Im Anschlufs an die oben aufgestellte Tabelle ergiebt sich dann weiter, dafs, wenn man zu niedrigeren Oktaven hinabsteigt, die Differenzen zwischen den reinen und temperierten Intervallen immer kleiner werden, beim Aufsteigen zu höheren Oktaven aber immer gröfser. Aus diesem Umstande kann man den Schlufs ziehen, dafs die Unreinheit der temperierten Stimmung nicht in allen Tonlagen gleich bemerkbar ist, während es bei blofser Betrachtung der Verhältniszahlen scheinen könnte, als ob jene Abweichung überall dieselbe ist. Allerdings ist der erstere Schlufs nur qualitativ ohne weiteres richtig, und man kann nicht allgemein folgern, dafs der Mangel an Reinheit sich in jeder höheren Oktave immer stärker geltend macht. Vielmehr ist diese Quantitätsbetrachtung nur für die mittleren Oktaven berechtigt, worauf weiter unten bei den Schwebungen noch einmal zurückzukommen sein wird.

§ 3. Absolute Schwingungszahl.

Wenn bei den früheren Betrachtungen die Schwingungszahl des Tones c′ gleich 256 angenommen wurde, so wird es sich weiter darum handeln, diese Zahl womöglich durch den Versuch als thatsächlich vorhanden festzustellen, wozu eine Sirene mit Zählwerk am meisten geeignet ist, die daher wohl in keinem besseren Kabinette fehlen dürfte. Die Bestimmung der absoluten Schwingungszahl mit Hülfe dieses Apparates ist nämlich darum besonders interessant, weil sie zu den wenigen messenden Versuchen gehört, bei denen die Schüler selbstthätig mitarbeiten. Ist es doch ein Mangel auf den Universitäten, und wie viel mehr auf den Schulen, dafs die Lernenden bei der Mehrzahl der physikalischen Versuche sich nur rezeptiv verhalten, dafs ihnen im günstigsten Falle die Versuche nur gezeigt werden, während sie die eigentliche Arbeit des Physikers, das Beobachten und Messen, nur selten mit ausführen können. Wohl ist in letzter Zeit bei dem regen Interesse, welches dem Gegenstande gewidmet wird, mancher zweckmäfsige Demonstrationsapparat konstruiert worden; doch es liegt in der Natur der Sache, dafs es sich dabei meist nur um die Qualität der Vorgänge, nicht um eigentliche Messungen handeln kann. Wie man aber nach dem französischen Sprüchworte nur durch Schmieden ein Schmied wird, so können jene wichtigsten Arbeiten des Physikers, das Beobachten und Messen, eben auch nur gelernt werden, wenn sie thatsächlich mit ausgeführt werden. Und nicht nur um die Erwerbung jener Fähigkeiten handelt es sich dabei (denn für wenige Schüler ist das an und für sich besonders wichtig), sondern um die Erweckung und Erhaltung des Interesses, ohne welches, wenn man auch nur das nächste Ziel ins Auge fassen wollte, nicht einmal das der Schule zugewiesene Pensum befriedigend zu Ende geführt werden kann.

Um nun die Bestimmung der absoluten Schwingungszahl auszuführen, ist es nötig einen starken und gleichmäfsigen Ton zu haben, mit welchem der Ton der Sirene verglichen werden soll. Eine grofse Stimmgabel mit Resonanzkasten könnte dazu gebraucht werden, müfste doch aber wiederholt angestrichen werden, wodurch die Sicherheit in der Vergleichung und die Beobachtung einigermafsen beeinträchtigt würde. Eine Orgelpfeife wäre ja an sich sehr gut geeignet, doch hat man nachher keine Kontrolle über den Ausfall des Experimentes. Das Harmonium dagegen liefert nicht nur einen sehr gleichmäfsigen lauten Ton, der starke Schwebungen ergiebt, wenn er von dem Sirenentone abweicht, sondern man weifs auch immer, wenn seine Stimmung bekannt ist, wie viel Schwingungen der betreffende Ton macht, so dafs ein Urteil über das Gelingen des Versuches möglich ist, das man gerade hier nicht zu scheuen braucht, da man recht

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

gute Resultate erzielen kann, besonders wenn diejenigen Versuche, bei deren Verlauf sich stärkere Schwebungen ergaben, sofort ausgeschieden werden.

Gemeinschaftlich mit den Schülern stellte ich nun das Experiment in folgender Weise an: Zunächst wurde das Pendel der Atwoodschen Fallmaschine mit Hülfe der Taschenuhren so reguliert, dafs jede Schwingung eine Sekunde dauerte [1]), und ein Schüler beauftragt, auf einen gegebenen Wink mit dem Zählen der Sekunden (0, 0, 0, 1, 2, 3 . . .) zu beginnen. Dann wurde der Stand der Zeiger des Zählwerkes notiert, ein zweiter Schüler gab den Ton auf dem Harmonium an, ein dritter handhabte den Blasebalg. Hierauf wurde der Luftzutritt zu einer Reihe von Löchern, deren Anzahl schon festgestellt war, geöffnet, bis der Ton die gewünschte Höhe hatte, dann das federnde Ventil des Gebläses losgelassen, sodafs es gegen eine Regulierschraube stiefs, die so gestellt wurde, dafs der Luftstrom gerade hinreichte, die Drehung der Sirene zu unterhalten; nachdem dauernde Übereinstimmung der beiden Töne erreicht war, wurde mit der Zählung der Sekunden begonnen und bei der dritten Null das Zählwerk eingerückt. Nach 20, 40 oder mehr Sekunden, je nachdem es möglich war, den Ton festzuhalten, wurde das Zählwerk ausgeschaltet, der Stand der Zeiger abgelesen und die Berechnung ausgeführt. Es ergaben sich beispielsweise folgende Resultate:

Ton	Zahl der Löcher	Umdrehungen	Sekunden	berechnete Schwingungszahl
c′	16	320	20	256
c′	16	636	40	254,4
d′	16	540	30	288
d′	16	728	40	291,2
e′	16	799	40	319,6
e′	16	812	40	324,8
f′	16	862	40	344,8
f′	16	860	40	344,0
g′	16	962	40	384,8
g′	16	968	40	387,2
a′	16	1072	40	428,8
a′	16	1079	40	431,6
h′	16	1297	40	478,8
h′	16	1214	40	485,6
c″	16	2577	80	515,4

Theoretisch genügt es ja, für irgend einen Ton die Schwingungszahl festzustellen, da man von ihm ausgehend sowohl die reinen, als auch die temperierten Intervalle berechnen kann, praktisch ist es jedoch von Wichtigkeit, den Versuch mit verschiedenen Tönen anstellen zu können. Da nämlich aus den angeführten Resultaten hervorgeht, dafs man unter günstigen Umständen Abweichungen von nur 2 Schwingungen erhält, so läfst sich erstens für die Sexte a′ feststellen, dafs sie nicht rein, sondern, wie oben gezeigt, um mehrere Schwingungen zu hoch ist. Zweitens aber werden die Versuche nicht mit jedem Tone gleich gut glücken, da es sowohl bei sehr langsamer Drehung der Sirenenscheibe, als auch bei sehr schneller, wo in folge des starken Wind-

[1]) Die Abhängigkeit der Schwingungsdauer eines Pendels von seiner Länge prägt sich dabei ein.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

verbrauches der Luftdruck eines kleinen Gebläses nicht gleichmäfsig sein wird, schwer ist, einen bestimmten Ton festzuhalten. Man kann aber, wenn man die Wahl hat, denjenigen Ton heraussuchen, für welchen die Messungen nach den speziellen Eigenschaften der vorhandenen Apparate erfahrungsmäfsig am sichersten anzustellen sind, ohne doch durch dieses Vorgehen sich dem Vorwurfe einer unerlaubten Korrektur der Experimente auszusetzen.

Durch eine Reihe solcher Messungen gewinnen die theoretischen Betrachtungen, wonach man mit Hülfe der Verhältniszahlen von einem beliebigen Tone aus die Schwingungszahlen aller anderen berechnen kann, wesentlich an Klarheit und Interesse. Natürlich mufs man, um die Resultate fruchtbar zu machen, die temperierten Intervalle zu Grunde legen, wobei es dann sehr bequem ist, wenn die oben angeführten Tabellen der Schwingungs- und Verhältniszahlen im voraus berechnet sind.

Es könnte hierbei der Einwand erhoben werden, dafs diese Betrachtungen insofern ohne sicheren Boden und daher wenig anziehend wären, als die temperierte Stimmung doch nur annähernd verwirklicht sei, je nach dem mehr oder minder guten Gehör dessen, der das Instrument gestimmt hat. Man ersieht jedoch aus den angegebenen Zahlen, dafs die Unterschiede zwischen der reinen und der temperierten Stimmung an den meisten Stellen viel gröfser sind, als der mögliche subjektive Fehler des Stimmers oder der objektive der Stimmungsmethode. Dafs nämlich auch solche objektiven Fehler vorhanden sind, scheint aus dem Umstande hervorzugehen, dafs die verschiedenen Tonarten nicht denselben Charakter haben. Für das Klavier läfst es freilich Helmholtz in seiner Lehre von den Tonempfindungen unentschieden, ob dieser verschiedene Charakter von der Stimmung oder von der Einrichtung der Tasten herrührt, wenn er (3. Aufl. S. 487) sagt: „Man kann hier kaum an etwas anderes denken, als dafs der Anschlag der kürzeren und schmalen Obertasten des Klaviers eine etwas andere Klangfarbe giebt, als der Anschlag der Untertasten, und je nachdem der kräftigere oder weichere Klang sich auf die verschiedenen Stufen verteilt, ein anderer Charakter eintritt. Ob dazu etwa regelmäfsige Unterschiede der Stimmung derjenigen Quinten, welche die Klavierstimmer zuletzt stimmen und auf welche sich die Fehler der übrigen Quinten des Quintenzirkels zusammendrängen, beitragen, wage ich nicht aus Erfahrung zu entscheiden.“

Jedenfalls ist klar, dafs wenn die Ausgleichung in der Weise bewirkt wird, dafs alle Quinten in einer Oktave gleich stark schweben, d. h. gleich viele Schwebungen machen, die Verhältnisse der Schwingungszahlen verschieden sind, also die Temperatur von der theoretisch geforderten abweichen mufs. Es würden dann die tieferen Quinten etwas gröfser sein als die richtig temperierten. die höheren etwas kleiner; die ersteren würden somit den reinen Quinten etwas näher kommen, die letzteren sich noch weiter von ihnen entfernen. Für Quarten mit gleich vielen Schwebungen gilt die entsprechende Überlegung, nur würden die Abweichungen nach der entgegengesetzten Seite liegen, da die temperierte Quarte zu hoch ist, eine Vergröfserung der Schwingungszahl sie also noch weiter von dem theoretischen Werte entfernt, eine Verminderung sie näher bringt. Doch würde sich hierdurch der Charakter wohl nicht so sprunghaft ändern, als er es thatsächlich thut. Indem Helmholtz die Möglichkeit abweist, dafs hierbei die absolute Tonhöhe eine Rolle spielt. spricht er von dem kräftigen, klaren Charakter von C-dur und dem weichen, wie verschleierten Wohlklang von Des-dur. Diese Bezeichnungen dürften als mustergültig anerkannt werden. Leider hat er einen entsprechenden Vergleich mit dem auf der anderen Seite

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

benachbarten H-dur nicht gemacht, dessen Klang von C-dur doch ebenfalls merklich abweicht. Wollte man den Vergleich verallgemeinern, so könnte man vielleicht sagen: Von dem kräftigen, klaren Charakter des C-dur entfernen sich die anderen Tonarten in der Weise immer mehr, dafs bei wachsender Zahl der b-Vorzeichen der Wohlklang immer weicher und verschleierter wird, bei wachsender Zahl der Kreuzvorzeichen immer munterer, pointierter. Bei der enharmonischen Vertauschung von fis und ges, wo also ebenso gut 6 Erhöhungen, wie 6 Erniedrigungen stehen können, tritt dann ein plötzlicher Wechsel ein[1]). Ohne die von mir hinzugefügten Bezeichnungen für die treffendsten ausgeben zu wollen, glaube ich doch den Eindruck der verschiedenen Tonarten durch jene Regel im ganzen richtig angedeutet zu haben.

Jedenfalls ist die Übereinstimmung bemerkenswert, die zwischen jenem verschiedenen Charakter der Tonarten und der folgenden Stimmerpraxis stattfindet, die beim Stimmen unseres Harmoniums angewendet wurde[2]). Die Reihe der eingestimmten Töne war nämlich folgende: c'-f'-b'-es'-as'-des'-fis'-h'-e'-a'-d'-g'-c'.

Sie entspricht also genau dem rückwärts gehenden Quintenzirkel, nur dafs statt der abwärts gehenden Quinten mehrfach aufwärts gehende Quarten vorkommen, so dafs die Töne alle innerhalb derselben Oktave liegen.

Gewöhnlich wird ja freilich beim Stimmen mit dem a' begonnen, und es kostete dem Stimmer bei unserem Harmonium zuerst einige Mühe, wegen der verlangten Potenzstimmung von c' anzufangen. Immerhin bleibt ja die Reihenfolge in dem Zirkel dieselbe, wenn man wie gewöhnlich nimmt:

a'-d'-g'-c'-f'-b'-es'-as'-des'-fis'-h'-e'-a'.

Unentschieden bliebe dabei die Frage, welche der verschiedenen Tonarten der wirklich gleichmäfsig temperierten am nächsten kommt.

Übrigens bemerkt Helmholtz, dafs auf der Orgel sich dieser verschiedene Charakter der Tonarten nicht bemerkbar macht, und ich finde auch bei dem Harmonium den Unterschied lange nicht so ausgeprägt wie bei dem Klavier. Der Grund hiervon dürfte darin liegen, dafs bei den langausdauernden, gleichmäfsigen Tönen der Orgel und des Harmoniums eine gröfsere Gleichmäfsigkeit der Temperatur erzielt werden kann. Dafs andererseits für den Charakter der Tonarten die *ungleichmäfsig* temperierte Stimmung ausschlaggebend ist, scheint mir schliefslich noch daraus hervorzugehen, dafs jene Verschiedenheiten auch beim vierstimmigen Gesange nicht bemerkbar sind, sodafs die Chordirigenten ohne Bedenken eine Komposition höher oder tiefer intonieren lassen, als vorgeschrieben ist, wenn sie für die vorhandenen Stimmen in der Tiefe oder Höhe zu grofse Schwierigkeiten enthält. Denn trotz der Einübung am temperierten Klavier streben die Stimmen der Sänger der natürlichen reinen Stimmung zu.

Alle diese Betrachtungen über reine und temperierte Stimmung, soweit sie sich für den Schulunterricht eignen, würden selbstverständlich an Interesse gewinnen, wenn man die reine Stimmung auch zum Vergleich heranziehen könnte. Dies würde sich in der Weise ermöglichen lassen, dafs man bei einem Instrument von 5 Oktaven nur den untersten 4 von C bis c''' die

---

[1]) Les extrêmes se touchent.

[2]) Die Praxis der Klavierstimmer ist allerdings verschieden und wird von ihnen zum Teil als Geheimnis behandelt; mir persönlich hat keiner vollständige Aufklärung geben wollen.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

temperierte Stimmung giebt, die übrigen weifsen Tasten mit den Tönen der reingestimmten c'-dur-Tonleiter versieht und die schwarzen Tasten passend verwertet. Dabei würde also es' als reine kleine Terz zu stimmen sein und statt b' könnte die natürliche Septime genommen werden, die als siebenter Partialton von C leicht einzustimmen ist. Bei der einfachen Konstruktion der kleineren Harmoniums würde diese Abänderung wahrscheinlich keine bedeutenden Schwierigkeiten und Kosten machen. Für unser Harmonium hatte ich sie auch in Aussicht genommen; leider aber zerschlug sich die Sache, weil die liefernde Firma keine Fabrik in Berlin hatte, weshalb ich schliefslich wegen der Umständlichkeit der Verhandlungen auf diese Abänderung verzichtete. Nachträglich habe ich dies allerdings bedauert, denn die höchsten Töne des Instrumentes werden doch eigentlich gar nicht gebraucht, sodafs ein noch kleineres Instrument von 4 Oktaven dieselben Dienste leisten würde, wie das vorhandene; nur müfste es dann mit C anfangen.

§ 4. Obertöne.

In derselben Weise wie das Harmonium sich nützlich erweist, um die Abweichung der temperierten Stimmung von der reinen durch das Gehör unmittelbar festzustellen, ist es auch sehr geeignet, die Untersuchung der Obertöne zu unterstützen. Bei der grofsen Wichtigkeit, welche dieselben für die verschiedensten Fragen der theoretischen Musik haben, ist es auch hier in hohem Grade wünschenswert, eine möglichst klare Vorstellung, wie sie eben nur die eigene Wahrnehmung giebt, zu Stande zu bringen. Dem stellt sich aber die Schwierigkeit der Beobachtung hindernd in den Weg. Die Thatsache, dafs bei allen musikalischen Instrumenten auch der einzelne Ton schon ein Gemisch von mehreren einfachen Tönen darstellt, ist für den Anfänger so neu und überraschend, dafs es nicht leicht ist, das objektive Vorhandensein derselben aufzuzeigen. Kann man doch im allgemeinen die Bemerkung machen, dafs alle Erkenntnisse, zu denen die Wissenschaft in ihrer Entwickelung verhältnismäfsig spät gekommen ist, so einfach sie auch demjenigen erscheinen, der sich mit ihnen vertraut gemacht hat, dem Neulinge zwar gedächtnismäfsig leicht überliefert, aber nicht so leicht verständlich gemacht werden können. Es ist deshalb zweckmäfsig, bei der Aufsuchung der Obertöne das Ohr zunächst durch Resonatoren zu unterstützen, die auf einen bestimmten Ton abgestimmt sind. Hierbei ist es doch wieder lehrreicher, wenn dieser Resonanzton für die einzelnen Resonatoren erst festgestellt wird, als wenn er nur auf denselben eingraviert resp. gedruckt ist. Übrigens sind die einfachen cylindrischen Papprohren hierzu völlig genügend[1]) und besitzen sogar mit einer kleinen Abänderung, die an den fertig gelieferten wohl meistens fehlt aber leicht anzubringen ist, vor den weit teureren Messingkugeln einen entschiedenen Vorzug. Läfst man nämlich die einzelnen Röhren etwas verkürzen und passende cylindrische Auszüge herstellen, so sind nicht nur etwa vorhandene Fehler der Abstimmung leicht zu beseitigen, sondern man kann auch den Resonator für eine andere Tonhöhe als die, für welche er ursprünglich bestimmt war, brauchbar machen. Um die Resonatoren etwa für die Obertöne von C abzustimmen, verschiebt man einfach bei jedem einzelnen die Auszugröhre so lange, bis die beiden benachbarten Halbtöne gleich stark resonieren, wodurch für den beabsichtigten

[1]) Die beim Schulunterricht aus ästhetischen und hygienischen Rücksichten verwerflichen Ansatzröhren aus Glas, die in den Gehörgang eingeführt werden hönnen, sind nicht unumgänglich notwendig; ich habe sie bei unsern Resonatoren entfernt.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf