Ueber die Schwingungstypen der Stimmbänder.

Von

Prof. **D. Koschlakoff**
in St. Peterburg.

Hierzu 44 Holzschnitte.

Im vorigen Jahr veröffentlichte ich in einer vorläufigen Mittheilung¹⁾ meine Versuche über „die künstliche Reproduction und graphische Darstellung der Stimme und ihrer Anomalien“.

Der Hauptzweck dieser Untersuchungen war eine wenn auch nur annähernd richtige Vorstellung über jene Arten von Stimm-anomalien zu gewinnen, welche dem unmittelbaren Studium am Menschen bisher nicht zugänglich waren. Doch beraubten mich damals die allzu einfachen Hilfsmittel, mit welchen jene Versuche angestellt wurden, der Möglichkeit, gleichzeitig von beiden Stimmbändern graphische Darstellungen zu erhalten, was gerade für das genauere Verständniss der Stimme und ihrer Anomalien von sehr grosser Wichtigkeit ist. Nach Erlangung eines passenden Apparates indessen gelang es mir endlich, graphische Darstellungen gleichzeitig von beiden Stimmbändern zu erhalten.

Die durch die graphische Untersuchungsmethode erlangten Resultate wurden vermitteltst des Stroboscop's und einer besonderen optischen Methode, von welcher weiter unten die Rede sein wird, vervollständigt und controlirt. Diese Untersuchungen ergeben nun sehr interessante Vibrationstypen bei künstlichen Stimmbändern und die unmittelbaren Folgen davon waren vergleichende Experimente am menschlichen Kehlkopf. Viele Fragen indessen, welche sich leicht am künstlichen Kehlkopf entscheiden lassen, sind am menschlichen Kehlkopf, sowohl am lebenden, wie am todtten jeder Erforschung unzugänglich, und deshalb beschränkte ich meine vergleichenden Experimente an der natürlichen Kehle nur auf einige Fragen.

1) Dies Archiv Bd. XXXIV.

Die Hauptresultate dieser Untersuchungen habe ich in aller Kürze der Petersburger physikalischen Gesellschaft am 19. December 1883 mitgetheilt, in ausführlicherer Form wurden sie in der Zeitschrift „Wratsch“ 1884, No. 38 etc. veröffentlicht.

Die Untersuchungen wurden auch im laufenden Jahre, also 1885, fortgesetzt. Vorliegende Arbeit enthält in gedrängter Form alles, was ich bisher in dieser Frage unternommen habe.

Um dem Leser die Bekanntschaft mit den in diesem Artikel zu verhandelnden Untersuchungen zu erleichtern, halte ich es für nothwendig, die Methoden der Untersuchungen, welcher ich mich hierbei bediente, genau zu beschreiben. Die Methoden waren dreifacher Art: 1. stroboscopisch, 2. graphisch und 3. die Streifenmethode.

1. Die stroboscopische Methode. Beginnen wir mit der Construction des Stroboscop's. Es besteht aus einer Scheibe aus Pappe *a* (Fig. A), in welcher an der Peripherie, in gleicher Entfernung von einander, sich Oeffnungen befinden und aus einem mit grosser Spannkraft versehenen Uhr-Mechanismus *b*, welcher die Pappscheibe in Rotation setzt. Je nach Bedürfniss wurden Scheiben mit grösserer oder kleinerer Anzahl Oeffnungen benutzt (von 8 bis 24).

Fig. A.

Das Experiment wurde auf folgende Weise angestellt: hinter dem Stroboscop, und etwas niedriger der Ebene seiner oberen Oeffnungen, wurde auf einem Stativ ein künstlicher (oder natür-

licher) Kehlkopf *c* (Fig. A) so befestigt, dass die Spalte des Kehlkopfes parallel der Sehlinie kam. Hinter den Kehlkopf wurde eine Sammellinse *d* hingestellt, um die Lichtstrahlen der Lampe *e* auf den Kehlkopf zu concentriren. Nachdem die bezeichneten Gegenstände, wie sie (Fig. A) darstellt, placirt sind, stellt sich der Beobachtende hinter das Stroboscop, bringt das Uhrwerk desselben durch Aufziehen mit einem Schlüssel in Gang und beginnt, mit den ersten Rotationen der Scheibe, Luft in den Kehlkopf hineinzublasen, um das Phoniren desselben hervorzurufen. Bei sehr raschen Rotationen der Stroboscopscheibe, erscheint an Stelle ihrer Oeffnungen ein durchsichtiger Streifen, durch welchen der Kehlkopf nicht allein für den Beobachter, sondern auch für Alle, die sich hinter dem Stroboscop befinden, deutlich zu sehen ist. In dem Maasse wie die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe des Stroboscops wächst, wird sich auch das Aussehen der Stimmbänder allmählich verändern. Anfangs kann man die Schwingungen des Kehlkopfes nicht bemerken, später erscheinen sie zitternd, dann werden sie vollständig deutlich sichtbar, darauf erleiden sie eine starke Verlangsamung und gehen zuletzt in vollständigen Stillstand über, so dass die Stimmbänder erscheinen, als wären sie in irgend einem Momente ihrer Schwingungsphase stehen geblieben, und die Kehlkopfspalte erscheint dann in diesem Falle während der Phonation entweder ganz offen oder ganz geschlossen u. s. w.

Wenn die Verschnellerung der Rotationsbewegungen der Stroboscopscheibe fort dauern, so werden die oben beschriebenen Erscheinungen sich wiederholen, aber nur auf umgekehrte Art und zwar: die stillstehenden Ränder beginnen wieder ihre Bewegung, anfangs langsam, dann immer schneller und schneller bis ihre Bewegungen dann wieder unbemerkbar werden. Zum Verständniss

Fig. B.

der stroboscopisch beobachteten Erscheinungen ist es nothwendig, einige Worte über physische Grundlage dieser Erscheinungen zu sagen. Möge *a b* (Fig. B.) eine elastische Stahlplatte darstellen, welche am Ende *b* fixirt ist und mit dem anderen, freien Ende *a* zwischen *c d* Schwingungen macht. Wenn wir diese schwingende Platte stroboscopisch beobachten, so werden wir durch

jede Oeffnung der rotirenden Scheibe nur irgend einen der Bewegungsmomente der Platte sehen. Die anderen Momente werden durch die Zwischenräume, welche sich zwischen den Oeffnungen der Scheibe befinden, unserem Auge verdeckt. Welchen von den Bewegungsmomenten der Platte wir nämlich durch jede Oeffnung der Stroboscopscheibe sehen werden, wird von dem Verhältniss zwischen der Schnelle der Bewegungen der Stroboscopscheibe und der Bewegung der Platte abhängen. Zwischen der Bewegungsschnelle der Scheibe und der Schwingungsschnelle der Platte kann sich ein solches Verhältniss einstellen, dass durch jede Oeffnung der Scheibe wir nur immer einen und denselben Bewegungsmoment der Platte sehen werden. Nehmen wir z. B. an, dass in einer Oeffnung der Scheibe von der ganzen Schwingungsphase der Platte wir den Moment erblicken, wo die Platte sich in der Lage *cb* befindet. Während der Zeit, wo vor unserem Auge der Zwischenraum dieser und der nächstfolgenden Oeffnungen der Scheibe vorübergeht, kann die Platte eine ganze Schwingungsphase beenden und zu ihrer früheren Lage *cb* wieder zurückkehren, so dass wir durch die zweite, nächstfolgende Oeffnung sie wieder in derselben Lage sehen wie früher in der ersten Oeffnung; dieselbe Erscheinung wird sich beim passiren jeder nächstfolgenden Oeffnung wiederholen. Folglich werden wir bei einem solchen Verhältnisse zwischen der Bewegungsschnelle der Scheibe und der Platte während der ganzen Zeit der stroboscopischen Beobachtung die Platte stets in ein und derselben Lage sehen, in welcher sie uns auf der Höhe ihrer Phase *cb* unbeweglich scheinen wird. Bei stroboscopischen Untersuchungen des Kehlkopfes kann zwischen der Bewegungsschnelle der Stimmbänder und Scheibe ein ganz solches Verhältniss vorkommen, wobei der Kehlkopf während der Phonation unbeweglich mit geöffneter oder geschlossener Spalte erscheinen kann. Zum Studium der Schwingungen der Stimmbänder ist ein solches Verhältniss der Schnelle nicht vortheilhaft; zu diesem Zwecke wird es besser sein, wenn die Bewegungen der Scheibe weniger schnell sein werden, als im vorhergehenden Falle. In diesem Falle werden wir durch die Oeffnungen des Stroboscops nicht ein und dieselben Momente der Schwingungsphasen sehen, sondern eine ganze Reihe von Momenten, die ununterbrochen auf einander folgen. So, wenn wir z. B. durch eine der Oeffnungen die Platte in der Lage *cb* gesehen haben, so werden wir sie durch

die zweite Oeffnung etwas niedriger sehen, z. B. in Lage *eb*, durch die dritte noch niedriger u. s. w. Und je weniger der Unterschied zwischen der Bewegungsschnelle der Scheibe und der Platte sein wird, desto näher wird sich jeder folgende Moment der Schwingungsphasen befinden, welche durch jede Oeffnung der Scheibe sichtbar sind. In Folge dessen verfließen die einzelnen durch das Auge empfangenen Eindrücke jeder Oeffnung in ununterbrochenen Reihen von Eindrücken, wesshalb es uns scheinen wird, als ob die Platte zwischen *c d* sich langsamer auf und ab bewege. In diesem Falle beobachten wir im Stroboscop nicht die wirkliche Schwingungsphase, sondern eine künstliche, die aus einer unzähligen Menge einzelner Momente besteht, welche folgerecht aus einer ganzen Reihe wirklicher Schwingungsphasen genommen sind. Diese zusammengesetzte Phase besitzt alle physischen Eigenschaften einer natürlichen Schwingungsphase und unterscheidet sich von der letzten nur durch eine bedeutende Langsamkeit.

Wenn die einzelnen Bewegungsmomente, die durch jede Oeffnung des Stroboscops beobachtet werden, von einander weit entfernt sind, so werden wir in solch einem Falle den Eindruck einer zitternden Bewegung bekommen.

Auf diese Art und Weise giebt das Stroboscop uns die Möglichkeit, die natürlichen Schwingungsphasen, die unseren Beobachtungen, ihrer ausserordentlichen Schnelle wegen, unzugänglich sind, durch künstliche Phasen zu ersetzen, die allen Eigenschaften der natürlichen, nur verlangsamten Phase entsprechen und desshalb der Beobachtung vollständig zugänglich sind. Daher wird für die stroboscopischen Beobachtungen der Schwingungen der Stimmbänder das vortheilhafte Verhältniss zwischen der Schnelle der Stroboscopscheibe und den Schwingungen der Stimmbänder ein solches sein, welches die Bewegungen der Stimmbänder langsamer erscheinen lässt. Wie auf praktischem Wege ein solches Verhältniss zu erlangen, wird später erwähnt werden.

2. Die graphische Methode. Graphische Darstellungen von Schwingungen der künstlichen Stimmbänder erhielt ich mittelst eines besonderen Apparates, der zu diesem Zwecke von dem Mechaniker Richter in St. Petersburg verfertigt wurde. Das Besondere dieses Apparates besteht darin, dass der Cylinder, auf dem die Schwingungen der Stimmbänder gezeichnet werden, um seine Axe und nach der Länge seiner Axe gleichzeitig mit einer bedeutenden

Schnelle (bis 10 Umläufe in der Secunde) sich bewegen kann. Dieser Apparat besteht aus einem Cylinder (siehe Fig. C), dessen Axe *ab* mit dem Ende *a*, welches eine tiefe Längsfurche besitzt, in einem Uhrmechanismus *c* befestigt ist, und mit dem anderen Ende *b*, in welchem ein breiter Schraubengang eingeschnitten ist, auf einem Stative ruht. An diesem Ende der Axe sind am Stativ zwei Hebel *a* und *f* befestigt, der eine über und der andere unter der Axe. Der Hebel *e* spielt die Rolle einer Bremse, mit

Fig. C.

welcher man durch Druck auf die Axe des Cylinders die Bewegungen desselben anhalten kann. Der Hebel *f* dient dazu, um dem Cylinder die Bewegung nach der Richtung der Axe zu geben; beim Druck dieses Hebels auf die Axe des Cylinders legt sich in die Furche des Schraubenganges, welcher in die Axe eingeschnitten ist, eine Stahlplatte, die den Cylinder nöthigt nach dem Gange der Schraube sich zu bewegen, d. h. nach der Richtung der Axe. Die Bewegung des Cylinders nach der Richtung der Axe wird von dem anderen Ende der Axe *a* durchaus nicht gestört, weil dieses Ende in dem Uhrmechanismus beweglich festgehalten ist (vermittelt eines Stiftes, der aus dem Rande der Oeffnung des Rades, durch welches die Axe des Cylinders durchgeht, und der in der Längsfurche der Axe eingesenkt ist). Wenn man die Hebel *e* und *f* von der Axe des Cylinders entfernt, d. h. sie von dem Drucke der Hebel befreit, so kann man den Cylinder ganz frei in der Richtung seiner Axe bewe-

gen (zwischen dem Uhrmechanismus und Stativ). Der den Cylinder notirende Uhrmechanismus *c* wird durch Gewichte, die auf einen Teller gelegt werden, in Thätigkeit gesetzt. Aus der Mitte des Tellers steht ein eisener Zapfen hervor, an dessen Spitze das Ende einer Schnur befestigt ist, die das Aufzugsrad des Uhrmechanismus umwindet. Die Gewichte bestehen aus Gusseisenscheiben von verschiedener Dicke und haben einen tiefen Einschnitt, durch welchen der Zapfen des Tellers beim Auflegen der Gewichte hindurchgeht. Durch Auflegen auf den Teller einer grossen Anzahl von Gewichten kann man der Rotation des Cylinders eine sehr grosse Schnelligkeit verleihen.

Der Apparat wird folgendermassen in Bewegung gesetzt: Zuerst wird auf den Teller die nöthige Anzahl von Gewichten aufgelegt und dann der Uhrmechanismus aufgezogen (durch einen Schlüssel, der auf die Axe des Aufzugsrades, die links von der Axe des Cylinders gelegen ist, angelegt wird). Wenn nun die Hebel *e* und *f* aufgehoben werden, so wird der Cylinder sich nur um seine Achse bewegen; wird jetzt der Hebel *e* angelegt, so nimmt der Cylinder, seine Rotations-Bewegungen fortsetzend, noch die Bewegung in der Richtung der Längs-Axe an, d. h. die Richtung vom Uhrmechanismus zum Stativ. Vermittelt der Bewegung des Cylinders in der Richtung der Längsaxe wird es möglich, graphische Bilder zu erhalten, die in Form einer ununterbrochenen Kette den Cylinder der ganzen Länge nach umwinden.

Graphische Bilder wurden gleichzeitig von den Bewegungen beider Stimmbänder auf folgende Weise erhalten: Zuvor wird der Cylinder mit Glanzpapier beklebt, das dann mit Russ bedeckt wird. Darauf werden auf den Stimmbändern zwei Schreibehärchen befestigt, auf je ein Stimmband zu einem Schreibehärchen. Am besten ist es, zu diesem Zwecke sich der Kopphaare des Menschen zu bedienen. Das Befestigen der Härchen geschieht folgendermassen: Ein Stückchen Wachs von der Grösse eines Stecknadelkopfes wird am Ende eines Drathes oder einer Stecknadel befestigt und am Rande der Flamme zum Schmelzen gebracht. Der geschmolzene Tropfen wird auf die Mitte der Länge des Stimmbandes ganz am Rande desselben aufgetragen und das Ende des Härchens, bevor der Tropfen noch nicht erstarrt ist, hineingetaucht (in perpendiculärer Richtung) und gewartet bis der Tropfen erstarrt. Genau auf dieselbe Weise und auf derselben Stelle

wird das zweite Härchen auf das andere Stimmband befestigt. Nachdem auf diese Weise die Härchen befestigt sind, werden sie bis auf 1 cm Länge, durch Abschneiden der oberen Enden, verkürzt (Fig. *D* und *E*). Jetzt schickt man sich an, graphische Bilder von Bewegungen der Stimmbänder zu erhalten. Der Kehlkopf mit den Schreibhärchen *g* (Fig. *C*) wird auf ein Stativ befestigt (besser in horizontaler Lage) und so lange dem Cylinder näher gerückt, bis die Scheibehärchen ihn berühren. Dabei giebt man dem Kehlkopf eine solche Lage, in welcher die Spalte desselben perpendicular zur Axe des Cylinders zu stehen käme und die Schreibhärchen (resp. Stimmbänder) parallel zur Axe des Cylinders während der Phonation des Kehlkopfes ihre Schwingungen aufführen könnten. *C* und *D* zeigen die relative Lage des Kehlkopfes, der Härchen und des Cylinders. Nachdem auf die beschriebene Art und Weise der Kehlkopf aufgestellt ist, werden zuerst Probeversuche der graphischen Bilder angestellt. Zu solchen Probeversuchen benutzt man nur die rotatorischen Bewegungen des Cylinders. Nach Abnahme beider Hebel nöthigt man den Cylinder sich um seine

Fig. D.

Axe zu bewegen, wobei die Härchen zwei gerade, parallele Linien zeichnen. Wenn der Kehlkopf während der ganzen Bewegungsdauer des Cylinders nicht phonirt, so bleiben die Linien in ihrer Lage unverändert. Lassen wir nun den Kehlkopf kurz phoniren (indem wir in die zum Kehlkopf führende Kautschukröhre kurz hineinblasen), so bekommen wir das graphische Bild der Bewegungen der Stimmbänder. Wenn wir nun die Bewegungen des Cylinders jetzt hemmen und beim Betrachten der graphischen Probelbilder es sich erweist, dass die beiden Härchen vollkommen untadelhafte Curven geben, so schreiten wir zur Erhaltung der eigentlichen graphischen Bilder. Zu diesem Zwecke bringt man den Cylinder zuerst in rotatorische Bewegung und wartet ab, bis die Bewegungen desselben, die durch einen Regulator des Uhrmechanismus controlirt werden, gleichmässig geworden sind, und bläst dann in den Kehlkopf hinein. Sobald der Kehlkopf gut genug phonirt, wird der Hebel *e* angelegt, in Folge dessen der Cylinder sofort Bewegungen noch nach der Längsaxe beginnt,

wobei er von einer Kette graphischer Bilder, in Form einer Schraube, bedeckt wird. Wenn der Cylinder schon bis zu Ende von einer solchen Kette umwunden ist, wird er durch Druck der Bremse *f* in seinen Bewegungen gehemmt. Wenn die Schreibehärchen gut angepasst waren, so erhält man ein Paar hübscher Curven, welche graphisch die Schwingbewegungen beider Stimmbänder darstellen. Je nach dem Typus der Schwingbewegungen wird auch die Form jedes Paares der Linien verschieden sein: so können ungeachtet dessen, dass in beiden Fällen, sowohl der Kehlkopf wie auch die relative Lage beider Schreibehärchen vollkommen dieselbe war, bei einem Typus die Curven des Paares zu einander entgegengesetzt (Fig. C), bei anderem Typus — parallel sein (Fig. D). Das Nähere darüber wird übrigens später erläutert werden. Die auf diese Weise erhaltenen graphischen Bilder werden, nachdem sie vom Cylinder abgenommen sind, in folgender Masse fixirt: Colophonii 10 grm, Aetheris q. s. ad solut., Ol. Terebinthinae 10 grm, Spiritus Vini (95%) 200 c. c., Collodii 50 c. c.

3. Die Streifen-Methode wurde von mir angewandt bei Studien der Durchschnitte des Schattens sich schwingender Bänder. Zum Studium des Schattens im Querschnitte gebrauchte ich einen Kehlkopf, auf dessen Bänder ich quer durch die Mitte eines jeden Bandes mit weisser Farbe einen Streifen zog, wie es in Fig. E dargestellt ist. Zum Studium des Durchchnittes des Schattens in der Länge gebrauchte ich einen Kehlkopf, auf dessen

Fig. E.

Fig. F.

Bänder ich den inneren Rand eines jeden Bandes mit weisser Farbe einen Streifen zog, wie es in Fig. F dargestellt ist. Während der Schwingbewegungen der Bänder nehmen die Streifen den Schein schwingender Saiten oder Platten an, und geben bei starker Beleuchtung optische Figuren, aus welchen man leicht über die

Form der sich schwingenden Bänder urtheilen kann, wie es später genauer mitgetheilt werden wird. In manchen Fällen ist es von Nutzen, Kehlköpfe mit einer grösseren Anzahl Streifen zu gebrauchen, oder solche, bei denen die Streifen durch eine grosse Anzahl von weissen Punkten vertreten ist. Die Beobachtungen nimmt man mit dem blossen Auge vor und am besten beim Sonnenlichte.

A. Versuche an künstlichen Kehlköpfen.

Zu diesem Zwecke benutzte ich vier künstliche Kehlköpfe von derselben Construction, wie sie in meiner vorläufigen Mittheilung angegeben, jedoch mit einigen Modificationen. Der Hauptvorteil bei diesen Apparaten bestand darin, dass der Neigungswinkel der beiden Stimmbänder gegen einander bei allen ein verschiedener war: bei einem derselben waren die Stimmbänder horizontal angezogen, beim zweiten betrug der Winkel der beiden Bänder gegeneinander 160° , beim dritten $= 130^\circ$ und beim vierten $= 90^\circ$ ¹⁾.

Der Neigungswinkel der Stimmbänder hat, wie wir später sehen werden, einen wesentlichen Einfluss auf den Vibrationstypus.

Künstliche Stimmbänder können, wie ich bereits in meiner vorläufigen Mittheilung angegeben habe, zweierlei Arten von Vibrationen ausführen: erstens einfache und zweitens combinirte. Die einfachen Schwingungen verursachen einen Ton, wenn ihre Zahl in einer gegebenen Zeit bei beiden Bändern die gleiche, dagegen zwei Töne, wenn die Anzahl der Schwingungen eine verschiedene ist. Die zusammengesetzten Schwingungen ergeben dagegen immer eine Polyphonie, mag die Anzahl der Schwingungen bei beiden Bändern dieselbe sein oder nicht. Betrachten wir nun zuerst die Schwingungen der ersten Kategorie.

1. Einfache Schwingungen.

Einfache Schwingungen können zweierlei Art sein. a) alternirende. b) gleichzeitige (synchronische).

a) Alternirende Schwingungen erhält man am leichtesten

1) Der Kürze halber wollen wir in der Folge diese Winkel folgendermaassen bezeichnen: $\angle = 180^\circ$ — im ersten Falle; $\angle = 160^\circ$ — im zweiten $\angle = 130^\circ$ — im dritten und $\angle = D$ — im vierten Falle.

bei Kehlköpfen mit horizontal angezogenen Stimmbändern und gleichfalls an solchen, wo die Bänder unbedeutenden Neigungswinkel besitzen. Um uns näher mit diesem Schwingungstypus bekannt zu machen wählen wir einen Kehlkopf mit horizontal gespannten Bändern aus und beobachten die Schwingungen seiner Stimmbänder, nachdem wir ihn vorläufig auf einen einfachen Ton gestimmt haben, mit dem Stroboscop.

In dem Maasse wie die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe des Stroboscops wächst, wird sich auch das Aussehen der Stimmbänder allmählich verändern. Dieselben, welche anfangs unbeweglich erscheinen, beginnen zuerst zu zittern, dasselbe wird stärker, und schliesslich gewahren wir dem Auge deutliche Bewegungen der Bänder; dieselben verlangsamen sich allmählich und schon gelingt es uns leicht Richtung, Grösse, so wie auch die wechselseitige Beziehung der Bewegungen der Stimmbänder zu bestimmen. Sobald die Bewegungen so langsam erscheinen, wie es für Beobachtungen günstig ist, kann man einer weiteren Beschleunigung der Umdrehungen der Stroboscopplatte dadurch vorbeugen, dass man einen leichten Fingerdruck auf die Axe des Instrumentes ausübt. Je nachdem man diesen Fingerdruck verstärkt oder vermindert, kann man die Umdrehungsgeschwindigkeit der Platte nach Belieben verändern, und gewinnt so die Möglichkeit, die Schwingungen der Bänder in jedem beliebigen Moment während einer geraumen Zeit zu beobachten (bei meinen Versuchen ungefähr 15 Minuten). Führen wir nun diese Beobachtung unter den oben erwähnten Umständen wirklich aus, so sehen wir eine merkwürdige Erscheinung und zwar: Beide Bänder bewegen sich bei der Erzeugung eines Tons in diesem Falle neben einander in entgegengesetzter Richtung, d. h. in der Zeit, wo das eine Band sich nach oben bewegt, senkt sich das andere; sinkt dann das erste nach unten, so erhebt sich das zweite nach oben und diese abwechselnden Schwingungen dauern unverändert während der ganzen Zeit der Tonbildung fort. Es erfolgt also bei diesem Typus der Schwingungen der Schluss der Stimmritze (kein vollständiger) in dem Moment, wo die Bänder sich aneinander vorbeibewegen und die Oeffnung in dem Moment, wo sie sich voneinander entfernen. Dabei öffnet sich die Stimmritze bald nach der Seite des einen, bald nach der Seite des andern Stimmbandes hin.

Es gibt unter den musikalischen Instrumenten kein einziges, welches als Repräsentant alternirender Schwingungen angesehen werden könnte; nichts desto weniger gleicht die Action des Kehlkopfs bei der Bildung alternirender Schwingungen vollkommen der von musikalischen Instrumenten mit durchschlagenden oder freischwingenden Zungen. Es erfolgt bei diesen Instrumenten der Verschluss der Stimmritze (gleichfalls nicht vollständig) in dem Moment, wo sich die Zunge in der Ebene der Ritze befindet, und die Oeffnung, sobald sie sich oberhalb oder unterhalb dieser Ebene befindet. Es verhält sich also auf diese Weise der Kehlkopf bei der Bildung alternirender Schwingungen wie ein musikalisches Instrument mit zwei durchschlagenden oder frei schwingenden Zungen und es führt dabei jedes Stimmband eine volle (deutsche) Schwingungsphase aus.

Graphische Darstellungen, gleichzeitig von beiden Bändern erhalten, bestätigen vollkommen die Resultate stroboscopischer Untersuchungen. Um solche Darstellungen zu erlangen, befestigte ich am Rande jedes Bandes ein Haar, einander gerade gegenüber, aber so, dass beide Haare bei den Schwingungen der Bänder an einander vorübergleiten konnten ohne sich zu berühren. Die auf diese Weise erhaltenen graphischen Darstellungen zeigen, dass bei alternirenden Schwingungen der Stimmbänder die Wellen, wie das auch zu erwarten war, einander entgegengesetzt angeordnet sind: da, wo sich bei den Wellen des einen Stimmbandes der Wellenberg befindet, sieht man bei den Wellen des anderen das Wellenthal (s. Fig. 1, 2 und 3). Auf diesen graphischen Darstellungen kann man weder den Moment des Oeffnens noch den Moment des Schlusses der Stimmritze sehen.

Fig. 1. Einfacher Ton = f; $\angle = 180^\circ$.

Fig. 2. Einfacher Ton = h; $\angle = 160^\circ$.

Fig. 3. Einfacher Ton = h^b ; $\angle = 130^\circ$.

Ein Ton, welcher durch alternirende Schwingungen gebildet wird, zeichnet sich durch Reinheit und Weichheit seines Timbres aus und klingt einer guten Bruststimme ähnlich.

Da man die Eigenschaften eines Tones durch Abänderungen in der Construction der Bänder bedeutend modificiren kann, so bestimmten wir das Timbre des Tones unter den möglichst günstigen Bedingungen.

b) Synchronistische Schwingungen erhält man am leichtesten bei solchen Kehlköpfen, wo die Stimmbänder stark gegen einander geneigt sind ($\angle = 130^\circ$ u. $\angle D$).

Beobachtet man diesen Vibrationstypus mit dem Stroboscop, so bemerkt man, dass in diesem Falle beide Stimmbänder sich gleichzeitig bewegen bald nach oben und aussen, bald nach innen und unten. Bei diesem Schwingungstypus berühren sich bei jedem Schluss der Stimmritze die Stimmbänder gegenseitig und der Verschluss der Spalte ist dabei ein vollständiger.

Die von beiden Bändern gleichzeitig erhaltenen graphischen Darstellungen bestätigen vollkommen die durch stroboscopische Versuche gewonnenen Resultate. Die Wellen sind hier streng symmetrisch gelagert. Der Wellenberg des einen Stimmbandes liegt dem des andern gegenüber, ebenso ein Wellenthal dem andern (siehe Fig. 4, 5 u. 6). Auf diesen Abbildungen ist sowohl der Moment des Verschlusses der Stimmritze, wie auch der Moment der Oeffnung deutlich sichtbar.

Fig. 4. Einfacher Ton = a^b ; $\angle = 160^\circ$.

Fig. 5. Einfacher Ton = f; $\angle = 130^\circ$. Fig. 6. Einfacher Ton = e'; $\angle = D$.

Unter den verschiedenen Bedingungen, welche auf die Entstehung des einen oder des andern Vibrationstypus Einfluss haben, spielen allem Anschein nach eine wesentliche Rolle a) der Neigungswinkel der Stimmbänder, b) der verschiedene Grad ihrer Spannung und c) die Breite der Stimmritze oder der Abstand der Stimmbandränder von einander.

a) Bänder, welche horizontal angespannt sind, bilden den einfachen Ton gewöhnlich durch alternirende Schwingungen; je mehr die gegenseitige Lagerung der Stimmbänder von der horizontalen abweicht, umso mehr verlieren diese ihre Fähigkeit, einen alternirenden Schwingungstypus zu erzeugen, so dass Stimmbänder, welche zu einander in einem rechten Winkel stehen, gewöhnlich synchronisch schwingen und es bedeutende Schwierigkeiten macht, alternirende Schwingungen hervorzurufen.

b) Nicht minder wichtig für den Schwingungstypus ist der verschiedene Spannungsgrad der Stimmbänder. Um zum Beispiel alternirende Schwingungen hervorzurufen, ist es nothwendig, dass das eine Stimmband eine geringere Spannung besitzt, wie das andere.

Die verschiedene Spannung der Bänder kann man nach der Höhe des Tones beurtheilen, welchen jedes Band für sich angiebt. Indem man bald das eine, bald das andere Stimmband andrückt (vermittelt eines Plättchens von der Form eines Bandes — die Methode J. Müller's) und auf diese Weise bald das eine, bald das andere allein schwingen lässt, kann man sich leicht überzeugen, dass beim alternirenden Schwingungstypus ein Band gewöhnlich einen höheren Ton angiebt, wie das andere. Desshalb kann man

auch Stimmbänder, welche synchronisch schwingen, leicht alternierend schwingen lassen, sobald man nur die Spannung des einen von ihnen verringert oder verstärkt.

Es ist leicht zu verstehen, auf welche Weise der ungleiche Spannungsgrad der Bänder eine Ursache für die Bildung alternirender Schwingungen wird. Beim Hineinblasen von Luft in den Kehlkopf giebt das schwächer gespannte Stimmband dem Andrang der Luft leichter nach und erhebt sich bedeutend höher, wie das stärker gespannte, und in Folge dessen bildet sich eine Spalte, welche nach der Seite des stärker gespannten Bandes geöffnet ist. Die in dem Kehlkopfraum verdichtete Luft strömt nun durch diesen Spalt über die Oberfläche des stärker gespannten Bandes und drückt es nach unten. So vollzieht sich die erste Hälfte der Phase der alternirenden Schwingungen. Danach streben die von der Luft nach entgegengesetzter Richtung von einander entfernten Bänder, vermöge ihrer Elasticität wieder ihre frühere Lage einzunehmen, gehen jedoch bei dieser rückgängigen Bewegung gemäss dem Trägheitsgesetze über die Gleichgewichtslage hinaus, d. h. das Band, welches sich oben befand, sinkt unter die Gleichgewichtslinie, und dasjenige, welches sich unten befand, erhebt sich über diese Linie. Nun hat jedes Stimmband eine Schwingungsphase vollendet. Die weiteren Erscheinungen sind nur Wiederholungen des eben Gesagten.

c) Durchaus nicht gleichgültig erscheint auch in dieser Hinsicht die Entfernung der Stimmbänder von einander. Je nachdem, ob sie einander sehr stark genähert sind oder sich gegenseitig nirgend berühren, wird auch der Schwingungstypus ein verschiedener sein. Man kann zum Beispiel Bänder, welche alternierend schwingen, dazu veranlassen, synchronische Schwingungen auszuführen, dadurch, dass man ihre Ränder in dem Maasse nähert, dass sie sich auf einander stützen und einen leichten Kamm bilden. (Es wird dabei ein Neigungswinkel von 160° vorausgesetzt.)

Dadurch wird den Bändern die Möglichkeit geraubt, freie Bewegungen neben einander auszuführen (d. h. alternirende Schwingungen auszuführen), und sie können nur synchronisch schwingen. Bei der eben beschriebenen Art und Weise, alternirende Schwingungen in synchronische umzuwandeln, erfolgt auch eine vermehrte Neigung der Ränder der Stimmbänder. Erwähnen wir nun noch mit einigen Worten eine Eigentümlichkeit, in welcher sich die

alternirenden und synchronischen Schwingungstypen von einander unterscheiden. Um diese Eigenheit zu studiren, bediente ich mich ausser des Stroboscops noch folgender optischen Methode. Auf jedem Stimmband werden mit weisser Farbe zwei ca. 1 mm breite Linien gezogen: die eine am Rande, die andere dagegen in der Mitte perpendicularär auf die erste. Bei den Schwingungen der Bänder haben diese Linien das Aussehen schwingender Saiten oder schmaler Plättchen und stellen mit ihrem Schatten den Längs- und Querdurchmesser vom Schatten des schwingenden Stimmbandes dar.

An Stelle der Linien kann man auch auf die Oberfläche der Stimmbänder mit weisser Farbe eine Menge von Punkten aufzeichnen. Bei den Schwingungen der Stimmbänder nehmen diese Punkte die Form von kleinen Luftsäulen an, nach deren Grösse man über die Grösse der Schwingungen der verschiedenen Abschnitte der Stimmbänder urtheilen kann. Dieser Versuchsmodus giebt sowohl von der Form als wie auch von der Grösse der Bewegung der verschiedenen Stimmbandtheile eine genaue und anschauliche Vorstellung.

Die Untersuchungen, welche sowohl mit Hülfe des Stroboscops wie auch vermittelst des eben angeführten optischen Versuchsmodus ausgeführt wurden, zeigten, dass zwischen den alternirenden und synchronischen Schwingungen in dieser Hinsicht folgender Unterschied besteht:

Die alternirenden Schwingungen pflegen mit sehr wenigen Ausnahmen gewöhnlich totale zu sein, d. h. solche, bei welchen sich die Bänder mit ihrer ganzen Masse in einer gleichen Richtung bewegen, oder mit anderen Worten: in diesem Falle haben alle Theile eines jeden Stimmbandes für sich genommen in einem beliebigen Schwingungsmoment dieselbe Richtung. Als Beweis dafür dient sowohl der Längs- wie auch der Querdurchmesser des Schattens des schwingenden Bandes. Der Querschnitt des Schattens hat in diesem Falle immer die Gestalt eines Keils oder Dreiecks, dessen Basis der Stimmritze zugekehrt ist, die Spitze der Peripherie (siehe Fig. 7).

Fig. 7.

Die äusseren Contouren des Schattens sind immer begrenzt von scharfen weissen Streifen, die übrigen Theile sind matt milchig gefärbt. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass die äusseren Theile in diesem Falle den Stellen des Stillstandes oder der zeitweiligen Ruhe der Bänder entsprechen (sie entsprechen den Gipfeln und Thälern der Wellen) und desshalb eine länger andauernde Einwirkung auf die Netzhaut unseres Auges hervorrufen. Der Längsdurchschnitt des Schattens, welcher vom Rande des schwingenden Bandes gebildet wird, hat die Gestalt einer verlängerten Ellipse, deren äussere Seiten gleichfalls scharf von weissen Streifen begrenzt sind, während der innere Theil dicht milchweiss gefärbt ist. Auf diese Weise theilen sich die Stimmbänder bei alternirenden Schwingungen weder der Länge noch der Breite nach in Theile, welche selbständige Schwingungen ausführen, sondern vollführen Schwingungen als Ganzes. Eine Ausnahme findet nur in jenen seltenen Fällen statt, wo bei einem Grundton sich Obertöne bilden. Kautschukmembranen geben gewöhnlich keine Obertöne; aber doch kommt das in einigen seltenen Fällen vor. Bei der Bildung von Obertönen vollführen die Stimmbänder ausser ganzen Schwingungen noch Partialschwingungen, indem sie sich der Länge nach in verschiedene Abschnitte theilen. Diese Partialschwingungen werden wir *longitudinale Partialschwingungen* nennen oder *Obertonschwingungen* und von ihnen genauer bei den zusammengesetzten Schwingungen sprechen. Fürs erste bemerken wir nur, dass wir sie auch allein als solche darstellen können, d. h. ohne totale Schwingungen (welche den Grundton abgeben), nur dass der Ton, welcher von diesen Partialschwingungen gebildet wird, dem Tone einer Flöte oder dünnen Metallsaite ähnlich klingt und um eine ganze oder um 2 Octaven höher ist, wie der Grundton.

Bei den synchronischen Schwingungen haben umgekehrt die Stimmbänder ein starkes Bestreben, Partialschwingungen auszuführen, wobei sie sich der Breite nach in zwei Abschnitte theilen, deren jeder einander entgegengesetzte Schwingungen ausführt. Desshalb begegnet man auch vollkommenen Totalschwingungen unter den synchronischen Schwingungen recht selten. Ausserdem existirt von den Total- zu den Partialschwingungen ein unmerklicher Uebergang, so dass es schwer zu sagen ist, wo die einen aufhören und die anderen anfangen. Die haupt-

sächlichsten Unterscheidungsmerkmale dieser beiden Formen lassen sich folgendermaassen charakterisiren.

Bei totalen synchronischen Schwingungen führt jedes Stimmband nur halbe Schwingungsphasen aus. Von der Richtigkeit des eben Gesagten überzeugt uns die Form des Schattens, der vom Rande des schwingenden Bandes gebildet wird; in diesem Falle stellt er die Hälfte einer verlängerten Ellipse dar, deren lange Axe bei der Stimmspalte liegt, deren Bogen aber nach oben und aussen gerichtet ist. Auf diese Weise bewegen sich die Stimmbänder nach innen nicht über ihre Gleichgewichtslage hinaus, oder über ihre Begegnungslinie, sondern sie stossen in dieser Linie auf einander und kehren zurück. Einen solchen Modus der Tonbildung zeigen uns musikalische Instrumente mit aufschlagenden Zungen (Oboe, Fagott u. s. w.). Und so verhält sich also der Kehlkopf bei totalen, synchronischen Schwingungen wie ein musikalisches Instrument mit 2 aufschlagenden Zungen. In Uebereinstimmung damit zeichnet sich auch ein durch totale synchronische Schwingungen gebildeter Ton durch eine gewisse Schärfe aus, wie auch der Ton der obengenannten Instrumente. Da diese Schwingungen, streng genommen, selten totale sind, so hat auch der Querdurchschnitt des Schattens des schwingenden Stimmbandes selten die Form eines regelmässigen Dreiecks, sondern meistens die Form einer sehr schmalen Leier, welche mit ihrem geschlossenen Theil nach aussen gerichtet ist, mit dem offenen aber der Stimmritze zu.

Bei Partialschwingungen wird jedes Stimmband durch eine Knotenlinie, welche der Stimmritze parallel läuft, in zwei ungleiche Theile getheilt, welche einander entgegengesetzte Schwingungen ausführen. Der eine Theil des Stimmbandes (d. h. der, welcher der Stimmritze anliegt) ist gewöhnlich bedeutend schmaler, wie der äussere. Der Querdurchmesser des Schattens des schwingenden Bandes wird in diesem Falle die Form einer stark ausgezogenen 8 haben, bei welcher die Hälfte der einen Schlinge abgeschnitten ist; dabei ist die ganze Schlinge der Figur nach aussen gekehrt, die halbe Schlinge der Stimmritze zu, der enge Theil der Figur stellt die Lage der Knotenlinien dar (siehe Fig. 8).

Fig. 8.

Bei totalen synchronischen Schwingungen bewegen sich die Stimmbänder nur bis zu der Linie, in welcher sie sich begegnen nach innen; bei den Partialschwingungen jedoch bewegen sie sich auch nach ihrem Zusammentreffen weiter nach unten, indem sie sich mit ihrem Rande der ganzen Länge nach gegenseitig stützen. Manchmal indessen lagert sich der Rand eines der Bänder dabei niedriger als der des andern. Auch kommt es vor, dass die mittleren Theile der Ränder über einander hinweggleiten. Der Schatten, welcher von dem schwingenden Rand eines jeden Bandes gebildet wird, hat die Form einer verlängerten Ellipse. Ueberschreiten die Bänder die Linie ihrer Begegnung sehr bedeutend nach unten, so wird die Ellipse eine fast gleichseitige sein; senken sie sich nur unbedeutend über diese Linie herab, so wird die Ellipse eine ungleichseitige sein; die innere Hälfte wird schmaler sein. Es beschreiben also die Stimmbänder bei Partialschwingungen volle Schwingungsphasen.

Die immer entgegengesetzten Bewegungen der Theile, welche zu beiden Seiten der knotenbildenden Linie liegen, kann man sehr gut mit Hülfe des Stroboscops sehen, namentlich wenn man zu dem Versuch Bänder mit queren Streifen auswählt. Diese Art von Partialschwingungen gleicht vollständig derjenigen, welche Prof. Oertel¹⁾ bei der Bildung des Falsetts am Menschen beobachtete. Deshalb kann man diese Partialschwingungen auch Falsettschwingungen oder quere Partialschwingungen nennen zum Unterschied von den longitudinalen Partialschwingungen oder Obertonschwingungen.

Ein Ton, welcher von Falsettschwingungen gebildet wird, zeichnet sich überhaupt durch die Weichheit seines Timbres aus; er ist bald einer weichen Bruststimme ähnlich, bald dem Falsett. Es ist also für die Bildung des Falsetts bei künstlichen Stimmbändern nicht allein ihre transversale Theilung in zwei Abschnitte

1) Centralblatt f. d. med. Wissensch. 1878, No. 5 u. 6. Ueber den Mechanismus des Brust- und Falsettregisters. Beiträge zur Biologie.

vermittelt einer Knotenlinie nöthig, sondern es kommen auch noch einige andere Bedingungen in Betracht. Ein Ton, welcher von Falsettschwingungen gebildet wird, hat allem Anschein nach von dem Falsett beim Menschen mehr Aehnlichkeit in dem Falle, wenn die Knotenlinie der Stimmritze sehr nahe liegt und die letztere in stärkerem Grade geöffnet ist.

Im Uebrigen liegt kein Grund vor, eine vollkommene Aehnlichkeit zwischen dem Tone künstlicher Stimmbänder oder gar eines todten menschlichen Kehlkopfs (nach der Methode J. Müller's präparirt) und der Stimme eines lebenden Menschen zu suchen. Bei der künstlichen Erzeugung der Stimme werden in beiden Fällen viele Bedingungen dazu nicht erfüllt: schon allein die Abwesenheit eines Resonators über dem Kehlkopf (Mund-, Rachen- und Nasenhöhle) muss bei der künstlichen Reproduction der Stimme einen bedeutenden Unterschied in den Eigenschaften der Töne bedingen.

Die Entstehung der einen oder der anderen Art von synchronischen Schwingungen hängt aller Wahrscheinlichkeit nach von dem verschiedenen Spannungsgrad der peripheren Stimmbandtheile und von der Näherung der Stimmbandränder ab.

Um ganze synchronische Schwingungen zu vollführen, müssen die peripheren Theile der Bänder mehr angespannt und ihre Ränder mehr genähert sein, als bei der Bildung von Falsettschwingungen. Ausserdem muss man, um ganze Schwingungen zu bekommen, dicke Membranen auswählen, für Falsettschwingungen aber dünne.

In manchen Fällen haben die synchronischen Schwingungen eine gemischte Form, wobei das eine der Stimmbänder totale Schwingungen ausführt, das andere Partial- oder Falsettschwingungen.

Es erzeugen also künstliche Stimmbänder, welche horizontal aufgespannt sind oder zueinander in einem stumpfen Winkel geneigt sind (Winkel von 180° bis 90° inclusive) einen einfachen Ton durch zwei Arten von Schwingungen: die alternirenden (oder freien) und die synchronischen (oder aufeinanderstossenden)¹⁾.

1) Diese Thatsache ist unlängst durch Dr. Simanowski mittelst einer Augenblicksphotographie bestätigt worden. Siehe „Russische Medicin“ (Russkaja medicina) 1885, No. 24.

Jede von diesen beiden Schwingungstypen kann von zweierlei Art sein: total und partiell. Die alternirenden Schwingungen sind hauptsächlich totale. Die synchronischen dagegen partielle.

Bei den totalen alternirenden Schwingungen beschreiben die Stimmbänder volle Schwingungsphasen und den Ton, welcher von diesen Schwingungen gebildet wird, kann man mit einer guten Bruststimme vergleichen.

Bei den partiellen alternirenden Schwingungen (partiellen Longitudinal- oder Obertonschwingungen) zerfallen die Stimmbänder der Länge nach in zwei Abtheilungen, welche einander entgegengesetzte Schwingungen ausführen. Theilen sich beide Stimmbänder in Abschnitte, so schwingt jeder Theil alternirend nicht nur mit dem andern Abschnitte desselben Stimmbandes, sondern auch mit dem gegenüberliegenden Theil des andern Stimmbandes. Der Ton, welcher durch diese Schwingungen gebildet wird, ist immer ein hoher und dem Ton einer Flöte oder einer dünnen Metallsaite ähnlich.

Bei den totalen synchronischen Schwingungen machen die Stimmbänder keine vollständigen Schwingungsphasen durch; der Ton, welcher von diesen Schwingungen gebildet wird, zeichnet sich durch seine Schärfe aus und ist dem Ton eines Oboe oder einer scharfen Bruststimme ähnlich.

Bei den partiellen synchronischen Schwingungen (Falsettschwingungen) theilen sich die Stimmbänder der Quere nach in zwei Theile, welche einander entgegengesetzte Schwingungen ausführen, die aber synchronisch den correspondirenden Theilen des anderen Stimmbandes sind. Bei diesen Schwingungen machen die Stimmbänder volle Schwingungsphasen durch. Ein von diesen Schwingungen gebildeter Ton zeichnet sich durch sein weiches Timbre aus und gleicht bald einer weichen Bruststimme, bald einem Falsett.

Es muss indessen bemerkt werden, dass es bei den synchronischen Schwingungen zuweilen sehr schwierig ist, die Eigenschaften des Tones zu bestimmen; einmal weil a) zwischen totalen und Falsettschwingungen viele Uebergangsformen existiren und b) weil manchmal der Schwingungstypus ein gemischter ist, wobei eines der Bänder totale Schwingungen ausführt, das andere aber partielle. Um reine Typen von synchronischen Schwingungen zu erhalten, ist es unumgänglich nöthig, sich bei der Stimmung von

der Form des Schattens vom Querdurchschnitt der schwingenden Bänder leiten zu lassen und folglich zu diesem Zweck nur Bänder mit Längs- und Querstreifen zu nehmen.

Ich erlaube mir hier noch eine Bemerkung hinsichtlich der Abschnitte, in welche sich die Stimmbänder theilen können. Sowohl bei Longitudinal- als wie auch bei Transversaltheilungen zerfallen die Bänder immer nur in zwei Abschnitte. Ich habe nie eine Ausnahme von dieser Regel gesehen, d. h. in dem Sinne, dass sich jemals die Bänder sowohl der Länge wie der Quere nach in mehr als zwei Abschnitte getheilt hätten. Bei Theilungen der Länge nach wird der Ton stark erhöht (um eine oder zwei Octaven), bei Quertheilungen dagegen nimmt seine Höhe nur unbedeutend zu (nur um einige Noten), sogar in dem Fall, wenn der Abschnitt, welcher der Stimmritze anliegt, bedeutend kleiner wie der periphere ist. Desshalb kann man vermittelst einer Quertheilung der Bänder keine bedeutende Tonerhöhung erzielen.

Erwähnen wir noch mit einigen Worten der unabhängigen einfachen Schwingungen. Stimmbänder, welche einfache Schwingungen ausführen (gleichgültig ob synchronische oder alternirende), befinden sich in einer bedeutenden Abhängigkeit voneinander. Wenn wir die Spannung des einen Bandes allmählich verstärken oder vermindern, so erhalten wir dadurch gewöhnlich keinen Doppelton; der Ton wird dadurch entweder niedriger (wenn die Spannung des einen Stimmbandes vermindert wird) oder höher (wenn er stärker angespannt wird).

In beiden Fällen passt sich das Stimmband, dessen Spannung unverändert bleibt, dem andern an, d. h. es vermindert oder erhöht die Zahl seiner Schwingungen und bringt sie so mit derjenigen des andern Bandes in Einklang, dessen Spannung die veränderliche ist. Deshalb kann man Schwingungen, welche einen einfachen Ton geben, auch abhängige oder conjugirte nennen. Aber unter gewissen Bedingungen geht diese Abhängigkeit verloren, und die Stimmbänder vollführen unabhängige Schwingungen, wobei jedes Stimmband nur seinem Spannungsgrad entsprechend schwingt und in einem solchen Falle ist dann auch die Anzahl der Schwingungen bei beiden Bändern eine ungleiche. Das Resultat unabhängiger einfacher Schwingungen ist desshalb ein Doppelton, dessen Intervall gewöhnlich weniger als eine Octave beträgt. Am meisten hört man bei diesen unabhängigen Schwin-

gungen die am meisten consonirenden Schwingungen, namentlich: Einen Zweiklang in der Quinte (wenn die Schwingungen sich wie 2:3 verhalten), in der Quarte ($= 3:4$) und in der grossen Sexte ($= 3:5$). Auf diese Weise können einfache unabhängige Schwingungen nur eine Art von Polyphonie erzeugen — den Zweiklang. Unabhängige Schwingungen erhält man gewöhnlich an dünnen, horizontal aufgespannten Membranen, bei weitgeöffneter Stimmritze. Unter den erwähnten Umständen kann man durch Verminderung der Spannung des einen Stimmbandes einen doppelten Ton erhalten.

Gehen wir nun zu den zusammengesetzten Schwingungen über.

2) Zusammengesetzte Schwingungen.

Die stroboscopische Analyse der zusammengesetzten Schwingungen ist sehr schwierig und nur in sehr wenig Fällen überhaupt ausführbar. Um die Entstehungsweise irgend einer Art von Polyphonie zu erklären, muss zuerst das gegenseitige Verhalten (nach Zahl, Zeit, Amplitude und Form) der Schwingungen beider Stimmbänder und der jedes Bandes, für sich genommen, bestimmt werden. Schon bei den einfachen Arten der Polyphonie hält es schwer, diese Beziehungen mit dem Auge zu definiren, und bei den zusammengesetzten ist es eine Unmöglichkeit. Eine genaue Vorstellung von den zusammengesetzten Schwingungen erhält man nur durch ihre graphische Darstellung, und zwar von beiden Stimmbändern gleichzeitig. Es wird das Verständniss dieser Schwingungen erleichtern, wenn wir uns hier mit der Untersuchung der reinen oder musikalischen Polyphonieformen begnügen.

Die von beiden Stimmbändern gleichzeitig erhaltenen graphischen Darstellungen zeigen uns, dass die zusammengesetzten Schwingungen, welche musikalische Formen von Polyphonien bilden, regelmässige periodische Schwingungen darstellen. Diese Schwingungen zeichnen sich dadurch aus, dass jedes periodische Schwingungen ausführende Stimmband zwei Töne giebt, von welchen der eine durch die die Periode darstellende Hauptwelle gebildet wird, der andere aber von Partialwellen, die in der Hauptwelle enthalten sind. Ausserdem zeichnen sich die Polyphonien, welche durch periodische Schwingungen gebildet werden, dadurch von allen andern Arten von Polyphonien aus, dass sich

unter den Verhältnisszahlen ihrer Schwingungen unbedingt eine Eins befinden muss. Es können deshalb periodische Schwingungen folgende Arten von Polyphonien bilden.

- Zweiklänge a) mit der Octave $= 1:2$ (der Grundton¹⁾ und seine untere Octave),
 b) mit der Duodecime $= 1:3$ (der Grundton und seine untere Duodecime),
 c) mit der zweiten Octave $= 1:4$ (der Grundton und seine 2. untere Octave).
 Dreiklänge a) der Quintenaccord $= 1:2:3$ (der Grundton, seine obere Quinte und die untere Octave),
 b) der Quartaccord $= 1:3:4$ (der Grundton, seine obere Quarte und untere Duodecime).

Diejenigen Schwingungen, bei welchen sich unter den Verhältnisszahlen der Schwingungen keine Eins vorfindet, werden wie oben gesagt von einfachen unabhängigen Schwingungen gebildet, wie z. B. der Zweiklang mit der Quinte (2:3), der Quarte (3:4), der grossen Sexte (3:5) u. s. w. Dabei erzeugt jedes Stimmband einen einfachen Ton.

Die oben angeführte Eigenthümlichkeit periodischer Polyphonien hängt davon ab, dass in periodischen Schwingungen die Zeiteinheit, mit welcher die Zahlen der Schwingungen gemessen werden, eine Periode bildet. Desshalb müssen die Partialschwingungen, welche sich im Verlauf einer Periode vollziehen, unbedingt Multipla der Hauptwelle darstellen, welche die Periode bildet. So stellt z. B. Fig. 9 die periodische Curve eines Stimmbandes dar, bei welcher jede Periode aus zwei Wellen besteht; das Zahlenverhältniss ist in diesem Falle zwischen der Hauptwelle und der Partialwelle $= 1:2$. Ein solches Verhältniss der Schwingungen giebt einen Zweiklang in der Octave, d. h. das Stimmband, welches solche periodische Schwingungen ausführt, erzeugt zwei Töne, von welchen der eine, von der Hauptwelle gebildet, um 8 Noten tiefer ist, als der Ton, welcher von den Partialwellen gebildet wird.

1) Den Grundton bildet in den Zweiklängen immer die obere Note, in den Dreiklängen die mittlere.

Fig. 9. Periodische Curve eines Stimmbandes bei Zweiklang = dd' ;
 $\angle = 160^\circ$.

Fig. 10. Periodische Curve eines Stimmbandes bei Dreiklang = Hhf ;
 $\angle = 160^\circ$.

Fig. 11. Periodische Curve eines Stimmbandes bei Dreiklang = $Ae'a'$;
 $\angle = D$.

Fig. 10 stellt die periodische Curve gleichfalls eines Stimmbandes dar, wobei die Perioden aus drei Wellen bestehen; es verhält sich also in Bezug auf die Anzahl der Schwingungen in der Zeiteinheit die Hauptwelle zu den Partialwellen wie 1:3.

Ein solches Verhältniss giebt einen Doppelton in der Duodecime, d. h. das Stimmband, welches solche periodische Schwingungen ausführt, erzeugt zwei Töne, von welchen der von der Hauptwelle erzeugte um 12 Töne niedriger sein wird, als der Ton, welchen die Partialwellen bilden. Aus demselben Grunde wird das Stimmband, dessen Schwingungscurve Fig. 11 darstellt, zwei Töne bilden, deren Entfernung von einander ganze 2 Octaven beträgt, d. h. der Ton, welcher in diesem Fall von der Periode gebildet wird, wird um 16 Noten niedriger sein, wie der Ton der Partialwellen, weil hier die Periode sich aus 4 Wellen zusammensetzt und die Verhältnisszahl zwischen der Hauptwelle und den Partialwellen = 1:4 ist.

Periodische Schwingungen, deren Perioden eine noch vielfachere Zusammensetzung hatten, habe ich nicht beobachtet. Er-

hält man schon Perioden mit vier Wellen nur mit Mühe und wenig ausgeprägt. Da ein Stimmband, welches periodisch schwingt, 2 Töne erzeugt, so müssten dem Anscheine nach, falls beide Bänder periodische Schwingungen ausführen, 4 Töne entstehen. In Wirklichkeit ist dem jedoch nicht so. Periodisch schwingende Stimmbänder können, wenn sie gemeinschaftlich schwingen, nicht mehr wie 3 Töne produciren, so verschieden von einander ihre Schwingungen auch sein mögen. Dies beruht auf dem Umstand, dass die Bänder, um musikalische Polyphonien zu erzeugen, unbedingt Perioden von gleicher Dauer ausführen müssen: im entgegengesetzten Fall ist eine musikalische Polyphonie unmöglich. Es werden deshalb die Stimmbänder, bei allen nur möglichen Zusammensetzungen der periodischen Schwingungen, mit ihren Perioden ein und dieselbe (immer die unterste) Note der Polyphonie erzeugen. Es entsteht also durch die Perioden beider Bänder immer nur eine Note, nicht zwei. Die Partialschwingungen aber erzeugen entweder nur eine Note (die höchste), wenn die Perioden beider Stimmbänder dieselbe Anzahl von Wellen enthalten, oder 2 (die höchsten), wenn die Perioden beider Bänder nicht die gleiche Anzahl von Wellen enthalten. Folglich wird die grösste Anzahl der Töne = 3 sein.

Von allen Polyphonieformen, welche durch periodische Schwingungen der Stimmbänder entstehen können, habe ich blos 3 erhalten, nämlich: den Zweiklang in der Octave = 1:2 und zwei Arten des Dreiklangs: den Quintenaccord = 1:2:3 und den Quartaccord = 1:3:4.

Die periodischen Schwingungen können ebenso, wie die einfachen, abhängige und unabhängige sein. Im ersteren Falle führen beide Bänder die gleiche Anzahl von Schwingungen aus, im zweiten dagegen eine ungleiche. Die abhängigen periodischen Schwingungen geben zwei Polyphonieformen, den Zweiklang in der Octave = 1:2 und den Quintenaccord = 1:2:3, die unabhängigen zwei Arten des Dreiklangs, den Quintenaccord = 1:2:3 und den Quartaccord = 1:3:4. Wir bringen zuerst einige Beispiele von graphischen Darstellungen abhängiger periodischer Schwingungen und fangen mit dem Zweiklang an.

Bei der Bildung des Zweiklangs führen meist beide Stimmbänder periodische Schwingungen aus, manchmal aber ist allem Anschein nach nur eins betheiligt. Die Figuren 12, 13 und 14

sind Beispiele von Zweiklängen, wo nur das eine Stimmband periodische Schwingungen ausführt, das andere hingegen einfache.

Fig. 12. Doppelton = gg' ; $\angle = 160^\circ$.

Fig. 13. Doppelton = ee' ; $\angle = 160^\circ$.

Fig. 14. Doppelton = ee' ; $\angle = 180^\circ$.

Doch muss hinsichtlich dieser Art von graphischen Darstellungen des Zweiklangs bemerkt werden, dass er in vielen Fällen für ein Kunstproduct angesehen werden muss und dass sie nur während der Zeit der graphischen Darstellung entsteht. Dies hängt davon ab, dass in vielen Fällen die Periodicität der Schwingungen bei dem einen Stimmband weniger stabil ist, wie bei dem andern, und dass sie in Folge des bedeutenden Widerstandes beim Registriren der Schwingungen vollständig verloren gehen kann, während die Periodicität des andern Bandes sich vollkommen deutlich dabei darstellen lassen wird. Davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man die Schwingungen der Bänder bei sich beständig steigender Umdrehungsgeschwindigkeit des Cylinders registriert. Dann erhält man im Anfang der Zeichnung von beiden Bändern periodische Schwingungen (siehe Fig. 15), am Ende derselben jedoch nur solche von einem Bande (siehe Fig. 16). Dasselbe erfolgt, wenn die schreibenden Häärchen ungleichmässig an den Cylinder angedrückt werden.

Fig. 15. Doppelton = gg' ; $\angle = 160^\circ$. Fig. 16. Doppelton = gg' ; $\angle = 160^\circ$.

Nichts desto weniger zeichnet, ungeachtet aller Vorsichtsmaassregeln, in manchen Fällen ein Stimmband beständig periodische Schwingungen auf, das andere dagegen einfache. Man muss deshalb unbedingt zugeben, dass in diesen Fällen das eine der Bänder entweder wirklich nur einfache Schwingungen oder aber ausserordentlich schwach ausgeprägte, periodische Schwingungen ausführt. Wie man auch hinsichtlich dieser Fälle denken mag, sie berechtigen uns zu dem Schluss, dass der Zweiklang hier, wenn auch nicht ausschliesslich, so doch vorzugsweise von dem einen Stimmband, welches periodische Schwingungen ausführt, erzeugt wird. Dasselbe muss man auch von den periodischen Schwingungen annehmen, welche in ihren Perioden mehr als zwei Wellen besitzen. Dadurch, dass bloss ein Stimmband periodische Schwingungen ausführt, das andere dagegen einfache, verändert sich die Art der Polyphonie nicht. Das wesentliche der Sache beruht in diesen Fällen auf der Stärke des tiefsten Tones der Polyphonien: er wird stärker sein, wenn beide Stimmbänder periodische Schwingungen ausführen, dagegen schwächer, wenn dies nur bei einem Band der Fall ist, weil er im ersten Fall von den Perioden beider Stimmbänder, im zweiten Falle jedoch von den Perioden eines Stimmbandes erzeugt wird.

Die weiter oben gebrachten Muster von periodischen Schwingungen mit einer periodischen Curve sind von verschiedenen Schwingungstypen gebildet: die beiden ersten werden durch den synchronischen Typus, das dritte Muster vom alternirenden gebildet.

Die Figuren 17, 18, 19 stellen Beispiele von graphischen Darstellungen des Zweiklangs in der Octave dar, wobei beide Stimmbänder periodische Schwingungen ausgeführt haben.

Fig. 17. Doppelton = gg' ; $\angle = 160^\circ$.

Fig. 18. Doppelton = dd' ; $\angle = 160^\circ$.

Fig. 19. Doppelton = $h^b h^b$; $\angle = 160^\circ$.

Fassen wir diese graphischen Darstellungen näher ins Auge, so bemerken wir, dass in diesem Falle bei der Bildung des Zweiklangs die Stimmbänder synchronisch geschwungen haben, weil hier bei beiden Stimmbändern alle Wellen gegeneinander symmetrisch gelagert sind. Hinsichtlich der Wellenamplitude aber ist hier eine Alternation bemerkbar: gegenüber der hohen Welle des einen Stimmbandes liegt immer die niedrige des anderen und umgekehrt. In Folge dessen haben auch die Perioden beider Stimmbänder selbst ein umgekehrtes Aussehen: bei dem einen Band sind die Partialwellen auf der aufsteigenden Linie der Hauptwelle gelagert, bei dem anderen auf der absteigenden, so dass also die Perioden des einen Stimmbandes mit einer grossen Welle, die entsprechenden Perioden aber des anderen Stimmbandes mit einer kleinen Welle anfangen. Diese Construction und Lagerung der Perioden hängt davon ab, dass während der Dauer einer Periode die Stimmbänder nacheinander Schwingungen von einer verschiedenen Amplitude ausführen: in der ersten Hälfte der Periode voll-

führt ein Stimmband eine starke Schwingung, das andere eine schwache, in der zweiten Hälfte ist das umgekehrte der Fall. Es ist augenscheinlich, dass der Luftdruck auf beide Stimmbänder kein gleicher ist: in der ersten Hälfte der Periode stösst die Luft stärker gegen das eine Stimmband, in der zweiten Hälfte stärker gegen das andere. Diese alternirenden Luftstösse gegen die Stimmbänder sind auch der Grund der Periodicität ihrer Schwingungen. Dies ist um so mehr wahrscheinlich, als die umgekehrte Lagerung der Perioden eine allgemeine Eigenschaft eines jeden Paares periodischer Curven bildet, wie sie auch gebildet sein mögen. Wodurch diese alternirende Thätigkeit des Luftstromes bedingt wird, ist schwierig zu erklären. Aller Wahrscheinlichkeit nach ist sowohl bei den periodischen wie auch bei den einfachen alternirenden Schwingungen die Ursache der alternirenden Wirkung des Luftstroms auf die Stimmbänder dieselbe — nämlich der ungleiche Spannungsgrad der Bänder.

Gehen wir nun zu dem Dreiklang über. Schon oben bemerkte ich, dass abhängige periodische Schwingungen (d.h. solche, welche in ihren Perioden eine gleiche Anzahl von Wellen enthalten) nur eine Art von Dreiklang geben, — den Quintenaccord. Die periodischen Schwingungen, welche diesen Typus des Dreiklangs erzeugen, enthalten in ihren Perioden drei Wellen: zwei grosse und eine kleine. In dem Grössenunterschied der Partialwellen ist auch die Ursache zu suchen, dass man dieselben als drei Wellen empfindet. Die Hauptwelle, welche die Periode bildet, erzeugt die Octave des Grundtons (1), die beiden grossen Partialwellen erzeugen den Grundton (2) und alle drei Partialwellen die Quinte des Grundtons (3). Gegenwärtig besitze ich keine guten Abbildungen von diesem Entstehungsmodus des Dreiklangs. Doch dürfte zu seinem Verständniss die auf Fig. 15 und 16 gebrachten Beispiele des Zweiklangs beitragen, welche, um mich so auszudrücken, den Keim dieses Modus enthalten. Auf diesen Abbildungen folgt in den Perioden beider Stimmbänder nach zwei gut entwickelten Wellen, noch eine sehr kleine dritte, — der Keim der Quinte. Ist diese dritte Welle sehr schwach entwickelt, so hört man in solchen Fällen gewöhnlich einen Zweiklang in der Octave, ist sie grösser, so gesellt sich zu den beiden Tönen noch ein dritter — die Quinte des Grundtones. Dabei muss bemerkt werden, dass bei diesem Entstehungsmodus des Dreiklangs die

Quinte immer bedeutend schwächer zu sein pflegt, wie die übrigen Töne.

Eine echte, d. h. vollkommen entwickelte Art des Dreiklanges entsteht durch unabhängige periodische Schwingungen, deren Perioden eine ungleiche Wellenanzahl enthalten. Wie schon oben gesagt bilden die unabhängigen, periodischen Schwingungen zwei Arten des Dreiklanges: den Quinten- und den Quartaccord. Betrachten wir zuerst die Abbildungen des Quintenaccords.

Fig. 20. Dreiklang — dd'a'; $\angle = 130^\circ$.

Fig. 21. Dreiklang = ee'h'; $\angle = 130^\circ$.

Fig. 22. Dreiklang = ee'h'; $\angle = D$.

In jeder der gebrachten Abbildungen vollführen beide Stimmbänder periodische Schwingungen mit gleichen Perioden, aber ein Stimmband macht während der Dauer einer Periode zwei Schwingungen, das andere drei. Das Stimmband, welches im Verlauf einer Periode zwei Schwingungen ausgeführt hat, giebt den Grundton (2) an, dasjenige welches drei Schwingungen ausgeführt hat, erzeugt die obere Quinte des Grundtones und die Perioden beider Stimmbänder geben den tiefsten Ton des Accords (1), welcher die Octave des Grundtones bilden wird (1:2) und die untere Duodecime der Quinte (1:3). In den beiden ersten Abbildungen sind die Perioden sehr scharf ausgebildet; desshalb ist auch der von ihnen gebildete Ton (die Octave) sehr laut. Ebenso laut ist auch

der Grundton, weil sich in den Perioden des einen Stimmbandes je zwei gut entwickelte Wellen befinden, während in den Perioden des anderen Stimmbandes je drei ungleichmässig entwickelte Wellen eingeschlossen sind; die dritte Welle, von deren Hinzu- kommen die Bildung der Quinte abhängt, ist schwächer ausgebildet; und deshalb ist auch in beiden Fällen die Quinte schwächer hörbar. Die dritte Curve (Fig. 22) gab einen vollkommen gleichmässigen und tadellosen harmonischen Accord, weil hier sowohl die Perioden, wie auch die Partialwellen gleich gut entwickelt sind.

Betrachten wir nun die Abbildungen des Quartanaccords $= 1:3:4$.

Fig. 23. Dreiklang $= Ae'a'$; $\angle = D$.

Fig. 24. Dreiklang $= Ae'a'$; $\angle = D$.

Fig. 25. Dreiklang $= Hb'f'hb'$; $\angle = D$.

Die oben gebrachten Abbildungen des Quartaccords zeigen, dass bei seiner Bildung das eine der Stimmbänder im Verlauf einer Periode drei Schwingungen ausgeführt hat, das andere aber vier. Folglich erzeugte der erste den Grundton (3), der zweite aber dessen obere Quarte (4); die Perioden beider Bänder aber erzeugten die tiefste Note des Accords (1), welche, mit Bezugnahme auf den Grundton, dessen untere Duodecime bilden wird (1:3), dagegen die zweite untere Octave der Quarte (1:4).

Es ist hinsichtlich des Quartanaccords zu bemerken, dass

seine Darstellung eine bedeutend schwierigere ist, wie die des Quintenaccords oder die des Zweiklangs in der Octave: die Stimmbänder halten die Stimmung schlecht und vollführen häufig fehlerhafte Schwingungen. Desshalb ist dieser Accord selten wohlklingend. Von den gegebenen Beispielen repräsentiren nur die beiden ersten (Fig. 23 und 24) ziemlich wohlklingende Accorde, da hier die Stimmbänder fehlerlose periodische Schwingungen ausgeführt haben. Dagegen repräsentirt die dritte Abbildung einen weniger angenehm klingenden Accord, weil hier die Stimmbänder fehlerhafte Schwingungen ausgeführt haben. Die Fehler bestanden darin, dass je nach 4—5 regelrecht gebildeten, d. h. Quartenperioden, eine unregelmässige, d. h. Quintenperiode folgte, wobei ein Stimmband zwei Schwingungen ausführte (statt drei). Das andere Stimmband dagegen drei (anstatt vier). Durch solche Fehler klingen alle Töne des Accords unrein, besonders aber leidet die tiefste Note des Accords darunter, so dass man sie manchmal nur mit Mühe bestimmen kann. Dadurch, dass die Perioden beim Quartenaccord gewöhnlich schwach ausgeprägt sind, werden die Schwierigkeiten noch grösser. Desshalb pflegt auch der von den Perioden gebildete tiefste Ton schwach zu sein. Es muss überhaupt bemerkt werden, dass der Quartenaccord in acustischer Hinsicht auf der Grenze steht zwischen musikalischer Polyphonie und der Heiserkeit.

Nachdem wir kennen gelernt, dass die periodischen Schwingungen gleich den einfachen abhängige und unabhängige, alternirende und synchrone sind, so lag der Gedanke nahe, dass ihre Aehnlichkeit mit den einfachen sich noch weiter erstreckt und dass unter ihnen auch ganze, partielle und gemischte Formen vorkommen. In Wirklichkeit trifft man auch alle diese Formen bei den periodischen Schwingungen an: durch die partiellen und totalen Schwingungen entstehen vorzugsweise die Zweiklänge, durch die gemischten Formen nur die Dreiklänge. Von der Richtigkeit des Gesagten können wir uns am besten überzeugen, wenn wir die oben beschriebene Methode mit den Streifen anwenden.

Bei den ganzen periodischen Schwingungen, welche den Zweiklang in der Octave bilden, hat der Querdurchschnitt des Schattens der schwingenden Bänder gleichfalls die Gestalt eines Dreiecks, jedoch keines einfachen, sondern eines getheilten. Dabei kann die Theilung des Dreiecks eine vollständige sein, oder auch

nicht: im ersten Fall theilen sich beide Seiten des Dreiecks, im zweiten nur eine — die obere oder die untere (s. Fig. 26).

Fig. 26.

Ein nicht vollkommen getheiltes Dreieck geben solche periodische Schwingungen, bei welchen die Gipfelpunkte der in der Periode enthaltenen Partialwellen in gleicher (oder fast gleicher) Höhe liegen (s. Fig. 27), ein vollkommen getheiltes Dreieck solche, bei welchen die Gipfel der Wellen in verschiedener Höhe liegen (s. Fig. 28).

Schon höher oben war gesagt, dass jede Linie der den Querschnitt des Schattens der schwingenden Bänder darstellenden optischen Figur einem Stillstand der Bänder während der Schwingungszeit entspricht. Bei einfachen Schwingungen machen die Stimmbänder im Verlauf einer Schwin-

Fig. 27.

Fig. 28.

gung nur zweimal Halt, einmal auf dem Gipfel der Welle, das zweite mal im Thal derselben, die optische Figur wird also zwei Linien haben. Bei periodischen Schwingungen hingegen wird die Anzahl der Haltepunkte der Bänder im Verlauf einer Periode um das Doppelte grösser sein, wie die in der Periode enthaltene Anzahl der Wellen. Folglich müssen bei periodischen Schwingungen, welche einen Zweiklang erzeugen, die Stimmbänder im Verlauf einer Periode viermal anhalten, weil ihre Perioden je zwei Wellen enthalten. Doch liegen manchmal zwei von diesen vier Haltepunkten auf gleicher Höhe, und dann fließen die ihnen entsprechenden Linien in eine zusammen. Dann besteht die optische Figur aus drei Linien, wie das auf Fig. 27 dargestellt ist. Befinden sich jedoch alle Haltepunkte auf verschiedener Höhe, so be-

sitzt die optische Figur vier Linien, wie dies auf Fig. 28 zu sehen ist.

Dass diese beiden verschiedenen Formen des optischen Durchschnits den Unterschied in der Form der periodischen Welle ausdrücken, davon kann man sich leicht in jedem einzelnen Fall durch einen Vergleich des optischen Bildes mit den graphischen Darstellungen der Stimmbänder überzeugen.

Man bekommt totale periodische Schwingungen, welche einen Zweiklang erzeugen, gewöhnlich bei horizontal aufgezogenen Bändern.

Von den Partialschwingungen begegnen wir bei den periodischen Schwingungen nur den alternirenden oder den Falsettschwingungen. Bei diesen periodischen Schwingungen hat der Querdurchmesser des Schattens der schwingenden Bänder dieselbe Gestalt, wie auch bei den einfachen Partialschwingungen, doch ist die Figur nicht einfach, sondern getheilt. Die Theilung der optischen Figur kann auch hier eine vollständige (siehe Fig. 29) oder eine unvollständige sein (siehe Fig. 30).

Fig. 29.

Fig. 30.

Fig. 31.

Fig. 32.

Eine unvollständige Theilung der optischen Figur beobachtet man bei diesen periodischen Schwingungen unter denselben Umständen, wie auch bei den ganzen Schwingungen, d. h. wenn die Wellenberge der in der Periode eingeschlossenen Partialwellen auf derselben Höhe liegen (Fig. 31), eine unvollständige Theilung dagegen, sobald sie verschieden hoch gelegen sind (Fig. 32). Auf diese Weise können sowohl die ganzen wie die partiellen periodischen Schwingungen eine gleiche Form der Periode geben.

Die periodischen ab-

hängigen Schwingungen, welche den Dreiklang erzeugen, unterscheiden sich optisch nicht von den oben beschriebenen periodischen Schwingungen (die einen Zweiklang ergeben), weil die dritte Welle in den Perioden dieser Schwingungen nur sehr schwach ausgebildet zu sein pflegt und sich optisch gar nicht markirt.

Hingegen unterscheiden sich die unabhängigen periodischen Schwingungen, welche einen Dreiklang erzeugen, scharf von allen von uns bisher betrachteten Formen von periodischen Schwingungen. Wir bringen hier nur optische Figuren vom Quintenaccord. Bei der Bildung dieses Accordes hat eins der Stimmbänder, welches im Verlauf einer Periode zwei Schwingungen macht (d. h. also den Grundton angiebt), ganze Schwingungen voll-

Fig. 33.

Fig. 34.

Fig. 35.

führt (s. die linke Hälfte der Fig. 33 u. 34); das Stimmband jedoch, welches 3 Schwingungen im Verlauf einer Periode machte (d. h. die Quinte des Grundtons) hat nur Falsettschwingungen oder gemischte Schwingungen ausgeführt (siehe die rechte Hälfte derselben Figuren). Die gegenseitigen Beziehungen zwischen der optischen Figur des Stimmbandes, welches während einer Periode 3 Schwingungen ausgeführt hat, und die Form der optischen Welle zeigt Fig. 35.

Zum Schluss noch einige Worte über einen praktischen Modus zur Darstellung periodischer Schwingungen. Um dieselben zu erhalten, muss man folgendermaassen verfahren: man nimmt einen Kehlkopf, welcher einen einfachen Ton durch alternirende Schwingungen erzeugt, und nähert die Ränder der Stimmbänder so weit, bis der synchronische Schwingungstypus zu Stande kommt. Um die Ränder der Stimmbänder einander zu nähern, muss man die peripheren Theile derselben allmählich unter den Klammern hervorziehen.

Hat man den synchronischen Schwingungstypus zu Stande gebracht, so entfernt man sehr vorsichtig die Bänder von einander so lange, bis man eine Polyphonie erhält. Allem Anschein nach nimmt die Stimmung, welche zur Erzeugung periodischer Schwingungen nothwendig ist, die Mitte ein zwischen derjenigen, welche für alternirende, und der, welche für synchronische Schwingungen nöthig ist. Doch muss ich hierbei bemerken, dass die Membranen so empfindlich sind gegen eine Veränderung ihrer Spannung und so capriciös, dass der oben genannte Modus nicht immer zum Ziel führt und man manchmal die Stimmung versuchsweise herstellen muss. Ueberhaupt bedarf die Frage, von welchen Bedingungen die Bildung periodischer Schwingungen abhängt, noch der weiteren Untersuchungen.

Töne mit Obertönen. Zu den zusammengesetzten Schwingungen müssen wir auch die Schwingungen mit harmonischen Tönen oder Obertönen zählen. Weiter oben war gesagt, dass Kautschukmembranen gewöhnlich keine Obertöne geben; doch kann man auch unter gewissen Bedingungen Schwingungen mit harmonischen Tönen von Kautschukmembranen erhalten. Mir ist es bisher nur gelungen, mit dem Grundton den ersten harmonischen Ton zu bekommen, d. h. dessen obere Octave. Zu diesem Zweck muss man dünne Membranen auswählen, welche horizontal aufgespannt oder gegen einander nur schwach geneigt sind. Sie werden auf eine besondere Weise aufgespannt. Bei dieser Spannung muss man sich bemühen, den Rändern der Bänder eine bogenförmige Gestalt zu geben, damit, wenn man sie anbläst, sie sich nur in der Mitte berühren, dagegen an den Enden die Spalte offen bleibt. Bei einem solchen Verhalten der Bänder wird die Luft an den Enden leichter, in der Mitte dagegen schwieriger durchströmen. Unter solchen Umständen erfolgt sehr leicht ein alternirendes Ausströmen der Luft bald durch das eine Ende, bald durch das andere der Ritze. Dieses alternirende Ausströmen der Luft durch die beiden Enden der Stimmritze bildet die Hauptbedingung, von welcher die Theilung der Bänder der Länge nach in zwei, entgegengesetzte Schwingungen ausführende Abschnitte abhängt. Durch Veränderung der Construction kann man nach Belieben Obertonschwingungen entweder zusammen mit denen des Grundtons (mit den ganzen Schwingungen, welche den Grundton bilden) oder aber allein erhalten. Im letzteren Falle kann man

entweder beide Stimmbänder partielle Schwingungen ausführen lassen oder nur das eine. Beschäftigen wir uns zuerst mit der Bildung der Obertonschwingungen für sich.

Um die Obertonschwingungen allein zu erhalten, dürfen die Stimmbänder nur schwach angezogen sein und müssen sich, angeblasen, mit ihren Rändern in der Mitte vollkommen berühren. Befinden sich die Ränder beider aufgeblasenen Stimmbänder auf derselben Höhe, so theilen sich gewöhnlich beide Stimmbänder in zwei Abschnitte, welche entgegengesetzte Schwingungen ausführen, dagegen bleibt die Mitte der Bänder, da wo sich die Knotenlinie befindet, ohne Bewegung. Dabei vollführt jede Hälfte der Bänder entgegengesetzte Schwingungen, nicht nur in Bezug auf die andere Hälfte desselben Bandes, sondern auch in Bezug auf die gegenüberliegende Hälfte des andern Bandes. In diesem Falle giebt der Rand jedes Stimmbandes während der Schwingungszeit folgende optische Figur, welche auf der Zeichnung 36 abgebildet ist.

Fig. 36.

Der Ton, welcher bei einer gleichzeitigen Theilung beider Bänder in zwei Hälften entsteht, ist sehr stark und dem Ton einer Flöte oder dünnen Metallplatte ähnlich und immer um zwei Octaven höher wie der Grundton.

Befinden sich dagegen die Ränder der Stimmbänder nicht auf gleicher Höhe, so zerfällt bloß ein Stimmband in zwei Abschnitte, gewöhnlich das tiefer liegende, das andere Stimmband dagegen bleibt unbeweglich. Der Ton, welcher durch Partialschwingungen des einen Stimmbandes entsteht, ist schwächer als der im vorhergehenden Fall und gewöhnlich nur um eine Octave höher wie der Grundton. Indem er sich mit dem Grundton vereinigt, giebt er demselben einen stark metallischen Klang. Weshalb bei der Theilung beider Bänder der erzeugte Ton um zwei Octaven höher ist wie der Grundton, dagegen bei der Theilung des einen Bandes nur um eine Octave, darüber kann ich gegenwärtig keine befriedigende Aufklärung geben.

Um den Grundton mit dem Oberton zugleich zu erzeugen, muss man die Bänder, welche für die Obertonschwingungen bestimmt sind, in der Mitte leicht auseinander ziehen. Dabei kommt manchmal eine solche Lagerung zu Stande, bei welcher man durch eine Veränderung in der Intensität des Anblasens bald den Oberton allein, bald denselben zusammen mit dem Grundton erhalten kann. Kommt der Oberton allein zu Stande, so ist er entweder um zwei oder auch nur um eine Octave höher wie der Grundton, je nach dem ob beide Stimmbänder Obertonschwingungen ausführen, oder nur eines derselben.

Werden dagegen Oberton und Grundton gebildet, so ist ersterer immer nur um eine Octave höher. Die optische Analyse zeigt, dass der Oberton, welcher den Grundton begleitet, nur von einem Stimmband erzeugt wird. Figur 37 zeigt den Randschatten des Stimmbandes, welches den Grundton mit seinem ersten harmonischen Ton (d. h. mit seiner oberen Octave) erzeugt hat.

Fig. 37.

Diese optische Figur zeigt, dass das Stimmband nur dann Obertonschwingungen ausführt, sobald es nach unten schwingt; bei seiner Excursion nach oben vollführt es ganze Schwingungen. Das andere Stimmband vollführt nur ganze Schwingungen, desshalb hat die optische Figur seines Randes die Form einer einfachen Ellipse. Ob die Bildung des ersten harmonischen Tones neben dem Grundton immer so stattfindet, oder ob der eben beschriebene Entstehungsmodus nur einen speciellen Fall bildet, vermag ich nicht anzugeben, da ich erst vor Kurzem die Art und Weise kennen lernte, die Stimmbänder die Obertonschwingungen ausführen zu lassen; zur Entscheidung dieser Frage sind weitere Untersuchungen unumgänglich nothwendig.

Den zusammengesetzten Schwingungen stehen auch die Schwingungen nahe, welche entstehen, wenn sich die Stimmritze in Abschnitte theilt. Durch Stimmen kann man beide Bänder der Länge nach gleichzeitig nur in zwei gleiche Abschnitte zerlegen, welche in der Zeiteinheit dieselbe Anzahl von Schwingungen ausführen;

es ist aber unmöglich, durch Stimmen der Bänder die Stimmritze in ungleiche Abschnitte zu theilen, welche eine ungleiche Anzahl von Schwingungen ausführten. Eine solche Theilung gelingt nur mittelst eines Fadens. Da eine solche Theilung der Stimmritze in ungleiche Abschnitte sehr häufig an Menschen beobachtet worden ist, bei denen Polypen am Rande der Stimmbänder wuchsen, so bringe ich einige Daten über meine Versuche an künstlichen Stimmbändern über diesen Gegenstand.

An künstlichen Kehlköpfen kann man die Stimmritze durch einen in querer oder schiefer Richtung über die Bänder gelegten Faden in zwei Abschnitte theilen. Es eignen sich zu diesen Versuchen Kehlköpfe mit schwach zu einander geneigten und aus dünnen Membranen bestehenden Stimmbändern. Durch die Theilung der Stimmritze in zwei Abschnitte erhält man zwei gewissermaassen selbständig functionirende Kehlköpfe; jeder von den beiden Abschnitten der Stimmritze kann alle die Schwingungen ausführen, über welche die ganze Kehle verfügt. Deshalb können die von beiden Abschnitten der Stimmritze gleichzeitig ausgeführten Schwingungen sehr complicirt sein; doch ist gewöhnlich ein Zweiklang in den Grenzen einer Octave das Resultat ihrer gemeinschaftlichen Action, wie auch bei Menschen, bei welchen an den Rändern der Stimmbänder Polypen wachsen. Durch eine Theilung der Stimmspalte in zwei Abschnitte kann man alle Intervalle der Octave ohne Ausnahme erhalten. Ich habe Zweiklänge in der Octave, Septime, Sexte, Quinte, Quarte, Terz, Secunde im halbem Ton und endlich unison erhalten. Alle diese Töne sind höher wie der ursprüngliche Ton, welchen die ungetheilte Stimmritze erzeugte. Berührt man während der Phonation einen der Stimmritzenabschnitte mit dem Finger, so verschwindet einer von den Tönen des Zweiklangs. Durch abwechselndes Berühren des längeren oder kürzeren Abschnittes der Stimmritze können wir entweder den unteren oder den oberen Ton des Zweiklangs eliminiren.

Bei der Theilung der Stimmritze in zwei Abschnitte bemerken wir dieselbe Beziehung zu den Tönen, wie auch beim Theilen von Saiten. Theilt man z. B. die Stimmritze in zwei gleiche Abschnitte, so erhält man zwei unisone Töne, welche um eine Octave höher liegen, wie der ursprüngliche von der ungetheilten Spalte erzeugte Ton. Ist einer der Abschnitte zweimal so gross

wie der andere, so erhält man einen Zweiklang in der Octave. Verhalten sich die Abschnitte zu einander wie 3 : 5, so erhält man einen Zweiklang in der grossen Sexte; ist das Verhältniss = 2 : 3, so erhält man einen Zweiklang in der Quinte u. s. w.

Wir bringen nun in kurzen Worten die Resultate unserer Untersuchungen an künstlichen Stimmbändern.

1) Künstliche Stimmbänder können zwei Arten von Schwingungen ausführen: a) einfache und b) zusammengesetzte.

2) Die einfachen Schwingungen können abhängige und unabhängige sein. Bei den abhängigen einfachen Schwingungen führen beide Stimmbänder die gleiche Anzahl von Schwingungen aus und erzeugen einen einfachen Ton, bei den unabhängigen dagegen führen sie eine ungleiche Anzahl von Schwingungen aus und erzeugen einen doppelten Ton innerhalb der Grenze der Octave.

3) Bei den einfachen abhängigen Schwingungen lassen sich zwei Typen unterscheiden: a) der alternirende und b) der gleichzeitige (synchronische) Typus.

4) Beide Typen der einfachen abhängigen Schwingungen können von zweierlei Art sein: ganze und Partialschwingungen. Die alternirenden Schwingungen sind vorzugsweise ganze Schwingungen; in den seltenen Fällen der Bildung von Obertönen aber sind sie Partialschwingungen; dabei zerfallen die Stimmbänder der Länge nach in Abschnitte, welche einander entgegengesetzte Schwingungen ausführen. Die synchronischen Schwingungen hingegen sind vorzugsweise Partialschwingungen, wobei die Stimmbänder der Quere nach in Abschnitte zerfallen, welche einander entgegengesetzte Schwingungen ausführen. Seltener sind es im strengen Sinne ganze Schwingungen. Dabei muss bemerkt werden, dass sich eine scharfe Grenze zwischen Partial- und ganzen synchronischen Schwingungen nicht ziehen lässt, weil beide nur die Endglieder ein und derselben ununterbrochenen Reihe bilden.

5) Die Hauptrepräsentanten der zusammengesetzten Schwingungen sind die periodischen Schwingungen, welche besondere Formen von Polyphonie erzeugen: die Zahlenverhältnisse der Töne, welche diese Polyphonien bilden, müssen so sein, dass sich eine Eins darunter befindet.

6) Die periodischen Schwingungen zerfallen gleichfalls in abhängige und unabhängige Schwingungen. Die ersteren erzeugen

den Zweiklang und Dreiklang (schwach ausgeprägt), die letzteren nur den Dreiklang.

7) Unter den abhängigen periodischen Schwingungen begegnet man gleichfalls Schwingungen von alternirendem und synchronischem Typus; ausserdem können die Schwingungen von synchronischem Typus so wohl ganze wie Partialschwingungen sein.

8) Die unabhängigen periodischen Schwingungen repräsentiren eine gemischte oder aus ganzen und Partialschwingungen zusammengesetzte Form.

9) Zu den zusammengesetzten Schwingungen müssen auch diejenigen gezählt werden, welche von harmonischen Tönen begleitet werden; ebenso die Schwingungen, welche ihre Entstehung dem Zerfallen der Stimmritze in zwei Abtheilungen verdanken.

Betrachten wir nun die Schwingungen natürlicher Stimmbänder.

B. Untersuchungen an wirklichen Stimmbändern.

Es galt, durch diese Untersuchungen folgende Fragen zu entscheiden: 1) erzeugt die natürliche Kehle einen einfachen Ton, d. h. die normale Stimme durch dieselben zwei Schwingungstypen (den alternirenden und den synchronischen), wie auch die künstlichen Stimmbändern, oder nicht; 2) durch welche Schwingungen wird der Brustton gebildet und durch welche das Falsett; 3) kommen bei dem Menschen zusammengesetzte Schwingungen vor, und beobachtet man unter ihnen periodische Schwingungen. Beschäftigen wir uns zuerst mit der Untersuchung der beiden ersten Fragen.

1) Der einfache Ton: Brustton und Falsett.

a) Untersuchungen an todtten Kehlköpfen. Diese Untersuchungen wurden auf folgende Art angestellt: Der aus der Leiche ausgeschnittene Kehlkopf wurde nach der Methode J. Müller's¹⁾

1) Man nähert die Basen der Giesbeckenknorpel einander so weit, dass sie sich gegenseitig berühren; dann führt man eine gewöhnliche chirurgische Nadel durch sie hindurch und fixirt ihre genäherte Stellung durch Achter-touren von Zwirn um die Enden der Nadel. Die Seitentheile des Kehlkopfs

präparirt und auf einer Unterlage so befestigt, dass man ihn von beiden Seiten gut beobachten kann. Von den so präparirten Kehlköpfen suchte ich anfangs für die Untersuchungen nur solche aus, welche beim Hineinblasen von Luft selbständig singen konnten, d. h. ohne jegliche Hilfsmittel und welche ausserdem, jenachdem man die Stimmbänder anzog oder nachliess, den Ton in genügendem Maasse erhöhen und erniedrigen konnten. Doch bekommt man solche Kehlköpfe nicht häufig: Unter 10 Kehlköpfen, welche von dem Prosector A. N. Tarcnezki, welchem ich meinen aufrichtigen Dank ausdrücke, auf das sorgfältigste präparirt wurden, besaßen diese Eigenschaften nur zwei. Einer von ihnen hatte eine auffallend reine Stimme und besass dabei die Fähigkeit dieselbe innerhalb zweier Octaven zu verändern: Ohne Anziehen der Bänder gab der Kehlkopf die reine Bassnote D an, welche, so bald man den nachgebliebenen Rest des Schildknorpels zurückzog, bis auf C und noch etwas mehr herunterging; zog man dagegen die Stimmbänder an, so konnte man ganze zwei Octaven bis d' inclusive erzeugen. Dabei sang der Kehlkopf, von der untersten Note angefangen, ungefähr $1\frac{1}{2}$ Octaven im Brustton, die übrigen Noten im Falsett. Es stand also dieser Kehlkopf, sowohl was den Umfang der Stimme anbelangt, als auch seine sonstigen Eigenschaften, dem lebenden Kehlkopf ziemlich nahe. Der andere Kehlkopf erzeugte unter denselben Bedingungen neun Noten: zwei oder drei unreine Basstöne (Brusttöne) und nach einem ziemlich grossen Zwischenraum 5—6 Falsetttöne. Die Stimmbänder dieses Kehlkopfs waren ziemlich stark ödematös. Späterhin fand ich für diese Versuche auch solche Kehlköpfe vollkommen brauchbar, welche nur unter Anwendung gewisser Hilfsmittel sangen. So konnten z. B. einige Kehlköpfe nur wegen zu schwacher Spannung der peripheren Theile der Bänder nicht singen. In solchen Fällen brauchte man nur die peripheren Bändertheile leicht anzudrücken,

werden bis zum Niveau der wahren Stimmbänder weggesehritten und es wird nur der vordere Theil des Schildknorpels nachgelassen (in Form eines Dreiecks), an welchem die Stimmbänder befestigt sind. Durch diesen Theil des Schildknorpels wird unmittelbar oberhalb der Befestigung der Stimmbänder ein Faden durchgeführt, welcher zur Verstärkung und Verminderung der Spannung der Bänder dient. Zieht man den Knorpel nach vorn, so spannen sich die Bänder, zieht man ihn nach hinten, so geben die Bänder nach.

indem man die Spitzen einer geöffneten Pincette auf sie setzte (so, dass sich jedes von den Enden der Pincette auf den peripheren Theil eines der Stimmbänder stützte), und die Kehle sang vollkommen befriedigend.

Die Untersuchungen der Schwingungen der Stimmbänder an Kehlköpfen, welche nach dem oben erwähnten Modus dazu hergerichtet waren, mit Hilfe des Stroboscops, zeigten, dass die Stimmbänder nur einen Schwingungstypus ausführen, nämlich den synchronischen, sowohl bei der Bildung von Brusttönen wie auch bei der des Falsetts. Der ganze Unterschied liegt in beiden Fällen in den verschiedenen grossen Antheilen der Stimmbänder, welche schwingen. Bei der Bildung eines Brusttons schwingen die Stimmbänder mit ihrer ganzen Masse; bei der Bildung des Falsetts jedoch schwingen bei jenem Stimmband deutlich nur schmale Streifen, welche der Stimmritze anliegen und von den peripheren Theilen durch eine Knotenlinie getrennt sind, eine Bewegung aber der peripheren Theile ist kaum bemerkbar. In Folge der schwachen Bewegung der peripheren Theile der Stimmbänder hält es schwer, sich von der entgegengesetzten Bewegung der Theile, welche zu beiden Seiten der Knotenlinie liegen, zu überzeugen; die Anwendung der optischen Methode mit Streifen gelang mir in diesem Falle nicht. Die Knotenlinien sind auch für das einfache Auge bemerkbar. Sie haben ein helleres Aussehen, wie die zu ihren Seiten liegenden Theile (bei den ödematösen Stimmbändern sogar einen spiegelnden Glanz). Gewöhnlich ist an jedem Stimmband nur eine Linie sichtbar; eine Ausnahme machte in diesem Fall der ödematöse Kehlkopf: hier konnte man an jedem Stimmband bis zu drei Knotenlinien sehen, welche der Stimmritze parallel gelagert waren, in einer Entfernung von ungefähr zwei Millimeter von einander. Doch muss man die Bildung mehrerer Knotenlinien anstatt einer bei jedem Stimmband des ödematösen Kehlkopfs als eine Ausnahme ansehen, die nur dem genannten pathologischen Zustand des Kehlkopfs eigen ist, und welche man durch eine grössere Beweglichkeit des ödematösen Gewebes erklären kann, denn bei allen andern sowohl natürlichen (todten und lebenden), wie künstlichen Kehlköpfen habe ich bei der Bildung von Falsettönen nur eine Knotenlinie auf jedem Stimmband beobachtet. Ebenso habe ich nie eine Vermehrung der Knotenlinien bei einem Höherwerden eines Tones bemerkt. Eine Erhöhung und Ernie-

drigung des Tones beim Falsett erreicht man gleichfalls durch Anziehen oder Nachlassen der Bänder, ebenso wie bei dem Brustton, aber nicht durch eine Theilung der Stimmbänder mittelst Knotenlinien in eine grössere oder kleinere Anzahl von Abschnitten.

b) Untersuchungen am lebenden Menschen. Professor Oertel war der Erste, welcher das Stroboscop zur Untersuchung der Stimmbandschwingungen unmittelbar am lebenden Menschen anwendete¹⁾.

Ich habe diese Untersuchungen wiederholt; die Resultate meiner Untersuchungen stimmen einerseits im grossen und ganzen mit den von Oertel erhaltenen Resultaten überein. Die stroboscopischen Untersuchungen stellte ich zuerst bei Drummond'schem Lichte an, später versuchte ich letzteres mit dem concentrirten Licht einer starken Lampe zu vertauschen und fand, dass diese Beleuchtung für solche Beobachtungen vollkommen genügt. Ich muss dabei bemerken, dass stroboscopische Untersuchungen an lebenden Leuten keinerlei Schwierigkeiten bieten, sobald der Kranke einen hinreichenden Grad von Geduld besitzt. Gegenwärtig dürften durch die Einführung des Cocains in die Praxis diese Untersuchungen in jedem Fall ohne Schwierigkeiten anzustellen sein. Ich halte es daher für nicht überflüssig, die Methode, welche ich bei meinen Untersuchungen anwendete und welche ich für die leichteste und bequemste ansehe, in kurzen Worten zu beschreiben.

Fig. 38.

Hinter der starken Lampe A (Fig. 38) wurde der concave Spiegel B aufgestellt, vor die Lampe das grosse planconvexe Glas C. Die von dem Spiegel und der Linse aufgefangenen Lichtstrahlen fielen auf den Reflector D, hinter welchem das Stroboscop F so aufgestellt war, dass die Oeffnungen seines Kreises an der Oeffnung des Reflectors vorbeiliefen und dass man durch diese Oeffnungen den Rachen des Kranken E sehen konnte, welcher durch die vom Reflector zurückgeworfenen Strahlen beleuchtet wurde.

Ist alles in gehöriger Weise vorbereitet, so setzt sich der Beobachter hinter das Stroboscop, lässt den Uhrmechanismus spie-

1) Centralblatt f. d. med. Wissensch. 1878, No. 5 u. 6.

len, führt einen Kehlkopfspiegel in den Rachen des Kranken ein und lässt letzteren singen. Je nachdem die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe des Stroboscops wächst, fangen die Stimmbänder, welche Anfangs unbewegt scheinen, an zu zittern, dann zu vibriren und bewegen sich endlich langsam. Um einem weiteren Anwachsen der Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe des Stroboscops vorzubeugen, muss man deren Welle mit dem Zeigefinger der linken (freien) Hand leicht berühren. Indem man den Fingerdruck vermindert oder verstärkt, kann man der Scheibe eine bestimmte Geschwindigkeit mittheilen. Um die nöthige Geschwindigkeit der Scheibe rasch herzustellen, kann man auch den Kranken die Stimme erhöhen oder erniedrigen lassen. Letzteres gelingt am besten, wenn man den Kranken unison mit sich selbst singen lässt. Wendet man diese beiden Hilfsmittel zugleich an, so kann man die Schwingungen der Stimmbänder ununterbrochen und sehr lange beobachten.

Nach der eben beschriebenen Methode untersuchte ich die normale Stimme bei zwei Sängern (Tenor und Bariton) und zeigte sich hierbei, dass die Stimmbänder sowohl bei der Bildung von Brusttönen wie des Falsetts synchronische Schwingungen ausführen.

Bei der Bildung eines Brusttones schwingen beide Stimmbänder mit ihrer ganzen Masse synchronisch. Dabei ist die Grösse der Schwingungen eine ganz bedeutende. Ihr Aussehen ist ein etwas anderes als wie bei Falsettschwingungen: sie sehen bei Brusttonschwingungen dicker und breiter aus als wie bei Falsettschwingungen.

Bei den Falsettschwingungen erscheinen die Stimmbänder länger und schmaler, ihre Ränder aber dünner, als wie bei den Schwingungen der Brusttöne. Bei den Falsettschwingungen führen deutliche Schwingungen nur schmale Streifen aus, welche der Stimmritze anliegen und von den peripheren Theilen durch eine Knotenlinie getrennt sind, die der Stimmritze parallel läuft. Die peripheren Theile dagegen, welche hinter der Knotenlinie liegen, führen nur sehr schwache Bewegungen aus. Doch sind auch die Bewegungen der Ränder sehr schwach im Verhältniss zu denjenigen, welche die Stimmbänder bei der Bildung von Brusttönen ausführen. Bei allen meinen Untersuchungen über Falsettschwingungen habe ich nur eine Knotenlinie auf jedem Stimmband be-

obachtet. Es war mir hier ebenso wenig möglich, mich von den entgegengesetzten Bewegungen der Theile, welche zu beiden Seiten der Knotenlinie liegen, zu überzeugen, wie bei den Untersuchungen an todtten Kehlköpfen, weil die Bewegungen der peripheren Theile auch hier sehr schwache waren und ihre bezügliche Lage für gute Beobachtungen noch weniger günstig war, als bei Beobachtungen an der Leiche. Es wird also die normale Stimme des Menschen durch synchronische Schwingungen gebildet. Die Bruststimme entsteht durch ganze Schwingungen der Bänder, das Falsett aber durch Schwingungen der Theile der Bänder, welche der Stimmritze anliegen.

Es liegt nicht in unserer Absicht, hier eine genaue Analyse des Mechanismus vorzunehmen, welche der Bildung von Bruststimme und Falsett zu Grunde liegt¹⁾, weil es das ausschliessliche Ziel unserer Untersuchungen war, den physikalischen Charakter der Schwingungen dieser Stimmregister zu bestimmen.

Wenn nun unter normalen Bedingungen die Bildung der Stimme bei dem Menschen durch synchronische Schwingungen vor sich geht, so ist doch die Frage interessant, ob nicht bisweilen abnorme Bedingungen vorkommen, bei welchen die Bänder während der Stimbildung den alternirenden Schwingungstypus ausführen. Eine bestimmte Antwort ist gegenwärtig auf diese Frage schwer zu geben, weil bisher nicht nur keine Untersuchungen in dieser Richtung angestellt worden sind, sondern auch die Existenz des alternirenden Schwingungstypus noch nicht bekannt war. Nach den Bedingungen zu urtheilen, unter welchen bei künstlichen Stimmbändern der alternirende Schwingungstypus vorkommt, kann man die mögliche Existenz dieses Typus beim Menschen bei den pathologischen Zuständen annehmen, welche eine Erschlaffung eines der Stimmbänder bedingen.

2) Die zusammengesetzten Schwingungen bei dem Menschen.

Zusammengesetzte Schwingungen der Stimmbänder kommen unzweifelhaft bei dem Menschen vor; nur die periodischen Schwingungen sollen uns hier beschäftigen.

1) Siehe die Arbeit Oertel's über diesen Gegenstand: Ueber den Mechanismus des Brust- und Falsettregisters, l. c.

Bei dem Menschen werden zwei Formen von Polyphonie beobachtet, welche durch periodische Schwingungen gebildet werden: der Zweiklang in der Octave und der Quintenaccord. Diese Arten der Polyphonie hört man bei leichtem Catarrh der Stimmbänder und sie entstehen gewöhnlich bei tiefen Tönen und geringer Anstrengung der Stimme (wenn „piano“ gesungen wird). Man kann sie auch mit normalen Stimmen erzeugen, namentlich nach dem Schlaf, wo die Stimmbänder saftreicher sind und ihr Zustand etwa dem catarrhalischen gleicht. Um bei normalen Stimmbändern diese Formen von Polyphonie zu erzeugen, muss man irgend einen bestimmten tiefen Ton singen und dabei die Stimme so wenig anstrengen, dass der Ton leicht heiser klingt. Anfangs kommt die Heiserkeit in Gestalt einzelner Stösse zu dem Tone hinzu, allmählich aber vereinigen sich diese Stösse zu einem reinen Ton, welcher um eine Octave tiefer als wie der ursprüngliche oder Grundton ist; auf diese Weise kommt es zu einem reinen musikalischen Zweiklang in der Octave. Verstärkt man die Stimme leicht, sobald dieser Zweiklang sich eingestellt hat, so kommt zu den beiden ursprünglichen Tönen noch als dritter die obere Quinte des Grundtons hinzu. Diese Quinte ist immer bedeutend schwächer wie die beiden übrigen Töne, so dass selbst erfahrene Sänger ihre Anwesenheit nur dann bemerken, wenn ihre Aufmerksamkeit auf dieselbe gelenkt wird. Bei catarrhalischen Zuständen erscheinen diese Polyphonien bisweilen unfreiwillig.

Ich habe die Schwingungen der Stimmbänder bei diesen Polyphonien mittelst des Stroboscops nur einmal untersucht; die Stimmbänder werden dabei gleichzeitig in allen ihren Theilen bewegt, wie auch bei der Bildung der normalen Stimme; ein Unterschied in der Amplitude zweier auf einander folgender Schwingungen war schwer zu bemerken. Es wurde auch dabei kein unvollständiger Verschluss der Stimmritze bemerkt: jede Schwingungsphase schloss allem Anscheine nach mit einem vollständigen Verschluss der Stimmritze.

Erinnern wir uns hierbei, dass a) die Entstehung dieser Polyphonien eng verknüpft ist mit dem Erscheinen der unteren Octave des Grundtons, und dass die Stimmbänder dabei den synchronischen Schwingungstypus ausführen, so müssen wir annehmen, dass die genannten beiden Polyphonieformen von abhängigen, periodischen Schwingungen gebildet werden. Das Erscheinen der

unteren Octave des Grundtones bei einer beliebigen Polyphonie ist nur dann möglich, wenn die Stimmbänder anfangen statt einfacher periodische Schwingungen auszuführen. Der synchronische Schwingungstypus aber, welcher bei diesen Polyphonien beobachtet wurde, weist darauf hin, dass diese Schwingungen abhängige und periodische sind, und dass sie alle Eigenthümlichkeiten jener periodischen Schwingungen besitzen, welche auf den Figuren 15, 16, 17, 18, 19 graphisch dargestellt sind.

Es erfolgt also bei dem menschlichen Kehlkopf, so weit unsere Kenntnisse bis jetzt reichen, die Bildung sowohl der einfachen, wie der periodischen Schwingungen nach dem gleichzeitigen (synchronischen) Schwingungstypus. Ob auch in gewissen Fällen der alternirende Schwingungstypus zur Anwendung kommt, müssen weitere Forschungen darthun. Vielleicht dass mit der Vervollkommenung unsrer Untersuchungsmethoden viele Erscheinungen, welche von uns an künstlichen Kehlköpfen bemerkt worden, künftig auch an natürlichen, wenn auch nicht unter normalen Bedingungen, so doch bei pathologischen Zuständen gefunden werden.

(Aus dem Institut für Pharmakologie und physiologische Chemie zu Rostock.)

Die Ausscheidung des Schwefels im Harn.

Von

Dr. A. Heffter,

Assistent.

Die Umsetzung des im Nahrungseiweiss dem Organismus zugeführten Schwefels ist schon seit einigen Jahrzehnten der Gegenstand von Forschungen gewesen. Dass Schwefel in Form von Schwefelsäure im Harn ausgeschieden wird, ist eine längst bekannte Thatsache, aber schon 1860 fanden Voit und Bischoff¹⁾, dass

1) Die Gesetze der Ernährung des Fleischfressers. Leipzig und Heidelberg 1860.