellt. Tatsächlich ist dies nach meinen Versuchen an Flaschen und Stimmgabeln der Fall. Insbesondere ergaben 5 Stimmgabeln auf Resonanzkästen, die alle beiläufig c^2 angaben, aber um je 4 Schwingungen voneinander differierten, einen prävalierenden Rhythmus von 4 Maximis per Sekunde und einen deutlichen Mittelton. Es ist also der gemeinsame Windkasten keine wesentliche Bedingung der Erscheinung.
