

(Aus dem Psychologischen Institut der Universität Berlin.)

## Akustische Untersuchungen. I.

Von

WOLFGANG KÖHLER.

(Mit 1 Tafel.)

### Inhalt.

	Seite
Einleitung . . . . .	134
I. Über eine neue Methode der Klangaufnahme . . . . .	136
II. Über die Funktion des Trommelfells und des Tensor tympani . . . . .	143
III. Über die Klangfarben:	
§ 1. Physik der Klangfarben . . . . .	161
§ 2. Versuch einer psychologischen Theorie der Klangfarbe . . . . .	171
IV. Von den Vokalen . . . . .	176
Schluss . . . . .	180

Seitdem HELMHOLTZ durch seine bekannten Experimente nachgewiesen hat, daß die Farbe eines Klanges von der Stärke seiner Partialtöne abhängt, ist in 50 Jahren eine Reihe von Arbeiten über die Klangfarbe der Instrumente, eine ganze Literatur über die der Vokale erschienen. Man weiß, wie die hervorragenden Forscher, welche sich diesen Gebieten zuwandten, nicht zufrieden mit den subjektiven Befunden des Ohres, eine Reihe von trefflichen Methoden erdachten, um auf physikalisch zuverlässigerem Wege Aufklärung zu erhalten. Denn von vornherein enthielt ja die HELMHOLTZsche Lehre einen Dualismus, der zur Nachprüfung reizen mußte: gleiche Klangfarbe bei Instrumenten wurde auf gleiche Intensitätsverhältnisse der Partialtöne zurückgeführt, gleicher Vokalcharakter auf das Überwiegen von Obertönen in etwa fester Höhe der Skala. Ob diese Zweiteilung den Tatsachen entspricht, und ferner, von welchen physikalischen Verschiedenheiten die Unterschiede der Färbung im

einzelnen abhängen, eben das wollte man jetzt nachprüfen, vornehmlich durch Verfahren, die die Klangkurve dem Auge sichtbar und endlich ihre dauernde Fixierung, wie damit die mathematische Behandlung möglich machen.

Aber dieser Weg ist lang, und schon der Apparat schwer kontrollierbar, der die Schallwellen aufzeichnet; im allgemeinen wird das Ergebnis eine Resultante sein aus seinen Eigenschaften und denen des untersuchten Klanges. Liegt schliesslich Kurve und Rechnung vor, — wer weifs, ob man sie richtig deutet? Kurz, man darf sich nicht wundern, wenn in den letzten Jahrzehnten der wissenschaftliche Streit nicht hat beigelegt werden können, zwischen Forschern, die für Vokale wie Instrumente die Ansicht des Meisters bestätigt fanden, solchen, die prinzipiell auf dem Boden der überlieferten Lehre stehend, die Vokaltheorie doch glaubten modifizieren zu müssen, anderen ferner, die beide Erklärungsweisen kombiniert auf beide Klangarten anwenden und endlich wieder anderen, die auf nur einem der zwei angedeuteten Wege schon Vokale und Instrumentfarben zugleich erklären wollten. Als endlich in Arbeiten von MEISSNER<sup>1</sup> und HERRMANN-GOLDAP<sup>2</sup> eine ganz unerwartete Theorie der Instrumentklänge aufgestellt wurde, bekam ich von Herrn Geheimrat STUMPF die Aufforderung, die Angaben der beiden Forscher nachzuprüfen.

Wenngleich ich nun hauptsächlich psychologisches Interesse an der Frage hatte und feste Grundlagen gewinnen wollte für eine Theorie, die die Farbe eines Klanges irgendwie aus den Eigenschaften der in ihm versteckten Partialtöne oder ihren Relationen abzuleiten erlaubte, so mußte ich mir doch sagen, daß ein solcher Versuch, ohne hinreichende Klarheit über die objektiven Bedingungen jener akustischen Elemente unternommen, recht waghalsig, ja unmöglich sein würde; denn jede der vorliegenden physikalischen Lehren involvierte ohne weiteres Folgerungen für das psychische Material, aus dem sich gehörte Klänge aufbauen; auch über dieses also mußte Unsicherheit herrschen, und wie nun einmal die Faktoren beschaffen sind, die nach all-

<sup>1</sup> Klängaufnahmen an Blasinstrumenten, eine Grundlage für das Verständnis der menschlichen Stimme. Nachgelassenes Manuskript von G. MEISSNER. Herausgegeben von R. WACHSMUTH. *Pflügers Archiv*. 1907.

<sup>2</sup> Über die Klangfarbe einiger Orchesterinstrumente und ihre Analyse. Dissertation. Königsberg 1908.

gemeinem Zugeständnis mit Klangfarben zu tun haben, — vorderhand mußte es sicherer scheinen, von irgendwie gesicherten objektiven Befunden auf psychische Tatbestände zu schließen, als eine unabhängige Feststellung dieser letzteren zu versuchen, ist es doch bisher noch fraglich, ob sie sich überhaupt quantitativen Methoden werden unterwerfen lassen.

Andererseits wieder konnte keiner der bisher eingeschlagenen Wege zum Ziele führen: daß von so vielen namhaften Gelehrten keiner sollte das Richtige getroffen haben, war freilich unwahrscheinlich, aber noch war kein Verfahren von unmittelbar garantierter Zuverlässigkeit vorhanden, das zwischen ihnen entschied. Ein solches Kontrollverfahren soll im folgenden geschildert werden.

## I. Über eine neue Methode der Klangaufnahme.

„Es wäre am erwünschtesten, die Bewegung des Trommelfells selbst zur Analyse bringen zu können, jedoch ist dies zurzeit noch nicht möglich.“  
HENSEN. 1887.

Die Grundlage aller ohrenärztlichen Untersuchungen ist das otoskopische Verfahren. Ein Hohlspiegel reflektiert das Licht einer starken Lampe in den Gehörgang, und der Mediziner hat nur die Concha etwas nach hinten oben zu ziehen und vielleicht noch einen kleinen Trichter einzuführen, um durch ein Loch im Spiegel das Trommelfell als Abschluss des Meatus hell erleuchtet zu sehen. Das bedeutet physikalisch: Auf das Trommelfell geworfene Strahlen kommen, diffus reflektiert, wieder aus dem Ohr heraus, und da ja selbstverständlich das Auge des beobachtenden Arztes an einer Stelle sich befindet, die kein Licht in den Gehörgang wirft, so ist ersichtlich, daß, besonders bei weitem Gehörgang, einfallende und von der Membran zurückgeworfene Strahlen gar nicht unbeträchtliche Winkel miteinander müssen bilden können. Gelingt es nun, einen kleinen Planspiegel derart auf dem Trommelfell anzubringen, daß er das aufgefangene Licht ebenfalls wieder aus dem Gehörgang zurückwirft, so sind die wesentlichen Bedingungen für eine experimentelle Versuchsart gegeben, wie sie besonders von L. HERMANN bei seinen Vokalaufnahmen mit Membranen und schwingenden Platten verwandt wurde.

Auf diese Weise zu verfahren, ist dem Verfasser gelungen, und der Wunsch HENSENS, den ich oben zitierte, jedenfalls erfüllt oder erfüllbar. Bevor ich aber das beweise, drängt es mich, im Gefühl der größten Verpflichtung denen herzlich zu danken, ohne deren ungewöhnliche Güte und Ausdauer ich niemals hätte so weit kommen können: zunächst Herrn Professor BRÜHL, der es sich nicht verdriessen liefs, den Spiegel immer wieder von neuem anzubringen, wenn er nicht die richtige Lage hatte oder locker geworden war; dann meinen Freunden stud. phil. E. BECKER und stud. med. P. STUMPF, die, während ich selbst Versuchsperson war, die Anordnung besorgten und die Aufnahmen machten, wobei denn so gewandte Experimentatoren auf wesentliche Verbesserungen des von mir angegebenen Planes kommen mußten. Sie haben weder Zeit noch Anstrengung geachtet, und das ist doppelt anzuerkennen, weil wir zeitweilig auch keinen Schritt vorwärts kamen.

Einige Bedenken standen dem Vorhaben von vornherein im Wege, die es zu zerstreuen gilt; das medizinische zunächst, es könnten durch den Spiegel im Ohr irgend gesundheitliche Störungen lokaler oder allgemein nervöser Art verursacht werden, wird dadurch beseitigt, dafs zunächst ich und nach mir zwei Versuchspersonen, endlich wieder ich selbst den Spiegel zum Teil Wochen hindurch auf dem Trommelfell getragen haben, ohne sein Vorhandensein irgend unangenehm zu bemerken. Ferner ist, was natürlich entscheidende Bedeutung für die Methode hat, auch eine Herabsetzung des Gehörs bei den angewendeten Dimensionen nicht im geringsten vorhanden, solange der Spiegel wirklich fest am Trommelfell haftet; sobald er sich lockert, übt er eine deutlich merkbare Dämpfung aus, an der ein solcher Fehler sogleich konstatiert werden kann. Auf diese Feststellung lege ich besonderen Wert, weil hier die Kritik am leichtesten einsetzen könnte. Während der ganzen Zeit habe ich akustische Beobachtungen gemacht und oftmals das freie Ohr fest verschlossen, um zu prüfen, wie es mit der Hörschärfe des belasteten stünde: nur ein einziges Mal habe ich geglaubt, eine ungewohnte Spur von metallischem Klang in allem Gehörten zu entdecken, und keine der weiterhin berichteten Tatsachen stützt sich auf Beobachtungen bei dieser Lage des Spiegels. Den Differenzton, den die Violinenquinten beim Stimmen geben, hörte ich wohl auf zwei Meter und mehr bei Verschluss des freien Ohres,

und auch die schwachen Obertöne der EDELMANNschen Gabeln mit Laufgewicht sind vollkommen deutlich.

Schwieriger war es, den Spiegel derart auf dem Trommelfell anzubringen, daß er seinen Zweck erfüllte. Alle Versuche, ihn direkt auf die Membran aufzusetzen, führten zu Mißerfolgen, weil dann bei der schrägen Stellung des Trommelfells zur Achse des Gehörganges der Reflex nicht wieder zurückkam, sondern von der Meatuswand aufgefangen wurde. Ich hatte schon die Absicht, an der betreffenden Stelle einen zweiten Spiegel anzubringen, um durch ein nochmaliges Reflektieren des Lichtes zum Ziel zu kommen, aber zum Glück liefs sich ein derartiges unbequemes Billardspiel mit dem Strahl auf folgendem Wege vermeiden: aus feinem Aluminiumblech wurde ein Streifen, andert-halbmal so lang wie der Spiegeldurchmesser und halb so breit geschnitten, in der Mitte geknickt, und dieses Winkelchen mit der einen Hälfte auf die Rückseite des Spiegels geklebt. Wurde nun die Öffnung des Winkels gleich  $50-60^{\circ}$  gewählt, so liefs sich durch ihn die Neigung des Trommelfells kompensieren. — Übrigens zeigte sich, daß der kleine Apparat auch so noch nicht vollendet war. Die freie Rückseite des Aluminiumwinkelchens wird zu den Versuchen mit Syndetikon auf die Membran geklebt. Will man Winkel und daran haftenden Spiegel später durch Ausspülen entfernen, so geschieht es gar zu leicht, daß das Ganze in den Recessus fällt, der von den beiden unteren Trommelfellquadranten und der schräg nach unten laufenden Gehörgangswand gebildet wird. Von dort ist er nur mit großer Mühe zu entfernen, zumal wenn er so zu liegen kommt, daß die glatte Spiegelfläche am feuchten Trommelfell adhärirt. Ein am Scheitel des Winkels festgebundener dünner Seidenfaden von der Länge des Gehörganges beseitigte diese Schwierigkeit: er bleibt beim Aufkleben mit seinem freien Ende zurück und erlaubt es, ohne weiteres den durch vorsichtiges Spülen mit warmem Wasser gelockerten Spiegelwinkel herauszuziehen. Weder das optische Verfahren noch die Hörfähigkeit wird so im mindesten behindert. Zunächst ist freilich das kratzende Geräusch, welches der Faden bei Bewegung der Gesichtsmuskeln im Meatus hervorruft, nicht erfreulich, aber wenn man den Spiegel erst einmal vierzehn Tage im Ohr getragen hat, wird man davon so wenig mehr gestört, wie gewöhnlich von der Reibung der Kleider am Körper.

Die Spiegel, die ich schliesslich allein verwendete, sind Plan-

spiegel von 3 mm Durchmesser, wie sie die Firma SCHMIDT & HAENSCH für Galvanometer anfertigt; bei kleineren Spiegeln ist der Reflex zu lichtschwach, um photographisch gut verwendbar zu sein, bei 4 mm Durchmesser war eine gewisse Dumpfheit des belasteten Ohres für mich nicht zu verkennen, welche bei dem 3 mm-Spiegel, wie erwähnt, völlig fehlte. Mit dem Faden beträgt das Gewicht des Ganzen 0,017 g, ein Betrag, der auch von Cerumenstücken, die sich gelegentlich an das Trommelfell hängen, erreicht wird<sup>1</sup>; auch diese bilden ja keine akustische Störung.

Beim Aufkleben verfuhr Herr Professor BRÜHL folgendermaßen: da mein Gehörgang weit und gerade, mein Trommelfell relativ unempfindlich ist, konnte er den auf der Rückseite mit einem Leimtropfen versehenen Winkel mit der gewöhnlichen Fremdkörperzange der Ohrenärzte fassen, in den Meatus einführen und gegen die Membran drücken; erhielt er nicht gleich den Reflex, wie er sein sollte, so konnten oft kleine Verschiebungen und Drucke mit der Sonde noch zum Ziele führen. Lag der Spiegel richtig, so wartete ich etwa eine halbe Stunde in derselben Stellung, bis sich ein Tröpfchen Leim, das gleichzeitig mit dem verwendeten aus der Tube geflossen war, als erstarrt erwies, und konnte dann ohne irgend welche Vorsichtsmaßregeln davongehen und mich verhalten wie sonst. Beim Tanzen, Rudern, Laufen und Turnen blieb der Spiegel ruhig kleben, und erst nach einer Zeit, die zwischen einer und drei Wochen schwankte, stellte sich eine Lockerung ein, worauf er denn von neuem aufgesetzt wurde. Bemerken möchte ich noch, daß natürlich im Anfang jede Berührung des Trommelfells unangenehm ist, aber man gewöhnt sich sehr daran, und nur das Aufkleben an der Stelle, wo von der Innenseite der Hammergriff anliegt, behält etwas Schmerzhaftes; man muß sich wohl hüten, durch reflektorisches Zucken die Arbeit des Arztes zu erschweren.

Soviel über den gewissermaßen physiologischen Teil der Versuchsanordnung. Sie ist im übrigen der bekannten HERMANNschen nachgebildet. Die Innenwand eines Dunkelzimmers des psychologischen Instituts hat an einer Stelle eine quadratische Öffnung, die bis auf einen beweglichen Spalt verschlossen wird. Auf diesen fällt das konzentrierte Licht einer im Nebenraume stehenden Projektionslampe von 20 Ampère. Im Zimmer selbst

---

<sup>1</sup> So versichert mir Herr Prof. BRÜHL.

wird das Ohr der Versuchsperson derart in den Weg der Strahlen gebracht, daß diese auf den Trommelfellspiegel fallen und nach der Reflexion den Meatus wieder verlassen. Jetzt werden sie von einer Linse konvergent gemacht, und wo das Bild des Spaltes entsteht, befindet sich der Aufnahmeapparat, ein lichtdichtes Metallgehäuse mit einem zu dem ersten senkrechten Spalt. Hinter diesem fährt, durch ein Gewicht gezogen, die photographische Platte vorbei und wird, wenn das Trommelfell schwingt, mit Kurven beschrieben.<sup>1</sup>

So einfach nun, wie das alles jetzt klingt, so schwierig war es, dahin zu kommen. Zur Festlegung des Kopfes zunächst verfahren wir folgendermaßen: die Versuchsperson sitzt in einem Stuhl mit Kopfstütze und Stirnriemen; von einem festen Stativ auf der Seite des unbenutzten Ohres reicht eine starke Holzleiste bis unter ihr Kinn und dient als Träger eines Brettes, das drehbar ist um Achsen parallel der Median- und Sagittalebene des Kopfes. Auf diesem Pult befindet sich, ebenfalls verschiebbar, ein Gipsabguß des Unterkiefers, und in diesen wird durch einen Gurt der Kopf hineingedrückt. Da das Stativ verstellbar, die das Pult tragende Leiste um eine vertikale Achse drehbar und die von hinten angreifende Kopfstütze nach oben und unten beweglich, außerdem noch in einem Kugelgelenk zu drehen ist, so ist in diesem System von Haltern genügend für „Freiheitsgrade“ gesorgt, um verschiedene Einstellungen des Kopfes zu ermöglichen. Es versteht sich von selbst, daß umgekehrt die einzelnen Stützen genügend fixiert werden können. Hier wird, vermute ich, der Physiker zur Kritik geneigt sein: man hat sich für die Aufstellung von Membranen zu phonographischen Zwecken erschütterungssichere Pfeiler gewünscht, und bevor ich meine Versuche begann, ist mir von einem hochverehrten Naturforscher der Einwand gemacht worden, es werde kaum möglich sein, den von weicher Substanz rings umgebenen Kopf zu fixieren. Lange Zeit war ich deswegen auch in Sorge; aber immer wieder habe ich mir gesagt, daß, wenn der Kopf nur einmal so weit fixiert wäre, daß nicht durch größere Bewegungen die optische Einstellung gestört würde, damit auch Geschwindigkeiten ausgeschlossen sein müßten, die der Größenordnung nach den

---

<sup>1</sup> Der Aufnahmeapparat stammt von Herrn Mechaniker OEHMKE in Berlin.

akustischen irgend gleichkämen.<sup>1</sup> Ja, aus Gründen, die ich noch anzugeben habe, haben wir ein gewaltsames Einpressen vermieden; wenn ich wollte, konnte ich immer kleine Bewegungen machen, und dadurch auf Geheiß meiner Versuchsleiter die optischen Verhältnisse günstiger gestalten. Im übrigen verweise ich auf die weiterhin abgebildeten Kurven.

Bei der großen Mehrzahl der Versuche stand der Stuhl so weit von der Wand entfernt, daß die Entfernung zwischen Spalt und Trommelfell etwa 45 cm betrug. Der Spalt war nach oben und unten, nach links und rechts verschiebbar, so daß die sehr störenden Schwankungen der Lampe kompensiert werden konnten, endlich um seine eigene Mitte drehbar, weil er ja auf der Schwingungsrichtung, die nach Lage des Spiegels und Kopfhaltung variierte, jederzeit senkrecht stehen sollte. Von der Wand zur Rückseite des Stuhles lief eine feste Metallstange, die drei Zwecken diente: zunächst dem Ohre war ein Arm drehbar befestigt, dessen Ende sich über dem Ohr befand und an einer Schnur eine innen wattierte Holzklammer zum Zurückziehen der Ohrmuschel trug; mehr der Wand zu folgte, ebenfalls an drehbarem Arm, das Brillenglas von 2,25 Dioptrien, das als Linse diente, und endlich ein Spiegel mit Kugelgelenk, der die konvergenten Strahlen auf die gewünschte Höhe des zweiten Spaltes warf. Der Aufnahmeapparat, an dem sich dieser befindet, stand auf einem besonderen Stativ meist hinter dem Rücken der Versuchsperson. Ich möchte an dieser Stelle noch hervorheben, daß es Herr stud. P. STUMPF war, der bei den ersten Versuchen, bei denen er die Einstellung des Kopfes besorgte, die Notwendigkeit erkannte, den Spalt in der Wand mannigfach verschiebbar zu machen, und diese Aufgabe in ebenso einfacher wie sinnreicher Weise löste, ferner, daß er auf meinen Vorschlag hin, eine Gipsmaske als Stütze zu benutzen, das praktische Pult dafür konstruierte, und daß von ihm endlich die Vereinigung von Conchahalter, Linse und Spiegel auf einer Metallachse herrührt.

Die Entfernung der Linse vom Ohr ergab mit der des Ohres vom ersten Spalt die doppelte Brennweite der Linse, so daß auch das Bild in dieser Entfernung hinter der Linse entstand und so groß war, wie der abgebildete, sehr schmale Spalt selber. Das erwies sich schließlichs als die beste Anordnung, die mit unseren

---

<sup>1</sup> Es kommt hinzu, daß die Aufnahme nur etwa  $\frac{1}{5}$  Sekunde dauerte

Mitteln zu erreichen war. Die Vorzüge, die es hat, die Linse in den Lichtweg vor der Reflexion im Ohr anzubringen, werden leider aufgewogen dadurch, daß dann die Versuchsperson aus einfachen optischen Gründen viel weiter von der Lichtquelle entfernt sitzen müßte und die Flächendichte des Lichtes auf dem kleinen Spiegel infolgedessen allzu gering würde, ist er doch überhaupt nur unter besonders günstigen Umständen in allen seinen Teilen direkt beleuchtet. Damit wenigstens auf dem Rückweg von den reflektierten Strahlen soviel wie möglich den Gehörgang wieder verläßt, erwies es sich als vorteilhaft, nicht nur die Concha, wie oben beschrieben, zurück- und emporzuziehen, sondern vor allem zwischen Anthelix, Tragus und Antitragus einen schmalen Aluminiumring einzuklemmen, der den Tragus beiseite schiebt. Es ist natürlich ausgeschlossen, daß diese beiden Mafsregeln die zum Ohr dringenden Schallwellen irgend modifizieren könnten, ich habe auch als Versuchsperson nie das mindeste davon bemerkt, vom Ohrentrichter der Ärzte, der ja die Funktion des Ringes hätte übernehmen können, sah ich gerade deshalb ab, weil er doch wie ein kleiner Resonator gewirkt hätte. Die aufzunehmenden Klänge wurden so dicht vor dem Ohr erzeugt, wie es die optische Einrichtung nur gestatten wollte, aber stets ohne Schallrohr oder dergleichen.

Das führt uns auf die Frage, was wir überhaupt von unserer Methode zu erwarten haben. Daß auch das Trommelfell, wie jede Membran, seine Eigenschwingungen haben müsse, ist ein Einwand, der mir im Anfang mehrmals gemacht wurde, aber natürlich deshalb nicht stichhaltig ist, weil wir ja auch diese hören müßten und es mir ja gerade auf den gehörten Klang ankommt. Übrigens sagen selbst Forscher, die so lebhaft das Studium der objektiven Schwingung empfehlen, wie L. HERMANN, „daß das Trommelfell den wahren Vorgang unzweifelhaft in aller Strenge, oder wenigstens in maßgebendster Weise zur Darstellung bringt.“<sup>1</sup>

Aber wie, wenn HERMANN, vor ihm HELMHOLTZ, POLITZER, HENSEN und heute noch die große Mehrzahl der Ohrenärzte und Physiologen, im Irrtum wären, und die Meinung JOHANNES MÜLLERS sich bewahrheitete, daß der Schall in der Regel als longitudinale Welle durch Trommelfell und Gehörknöchelchenkette laufe und

<sup>1</sup> *Pflügers Archiv* 47, S. 369. 1890.

transversale Schwingungen nur bei exzessivem Reiz vorkämen? Ähnliche Ansichten sind in neuester Zeit gerade von einigen Otiatern geäußert worden, und wenn nach einer Autorität wie BEZOLD „in der Aufnahme (nur) der tiefen Töne aus der Luft ... die Haupt-, ja wahrscheinlich die einzige Funktion des Schallleitungsapparates besteht“<sup>1</sup>, so muß man sich doch sagen: Schwingungen, die wir nicht hören, kann das Trommelfell nicht machen — vielleicht aber macht es nicht einmal alle mit, die wir hören?

Daraus ergab sich die Aufgabe, zunächst über die Funktionsweise des Trommelfells das Nötigste festzustellen. Und nicht allein für das Ziel dieser Untersuchungen, auch für die Physik, die Physiologie der Sinnesorgane und nicht zum wenigsten die Ohrenheilkunde mußte ja jede gesicherte Auskunft hierüber von bedeutendem Interesse sein.

## II. Über die Funktion des Trommelfells und des Tensor tympani.

VON ED. WEBER, MACH UND HELMHOLTZ rührt im wesentlichen die Theorie der Mittelohrfunktion her, von der ich ausging. In ihren Grundzügen kurz und klar präzisiert, findet man sie von K. L. SCHAEFER: „Das Trommelfell schwingt mit dem fortzuleitenden Tone oder Klange als resonierende Membran mit. Bei seiner Einwärtsbewegung geht die Hammergriffspitze mit nach innen und, da die Bewegung des Hammers im wesentlichen eine Drehung um das Achsenband ist, der Hammerkopf nach außen. Dabei nimmt letzterer den Kopf des Ambosses, der sich seinerseits um seinen kurzen Fortsatz als Achse dreht, mit und veranlaßt so eine Hebung und Einwärtsbewegung des langen Ambossfortsatzes, durch welche der Steigbügel in den Vorhof gedrückt wird. Beim Auswärtsschwingen des Trommelfells verlaufen die Bewegungen der Knöchelchen umgekehrt.“<sup>2</sup>

POLITZER<sup>3</sup> war der erste, der am Präparat den experimentellen Nachweis erbrachte, daß wirklich die Gehörknöchelchen als Ganzes schwingen. Nach Öffnung des Tegmen tympani

<sup>1</sup> *Münchener medizinische Wochenschrift* 19/20. 1900.

<sup>2</sup> NAGELS Handbuch der Physiologie des Menschen. 3, II.

<sup>3</sup> *Arch. f. Ohrenheilk.* 1. 1864.

befestigte er am Hammerkopf ein Fähnchen, und dieses schrieb auf einer beruften Fläche die zierlichsten Kurven auf, sobald das Trommelfell von intensivem Schall getroffen wurde. LUCAE<sup>1</sup> konnte diese Resultate mehrfach bestätigen, BUCK<sup>2</sup> und andere sie durch mikroskopische Beobachtung ergänzen. Endlich machte BERTHOLD<sup>3</sup> den äußeren Gehörgang des lebenden Menschen zur manometrischen Kapsel, wobei das Trommelfell die von KÖNIG verwandte Membran vertrat, und erhielt auch Flammenkurven im rotierenden Spiegel, wenn er eine tönende Stimmgabel auf den Kopf setzte. Auch diese Angaben sind bei Wiederholung durch NAGEL und SAMOJLOFF<sup>4</sup> bestätigt worden.

Trotzdem habe ich lange Zeit die wiedergegebene Theorie bezweifelt und vergeblich nach Erklärungen für die Versuchsergebnisse der genannten Forscher gesucht. Wir haben nämlich Wochen hindurch keine Schwingungen des Trommelfells konstatieren können. Ich erwähne das für diejenigen, die etwa meine Angaben nachprüfen wollen, und denen es zunächst ebenso gehen könnte. Ganz aufgeklärt ist dieser anfängliche Misserfolg noch nicht. Da er auch jetzt noch auftritt, sobald der Spiegel nicht absolut fest am Trommelfell anliegt, wäre es möglich, hierin den Fehler zu sehen, zumal wir damals, um Herrn Professor BRÜHL nicht zu sehr zu beanspruchen, das Aufkleben des Winkelchens selbst besorgten, natürlich mit einer schüchternen Vorsicht, die der geübte Ohrenarzt dieser zähen, wenn auch sehr dünnen Membran gegenüber nicht anzuwenden braucht. Man muß ferner in solchen Fällen nicht vergessen, den Spalt um seine Mitte zu drehen. Die Beobachtungen geschehen an einem weißen Schirm, auf den der Trommelfellspiegel das Bild des Spaltes wirft. Fällt nun die Schwingungsrichtung zufällig ganz oder nahezu mit seiner Längsrichtung zusammen, so wird es besonders, solange man noch keine Erfahrung hat, schwer, die Verbreiterung, die Schwingungen anzeigt, zu konstatieren, natürlich weil die absolute Unterschiedsempfindlichkeit dann zu gering ist.

Um die Ausschläge durch Verlängerung des Lichthebels

<sup>1</sup> Zuerst *Arch. f. Ohrenheilk.* 1. 1864.

<sup>2</sup> *Arch. f. Augen- u. Ohrenheilk.* 1 (2). 1870.

<sup>3</sup> *Monatsschr. f. Ohrenheilk.* 1872.

<sup>4</sup> *Arch. f. Anatomie u. Physiologie.* Phys. Abteilung. 1898.

vielleicht doch noch sichtbar zu machen, hatten wir schliesslich das durch sehr schwache Linsen entworfene Bild erst in 12 m Entfernung (nach mehrmaliger Reflexion durch Spiegel an den Zimmerwänden) aufgefangen, wobei es natürlich selbst vergrößert und zu einem Lichtbände wurde. Als deshalb auch dies Mittel selbst bei lautem Schreien versagte, beschloß ich, um ganz sicher zu gehen, doch noch einen Bildpunkt während der Schalleinwirkung zu photographieren; es konnte ja sein, daß sich dabei noch kleine Bewegungen konstatieren ließen, die uns bei direkter Beobachtung entgangen waren. Dazu mußte das Bild schärfer und feiner gemacht, also genähert werden. Und als dies nach Linsenaustausch geschehen war, bemerkte Herr BECKER beim Rufen eines Vokals eine deutliche Verbreiterung, von deren Vorhandensein wie von der Richtigkeit aller weiter folgenden Angaben ich mich überzeugen konnte, wenn das Bild mittels des drehbaren Spiegels auf einen Schirm vor mir (der Versuchsperson) geworfen wurde. Später zeigte sich, daß diese Verbreiterungen auch sehr gut erzeugt werden konnten, wenn ich selber (nach Entfernung der Gipsmaske) laut sang, und wenn mir an einem Spafs gelegen hätte — der Aufnahmeapparat konnte in den Bereich meines Armes gestellt und ein Vokal der eigenen Stimme vom eigenen Trommelfell eigenhändig photographiert werden. Es schwingt seit jener Zeit immer, an der von uns benutzten Stelle merklich und so, daß Aufnahmen möglich werden, freilich nur bei ziemlich lautem Schall. Diese Stelle ist der Teil der Membran, dem von innen der Griff des Hammers anliegt; sie wurde gewählt, weil man nicht im voraus wissen kann, ob alle Teile des Trommelfells gleichmäÙig auf alle Töne reagieren, sicher aber jedes Klangelement, das überhaupt auf dem Weg der Gehörknöchelchenkette ins innere Ohr gelangt, Komponente der Hammergriffschwingungen werden muß. Da ich vor allem meinem Hauptziel zustrebte, mußte ich auf diesen Umstand Gewicht legen und die Untersuchung der übrigen Membranteile einstweilen beiseite lassen; diese Arbeit wird mit einer zufälligen Beobachtung abschließen, die vielleicht auf Eigenschaften eben jener anderen Trommelfellteile hinweist.

Fünf Arten von Bewegungen macht das vom Ohr kommende Spaltbild. Von Zeit zu Zeit verschiebt es sich ohne akustischen Anlaß ein wenig in irgendeiner Richtung, und wenn auch die Versuchsperson es nicht selbst angäbe, so könnte doch der geübte

Beobachter, der sozusagen das Bild kennt, diese Verschiebungen gewöhnlich als Kopfbewegungen ohne weiteres von anderen unterscheiden. Sie kommen natürlich bisweilen vor, wenn die Versuchsperson schon längere Zeit eingeschnallt ist, sind aber auch dann noch mit Sicherheit für wichtige Minuten vollständig auszuschließen, zumal wenn die Versuchsperson die eigene Haltung durch Beobachtung des Reflexes prüfen kann. Erst wenn — besonders bei unbequemer Kopfhaltung — die Halsmuskeln krampfartig zu vibrieren beginnen, kann auch der festeste Wille nicht mehr viel helfen. Die zweite Bewegung ist die beim Schlucken; dabei beschreibt der Reflex eine lange Schleife nach unten. Die dritte ist die vom Puls im Trommelfell herrührende: als ein kleines Zucken nach oben ist sie jederzeit dem aufmerksam beobachtenden Auge sichtbar, und daß ihr mit Recht diese Ursache zugeschrieben wird, zeigt sich sofort beim Vergleich mit dem Handgelenkpuls. Auf akustische Einwirkung reagiert das Bild zweifach: es wechselt seine Lage sofort nach Einsetzen des Schalles, und es verbreitert sich, dies wegen der Hammeroszillationen, jenes durch die Reflexbewegung des berühmten *Musculus tensor tympani*. Vor allem ist erforderlich zu wissen, welche Rolle dieser spielt, und deshalb soll an dieser Stelle berichtet werden, was sich über ihn feststellen liefs.

Wovon der Reflex des *Tensor tympani* abhängt, wie er sich abspielt, das sind nicht ganz gelöste Fragen. Demgemäß schwanken die Theorien und die Auslegungen seiner Wirksamkeit in teleologischer Hinsicht. JOHANNES MÜLLER hielt ihn für ein Schutzmittel: die Sehne des Muskels greift am *Manubrium mallei* an, und da dieses mit dem Trommelfell verwachsen ist, so dachte er sich bei übermäfsiger Schalleinwirkung den Muskel kontrahiert und die Oszillationen von Membran und Hammer durch Spannung reduziert.

Ähnlich stellte sich wohl HELMHOLTZ zu der Frage, ganz anders eine Zeitlang MACH<sup>1</sup>, welcher vermutete, der *Tensor* akkommodiere das Trommelfell für die verschiedenen Tonhöhen, jeder derselben korrespondiere eine bestimmte Anspannung des Muskels — wir nennen dies im folgenden Akkommodations-theorie —, und eigentlich seien es die verschiedenen Spannungsempfindungen, welche uns Tonhöhen erkennen liefsen. STUMPF

<sup>1</sup> Sitzungsber. d. W. Akad. Math. phys. Kl. 1863.

hat bereits in dem ersten Band der „Tonpsychologie“ die wichtigsten Bedenken gegen die skizzierte Ansicht geäußert, und aus Mangel an experimentellen Nachweisen gab der berühmte Physiker seine Meinung auf. Später aber stellten HENSEN<sup>1</sup> und BOCKENDAHL<sup>2</sup> am lebenden Tiere Versuche an, wobei auf verschiedene Tonhöhen verschiedene Zuckungen des Muskels erfolgten, nur konnten die Kieler Physiologen nicht darüber ein werden, ob der Tensor während dauernder Schalleinwirkung kontrahiert bleibe oder nur im Beginn eine Zuckung ausführe. HENSEN hält auf seine Untersuchungen hin bis in die neueste Zeit daran fest, der Tensor sei ein Akkommodationsmuskel mit der besonderen Aufgabe, die Konsonanten abzuschwächen, damit die wichtigen Vokale mehr hervortreten.“ Ebenfalls auf Grund von Versuchen an Hunden hat POLLAK (*Medizinische Jahrb. N. F.* 1886) die Akkommodationstheorie verteidigt; er hatte übrigens anhaltenden Ausschlag gefunden, außerdem „Unterschiede, welche sich durch die verschiedene Intensität der angeschlagenen Töne ergeben“. — Und wie schon die genannten Forscher bemerkten, daß auch bei gleicher Tonhöhe stärkerem Schall ein stärkerer Reflex folgte, so haben mehrere Mediziner, zuerst wohl POLITZER, am Präparat eine Abnahme der Schwingungen bei Tensorspannung konstatiert, ein Befund, durch den eine Abhängigkeit der Reaktion von der Intensität des einwirkenden Schalles und die Annahme einer Schutzfunktion im Sinne JOHANNES MÜLLERS recht nahegelegt wurde. KESSEL vollends machte an Patienten die ergänzende Beobachtung, daß die Schwingungen des Hammerkopfes nach Durchschneidung des Tensors um  $\frac{1}{4}$  zunahmen. Trotz dieser Befunde hat OSTMANN<sup>4</sup> die Annahme eines Apparates, welcher in dem Moment, wo das Sinnesorgan in Aktion tritt, die Schärfe des Sinnsorganes vermindert, für paradox erklärt. Wer weiß? Die Natur scheint bisweilen kapriziös, und statt immer recht viel Licht auf die Netzhaut fallen zu lassen, verengert sie paradox genug bei wachsender Reizintensität die Pupille, wobei denn, wenn man es so auffassen will, die „Schärfe des Sinnesorganes vermindert wird“.

<sup>1</sup> HERMANN'S Handb. d. Phys. III. 2.

<sup>2</sup> Diss. Kiel 1880.

<sup>3</sup> *Pflügers Arch.* 87. 1901. Ergebnisse d. Phys. I, 2. S. 860 ff.

<sup>4</sup> *Arch. f. Anatomie u. Physiologie.* 1898.

Über die Reflexbahnen des Tensor tympani bei Hunden und Katzen hat dann HAMMERSCHLAG eine außerordentlich klare Arbeit veröffentlicht. Es gelang ihm zunächst, POLLAKS Versuche zu bestätigen, wonach der Reflex in zentripetaler Phase im Akustikus verläuft, und zwar schien der Hörnerv nur bei adäquater Reizung die Reaktion auszulösen. Da (wie früher in POLITZERSCHEN Untersuchungen) bei Reizung des peripheren Trigeminstumpfes der Muskel in Kontraktion geriet, so ist auch über die zentrifugale Bahn ein Zweifel nicht mehr möglich. Wichtig sind nun folgende Feststellungen: wie schon GELLÉ und STRICKER behauptet haben, ist nämlich der Reflex konsensoriell. Wenn HAMMERSCHLAG Schnecke und Nervus acusticus rechts völlig zerstörte, so brachten Töne von einiger Intensität vor dem linken Ohr den rechten Hammer zu kräftiger Bewegung. Die Reaktionen unterblieben natürlich nach Durchschneidung auch des linken Akustikus, und der Autor kann den Satz aufstellen: „Neben der zweifellos bestehenden Reflexbahn zwischen dem Akustikuskern und dem motorischen Trigeminskern derselben Seite besteht . . . eine zweite Reflexbahn, die von dem Akustikuskern der einen Seite zum motorischen Kern des Trigemini der anderen Seite verläuft.“ — Es gelang sogar (wenigstens für Katzen), den Verlauf dieser zweiten Reflexbahn näher zu bestimmen.

Die zweite wichtige Tatsache ist, daß der Reflex ohne Beteiligung des Großhirns erfolgen kann: die Reaktion erfolgte unverändert nach beiderseitiger totaler Schläfenlappenexstirpation, ebenso wenn durch einen Schnitt unter dem Hinterhauptslappen hindurch das Großhirn von Medulla, Brücke und Kleinhirn vollständig getrennt wurde. Die näheren Angaben müssen wir bitten, in der Originalarbeit<sup>1</sup> selbst nachzulesen. Wir werden noch einmal auf sie zurückkommen.

Vor wenigen Jahren — und wir sind erst nach Abschluß unserer Untersuchungen darauf aufmerksam geworden — hat endlich W. HEINRICH<sup>2</sup>, der die Akkommodationstheorie vertritt, an Tierpräparaten Versuche gemacht, unter Anwendung einer der unseren ähnlichen Methode. Aber leider hat er sie durch das MICHELSONSche Interferenzverfahren kompliziert, und da der angewandte Spiegel gar zu klein war, konnten keine Aufnahmen

<sup>1</sup> *Arch. f. Ohrenheilkunde* 47. 1899.

<sup>2</sup> *Bulletin der Krakauer Akad. Math.-naturwissenschaftl. Kl.* 1903.

gemacht und trotz der größten Anstrengungen sichere Resultate nicht erzielt werden; der Autor scheint selbst nicht befriedigt, und wenn er doch meint, an der Akkommodationstheorie festhalten zu sollen, so müssen wir auf Grund der Tatsachen widersprechen, die in folgendem zusammengestellt sind.

Der Tensorreflex wurde gleich beim Beginn unserer Versuche von Herrn stud. med. STUMPF bemerkt. Wenn man vor dem „armierten“ Ohre ruft, springt das Spaltbild auf dem Schirm an eine andere Stelle. Wir verwandten in allen Fällen das rechte Ohr, und da war die Bewegung nach hinten unten gerichtet, bald mehr horizontal, bald mehr nach unten, je nachdem wir den Kopf fixiert hatten und wo der Spiegel aufgeklebt war. Diese Richtung entspricht denn auch den anatomischen Verhältnissen: der Tensor greift etwa in der Mitte der Gesamtlänge des Hammers (von der Spitze des Manubrium bis zum Caput mallei gerechnet), also an einer Stelle an, die in der Höhe des oberen Trommelfellrandes (Membrana flaccida) liegt, und nimmt seinen weiteren Verlauf nach vorwärts, wo er in der Wand der Tuba verschwindet. Bei Kontraktion muß also die Spitze des Manubrium mit dem Umbo nach vorne einwärts gezogen werden, so daß die beschriebene Bewegung des Spaltbildes nicht ausbleiben kann.

In wenigen Versuchen konnte schon festgestellt werden, daß der Reflex nicht eine momentane Zuckung ist, daß vielmehr der Tensor tetanisch gespannt bleibt, solange die Intensität des Reizes dieselbe ist; in einzelnen Fällen zwar schien er über das Ziel hinausgeschossen zu sein und kehrte um einen ganz geringen Bruchteil des ersten Ausschlages zurück, aber da auch diese Erscheinung immer unterblieb, wenn recht sorgfältig auf möglichst konstante Stärke des Klanges geachtet wurde, so ist sie wohl auf Intensitätsschwankungen zurückzuführen. Sobald wir zu photographieren begannen, war eigentlich jede Aufnahme eine Bestätigung dieses Befundes; denn bevor irgend ein Klang photographiert werden konnte, mußte das Bild des ersten Spaltes so weit seitlich von dem zweiten<sup>1</sup> (am Aufnahmeapparat) entworfen werden, daß es der Reflex des Tensor tympani bei der beabsichtigten Stärke gerade auf die richtige Stelle brachte. Und während es sich hier befand, wurde es photographiert. Nun hören freilich diejenigen, welche den Tensor willkürlich zu inner-

<sup>1</sup> Und oberhalb der gewünschten Höhe.

vieren vermögen, bei dieser tetanischen Kontraktion „ein tiefes, schnurrendes Muskelgeräusch, welches wir beim Hören niemals wahrnehmen“ (OSTMANN), aber der Otiaater, der daraufhin behauptet hat, beim gewöhnlichen Hören trete unzweifelhaft keine tetanische Kontraktion auf, wird zugeben, daß sich die Verhältnisse in beiden Fällen nicht wohl vergleichen lassen, schon, weil vermutlich die willkürliche Anspannung, die den Muskelton ergibt, weit stärker ist, als die in der Regel vorkommenden reflektorischen. An der Tatsache der dauernden Anspannung ist jedenfalls nicht mehr zu zweifeln.

Aus dem Gesagten ist schon zu entnehmen, daß die Größe der Ausschläge von der Intensität abhängt. Keineswegs aber darf man dabei nur an lautes Schreien und Knalle denken. Wird das zu beobachtende Bild etwas weiter entfernt aufgefangen, so erkennt man, daß jedes Sprechen, ja Räuspern im Zimmer zu sichtbaren Reaktionen von je nach der Intensität verschiedener Größe führt; bei einer Entfernung des Schirmes von mehreren Metern kann man Ausschläge von Bruchteilen eines Millimeters und von halben Dezimetern bekommen, z. B. indem man eine tönende Stimmgabel bald dem Ohr nähert, bald entfernt.

Damit ist eigentlich jede Akkommodationstheorie schon unmöglich geworden. Nach ihr soll ja (z. B. bei W. HEINRICH) den verschiedenen Tonhöhen ein verschiedener Spannungszustand des Tensors entsprechen und dadurch der Eigenton des Trommelfells der Höhe des jeweiligen Klanges angepaßt werden. Nun entsprechen aber schon ein und demselben Ton, je nachdem wie stark er ist, ganz verschiedene Anspannungen und also Trommelfelleigentöne, es ist also nichts mit der qualitativen Anpassung.

Das kann man auch direkt beweisen und durch diesen Beweis eine andere Frage gleich mitentscheiden, nämlich ob die Größe des Ausschlages von dem jeweilig stärksten Ton abhängt oder von der Gesamtenergie der gleichzeitig wirkenden Schallwelle. Da der Reflex in zentripetaler Phase durch die Schnecke verläuft, wo, wie wir wissen, irgendwie der Schall in seine Sinuskomponenten zerlegt wird, so ist die Antwort nicht selbstverständlich. Wir verfahren nun so, daß zu einem von einer Männerstimme nach Qualität und Quantität unveränderlich festgehaltenen Tone für kürzere Zeiten eine zweite andere Töne bald tiefer, bald höher hinzufügte. Wie immerhin zu erwarten war, ist der Ausschlag während des Zusammenklanges entsprechend größer und

— damit kommen wir auf die Akkommodationsfrage zurück — es ist für Richtung und Betrag des Zuwachses völlig gleichgültig, ob der hinzukommende Ton über oder unter dem ersten liegt, der Betrag zeigt sich vielmehr wieder nur von der Intensität abhängig und ist immer positiv, nach jener Hypothese müßte er in einem Falle positiv, im anderen negativ sein. Wenigstens sollte man denken, daß sich der Tensor, einmal dazu bestimmt, das Trommelfell qualitativ zu akkommodieren, für eine Mittelstellung entscheide, wenn man ihm mit zwei gleichzeitigen Tönen kommt. In welche Verlegenheit aber müßte er geraten, sobald der eine aus der Subkontra-, der andere aus der fünfgestrichenen Oktave gewählt wird, oder vollends, wenn der reichhaltige Akkord eines modernen Orchesters mit Eigentönen des Trommelfells versorgt sein will!

Ob der Reflex überhaupt für verschieden hohe Töne bei gleicher Intensität irgend verschieden ausfällt, darüber können wir eine endgültige Entscheidung noch nicht geben, weil das Desiderat aller Akustiker, ein Instrument, das die Skala reiner Töne in meßbaren Stärken herzustellen erlaubt, vorläufig noch Desiderat ist und bleiben wird. Beobachtet wurde bisher vom Anfang der kleinen bis zu dem der fünfgestrichenen Oktave. Wenn Unterschiede vorhanden sind, beschränken sie sich auf eine geringe Abnahme der Tensorbewegung bei den höchsten Tönen, aber die waren zwar unangenehm, doch (mit der Galtonpfeife) nicht so laut zu bekommen, wie die der mittleren und tiefen Regionen. Was helfen übrigens subjektive Abschätzungen objektiver Intensitäten in einem Falle, wo vielleicht die letzteren durch die Wirksamkeit eben des Tensors für den Urteilenden modifiziert werden? Als sehr wahrscheinlich kann indessen gelten, daß in den mittleren Oktaven die Reflexgröße überhaupt nicht Funktion der Tonhöhe ist. Wenn frühere Autoren angeben, die Vokale a e i o u erzielten in dieser Reihenfolge bei gleicher Tonhöhe (?) und Stärke immer schwächere Reaktionen, so dürften wohl doch Intensitätsunterschiede zur Erklärung heranzuziehen sein (vgl. STUMPF, „Tonpsychologie“ II, S. 299f.). Wir können nichts davon bemerken, wenn wir uns Mühe geben, die Vokale gleich stark zu singen oder zu sprechen. Außerdem würde die Akkommodationstheorie mit einer solchen Tatsache nichts anfangen können; denn die charakteristischen Tonhöhen der Vokale, auf die es doch wohl abgesehen ist, liegen, wie sich

zeigen läßt, bestimmt nicht in dieser Reihenfolge auf der Skala verteilt.

Um die Versuche HAMMERSCHLAGS bestätigen zu können, welche bei Katzen den Reflex als konsensoriell erwiesen, wandten wir folgendes Verfahren an: Aus einem Raum, der von dem Versuchszimmer durch einen dritten getrennt war, wurde möglichst schalldicht eine Röhrenleitung bis neben die Versuchsperson gelegt und mit deren linkem Ohr durch einen ebenfalls völlig abschließenden Hörschlauch verbunden. War der Schlauch zugeedrückt, so konnte ein draussen in die Röhre gesungener Ton nur eben schwach gehört werden, und der rechte Tensor machte keine merkliche Bewegung. Sowie aber der Schlauch geöffnet wurde, fand eine heftige Kontraktion, natürlich wieder bleibender Art und in genau der Richtung, wie bei Schall vor dem rechten Ohr, statt. An Kopfknochenleitung ist gar nicht zu denken, weil die Reaktion reichlich so stark auftrat wie bei Versuchen mit direkter Einwirkung auf das rechte Ohr, bekam doch das linke Impulse zugeleitet, die wegen der schalldichten Zuleitung äußerst intensiv waren. Eine Verbreiterung des Spaltbildes war bei diesem Versuch nicht sicher festzustellen, womit nicht bewiesen ist, daß die Kopfknochenleitung nicht sehr geringe Schwingungen auch am Trommelfell hervorzubringen vermöchte.<sup>1</sup> Jedenfalls aber ist die Reflexübertragung auch beim Menschen gesichert, wofern wir überhaupt aus den Feststellungen an einer Versuchsperson solche Schlüsse ziehen dürfen.

Über die Vorgänge bei willkürlicher Kontraktion konnte ich nichts ausmachen, weil ich nicht zu denen gehöre, deren Tensor Willensimpulsen folgt. Dagegen konnten wir einiges über die Geschwindigkeit ermitteln, mit der der Muskel Intensitätsänderungen folgt. Metronomschläge begleitet das Spaltbild auf dem Schirm durch Verschiebungen in gleichem Tempo, jedoch kehrt der Muskel schon bei dem Tempo 200 (etwas über 3 Schläge pro Sekunde) zwischen den einzelnen Schlägen nicht mehr völlig in seine Ruhelage zurück; zählt man etwas lauter, als das Metronom schlägt, und in demselben Tempo, so bekommt man auch jetzt noch sehr deutlich voneinander geschiedene Reaktionen für jede Zahl, und würde die Geschwindigkeit auf diesem Wege wohl noch etwas steigern können, ohne daß Tetanus eintritt. An

<sup>1</sup> Vgl. über diese Frage LUCAE, *Arch. f. Ohrenheilk.* 1. 1864.

Photographien werden wir später sehen, daß der Reflex den Intensitätsschwankungen von etwa 30 Schwebungen in der Sekunde gar nicht mehr folgt. Immerhin arbeitet er sonst wacker genug, und es ist äußerst spaßhaft anzusehen, wie das Bild auf dem Schirm Tempo und Rhythmus eines Studentenliedes ins Optische übersetzt. Dabei möchten wir doch für die Theoretiker des Rhythmus eines bemerken: es scheint, daß die zentrifugale Phase des Reflexes bei den meisten, wenn nicht allen Menschen durch eine Empfindung vertreten ist. Die OSTMANNschen Versuchspersonen haben öfters angegeben: „Es zuckt etwas im Ohr“, und wenn wir die Reaktion durch irgend welche kurzen und nicht zu schwachen Schläge hervorriefen, konnten wir bisher alle darauf aufmerksam gemachten Versuchspersonen zur Beobachtung des (mit akustischen Eindrücken gar nicht zu verwechselnden) kurzen Ruckes im Ohr bringen. Bei manchen Personen ist diese begleitende Empfindung sogar abnorm stark und unangenehm, schon wenn sie ein Metronom schlagen hören. Als MACH<sup>1</sup> früher einmal auf die Möglichkeit einer Verbindung von Tensor und Rhythmus in psychologischer Hinsicht hinwies, entgegnete MEUMANN<sup>2</sup>, daß der Akkommodationsmuskel nach MACHscher Auffassung dann auch Melodieempfindungen vermitteln müsse. Wenn wir MACH recht verstehen, würde er in gewissem Sinne gerade dies vom Tensor ursprünglich behauptet haben. Mit den Melodieempfindungen ist's nun freilich nichts, aber da die objektiven Bedingungen eines akustischen Rhythmuserlebnisses erweislich Zustandsänderungen in einem Muskel zur Folge haben, die in der Regel von Empfindungen begleitet zu sein scheinen, so können wir die Tensorbewegung wohl unter die Begleiterscheinungen des psychologisch-physiologischen Rhythmus rechnen: daß die in Frage stehenden Empfindungen von der großen Mehrzahl der Menschen nicht bemerkt werden, ist kein Argument, das uns schwer treffen könnte, haben wir doch wahrscheinlich Gelenk- und vollends Lageempfindungen genug, die wir nicht bemerken und die trotzdem von der größten Wichtigkeit sind. Ausdrücklich aber stellen wir fest, daß wir nicht daran denken, das Rhythmuserlebnis auf Tensorkontraktion „zurückzuführen“.

Ebenso vorsichtig müssen wir uns über den naheliegenden Gedanken äußern, die Tensorbewegung könne mit der immer noch rätselhaften Lokalisation von akustischen Empfindungen zu

<sup>1</sup> Wiener Sitz.-Ber. 1865.

<sup>2</sup> *Philosophische Studien* 10. 1894.

tun haben: statt einer unmittelbaren, d. i. auf Unterschiede akustischer Intensitäten gegründeten Auffassung der Richtung, von der der Schall herkommt, würde es sich darum handeln, in welchem Ohr der Tensor stärker zuckt oder angespannt ist, und so würden strenggenommen Muskelempfindungen lokalisiert. Aber der obige vom linken Ohr her konsensoriell ausgelöste Reflex war so groß, daß wir im Zweifel sind, ob die Reflexe links und rechts sich viel oder überhaupt an Größe unterscheiden, wenn die Schallwelle das eine Ohr stärker trifft als das andere. Wenn freilich ein Forscher wie HAMMERSCHLAG sich dahin ausspricht, man müsse die Intensität steigern, um von links her den Reflex rechts zu erzeugen, so wird es sich verlohnen, sowohl nach unserer Methode weitere Nachforschungen anzustellen, wie auch gut lokalisierenden Hunden die Tensoren vorsichtig zu durchschneiden und ihre Fähigkeit im Erkennen von Schallrichtungen nachher zu prüfen.

Mit etwas größerer Sicherheit dagegen können wir uns schon jetzt dafür aussprechen, daß JOHANNES MÜLLERS Hypothese, nach der der Tensor als Schalldämpfer dient, das Richtige getroffen hat, nur mit der Erweiterung, daß nicht allein extreme Intensitäten seine Reaktion hervorrufen, vielmehr allen Stärkegraden bestimmte Tensorkontraktionen zugeordnet sind. Es scheint nichts anderes theoretisch möglich, als daß bei Spannung die elastischen Kräfte im Trommelfell zunehmen, bei gleicher Intensität der physikalischen Schallwelle also die Amplituden von Membran und Hammer verringert werden. Einen Schutz für die Membran selbst gibt das freilich nicht, die zerspringt so eher, als wenn sie schlaff ist, wie bereits HENSEN betont hat<sup>1</sup>, aber er wird nicht gegen die Schutztheorie überhaupt geltend machen dürfen, „daß man Knall und sonstige Explosionen in der Regel nicht im voraus wissen könne“. Die waren noch gar nicht üblich, als sich in der Tierreihe der Tensor ausbildete, und deshalb sind Kanonen in diese Frage nicht hineinzuziehen. Der berühmte Kieler Physiologe meint freilich, der Tensor zucke bloß momentan, da aber die Kontraktion tetanisch ist, so kann sie doch viel nützen, wenn die Schalleinwirkung länger dauert: der Schaden, den große Amplituden in der Gehörknöchelchenkette und in der Schnecke anrichten dürften, würde ja wohl auch mit der Zeit wachsen. Endlich darf man hier ebensowenig einen Schutzengel

<sup>1</sup> a. a. O.

verlangen, der die rechtzeitige Kontraktion veranlaßt, wie er in den gar nicht seltenen Fällen vorhanden ist, wo erst der Anfang einer Zerstörung von lebender Substanz zur reflektorischen Schutzbewegung führt.

Eine weitere theoretische Konsequenz ist folgende: Während in der bisherigen Literatur fast immer von dem Eigentone des Trommelfells gesprochen wird und nur von wenigen (z. B. neuerdings von WAETZMANN, *Annalen d. Phys.* 1909, Nr. 5) betont wird, es dürfte deren mehrere haben oder vollends in Teilen schwingen können, ergibt sich aus den mitgeteilten Beobachtungen, daß man schlechterdings nur von Eigentönen bei einer bestimmten Intensität sprechen kann; denn jede Spannungsänderung muß ja die Eigenfrequenzen eines schwingungsfähigen elastischen Körpers ändern. So kommen wir am Ende in den schroffsten Gegensatz zur Akkommodationstheorie; denn während diese lehrt, jeder Tonhöhe werde der Eigentone des Trommelfells durch Spannung genähert, müssen wir umgekehrt schließen: sobald ein Ton das Ohr trifft, der einer der momentanen Abstimmungen der Membran nahe liegt, müssen die resonierenden Schwingungen so groß werden, daß der Tensor sich kontrahiert; dadurch werden nicht nur die Schwingungen kleiner, sondern auch der Eigentone verschoben und also auch auf diesem Wege die Amplituden vermindert. Vielleicht ist es besser so: wer weiß, wie lange das Trommelfell ein fortwährendes Mitschwingen in maximaler Resonanz aushielte?

Aber der Folgerungen sind noch mehr: Die Kontraktion des Muskels fanden wir abhängig von der Gesamtenergie der einwirkenden Schallwelle. Nehmen wir also an, zwei verschiedene Töne bildeten den wirksamen Reiz, so wird die resultierende Anspannung größer, als wenn jeder der beiden Töne einzeln erklingt (vgl. S. 150 f.): folglich muß in einem Zusammenklang jede der Komponenten schwächer vertreten sein, als wenn sie bei unveränderter physikalischer Stärke allein vorhanden wäre, und besonders müssen schwächere Töne von der Gegenwart stärkerer zu leiden haben. An Zusammenklängen gemachte unmittelbare Beobachtungen, die eine Verifikation bilden, liegen längst vor bei MACH<sup>1</sup> und bei STUMPF.<sup>2</sup> Auf dem angegebenen Wege erklärt sich auch höchst ungezwungen die Beobachtung,

<sup>1</sup> Sitzungsber. d. W. Akad. 1865, und sonst mehrfach.

<sup>2</sup> Tonpsych. II, S. 418 ff.

die HENSEN zugunsten seiner Akkommodationstheorie deutet: Wenn eine Stimmgabel (etwa 400 v. d.) tönt, während ein Metronom schlägt, so bemerkt man ein Anschwellen des Stimmgabeltones kurz nach jedem Schläge. Ich kann das bestätigen; aber der Ton wird während des Metronomschlages unterdrückt und, hört man genau zu, so bekommt er wohl nach dem Schläge seine Intensität nur wieder und behält sie bis zum nächsten, wie man besonders deutlich konstatiert, wenn die Schläge recht langsam aufeinander folgen. In allen solchen Fällen aber, wo ein Ton durch gleichzeitige andere geschwächt wird, sind sicherlich noch wichtigere Faktoren außer dem Tensorreflex wirksam, die man im Labyrinth oder gar in subkortikalen und zentralen Gebieten zu suchen hat.

Unsere Versuche regen endlich auch aufs neue zum Nachdenken über die wahre Deutung des WEBER-FECHNERSCHEN Gesetzes für Schallintensitäten an, ohne freilich schon die Entscheidung zu bringen. Solange man mit dem Schallpendel arbeitet, kommt freilich der Reflex zu spät, um etwa die Intensitäten zu modifizieren, sowie es sich aber um die Abschätzung und Vergleichung der Stärke dauernder Töne handelt, müßten wieder aus unseren Beobachtungen allerlei Veränderungen des objektiven Materials schon an der Peripherie des Körpers gefolgert werden. Der Muskel spannt sich für verschiedene Intensitäten verschieden an; wenn seine Kontraktion überhaupt die Schallstärken beeinflusst, so kommt es uns sehr unwahrscheinlich, ja unmöglich vor, daß er sie alle mit demselben Bruch multiplizieren oder dividieren sollte. Die Proportionalität zwischen Reizstärke und physiologischer Stärke würde also schon am Trommelfell zerstört werden.

Übrigens dürfen wir hierbei eins nicht übersehen: der ganze Binnenohrapparat ist bekanntlich derart angelegt, daß Schwingungen von relativ großer Amplitude und geringer Kraft in solche von kleinerer Amplitude und gesteigerter Kraft verwandelt werden, besonders durch die Hebelwirkung der Gehörknöchelchen. Ganz die gleiche Wirkung muß auch, wenn wir recht sehen, die Tensorkontraktion haben. Nehmen unter ihrem Einfluß die Amplituden ab, so wachsen andererseits die Drucke, die der Hammer an den Ambos weitergibt, infolge der gesteigerten Spannung. Zu gleicher Zeit dürfte aber wieder Energie durch die vermehrte Dämpfung verloren gehen, so daß schwer

zu ermessen ist, wie die Bilanz für unsere Empfindung ausfällt. Aber gerade, weil diese Dinge noch ungeklärt sind, halten wir Vorsicht dem oben genannten (an sich schon unsicheren) Gesetz gegenüber für geboten.

Von unseren Photographien der Tensorbewegung geben die erste bis dritte das Einsetzen des Vokals o, die vierte das eines a in der Tonhöhe von etwa 250 bis 275 v. d. wieder. Nur bei 1 und 2 ist es gelungen, den eigentlichen Beginn der Bewegung auf die Platte zu bekommen. Man sieht, wie die Schwingungen in der Ruhelage anfangen, wie nach etwa 30  $\sigma$  (bei 1; die Zacken der o-Kurven geben die Oktave, nicht den Grundton) die Verlegung der Abszisse beginnt und andauert, bis das Wechselspiel zwischen reflexauslösendem Reiz und Hemmungen irgend welcher Art zum Gleichgewichtszustand führt; wir gehen wohl nicht fehl, wenn wir die kleinen Schwankungen der Abszisse, die an den Kurven, nachdem das Minimum erreicht ist, zu bemerken sind, eben auf die Annäherung an dieses Gleichgewicht deuten; die von Vokalen und Instrumenten erhaltenen Photographien, die immer erst einige Zeit nach Einsetzen des Tones aufgenommen wurden, zeigen dergleichen eigentlich niemals. Jedenfalls aber leiden die Aufnahmen an einem Fehler, der es verbietet, aus ihnen viel zu schliessen. In unserer etwas primitiven Versuchsanordnung konnte die Photographie gerade während der Tensorbewegung noch am besten gelingen, wenn Sänger und Experimentator ein und dieselbe Person waren. Dies hat aber dazu geführt, daß, wie auch die Kurven zeigen, die Intensität der gesungenen Vokale im ganzen rasch zunahm, wodurch denn die Wirksamkeit des Tensor tympani verschleiert wird. Dem wird ja in Zukunft leicht abzuhelfen sein.

Wir fassen zusammen: Die Tensorkontraktion erfolgt reflektorisch als Funktion der Gesamtenergie einfallender Schallwellen (inkl. Geräusche), von Tonhöhenunterschieden dagegen ist sie innerhalb der untersuchten Skalenteile fast unabhängig. Sie muß, soweit wir sehen, zur Folge haben, daß die Amplituden relativ vermindert werden, kann vielleicht zur Herabsetzung gehörter Intensitäten führen. Als Bestätigung finden wir von den ersten Ohrenärzten folgende Beobachtungen angegeben: Nach Spannung des Tensor tympani werden die Amplituden der Hammerschwingungen (also auch des Trommelfells) geringer (POLITZER, LUCAE, KESSEL, BEZOLD), bei willkürlicher Kontraktion

wird die gehörte Stärke, besonders der tieferen Töne, herabgesetzt (BEZOLD u. a.) nach Durchschneidung des Tensors nehmen die Hammerkopfschwingungen zu (KESSEL).

Demnach halten wir eine Schutzfunktion des Tensors analog der Pupillenbewegung für wahrscheinlich. Ein ganz zutreffendes Bild von den besprochenen Vorgängen wird man sich erst machen können, wenn genauere Daten auch über den zweiten Binnenohrmuskel, den Stapedius, vorliegen.

Die Tensorbewegung hat für unsere Aufnahmen allein dadurch Bedeutung, daß sie das experimentelle Verfahren erschwert: es kommt vor, daß bei falscher Abschätzung ihrer Größe zwei Kurven, die übereinander auf derselben Platte gemacht werden sollen, ein wenig ineinander greifen, oder nur ein seitlicher lichtschwacher Teil des Spaltbildes die empfindliche Schicht trifft; das veranlaßt dann große Blässe oder gar das Fehlen von Kurven. Von der wesentlichsten Bedeutung sind dagegen die Oszillationen des Trommelfells oder, worauf wir vorläufig uns einschränken, des Hammers.

Es ist üblich, neue Aufnahmeapparate auf ihre Wiedergabe von Sinusschwingungen hin zu prüfen. Die abgebildete Kurve rührt von einer KÖNIGSchen Stimmgabel  $c^2$  (512 v. d.) her, und gegen ihre Sinusform ist wohl nichts einzuwenden, soweit die nicht sehr gelungene Aufnahme darüber urteilen läßt. Bei größerer Intensität gab dieselbe Gabel eine Kurve mit deutlich zugespitzten Maximis und Minimis entsprechend den stärker hervortretenden Obertönen.

Daß Schwebungen auf dem Trommelfell nicht anders vor sich gehen wie auf anderen Membranen, zeigt die nächste Figur, welche das Zusammenklingen der eben erwähnten Gabel mit dem benachbarten  $cis^2$  (542,5 v. d.) wiedergibt. Es finden also  $30\frac{1}{2}$  Schwebungen pro Sekunde statt, und — worauf schon hingewiesen wurde — auf so schnelle Intensitätsschwankungen hat der Tensor nicht mehr reagiert, die Abszissenachse bleibt für Maxima und Minima der Schwebungen dieselbe.

Besonderes Interesse hat die Frage, wie groß die akustischen Bewegungen des Hammers sind, wurden doch alle bisherigen Bestimmungen unter abnormen Verhältnissen (an Präparaten, fast immer durch einseitige konstante Steigerung des Luftdruckes nicht akustischer Provenienz) gewonnen. Um die größten erreichbaren Amplituden bequem zu bestimmen, setzten wir die

Linse in den Strahlenweg zwischen Lampe und Ohr. Dann ergab sich bei sehr lautem Schreien der Vokale o und a vor dem Ohr, daß in einer Entfernung von etwa 96 cm vom Trommelfellspiegel die Schwingungen 6 mm breit waren. Dabei hatte offenbar der Tensor annähernd seine maximale Spannung erreicht; denn der obere Rand des Lichtbandes war nur 1 mm von der Ruhelage entfernt, und weil bei geringeren Intensitäten die Tensorbewegung schon meist über diesen Betrag hinausgeht, so ist der Vorgang annähernd so aufzufassen, daß die Tensorbewegung die Abszisse um 4 mm verlegt, und daß um diese Schwingungsmittle Oszillationen von 3 mm nach beiden Seiten erfolgen.<sup>1</sup> Es ist hierbei schon stillschweigend vorausgesetzt, daß die Tensorbewegung um ungefähr dieselbe Achse und in derselben Ebene erfolgt wie die Schwingungen. Das war bei dieser und den meisten der vorgekommenen Spiegellagen auch annähernd der Fall.

Nennen wir  $2\varphi$  den Winkel, den ein zentraler Strahl des konvergenten Lichtbüschels zwischen seinen extremen Lagen einschließt, so ergibt sich aus den angegebenen Massen für die Gesamtbewegung:

$$2\varphi = \frac{7 \cdot 360}{960 \cdot 2\pi} = 25'.$$

Der Spiegel dreht sich also während des Vorgangs um  $\varphi = 12,5'$ . — Ferner sei  $\sigma$  die lineare Bewegung der Hammergriffspitze am Umbo und die Entfernung der Drehungsachse von diesem Punkt 5 mm (wie es wohl den anatomischen Verhältnissen entspricht<sup>2</sup>), so folgt für die maximale Exkursion des Umbo:

$$\sigma = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 12,5}{360 \cdot 60} = 0,018 = \frac{1}{55} \text{ mm.}$$

In der berühmten Arbeit, mit der das *Pflügersche Archiv* eröffnet wurde, hat HELMHOLTZ am Präparat Verschiebungen der Hammerspitze von  $\frac{1}{28}$  mm durch einseitige Druckerhöhung erhalten. Wenn wir fast genau die Hälfte finden, so mag der Unterschied darin liegen, daß am Präparat die reduzierende Tensorwirkung fehlt, und daß er eben nicht die Ausschläge bei akustischen Schwingungen maß. BEZOLD hat später 0,76 mm

<sup>1</sup> Dabei setze ich der Einfachheit wegen voraus, daß die Exkursionen symmetrisch zur Mittellage erfolgen, was vermutlich nicht der Fall, aber für die obige Berechnung irrelevant ist.

<sup>2</sup> HELMHOLTZ nimmt  $4\frac{1}{2}$  mm an.

unter ähnlichen Umständen gefunden<sup>1</sup>, HENSEN<sup>2</sup> (schon 1867) 0,193 mm stärkste Schwingung, also etwa das Zehnfache, aber natürlich am Präparat. Sicherlich können ja auch die Schwingungen des lebenden Trommelfells noch vergrößert werden, aber ich scheue den Versuch, weil das Ohr schon bei den angewandten Intensitäten zu schmerzen beginnt.

Wichtiger noch als die behandelte ist die Frage, über welchen Bezirk der Tonreihe sich die Funktion des Trommelfells erstreckt; denn während der populärphysiologische Schriftsteller demselben alles zutraut, ist der Arzt seit einiger Zeit recht skeptisch, und schon oben mußte zitiert werden, daß BEZOLD die Funktion des Trommelfells als Membran auf die untere Hälfte des Tongebietes beschränkt. Genau vergleichende Untersuchungen würden ja wieder die Meßbarkeit der objektiven Intensitäten voraussetzen, ich habe mich darauf beschränkt zu bestimmen, bis zu welcher Tonhöhe noch Schwingungen des Hammers photographisch nachzuweisen sind.  $c^3$  läßt sich noch bequem erhalten (die Abbildung z. B. gibt den Klang der betreffenden KÖNIGSchen Gabel wieder; es sei bemerkt, daß bei gleicher Plattengeschwindigkeit  $c^2$  aufgenommen und die Schwingungszahlen auf gleichen Strecken abgezählt und als genau im Verhältnis 1 : 2 stehend gefunden wurden),  $c^4$  von Gabeln ist schon mehrmals mißlungen, aber sicher durch unsere Schuld; denn meine Kurven des Vokals e zeigen den verstärkten Teilton, der nach den meisten bei  $c^4$  liegt, über die tieferen Partialtöne gelagert. Die Abzählung der Zäckchen ergibt in der Tat Schwingungszahlen, die sich um  $c^4$  gruppieren.

Indessen kann ich mich des Eindrucks nicht erwehren, daß es immer schwerer wird, Verbreiterungen des Spaltbildes zu erhalten, je höhere Töne man wählt. Und da ja feststeht, daß die Wellen hoher Frequenz in beträchtlichem Maße direkt aus der Luft auf die Kopfknochen übergehen und Personen ohne Trommelfell die höheren Töne noch recht gut hören, so ist es wohl sicher, daß Aufnahmen nach meiner Methode von der physikalischen wie physiologischen Stärke der höchsten Partialtöne kein zutreffendes Bild geben, so daß wir unseren Hauptzweck, die Kontrolle bisheriger Aufnahmen mit physikalischen Apparaten, an Klängen vornehmen müssen, von denen feststeht, daß ihre charakteristischen Elemente nicht zu hoch liegen.

<sup>1</sup> *Arch. f. Ohrenheilk.* 16. 1880.

<sup>2</sup> Arbeiten des Kieler Phys. Inst. Kiel 1867. (Von mir nicht eingesehen.)

Ein anderer Grund hat mich veranlaßt, die seit HELMHOLTZ immer wieder (so neuerdings von L. HERMANN) erörterte Frage, ob das Trommelfell der Entstehungsort der sogenannten subjektiven Kombinationstöne sei, vorläufig ununtersucht zu lassen. Der Weg, auf dem man vorzugehen hätte, wäre natürlich der, daß der Zusammenklang zweier Primärtöne etwa vom Frequenzverhältnis 3 : 4, der von zwei Differenztönen mit den relativen Schwingungszahlen 1 und 2 begleitet wird, aufgenommen und die photographische Kurve wie ein Klang vom Grundton 1 nach FOURIER analysiert würde, wobei sich herausstellen müßte, ob 1 und 2 durch nennenswerte Amplituden vertreten werden. Bei der Analyse von anderen Kurven ist es mir jedoch immer klarer geworden, daß man auf die Resultate eines solchen Verfahrens gar keine Schlüsse stützen kann, solange die Photographien nicht viel schärfer ausfallen, als alle, die wir mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln herstellen konnten. Unter dem Mikroskop werden auch die besten der vorhandenen Kurven graue Bänder, deren Rand zu verschwommen ist, als daß eine genaue Einstellung des Fadenkreuzes möglich wäre. An den Spitzen besonders und allen anderen Stellen, wo die Geschwindigkeit geringer wird, sind diese Bänder recht breit, und wer die Messungen kennt, wird zugeben, daß auch die Feststellung der Bandmitten, die man wohl anzuwenden pflegt, zu sehr unsicheren Ergebnissen führt, wenn die Kurven photographisch aufgenommen sind. So gibt denn die Fourieranalyse, auf unsicheres Messungsmaterial aufgebaut, zu trügerischen Resultaten Anlaß gerade für Klangkomponenten geringerer Intensität, und um solche würde es sich bei den Differenztönen handeln. Die Entscheidung der Frage bleibt also denjenigen vorbehalten, die eine — sicherlich mögliche — Verbesserung des Verfahrens durch vermehrte physikalische Hilfsmittel vornehmen. Die Interferenzmethode freilich dürfte eine derartige Fixation des Kopfes voraussetzen, wie sie beim Lebenden unmöglich ist.

### III. Über die Klangfarben.

#### § 1. Physik der Klangfarben.

Wenn HELMHOLTZ die Farbe eines Instrumentklanges auf die Zahl und Stärke der in ihm enthaltenen Teiltöne zurückführt, so ist die einfache Konsequenz die, daß die Komponenten der

verschieden hohen Klänge eines Instrumentes solange diese die gleiche Farbe behalten, in gleichen Intensitätsverhältnissen stehen. Diese Lehre wird in hinterlassenen Papieren MEISSNERS<sup>1</sup> und in einer Dissertation von HERRMANN-GOLDAP<sup>2</sup> auf Grund experimenteller Untersuchungen für unrichtig erklärt. Beide sind zu dem Resultat gekommen, daß — wie nach HELMHOLTZ bei den Vokalen der menschlichen Stimme — Teiltöne von etwa konstanter Höhe und deshalb wechselnder Ordnungszahl in den Klängen eines und desselben Instrumentes dominieren und ihm die charakteristische Färbung verleihen. Es wäre töricht, die Möglichkeit der behaupteten Tatsachen von vornherein für alle Instrumente zu bestreiten. Weshalb sollte zwischen Instrumentklängen und Vokalen eine Kluft befestigt sein? Auch HELMHOLTZ konnte irren, und es unterliegt ja keinem Zweifel, daß seine Untersuchungsmethode in diesem Fall primitiv war. Da ich nicht alle Instrumente genauer untersucht habe, auf deren Prüfung sich die beiden Forscher stützen, so werde ich auch nicht versuchen, die Streitfrage für alle zu entscheiden. Aber ich glaube zeigen zu können, daß der HERRMANN-GOLDAPschen Lehre schwere Bedenken gegenüberstehen und daß nicht wenige davon zugleich MEISSNERS Darstellung treffen. Zu einem allgemeinen Urteil über die letztere aber wird man weitere Befunde abwarten müssen.

Der Satz von HERRMANN-GOLDAP lautet so: „Nach den vorliegenden Untersuchungen besteht physikalisch das einem einzelnen Instrumentklang Charakteristische in der Existenz eines oder mehrerer, dem einzelnen Instrument eigentümlicher, fester Resonanzmaxima“ (S. 103). Diese sollen bei Blasinstrumenten durch die Form der Ansatzröhren und Schallbecher, bei den Streichinstrumenten durch die Größe und Form der Resonanzkästen bedingt sein. Man wird bereits stutzig, wenn man findet (Tabelle S. 89), daß von 6 derartigen Resonanzmaximis oder „Formanten“ gleich 4 am Ende der dreigestrichenen Oktave aufeinanderfallen, und Anhänger der MÜLLSchen Übereinstimmungsmethode könnten auf den Gedanken kommen, da immer derselbe Phonograph zur Aufnahme der Kurven benutzt wurde, die untersuchten Instrumente aber wechselten, so sei das Resonanzmaximum zwar vorhanden, aber in der Phonographenmembran. Gegen den Einwurf, diese Instrumente müßten seiner Lehre nach alle nahezu

<sup>1</sup> A. a. O.<sup>2</sup> A. a. O.

gleich klingen, schützt sich der Autor, indem er auf die jeweils verschiedene Stärke des Grundtones hinweist oder ein zweites Resonanzmaximum (z. B. beim Waldhorn) heranzieht. Wenn es schon allen, die das Waldhorn kennen, schwer fallen wird, anzugeben, wo in ihm die Resonatoren mit den beiden angegebenen Verstärkungsbereichen liegen sollen, so wird die Schwierigkeit doch noch erhöht dadurch, daß diese Resonatoren, die ja nur fest begrenzte Räume innerhalb der Instrumente sein können, imstande sein müßten, Töne, die um Quartan (*Oboe*  $g^3-c^4$ ) und Quinten (*Klarinette*  $e^3-h^3$ ) auseinander liegen, zu den stärksten Obertönen der betreffenden Klänge zu machen. Das wird doch ein Physiker nicht behaupten wollen.

Aber wir haben die Resonanzbreiten noch viel zu eng eingeschätzt. Bei der Anwendung der Schwerpunktmethode, einem von L. HERMANN herrührenden praktischen Verfahren zur Ermittlung der Höhe starker Teiltöne, das ich hier nicht schildern kann, werden als zugleich verstärkt angesehen: einmal eine ganze Duodezime, einmal eine Dezime, dann die Töne, welche in das Intervall 3:7 fallen, und immerfort Oktaven. Das ist natürlich nur ein Versehen des Autors. Früher (*Annalen d. Phys.* 23, 1907) ist er der Meinung gewesen, es klinge ein starker Ton konstanter Höhe bald unharmonisch, bald mit einem harmonischen Teilton zusammenfallend im Instrumentklange mit und charakterisiere denselben. Einem solchen Ton gegenüber kann sich die Fourieranalyse nur dadurch helfen, daß sie seine Intensität auf die der harmonischen Nachbarn verteilt, und es läßt sich darüber streiten, wie weit da bei der Schwerpunktmethode die Verteilung nach oben und unten zu rechnen ist; handelt es sich aber um einen Resonator, der harmonische Teiltöne verstärkt, so gibt die Fourieranalyse (bei idealer Messung und Rechnung) jedem, was ihm gebührt, und man darf in die Schwerpunktsberechnung nur Teiltöne aufnehmen, deren Amplitude man sich durch Resonanz wirklich verstärkt denkt. Seine Rechnungen hat der Autor aber zur Zeit der früheren Theorie gemacht, und beim Übergang zur neuen ist es ihm entgangen, daß sie zu dieser gar nicht passen.

Damit bekommen die HERMANNschen Resultate ein ganz anderes Aussehen: Man kann aus seinen Amplitudenzahlen schlechterdings nicht mehr auf Resonanzmaxima der Instrumente

schliessen, es müßten denn verschiebbare sein, und darüber wird die neue Lehre nicht fortkommen.

Die große Flöte, die Violine und das Cello hat HERRMANN-GOLDAP mit Hilfe des WEISSschen Phonoskops, in dem ein Seifenhäutchen die Membran vertritt, aufgenommen. Der Apparat soll von der größten Empfindlichkeit sein. Aber wie ist es dann möglich, daß die Analyse der von ihm aufgeschriebenen Violinkurven gar so wenig Partialtöne ergibt? Die vortrefflichen Photographien der schwingenden Seite, die wir KRIGAR-MENZEL und RAPS verdanken, zeigen Kurvenformen, die nur aus dem Zusammenwirken sehr vieler Obertöne zu erklären sind; Herr Geheimrat STUMPF und ich hören denn auch recht starke Partialtöne der Geige, deren Stelle in HERRMANN-GOLDAPs Tabelle ein lakonischer Strich ausfüllt.

Es würde zu weit führen, wollten wir alles anführen, was die neue Theorie so völlig unwahrscheinlich macht. Es trifft sich günstig, daß gerade von einer Autorität, der HERRMANN-GOLDAP sein Versuchsverfahren und im Anfang seine Theorie nachgebildet hat, Versuche vorgenommen worden sind, die die neue Lehre unmöglich machten, noch bevor sie das Licht der Welt erblickt hatte. Um nämlich seine Lehre, die Vokale seien durch einen „Formanten“ von etwa konstanter Höhe charakterisiert, durch schlagende Experimente zu stützen, hat L. HERMANN geprüft, wie sich Vokale und Instrumente verhalten, wenn man durch telephonische und mikrophonische Übertragungen mit eingeschalteten Induktionsrollen und bestimmter Wahl der Leitungswiderstände die Amplituden gründlich verändert. Ich darf zitieren, was er (*Pflügers Arch.* 61, 1895) selbst darüber berichtet: „Unter solchen Umständen, daß die Amplitudenverhältnisse sich total ändern, werden, wie ich gezeigt habe, die Klänge gänzlich deformiert, die Vokale behalten aber ihren Charakter. . . . Ich schloß hieraus, daß es für den Vokalcharakter . . . nicht auf das Amplitudenverhältnis der Partialtöne ankommt, wie bei musikalischen Klängen, deren Charakter sich bei diesen Versuchen in unbeschreiblichem Grade ändert.“ Seinem Gegner PIPPING empfiehlt HERMANN noch, die Versuche zu wiederholen; „er würde dann sich überzeugen, wie ungeheuer verschieden der Einfluß auf musikalischen Klang und auf Vokale ist“. Diese Stelle ist HERRMANN-GOLDAP offenbar entgangen. Da weder er noch ich an der Richtigkeit der Angaben L. HERMANNs zweifeln

können, so sind die Amplitudenverhältnisse keineswegs gleichgültig für die Klänge von Instrumenten.

Trotz der als verfehlt anzusehenden Theorie ist jedoch die Arbeit HERRMANN-GOLDAPS wertvoll wegen der beigegebenen Kurven. Er bemerkt selbst: „Der blofse Anblick der Kurven sagt vieles, was die Rechnung und die Wahrnehmung mit dem Ohre nicht ohne weiteres ergeben können.“ Ganz richtig, es kommt nur darauf an, daß die Dispositionen, mit denen man an die Betrachtung herangeht, günstig sind. Man kann z. B. an den HERRMANNschen Kurven von Waldhorn und Trompete, die ich leider nicht abbilden kann, folgendes sehen: Für jedes der beiden Instrumente sind sämtliche Kurven gar nicht sehr stark voneinander abweichende Variationen eines Grundtypus, und es zeigt sich obendrein, daß die beiden Waldhornkurven, die noch am meisten aus der Reihe herausfallen, geringeren Intensitäten des Instrumentes entsprechen (siehe die Kurven selbst S. 67 und die bestätigende Angabe der Maximalamplituden S. 85, Tabelle), weshalb denn die kräftigen Zacken der höheren Obertöne hier nur eben leise angedeutet sind. Bei der Trompete liegen die Dinge noch günstiger, und ich kann fast nicht begreifen, daß dieser Umstand dem Königsberger Forscher entgangen ist. Aber er sagt selbst, was ihn auf „Formanten“ gebracht hat: „Man bemerkt, daß die Zackenzahl bei diesen Kurven nicht dieselbe bleibt, wie es der Fall sein müfste, wenn ein festes Intensitätsverhältnis der Partialtöne für die Klangfarbe maßgebend wäre, sondern daß sie mit zunehmender Notenhöhe des Grundtones immer geringer wird.“ Indessen, wenn ein Resonanzmaximum die Kurvenform bestimmte, müfste zugleich der nächst niedrigere Oberton oder (bei großer Dichte der Obertöne) die nächsten verstärkt hervortreten. Daß das nicht der Fall ist, zeigt die gleichbleibende Gestalt der Welle. Wir müssen uns also nach einer anderen Erklärung umsehen, und sie liegt nahe genug. Bei der modernen Trompete wird die Erhöhung des Grundtons durch Öffnen von Seitenklappen erreicht, wobei denn die schwingende Luftsäule immer kürzer wird. Und wie Saiten immer schwerer ihre Obertöne geben, je kürzer sie sind, so ist es um so schwerer, eine Luftsäule in Knoten und Bäuche zu zerfallen, je näher die Stellen maximaler Druck- und Bewegungsunterschiede einander rücken, d. i. bei höheren Tönen. Deshalb

fallen die höchsten Obertöne einer nach dem anderen allmählich aus, je höher der Grundton rückt.

Bevor ich nun von meinen Kurven spreche, muß ich noch einmal auf mein Versuchsverfahren zurückkommen. Wie die Aufnahmen bisher gemacht wurden, ist zunächst an die Untersuchung von Instrumenten schwachen Tones, wie Flöte, Violine und Cello kaum zu denken. Ein anderer Mangel besteht darin, daß — zumal wenn die Lampe gleich der unserigen recht ungleichmäßig brennt — immer wieder Kurven auf einer Platte fehlen oder zu lichtschwach sind, woran einmal die Lampe, dann kleine Kopfbewegungen zwischen den Aufnahmen, die die Breite des Lichtweges einschränken, endlich, wie gesagt, unrichtige Berechnung der zu erwartenden Tensorbewegung die Schuld tragen. In vielen Fällen, wo infolgedessen die Kurven schlecht erkennbar sind, habe ich noch nicht Ersatz geschafft. Zunächst mochte ich Herrn Professor BRÜHL und meinem Freunde BECKER, der in der ganzen letzten Zeit Experimentator war, eine so mühsame Tätigkeit wie die ihre bisweilen war, vorderhand nicht mehr zumuten, und dann ist's auch eine andere Sache, mit einem physikalischen Instrument und mit einem lebenden Menschen als Apparat zu arbeiten. Die optische Einstellung dauert, wenn der Spiegel etwas ungünstiger sitzt, bisweilen doch eine Viertelstunde und darüber und muß noch dazu von Zeit zu Zeit aufge bessert werden. Inzwischen wird die Lage der Versuchsperson unerfreulich: ist das Stirnband etwas fest angezogen, so stellt sich schließ lich durch den starken Druck auf Stirn und Hinterkopf ein wenig Übelbefinden ein, und über diesen Zeitpunkt hinaus haben wir gewöhnlich die Versuche nicht ausgedehnt. Das ist ein Schatten auf dem Bilde, das ich oben von dem Verfahren zu zeichnen versucht habe. Noch konnte er nicht beseitigt werden, später wird er vielleicht verschwinden.

Nur von drei Instrumenten habe ich Aufnahmen, die mich einigermaßen befriedigen, von der Trompete, dem Waldhorn und der Tenorposaune. Die Trompetenkurven — sie geben die Tonleiter von  $b$  bis  $d^2$  wieder — können, meine ich, nur in einem Sinn gedeutet werden: eine charakteristische Wellenform mit starker Oktave und Duodezime wird, je höher der Grundton steigt, ihrer ausgezeichneten Partialschwingungen immer mehr beraubt. Langsam nimmt die Duodezime an Stärke ab und hört nach der vierten Tonstufe auf, die Wellenform sichtlich zu be-

einflussen. Inzwischen scheint sich die Oktave kaum verändert zu haben — von einer Verstärkung ist bei ihr nicht die Rede, die vierte Kurve, wo es so scheinen könnte, ist, wie man sieht, das Bild eines überhaupt stärkeren Klanges —, aber nun beginnt auch sie, langsam zu weichen, und bei der letzten Kurve ist sie nur eben noch durch ein verschwindendes Zäckchen sichtbar angedeutet.<sup>1</sup>

Vielleicht wird man mir einwenden, die HERRMANN-GOLDAP-schen Trompetenkurven hätten in gleichen Notenhöhen viel mehr Zacken als die meinigen, das Trommelfell gebe offenbar die höchsten Partialtöne geschwächt oder gar nicht wieder, für diese erfolge die Leitung durch die Kopfknochen. Ich räume die Möglichkeit, ja Wahrscheinlichkeit dieses Umstandes ein, aber man wird andererseits mir zugeben, daß wenigstens für die tieferen Partialtöne in diesen Kurven von nur ganz allmählich und immer in demselben Sinn sich ändernder Form eine starke Stütze der HELMHOLTZschen Ansicht über die Instrumentfarben vorliegt. Und wird denn jemand ernstlich behaupten wollen, daß für tiefere Obertöne die HELMHOLTZsche, für höhere eine andere, etwa die HERRMANNsche Theorie gelte? Dazu verhalten sich die bei mir nicht vertretenen Teilschwingungen in den HERRMANNschen Kurven genau so wie bei mir die tieferen. Wenn endlich das Trommelfell die höheren Partialtöne hat zurücktreten lassen, dann hat es wohl auch schon die der Ordnungszahl nach tieferen, die es noch wiedergibt, im Verhältnis ihres Emporrückens beeinträchtigt, und das Abnehmen derselben geht in Wirklichkeit noch langsamer vor sich, die ganz korrekten Kurven müßten einander noch ähnlicher sein. — Demnach läßt sich behaupten, daß durch HERRMANN-GOLDAPs Aufnahmen wie durch meine die HELMHOLTZsche Theorie recht gut sei bestätigt worden — vorläufig für die Trompete.

Indessen brauchen wir uns nicht auf diese zu beschränken. Die Tenorposaune hat ähnliche Klangfarbe, wenn man sie stark anbläst; ähnlich sind denn auch ihre Kurven (es wurden die Noten  $g$   $a$   $d^1$   $e^1$   $f^1$  aufgenommen) denen der Trompete, nur daß der oben für diese geschilderte Vorgang des Ausfalls von Partialtönen sich bei der Posaune tiefer abspielt. HERRMANN bildet

---

<sup>1</sup> Natürlich ist's damit noch lange keine Sinusschwingung, die Obertöne sind nur recht schwach geworden.

seine Aufnahmen von diesem Instrument nicht ab, weil sie nicht so gut gelungen sind wie die übrigen, aber glücklicherweise berichtet er (S. 83), daß diese Kurven „im Gegensatz zu denen der Holzinstrumente untereinander sehr ähnlich sind“. Mehr verlangt die HELMHOLTZsche Lehre nicht: die Amplituden und sogar die Phasenverhältnisse müssen annähernd konstant geblieben sein, und da nach dem Autor selbst die Zackenzahl der höchsten Obertöne sehr langsam, nämlich „von drei Erhöhungen bei  $f$  bis zu zwei bei  $f^1$ “ abnimmt, so scheinen die Posaunenklänge noch gleichmäßsigere Klangfarbe zu haben als die der Trompete.

Von HERRMANNs Waldhornaufnahmen war schon die Rede. Die meinen ( $c^1$   $es^1$   $f^1$   $g^1$   $as^1$ ) bestätigen aufs beste, was wir schon an jenen sahen, nur daß, wie bei der Trompete, meine Kurven das reiche Gekräusel nicht zeigen, das die Grundform der HERRMANNschen umspielt, nur auf der Originalplatte vermag bei der tiefsten Note ein scharfes Auge Spuren davon zu erkennen.

Über die Holzblasinstrumente hoffe ich im Lauf der nächsten Zeit noch Aufschluß bekommen zu können. Die Klarinettenaufnahmen vom Trommelfell sind zu blaß geraten, als daß man sie wiedergeben könnte. Bis zur Mitte der eingestrichenen Oktave scheint in diesen Kurven, die denen der Blechinstrumente ebenso unähnlich wie einander ähnlich sind, der dritte und fünfte Oberton über einem recht schwachen Grundton zu liegen, von etwa  $g^1$  ab tritt der Grundton deutlicher hervor, und über seine Welle lagern sich die drei Zacken einer starken Duodezime. Ich will an dieser Stelle nur darauf hinweisen, daß auch bei HERRMANN von  $a^1$  ab die Duodezime in jedem Klange der stärkste Oberton ist, von einem Herabsinken der größten Intensität auf Partialschwingungen immer tieferer Ordnungszahl also gar nicht die Rede sein kann.

Wahrscheinlich indessen wird er sich — wenigstens für die übrigen Instrumente — auf die Resultate der Fourieranalyse berufen. Die Amplitudentabellen geben in der Tat keinen deutlichen Hinweis auf die HELMHOLTZsche Lehre, die neue Theorie begünstigen sie freilich auch nur scheinbar. Ich habe die Fourierrechnung bei einer Anzahl meiner Instrumentkurven ebenfalls durchgeführt, und die Resultate seien mitgeteilt in Tafeln, die in ihrer Anordnung genau den HERRMANNschen entsprechen.

## Trompete:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>b</i>	19	58	100	29	12	12	10	12	11	8
<i>c</i> <sup>1</sup>	36	100	75	20	18	11	11	7	2	7
<i>d</i> <sup>1</sup>	34	100	46	11	14	2	7	7	3	4
<i>es</i> <sup>1</sup>	34	100	26	14	16	8	4	6	2	1

## Tenorposaune:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>g</i>	17	33	100	36	10	10	10	7	4	2
<i>a</i>	28	100	56	25	9	10	4	4	6	3
<i>d</i> <sup>1</sup>	27	100	22	11	11	5	3	1	1	0
<i>e</i> <sup>1</sup>	10	100	17	14	7	8	2	3	3	1
<i>f</i> <sup>1</sup>	36	100	15	12	4	7	3	2	0	1

## Waldhorn:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>c</i> <sup>1</sup>	14	100	40	6	9	2	1	2	1	2
<i>es</i> <sup>1</sup>	22	100	3	15	4	2	2	1	1	2
<i>f</i> <sup>1</sup>	46	100	5	9	4	6	2	2	5	2
<i>g</i> <sup>1</sup>	52	100	9	17	2	2	1	1	0	2
<i>as</i> <sup>1</sup>	159	100	12	21	11	5	1	3	1	4

Das sind annähernd ebenso wunderliche Ergebnisse, wie sie sich in der Königsberger Arbeit finden. Dafs die Fourieranalyse oberhalb etwa des 6. Partialtones keine verlässlichen Zahlen mehr liefert<sup>1</sup>, hatten mir Physiker schon früher gesagt, und die höchsten Schwingungen, deren Amplitude ich der Sicherheit halber auch berechnete, sind auf dem Trommelfell kaum oder nur schwach vertreten, so dafs auf die rechts stehenden Amplituden von vornherein nicht viel Gewicht gelegt wurde; aber dafs Kurven

<sup>1</sup> Falls nicht die hohen Schwingungen, wie bei den Vokalen *e* und *i*, sehr stark sind.

von so großer Ähnlichkeit wie die zwei tiefsten der Trompete in der Fouriertabelle derartige Unterschiede der Amplitudenverhältnisse zeigen könnten, das hatte ich nicht gedacht, und keinesfalls entspricht es dem wahren Tatbestand. Natürlich ist es nicht das mathematische Verfahren, welches die Fehler hineinbringt, gegenüber analytisch gegebenen Funktionen ist dieses ja vielmehr ein vielfach unentbehrliches Hilfsmittel, nur gegenüber empirisch gewonnenen Kurven versagt es meistens, weil die Messungen nicht präzise genug vorgenommen werden können; schon oben wurde von dieser Schwierigkeit gesprochen. Nun ist es freilich möglich, photographische Kurven von größerer Feinheit aufzunehmen, als es uns bei der Schwierigkeit des Verfahrens gelungen ist, aber wenn selbst bei so zarten, scharfen Wellenlinien, wie die letzten von L. HERMANN<sup>1</sup> gewesen sind, die Fourieranalyse nicht weit voneinander liegender Perioden derselben Aufnahme nach dem Autor selbst gleiche Amplituden und Phasen nur für die allerstärksten Teilschwingungen ergibt, so wird man doch bedenklich. — Die letzte in der Trompetentabelle mitgeteilte Amplitudenreihe (für  $es^1$ ) habe ich deshalb dadurch kontrolliert, daß ich die betreffende Messung nach Umkehrung der Kurve auf dem Objektischchen an eben derselben Periode noch einmal vornahm. Das Resultat der darauf basierten Rechnung war folgendes:

Trompete:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$es^1$	50	100	19	16	10	5	5	2	2	2

Seitdem habe ich keine von meinen Kurven mehr analysiert, steht doch offenbar die Zeit und Mühe, die das Verfahren selbst bei Anwendung aller üblichen Vereinfachungen kostet, in völligem Mißverhältnis zu der Genauigkeit der Ergebnisse. Ich freue mich außerordentlich, auch einen Gelehrten, wie F. AUERBACH, der Meinung zu finden, „daß die Analyse vielfach zu geradezu paradoxen Ergebnissen führt“<sup>2</sup>, zu denen er denn auch die von

<sup>1</sup> *Pflügers Arch.* 61. 1895.

<sup>2</sup> WINKELMANN'S Handb. d. Physik, Bd. II. Akustik, v. F. AUERBACH, S. 692. 1909.

HERRMANN-GOLDAP zählt, und „dafs die Fourierauflösung zusammengesetzter graphischer Tonkurven mit grofser Vorsicht gedeutet werden mufs, da diese Analyse äufserst labil ist, d. h. schon bei kleinen Änderungen grofse Änderungen in den Koeffizienten der Glieder ergibt“.<sup>1</sup>

Wir fassen zusammen: Da zum Glück bei den drei besprochenen Blasinstrumenten — wir lassen die Verhältnisse bei anderen vorläufig aus dem Spiel — die Phasenrelationen der Partialtöne in verschiedener Höhe der Klänge dieselben bleiben, so können wir aus den Kurven, die vom Phonographen und vom Trommelfell erhalten wurden, sofort auf die Amplitudenrelationen der Teilschwingungen schliessen. Die Kurvenformen aber sind, gleiche Intensität der Klänge vorausgesetzt, Modifikationen eines Grundtypus, welche durch den physikalisch selbstverständlichen Ausfall der höchsten Komponenten bei steigender Grundtonnote hervorgerufen werden. Demnach bleiben die Verhältnisse der Partialtonamplituden mit der angegebenen Beschränkung dieselben, und die HELMHOLTZsche Klangfarbentheorie ist, wie übrigens jedes physikalische Gesetz, der zutreffende Ausdruck idealer Verhältnisse, die in Wirklichkeit durch die Mitwirkung untergeordneter Faktoren mehr oder weniger getrübt werden.

## § 2. Versuch einer psychologischen Theorie der Klangfarbe.

Wir kommen endlich zu unserem ersten Ziel, der psychologischen Theorie der Klangfarbe. Aber damit ist es uns so ergangen, wie — wir werden es sehen — mit der psychologischen Erklärung der Vokalcharaktere auch: Konsequenzen, denen wir gar nicht ausweichen konnten, glauben wir in beiden Fällen durch Tatsachen vollständig verifizieren und so die Richtigkeit des Gedankenganges nachweisen zu können. Aber mit dem Augenblick tun sich eine Reihe von Aufgaben auf, die nicht so schnell zu erledigen sind. Erst wenn sie gelöst sind, können beide Theorien völlig zu Ende geführt werden, und deshalb beschränken wir uns vorläufig auf das Notwendigste. Dessen Nachweis wollen wir im folgenden in einem analytischen Verfahren zu erbringen suchen.

Der vorige Abschnitt führte zu dem Ergebnis zurück, dafs

<sup>1</sup> A. a. O. S. 642.

für die betrachteten Instrumente im physikalischen Idealfall gleiche Klangfarbe auf gleichen Intensitätsverhältnissen der Partialschwingungen beruht. Nun kann die Physik den Begriff der Klangfarbe eigentlich erst durch eine Definition auf Grund dieses Umstandes in ihr System einführen. An sich gibt es gleiche und ungleiche Klangfarben natürlich nur für ein Bewußtsein, dem eben das Sinnesorgan Reihen von Tönen zuführt, die die angegebene Eigenschaft besitzen oder nicht. Aber der Physiker spricht nicht nur davon, daß Klänge eines und desselben Instrumentes bei verschiedener Frequenz der Grundschwingung dasselbe Verhältnis der Partialamplituden zeigen, sondern er ist durch einen Schluß von überwältigender Wahrscheinlichkeit berechtigt, das Gemeinsame, das jene Klänge für unser Empfinden haben, als eine Wirkung jener physikalischen Konstanz aufzufassen. Umgekehrt sind wir genau so berechtigt, anzunehmen, daß jenem Idealfall der Physik ein zweiter in unserem Sinnesmaterial entspricht, in welchem also die Intensitätsrelationen der Partialempfindungen etwa konstant bleiben müssen, sollen die gehörten Klänge die gleiche Farbe haben.

Aber damit sind wir noch nicht viel weiter. Nunmehr fragt es sich, wie überhaupt Partialempfindungen, sobald sie unanalysiert zusammenfließen, die verschiedenartigen Klangfarben ergeben können, die wir hören, und wie es ferner möglich ist, daß diese Farben unter Umständen bei beträchtlicher Verschiebung sämtlicher Komponenten in der Tonskala dieselben bleiben. Es liegt nahe und muß zunächst versucht werden, eben die Eigenschaften dieser Komponenten zur Erklärung heranzuziehen; STUMPF hat diesen Weg in der Tat eingeschlagen<sup>1</sup> und den Versuch gemacht, die Klangfarbe im engeren Sinn aus der Farbe der einzelnen Töne abzuleiten. Indessen kann ich die Theorie meines hochverehrten Lehrers, ohne dessen Anleitung ich überhaupt nicht akustisch zu arbeiten verstünde, und ohne dessen andauernde gütige Unterstützung ich diese Untersuchung gar nicht hätte ausführen können, nicht für ausreichend halten. Von welcher Wichtigkeit sie ist, werden wir erst sehen, wenn von den Vokalen und ihrer Charakteristik die Rede ist; zur Erklärung der Klangfarbe von Instrumenten kann die Tonfarbe, wie ich glaube, deshalb den Hauptbeitrag nicht liefern, weil sie nach der Meinung

<sup>1</sup> Tonpsych. II, S. 520 ff.

von STUMPF selbst parallel der Tonhöhe veränderlich ist. Die Klänge eines Instrumentes, wie z. B. der Tenorposaune, hält aber in großen Gebieten ihres Umfanges etwas Farbigen zusammen das, in dieser Weise bei anderen nicht oder nur annähernd vorhanden, in jenen immer wiederkehrt, bei recht erheblichen Höhenverschiebungen und deshalb Farbenänderungen sämtlicher Teiltöne.

Dafs nicht die Erzeugungsgeräusche, die freilich annähernd konstant bleiben, die geforderte Gleichartigkeit hervorrufen, wird man uns zugeben, wenn man die Posaune mehrmals langsam die Skala hinaufblasen hört; man wird sich überzeugen, dafs es immer eine gewisse Art von Farbigkeit ist, etwas, was im eigentlich Musikalischen des Klanges liegt, worin die verschiedenen gehörten Klänge übereinstimmen. Geräusche und andere Nebenbedingungen werden gewifs bei weitem in ihrem Einflufs auf die Klangfarbe (das Wort in weiterem Sinn genommen) unterschätzt, aber die restlose Erklärung geben sie auch nicht.

Besser hoffen wir auf einem analytischen Umwege zum Ziel zu kommen und werfen die Frage auf: Wodurch unterscheidet sich unser Idealklang — er sei z. B. aus 10 Teiltönen von ein für allemal festgelegter Intensität aufgebaut — wodurch unterscheidet er sich von einem Akkord, der auch aus einfachen Tönen und zwar derselben Intensität zusammengesetzt sei, welche die Intervallreihe  $1 : 2 : 3 : 4$  usw. bilden? Dafs, wenn wir einmal an die Erzeugungsart denken wollen, Phasenunterschiede hier und dort für unsere Empfindung völlig gleichgültig sind, braucht kaum erwähnt zu werden, und dafs die vollkommeneren Kohärenz der Schallstrahlen im ersten Falle nur ein Grund schwererer Analyse, übrigens aber ohne Bedeutung ist, dürfte ebenfalls ohne weiteres zugegeben werden. Die Folge ist, dafs es einen wesentlichen Unterschied beider Fälle überhaupt nicht gibt, dafs demnach der Akkord, wenn er irgendwo in der Skala ruht, eine gewisse Färbung haben mufs, die genau der Farbe des Instrumentklanges entspricht, und dafs der in der Skala verschobene Akkord diese Färbung wie der Klang beibehalten mufs.

Wie wir fortfahren müssen, ist leicht zu sehen. Was ist an Klang und Akkord, wenn wir sie analysiert denken, bei der Verschiebung sich gleich geblieben? Nichts als die Relationen der Partialtöne nach Intervall und Intensität. Irgendwie von den Relationen mufs also die ebenfalls konstant gebliebene Färbung

abhängen, die der Nichtanalysierende hört. Aber wir können die Betrachtung vereinfachen: Die Flöte z. B. hat nur sehr wenige Obertöne, vielleicht 3 oder 4, und die beiden höchsten pflegen äußerst schwach zu sein. Wir ahmen also den Flötenklang durch einen Akkord der oben angegebenen Art nach, und wieder gilt von diesem, was von jenem. Endlich nehmen wir dem schon verarmten Klange und Akkorde die Obertöne bis zum ersten, der Oktave, welche bleibt. Dann sind zwei Fälle möglich: entweder hat der unanalytierte Zusammenklang von Grundton und Oktave, wenn man ihn über die Skala hin verschiebt, in den verschiedenen Höhen nichts Gemeinsames derart wie die Klänge, oder es findet sich ein solches. Im zweiten Fall sind wir schon am Ziel. Im ersten Falle haben wir das Gemeinsam-Farbige der Flötenklänge, von dessen Vorhandensein wir überzeugt sind, in dem nächst höheren Intervall, der Quinte zwischen Oktave und Duodezime, zu suchen, und von dem aus könnten wir wegen der Schwäche der nun folgenden Obertöne schon kaum mehr weiter rekurrieren. Da wir aber doch irgendeinem unanalytierten Intervall auf diese Weise ein Merkmal zuschreiben müssen, welches sich nicht verändert, wenn das Intervalls eine Höhe wechselt, so ist unsere Aufgabe schon gelöst; denn nun können wir wieder aufsteigen, und wie ja ohne weiteres einleuchtet, beweisen, daß einem jeden der Intervalle eine bestimmte Farbigkeit zukommt, die es bei wechselnder Lage in der Skala behält. Aus diesen Intervallfarben, wie sie heißen mögen, setzt sich demnach die Klangfarbe zusammen.

Man wird mir nicht einwerfen, alle Klangfarben müßten nunmehr gleich sein, da ja die harmonischen Obertöne aller Instrumente in denselben Intervallen stünden. Vorausgesetzt war bei unserem Verfahren, daß auch die Intensitätsrelationen konstant bleiben müßten, und man sieht, von welcher Bedeutung das ist, wenn wir noch die eigentlich selbstverständliche Annahme machen, daß Intervallfarben sich um so mehr in einer simultanen Gesamtheit akustischer Eindrücke geltend machen, je lauter die das Intervall bildenden Töne sind. Wenn die Intervalle verschiedene Farben haben — und das ist der Fall —, so kommen eben bei verschiedener Intensität der Partialtöne verschiedene Intervallfarben am stärksten zur Geltung und dominieren in der Klangfarbe.

Soweit die Skizze meiner Theorie. Umständlich und langsam

bin ich bei der hoffentlich stringenten Ableitung der Intervallfarben zu Werke gegangen, und zwar, weil ja über „vorfindliche“ Komplexqualitäten schon etwas hastig und so geschrieben worden ist, daß man sich nach Dingen umsehen muß, die nicht unter diese Kategorie fallen. — Der Akkord wäre wohl auch entbehrlich gewesen; indessen haftet für alle die, welche nicht geübt sind, Klänge mit dem Ohr zu analysieren, an der Klangfarbe etwas Geheimnisvolles; eben das wollte ich gründlich beseitigen. Bei diesem Anlaß könnten sehr genaue Kritiker noch einwerfen, der Akkord ließe sich in Wirklichkeit gar nicht herstellen, weil die dazu benötigten Stimmgabeln praktisch niemals obertonfrei wären. Indessen durch einen großen Apparat von Interferenzröhren ließe sich das Gewünschte doch mit so großer Annäherung erreichen, wie man nur verlangen kann.

Was endlich die Beobachtung von Intervallfarben anbetrifft, so möchte ich zunächst jeden auf das eigene Gehör, überdies aber auf MACH<sup>1</sup> und KRÜGER<sup>2</sup> hinweisen, ohne daß ich freilich weiß, ob ich ganz das gleiche meine wie der letztere — denn mit Differenztönen kann schon nach der obigen Ableitung die Intervallfarbe nichts zu tun haben —, und ohne mich ferner irgend für die physiologisch-psychologische Theorie der Zusatzempfindungen auszusprechen, die der berühmte Wiener Physiker zu ihrer Erklärung beibringt. Jedenfalls sind die Intervallfarben nicht meine Entdeckung, vielleicht aber ist der Versuch neu, auf sie die Klangfarbe zurückzuführen.

Es versteht sich von selbst, daß wir damit nur den Ausgangspunkt neuer Untersuchungen erreicht haben. Welcher der Gattungen von Bewußtseinsphänomenen ist die Intervallfarbe unterzuordnen, in welchen Beziehungen stehen die Farben verschiedener Intervalle zueinander, welche Gesetze gelten für ihre Kombination und vor allem, welche Rolle spielt die analysierende Aufmerksamkeit ihnen gegenüber? Leicht sind wir oben besonders an der schwierigen Frage der beiden Phasen des Analysiertseins und des Zusammenfließens vorübergeglitten, die Tonmehrheiten in unserem Bewußtsein haben können, und ehe alle diese Probleme nicht der Lösung näher gebracht sind, wird sich auch die Klangfarbe nicht völlig aus den Intervallfarben erklären

<sup>1</sup> Analyse der Empfindungen. 4. Aufl. S. 218 ff.

<sup>2</sup> *Wundts Psych. Stud.* 1. 1906. 2. 1907.

lassen. Für die letzteren selbst aber eine Erklärung zu geben, sind wir heute, wahrscheinlich auch noch lange, außerstande.

Übrigens liegen die Wege für die angedeuteten Untersuchungen und andere, die sich anzuschließen hätten, offen vor uns, und bei manchen ist die Aufgabe nicht einmal schwer. In nicht langer Zeit hofft auch der Verfasser neue Arbeiten aus diesem Gebiet vorlegen und die angegebene Theorie durch eine Reihe von Belegen stützen zu können.

#### IV. Von den Vokalen.

Die Vokalkurven, die ich erhalten habe, sind denen von PIPPING, HERMANN und SAMOJLOFF größtenteils zum Verwechseln ähnlich. Nur a und o, u und e sind meinem Freund BECKER und mir bisher geglückt, und auch von den beiden letzteren würde ich gern mehr und bessere Aufnahmen haben, i ist vielleicht wegen der Höhe seiner wichtigen Teiltöne nicht gut vom Trommelfell zu erhalten. Aber schon aus einem Vergleich des bisher vorliegenden Materials mit dem von den drei genannten Forschern gesammelten ergibt sich die vollkommen gesicherte Folgerung, daß nicht nur die Kurven, die sie gewannen, ein recht getreues Abbild dessen geben, was wir hören, sondern daß wir — wegen der großen Verschiedenheit des Wesentlichen der Methoden — auch der Kenntnis der streng objektiven akustischen Vorgänge außerordentlich nahe gekommen sind. Die von TOEPLER und BOLTZMANN entworfene, von RAPS verbesserte Methode der direkten Aufnahme von Luftdruckschwankungen mit Hilfe der optischen Interferenz bleibt freilich für den Physiker die vollkommenste; aber schon nach den Resultaten, die bisher mit ihr gewonnen wurden, kann man voraussagen, daß sie bei weiterer Steigerung ihres technischen Teiles die Ergebnisse der genannten Forscher bestätigen wird. Keinem Zweifel unterliegt ferner, daß diese Ergebnisse speziell den alten Streit der Vokaltheorien zugunsten des sogenannten absoluten Momentes entscheiden: Teiltöne in für jeden Vokal ganz bestimmten Gegenden der Skala beherrschen, auf welchen Grundton man auch singen oder sprechen mag, durch überwiegende Intensität den ganzen Klang. Wie das auch kommen mag — und die Theorien darüber liegen im Kampf miteinander — die Tatsache selbst ist so gesichert, wie die Forderung unabweislich, aus ihr in der Hauptsache das Charakteristische der Vokale zu erklären.

Das alles ging mir freilich erst allmählich auf: nach einem ersten u, welches als erste überhaupt photographierte Trommelfellschwingung abgebildet werden mag, waren die Vokalkurven, die wir aufnahmen, zunächst solche des o. Ich war damals auf die angegebenen Anfänge einer psychologischen Theorie der Klangfarben gekommen, und hoffte im stillen, sie werde sich auch auf die Vokale ausdehnen lassen. Als deshalb von den sieben gut geratenen o-Kurven der Platte V — sie beginnen bei einer Grundtonhöhe von 175 Schwingungen und steigen in Stufen von 25 Schwingungen bis zu 325 empor — die fünf (in der Tonreihe) oberen einander recht ähnlich waren, meinte ich die tieferen ihnen dadurch ähnlich machen zu können, daß ich den Sängern einschärftete, recht deutliche Vokale zu singen, und genau auf die Befolgung dieser Vorschrift achtete. Aber damit war nichts gewonnen; im Gegenteil, Aufnahmen des o von einer Bassstimme, die noch tiefer hinab in der Skala die erforderliche Stärke besaß, zeigten, daß je tiefer der Vokal gesungen wurde, sein Wellenbild immer verwickelter ward, und daß Teiltöne, die an demselben in höheren Lagen gar nicht zu bemerken waren, tiefer unten mit starken Zacken die Periode fast allein ausfüllten. Und ganz arg wurde es beim a. Bei der Betrachtung der a-Aufnahmen von Platte VII konnte ich an der Wichtigkeit des absoluten Momentes, an der maßgebenden Bedeutung bestimmter Tonhöhen für die einzelnen Vokale nicht mehr zweifeln. Ich versuchte, jene Theorie der Klangfarben so zu formen, daß sie auch auf diesen Fall paßte, aber es ging nicht und war ja auch unmöglich. Demnach mußte entweder die Theorie falsch und eine andere zu suchen sein, oder die Vokale waren nach einem anderen psychologischen Prinzip zu erklären als die Klangfarbe der Instrumente. Da ich ferner keine Lücke in dem Beweisgang entdecken konnte, der zu jener Meinung führte, so mußte ich zu einem näheren Verständnis der Vokale von ihnen allein aus zu kommen suchen. In der Literatur, die ich damals kannte, fand ich keine Hilfe, viele Bestimmungen zwar jener charakteristischen Tonhöhen, aber kein Wort darüber, was diese mit den von uns gehörten Vokalen zu tun haben. Um weiter zu kommen, stellte ich mir also eben diese Frage: Welche Eigenschaften muß derjenige Ton (dasjenige Tongebiet) haben, welcher, mit ganz besonderer Intensität in Klängen sehr verschiedener Höhe immer wiederkehrend, ihnen allen das Gemeinsame verleiht, sich z. B.

wie a anzuhören? So schon kam ich zu der Konsequenz, daß der betreffende Ton selbst wie a klingen müsse, und wenn ich weiter überlegte, daß bei allmählichem Aufsteigen in der Skala ein Augenblick kommen müsse, wo die Grundtonnote mit dieser wunderlichen Tonhöhe zusammenfiel, so wurde, da nach den vorliegenden Kurven die übrigen Partialtöne sehr schwach und also ohne wesentliche Bedeutung waren, diese Folgerung noch unausbleiblicher. Aber dafür schien sie mir auch vollkommen absurd, ich dachte zunächst nicht daran, sie zu prüfen. Endlich aber — ich gestehe, im Ärger — ergriff ich eine Stimmgabel von 3840 Schwingungen — so hoch ganz ungefähr mußte ja der charakteristische Ton des i liegen —, schlug sie an und hörte ein lautes i. Als ich dann hinabsteigend ungefähr in den von L. HERMANN angegebenen Tonhöhen (oder, wo er zwei „Formanten“ angibt, in der Höhe des einen von ihnen) ein e, a, o und u mühelos finden konnte, wußte ich freilich, woher die Vokale wie Vokale klingen. Der Diener des Instituts — völlig unbekannt mit Vokaltheorien — gab auf die Frage: welchem Vokal klingt das ähnlich? bei allen sofort die entsprechende Antwort, oder als z. B. das a ihm etwas nach o hin verdunkelt vorkam, fand sich in unmittelbarer Nachbarschaft darüber eine Gabel, die ihn durch ihren a-Charakter vollauf befriedigte. Auch andere Personen, denen ich später, ohne ihnen meine Absicht im voraus mitzuteilen, die gleiche Frage bei den gleichen Tönen stellte, verhielten sich ähnlich, und ich bin nunmehr der Ansicht, daß bei Anwendung von Stimmgabeln mit Laufgewicht Versuchspersonen imstande sein werden, bei Annäherung von oben wie von unten ein für sie optimales a e i o u zu finden; soweit sich aus den bisherigen Erfahrungen schließen läßt, dürften die gefundenen Schwingungszahlen beim auf- wie beim absteigenden Verfahren, sowie für verschiedene Personen gleichen Dialekts nicht zu weit auseinanderliegen. Inzwischen ist mir übrigens eine Stelle aus den „Tonempfindungen“ von HELMHOLTZ eingefallen, wo gewissen Tönen ein u-Charakter zugeschrieben wird. Er aber wie GRASSMANN<sup>1</sup>, den nicht früher gelesen zu haben ich lebhaft bedauere, weil ich dann rascher zum Ziele gekommen wäre, haben sich von der Verfolgung solcher gelegentlichen Beobachtungen dadurch abbringen lassen, daß ihnen als Physikern

<sup>1</sup> *Wied. Annalen* 1. 1877.

ein einfacher Ton keine Merkmale als Frequenz und Amplitude haben konnte. Auch HENSEN<sup>1</sup> sagt nur: „Selbst gewisse Stimmgabeln singen ziemlich deutlich Vokale“, ohne der Erscheinung weiter nachzugehen.<sup>2</sup> Neuerdings ist aus dem angegebenen physikalischen Motiv heraus von einem hoch geschätzten Physiker ein Angriff auf die STUMPFsche Lehre von den Tonfarben gemacht worden. Wir kommen darauf ein andermal zurück und bemerken vorläufig nur, daß es doch spezifische Helligkeiten von Farben und ein endogenes Schwarz gibt, für die eine physikalische Parallelerscheinung durchaus fehlt. Die geschilderten Tatsachen lassen sich ohne Tonfarben gar nicht verstehen, sind sie doch nichts als deren Nachweis. Da aber natürlich die Reihe der Tonfarben (besser vielleicht „Tonhelligkeiten“) an sich keine ausgezeichneten Punkte besitzt, so hat hier die Erörterung psychologischer Faktoren zu beginnen, die wir im zweiten Teil dieser Untersuchungen anstellen wollen. Übrigens sind die mit gewöhnlichen Stimmgabeln bestimmten Vokaltöne durch die gröfsere Helligkeit der freilich schwachen Obertöne vermutlich etwas zu niedrig.

Wir sind, wie im vorigen Abschnitt bereits angedeutet wurde, auch mit diesem Fund erst recht in Probleme hineingeraten. Die Umlaute ö und ü z. B. (vielleicht auch ä) finden sich bei einzelnen Stimmgabeln nicht, und wir haben noch keine Zeit gefunden, die naheliegenden Vermutungen über ihre Entstehung nachzuprüfen. Es ist ferner zu untersuchen, welche Bedeutung den zweiten „Formanten“ oder Verstärkungsgebieten zukommt, die bei einigen Vokalen auch nach den Trommelfellkurven vorhanden sind; dann, wie es mit allen übrigen Teiltönen, vor allem dem Grundton steht, und endlich ist ja für die psychologische Erörterung eine Grundlage gewonnen und ihre Probleme lassen sich nunmehr präziser formulieren, aber dafür sind sie auch um so zahlreicher geworden. Ich hoffe, wie auf die ungelösten Rätsel der Klang- und Intervallfarbe auf diese anderen in betreff der Tonfarben recht bald weiter eingehen zu können, und dann vor allem das Verhältnis beider Erscheinungen zueinander klarstellen zu können.

In der psychologischen Theorie, das glaube ich schon jetzt

<sup>1</sup> *Zeitschr. f. Biologie* 28. 1891.

<sup>2</sup> Vgl. jedoch den Nachtrag am Schluss.

sagen zu können, sind sie vollständig voneinander zu trennen, und die Konstanz eines Vokales bei verschiedener Tonhöhe wird allein aus der einen von beiden, die eines der besprochenen Instrumente aus der anderen abzuleiten sein, wenngleich beide Faktoren in allen unanalysierten Klängen eine gewisse Rolle spielen müssen.

Ich habe nichts über die Entstehung der Vokale in der menschlichen Mundhöhle gesagt, weil ich noch nicht alles Material sammeln konnte, das zur Entscheidung dieser Frage unentbehrlich ist. Wer die Entwicklung der betreffenden Theorien kennt und sich jetzt von den oben angegebenen Tatsachen zu überzeugen vermag, wird schon vermuten, welches das Endresultat sein muß. Aber es empfiehlt sich, mit dieser Erörterung zu warten, bis die Kette der Beweismittel geschlossen ist.

Wenn die Theorie der Klang- und Vokalfarben, ebenso wie die Mechanik des Trommelfells hier nur in einzelnen Punkten aufgehellt werden konnte, so darf man doch die Hoffnung hegen, daß auf diesem Wege weitere Fortschritte möglich sein werden. Eine Beobachtung, die Herr BECKER ganz zuletzt beim Einstellen der Versuchsanordnung machte, und die ein anderer Anwesender und ich bei genauer Prüfung nur bestätigen konnten, zeigt, wie man fortfahren muß: Die Spaltbildverbreiterung zeigte sich, während der Spiegel wahrscheinlich nur am freien Trommelfell, nicht mehr am Hammergriff klebte, stark vergrößert und fand (bei gleich bleibender Richtung der Tensorbewegung) für Töne verschiedener Höhe in verschiedener Richtung statt, derart, daß bei dem Vokal o (dessen bei weitem stärkster Teilton etwa bei  $b^1$  liegt) die Schwingungen fast senkrecht erfolgten zu denen des Vokals a (stärkster Teilton etwa eine Oktave höher). Da der erste Spalt — der in der Wand — senkrecht auf der Schwingungsrichtung stehen soll, mußte er also um etwa  $90^\circ$  wie ein Nikol gedreht werden. Die große Amplitude war nach HELMHOLTZ zu erwarten, sobald der Spiegel auf der freien Membran saß, das zweite Phänomen legt unvorsichtige Hypothesen so gefährlich nahe, daß wir es vorziehen, nicht weiter darauf einzugehen, bis der Spielraum möglicher Erklärungen durch weiteres Tatsachenmaterial ein wenig eingeschränkt ist.

Aufrichtigen Dank muß ich zum Schluß noch einmal meinen drei gütigen Helfern und dann vor allem Herrn Geheimrat STUMPF sagen, der mich zur Untersuchung der Klangfarbe veranlaßt, als ich mein experimentelles Verfahren vorschlug, ohne weiteres die Erlaubnis gegeben und so lange Zeit hindurch, obwohl die Versuche immer wieder fehlschlugen, die Geduld mit mir nicht verloren hat. Endlich dürfen Fräulein GOLLMER und die Herren Dipl.-Ing. HEMME, stud. phil. RICHTER und stud. phil. PLANCK, welche mir ihre schönen Stimmen freundlichst zur Verfügung stellten, meiner dankbaren Gesinnung versichert sein.

Nachtrag zu S. 179: Erst nach Abschluß dieser Arbeit erfahre ich von Herrn Geheimrat STUMPF, daß schon im Jahre 1832 WILLIS in einer Untersuchung „Über Vokaltöne und Zungenpfeifen“ (*Poggendorffs Ann. d. Physik* 24) fast die gleiche Beobachtung gemacht hat wie ich. Er sagt nämlich (S. 415 f.): „Der Vokallaut läßt sich bis zu einem gewissen Grade an einfachen musikalischen Tönen wahrnehmen. Die hohen Töne der Orgel oder Geige geben offenbar ein *I* an, die Bafstöne ein *U*, und wenn man schnell die ganze Tonreihe hinauf und hinab durchläuft, glaubt man die Reihe *U O A E I I E A O U* usw. zu hören, so daß es den Anschein hat, als sei in einfachen Tönen ein jeder Vokallaut unzertrennlich von einer gewissen Tonhöhe.“ (Dabei sind noch unter einfachen Tönen solche gemeint, die durch Schwingungen eines einzigen Körpers entstehen, z. B. die Töne der Labialpfeifen, die nur durch Schwingungen der Luft hervor gebracht werden.)

Schon der Bericht, den HELMHOLTZ („Tonempfindungen“<sup>4</sup> 189 f.) über die WILLISsche Untersuchung gibt, läßt die Meinung des englischen Forschers nicht mehr deutlich hervortreten. STUMPF freilich hat sie in der „Tonpsychologie“ (II, 543) wiedergegeben. Indessen ist es wohl den meisten Vokaltheoretikern wie mir gegangen: die einen haben diese Stelle übersehen und die übrigen die Beobachtung ohne weitere Prüfung für irrtümlich gehalten. Anders läßt es sich nicht erklären, daß sie in der reichen Vokalliteratur der letzten Jahrzehnte meines Wissens überhaupt nicht erwähnt wird, obwohl sie wie keine andere die am meisten vertretene Theorie des „absoluten Moments“ zu stützen und zu klären geeignet ist.

Dafs die Beobachtung den Tatsachen entspricht, wird natürlich nur noch wahrscheinlicher dadurch, dafs ich sie ohne Kenntnis der WILLISSchen Arbeit aufs neue gemacht habe, ferner dadurch, dafs ich vortreffliche Stimmgabeln verwenden konnte, die gewifs einfachere Töne geben als WILLIS herzustellen vermochte.

Es freut mich ganz besonders, von diesem Forscher auch die Konsequenz gezogen zu finden, die ich auf Grund meiner Versuche für zwingend halte, nämlich: „dafs Vokallaute eine von der Tonhöhe und dem Klang (quality = Klangfarbe) ganz verschiedene Modifikation des Schalles sind, die man sorgfältig von den beiden letzteren unterscheiden mufs.“

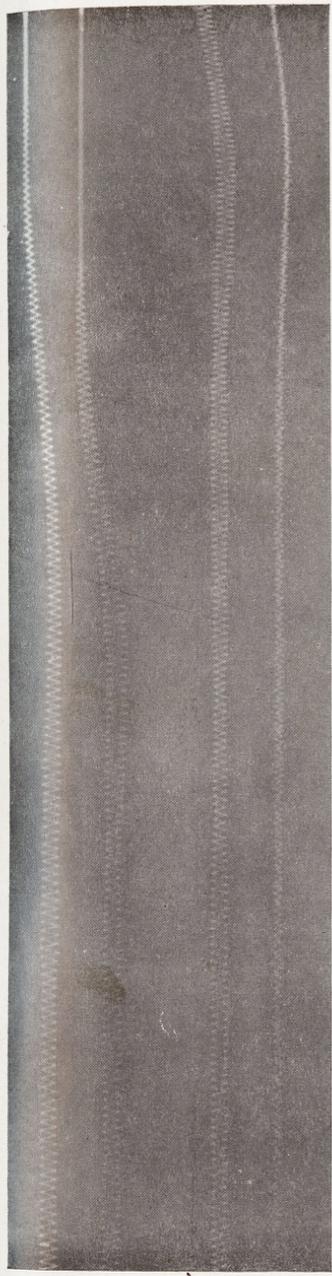
---

### Berichtigung zu Heft III.

Von C. STUMPF.

Herr Dr. v. HORNOSTEL hat mich aufmerksam gemacht, dafs in meiner Abhandlung „Tonsystem und Musik der Siamesen“ S. 86 ein Mißverständnis in Hinsicht der LANDSchen Tabelle vorliegt. Die Tabelle gibt nicht, wie ich annahm, die Resultate mehrerer voneinander unabhängiger Messungsreihen in verschiedenen Oktaven, sondern nur die einer einzigen Messungsreihe in einer Oktave. Die erhaltenen Werte sind aber von LAND unter Zugrundelegung verschiedener Anfangstöne viermal umgerechnet und so in 5 Rubriken nebeneinandergestellt. Das von mir berechnete vermeintliche Mittel aus LANDS Messungen mußte daher selbstverständlich genau mit den durch das Prinzip der gleichstufigen Fünftonskala geforderten Werten übereinstimmen. Dafs die Übereinstimmung beim letzten Ton nicht genau ist, rührt nur daher, dafs LAND selbst sich hier verrechnet oder verschrieben hat (die 2 ersten Werte seiner 3. Kolumne müssen 7·18 und 9·69 sein statt 6·88 und 9·39). Mein Mißverständnis mag dadurch entschuldigt werden, dafs der Tabelle LANDS keine Erläuterung, wohl aber die Bemerkung beigefügt ist, auf anderen Instrumenten wiederhole sich die Skala in mehreren Oktaven, und dafs ich selbst im Berliner Museum die Fortsetzung der Tonleiter eines Saron auf einem anderen Exemplar in höherer Oktave beobachtet hatte. In meiner Zusammenstellung a. a. O. ist infolge dieses Mißverständnisses die 3. Kolumne (LAND, Mittel) zu streichen. In der 1. Kolumne „ELLIS, Mittel“ streiche man nur das Wort „Mittel“. Denn hier ist tatsächlich nur die erste (und einzige) Oktave mit den von ELLIS angegebenen Werten zugrunde gelegt. Alles Übrige bleibt unverändert, und die Übereinstimmung der Beobachtungen mit den theoretischen Werten der gleichstufigen Fünftonleiter ist auch so noch eine glänzende zu nennen.





Zu S. 157. „Tensorbewegung“.

2.



Zu S. 158. „Körtsche Gabel  $e_2$ “.

3.



Zu S. 160. „Körtsche Gabel  $e_3$ “.



Zu S. 158. „Schwebungen der Körtschen Gabeln  $e_2$  und  $e_3$ “.

5.



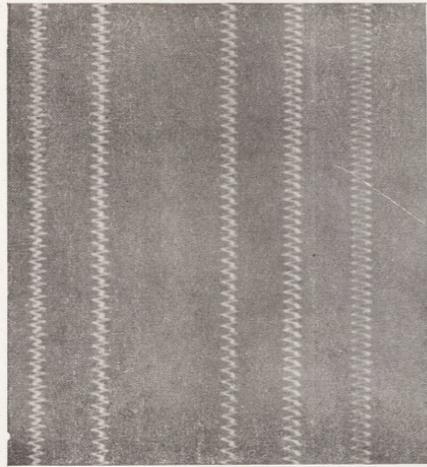
Zu S. 166 f. „Trompete  $b - f_1$ “.

8.



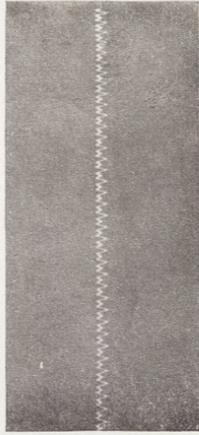
Zu S. 168. „Waldhorn  $e_1$   $es_1$   $f_1$   $g_1$   $as_1$ “.

6.



Zu S. 166 f. „Trompete  $g_1 - d_2$ “.

9.



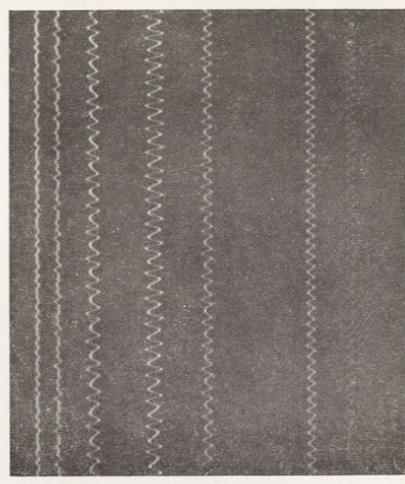
Zu S. 177. „Vokal  $u$ “.

7.



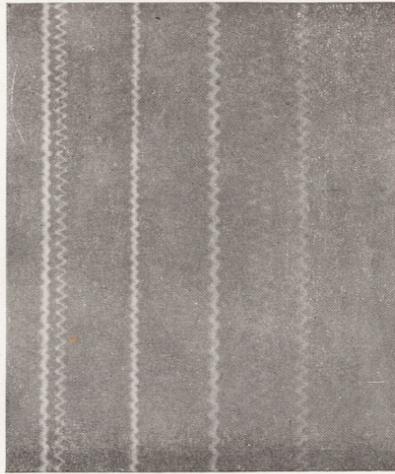
Zu S. 167 f. „Tenorposaune  $g$   $a$   $d_1$   $e_1$   $f_1$ “.

10.



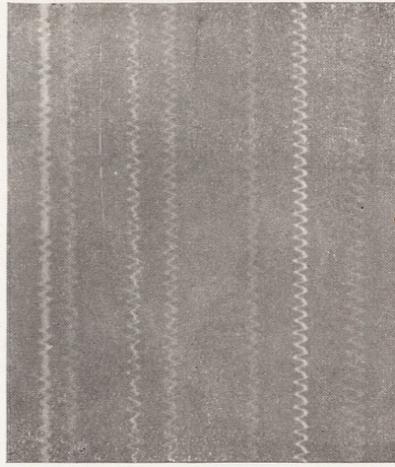
Zu S. 177. „Vokal  $o$ “.

11.



Zu S. 177. „Vokal  $o$ “.

12.



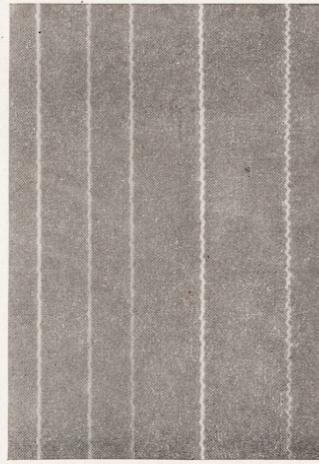
Zu S. 177. „Vokal  $o$ “.

13.

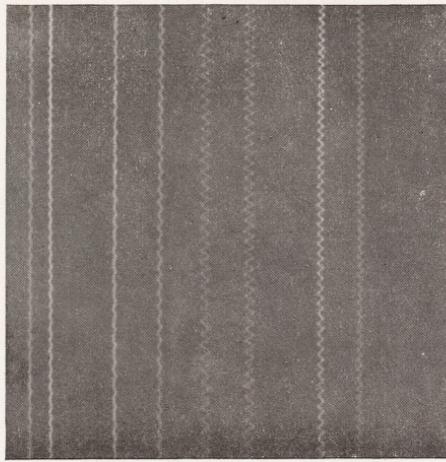


Zu S. 177. „Vokal  $o$ “.

14.



„Vokal  $u$ “.



„Vokal  $e$ “.