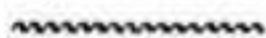


Ueber die Grundlehren der Akustik.

Von
H^{rn}. F I S C H E R.



[Gelesen in der Akademie der Wissenschaften am 17. und 24. Juny, und 15. July 1824.]

Einleitung.

Wenn die Theorie der Akustik in der vollkommensten Strenge ausgeführt werden soll, so kann dieses nur durch Hülfe der höhern Mechanik geschehen: denn die Oscillationen durch welche der Schall entsteht, sind eine der allerfeinsten und verwickeltesten Arten von Bewegungen, wobei die bewegten Punkte der Materie ihren Ort nur unermesslich wenig verändern, diese Bewegungen selbst aber von Stelle zu Stelle in dem Innern der Materie fortschreiten, und sich daselbst auf die mannigfaltigste Art durchkreuzen, verbinden und trennen. Wie schwierig diese Theorie sei, geht schon daraus hervor, dafs die grössten Analytiker des verflossenen Jahrhunderts mit eifersüchtiger Anstrengung versucht haben, die wichtigsten Probleme aufzulösen, und man dennoch nicht sagen kann, dafs es ihnen gelungen sei, uns eine vollendete Grundlage der Theorie zu geben.

Newton, der zu allen Untersuchungen der höheren Bewegungslehre den ersten festen Grund gelegt hat, untersuchte zuerst die Oscillationen der Luft; Taylor zunächst nach ihm, die einer gespannten Saite. Ihre Schlüsse und Rechnungen wurden mit grofser Strenge geprüft, von den beiden Bernoulli, Johann und Daniel, von L. Euler, von d'Alembert, von Lagrange und Andern, und dieses nicht ohne Eifersucht gegen die ersten Erfinder, und gegenseitig unter einander. Das Ergebnifs dieser Prüfungen war, dafs sich zwar gegen die Voraus-

setzungen, die Newton und Taylor gemacht hatten, gegründete Erinnerungen machen liefsen, dafs man aber ihren Hauptformeln durchaus keinen Fehler nachweisen konnte.

Diese Anstrengungen sind für die höhere Analysis und Mechanik eine Quelle sehr wichtiger Erweiterungen geworden. Die Akustik selbst aber hat dadurch nicht sowohl neue Ansichten, als gröfsere Bestimmtheit und Sicherheit in ihren Erklärungen gewonnen: denn diejenigen Eigenschaften der Oscillationen, von denen der Schall abhängt, waren schon vor der Rechnung, den Physikern unmittelbar aus Betrachtung der akustischen Erscheinungen bekannt.

Man wufste vor Newton und Taylor, dafs die Empfindung des Schalles durch Oscillationen der Luft entstehe, und dafs diese meistens durch Oscillationen fester Körper erregt werden; dafs die Luft in Blas-Instrumenten Longitudinal-Oscillationen mache; dafs alle diese Oscillationen vollkommen gleichzeitig, und ihre Schläge ungemein schnell seyn müssen, wenn die Empfindung eines Tones entstehen soll; und dafs die Höhe des Tones von der bestimmten Anzahl der Oscillations-Schläge in einer Sekunde abhängt. Man kannte ferner den Zusammenhang der musikalischen Intervalle mit der Schnelligkeit der Oscillationen, und Sauveur hatte schon vor Taylor auf eine sehr sinnreiche Art versucht, die Anzahl der Oscillationen, die ein Ton von bestimmter Höhe erfordert, durch Beobachtung zweier Orgelpfeifen, die beinahe denselben Ton gaben, zu bestimmen. In Rücksicht aller dieser Gegenstände gewann aber die Akustik durch die mathematische Theorie nicht neue Wahrheiten und vergröfserten Umfang, sondern nur gröfsere Bestimmtheit und Evidenz. Was sie durch die mathematische Theorie gewann, war hauptsächlich die bestimmte Kenntnifs der Gesetze, nach welchen die Höhe des Tones von der Gröfse und Masse und von der Spannung oder Elasticität der oscillirenden Theile abhängt. Die entscheidensten Untersuchungen verdanken wir dem Scharfsinn des trefflichen Lagrange, der so wie mehrere der genannten berühmten Männer, einst eine Zierde unserer Akademie war. Er zeigte in seinen höchst scharfsinnigen *Recherches sur la propagation du son* ⁽¹⁾, worin Newton,

(1) *Miscellanea Taurinensia*, Tom. I et II.

Taylor, und alle seine Vorgänger gefehlt hatten, und wie die Untersuchung anzugreifen sei, um nicht nur fehlerfreie Resultate zu erhalten, sondern auch allen Forderungen der strengsten Methode Genüge zu leisten.

Demohngeachtet kann man nicht sagen, daß Lagrange eine vollständige Theorie der Oscillationen geliefert habe. Noch ist mehr als ein Problem rückständig, dessen Auflösung man von den Fortschritten der Analysis und höhern Mechanik erwarten muß. Dahin gehört die Berechnung der Oscillationen ganzer Flächen, desgleichen die Theorie des Ueberganges der Oscillationen aus einer Materie in eine anderartige. In Ansehung dieses letztern Problems scheinen die genannten großen Männer noch gar nicht auf die Nothwendigkeit dieser Theorie aufmerksam geworden zu seyn, denn alle von Newton bis auf Lagrange, betrachten immer nur die Oscillationen in so fern sie in einem und demselben Mittel statt finden; erwähnen aber des Ueberganges aus einem Mittel in das andere, entweder gar nicht, oder so als ob derselbe gar keiner eigenen Theorie bedürfe. Wir werden aber sehen, daß man ohne eine genauere Kenntniß der Gesetze dieses Ueberganges von den meisten akustischen Erscheinungen gar keine befriedigende Erklärung geben könne ⁽¹⁾.

Die genannten Analytiker haben also in der höhern Mechanik noch eine große Lücke auszufüllen übrig gelassen; nämlich die Entwicklung der Gesetze nach welchen körperlich sich berührende Punkte bewegend auf einander wirken, wenn sie sich im Zustande einer gegenseitigen Spannung befinden. Die bekannten Gesetze des Anstoßes setzen eine solche Spannung nicht voraus; der Erfolg nach diesen Gesetzen kann also auch eigentlich nur dann vollkommen statt finden, wenn die sich berührenden Körper als frei, also in einem von aller widerstehenden Materie leeren Raum angenommen werden. Und

(1) Einige neuere Analytiker in England und Frankreich, besonders Fresnel und Poisson scheinen in der That die Theorie bedeutend weiter geführt zu haben; doch nicht in Beziehung auf den Schall, sondern auf das Licht. Aber die Verhältnisse des Verfassers haben ihm noch nicht erlaubt, sich mit diesen Arbeiten genau bekannt zu machen; welches indessen für die gegenwärtige Abhandlung nicht nothwendig schien, da diese mehr den Zweck hat zu zeigen, was die Beobachtung, als was die Rechnung über die Gesetze der Oscillationen lehre.

für diese Voraussetzung hat man in der That die Theorie der Bewegungen zu einem völlig befriedigenden Grad der Vollendung gebracht. Für die Bewegungen im Zustande der Spannung aber, sind die oben erwähnten scharfsinnigen Untersuchungen über die Oscillationen in gleichartigen Mitteln ein sehr schätzenswerther Anfang, aber in der That auch nur ein Anfang, der die Möglichkeit einer vollständigen Ausführung anschaulich macht, die aber in der That nichts weniger als leicht seyn dürfte. Nothwendig ist aber solche Ausführung: denn alle Bewegungen innerhalb des Raumes wo wir leben, geschehen zwischen körperlichen Theilen, die sich im Zustande einer gegenseitigen Spannung berühren. Und eben darin dürfte vielleicht der eigentliche Grund liegen, warum die geprüftesten Formeln der Mechanik dennoch oft so sonderbar von der Wirklichkeit abweichen, wie z. B. Newtons Formel für die Geschwindigkeit des Schalles.

Selbst die Idee einer allgemeinen Spannung, in welcher sich alle körperliche Punkte nicht nur im Innern der Körper, sondern auch in der Oberfläche, wo sich ungleichartige Materien berühren, befinden, (der Aggregatzustand beider sey wie man will), gehört zu den Ideen, die eine sehr feine Analyse aller Erscheinungen voraussetzen, und daher erst nach und nach zum deutlichen Bewußtseyn in dem menschlichen Vorstellungsvermögen gelangen können.

Hätte ich auch in den Jahren des kraftvollen männlichen Alters zu meinen Kräften das Vertrauen haben dürfen, die Auflösung so schwieriger Aufgaben zu versuchen, so war dieses doch unmöglich in den Verhältnissen nicht nur eines Schulmannes, sondern überhaupt eines anderweitig beschäftigten Gelehrten: denn Untersuchungen dieser Art erfordern nicht Wochen und Monate, sondern Jahre einer ungestörten wissenschaftlichen Muße.

Unausweichlich gezwungen, auf ein höheres Ziel, was mir vorschwebt, zu verzichten, habe ich mir ein näheres leichter erreichbares gewählt. Der vollständigen mathematischen Theorie eilt gewöhnlich eine empirische, d. i. unmittelbar aus den Erscheinungen abgeleitete voraus. Kepler entdeckte die Hauptgesetze, unter welchen die Bewegungen der Planeten stehen, durch eine sehr mühsame Entzifferung aus ihrem scheinbaren Lauf, ehe Newton diese Gesetze auf die ersten Grund-

begriffe von der Bewegung zurückführte. Eben so kannte man die Hauptgesetze der akustischen Oscillationen aus unmittelbarer Beachtung der Erscheinungen früher, als die genannten Analytiker ihre rationale Theorie erfanden. Ja man kann behaupten, daß den rein mathematischen Theorien physikalischer Erscheinungen allezeit eine bloß auf Erfahrungen beruhende vorausgehen müsse, wenn Mathematik und Physik Schritt halten, und in gleichem Grade zur Vollkommenheit reifen sollen. Es läßt sich erweisen, daß die wichtigsten Erweiterungen, welche die Mathematik, besonders in dem verflossenen Jahrhundert, in dem Gebiete der höhern Analysis und Mechanik erhalten hat, fast ohne Ausnahme veranlaßt sind durch Probleme, welche die Naturlehre aufstellte. Mathematische Theorien, die nicht diesen Ursprung haben, und welche nicht etwa bloß zur Vervollkommnung schon begründeter Theorien dienen, sondern als ganz neue und isolirte Erzeugnisse im Gebiete der Mathematik da stehen, haben als bloße Wahrheiten einen unbestrittenen Werth, aber wichtig und fruchtbar werden sie erst dann, wenn sich gleichsam zufällig, eine Art von Naturerscheinungen an sie anschließt. So war bisher die Theorie der regulären Körper eine rein mathematische Speculation, und hatte als Wahrheit ihren unbestrittenen Werth; aber durch die Entdeckungen, die neuerlich über die Structur der Krystalle gemacht worden, hat sie offenbar an Wichtigkeit und Fruchtbarkeit ungemein gewonnen. Je mehr aufzulösende Aufgaben also die Naturlehre der Mathematik vorlegt, desto mehr fruchtbare Erweiterungen der mathematischen Theorien darf man erwarten. Soll aber dieser Zweck sicher erreicht werden, so muß die Naturlehre ihren Aufgaben die größte Bestimmtheit zu geben suchen. Geschieht dieses nicht, so wird der Mathematiker mit allem Scharfsinn, den er anwendet, dennoch keine vollständigen und erschöpfenden Theorien zu Stande bringen. So fand Lagrange die Probleme der Akustik noch nicht vollständig von den Physikern aufgestellt, und um etwas bestimmtes zu erwähnen, so ist selbst jetzt noch der Begriff der Resonanz nicht scharf genug bestimmt: denn man schreibt der Resonanz Erscheinungen zu, die gar nichts mit ihr gemein haben. Es ist daher kein Wunder, daß Lagrange und noch weniger seine Vorgänger eine vollständige, d. i. auf alle Fälle anwendbare Theorie geben konnten. Es ergiebt sich hieraus sehr bestimmt, was

das Hauptgeschäft des Naturforschers sey, und seyn müsse. Er muß die Gesetze der Erscheinungen aus den Erscheinungen selbst so genau als möglich zu bestimmen suchen. Er kann dabei der Hülfe der Mathematik nicht entbehren; doch ist es mehr der Geist mathematischer Ordnung, Deutlichkeit und Genauigkeit, als die Kenntniß der höhern Rechnungen. Denn in der That sind gegenwärtig Mathematik und Physik so überaus weitläufig geworden, daß in einem Kopfe nicht Umfang genug für beide Wissenschaften ist, d. h. es ist eben so unmöglich, daß der Physiker ein vollendeter Mathematiker, als dieser ein vollendeter Physiker sey. Arbeitet aber der Physiker dem Mathematiker auf die angedeutete Art vor, so ist sichtbar, daß beide Wissenschaften gewinnen werden.

Ich habe versucht, dieses in Ansehung der Akustik zu leisten, indem ich theils für die Fälle, die schon als theoretisch feststehend anzusehen sind, theils für die, wo die Theorie noch mangelhaft ist, die Hauptsächlichsten und die Gesetze derselben, so fern sie empirisch erkennbar sind, auf deutliche Begriffe zu bringen gesucht habe. Hiemit ist der Zweck und Inhalt der gegenwärtigen Abhandlung ausgesprochen; wobei ich nur um gefällige Nachsicht bitten muß, wenn ich, um Deutlichkeit und Ueberzeugung zu bewirken, manches Bekannte nicht mit Stillschweigen übergehen kann, wobei ich mich indessen aller Kürze, welche nur der Zweck zuläßt, befleißigen werde.

Von Oscillationen überhaupt.

§. 1. Oscillationen nenne ich diejenige Art von pendelartigen Schwingungen oder Vibrationen, welche innerhalb so enger Grenzen, die ich die Oscillations-Weite nenne, geschehen, daß sie sich in den meisten Fällen der unmittelbaren Wahrnehmung entziehen, ja in manchen Fällen, im eigentlichsten Sinne des Wortes, unendlichklein seyn dürften. Da aber alle wissenschaftlichen Forschungen, wenn sie gründlich seyn sollen, von ganz bestimmten und möglichst deutlichen Grundbegriffen ausgehen müssen, so ist nothwendig, zuerst einiges Allgemeine über diejenigen Eigenschaften aller körperlichen Materien voraus zu schicken, wodurch Oscillationen möglich werden.

§. 2. Die Möglichkeit oscillirender Bewegungen beruhet darauf, daß alle Theile der uns umgebenden körperlichen Materie sich in dem Zustande einer gegenseitigen Spannung befinden, vermöge deren die relative Ruhe der Theile gegeneinander, nicht daher rührt, weil keine Kraft auf sie wirke, sondern daher, weil jeder Theil nach allen Seiten gezogen oder getrieben wird, durch Kräfte, die sich gegenseitig ins Gleichgewicht gesetzt haben. Eine solche Spannung findet nicht nur in dem Innern eines jeden gleichartigen Körpers ohne Ausnahme statt, sondern sie entsteht nothwendig auch bei der äußern Berührung ungleichartiger Materien, also mit einem Wort überall in der uns umgebenden Körperwelt. Man pflegt diese Spannung ziemlich allgemein Elasticität zu nennen; gegen welchen Ausdruck nichts zu sagen ist, wenn dadurch bloß die Thatsache einer allgemein vorhandenen Spannung bezeichnet werden soll. Als Benennung einer Kraft aber, die nach bestimmten allgemeinen Gesetzen wirke, ist die Benennung zu unbestimmt; denn es läßt sich leicht sichtbar machen, daß diese Spannung von mehreren unterschiedenen Kräften herrühre, und daß sich besonders die verschiedenen Aggregatzustände der Körper in dieser Rücksicht unläugbar und unzweideutig von einander unterscheiden.

§. 3. Bei luftförmigen Körpern liegen die Kräfte, welche eine Spannung aller Theile hervorbringen, am deutlichsten vor Augen. Sie ist die Folge einerseits von der Expansivkraft der Luft, andererseits aber von einem bloßen äußern Drucke; im Freien von dem Gewicht der überstehenden Luft; in geschlossenen Gefäßen, von der Cohäsionskraft der sperrenden Wände. Dieser äußere Druck ist gewöhnlich von einer beständigen Größe; die Gesetze der Expansivkraft aber sind hinlänglich bekannt. Sie verhält sich bei gleicher Temperatur wie die Dichtigkeit, und bei gleicher Dichtigkeit wie die Temperatur nach dem Luft-Thermometer.

§. 4. Bei tropfbaren Körpern ist schon das Spiel der thätigen Kräfte nicht so einfach; ja man muß bei ihnen eine doppelte Art der Spannung unterscheiden. Die eine hängt ab einerseits von der Schwere, deren Druck sich durch alle Theile der Flüssigkeit verbreitet, andererseits von dem Widerstand der unten und seitwärts sperrenden Wände. Sie besteht also eigentlich in nichts, als in dem hydrosta-

tischen Gleichgewicht. Von einer freien Expansivkraft zeigt sich bei tropfbaren Flüssigkeiten keine Spur.

Dagegen ist man genöthigt, bei jeder solcher Flüssigkeit noch das Daseyn einer eigenen Spannung anzuerkennen, die lediglich von dem Daseyn einer innern zwischen den Theilen herrschenden Attractiv- und Repulsivkraft herrührt, deren Gesetze eigentlich noch gar nicht untersucht sind, und vor der Hand nur nach Analogien anticipirt werden müssen. Wäre es auch nicht in neuern Zeiten durch Perkin's directe Versuche erwiesen, dafs Wasser durch mechanische Kraft ein wenig zusammengedrückt werde, und wenn der Druck nachläßt, wieder zu seiner ersten Dichtigkeit zurück kehre, so müßte man doch das Daseyn solcher Eigenschaft schon deswegen einräumen, weil man sonst gar keinen deutlichen Grund angeben könnte, warum sich jeder Druck durch eine Flüssigkeit, nicht blofs in der Richtung des Druckes, sondern nach allen Seiten in gleicher Stärke fortpflanze. Auch giebt es eine Menge anderer Erscheinungen, welche diese Voraussetzung zu machen nöthigen, und besonders würde man schwerlich ohne dieselbe die Entstehung akustischer Oscillationen im Wasser begreiflich machen können, deren Daseyn doch nicht bezweifelt werden kann.

§. 5. Elasticität oder Federkraft im engeren Sinne des Wortes findet nur bei festen Körpern statt, ist aber eine allgemeine Eigenschaft derselben. Feste Körper zeigen keine Spur von einer freien Expansivkraft oder Contractivkraft, noch von einer solchen Beweglichkeit der Theile, wie wir sie bei flüssigen Körpern finden, sondern im Gegentheil ein Bestreben, in einem gewissen Zustand zu beharren. Doch können durch Drücken, Ziehen, Beugen oder Drehen einzelne Theile ein wenig aus ihrer natürlichen Lage gebracht werden; aber alsdann zeigen die Theile jederzeit das Bestreben in ihren ersten Zustand zurückzukehren, sobald die störende Kraft nachläßt. Ist diese störende Kraft nur schwach, so geschieht die Wiederherstellung des ersten Zustandes vollständig. Ueberschreitet diese Kraft eine gewisse Gröfse, so zeigt sich zwar auch jetzt noch das Bestreben den ersten Zustand herzustellen, aber die Herstellung erfolgt unvollständig. Jenes nennt man die Wirkung einer vollkommenen, dieses einer unvollkommenen Elasticität. Beide finden bei jedem festen Körper statt, nur sind die

Gränzen beider sehr verschieden, und bei Körpern die man gewöhnlich unelastisch nennt, sind sie sehr enge. Man würde sich aber von der Elasticität harter Körper eine unrichtige Vorstellung machen, wenn man annehmen wollte, daß ihre Theile nur einem starken Druck nachgäben. Man ist vielmehr genöthigt anzunehmen, daß der leiseste Druck, an der berührten Stelle einige wiewohl unermesslich kleine Zusammendrückung hervorbringe.

§. 6. Die Elasticität gehört unstreitig zu den eigenthümlichen Wirkungen der Cohäsionskraft. Aber die Gesetze ihrer Wirkungen dürften wohl, wie ich glaube, Stoff zu manchen sehr wichtigen Untersuchungen geben. Doch hat sich aus einer Menge angestellter Versuche ein allgemeines Gesetz ergeben, welches in den Gränzen der vollkommenen Elasticität, entweder genau, oder mit einer großen Annäherung richtig ist. Es sei A Fig. 1. ein Punkt eines festen Körpers, und er sei durch Druck oder Zug, durch Beugen oder Drehen, aus der Stelle A in B gebracht. Hat die Kraft die Gränze der vollkommenen Elasticität nicht überschritten, so strebt der Punkt nach A zurück mit einer Kraft, welche der Entfernung BA proportional ist. So verhielt es sich wenigstens bei gespannten Saiten.

Aber die neuern Entdeckungen über die Structur der Krystalle deuten auf höchst merkwürdige Eigenthümlichkeiten der Cohäsionskraft, deren Gesetze aber vor jetzt noch in ein ziemlich tiefes Dunkel gehüllt sind, deren Enthüllung aber der höhern Mechanik ein ganz neues Feld eröffnen dürfte. Diese Entdeckungen setzen es nämlich ausser Zweifel, daß der Punkt A , er sei im Innern, oder an der Oberfläche eines festen Körpers, nicht in allen Richtungen mit gleicher Kraft gezogen wird, und ziehet. Daher wird er auch, wenn er aus A nach B getrieben ist, nicht in allen Fällen mit gleicher Kraft zurückgetrieben. Ob diese Kraft nun unter allen Umständen, wenn der Punkt von B nach A zurückkehrt, wie die Entfernung von A abnehme, ist wahrscheinlich, aber nicht unmittelbar deutlich, und würde erst nach den Grundsätzen der höhern Bewegungslehre auszumitteln seyn. Aber der Mathematiker wird sich immer nur auf Hypothesen stützen müssen, so lange sich der Naturforscher der Gesetze dieser Kräfte die nur in der Berührung wirken,

und in verschiedenen Richtungen ungleiche Spannung hervorbringen, noch nicht vollständig bemächtigt hat.

§. 7. Dadurch dafs die Gesetze der Expansivkraft der Luft, und der Elasticität gespannter Saiten hinlänglich bekannt sind, ist es möglich geworden, zwei Grundprobleme der Akustik, die Oscillationen der Luft und gespannter Saiten der Rechnung zu unterwerfen, und ihre Gesetze mit mathematischer Genauigkeit zu bestimmen.

Ich setze diese Theorie als bekannt voraus, und bemerke blofs zur Verständlichkeit alles folgenden, dafs wenn Oscillationen entstehen sollen, unmittelbar nicht der ganze Körper, sondern nur einzelne Theile desselben in Bewegung gesetzt werden müssen. Denn ein Stofs, der gegen einen Theil eines Körpers gerichtet ist, wirkt immer unmittelbar nur auf diesen Theil, und theilt sich erst nach und nach der übrigen Masse mit. Daher bewirkt nicht nur bei der Luft, sondern bei jedem Körper, ein Stofs, der irgend einen Theil um eine äufserst geringe Weite aus seiner natürlichen Lage bringt, allezeit eine Verdichtung der Masse an der Stelle wohin ein Punkt derselben getrieben wird, welche in jedem Fall dadurch in eine erhöhte Spannung versetzt wird, aus welcher das Bestreben entsteht, in die erste Stelle zurückzukehren.

§. 8. Es sei nun wieder A Fig. 1. ein aus seiner natürlichen Lage nach B , innerhalb der Grenzen der vollkommenen Elasticität verrückter Punkt, so sieht man leicht ein, dafs er mit zunehmender Geschwindigkeit, aber mit abnehmender Beschleunigung, nach A zurückkehren wird, (die Beschleunigung in jedem Punkte D sei dem Abstand von A proportional oder nicht). In A ist daher die Beschleunigung Null, die Geschwindigkeit aber ein Maximum. Daher kann er in A nicht stillstehen, und wäre seine Bewegung frei, so würde er bis C gehen (wenn $AC = AB$), und alsdann fortfahren zwischen B und C wie ein Pendel hin und her zu schlagen. Aber seine Bewegung ist nicht frei. Denn wegen des Zusammenhanges mit der übrigen Masse, kann er nicht oscilliren, ohne die ihn berührenden Theile mit fortzudrücken und zu ziehen. Soviel Bewegung er aber anderen Punkten mittheilt, eben soviel verliert er an seiner eigenen. Die zweite Hälfte des Weges den er durchläuft, ist also kürzer als die erste, und indem er von C

gegen *A* zurückschlägt, so wird er sich auf der ersten Seite noch weniger von *A* entfernen. Kurz, er wird in den allermeisten Fällen, nach sehr wenigen Oscillationen, wie man an jeder Claviersaite sieht, wieder zur Ruhe kommen, wofern nicht die bewegende Kraft, wie bei dem Streichen mit einem Bogen, immer fortwirkt.

§. 9. Es ist aber theoretisch erwiesen, und durch die Beobachtung vollkommen bestätigt, daß die Dauer einer Oscillation von der Größe der Oscillationsweite unabhängig ist, so daß alle Oscillationen desselben Punktes vollkommen gleichzeitig sind, er mag zwischen *B* und *C*, oder nur zwischen *D* und *E* oscilliren. Wenigstens verhält es sich so, wenn der oscillirende Punkt nicht über eine gewisse Gränze aus seiner natürlichen Lage herausgetrieben wird. Da ich als bekannt und ausgemacht voraussetze, daß die Höhe eines Tones lediglich von der Dauer seiner Oscillationen abhängt, so kann man sich auf die einfachste Art von der Gleichzeitigkeit der Oscillationen überzeugen, wenn man den Ton einer Saite oder einer Stimmgabel verklingen läßt, wo man nicht die allergeringste Veränderung in der Höhe des Tones wahrnehmen wird.

Unterschied zwischen ursprünglichen und mitgetheilten Oscillationen.

§. 10. Ursprünglich nenne ich eine Oscillation, wenn ein einzelner Punkt irgend eines Körpers durch einen äußern Druck oder Zug, in oscillirende Bewegung gesetzt wird. Mitgetheilt nenne ich sie, wenn ein ruhender Punkt durch unmittelbare Berührung eines schon oscillirenden, mit zu oscilliren genöthigt wird, wobei es weiter keinen Unterschied macht, ob der mittheilende Punkt ursprünglich, oder selbst schon durch Mittheilung oscillirt.

Es ist nicht schwer einzusehen, daß mitgetheilte Oscillationen an sich keine andere Gesetze befolgen können, als ursprüngliche. Denn wenn ein Punkt deswegen oscillirt, weil ein anderer, der durch Berührung und Spannung mit ihm verbunden ist, oscillirt, so muß die Bewegung desselben genau in dem Maasse zu- und abnehmen, wie die des mittheilenden. Nur in der Vibrationsweite kann, wie wir in der Folge

sehen werden, zwar eine, aber nur im eigentlichsten Sinne unendlich kleine Veränderung vorgehen.

Demohngeachtet halte ich die schärfste Auffassung des Unterschiedes zwischen ursprünglichen und mitgetheilten Oscillationen für so wichtig, dafs man ohne dieselbe schwerlich zu deutlichen Begriffen und Erklärungen über akustische Erscheinungen gelangen wird. Denn wir werden uns in der Folge überzeugen, dafs die Dauer und die Gröfse der Oscillationen in einer sehr verschiedenen Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Mittels stehen, in welchem sie statt finden, je nachdem sie ursprünglich oder mitgetheilt sind.

Anmerkung. Dieser Unterschied ist bisher entweder ganz übersehen, oder nicht gehörig benutzt worden. Unser Chladni ist der einzige mir bekannte Akustiker, der ihn in seiner Akustik (§. 163. ff.) bestimmt ausspricht; nur nennt er eigenthümliche Oscillationen, was ich ursprüngliche nenne. Doch lassen sich aus der genaueren Beachtung dieses Unterschiedes weit mehr für die Theorie fruchtbare Folgerungen ableiten, als Chladni in seinem schätzbaren Werke abgeleitet hat. Die mathematischen Akustiker, selbst Lagrange, kennen diesen Unterschied gar nicht.

Ursprüngliche Oscillationen.

§. 11. Wenn Theile eines Körpers, auf die oben (§. 8.) beschriebene Art zu oscilliren genöthigt werden, so hängt die Dauer eines Schlages ganz und gar nicht von der Stärke des erregenden Anstosses ab, sondern lediglich von der Kraft, mit welcher die verschobenen Theile wieder in ihre natürliche Lage zurückgetrieben werden, also von der vorhandenen Spannung und von der Masse der verschobenen Theile. Der Grund ist leicht einzusehen. Ist der Punkt A durch äufsere Kraft aus A nach B getrieben, so kann er nicht eher anfangen zu oscilliren, als bis diese äufsere Kraft ihn frei läfst. Dann kann er lediglich derjenigen Kraft folgen, mit welcher ihn die vorhandene Spannung wieder nach A hintreibt.

Von der Stärke des Stosses hängt blofs die Gröfse der Oscillationsweite BC ab, durch welche aber die Dauer der Schläge, und die Höhe des Tons nicht geändert wird (§. 9.).

§. 12. Dieses Gesetz der ursprünglichen Oscillationen würde sich sehr vollständig empirisch erkennen lassen, wenn es nicht schon hinreichend durch die Mechanik begründet wäre.

In jedem Körper kann man unter gegebenen Umständen, nicht jeden beliebigen, sondern nur ganz bestimmte Töne hervorbringen. In manchen nur einen, in anderen mehrere, oder eine ganze Reihe, die aber sämmtlich nach bestimmten Verhältnissen von einander abhängen. Dieses ist vorzüglich der Gegenstand, über welchen unser Chladni durch seine sinnreiche Beobachtungsart so viel Licht verbreitet hat. Er hat nämlich gezeigt, dafs bei dem Oscilliren sich der Körper sehr häufig in mehrere Theile theilt, welche sämmtlich, jeder für sich, aber gleichzeitig, oscilliren. Je kleiner nun diese Theile sind, desto höher ist in der Regel der Ton; doch hat auch die Gestalt der oscillirenden Theile und ihr Zusammenhang mit dem Ganzen Einfluss darauf, weil dadurch die Kraft, mit welcher sie in ihrer natürlichen Lage erhalten werden, einige Aenderung erleiden kann. Von allen Tönen nun, die derselbe Körper geben kann, mufs einer der tiefste seyn, und diesen nenne ich den Grundton, die übrigen nenne ich Nebentöne. Bei dem Grundton ist es klar, dafs seine Höhe lediglich von der Beschaffenheit des oscillirenden Mittels abhängt, und zwar theils von der Spannung, theils von der Masse oder Dichtigkeit desselben: denn jede Veränderung in der materiellen Beschaffenheit, oder in der Gröfse des Körpers, ändert den Grundton, und da die Nebentöne nach bestimmten Gesetzen vom Grundton abhängen, so ist klar, dafs auch bei diesen die Dauer der Oscillationen ganz von der Beschaffenheit des Mittels, in welchem sie stattfinden, abhängt. Bekanntlich kann auch die in einer langen Röhre eingeschlossene Luftsäule sich nach der Länge in zwei, drei, vier und mehr gleiche Theile theilen, wodurch ausser dem Grundton in offenen Pfeifen eine Reihe von Tönen nach der harmonischen Scale hervorgebracht wird. In diesem Fall ist bei gleicher Spannung die oscillirende Masse verschieden; also die Dauer der Oscillation wieder von der Beschaffenheit des Mittels abhängig.

Gespannte Saiten haben das eigenthümliche, dafs aufser der ganzen Länge, auch die Hälfte oder ein Drittel u. s. w. oscilliren kann, also aufser dem Grundton noch ein oder ein Paar Nebentöne, aber

nur schwach, mitklingen können. Doch geschieht dieses nicht immer, und wenn der Ton durch Streichen mit dem Bogen erregt wird, wie es mir scheint, nie.

Uebrigens bemerke ich noch, dafs die Nebentöne für unsern Zweck kein besonderes Interesse weiter haben, und dafs zwischen ihnen und den Grundtönen, so fern man sie als ursprüngliche betrachten mufs, kein wesentlicher Unterschied statt findet.

Mitgetheilte Oscillationen.

§. 13. Der wichtigste Unterschied zwischen ursprünglichen und mitgetheilten Oscillationen liegt darin, dafs die Dauer einer mitgetheilten Oscillation, von der Spannung und Dichtigkeit, kurz von der Beschaffenheit des Mittels in welchem sie erregt wird, völlig unabhängig, und in jedem Fall der mittheilenden Oscillation gleichzeitig ist.

Der Grund dieses Gesetzes liegt nicht so tief, dafs er sich nicht auch ohne höhere Rechnung deutlich machen liefse. Man stelle sich eine Reihe körperlicher Punkte *A, B, C, D, E* u. s. w. vor, welche sämmtlich einander berühren, also unendlich nahe beisammen sind, so ist aus dem oben §. 2. ff. gezeigten klar, dafs sie sämmtlich sich in einem Zustand gegenseitiger Spannung befinden, vermöge deren jeder ein wenig aus seiner Stelle gedrängt werden kann, dann aber allezeit zu derselben wieder zurück zu kehren strebt, und zwar mit desto gröfserer Kraft, je weiter er aus seiner Stelle gedrängt worden. Es macht hierin keinen wesentlichen Unterschied, ob wir uns diese Punkte aus gleichartiger oder aus ungleichartiger Materie bestehend vorstellen wollen. Denn auch ungleichartige Materien, die sich berühren, befinden sich in einer solchen gegenseitigen Spannung, dafs jeder Punkt, der einen Materie, ein wenig nachgeben mufs, wenn er von einem berührenden Punkte der andern gedrückt wird (§. 5.).

Denken wir uns also die Punkte *B, C, D, E* u. s. w. als gleichartig, und in Ruhe, den Punkt *A* aber gleichartig oder anderartig, aber in Oscillation gesetzt, so ist klar, dafs der Punkt *B*, weil er sich von *A* wegen der vorhandenen Spannung nicht trennen kann, gezwungen ist,

nur schwach, mitklingen können. Doch geschieht dieses nicht immer, und wenn der Ton durch Streichen mit dem Bogen erregt wird, wie es mir scheint, nie.

Uebrigens bemerke ich noch, dafs die Nebentöne für unsern Zweck kein besonderes Interesse weiter haben, und dafs zwischen ihnen und den Grundtönen, so fern man sie als ursprüngliche betrachten mufs, kein wesentlicher Unterschied statt findet.

Mitgetheilte Oscillationen.

§. 13. Der wichtigste Unterschied zwischen ursprünglichen und mitgetheilten Oscillationen liegt darin, dafs die Dauer einer mitgetheilten Oscillation, von der Spannung und Dichtigkeit, kurz von der Beschaffenheit des Mittels in welchem sie erregt wird, völlig unabhängig, und in jedem Fall der mittheilenden Oscillation gleichzeitig ist.

Der Grund dieses Gesetzes liegt nicht so tief, dafs er sich nicht auch ohne höhere Rechnung deutlich machen liesse. Man stelle sich eine Reihe körperlicher Punkte *A, B, C, D, E* u. s. w. vor, welche sämmtlich einander berühren, also unendlich nahe beisammen sind, so ist aus dem oben §. 2. ff. gezeigten klar, dafs sie sämmtlich sich in einem Zustand gegenseitiger Spannung befinden, vermöge deren jeder ein wenig aus seiner Stelle gedrängt werden kann, dann aber allezeit zu derselben wieder zurück zu kehren strebt, und zwar mit desto gröfserer Kraft, je weiter er aus seiner Stelle gedrängt worden. Es macht hierin keinen wesentlichen Unterschied, ob wir uns diese Punkte aus gleichartiger oder aus ungleichartiger Materie bestehend vorstellen wollen. Denn auch ungleichartige Materien, die sich berühren, befinden sich in einer solchen gegenseitigen Spannung, dafs jeder Punkt, der einen Materie, ein wenig nachgeben mufs, wenn er von einem berührenden Punkte der andern gedrückt wird (§. 5.).

Denken wir uns also die Punkte *B, C, D, E* u. s. w. als gleichartig, und in Ruhe, den Punkt *A* aber gleichartig oder anderartig, aber in Oscillation gesetzt, so ist klar, dafs der Punkt *B*, weil er sich von *A* wegen der vorhandenen Spannung nicht trennen kann, gezwungen ist,

gerade so vorwärts zu gehen, wie *A* geht. Schlägt aber der Punkt *A* zurück, so muß ihm *B* eben so nachfolgen, also völlig wie *A*, und gleichzeitig mit demselben oscilliren. Was aber *A* auf *B* wirkt, eben das wird *B* auf *C*, *C* auf *D* u. s. f. wirken, und es ist daher klar, daß alle diese Punkte nach und nach gezwungen werden, gleichzeitig mit *A* zu oscilliren. Daraus folgt indessen nicht, daß die Oscillationsweiten der Punkte *C*, *D*, *E* u. s. w. eben so groß als bei dem Punkte *A* seyn werden. Denn die erste Wirkung, welche *A* gegen *B* ausübt, ist in jedem Fall eine Zusammendrückung der hinter *B* liegenden Theile. Hierdurch entsteht ein Widerstand, der selbst die Oscillationsweite von *A* kürzer macht, als sie außer der Berührung mit *B* im leeren Raume seyn würde, woraus eine allmälige Verkürzung der Oscillationsweiten, aber nicht eine Verkürzung ihrer Dauer entstehen muß. In der Folge wird sich Veranlassung finden, dieses noch genauer zu erörtern.

§. 14. Was wir im vorigen §. aus bloßen Begriffen zu erweisen gesucht haben, ergibt sich auf das unzweideutigste aus einer allgemeinen akustischen Erfahrung. Jedermann weiß, daß die Höhe eines Tones nicht die geringste Veränderung leidet, der Ton pflanze sich durch die Luft, auf einem kurzen oder langen Wege fort, er dringe durch dünne oder dicke Wände, oder überhaupt durch Körper von ganz beliebiger Beschaffenheit. Schwächer wird wohl der Ton durch die Fortpflanzung, aber seine Höhe verändert er nicht, also auch nicht die Dauer der Oscillationen.

§. 15. Wenn ich behaupte, daß eine mitgetheilte Oscillation in Ansehung der Dauer jedes Schlages von der Beschaffenheit des Mittels unabhängig ist, so wird damit nicht gesagt, daß sie in jeder Beziehung davon unabhängig sei. Es läßt sich in der That in mehr als einer Rücksicht eine Abhängigkeit nachweisen. Besonders gehört dahin die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Oscillationen von Punkt zu Punkt fortpflanzen, denn diese ist von der Geschwindigkeit, mit welcher die oscillirenden Punkte ihre kleine Bahn zurücklegen, völlig unabhängig, und ohne Vergleich größer als diese. Diese Geschwindigkeit der Fortpflanzung ist lediglich eine Function von der im fortpflan-

zenden Mittel herrschenden Spannung. Um dieses deutlich zu machen, ist zuerst einiges über die Geschwindigkeit des Schalles zu sagen.

Von der Geschwindigkeit des Schalles.

§. 16. Alle theoretische Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles ist unsicher, da Newton's Formel für diese Geschwindigkeit in der Luft, ob ihr gleich die allerstrengste Prüfung keinen Fehler hat nachweisen können, dennoch die absolute GröÙe bedeutend zu klein angiebt. Es ist aber für die wissenschaftliche Begründung des physikalischen Theiles der Akustik dasjenige, was aus Beobachtungen hierüber bekannt ist, völlig hinreichend. Am wichtigsten ist es, die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft zu kennen, da der Schall einem menschlichen Ohre äußerst selten durch ein anderes Mittel als die Luft mitgetheilt wird. Für unsern gegenwärtigen Zweck ist es hinreichend zu bemerken, daß die Geschwindigkeit des Schalles vollkommen gleichförmig ist, und daß sie mehr als 1000 Fufs in der Secunde beträgt. Was die Fortpflanzung durch feste Körper betrifft, so ist es zwar viel schwieriger, sie durch Versuche sicher zu bestimmen; indessen haben gelegentlich gemachte Beobachtungen gezeigt, daß sich der Schall durch feste Körper noch ungleich schneller als durch Luft fortpflanzt. So beobachtete Biot, bei einer gegen 3000 Fufs langen Wasserleitung, die aus zusammengefügtten Röhren von Gufseisen bestand, daß sich der Schall durch dieses Eisen mehr wie zehnmal so schnell als durch die Luft fortpflanzte. Andere Beobachter haben diese Geschwindigkeit durch Holz oder andere feste Körper so schnell gefunden, daß sich die Geschwindigkeit nicht schätzen liefs.

Diese Beobachtungen, verbunden mit der allgemeinen Erfahrung, daß hohe und tiefe Töne sich mit völlig gleicher Geschwindigkeit durch die Luft und durch alle Körper fortpflanzen, sind mehr als hinreichend, um die Unabhängigkeit der Fortpflanzungs-Geschwindigkeit von der Oscillations-Geschwindigkeit aufser allen Zweifel zu setzen.

Beide Arten von Geschwindigkeit lassen sich allgemein auf folgende Art vergleichen. Ein Ton mache in einer Secunde n Schläge, und sein kleiner Oscillationsraum, den er also in $\frac{1}{n}$ Secunde zurücklegt,

sey s . Die Geschwindigkeit des Schalles, also der Weg, den er in einer Secunde zurücklegt, sey c ; so legt er in $\frac{1}{n}$ Secunde den Weg $\frac{c}{n}$ zurück. Betrachtet man nun die Bewegung, mit welcher ein oscillirender Punkt seine Bahn durchläuft, als gleichförmig, (was bei einer so kleinen Gröfse verstattet ist), so verhalten sich die in gleichen Zeiten gemachten Wege, wie $s : \frac{c}{n}$. Man betrachte nun einen Ton, dessen Oscillationen ungemein schnell sind, z. B. das viermalgestrichene c , welches mehr als 4000 Oscillationen in einer Secunde macht. Man setze $s = 0,01$ Zoll, $n = 4000$, und $c = 12000$ Zoll, so verhält sich $s : \frac{c}{n} = 1 : 300$. Bei einem tiefen Ton wird das Verhältniß noch viel gröfser.

Da also die Geschwindigkeit der Fortpflanzung von der Oscillations-Geschwindigkeit unabhängig, und so weit die Beobachtungen und Untersuchungen reichen, in jedem Mittel anders ist, so folgt, dafs sie lediglich durch die Beschaffenheit des fortpflanzenden Mittels bestimmt ist.

§. 17. Um die Art, wie sich Oscillationen fortpflanzen, noch anschaulicher zu machen, betrachte man die Fortpflanzung eines Tones durch die Luft, und zwar für jetzt nur in einer einzigen geraden Linie AH Fig. 2.

Zwischen B und C oscillire ein Punkt (etwa einer gespannten Saite), der in einer Secunde n Schläge macht. Seine natürliche Stelle sei mitten zwischen B und C in A , und er sei aus derselben auf irgend eine Art bis B zurückgezogen, vor ihm liege aber in der Linie BH ruhende Luft. Es ist nun zu überlegen, was in der Luft geschehen wird, wenn man den Punkt in B losläfst?

Es ist klar, dafs er während der ganzen Bewegung von B bis C gegen die ihn unmittelbar berührende Luft drückt. Jeder Druck bringt aber einige, wenn auch noch so geringe Verdichtung hervor. Die unmittelbar durch den oscillirenden Punkt verdichtete Luft drückt aber nun eben so stätig gegen die ihr nächste, und diese gegen die weiter liegende u. s. w.; kurz, diese Verdichtung pflanzt sich auf der Linie BH schnell von Punkt zu Punkt fort. Die Geschwindigkeit, mit der die Verdichtung fortrückt, ist aber nichts anders als die Geschwindigkeit des Schalles, die wir, wie oben, c nennen. Nun legt der oscil-

oscillirende Punkt seine kleine Bahn $BC = s$ in $\frac{1}{n}$ Secunde zurück, der Schall aber legt in eben der Zeit den Weg $\frac{c}{n}$ zurück. Man nehme nun an, daß $CD = DE = EF = FG = GH$ u. s. w. dieser Größe $\frac{c}{n}$ gleich sei, so ist klar, daß in dem Augenblicke, wo der oscillirende Punkt die Gränze C erreicht, die erste Luftverdichtung, die er bei den Anfang seiner Bewegung in B hervorbrachte, bis D fortgerückt, die jenseits D liegende Luft aber noch in Ruhe und in ihrem natürlichen Zustand seyn wird. Hieraus ist nun aber klar, daß alle Luft, die vorher zwischen B und D ausgedehnt war, nun in dem Raum CD zusammengedrängt, also verdichtet seyn wird. Diese ganze Verdichtung entsteht also dadurch, daß jeder Punkt derjenigen Luft, die anfangs zwischen B und D enthalten war, eben so, wie der ursprünglich oscillirende Punkt selbst, eine sehr kurze Bewegung gegen D hin gemacht hat. Schlägt nun der oscillirende Punkt von C gegen B zurück, so folgt ihm die bei C befindliche Luft nach, d. h. die verdichtete Luft fängt bei C an, sich zu verdünnen, und diese Verdünnung schreitet eben so schnell, wie vorher die Verdichtung gegen D hin, fort. Da aber die Verdichtung fortfährt, bei D eben so schnell gegen E fortzuschreiten, so ändert sich die Länge der verdichteten Schicht nicht, sondern die Verdichtung, (nicht die verdichtete Luft), rückt nur mit der Geschwindigkeit des Schalles gegen E hin fort. Hat also der oscillirende Punkt wieder die Gränze B erreicht, so befindet sich die Luft-Verdichtung zwischen D und E ; dagegen ist die Luft zwischen D und C nun in einem verdünnten Zustand, und dieser entsteht dadurch, daß jedes anfangs zwischen C und D befindliche Lufttheilchen eine kleine Bewegung gegen B hin gemacht hat.

Man sieht leicht, wie diese Betrachtung weiter fortzusetzen ist. Schlägt der oscillirende Punkt zum zweitenmal von B nach C , so geht die erste Luft-Verdichtung in EF , und die erste Verdünnung in DE über. Bei dem zweiten Rückschlag kommt die erste Verdichtung in FG , die erste Verdünnung in EF , die zweite Verdichtung in DE , und eine dritte Verdünnung in CD u. s. f.

Es müssen also längs der ganzen Linie BH lauter abwechselnde Schichten von verdichteter und verdünnter Luft entstehen, und dieses wenigstens so weit, als der durch den oscillirenden Punkt erregte

Schall hörbar ist. In jeder Verdichtung oscilliren die Punkte der Luft vorwärts, in jeder Verdünnung rückwärts. Die Länge der Verdichtungen oder Verdünnungen ist $\frac{c}{n}$; also, da c eine beständige Gröfse ist, blofs eine Function von n , d. i. von der Anzahl der Schläge, die der Ton in einer Secunde macht; also von der Zeit oder Dauer einer Oscillation, aber ganz und gar nicht von der Oscillationsweite BC . In eben dem Maafse aber, in welchem BC gröfser oder kleiner ist, sind auch die Räume, innerhalb deren jedes Luft-Theilchen oscilliret, gröfser oder kleiner. Doch werden wir in der Folge sehen, dafs die Oscillationsweiten der Luft-Theilchen nach einem bestimmten Gesetz, mit der Entfernung von den ursprünglichen Oscillationen kürzer werden müssen.

Von der Verbreitung des Schalles in der Luft.

§. 18. Wir haben im vorhergehenden gesehen, wie sich die Oscillationen in einer einzigen geraden Linie fortpflanzen; jetzt ist zu untersuchen, ob, und auf welche Art sie sich von einem einzigen Punkte aus seitwärts verbreiten.

In C Fig. 3 befinde sich ein körperlicher Punkt, der zwischen den Gränzen A und B ursprünglich oscilliret. Wir haben bemerkt, dafs so wie er von A gegen B schlägt, die vor ihm liegende Luft zusammengedrückt wird. Diese Verdichtung entsteht aber offenbar nicht erst dann, wenn der oscillirende Punkt den Weg AB schon zurückgelegt hat, sondern in jedem Punkte des Raumes AB dauert die Verdichtung der vorliegenden Luft stätig fort. Verdichtete Luft aber strebt in jedem Fall, sich nach allen Seiten auszudehnen; daher werden sich die Oscillationen nicht blofs in der verlängerten Richtung AB , (also in AN) fortpflanzen, sondern in allen Richtungen, wohin man von den Punkten des Raumes AB aus, eine gerade Linie ziehen kann. Da aber AB in jedem Fall ungemein klein ist, so reicht es hin, alle Richtungen, als von der Mitte C ausgehend zu betrachten. Zieht man also CM in beliebiger Richtung, so müssen in dieser die verdichteten und verdünnten Luftschichten, gerade so wie in der Richtung CN wechseln. Da nun eben dieses von jeder Linie gilt, die man von C aus in der

Luft ziehen kann, so sieht man leicht ein, daß sich diese Verdichtungen und Verdünnungen, in der Gestalt concentrischer Kugelschichten von C aus verbreiten werden. In der Figur ist angenommen, daß die Linien CD , DE , EF , FG gleich sind, und die oben bestimmte Länge einer Verdichtung oder Verdünnung vorstellen; daß ferner aus C durch D , E , F , G u. s. w. Kugelflächen $d\delta$, $e\varepsilon$, $f\phi$, $g\gamma$ u. s. w. gelegt sind, und daß endlich sich zwischen C und $d\delta$ eine Verdünnung, zwischen $d\delta$ und $e\varepsilon$ eine Verdichtung u. s. f. befinde.

Eine solche kugelförmige Verdichtungs-Schicht wie $d\delta e\varepsilon$ oder $f\phi g\gamma$, nebst der ihr folgenden Verdünnung $Cd\delta$ oder $e\varepsilon f\phi$ u. s. w. nennt man eine Schall-Welle, die Länge einer Verdichtung und Verdünnung zusammen, wie CE oder EG , das Maafs oder die Breite einer Schall-Welle, endlich jede aus C gezogene Linie, wie CN oder CM , einen Schall-Stral. Daß die Breite jeder Schall-Welle $= \frac{2c}{n}$ sei, ist aus §. 17. klar.

§. 19. Auf diese Art hat es gar keine Schwierigkeit, nicht nur deutlich, sondern auch anschaulich zu machen, was bei der Verbreitung des Schalles von einem Punkte aus, in der Luft geschieht. In der Wirklichkeit kommt aber nie der Schall aus einem einzigen Punkte; doch begreift man leicht, daß eine starke Annäherung an die gegebene Vorstellung statt finden müsse, wenn entweder die ursprünglich oscillirenden Punkte sich innerhalb eines kleinen Raumes befinden (z. B. in der Oeffnung eines Blase-Instrumentes, aus welcher der Schall hervortritt), oder wenn dieser Raum zwar von einiger Ausdehnung ist, wie bei Saiten-Instrumenten, der Hörer sich aber in solcher Entfernung befindet, daß er die ganze Länge unter einem ziemlich kleinen Winkel sehen würde.

Verwickelter wird aber die Sache, wenn sich das Ohr nahe bei der Quelle eines solchen Schalles befindet. Es sei Fig. 4, AB eine tönende Saite, in C befinde sich ein Ohr, so ist klar, daß ein Luft-Theilchen in C von jedem Punkt der Saite einen Schall-Stral, wie AC , DC , IC , BC u. s. w. erhält. In jeder solchen Richtung erhält also der Punkt C einen Oscillationsschlag; da aber alle diese Stralen von sehr verschiedener Länge sind, so wird der Punkt C in einigen derselben in einer Verdichtung, in andern in einer Verdünnung zu liegen

kommen, d. h. er wird in einigen Stralen einen Stofs erhalten in der Richtung gegen die Saite, in andern hingegen abwärts. (§. 17). Der Anstofs den *C* erhält, ist also in der That sehr zusammengesetzt, und es würde nicht ganz leicht seyn, aus allen diesen Anstößen die Richtung des zusammengesetzten Stofses zu berechnen. Es ist indessen die Bestimmung dieser Richtung in akustischer Hinsicht nicht wichtig. Es ist völlig hinreichend zu wissen, dafs alle Schläge, die der Punkt *C* erhält, gleichzeitig sind, und dafs daher auch das Ergebnifs aller dieser Schläge nichts als eine einzige gleichzeitige Oscillation seyn könne, wie sich leicht aus den ersten Begriffen von der Zusammensetzung jeder beliebigen Art von Bewegungen deutlich machen läfst. In welcher Richtung diese zusammengesetzten Oscillations-Schläge das Ohr treffen, ist für die Höhe des Tones gleichgültig.

Ob man unter solchen Umständen noch von regelmässigen Schall-Wellen reden könne, ist nicht leicht deutlich zu machen; und diese Betrachtung mag wohl der Grund seyn, warum *Lagrange* in mehreren Stellen seiner *Recherches*, die Vorstellung von Schall-Wellen, die zuerst *Newton* aufgestellt hatte, gänzlich verwirft, obgleich ihre Realität unbestreitbar ist, sobald man den Schall, als von einem Punkte, oder auch von einem kleinen Raume ausgehend, betrachtet.

§. 20. Noch verwickelter wird das Spiel der Oscillationen, wenn eine Menge von verschiedenen Tönen zugleich klingen. Auf Anschaulichkeit mufs man dabei gänzlich Verzicht thun. Aber der Verstand reicht weiter als die Einbildungskraft oder das Anschauungsvermögen: denn er vermag, Deutlichkeit in die verwickeltsten Erscheinungen zu bringen, welche die Einbildungskraft nicht vermögend ist, in ein anschauliches Bild zusammen zu fassen, wofern er nur im Stande ist, die einfachen Bestandtheile der Erscheinung auf deutliche Begriffe zu bringen. Es kommt nämlich hierbei auf die Anwendung eines Satzes an, der aus den ersten Begriffen der Bewegungslehre deutlich hervorgeht, wenn diese Lehre rein mathematisch und von allen physikalischen Begriffen abgesondert vorgetragen wird. Legt man nämlich einem Punkte vielerlei relative Bewegungen (z. B. dem Punkte *C* Fig. 4 in den Richtungen *AE*, *DF*, *IG*, *BH* etc.) mit gegebenen Geschwindigkeiten bei, und bestimmt dar-

aus seine absolute Richtung und Geschwindigkeit, so ist es in jedem Fall absolut einerlei, ob man sagt, der Punkt habe die einzige absolute Bewegung, oder er habe alle die einzelnen Bewegungen, die man ihm in Beziehung auf die gegebenen Richtungen beilegt. Man darf daher in jedem Fall beide Vorstellungsarten, ohne einen Irthum zu besorgen, vertauschen. Aus diesem Satze folgt aber, daß man bei der Zusammensetzung noch so vieler Bewegungen, dennoch jede einzelne für sich so betrachten kann, als ob sie ganz allein da wäre.

Wendet man diesen Satz auf unsern Gegenstand an, so ist man berechtigt, jeden Schall-Stral, der durch C geht, z. B. IG so zu betrachten, als ob er ganz allein da wäre; d. h. man kann und muß annehmen, daß in jedem Punkte C dieses Strales die Oscillations-Bewegung wirklich realisirt sei, die an dieser Stelle statt finden würde, wenn er ganz allein da wäre. Denn obgleich seine absolute Bewegung in diesem Punkte ganz anders seyn mag, so ist doch in derselben die Wirkung derjenigen Oscillation mit enthalten, die er in dem einzigen Stral, wenn dieser allein da wäre, erhalten würde.

Hieraus wird auch begreiflich, obgleich nicht anschaulich, daß wenn das Ohr in C nicht gleichzeitige, sondern Oscillationen von verschiedener Dauer, also von verschiedenen Tönen erhält, man jederzeit berechtigt sei zu behaupten, das Ohr werde von jeder Oscillation gerade so gerührt, als ob sie ganz allein da wäre.

Um indessen die Kräfte der Phantasie bei diesen Ansichten nicht ganz ungenutzt zu lassen, so giebt uns die Natur ein recht lehrreiches und anschauliches Bild von einer Verbindung vieler Bewegungen, die sich auf die mannigfaltigste Art durchkreuzen und schneiden, ohne daß eine die andere stört, in den kreisförmigen Wellen, welche auf der Oberfläche eines ruhigen Wassers entstehen, wenn man kleine Körper hineinwirft. Man sieht leicht, daß die Benennung von Schall-Wellen, von dieser Erscheinung entlehnt ist.

Zurückwerfung des Schalles.

§. 21. Auch hier muß die Betrachtung von den einfachen Bestandtheilen der Erscheinung ausgehen. Es sei also in C Fig. 5. die

ursprüngliche Quelle eines Schalles, AB sei die Oberfläche irgend eines festen (oder auch flüssigen) Körpers, und auf den Punkt D derselben falle der Schall-Stral CD . Da wir oben gezeigt haben, daß alle körperliche Materie ohne Ausnahme die Eigenschaften besitzt, durch welche Oscillationen möglich werden, (Presbarkeit und Spannkraft), so muß der Punkt D durch die Schläge des äußersten Luft-Theilchens in dem Stral, nothwendig in gleichzeitige Oscillationen versetzt werden. Hierbei wirken die Schläge der Luft nicht anders als jede andere mechanische Kraft, auf D , d. h. man wird die Oscillationen dieses Punktes als ursprüngliche betrachten können. Es wird folglich durch dieselben die Luft gerade so, wie §. 18. in Oscillationen versetzt, die sich nach allen Seiten verbreiten, wohin man nur von D aus eine gerade Linie ziehen kann. Es spaltet sich folglich der Stral CD in unendlich viele Stralen. Man kann also nicht sagen, wie man oft angenommen hat, daß der Stral CD , von dem Punkte D in einer einzigen Richtung, nach den Gesetzen des elastischen Stosses reflectirt werde, so daß der zurückgeworfene Schall in der einzigen Richtung DE fortgehe, wenn man den Winkel $BDE = ADC$ macht.

Würde der Schall auf solche Art zurückgeworfen, so geschähe es eben so, wie ein Lichtstral CD von einer polirten Fläche AB zurückgeworfen wird. Dieses ist schon deswegen als allgemeiner Satz höchst unwahrscheinlich, da die Fläche AB , in Beziehung auf bewegte Lufttheilchen, gar nicht als polirt angesehen werden kann; was doch ohne Zweifel nöthig ist, wenn so kleine Bewegungen, als Oscillationen sind, in einer so genau bestimmten Richtung zurückgeworfen werden sollten. Dagegen hat die Zurückwerfung des Schalles die größte Aehnlichkeit mit der Art, wie ein Lichtstral von einer unpolirten Fläche reflectirt wird. Denn ist CD ein Lichtstral, so zerstreut sich auch das Licht nach allen Seiten.

§. 22. Es giebt indessen manche Erscheinungen, welche doch eine Reflexion nach den Gesetzen des elastischen Stosses voraussetzen scheinen: aber diese lassen sich ohne Schwierigkeit erklären, wenn man annimmt, daß die Zurückwerfung des Schalles mit der Zerstreung des Lichtes völlig gleiche Gesetze befolge. Man darf nämlich eine nur einigermaßen ebene Fläche sehr schräge gegen ein lebhaftes Licht

halten, um sich zu überzeugen, daß das zerstreute Licht nicht in allen Richtungen von gleicher Stärke ist. Am lebhaftesten ist es immer in der Richtung DE ; auch wird es lebhafter, je kleiner die Winkel ADC und BDE sind. Nimmt man nun an, daß es sich bei der Reflexion des Schalles eben so verhalte, so wird dadurch manche Erklärung akustischer Erscheinungen an Ungezwungenheit gewinnen.

§. 23. Es erklären sich hieraus sehr befriedigend die Erscheinungen des Wiederhalles und des Echo.

Der Wiederhall entstehet allezeit, und unvermeidlich, in eingeschlossenen Räumen von einigem Umfang, und es hat damit folgende Bewandniss. Es sei AB Fig. 6. die Wand eines Zimmers; in C sei die ursprüngliche Quelle eines Schalles; in D befinde sich das Ohr. Unter diesen Voraussetzungen erhält das Ohr den Schall unmittelbar nur durch den Stral CD . Da aber auch jeder Punkt der Wand, wie A, E, F, G von C aus einen Stral erhält, von jedem solchen Punkte aber der Schall nach allen Seiten zurückgeworfen wird, so erhält das Ohr auch durch unendlich viele reflectirte Stralen, AD, ED, FD, GD , gleichzeitige Oscillationsschläge. Nun muß zwar jeder einzelne zurückgeworfene Stral weit schwächer seyn, als jeder ursprüngliche. Aber was jedem einzelnen an Stärke abgeht, wird vollkommen durch ihre unendliche Menge ersetzt. Denn in der That bekommt das Ohr von jedem Punkte der Wände, von wo man zwei freie Linien, die eine nach C , die andere nach D ziehen kann, einen reflectirten Stral.

Diese Stralen verstärken den Schall beträchtlich, so fern man annehmen kann, daß ihre Oscillationen zugleich, oder in äußerst kleinen Zwischenzeiten, zum Ohr kommen. Diese Annahme findet aber bloß in kleinen Räumen statt. Es ist nämlich klar, einmal: daß reflectirte Oscillationen sich eben so schnell als ursprüngliche in der Luft fortpflanzen; und dann: daß der Weg jedes reflectirten Schalles, z. B. $CG + GD$ größer ist, als der Weg des ursprünglichen CD . Folglich kommt jede reflectirte Oscillation später nach D , als die ursprüngliche. Bei der großen Geschwindigkeit der Fortpflanzung aber ist in Zimmern von mässiiger Größe der Unterschied der Zeit, in welcher die ursprünglichen und reflectirten Stralen in das Ohr kommen, so klein, daß er

unserm Gefühl für Einen Augenblick gelten kann. Denn wäre auch z. B. der Weg $CE + ED$ um 50 Fufs länger als CD , so legt der Schall diese 50 Fufs in $\frac{1}{20}$ Secunde zurück, welches für das Ohr so gut als ein Augenblick ist.

In grossen Sälen hingegen kann der Fall vorkommen, dafs der Weg der reflectirten Stralen, den der ursprünglichen um 100 und mehr Fufs übertrifft; dann gewinnt ein augenblicklicher Schall eine bemerkbare Dauer, und dieses ist es, was man den Wiederhall nennt.

§. 24. Gänzlich vermeiden kann man in umschlossenen Räumen den Wiederhall nie, und er kann da, wo öffentlich gesprochen werden soll, sehr beschwerlich werden. Denn, wird z. B. der Klang einer einzigen Sylbe durch den Wiederhall in den Zeitraum zweier Sylben ausgedehnt, wozu eben keine sehr lange Dauer des Wiederhalles erforderlich ist, so begreift man leicht, dafs dadurch die Rede unverständlich werden mufs, weil man die zweite Sylbe schon höret, während die erste noch nicht verklungen ist.

Vermindern kann man den Wiederhall hauptsächlich durch eine schickliche Gestalt des Saales. Die lange und schmale Gestalt fast aller unserer Kirchen und Säle, die zu öffentlichen Vorträgen bestimmt sind, ist unter allen die man wählen kann, die ungünstigste, nicht blofs deswegen, weil der reflectirte Schall in manchen Richtungen einen sehr langen Weg machen mufs, sondern auch, weil zwischen den langen Seitenwänden, wegen ihrer geringen Entfernung von einander, eine doppelte oder mehrfache Reflexion entstehen kann. Bisweilen kann der Sprechende dadurch den Wiederhall unschädlicher machen, dafs er nicht sehr laut, aber langsam und deutlich spricht. Denn je stärker die Sprache ist, desto lauter spricht auch der Wiederhall mit. Aus Erfahrung und Gründen scheint die Gestalt, welche sich der quadratischen nähert, die vortheilhafteste zu seyn.

Für die Musik ist der Wiederhall, wenn er nur nicht allzustark ist, eher vortheilhaft als nachtheilig.

§. 25. Vom Wiederhall unterscheidet sich das Echo nur dadurch, dafs zwischen dem ursprünglichen und reflectirten Schall eine bemerkbare Zeit verstreicht.

In den meisten Fällen läßt sich das Echo aus den Gesetzen des elastischen Stofses nicht erklären. Dagegen lassen sich die Bedingungen der Entstehung aus der vorgetragenen Theorie ungezwungen, und auf eine mit der Erfahrung völlig einstimmige Art erklären. Die Bedingungen des Entstehens eines einfachen Echo sind folgende.

Man denke sich im Freien um den Ort eines Beobachters zwei große Kreise beschrieben; den kleineren mit einem Halbmesser von einigen hundert Fufs; wir wollen 300 annehmen; den anderen mit einem 25 Fufs gröfsern. Den innern Raum des kleinern Kreises denke man sich ziemlich eben und frei von hohen Gegenständen. In dem Zwischenraum beider Kreise aber befinden sich in beliebigen Lagen kleine Gruppen hoher Gegenstände, Häuser, Mauern, Felswände, Bäume, hohes Gebüsch und dergleichen. Unter diesen Voraussetzungen muß der Beobachter ein deutliches Echo nach etwas mehr als einer halben Secunde hören. Denn von den 300 Fufs entfernten Gegenständen hat der zurückgeworfene Schall einen Weg von 600 Fufs, von den 325 Fufs entfernten, einen Weg von 650 Fufs zu machen. Jener wird ungefähr in 0,60, dieser in 0,65 Secunden zurückkommen. Der Unterschied von 0,05 ist klein genug, um allen reflectirten Schall als einen augenblicklichen zu empfinden, und man hört ihn ungefähr 0,6 Secunden nach dem ursprünglichen.

Man sieht hieraus, dafs zur Entstehung eines Echo ausgedehnte Flächen gar nicht nothwendig sind, und dafs, wie die Erfahrung vielfältig lehrt, Waldungen von einer schicklichen Lage ein sehr gutes Echo machen können, indem jede Oberfläche, auf welche der Schall trifft, wäre es auch nur die Oberfläche eines leichten Blattes, zurückkehrende Oscillationen hervorbringt. Auch ist klar, dafs gar nicht nothwendig der ganze Zwischenraum der beiden angenommenen Kreise mit hohen Gegenständen besetzt sein muß. Sie können in ganz beliebiger Ordnung und Stellung, und gruppenweise stehen, wofern nur die reflectirenden Punkte zahlreich genug sind, um den zurückkehrenden Schall bemerklich zu machen.

§. 26. Ein doppeltes oder mehrfaches Echo kann auf mehr als eine Art entstehen. Man denke sich in dem Zwischenraum

der beiden angenommenen Kreise zwei hinlänglich ausgedehnte Gruppen von Gegenständen einander gerade gegenüber, so erhält man das erste Echo, wie vorher, nach 0,6 Secunden; aber der beiderseitige Schall geht nun über den Ort des Beobachters hinaus nach der gegenüberstehenden Gruppe, und kehrt nun als zweites Echo, 1,2 Secunden nach dem ursprünglichen Schall zurück. Ist das zweite Echo noch lebhaft genug, so kann eben so ein drittes u. s. w. entstehen. Oder man denke sich, aufser den beiden angenommenen Kreisen, noch zweie, mit Halbmessern von 600 und 625 Fufs beschrieben. Befinden sich in den Zwischenräumen der letztern an einer oder mehr Stellen, Gruppen von Gegenständen, und zwar gerade an solchen Stellen, wo der Zwischenraum der kleineren Kreise leer ist, so hört der Beobachter, 0,6 Secunden nach dem ursprünglichen Schall, das erste Echo von den näheren, und nach 1,2 Secunden ein zweites von den entfernteren Gegenständen. Man sieht leicht, wie mancherlei Abänderungen dabei statt finden können.

§. 27. In elliptischen Sälen hört man bekanntlich einen Schall, der in dem einen Brennpunkte entsteht, in dem andern Brennpunkte deutlicher und stärker, als an jeder andern Stelle. Es ist möglich, aber gar nicht nothwendig, dieses aus einer Zurückwerfung des Schalles nach den Gesetzen des elastischen Stofses zu erklären. Zur Erklärung genügt es schon zu bemerken, dafs (wegen einer bekannten Eigenschaft der Ellipse) aller Schall, der von einem Brennpunkt zum andern durch Zurückwerfung gelangt, einen gleich langen Weg, von der Länge der grofsen Achse zu machen hat. Jeder augenblickliche Schall, der in dem einen Brennpunkt erregt wird, kommt eigentlich doppelt im andern Brennpunkte an, einmal unmittelbar, und dann auch durch Zurückwerfung von den Wänden; aber (wenn der elliptische Raum nicht viele hundert Fufs lang und breit ist), so schnell hinter einander, dafs das Ohr nur einen Schall hören wird. Hierzu kommt, dafs der unmittelbare Schall, der nur von sehr wenigen Schallstralen herrührt, weit schwächer seyn dürfte, als der von unendlich vielen Stralen herrührende reflectirte. Der zweite Schall würde eben so augenblicklich seyn als der erste, wenn der ganze Cubik - Raum die Gestalt eines länglichen Ellipsoides hätte. Haben aber nur die Wände

eine elliptische Krümmung, so wird der Wiederhall von den obern Theilen derselben allerdings etwas später als von den untern im zweiten Brennpunkt anlangen.

Diese Erscheinung macht übrigens doch die oben §. 22 bemerkte Hypothese, daß der reflectirte Schall in der Richtung, wohin ein Lichtstral von der Spiegelfläche gehen würde, am stärksten sei, ziemlich wahrscheinlich. Denn auf diese Art wird der Schall im zweiten Brennpunkte nicht nur fast augenblicklich, sondern auch stärker als in andern Stellen anlangen.

Sehr entscheidend für das §. 21 aufgestellte Hauptgesetz ist die Erfahrung, daß auch in großen kreisförmig ummauerten Räumen, besonders unter einer halbkugelförmigen Kuppel, etwas ähnliches statt findet, indem zwei Personen die einander gegenüber, und fast um den ganzen Durchmesser von einander entfernt stehen, sich ziemlich leise mit einander unterhalten können, wenn der Sprechende gegen die nahe Wand redet. Es dürfte schwerlich möglich seyn, diese Erscheinungen aus Reflexionen nach den Gesetzen der Spiegelung zu erklären. Vergleicht man aber die Längen der Wege, auf welchen der Schall von einem Endpunkte des Durchmessers zu dem andern gelangen kann, so läßt sich zeigen, daß der Unterschied des längsten und kürzesten Weges sehr wenig mehr als 0,4 des Durchmessers beträgt. Setzt man diesen 120 Fufs, so ist dieser Unterschied ungefähr 48 Fufs. Hieraus läßt sich aber leicht berechnen, daß aller von dem Kugelgewölbe reflectirter Schall, fast in einem Augenblick (nämlich in weniger als $\frac{1}{20}$ Secunde) am andern Endpunkte des Durchmessers anlangt. Irre ich nicht, so ist dieses die einzig mögliche Art, diese Erscheinung befriedigend zu erklären.

Von der Stärke des Schalles.

§. 28. Zuerst müssen wir ganz im Allgemeinen überlegen, wovon die Stärke des Schalles abhängig sei, wobei wir uns wieder auf den Schall in der Luft beschränken, weil ein menschliches Ohr selten oder nie den Schall durch ein anderes Mittel erhält, und weil das, was in Ansehung der Luft zu bemerken ist, sich leicht auch auf andere Mittel anwenden läßt.

Unmittelbar kann unstreitig die Stärke des Schalles, so fern man einen einzigen Schallstral betrachtet, von nichts abhängen, als von der Lebhaftigkeit oder Kraft, mit welcher die Oscillationsschläge der Luft das Trommelfell des Ohres treffen. Es ist aber aus den ersten Elementen der Mechanik bekannt, daß sich die Kraft der Bewegungen bei gleicher Geschwindigkeit, wie die bewegten Massen, und bei gleichen Massen, wie die Geschwindigkeiten verhalte. Es entsteht also nun die Frage, wie die Begriffe von Masse und Geschwindigkeit auf oscillirende Bewegungen angewendet werden können.

§. 29. Körperliche Massen, welche sich Oscillationen mittheilen, befinden sich allezeit in Berührung mit einander. Es scheint daher nöthig, erst die Vorstellung einer Berührung auf deutliche Begriffe zurück zu führen.

Wenn sich zwei gleichartige oder ungleichartige körperliche Flächen berühren, so kann man mit gleichem Rechte sagen, die Berührung geschehe in einer oder in zwei Flächen. Denkt man sich nämlich an der Stelle, wo man eine Berührung betrachtet, eine bloß geometrische Fläche, so kann man sagen: die Berührung geschehe in dieser einzigen Fläche. Erwägt man aber, daß diese geometrische Fläche zwei Seiten hat, deren eine diesseits, die andere ganz jenseits liegt, und von denen jede wieder mit einer der angenommenen körperlichen Oberflächen zusammen fällt, so kann man sagen, die Berührung geschehe in diesen beiden Flächen. Nun kann man aber jede Fläche vorstellen als einen Körper von unendlich kleiner Dicke; daher kann man eben so richtig sagen: daß die sich berührenden Massen zwei körperliche Schichten oder Scheiben sind, denen man gleiche, aber unendlich kleine Dicken beilegen kann. Hierdurch entstehet der Begriff eines Volumens, auf welches sich der Begriff der Masse bestimmt anwenden läßt.

Das Volumen zweier sich berührenden Scheiben muß aber in der Regel als gleich betrachtet werden: denn daß sie in Länge und Breite congruent sind, ist unmittelbar klar; legt man ihnen aber auch noch zwar unendlich kleine, aber gleiche Dicke bei, so sind alle Bedingungen der Congruenz vollständig vorhanden. Haben aber die sich berührenden Scheiben gleiches Volumen, so verhalten sich ihre Massen

wie ihre Dichtigkeiten. Und aus dieser Betrachtung ergibt sich das Recht, diese statt der Massen zu setzen.

Um keiner Dunkelheit Raum zu lassen, bemerke man noch folgendes. Es macht einen zwar nur unendlich kleinen, aber dennoch nicht zu übersehenden Unterschied in der Anwendung des Begriffes der Masse, ob man die sich berührenden Scheiben als ebene, oder ob man sie als gekrümmte betrachtet. Im ersten Fall ist das Volumen derselben absolut congruent. Denkt man sich aber zwei sich berührende concentrische Kugelschichten, so ist die vom Mittelpunkt entferntere allerdings größer als die nähere. Betrachtet man aber ihre Dicke als ein Unendlichkleines der ersten Ordnung, so ist der Unterschied des körperlichen Volumens von der zweiten Ordnung, und kann daher in der Regel mit vollkommenem Rechte als Null betrachtet werden. Doch würde die stätige Zunahme des Volumens, wenn man sich den Halbmesser einer Kugel als stätig wachsend vorstellt, nicht auf deutliche Begriffe zu bringen seyn, wenn man diesen Unterschied unbeachtet liesse.

Was hier von berührenden Flächen gesagt worden, findet auch Anwendung auf berührende Punkte. Man kann sie in jedem Fall als zwei unendlich kleine Körper von gleichem Volumen vorstellen, deren Massen sich folglich wie ihre Dichtigkeiten verhalten. Doch findet auch hier der eben erörterte Unterschied statt, ob man die beiden sich berührenden Punkte vorstellt, als einer Ebene, oder als einer gekrümmten Fläche angehörig.

§. 30. Was aber die Geschwindigkeit betrifft, so ist schon oben (§. 8.) bemerkt worden, daß die Geschwindigkeit einer Oscillation in jedem Punkte des Oscillations-Raumes eine andere ist. Nun sind aber alle Oscillationen, welche einen Ton erregen, so schnell, daß jeder Schlag für einen Augenblick gelten muß. Legt also ein oscillirender Punkt der Luft, welcher in einer Secunde n Schläge macht, in dem kleinen Zeitraum einer $\frac{1}{n}$ Secunde den äußerst kleinen Raum s zurück, so ist es für unser Gefühl einerlei, ob der fast augenblickliche Schlag den Weg s in der Zeit $\frac{1}{n}$ Secunde gleichförmig oder ungleichförmig zurücklegt. Betrachten wir nun die Bewegung als gleichförmig, so verhält sich die Geschwindigkeit, alles übrige gleich gesetzt, wie der Oscilla-

tions-Raum *s.* Hieraus folgt also das zweite Gesetz: dafs bei unveränderter Dauer der Oscillationen, d. i. bei gleichbleibender Höhe eines Tones, die Stärke desselben sich wie die Gröfse der Oscillationsweite verhält.

Auch dieses Gesetz bestätigt sich durch eine sehr einfache und allgemein bekannte Erfahrung. Wenn man eine angeschlagene Saite, oder noch besser eine oscillirende Stimmgabel verklingen läfst, so ändert sich die Höhe des Tones auf keine dem geübtesten Ohr bemerkbare Art, d. h. die Dauer der Oscillationen bleibt gleich; aber die Oscillationsweiten werden immer kleiner, und mit ihnen nimmt zugleich die Stärke des Tones ab.

§. 31. Hieraus ergibt sich nun, dafs die Abnahme des Schalles mit der Entfernung von der Quelle des Schalles, von nichts anderem herrühren könne, als davon, dafs die Oscillationsweiten bei Verbreitung des Schalles mit der Entfernung immer kürzer werden; denn die Dichtigkeit der Luft könnte nur dann einigen Einflufs haben, wenn der Schall aus sehr grofsen Höhen nach der Tiefe, oder umgekehrt fortginge. Die ersten Elemente der rein mathematischen Bewegungslehre sind völlig hinreichend, die Ursache und das Verhältnifs dieser Abnahme genau zu bestimmen.

Man betrachte wieder Fig. 3, und erinnere sich alles dessen, was §. 18. über die Verbreitung des Schalles durch die Luft gesagt worden. Unter *CN* lege man einen Winkel $NCO = NCM$, und stelle sich unter *CN* die Achse eines Kegels *MCO* vor, dessen Spitze in *C* liegt. Dieser Kegel umfasset alle Schall-Strahlen, die sich von *C* aus innerhalb seines Raumes ausbreiten können. Man wähle auf einer der von *C* aus gezogenen Linien, etwa auf *CN*, zwei Punkte *H* und *K* beliebig, und lege durch diese aus dem Mittelpunkt *C* zwei Kugelflächen, von welchen die in den Kegel fallenden Stücke *PQ* und *RS* kreisförmige Abschnitte sind. In jedem dieser Abschnitte befinden sich alle Punkte der Luft in gleicher und gleichzeitiger Oscillation; und zwar, wenn *PQ* in einer Verdichtung liegt, von *C* abwärts; wenn aber *RS* in einer Verdünnung liegt, gegen *C* hinwärts. Nun kann, nach den Grundlehren der Mechanik, kein Körper mehr Bewegung mittheilen, als er selbst hat,

woraus folgt, dafs in der kreisförmigen Fläche PQ nicht mehr oder weniger Bewegung seyn kann, als in RS . Da nun die oscillirenden Massen in beiden Flächen gleiche Dichtigkeit haben, so kann der Forderung, dafs in PQ und RS gleichviel Bewegung seyn soll, nur dadurch Genüge geschehen, dafs die Oscillationsweiten in RS in demselben Verhältnifs kleiner sind, als in PQ , in welchem die Fläche RS gröfser ist als PQ . Nun stehen diese Flächen im geraden Verhältnifs mit den Quadraten der Halbmesser CH und CK ; folglich mufs die Gröfse der Oscillationsweiten, und mit ihnen die Stärke des Schalles im umgekehrten Verhältnifs mit den Quadraten der Entfernung stehen.

§. 32. Da wir bei dem Beweise vorausgesetzt haben, dafs der Schall von dem einzigen Punkte C ausgehe, so ist klar, dafs es in voller Strenge auch nur für diesen idealischen Fall gelte. Verbreitet sich aber ein Schall von mehreren Punkten, das Ohr hat aber eine solche Stellung, dafs man ohne erheblichen Fehler sagen kann: es sei von jedem schallenden Punkte gleichweit entfernt, so befolgt die Stärke des Schalles in jedem Stral den das Ohr erhält, dieses Gesetz, und so wird das Gesetz auch unter diesen Voraussetzungen anwendbar bleiben. Dieses wird also der Fall seyn, wenn entweder der Raum aus welchem der Schall kommt, wirklich sehr klein, oder wenn er wenigstens im Verhältnifs gegen die Entfernung des Ohres klein ist.

Kommt dagegen der Schall aus mehreren Punkten, deren Entfernung vom Ohr sehr verschieden ist, wie wenn z. B. AB Fig. 4. eine schallende Saite, in C aber das Ohr wäre, so würde es zwar nicht unmöglich, aber doch immer etwas schwierig seyn, die Stärke des Schalles in C zu bestimmen, weil man dazu die Oscillationsweite des Luft-Theilchens C berechnen müfste, welche das Resultat aller Oscillationsschläge ist, welche der Punkt C durch alle von AB kommenden Stralen erhält. Indessen ist eine genauere Schätzung der Stärke des Schalles unter diesen Umständen selten oder nie ein Bedürfnifs, und es ist hinreichend, nur zu bemerken, dafs der Schall um so stärker wird, je gröfser die Anzahl der Punkte ist, von welchen das Ohr in C Schall-Stralen erhält. Welches dritte Gesetz,

ungeachtet seiner Unbestimmtheit, demohngeachtet sorgfältig zu bemerken ist, weil man es zur richtigen Beurtheilung vieler Erscheinungen nicht entbehren kann.

§. 33. Mit dieser Theorie von der Stärke des Schalles müssen wir eine sehr merkwürdige und lehrreiche Beobachtung des Herrn Biot verbinden. An eben der cylindrischen gegen 3000 Fufs langen Röhre von Gufseisen, die schon oben (§. 16.) erwähnt worden, beobachtete er, dafs der leiseste Schall (z. B. das Schlagen der Unruhe einer Taschenuhr) an dem anderen Ende, ungeachtet der grossen Entfernung, so ungeschwächt gehört wurde, als ob man dichte dabei wäre.

Dieser Erfolg konnte nur statt finden, wenn die Oscillationsweiten die ganze Röhre hindurch von gleicher Gröfse blieben. Von gleicher Gröfse aber konnten sie nur bleiben, wenn sie sich nicht ausbreiteten, und selbst nicht der innern Fläche des Eisens Oscillationen mittheilten. Dieses führt aber nothwendig zu der Folgerung, dafs die Schallstralen längs der ganzen Röhre parallel mit der Achse fortgingen; desgleichen, dafs Schallstralen die einer Fläche parallel laufen, derselben keine, oder unmerklich wenig Oscillations-Bewegung mittheilen.

§. 34. Diese Folgerungen werfen wieder Licht auf die Theorie der Sprach- und Hör-Röhre, an deren Gestalt man so viel, aber ohne allen Erfolg gekünstelt hat, weil man dabei von einer Reflexion der Stralen nach katoptrischen Gesetzen ausging.

Die Erklärung der Wirkungen des Sprachrohrs ist ganz einfach folgende. In einer etwas langen kegelförmigen Röhre, deren entgegengesetzte Seiten nur unter einem kleinen Winkel divergiren, werden die Schallstralen verhindert, sich seitwärts auszubreiten, und gezwungen, fast parallel zu bleiben. Die äufsersten Stralen laufen parallel längs den Wänden, und theilen denselben wenig oder gar keine Oscillations-Bewegung mit. Daraus erklärt sich, warum zu Folge der Erfahrung die Materie, woraus das Rohr besteht, ziemlich gleichgültig, und dafs die ganz einfache schlichte Kegelgestalt die beste ist. So lange die Oscillationen innerhalb des Rohres bleiben, können sich die Oscillationsweiten nur wenig verkürzen. Tritt aber der Schall aus dem Rohre hervor, so werden sich zuerst nur die äufsersten Stralen seitwärts ausbreiten; in

der Mitte behalten sie aber, bis in ziemlich grossen Entfernungen, die Richtung bei, welche sie im Rohr erhalten haben, bis allmählig die Seitenverbreitung der äussersten Stralen bis zur Achse des Rohres fortschreitet, wo dann der Schall nach den Gesetzen der freien Verbreitung fortgeht, doch mit einer Stärke, als käme er aus einem näher liegenden Punkte als aus der Mundöffnung des Rohres.

§. 35. Auch alle Künsteleyen an der Gestalt des Hörrohres sind ohne alle Wirkung geblieben, oder haben wohl gar die Wirkung beeinträchtigt. Meines Erachtens würde auch bei diesem die ganz schlichte Kegelgestalt die beste seyn. Denn die Wirkung beruhet unstreitig darauf, dafs man die Schallstralen zwingt zu convergiren, wodurch eine Vergrößerung der Oscillationsweiten, also eine Verstärkung des Schalles, entstehen mufs. Ich kann es auch nicht für vortheilhaft halten, wenn man das Hörrohr krümmt, und den Schall nöthigt, von den innern Flächen reflectirt zu werden. Es giebt Hörröhre, wo man dem Schall allerlei Flächen, an denen er sich brechen mufs, recht künstlich entgegenstellt. Die Folge ist, dafs jedes kleine in der Luft vorhandene Geräusch verstärkt zum Ohr gelangt, so dafs man stets ein ähnliches Brausen als an gewissen Muscheln hört, wodurch natürlich die Haupttöne, die gehöret werden sollen, an Deutlichkeit verlieren.

Von der Mittheilung der Oscillationen zwischen ungleichartigen Mitteln.

§. 36. Bis jetzt haben wir den Schall blofs betrachtet, wie er sich in der Luft oder auch in einem anderen völlig gleichartigen Mittel fortpflanzt, oder auch in demselben Mittel durch Zurückstrahlung verbreitet. Und wenn von der Mittheilung der Oscillationen einer Saite, einer Stimmgabel oder eines andern schallenden Körpers an die Luft, oder von der Luft an die Oberfläche eines andern Körpers die Rede war, so genügte es zu zeigen, dafs die mitgetheilten Oscillationen den mittheilenden gleichzeitig seyn müssen. Es ist aber jetzt genauer zu untersuchen, ob und was für Veränderungen dabei in der Gröfse der Oscillationsweiten, in der Stärke des Schalles, und vielleicht auch in

der Art, wie sich die Stralen im Innern des Körpers verbreiten, vorgehen möchten.

Soll diese Frage mathematisch behandelt werden, so führt sie zu schwierigen Problemen. Aber nach dem Plane, den ich mir in dieser Abhandlung vorgezeichnet habe, ist die Frage mehr physikalisch als mathematisch zu behandeln. Doch wird es dienlich seyn, zuerst zu untersuchen, was aus den anerkannten Gesetzen des elastischen Stofses, zur Beantwortung der Frage folge.

§. 37. Dafs alle Mittheilung der Oscillationen durch den Stofs geschehe, liegt unmittelbar in dem Begriff, und aus der ungemeinen Kleinheit aller Oscillationsweiten darf man mit Sicherheit schliessen, dafs die durch einen Oscillationsschlag entstehende Verschiebung der Theile nie die Grenzen der vollkommenen Elasticität überschreite. Wir haben ferner im 29sten §. gezeigt, dafs man zwei körperliche Punkte, die sich berühren, als unendlich kleine Körper von gleichem Volumen betrachten könne, deren Massen sich daher wie die Dichtigkeiten der Materien verhalten, denen sie angehören. Nach diesen Betrachtungen kann man alles als gegeben betrachten, was zur Anwendung der Gesetze des Stofses auf die Oscillationen bekannt seyn muß. Der Grund aber, warum dennoch diese Gesetze keine vollständige Beantwortung der Frage geben können, ist folgender. In der Theorie des Stofses betrachtet man zwei Körper *A* und *B* als völlig frei, d. h. man siehet ab von jeder andern mitwirkenden Kraft, obgleich in der Wirklichkeit die Mitwirkung anderweitiger Kräfte gar nicht zu vermeiden ist. Dafs aber dennoch die Versuche, welche man mit elastischen Kugeln anstellt, den Erfolg ziemlich genau der Theorie gemäfs zeigen, rührt daher, weil der Widerstand der Luft und andere Hindernisse der Bewegung, in Rücksicht des Gewichtes der Kugeln, immer nur klein sind. Ganz anders ist aber der Fall, wenn ein oscillirender Punkt *A* gegen einen anderartigen Punkt *B* stößt, denn dieser hat hinter sich und rund um sich herum eine unendliche Menge gleichartiger Punkte *C*, *D*, *E*, *F* etc., denen er nun seinerseits die durch den Schlag des Punktes *A* empfangene Bewegung mitzutheilen genöthigt ist. Aber weder der Punkt *B* selbst, noch die um ihn liegenden, können wegen der Spannung, in der sie sich

gegenseitig befinden, die Bewegung wirklich machen, welche sie nach den Gesetzen des freien Stosses machen würden. Aber dennoch ist klar, dafs in dem Augenblicke des Stosses in beiden das Bestreben nach der dadurch bestimmten Geschwindigkeit entstehe, und dafs diesem Bestreben auf irgend eine Art Genüge geschehen müsse. Da sich aber B von A nicht trennen, also keine andere Bewegung als A machen kann, so ist ferner klar, dafs dieses Bestreben auf die anliegenden Punkte B, C, D etc. übergehen, und allmählig durch unendlich kleine Incremente, oder Decremente, eine Abänderung der Oscillationsweiten bewirken müsse, welches eigentlich der durch höhere Rechnung auszumittelnde schwierige Punkt ist. Man sieht indessen leicht ein, dafs man aus den Elementarsätzen vom Anstofs doch in jedem Fall richtig beurtheilen könne, ob eine Vergrößerung oder Verkleinerung erfolgen müsse, und ob diese beträchtlich oder unbedeutend seyn werde. Nur das eigentliche genauere Maafs der Veränderungen mufs höheren Rechnungen vorbehalten bleiben.

§. 38. Die Fälle, auf deren Beurtheilung es hier besonders ankommt, gehören zu den einfachsten, wo sich die Art des Erfolges selbst ohne Rechnung beurtheilen läfst. Die zu beantwortende Frage ist nämlich bestimmt folgende. Zwei körperliche Punkte A und B , von gleicher Gestalt und Gröfse, aber verschiedener Dichtigkeit oder Masse, berühren sich; B ruht, und A macht einen Oscillationsschlag gegen B ; es fragt sich, was würde B dadurch für eine Geschwindigkeit erhalten, wenn es sich frei bewegen könnte. Ist die Dichtigkeit oder Masse A bei weitem kleiner als B , so ist in seinem Schlage wenig Kraft, und in B wird daher nur ein geringes Bestreben nach Geschwindigkeit entstehen. Ist hingegen die Masse A bei weitem gröfser als B , so ist der Schlag kräftig, und wird den Punkt B in eine gröfsere Geschwindigkeit, als A selbst hatte, zu versetzen suchen. Bestimmter läfst sich aber der Erfolg aus der Theorie des Stosses bestimmen.

Die Masse A schlage mit der Geschwindigkeit c gegen die Masse B , und diese erhalte dadurch die Geschwindigkeit v (angenommen, dafs sie sich frei bewegen könnte), so ist unter Voraussetzung vollkommener Elasticität

$$v = \frac{2A}{A+B} c; \text{ woraus folgt: } A+B : 2A = c : v;$$

hieraus lassen sich alle hier zu beachtende Fälle beurtheilen. Nämlich:

- 1) Ist $B = A$, so ist $v = c$.
- 2) Setzt man $B < A$, so nähert sich das Verhältniß $A+B : 2A$ dem Verhältniß $1 : 2$ desto stärker, je kleiner B ist. Also ist $v > c$ und liegt zwischen den Grenzen c und $2c$.
- 3) Ist $B > A$, so ist das Maafs des Verhältnisses $A+B : 2A$, nämlich $\frac{2A}{A+B}$, ein desto kleinerer Bruch, je kleiner A gegen B ist. In diesem Fall ist also $v < c$, und dieses unbegrenzt um so mehr, je kleiner A ist. Der Werth von v ist allezeit innerhalb der Grenzen 0 und c .

Dafs die Zahlenwerthe, welche diese Formeln geben, in der Anwendung auf Oscillationen nicht richtig sind, dafs sie aber dennoch richtig anzeigen, ob eine Vergrößerung oder Verkleinerung der Oscillationsweiten statt finde, ist leicht einzusehen.

§. 39. Bei der Entwicklung der Theorie des Stosses denkt man gewöhnlich nur an gleichartige Körper. Man kann daher zweifeln, ob man berechtigt sei, die Formeln auch auf den Anstofs ungleichartiger Körper anzuwenden. Es scheint indessen die qualitative Beschaffenheit auf den Erfolg nur in so fern Einfluss zu haben, als davon die Dichtigkeit und die Grenzen der vollkommenen Elasticität abhängen; doch verdienen die Gesetze des Anstosses ungleichartiger Körper wol eine eigene Experimental-Untersuchung.

Wir haben oben (§. 29.) gezeigt, dafs man zwei sich berührende Punkte als unendlich kleine Körper betrachten könne, deren Massen sich wie ihre Dichtigkeiten oder specifischen Gewichte verhalten. Wir dürfen also nur für A und B in den Formeln die Dichtigkeiten beider Materien setzen, um mit Sicherheit beurtheilen zu können, ob unter bestimmten Umständen eine allmälige Vergrößerung oder Verkleinerung der Oscillationsweiten zu erwarten sey.

§. 40. Betrachten wir nun zuerst die Mittheilung der Oscillationen in der Luft oder einem andern völlig gleichartigen Mittel, so sind die Massen A und B gleich, also $v = c$ (Nr. 1 des vorigen §.), d. h. in B entsteht kein Bestreben nach einer andern Geschwindigkeit,

als A hat. Wenn daher, wie in einer cylindrischen Röhre, die Schallstrahlen parallel sind, so müssen die Oscillationsweiten gleich, also die Stärke des Schalles unverändert bleiben. Divergiren hingegen die Strahlen, so kann man die Massen A und B (nach §. 29.) nicht mehr als absolut gleich betrachten, sondern die Oscillationen müssen immer ausgebreiteteren Massen mitgetheilt werden; hierin liegt der Grund, warum die Oscillationsweiten mit der Entfernung, wie oben (§. 31.) gezeigt worden, abnehmen. Convergiren die Strahlen, wie in dem Hörrohr, so müssen sich die Oscillationsweiten (nach Nr. 2. des vorigen §.) vergrößern.

§. 41. Wenn Oscillationen an eine anderartige Materie mitgetheilt werden, so sind beide fast in jedem Fall an Dichtigkeit sehr verschieden; also ist der Erfolg immer nach Nr. 2. und 3. des 38sten §. zu beurtheilen.

Ist z. B. A Messing oder Stahl, B Luft, so verhält sich die Dichtigkeit beider ungefähr wie $6000 : 1$. Setzt man also $A = 6000$, $B = 1$, so ist $A + B : 2A = 6001 : 12000$, d. i. fast genau wie $1 : 2$; also werden sich die Oscillationsweiten in der Luft von der Saite aus bis zu einer vermuthlich sehr kleinen Weite zuerst vergrößern, und dann erst nach dem Gesetz §. 31. abnehmen.

Wäre umgekehrt A Luft und B Stahl oder Messing, so ist $A = 1$ und $B = 6000$; also $A + B : 2A = 6001 : 2$, oder ziemlich genau $3000 : 1$; es werden also die Oscillationsweiten ungemein klein ausfallen, u. dergl. m.

Wir wollen nun versuchen, diese Ergebnisse auf einige akustische Erscheinungen anzuwenden.

Von der Resonanz.

§. 42. Was in den akustischen Schriften zur Erklärung der Resonanz gesagt wird, ist nicht nur unbefriedigend, sondern ich erinnere mich auch nicht einmal, irgendwo eine recht bestimmte Erklärung des Begriffes gefunden zu haben, indem häufig Erscheinungen, die in ihren äußern Bedingungen und in ihrer Beschaffenheit das Gegentheil der Resonanz sind, dennoch einer Resonanz zugeschrieben werden.

Den unzweideutigsten Fall einer Resonanz bietet unstreitig der Resonanzboden eines Saiten-Instrumentes dar. An einem Claviere wird eine Metallsaite an dem einen Ende gegen einen hölzernen Steg gedrückt, der auf einem dünnen und sehr elastischen Brett, das man den Resonanzboden nennt, befestigt ist. Bei Violinen findet dasselbe statt, nur ist der ursprünglich oscillirende Körper eine Darmsaite. Unter diesen Umständen werden die Oscillationen der Saite dem Steg und Resonanzboden mitgetheilt, die wir hier als einen Körper betrachten können; von dem Resonanzboden aber werden sie wieder der Luft mitgetheilt. Die äußern Bedingungen der Resonanz sind also: dafs die Oscillationen der Saite an Holz, und von diesem an die Luft mitgetheilt werden. Und die Wirkung dieser Construction besteht darin, dafs der Ton weit stärker klingt, als wenn die Oscillationen der Saite blofs unmittelbar der Luft mitgetheilt werden, wie dieses der Fall ist, wenn man eine Saite über einen wenig elastischen Körper, z. B. über einen Stein oder feuchtes Holz spannt.

Die Verstärkung des Schalles rührt von zwei Ursachen her.

1) Aus Vergrößerung der Oscillationsweiten. Auf einem Clavier gehen zuerst die Oscillationen aus Messing in Holz über. Da nun Messing ungefähr 15 mal so schwer als Tannenholz ist, so kann man $A = 15$, $B = 1$ setzen. Dann ist

$$A + B : 2A = 16 : 30,$$

folglich werden die Oscillationsweiten im Holze sich fast verdoppeln. Dann gehen sie aus Holz in die Luft über, die ungefähr 400 mal leichter als Tannenholz ist. Setzt man also $A = 400$, $B = 1$, so ist

$$A + B : 2A = 401 : 800;$$

also werden die im Holze schon verdoppelten Oscillationsweiten ungefähr gegen die Oscillationsweiten der Saite fast viermal vergrößert seyn.

Theilte dagegen die Saite ihre Oscillation der Luft unmittelbar mit, so ist Messing ungefähr 4000 mal dichter als Luft. Setzt man also $A = 4000$, $B = 1$, so hat man

$$A + B : 2A = 4001 : 8000.$$

Die Oscillationsweiten, welche bei dem Durchgang durch Holz vervierfacht worden, werden in diesem Fall nur verdoppelt. Und wenn man

sich auch hier auf die Zahlen 4 und 2 nicht verlassen kann, so ist doch gewifs, dafs die Oscillationsweiten durch die Resonanz vergrößert werden.

2) Die zweite und wichtigste Ursache der Verstärkung ist, dafs das Ohr nunmehr eine viel gröfsere Menge von Schallstralen erhält, nämlich nicht nur von jedem einzelnen Punkte der Saite, sondern auch von allen mitoscillirenden Punkten des Resonanzbodens. Hierbei entsteht die Frage, wie weit sich wohl die Oscillationen dem Holze mittheilen, ob nur in der Nähe der oscillirenden Saite, oder in dem ganzen Umfang des Resonanzbodens. Begreiflich können die Oscillationen nicht in allen Punkten von gleicher Stärke seyn; am lebhaftesten sind sie da, wo die oscillirende Saite den Steg drückt; von da aus müssen sie abnehmen, und wahrscheinlich im umgekehrten Verhältnifs mit den Quadraten der Entfernung; doch dürfte wohl die Lage der Fibern des Holzes eine andere minder regelmäfsige Abnahme der Oscillationen veranlassen. Auf jeden Fall geschieht die Abnahme allmähig und stätig, so dafs sich gar keine bestimmte Gränze der Oscillationen angeben läfst, und sie sich daher unstreitig über den ganzen Resonanzboden, so weit er frei ist, verbreiten. Diese Vorstellung hat keine Schwierigkeit, so lange man an einen einzigen Ton denkt. Klingen aber mehrere Töne zusammen, so ist zwar die Einbildungskraft nicht mehr im Stande, anschaulich zu machen, wie in demselben Punkt zu gleicher Zeit mehrere Oscillationen bestehen können, ohne sich zu verwirren. Es ist aber schon oben (§. 19.) gezeigt worden, dafs allerdings in einem Punkte der Luft vielerlei Oscillationen zugleich bestehen können, ohne sich in der Wirklichkeit und für das Gefühl zu verwirren. Was aber dort in Ansehung der Luft gesagt worden, ist für jeden anderartigen körperlichen Punkt gültig.

§. 43. Die Richtigkeit dieser Theorie der Resonanz bestätigt sich auf eine sehr befriedigende Art durch die Erscheinungen der Stimmgabeln. Chladni hat in seiner Akustik sehr deutlich die Art ihrer Oscillationen nachgewiesen. Wenn die Arme derselben durch einen Schlag oder auf andere Art in Oscillation gesetzt werden, so theilt sich die Gabel in drei Stücke vermittelst zweier Schwingungsknoten, die am

untern Ende der Arme, ganz nahe bei der Verbindung beider liegen. Die beiden Arme schwingen zugleich einwärts und zugleich auswärts. Das mittlere Stück aber schlägt aufwärts und abwärts, jenes, wenn die Arme auswärts, dieses, wenn sie einwärts schwingen. Die Oscillationen dieses Mittelstückes sind also in Beziehung auf den Griff als Longitudinalschwingungen zu betrachten.

Ist nun die Gabel in Oscillation gesetzt, und man hält den Griff frei zwischen den Fingern, so fühlt man zwar deutlich ihre zitternde Bewegung, aber der Ton den man hört ist nur schwach. Setzt man aber den Griff auf einen Resonanzboden, oder auch nur auf ein recht trockenes Brett, so wird der Ton unerwartet laut. Dafs hierbei die Oberfläche des Holzes rings umher oscillire, kann man mit der Hand fühlen, und wenn der Ton kräftig ist, selbst noch in einer nicht unbedeutlichen Entfernung von der Gabel. Setzt man zwei Gabeln, welche verschiedene Töne geben, zugleich auf das Holz, so fühlt man ein verstärktes Zittern, aber das Ohr unterscheidet beide Töne deutlich, so dafs offenbar die in demselben Punkt des Holzes vereinigten Oscillationen sich dennoch für das Ohr nicht verwirren.

Man sieht leicht, dafs die Erklärung dieser Erscheinungen gar nicht verschieden ist von der, die im vorigen §. in Ansehung des Claviers gegeben worden. Auch hier verhält sich die Dichtigkeit des Stahles zu der des Holzes ungefähr wie 15 : 1, und die des Holzes zu derjenigen der Luft wie 4000 : 1. Es müssen daher die Oscillationen, welche die Luft mittelbar durch das Holz erhält, gröfser seyn, als die, welche sie unmittelbar vom Stahle erhält. Ueberdies erhält das Ohr hier wie dort von allen oscillirenden Punkten des Holzes, so wie von allen Punkten der Gabel, Schallstralen, statt dafs sie nur die letztern allein erhält, wenn man die Gabel frei hält, deren verhältnismässige Menge aber, wegen des geringen Umfanges der Gabel, viel kleiner ist.

Durch einen kleinen Versuch kann man die Richtigkeit dieser Erklärung sehr anschaulich machen. Wenn man die oscillirende Gabel nicht wirklich auf das Holz aufsetzt, sondern demselben gleichsam nur unendlich nahe bringt, so treffen nur die abwärts gerichteten Schläge des Griffes das Holz. Dieses empfängt daher immer nur einen Schlag,

während der Griff zweie macht. Die Folge ist, daß man außer dem Ton der Gabel auch noch ihre tiefen Octaven hört.

Von dem Mitklingen gleichgestimmter Saiten und von der Aeolsharfe.

§. 44. Wenn man zwei Saiten genau in den Einklang stimmt und die eine allein anschlägt, so oscillirt die andere freiwillig mit, doch nur schwach. Man schreibt diese Erscheinung einer Resonanz zu. Es ist aber aus dem Inhalt der vorigen §§. klar, daß sie mit der Resonanz gar nichts gemein hat, weder in Ansehung der äußern Bedingungen, noch in Ansehung der Wirkungen. Die Oscillation geht hier von Metall in die Luft, und von dieser wieder zu dem Metall der zweiten Saite über, und der so erregte Ton ist sehr schwach.

Wenn die Oscillationen der Luft die zweite Saite treffen, so wirken ihre Schläge nicht anders auf sie, als jede andere schwache mechanische Kraft wirken würde. Sie setzen sie in diejenigen Oscillationen, welche die Saite vermöge ihrer Spannung leichter als jede andere annimmt. Diese Oscillationen sind also als ursprünglich erregte, nicht als mitgetheilte zu betrachten. Und was die Stärke des Tones betrifft, so sind zwar die Oscillationsweiten der Luft größer, als die der ersten Saite; gehen aber diese Oscillationen aus der Luft in die zweite Saite über, so hat man, wenn $A = 1$ gesetzt wird, ungefähr $B = 4000$; also $A + B : 2A = 4001 : 2$, d. h. die Oscillationsweiten der Saite können gegen 2000 mal kleiner seyn, als in der Luft. Bei dem neuen Uebergang von der zweiten Saite in die Luft vergrößern sie sich zwar wieder, können aber dennoch gegen 1000 mal kleiner bleiben, als die von der ersten Saite kommenden. Zwar sieht man leicht ein, daß die hier gegebenen Zahlenwerthe nicht sicher sind, aber das Sachverhältniß kann kein anderes seyn.

Eben so wenig hat das artige Spiel der Aeolsharfe den geringsten Zusammenhang mit der Resonanz. Der an den Saiten hinstreichende Luftzug, wirkt auf einzelne Theile derselben, wie jede andere mechanische Kraft, und setzt irgend einen aliquoten Theil derselben in Oscil-

lationen. Das harmonische in diesem Spiel rührt aber daher, daß die entstehenden Töne keine andern als die 6 oder 7 tiefen Töne der harmonischen oder natürlichen Tonleiter sind, also Octave, Quinte, Quarte, Tertie, Sexte, auch wohl Septime des Grundtons, auf welchen alle Saiten des Instruments gestimmt sind.

Ueber die Verbreitung der Oscillation in andern Mitteln als Luft.

§. 45. Wenn Oscillationen auf irgend eine Art in einem Mittel erregt werden, welches man, so wie Luft, in allen Richtungen als völlig gleichartig betrachten kann, so kann sich der Schall in demselben offenbar nicht anders fortpflanzen und verbreiten, als in der Luft. Dieser Fall findet aber im strengsten Sinne wohl nur bei Flüssigkeiten statt, sie mögen tropfbar oder ausdehnbar seyn. Betrachtet man also den Schall als von einem einzigen Punkte eines solchen Mittels ausgehend, so müssen regelmässige Schallwellen entstehen, deren Breite nur anders seyn wird als in der Luft, weil die Geschwindigkeit mit welcher sich der Schall fortpflanzt, in jedem Mittel anders ist. Sofern aber der Schall von vielen Punkten ausgeht, wie, wenn die Oberfläche einer Flüssigkeit durch die Luft in oscillirende Bewegung gesetzt wird, so werden sich zwar die Strahlen auf unendlich mannigfaltige Art durchkreuzen, aber dennoch werden sie eben so wenig als in der Luft einander stören, und man wird nie zu einem Irrthum verleitet werden, wenn man jeden Schallstral, oder jeden Schallkegel gerade so betrachtet, als ob er ganz allein da wäre, d. h. in dem betrachteten Stral, oder in dem betrachteten Kegel wird alles wirklich seyn, was da seyn würde, wenn er allein vorhanden wäre. Alle von andern Richtungen herkommenden Bewegungen sind zwar in jedem Punkte auch vorhanden, heben aber die besonders betrachteten nicht auf, und können daher bei der Betrachtung außer Acht gelassen werden.

§. 46. Die Fortpflanzung und Verbreitung der Oscillationen durch das Innere fester Körper ist eigentlich der schwierigste Theil der Akustik, und man kann kaum erwarten, daß es dem menschlichen Fleiße

je gelingen dürfte, die Gesetze der Oscillationen für diesen Fall, es sey auf dem Wege der Beobachtung oder der Rechnung, völlig ins Klare zu bringen. Die neuern Entdeckungen über das Gefüge der Krystalle haben es sichtbar gemacht, dafs selbst bei solchen Körpern, die unseren Sinnen sich als völlig stätige und gleichartige Massen darstellen (wie Glas, Metalle etc.), dennoch im Innern nicht in allen Richtungen gleiche Spannung vorhanden sey, welches unstreitig einen grossen Einfluss auf die Art haben mufs, wie sich die Oscillationen im Innern verbreiten. Diese Dunkelheit in der Theorie dürfte indessen doch keine sehr nachtheiligen Folgen für die Anwendungen der Akustik haben. Denn wenn wir etwa unsere Fensterscheiben ausnehmen, so kommt der Fall selten oder nie vor, dafs der Schall durch eine ganz gleichartig scheinende Masse fortgepflanzt wird. Unsere massiven Wände bestehen eigentlich aus einem höchst unregelmässigen Conglomerat kleiner Körner von verschiedener Gröfse und Gestalt; und eben diese Unregelmässigkeit nähert sich wieder einer nicht blofs scheinbaren, sondern wirklichen Gleichartigkeit in allen Richtungen. Denn wenn man in Gedanken Linien in den mannigfaltigsten Richtungen zieht, so wird man schwerlich behaupten können, dafs in der einen mehr Spannung sey, als in der andern. Doch nimmt unstreitig die Spannung von oben nach unten zu wegen des immer gröfser werdenden Druckes der überstehenden Massen; aber eben so verhält es sich mit der Luft, mit dem Wasser, und überhaupt mit allen Körpern. Man darf daher wohl annehmen, dafs die Gesetze, nach welchen sich der Schall durch unsere Wände, oder andere grofse feste Massen fortpflanzt, nicht wesentlich von denen verschieden seyn könne, nach welchen er sich durch ganz gleichartige Mittel verbreitet. Der Hauptunterschied möchte nur darin liegen, dafs die Kraft der Oscillationen nach einem höheren Verhältnifs mit der Entfernung von der Stelle, von wo die Oscillationen ausgehen, abnimmt, als in der Luft, weil der Durchgang durch eine Menge ungleichartiger Körner, und die zwischen ihnen vorhandenen Pori, wohl nicht anders, als schwächend wirken kann. Der Durchgang durch Holz möchte vielleicht eine besondere Aufmerksamkeit der Beobachter verdienen, weil hier in verschiedenen Richtungen die Spannung offenbar sehr verschieden ist.

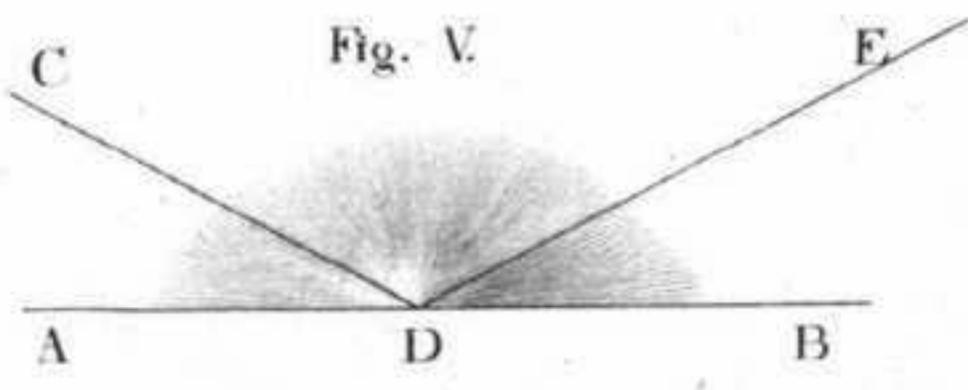
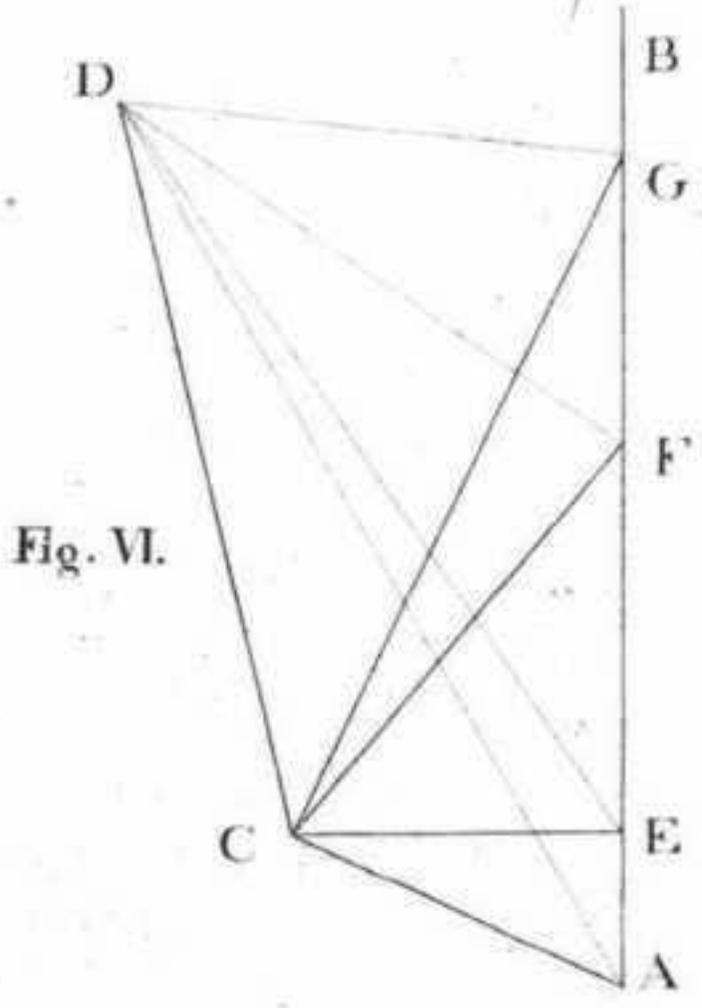
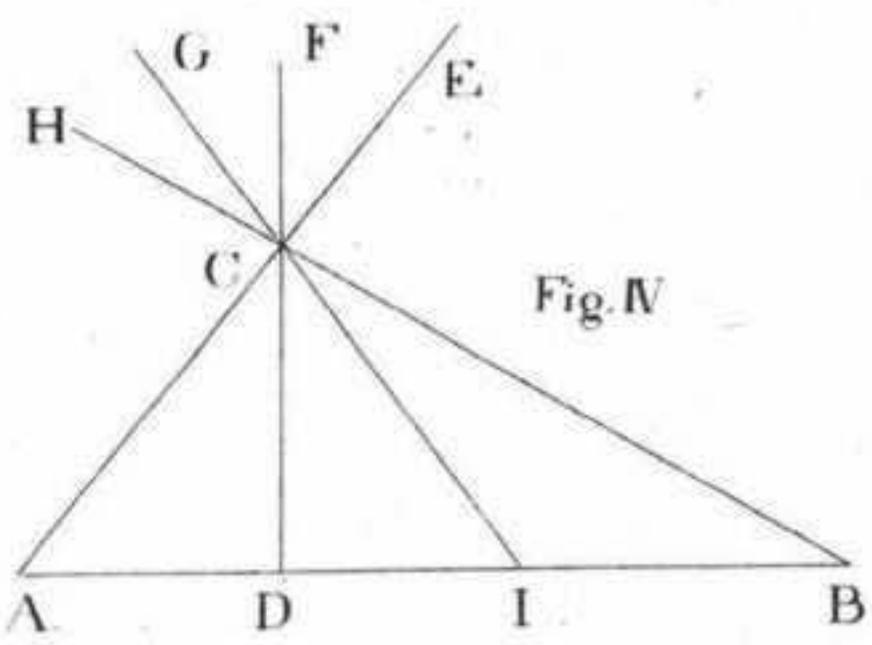
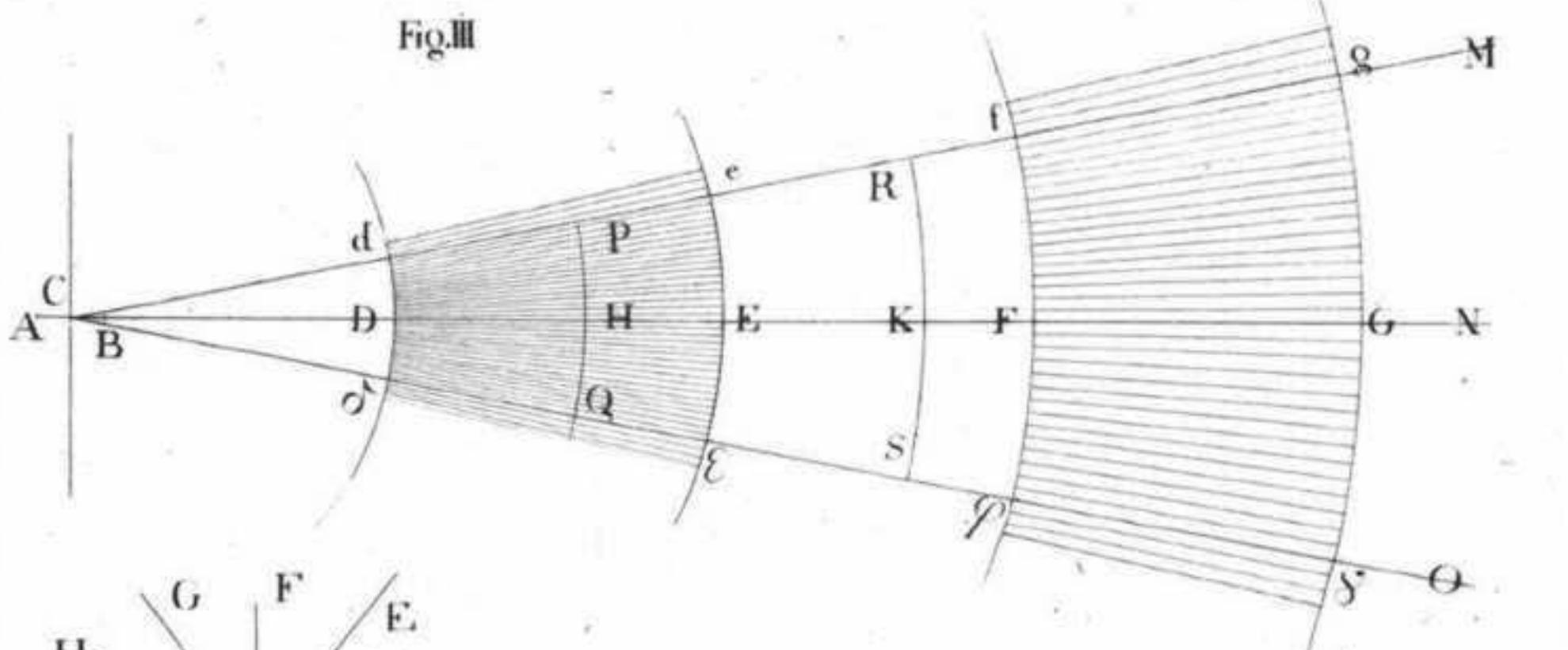
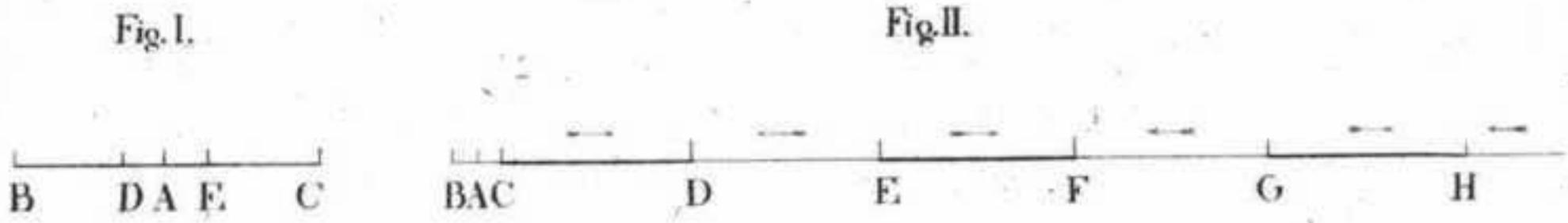
§. 47. Dafs übrigens, auch abgesehen von dieser Dunkelheit, der Schall bei dem Durchgang durch jeden festen Körper sehr geschwächt werden müsse, ergibt sich deutlich, aus der vorgetragenen Theorie. Wenn in einem Zimmer die Oscillationen der Luft in eine Wand, also aus einer sehr dünnen in eine viel dichtere Materie übergehen, so müssen sich die Oscillationsweiten schon auf der Oberfläche sehr verkleinern. Pflanzen sie sich dann im Innern der Wand fort, so werden sie sich noch stärker, als bei dem Fortgang in der Luft verkleinern. Theilen sie sich endlich auf der anderen Seite wieder der Luft mit, so werden zwar die Oscillationsweiten wieder etwas gröfser, aber doch lange nicht so stark, als wenn sie durch blofse Luft bis dahin gelangt wären. Dafs übrigens der Schall destoweniger geschwächt werde, je dünner der Körper ist, durch welchen er dringt, bedarf keiner Erwähnung. Uebrigens folgt noch aus unserer Theorie, dafs jeder Körper ohne alle Ausnahme dem Schalle durchdringlich ist.

§. 48. Wir haben oben (§. 21. f.) gezeigt, dafs die Schallstralen von der Oberfläche eines Körpers, nicht wie das Licht von einem Spiegel sondern wie von einer unpolirten Oberfläche, zurückgeworfen werden. Erfahrung und Gründe verstatten keine andere Vorstellung. Denn die Erscheinungen des Wiederhalles und des Echo lassen sich auf keine andere Art erklären, und die Unebenheiten einer Wand verstatten den so feinen Theilen der Luft in keinem Fall eine so regelmässige Reflexion, als den Lichtstralen wenn sie auf eine Spiegelfläche fallen. Eben so kann man, meines Erachtens, durchaus nicht annehmen, dafs bei dem Durchgang des Schalles durch feste Körper eine solche Refraction statt finde, als das Licht befolgt, wenn es durch die polirte Oberfläche eines durchsichtigen Körpers hindurchgeht. So wie wir indessen oben als wahrscheinlich gezeigt haben, dafs ein Schallstral von einer mässig ebenen Fläche nach der entgegengesetzten Seite stärker als in andern Richtungen reflectirt werde, eben so möchte ich es nicht für unmöglich halten, dafs eine Annäherung an die Refractions-Gesetze, auch bei dem Durchgang des Schalles durch feste Körper statt finde; und eine ganz regelmässige Refraction dürfte man schwerlich in irgend einem Fall, es müfste denn etwa im Wasser seyn, erwarten.

S c h l u s s.

§. 49. Es scheint mir, daß die Ansicht von den Grundlehren der Akustik, die ich in dieser Abhandlung entwickelt habe, zu richtigeren, bestimmteren und deutlicheren Erklärungen der meisten Erscheinungen führe, und daß sie da, wo sich unausweichliche Schwierigkeiten finden, wenigstens sehr bestimmt die Punkte andeute, auf deren fernere Erledigung es eigentlich ankommen dürfte. Glücklichere Analytiker, denen nicht zerrissene Stunden, sondern zusammenhängende und ungestörte Muse zu Gebote steht, mögen nun versuchen, ob die aus den akustischen Erscheinungen selbst abgeleiteten Gesetze, durch Rechnung gerechtfertigt oder widerlegt werden können; und ob es überhaupt möglich sey, die noch vorhandenen Lücken auf dem Wege der Theorie auszufüllen.





Figuren zu der Abhandlung über die Grundlehren der Akustik.