Methodischer Leitfaden

der

Experimentalphysik

für höhere Schulen

(Mechanik, Akustik.)

von

Dr. Börner,
Direktor des Realgymnasiums

REALGYMNASIUM DÜSSELDORF BIBLIOTHEK

zu

Elberfeld.

Beilage zu dem Osterprogramm 1889.
Nr. 451.

Gedruckt bei Sam. Lucas in Elberfeld.

9 eL
5
(1889)

357.476

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

LANDESBIBLIOTHEK DÜSSELDORF

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Vorwort.

Die vorliegende Arbeit ist eine Probe aus einem demnächst erscheinenden Lehrbuche der Physik in 2 Stufen. Die Sonderung des physikalischen Lehrstoffs in 2 Stufen ist durch die Rücksicht auf die in 3 Jahren eintretende erhebliche Zunahme der Leistungsfähigkeit der Schüler und auf die pädagogischen Vorteile geboten, welche ein vorbereitender Überblick über das ganze Gebiet der Physik für den späteren Unterricht bietet. Die Erkenntnis der Wichtigkeit einer solchen Scheidung bricht sich auch mehr und mehr Bahn. (Vergl. die Lehrbücher von Reis, Krebs, Krumme, Weinhold u. a.) Die erste Stufe wird vorzugsweise die Induction, die zweite dagegen die Deduction anzuwenden haben.

Die folgende Arbeit behandelt zwei Abschnitte aus dem ersten Kursus. Inbezug auf die Auswahl des Stoffes und seine Anordnung unterscheidet sie sich nicht wesentlich von den im Gebrauch befindlichen Lehrbüchern, inbezug auf die methodische Behandlung dagegen macht sie Anspruch auf den Vorzug einer besonderen Eigenart. Während nämlich in den gebräuchlichen Lehrbüchern die Resultate des Unterrichts in der Regel in erzählender Weise zur Darstellung gebracht und die Experimente als bestätigende Versuche hinzugefügt werden, so dass es dem Ermessen des Lehrers überlassen bleibt, ob er sämmtliche Prämissen eines Schlusses erst feststellen, oder einige derselben bezw. alle übergehend den an die Spitze gestellten Schlusssatz nachträglich bestätigen will, schreibt die vorliegende Arbeit den Weg, auf dem man zum Schlusse gelangt, streng vor und lässt überall die logische Aufeinanderfolge der Glieder einer Schlussreihe auch in der äusseren Form erkennen. Für die Wiederholung der Schüler ist dies nach der langjährigen Erfahrung des Verfassers von der äussersten Wichtigkeit. Der Durchschnittsschüler ist in der Regel nicht im Stande, aus einer zusammenhängenden Darstellung die einzelnen Schlussglieder wieder herauszufinden und logisch zu ordnen, er entgeht nicht leicht der Gefahr, sich die Ergebnisse dogmatisch anzueignen und sich mit einer unvollständigen Beweisführung zu begnügen. Damit aber geht ein Hauptbildungsmoment der Physik, nämlich die klare und bewusste Einsicht in den Causalzusammenhang der Erscheinungen verloren. Wie in der niederen Mathematik, so muss nach der auf Erfahrung gestützten Ansicht des Verfassers auch in dem ersten Kursus der Physik die logische Aufeinanderfolge der Thatsachen und der daraus gezogenen Schlüsse und Schlussreihen äusserlich vor Augen geführt werden — und wie dort die gewonnenen Wahrheiten zur Lösung von Aufgaben verwandt werden, so sollen hier die bestätigenden Versuche dazu dienen, aus den gefundenen Gesetzen die Resultate dieser Versuche vorherzusagen. Der Lehrer der Physik wird durch einen derartigen Gang, der ja, abgesehen von der Freiheit in der Auswahl der Versuche, durch die Natur der Sache geboten ist, eben so wenig eingeengt wie der Lehrer der Mathematik durch den Gebrauch eines Elementarlehrbuchs. — Überhaupt wolle man bei Beurteilung dieser Arbeit

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

den Gesichtspunkt nicht aus dem Auge verlieren, dass sie nicht die Bedürfnisse des Lehrers, sondern die des Schülers befriedigen soll.

Wenn auch im Allgemeinen die Induction in dem ersten Kursus vorwalten soll, so giebt es doch einzelne Abschnitte der Mechanik und Optik, bei welchen eine streng induktive Behandlung ein in der Regel wenig zuverlässiger Umweg sein würde. Dazu rechne ich aus dem Vorliegenden z. B. die Lehre von den einfachen Maschinen. Will der Lehrer mit den gebräuchlichen Modellen die Gesetze experimentell ableiten, so begeht er wegen des bedeutenden Einflusses des Reibungswiderstands bewusst oder unbewusst eine Täuschung. Hier ist die Deduction am Platze. Nach dem Vorgange von Reis, Budde und Weinhold (in seiner Vorschule der Experimentalphysik) ist für die Ableitung der genannten Gesetze das Princip von der Erhaltung der Energie, das natürlich einen dem Standpunkte des Schülers angemessenen Ausdruck gefunden hat, zu Grunde gelegt. Von den verschiedenen Arten der Behandlung hat Verf. diese als die einfachste und fruchtbringendste erprobt.

Es darf zum Schluss nicht unerwähnt bleiben, dass der vorliegende Abriss nicht aus theoretischen Erwägungen allein entstanden, sondern dass er geradezu aus dem Unterrichte stückweise herausgewachsen ist. Die Vorarbeit, welche in Weinholds Vorschule, deren abweichende Form durch den verschiedenen Zweck bedingt ist, vorlag, hat dabei treffliche Dienste geleistet.

Die Rücksicht auf die Höhe der Druckkosten zwang den Vf. dazu, die Figuren ganz wegzulassen. Dieser Zwang aber hatte sein Gutes, denn er hat die Überzeugung gefestigt, dass die meisten Figuren in einem physikalischen Lehrbuche entbehrt werden können. Es dürften nur verhältnismässig wenige Stellen in der Arbeit sich vorfinden, wo die Anbringung einer schematischen oder geometrischen Figur die Darstellung einfacher und klarer gestaltet hätte. Die Führung eines besonderen Figurenhefts seitens der Schüler, welche bei erheblicher Einschränkung der Figuren im Buche notwendig wird, schliesst ausserdem manchen pädagogischen Vorteil ein. Dass es nicht Aufgabe eines Schulbuchs sein kann, viele Bilder von ganzen Apparaten zu liefern, besonders von solchen, welche heutzutage in den meisten Schulsammlungen vorhanden sind, bedarf keiner Ausführung.

Elberfeld, im März 1889.

Dr. Börner.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

I. Allgemeine Eigenschaften der Körper.

1) Räumliche Ausdehnung der Körper. Messen. Inhalts-Berechnung.

§ 1. Erfahrung. Jeder Körper ist nach drei aufeinander senkrechten Richtungen (Dimensionen) ausgedehnt. Von den Ausdehnungen können eine oder zwei sehr klein, im Verhältnis zu den anderen verschwindend werden (500 Blättchen Seidenpapier auf 1 cm, 10000 Blättchen feines Blattgold auf 1 mm, 1 Coconfaden $^1/_{100}$ mm dick).

Begriffs-Bestimmung. Messen heisst, eine Grösse mit einer bekannten Grösse derselben Art (dem Masse) vergleichen. Massstäbe, Messketten, Messbänder. Einheit des Längenmasses ist das Meter mit seinen Ober- und Unterteilen (m, km, cm, mm). Das Meter ist die Länge des im Archiv zu Paris aufbewahrten Normalmeterstabes von Platin. (Die Angabe, dass das Meter der zehnmillionte Teil des Erdquadranten sei, ist nicht mehr richtig, da die neueren Gradmessungen eine andere Länge dieses Quadranten ergeben haben). Einheit des Flächenmasses ist das Quadratmeter (qm) mit seinen Ober- und Unterteilen (qkm, qcm, qmm). Einheit des Körpermasses ist das Kubikmeter (cbm) mit seinen Ober- und Unterteilen (ccm, cmm).

Anmerkung. Ausser den in der Geometrie entwickelten Inhaltsberechnungen sind noch folgende Sätze zu merken: Inhalt eines Kreises vom Halbmesser r: $J = r^2\pi$ Flächeneinheiten (π annähernd $= {}^{22}/_7 = 3{,}14\ldots$), Umfang des Kreises: $U = 2\,r\,\pi$ Längeneinheiten; Inhalt eines geraden Körpers, dessen Grundfläche g und dessen Höhe h ist: $J = gh$ Kubikeinheiten.

2) Raumerfüllung oder Undurchdringlichkeit.

§ 2. Erfahrung. Sucht man in einen Körper hineinzudringen, so ergibt das Gefühl, dass der Körper entweder Widerstand leistet (feste Körper) oder ausweicht (flüssige Körper).

Folgerung. Den Raum, welchen ein Körper einnimmt, kann nicht gleichzeitig ein zweiter Körper erfüllen.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Bestätigende Versuche. 1. Einfüllen von Wasser in eine Flasche durch einen Trichter a) wenn der Trichter lose im Halse sitzt, b) wenn er durch ein den Hals dicht schliessendes Korkstück hindurch geht. 2) Man tauche ein mit der Öffnung nach unten gekehrtes Glas (Trinkglas) in Wasser. (Die Luft verhindert das völlige Eindringen des Wassers) — Taucherglocke.

3) Kohäsion. Aggregatzustände.

§ 3. Erfahrung. Bei vielen Körpern hängen die einzelnen Teilchen so fest zusammen, dass die Körper eine bestimmte Gestalt beibehalten; bei anderen ist zwar auch noch ein Zusammenhang der Teilchen vorhanden, derselbe ist aber so gering, dass die Teilchen sich leicht verschieben lassen, der Körper also zwar denselben Rauminhalt behält, seine Form aber beim geringsten Anlass ändert; andere Körper endlich besitzen gar keinen Zusammenhang der Teilchen, so dass weder der Rauminhalt noch die Gestalt unverändert bleiben.

Begriffsbestimmung. Die Kraft, welche die Teilchen eines Körpers zusammenhält, heisst Kohäsion. Bei festen Körpern ist die Kohäsion so stark, dass sie einen bestimmten Rauminhalt und eine bestimmte Gestalt haben; bei flüssigen Körpern ist die Kohäsion so schwach, dass sie nur noch einen bestimmten Rauminhalt, aber keine bestimmte Gestalt mehr haben (sie nehmen die Gestalt des Gefässes an); gasförmige oder luftförmige Körper besitzen gar keine Kohäsion.

Bestätigender Versuch. Die durch Wasser in einer umgekehrten Retorte abgesperrte Luft dehnt sich aus, wenn man an der Mündung saugt; sie zieht sich zusammen, wird zusammengedrückt, wenn man in dieselbe hineinbläst.

§ 4. **Feste oder starre Körper.** Erfahrung. Die durch Zerreissen oder Zerbrechen getrennten Teilchen eines Körpers lassen sich nicht durch genaues Aneinanderpassen und Drücken wieder vereinigen.

Folgerung. Die Kohäsion ist eine Kraft, welche nur zwischen unendlich nahe liegenden Teilchen wirkt.

Begriffsbestimmungen. (Verschiedene Arten der Kohäsion.) 1. Die Kohäsion der starren Körper heisst Festigkeit. Die Kraft, mit welcher ein Körper dem Zerreissen Widerstand leistet, heisst Zerreissungs- (absolute) Festigkeit, die Kraft, welche er dem Zerbrechen entgegensetzt, heisst Zerbrechungs- (relative) Festigkeit.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

2. Der Widerstand, welchen ein Körper dem Eindringen in seine Oberfläche entgegensetzt, heisst Härte. (Eindringen der Hand in weichen, in gebrannten Thon, Vergleichen der Härte durch Ritzen: weicher Stahl und Glas, harter Stahl und Glas, Feuerstein, Diamant. Härteskala.)

3. Ein Körper heisst zähe, wenn er eine bedeutende Formveränderung verträgt, ohne zu zerbrechen oder zu zerreissen (Weidenrute, Kautschuk, Leder, glühendes Schmiedeeisen, ausgeglühter Draht); er heisst spröde, wenn er bei geringer Formveränderung entzwei geht. (Viele Steine, rasch gekühltes Glas: Glasthränen, Bologneser Flaschen, gehärteter Stahl).

4. Ein Körper heisst elastisch, wenn die Teilchen nach einer Formveränderung in die alte Lage zurückkehren, sobald die Ursache der Formveränderung aufhört; behält er die Formveränderung bei, so heisst er dehnbar (hämmerbar). Die Kraft, welche die Teilchen in die alte Lage zurückführt, heisst Elasticität oder Federkraft. (Kautschuk, Uhrfeder, Glas: Spirale von Glas, Glasfäden.)

Anmerkung. Das Verhalten des Glases zeigt, dass Elasticität und Sprödigkeit keine sich ausschliessenden Eigenschaften sind.

Flüssige Körper. Erfahrung. Langsam aus einer Oeffnung fliessendes Wasser bildet Tropfen, der Regen besteht aus Tropfen. Versuch. Bringt man in ein Gemisch von Weingeist und Wasser (vom specifischen Gewichte des Oels) mittels einer Pipette eine geringe Menge Oel, so nimmt diese die Gestalt einer Kugel an.

Folgerung. Infolge der Kohäsion haben die Flüssigkeiten das Bestreben, Tropfen zu bilden.

Erläuternde Versuche. Die Kohäsion der Flüssigkeiten lässt sich durch Versuche mit Seifenwasser und verschiedenen Drahtgestellen trefflich erläutern.

Gasförmige Körper. Erfahrung. Rauch oder Dämpfe breiten sich aus. Versuch. Zwei Kochflaschen sind durch einen mit einem Quetschhahn verschliessbaren Gummischlauch mit einander verbunden, die eine Flasche ist mit Rauch gefüllt, die andere luftleer gemacht. Oeffnet man den Quetschhahn, so erfüllt der Rauch sofort auch die andere Flasche. (Die Flasche wird luftleer gemacht, indem man sie mit etwas Wasser auskocht und sofort den Kork mit dem durch den Quetschhahn geschlossenen Gummischlauch aufbringt; nachher wird die zweite Flasche an das andere Ende des Gummischlauchs befestigt.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Folgerung. Gasförmige Körper haben das Bestreben, ihr Volumen zu vergrössern. (Expansion.)

Erfahrung. Wasser kommt im festen, flüssigen und gasförmigen Zustande vor. Die meisten Flüssigkeiten lassen sich verdampfen, viele Flüssigkeiten gefrieren bei unserer Winterkälte. Mitteilung. Durch geeignete Massnahmen (Temperaturerniedrigung und Druck) lassen sich die meisten gewöhnlich nur im flüssigen oder gasförmigen Zustande vorkommenden Stoffe fest bezw. flüssig und fest machen.

Begriffsbestimmung. Die drei Zustände (fest, flüssig oder gasförmig), in denen derselbe Stoff vorkommen kann, heissen seine Aggregatzustände.

4) Adhäsion.

§ 5. Versuch. Zwei sorgfältig abgeschliffene Platten (von Metall, Marmor, Glas) haften an einander, wenn man sie mit Druck übereinander schiebt. (Adhäsionsplatten.)

Folgerung und Begriffsbestimmung. Bringt man die Teilchen zweier Körper sehr nahe zusammen, so haften sie mit einer Kraft an einander, welche Adhäsion heisst. Die Adhäsion findet zwischen gleichartigen und verschiedenartigen Stoffen statt.

Erläuternde Versuche und Erfahrungen. 1. Zwei Bleistücke, welche mit frisch geglätteten Schnittflächen an einander gelegt und im Schraubstock zusammengepresst werden, haften mit grosser Gewalt an einander. 2. Zwei Kautschukstücke können, wenn sie mit frischen staubfreien Schnittflächen und gelindem Drucke zusammengedrückt werden, wieder vereinigt werden. 3. Ansetzen des Staubs, Schreiben mit Kreide, Bleifeder, Kohle; Schweissen.

Versuche. 1. Bringt man zwischen die Adhäsionsplatten etwas (benetzende) Flüssigkeit, so haften die Platten mit grosser Kraft an einander. 2. Hängt man eine Adhäsionsplatte an die eine Seite einer Wage und bringt sie, nachdem man das Gleichgewicht hergestellt hat, mit der Oberfläche einer Flüssigkeit in Berührung, so bedarf es bedeutender Gewichtszulage, ehe die Platte losreisst. War die Flüssigkeit Wasser, Weingeist oder eine andere die Platten benetzende Flüssigkeit, so hängen nach dem Losreissen Flüssigkeitstropfen an den Platten; war die Flüssigkeit Quecksilber, so sind die Platten rein. Im ersteren Falle haben die Zulagegewichte die Kohäsion der Flüssigkeit, im letzteren die Adhäsion zwischen Flüssigkeit und Platten überwunden.

Folgerung. Zwischen Flüssigkeiten und festen Körpern

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

findet Adhäsion statt. Ist die Adhäsion der Flüssigkeit an den festen Körper grösser als ihre Kohäsion, so benetzt sie den festen Körper, ist dagegen die Kohäsion stärker als die Adhäsion, so benetzt sie ihn nicht.

Anwendungen. Das Schreiben mit Tinte, das Löten, Verzinnen, Vergolden, Belegen der Glasspiegel, Leimen, Kitten, die Wirkung der Fettdrüse bei den Wasservögeln, das Bestreichen der Ausgussstelle eines Gefässes an der unteren Seite mit Fett, das Ausgiessen einer Flüssigkeit längs eines mit der Flüssigkeit benetzten Glas- oder Holzstabes.

5) Porosität.

§ 6. Erfahrung. Bei einzelnen festen Körpern ist der Zusammenhang zwischen den Teilen durch grosse Zwischenräume (Poren) unterbrochen (Schwamm, Bimstein); bei anderen sind solche Öffnungen ebenfalls vorhanden, können aber nur durch Vergrösserungsgläser wahrgenommen werden (Holz, Papier, Sandstein u. s. w.); wieder andere Körper (z. B. die meisten Steine, die Metalle) zeigen auch unter dem Vergrösserungsglase keine Oeffnungen; es muss aber auf ihr Vorhandensein aus anderen Umständen geschlossen werden: Die künstliche Färbung mancher Steine wäre nicht möglich, wenn der Farbstoff nicht durch die Poren eindringen könnte; bei Anwendung von grosser Gewalt kann man Flüssigkeiten in Metalle hinein und durch dieselben hindurch pressen.

Folgerung. Die kleinsten Teilchen der festen Körper liegen nicht unmittelbar an einander, sondern sind durch Zwischenräume (Poren) getrennt.

Versuch. Füllt man ein kleines mit dicht verschliessendem Korke versehenes Fläschchen halb mit Wasser und halb mit Weingeist, sodass keine Luft mehr bleibt, und kehrt dann das Fläschchen mehrmals um, so dass beide Flüssigkeiten sich mischen, so nehmen dieselben weniger Raum ein.

Folgerung. Flüssige Körper sind ebenfalls porös.

Versuch. Bringt man in einen mit Luft gefüllten Kolben einige Körnchen Jod (sehr giftig!) und erhitzt die mit einem Kork geschlossene Flasche vorsichtig, so entwickeln sich Joddämpfe, die sich in der Luft verbreiten.

Folgerung. Gasförmige Körper sind ebenfalls porös.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Bestätigung durch spätere Versuche. Durch Druck bezw. Wärmeentziehung lässt sich das Volumen aller Körper, besonders aber der Gase verkleinern (darüber wird in der Wärmelehre das Nähere mitgeteilt werden). Das ist nur erklärlich, wenn man Zwischenräume zwischen den kleinsten Teilchen annimmt.

6) Teilbarkeit.

§ 7. Erfahrung. Durch geeignete Mittel (Zerschneiden, Zerstossen, Auflösen u. s. w.) können alle Körper in immer kleinere Teile zerlegt werden. Eine besonders feine Zerteilung ist durch Auflösen zu erzielen. (Löst man 1 g Fuchsin in 50 ccm Weingeist, so kann man mit 1 ccm dieser Lösung 2 l Wasser noch schön rot färben.)

Hypothese. (Annahme über die gemeinschaftliche Ursache einer Gruppe von Erscheinungen.) Infolge gewisser Erscheinungen der Chemie nimmt man an, dass die Teilbarkeit der Körper sich nur bis zu einer gewissen Grenze fortsetzen lässt. Die kleinsten Teilchen, die sich nicht weiter mechanisch zerlegen lassen, nennt man Moleküle, die Kräfte, welche dieselben zusammenhalten, heissen Molekularkräfte. (Kohäsion und Adhäsion sind Molekularkräfte.)

7) Schwere. Absolutes und specifisches Gewicht.

§ 8. Erfahrungen. Ein Körper, den man auf die Hand legt, übt nach unten zu auf dieselbe einen Druck aus. Lässt man einen in der Hand gehaltenen Körper los, so fällt er senkrecht zur Erde. Hängt man einen schweren Körper an einem Faden auf (Lot), so nimmt der Faden eine senkrechte Lage an.

Hypothese. Man nimmt an, dass die Erde alle an ihrer Oberfläche befindlichen Körper anzieht. (Später werden wir sehen, dass diese Anziehung gegenseitig zwischen je zwei Massenteilchen vorhanden ist.) Die Kraft ist im Allgemeinen nach dem Mittelpunkte der Erde gerichtet.

Begriffsbestimmungen. Die Kraft, welche sämtliche an der Oberfläche der Erde befindlichen Körper nach derselben hinzieht, heisst Schwerkraft, die Richtung, in welcher sie wirkt, heisst senkrecht, lotrecht oder vertikal; eine zu dieser Richtung Senkrechte heisst wagerecht oder horizontal.

Die Stärke der Anziehung, welche ein Körper erfährt, gibt sich in dem Drucke zu erkennen, welchen er auf eine Unterlage ausübt. Dieser Druck heisst sein absolutes Gewicht oder

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

schlechthin sein Gewicht. Als Einheit des Gewichts gilt das Gramm (Gewicht eines Kubikcentimeters Wasser bei 4° C) mit seinen Ober- und Unterteilen (kg, dg, cg, mg.) Die Zahl, welche angibt, wie vielmal so schwer ein Körper als ein gleiches Volumen Wasser ist, heisst sein specifisches Gewicht.

§ 9. Folgerung. Ist das absolute Gewicht eines Körpers in ccm gegeben, so ist die Masszahl des Volumens gleich der Masszahl des Gewichts eines gleichen Volumens Wasser (da 1 ccm Wasser 1 g wiegt), demnach erhält man das absolute Gewicht eines Körpers, indem man die Masszahl des Volumens mit dem specifischen Gewichte multiplicirt. (Beispiel!) Umgekehrt erhält man das specifische Gewicht eines Körpers, indem man sein absolutes Gewicht durch sein Volumen dividirt. (Das specifische Gewicht ist das Gewicht der Volumeneinheit.)

Bestimmung des specifischen Gewichts: a) fester Körper. Man bestimmt das absolute Gewicht mittels der Wage, ermittelt das Volumen und dividirt die erste Zahl durch die zweite. Das Volumen regelmässiger Körper wird durch Messen und Ausrechnen nach den geometrischen Sätzen bestimmt. Das Volumen unregelmässiger (in Wasser nicht lösbarer) Körper wird ermittelt, indem man dieselben in ein an seinem oberen Rande mit einem seitlichen Ausflusse versehenes und his zu diesem mit Wasser gefülltes Gefäss bringt, und das Volumen des ausfliessenden Wassers durch Auffangen in einem kalibrirten Gefässe bestimmt. Das Volumen des ausfliessenden Wassers und des Körpers sind nach § 2 gleich; b) flüssiger Körper. Ein Fläschchen, welches bis zu einer bestimmten Marke gefüllt eine bestimmte Menge Flüssigkeit fasst (z. B. 100 g), wird mit der zu bestimmenden Flüssigkeit bis zur Marke gefüllt und gewogen. Zieht man von dem gefundenen Gewichte das des Fläschchens ab, so erhält man das absolute Gewicht der Flüssigkeit; das specifische Gewicht ergiebt sich also, indem man jenes durch das Volumen (in dem genannten Beispiele durch 100) dividirt.

Anmerkung. Dass die gasförmigen Körper auch schwer sind, wird später gezeigt. (Näheres über das specifische Gewicht folgt später.)

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

II. Mechanik,

d. h. die Lehre von der Ruhe (Statik) und der Bewegung der Körper (Dynamik).

Vorbegriffe.

§ 10. Begriffsbestimmung. Ein Körper ist in Ruhe (absoluter Ruhe), wenn er seinen Ort im Raume nicht verändert; er ist in (absoluter) Bewegung, wenn er seinen Ort ändert. Ein Körper ist in relativer Ruhe oder relativer Bewegung, wenn er seinen Ort inbezug auf bestimmte andere Körper nicht verändert oder verändert.

Anmerkung. Absolute Ruhe und absolute Bewegungen vermögen wir nicht wahrzunehmen, weil unsere Erde und unser Sonnensystem in Bewegung sind. Die meisten Bewegungen betrachten wir in Beziehung zu unserem Standorte, der Erde.

§ 11. Erfahrungen. 1. Ein Körper bleibt in Ruhe, wenn nicht eine äussere Veranlassung ihn in Bewegung setzt. Ein Körper setzt seine Bewegung um so länger fort, je geringer die Widerstände sind, welche sich der Bewegung entgegensetzen. (Bewegung einer Kugel auf rauher, auf glatter Bahn, Bewegung eines Kreisels, eines Schlittschuhläufers, der Erde.) Wir gelangen dadurch zu dem Schlusse, dass, wenn es uns gelänge, alle Hindernisse zu beseitigen, der Körper sich ewig fortbewegen würde.

Folgerung und Begriffsbestimmung. Jeder Körper hat das Bestreben, in dem Zustande zu bleiben, in welchem er sich befindet. Dieses Bestreben heisst Beharrungsvermögen oder Trägheit.

Versuch. Man lege einen mässig grossen Körper auf ein auf dem Tische liegendes Stück Papier und ziehe dann das Papier erst langsam, dann ruckweise fort. Im ersten Falle geht der Körper mit, im zweiten bleibt er liegen, das Papier wird unter ihm fortgezogen.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Folgerung. Damit eine äussere Einwirkung den Zustand eines Körpers ändere, muss dieselbe eine gewisse Zeit andauern.

Versuch Man mache den vorigen Versuch mit Körpern von verschiedenem Gewicht. Der Körper bleibt um so eher liegen, je schwerer er ist, je grösser seine Masse (Menge des Trägen) ist.

Folgerung. Das Beharrungsvermögen eines Körpers ist um so grösser, je grösser seine Masse ist.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

A. Allgemeine Mechanik und Mechanik starrer Körper.

1. Kraft und Arbeit.

§ 8. Begriffsbestimmungen. Die Ursache einer Zustandsänderung heisst Kraft. Die Überwindung eines Widerstands (durch eine Kraft) heisst Arbeit. Einheit der Arbeit ist die Arbeit, welche nötig ist, um 1 kg 1 m hoch zu heben; sie heisst Kilogrammeter (kgm).

Folgerung. Die Erhebung von k Kilogramm auf die Höhe von s Meter erfordert demnach eine Arbeit von

$$A = k.s \text{ Kilogrammeter.}$$

Arbeit ist also das Product aus Kraft und Weg.

Man sagt: Das gehobene Gewicht erleidet die Arbeit, die Kraft aber, welche das Heben bewirkt, leistet die Arbeit.

Grundsatz. Die Arbeit, welche die Kraft leistet, ist gleich der Arbeit, welche der Widerstand erleidet.

Anmerkung. Bei Berechnung der Arbeit, welche zur Überwindung eines Widerstands erforderlich ist, kommt immer nur der Weg in Betracht, welcher in die Richtung des Widerstands fällt. Hebt man z B. ein Gewicht q in schräger Richtung auf die Höhe h, so ist die geleistete Arbeit q.h (nicht etwa q × dem wirklichen Wege), da der Widerstand des Gewichts q nur auf der Strecke h überwunden worden ist. Die seitliche Verschiebung hat nichts zur Überwindung dieses Widerstands beigetragen.

2. Die einfachen Maschinen.

§ 9. Begriffsbestimmung. Maschine heisst jede Vorrichtung, durch welche eine Arbeit in eine andere Form gebracht werden kann; der Widerstand, welcher überwunden, an welchem die Arbeit geleistet werden soll, heisst die Last; die Kraft, welche den Widerstand überwindet, schlechtweg die Kraft.

Die Rolle.

§ 10. Begriffsbestimmung. Eine Rolle ist eine kreisförmige Scheibe, die sich um eine durch den Mittelpunkt gehende Axe drehen lässt und um deren Umfang eine Schnur (ein Seil) gelegt werden kann. — Ist die Axe fest, die Rolle also nicht verschiebbar,

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

so heisst die Rolle fest, ist dagegen das eine Seilende befestigt, die Rolle also auf dem Seile verschiebbar, so heisst sie beweglich oder lose.

§ 11. **Die feste Rolle.** Gesetz. Bei der festen Rolle ist Gleichgewicht, wenn die Kraft gleich der Last ist.

Beweis. Wir nehmen an, einer Last p werde durch die Kraft k das Gleichgewicht gehalten. Wenn keine Hindernisse (Reibung, Widerstand der Last u. s. w.) vorhanden wären, so würden die beiden Gewichte infolge eines Stosses sich gleichmässig so lange fortbewegen, als die Seillänge es zuliesse. (Im Folgenden soll immer der Einfachheit halber von diesen Hindernissen, zu deren Ueberwindung ein Teil der geleisteten Arbeit verbraucht wird, abgesehen werden.) Bei der gedachten Bewegung leistet die Kraft k eine Arbeit, welche gleich der von der Last p verzehrten Arbeit sein muss. Wird nun das Kraftende des Seils um das Stück s abwärts bewegt, so bewegt sich das Lastende um dasselbe Stück aufwärts. Die Arbeit der Kraft ist demnach ks, die der Last ps. Demnach ist:

$$k.s = p.s; \text{ also } k = p.$$

Bestätigung. Durch den Versuch.

§ 12. **Die lose Rolle.** Gesetz. Bei der losen Rolle ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die Kraft halb so gross wie die Last ist.

Beweis. Die Kraft wirkt am freien Seilende, die Last hängt an der Flasche der Rolle. Bewegt sich die Kraft um das Stück s vorwärts, ist also ihre Arbeit ks, so verkürzen sich die beiden Seile, an welchen die Rolle hängt, ebenfalls um s; jedes also um $\frac{s}{2}$, also hebt sich auch die Rolle und damit die Last um $\frac{s}{2}$; mithin ist die Arbeit, welche die Last erleidet, $p.\frac{s}{2}$ also $k.s = p.\frac{s}{2}$; $k = \frac{p}{2}$.

Bestätigung. Durch den Versuch.

§ 13. Begriffsbestimmungen. Ein System von beweglichen Rollen, bei welchem die Last an der Flasche der ersten Rolle, das freie Ende ihres Seils an der Flasche der zweiten, das freie Seilende dieser an der Flasche der dritten u. s. f. befestigt ist, während die Kraft am letzten Seilende wirkt, heisst ein Potenz-Flaschenzug.

Gesetz. Beim Potenzflaschenzug ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die Kraft sich zur Last wie $1 : 2^n$ verhält, wobei n die Anzahl der beweglichen Rollen bedeutet.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Beweis. Bewegt man das freie Seil um s, so hebt sich die nächste bewegliche Rolle um $\frac{s}{2}$, die folgende um $\frac{s}{2^2}$, die dritte um $\frac{s}{2^3}$ u. s. f., die n^{te}, an welcher die Last hängt, um $\frac{s}{2^n}$; es ist demnach:

$$k.s = p.\frac{s}{2^n};\ k = \frac{p}{2^n}$$

Bestätigung. Durch den Versuch.

Begriffsbestimmung. Ein System von gleichviel festen und beweglichen Rollen, bei welchem die festen und beweglichen Rollen in je einer gemeinschaftlichen Flasche sitzen und das Seil so geführt ist, dass es von der (höher gelegenen) Flasche der festen Rollen abwechselnd über eine lose und eine feste Rolle geht und die Last an der Flasche der beweglichen Rollen hängt, die Kraft aber am freien Seilende wirkt, heisst gewöhnlicher Flaschenzug.

Gesetz. Beim gewöhnlichen Flaschenzuge ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die Kraft gleich dem n^{ten} Teile der Last ist, wobei n die Anzahl der Rollen bedeutet.

Beweis. Wenn sich das freie Seilende um s weiter bewegt, so verkürzt sich jedes der n Seilstücke, an welchen die Last hängt, um $\frac{s}{n}$. Es ist demnach:

$$k.s = p.\frac{s}{n};\ k = \frac{p}{n}.$$

Bestätigung. Durch den Versuch.

Der Hebel.

§ 14. Begriffsbestimmung. Eine gerade unbiegsame Stange, welche um einen Punkt drehbar ist, heisst Hebel. Der Hebel heisst zweiarmig, wenn der Drehpunkt zwischen Kraft und Last, einarmig, wenn er an einer Seite derselben liegt.

Gesetz. Beim Hebel ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die Kraft sich zur Last verhält, wie der Hebelarm der Last zum Hebelarm der Kraft. (Hebelarm heisst der Abstand des Angriffspunktes vom Drehpunkt.)

Beweis. Dreht sich der Hebel um einen gewissen Winkel, so sinkt der Angriffspunkt der Kraft um eine gewisse Höhe, während der der Last um eine andere bestimmte Höhe steigt. Kraft und Last verhalten sich also umgekehrt wie diese Höhen. Aus der Ähnlichkeit der entstandenen Dreiecke folgt aber, dass diese Höhen sich wie die Hebelarme verhalten.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Bestätigung durch den Versuch.

Anwendungen. Wage, Brecheisen, Griff vom Schlüssel, Spaten, Stock zum Tragen, Pumpenschwengel, Thürdrücker, Scheere, Zange, Hebebaum, Tabakmesser, Brodschneidemaschine, Schiebkarre, Schraubenschlüssel, Nussknacker, Unterarm, Schaufel, Sicherheitsventil, Feuerzange, Ruder u. s. w.

Das Wellrad.

§ 15. Begriffsbestimmung. Zwei concentrische Räder, welche auf einer gemeinschaftlichen Axe befestigt sind, und über deren Umfange je eine Schnur (Seil, Kette) gelegt werden kann, bilden ein Wellrad. Die Last hängt an dem kleineren Rade (der Welle), die Kraft wirkt an dem grösseren Rade. (Anstatt der Schnur können auch die Räder mit Zähnen versehen sein.)

Gesetz. Beim Wellrade ist Gleichgewicht vorhanden, wenn sich Kraft zur Last verhält, wie der Radius der Welle zum Radius des Rades.

Beweis. Lässt man das Wellrad eine Umdrehung machen, so ist die Arbeit der Kraft $k . 2R\pi$, die der Last $p . 2r\pi$, demnach

$$k . R = p . r; \quad k : p = r : R.$$

Bestätigung. Durch den Versuch. Anwendungen. Winde, Haspel.

Die schiefe Ebene.

§ 16. Begriffsbestimmung. Eine gegen den Horizont geneigte Ebene heisst schiefe Ebene. Die Höhe des höchsten Punktes heisst Höhe, sein Abstand vom Fusse Länge der schiefen Ebene.

Gesetz. Bei der schiefen Ebene ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die Kraft sich zur Last verhält, wie die Höhe der schiefen Ebene zur Länge derselben.

Beweis. Einer Last p, welche auf der schiefen Ebene von der Länge l und der Höhe h ruht, werde durch eine Kraft k, welche in der Richtung der schiefen Ebene wirkt, das Gleichgewicht gehalten. Bewegt sich nun die Last vom Fusse der schiefen Ebene bis auf deren Höhe, so hat sie die Arbeit $p . h$ erlitten, die Kraft aber hat die Arbeit $k . l$ geleistet. Es ist demnach:

$$p . h = k . l : k : p = h : l.$$

Bestätigung. Durch den Versuch. Anwendungen. Ansteigende Strassen und Eisenbahnen, Laufbrücken bei Bauten, Rampen, Schrotleiter.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Der Keil.

§ 17. Begriffsbestimmung. Der Keil ist ein dreiseitiges Prisma, welches mit einer Kante (der Schneide) in den Spalt eines zu zerkleinernden Körpers hineingesetzt wird. Durch Schläge auf die der Schneide gegenüberliegende Seitenfläche (den Rücken) drängen die beiden anderen Seitenflächen (die Seiten) die Teile des Körpers auseinander.

Gesetz. Beim Keil ist Gleichgewicht vorhanden, wenn sich Kraft zur Last verhält, wie der Rücken zur Seite.

Beweis. Die Druckkräfte, welche den Keil am Eindringen verhindern, können als senkrecht zu den Seiten wirkend angesehen werden. Dringt nun der Keil um seine ganze Länge l ein, so ist die Arbeit der Kraft $k.l$; die Last p wird um das Lot a, welches man von der Mitte des Rückens auf die Seite fällt, zurückgeschoben, die Arbeit, welche sie erleidet, ist demnach pa.

Also: $k.l = p.2a$; $k:p = 2a:l$

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke ergibt sich $2a:l = r:s$, wobei r den Rücken und s die Seite des Keils bedeutet. Also:

$$k:p = r:s$$

Bestätigung. Durch den Versuch. Anwendungen. Scheere Messer, Meissel, die Zähne u. s. w.

Die Schraube.

§ 18. Begriffsbestimmung. Wickelt man ein rechtwinkliges Dreieck um einen Cylinder, dessen Umfang gleich der Basis des Dreiecks ist, so beschreibt die Hypotenuse eine Schraubenlinie. Erhöht man diese Linie, so entsteht eine Schraubenspindel, vertieft man sie, so entsteht eine Schraubenmutter (Scharfes, flaches Gewinde.) Gewöhnlich ist die Schraube mit einem Hebel (dem Schlüssel) fest verbunden, an dessen Ende die Kraft in tangentialer Richtung wirkt.

Gesetz. Bei der Schraube ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die Kraft sich zur Last verhält, wie die Höhe des Schraubengangs zum Umfange des Kraftkreises.

Beweis. Lässt man die Schraube eine Umdrehung machen, so legt die Kraft, wenn die Länge des Hebels R ist, den Weg $2R\pi$ zurück, während die Last sich um die Höhe des Ganges h hebt. Es ist demnach:

$$k.2R\pi = p.h;\ k:p = h:2R\pi.$$

Bestätigung: Durch den Versuch. Anwendungen: Zum Befestigen (die Reibung wirkt als Last), zum Pressen.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

3. Der Schwerpunkt.

§ 19. Versuch. Man schneide aus Pappdeckel eine beliebige Figur, hänge sie an einem durch ein nahe dem Rande befindliches Loch gezogenen Faden auf und zeichne, nachdem sie in Ruhe gekommen ist, die Senkrechte durch den Aufhängepunkt auf die Figur auf. Bringt man nun den Körper aus seiner Lage und lässt ihn los, so kehrt er nach einigem Schwanken in die alte Lage zurück.

Erklärung. Das Gleichgewicht, in welchem ein Körper sich befindet, heisst stabil oder sicher, wenn nach einer Störung desselben der Körper in seine alte Lage zurückkehrt.

Versuch. Man drehe den vorigen Körper um 180° herum, so dass die vorher eingezeichnete Linie in die Richtung des Fadens kommt. Auch jetzt ist Gleichgewicht vorhanden. Die geringste Störung aber bewirkt, dass der Körper umschlägt und in die Lage des sicheren Gleichgewichts übergeht.

Begriffsbestimmung. Das Gleichgewicht, in welchem ein Körper sich befindet, heisst schwankend (labil), wenn die geringste Störung bewirkt, dass der Körper umschlägt und in die sichere Gleichgewichtslage übergeht.

Versuch. Man wiederhole den ersten Versuch dieses Paragraphen, indem man den Aufhängepunkt ändert. Man findet, dass die sämtlichen Senkrechten sich in einem Punkte schneiden. Unterstützt man den Körper in diesem Punkte, so bleibt er in jeder Lage im Gleichgewicht.

Begriffsbestimmung. Der Punkt eines Körpers, in welchem derselbe unterstützt werden muss, um in jeder Lage im Gleichgewicht zu sein, heisst Schwerpunkt. Das Gleichgewicht, in welchem ein Körper sich befindet, heisst unbestimmt (indifferent), wenn eine Lagenveränderung des Körpers dasselbe nicht stört.

Folgerung. Ein Körper befindet sich im sichern Gleichgewicht, wenn er senkrecht über, im schwankenden Gleichgewicht, wenn er senkrecht unter, und im unbestimmten Gleichgewicht, wenn er im Schwerpunkte selbst unterstützt ist.

Anwendungen. Aufhängen der Körper, Stehen derselben, Neigung des Körpers beim Tragen von Lasten, Balanciren.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

4. Bewegung der Körper.

§ 20. Begriffsbestimmungen. Verändern alle Teile eines Körpers ihren Ort, so heisst die Bewegung fortschreitend, verändern einzelne Teile des Körpers ihren Ort nicht, so heisst die Bewegung drehend.

Legt ein Punkt bei seiner Bewegung in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurück, so heisst die Bewegung gleichförmig, im andern Falle heisst sie ungleichförmig.

Bei der gleichförmigen Bewegung heisst Geschwindigkeit der Weg, den der bewegte Punkt in einer Sekunde zurücklegt. Bei der ungleichförmigen Bewegung heisst Geschwindigkeit in einem gegebenen Zeitpunkte der Weg, den der Punkt zurücklegen würde, wenn von diesem Momente an die Bewegung gleichförmig würde. Nimmt bei der ungleichförmigen Bewegung die Geschwindigkeit in jeder Sekunde umgleich viel zu oder ab, so heisst die Bewegung gleichmässig beschleunigt oder gleichmässig verzögert.

§ 21. Gesetz. Wirkt eine Kraft andauernd auf einen Körper, so nimmt der letztere eine gleichmässig beschleunigte Bewegung an. Wirkt eine Kraft andauernd einem in Bewegung befindlichen Körper entgegen, so nimmt er eine gleichmässig verzögerte Bewegung an.

Beweis. Die Wirkung der Kraft ist in jeder Sekunde dieselbe, der Körper aber behält die erlangten Geschwindigkeiten vermöge des Beharrungsvermögens bei. Hat also eine Kraft einem Körper in einer Secunde dieselbe Geschwindigkeit verliehen, so behält er diese und bekommt von der Kraft in der zweiten Sekunde dieselbe Geschwindigkeit hinzu u. s. f. Der Beweis für die verzögerte Bewegung ergiebt sich hiernach leicht. (Zahlenbeispiele!)

Der freie Fall.

§ 22. Erfahrung. Alle Körper, welchen die Unterlage entzogen wird, fallen in einer nach dem Mittelpunkte der Erde gerichteten Geraden (Senkrechten, Lotrechten) der Erde zu.

Folgerung. Alle auf der Oberfläche der Erde befindlichen Körper werden von der Erde angezogen. Die Anziehungskraft wirkt so, als ob sie ihren Sitz im Mittelpunkte der Erde hätte.

Erläuterung. Nach einer von Newton aufgestellten Hypothese (Annahme über die Ursache einer Gruppe von Erscheinungen) ziehen alle im Weltall vorhandenen Massen einander an. Die Erdan-

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

ziehung ist ein besonderer Fall der allgemeinen Anziehung (Allgemeine Schwere, Gravitation). Vergleiche § 8. Wie hängt das im Paragraphen 16 Gesagte hiermit zusammen?

Mitteilung. Die Geschwindigkeit, welche ein Körper beim freien Fall am Ende der ersten Sekunde erlangt hat, beträgt 9,81 (rund 10) m. (Der Beweis folgt später.)

Gesetz. Die Geschwindigkeit eines frei fallenden Körpers nach einer bestimmten Zeit erhält man, wenn man die Geschwindigkeit am Ende der ersten Secunde mit der Zeit (in Secunden) multiplizirt.

Beweis. Da der Körper in der ersten Sekunde eine Geschwindigkeit von 9,81 m erlangt, so erhält er, da die Kraft unaufhörlich wirkt, in jeder Sekunde dieselbe Geschwindigkeit hinzu, hat also am Ende der Zeit so viel mal 9,81 m Geschwindigkeit, als die Zeit beträgt.

Gesetz. Den Weg, welchen ein frei fallender Körper in einer bestimmten Zeit zurücklegt, erhält man, wenn man die mittlere Geschwindigkeit mit der Zeit multiplicirt.

Beweis. Der Weg, den der Körper in der ersten Hälfte der Zeit zurücklegt, ist kleiner, und der Weg, den er in der zweiten Hälfte der Zeit zurücklegt, ist grösser als der Weg, den er zurücklegen würde, wenn er sich dieselbe Zeit gleichförmig mit der mittleren Geschwindigkeit bewegt hätte. Da aber die Geschwindigkeit gleichmässig zunimmt, so ist der erste Weg um eben so viel kleiner als der zweite Weg grösser ist. Der Gesamtweg ist also gerade so gross, als ob der Körper sich die ganze Zeit gleichförmig mit der mittleren Geschwindigkeit bewegt hätte. (Zahlenbeispiele!)

Wurf senkrecht aufwärts.

§ 23. Gesetz. Ein senkrecht in die Höhe geworfener Körper hat eine gleichmässig verzögerte Bewegung. Die Zahl der Secunden, welche er steigt, ergibt sich, wenn man die Anfangsgeschwindigkeit durch die Zahl 9,81 dividirt.

Beweis. Die Anfangsgeschwindigkeit wird durch die Anziehungskraft vermindert und zwar, da die Wirkung dieser Kraft stets dieselbe ist, in jeder Sekunde um 9,81 m. Der Körper steigt also so viel Secunden lang, als 9,81 in der Anfangsgeschwindigkeit enthalten ist.

Aufgaben: 1) Berechne unter Zugrundelegung bestimmter Zahlen die Geschwindigkeit, welche der Körper nach einer gewissen Anzahl von Secunden hat! 2) Berechne den Weg, welchen er in dieser Zeit zurücklegt! (Der Weg ist auch hier gerade so gross, als ob der Körper die ganze Zeit

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

sich gleichförmig mit der mittleren Geschwindigkeit bewegt hätte.) 3) Berechne die Höhe, welche der Körper überhaupt erreicht! 4) Warum erreicht der Körper in Wirklichkeit die berechnete Höhe nicht?

§ 24. **Parallelogramm der Bewegungen.** Erfahrung. Wirken auf einen Körper gleichzeitig zwei Bewegungen ein, so folgt er keiner von beiden, sondern nimmt eine mittlere Bewegung an. Betrachtet man die Bewegung genauer, so findet man, dass der Körper nach Ablauf der betreffenden Zeit in die Ecke des Parallelogramms gelangt, welches man aus den beiden ursprünglichen Bewegungen construiren kann. Beispiel: Ein Schiff bewegt sich vorwärts, gleichzeitig aber verändert ein Gegenstand auf dem Verdeck seinen Ort. (Zeichnung.)

Folgerung. Wirken auf einen Körper zwei Bewegungen gleichzeitig, so bewegt sich derselbe so, dass er in die Ecke des aus beiden Bewegungen konstruirten Parallelogramms gelangt. — Der Ort, den ein Körper infolge mehrerer gleichzeitig auf ihn wirkenden Einzelbewegungen erreicht, kann demnach gefunden werden, indem man diese Bewegungen nach einander die gegebene Zeit hindurch auf ihn wirken lässt.

Wagerechter Wurf.

§ 25. Gesetz. Ein wagerecht geworfener Körper beschreibt eine sich mehr und mehr der Erde nähernde krumme Linie (Parabel).

Beweis. Auf den Körper wirken 2 Bewegungen: 1) Eine gleichförmige in horizontaler Richtung infolge der erteilten Geschwindigkeit; 2) eine gleichmässig beschleunigte in vertikaler Richtung infolge der Erdanziehung. Zeichnet man in verjüngtem Massstabe die Wegstrecken, welche der Körper infolge jeder dieser Bewegungen in den einzelnen Sekunden durchlaufen würde und konstruirt von den zusammengehörigen Punkten aus die Parallelogramme, so ergiebt sich als wirklicher Weg des Körpers die krumme Verbindungslinie der vierten Eckpunkte dieser Parallelogramme.

Aufgabe. Zeichne den Weg des Körpers unter Zugrundelegung bestimmter Zahlen.

Schiefer Wurf.

§ 26. Gesetz. Ein schief aufwärts geworfener Körper beschreibt eine erst steigende, dann wieder fallende krumme Linie (Parabel).

Beweis. Aehnlich dem vorigen.

Aufgabe. Zeichne den Weg des Körpers unter Zugrundelegung bestimmter Zahlen.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Das Pendel.

§ 27. Begriffsbestimmung. Ein im stabilen Gleichgewichtszustand aufgehängter Körper heisst ein Pendel. Besteht das Pendel aus einem kleinen, schweren Körper (Blei- oder Eisenkugel), welcher an einem so leichten Faden hängt, dass man dessen Gewicht gegen das Gewicht des Körpers vernachlässigen kann, so heisst das Pendel einfach.

Versuch. Man hebe ein einfaches Pendel aus seiner Ruhelage und lasse es dann los. Es kehrt in die frühere Lage zurück, geht aber infolge der Trägheit über dieselbe hinaus und erhebt sich auf der anderen Seite fast ebenso hoch, um nun denselben Weg rückwärts zurückzulegen u. s. w.

Folgerung. Die Bewegung eines Pendels ist eine schwingende (oscillirende). Dieselbe würde ewig andauern, wenn nicht Reibung und Luftwiderstand sie allmählich verzehrten.

Begriffsbestimmungen. Der Winkel, den das Pendel in seiner äussersten Lage mit der Senkrechten macht, heisst Schwingungsweite (Schwingungs-Amplitude), die Zeit, welche das Pendel zu einem Hin- und Hergange gebraucht, heisst Schwingungszeit, die Hälfte dieser Zeit heisst Schlagzeit.

Versuch. Man lasse mehrere gleichlange, einfache Pendel aus verschiedenen Stoffen (Holz, Eisen, Blei, Wachs) gleichzeitig schwingen, sie schwingen gleich schnell.

Folgerung. Die Schwingungszeit eines Pendels ist unabhängig von dem Stoffe, aus welchem es besteht.

Versuch. Man lasse dasselbe Pendel mehrmals eine gewisse Zeit hindurch (1 Minute) schwingen, indem man jedesmal die Schwingungsweite grösser nimmt. Die Anzahl der Schwingungen in der gleichen Zeit ändert sich dadurch nicht.

Folgerung. Die Schwingungszeit eines Pendels ist unabhängig von der Schwingungsweite. (Dieses Gesetz gilt, wie im 2. Kursus gezeigt wird, genau nur für kleine Schwingungsweiten.)

Versuche. 1) Man ändere die Pendellänge. Das längere Pendel schwingt langsamer. — Man lasse 3 Pendel, deren Länge sich wie 1:4:9

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

verhalten, eine gewisse Zeit hindurch schwingen und zähle die Anzahl der Schwingungen. Dieselben verhalten sich wie 1 : 2 : 3.

Folgerung. Die Schwingungszeit eines Pendels ist von der Länge abhängig, die Schwingungszeiten ungleich langer Pendel verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen.

Begriffsbestimmung. Fin Pendel, dessen Schlagzeit eine Sekunde beträgt, heisst Sekundenpendel. (Seine Länge beträgt 0,994 m.)

§ 28. Mitteilung. Das Pendel dient wegen der Unabhängigkeit seiner Schwingungszeit von der Schwingungsweite zum Reguliren des Gangs der Uhren. Da der schwere Körper dort nicht mehr an einem Faden hängt, dessen Gewicht zu vernachlässigen ist, so hängt die Schwingungszeit nicht blos von der Länge des Pendels ab, sondern auch von der Form, Grösse und dem Gewichte der einzelnen Teile. Ein solches Pendel schwingt immer langsamer als ein einfaches Pendel von gleicher Länge.

§ 29. Versuch. Man hänge ein Pendel an einer drehbaren Axe auf. (Schwungmaschine, oder in der bei Weinhold angegebenen Weise.) Lässt man das Pendel schwingen und dreht gleichzeitig die Axe, so verändert sich die Schwingungsebene nicht.

Folgerung. Ein schwingendes Pendel sucht seine Schwingungsebene beizubehalten. (Der Foucault'sche Pendelversuch.)

Erläuterung. Die Ursache ist die Trägheit.

Centralbewegung.

§ 30. Erfahrung. Schwingt man einen an einem Faden befestigten Körper (Stein) im Kreise herum, so fühlt man einen Zug an der Schnur, der um so stärker wird, je schneller man dreht. Der Faden kann schliesslich reissen.

Folgerung. Ein Körper, welcher um einen Punkt eine geschlossene Bahn beschreibt, hat das Bestreben, sich von diesem Punkte (Mittelpunkte, Centrum) zu entfernen. Damit er in seiner Bahn bleibt, muss eine Kraft vorhanden sein, welche ihn nach dem Mittelpunkte hinzieht.

Erläuterung. Vermöge der Trägheit hat der Körper das Bestreben, in der Richtung der Tangente weiter zu gehen. Damit er in der Bahn (dem Kreise) bleibt, muss eine nach dem Mittelpunkte gerichtete Kraft vorhanden sein, welche ihn in jedem Momente um eben so viel zurückzieht (bezw. zurückhält), als er sich vermöge der Trägheit aus der Bahn entfernen würde.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

Begriffsbestimmung. Die Kraft, mit welcher ein in einem Kreise sich bewegender Körper vom Mittelpunkte sich zu entfernen strebt, heisst Centrifugalkraft; die Kraft, welche ihn in seiner Bahn hält, heisst Centripetalkraft. Die letztere ist zugleich ein Mass für die erstere.

§ 31. Begriffsbestimmung. Eine Vorrichtung, welche dazu dient, einen Körper in rasche Drehung um eine feste Axe zu versetzen, heisst Schwungmaschine.

Versuch. Setzt man mit der Schwungmaschine eine horizontale Scheibe, auf welcher 3 gleichschwere Kugeln in 3 gleichen, auf einem Radius angeordneten Löchern ruhen, in Drehung, so bleiben bei geringer Geschwindigkeit alle Kugeln liegen, bei zunehmender Geschwindigkeit fliegen sie der Reihe nach, von aussen her gerechnet, ab.

Folgerung. 1. Bei gleichem Radius nimmt die Centrifugalkraft mit der Drehungsgeschwindigkeit zu. 2. Bei gleicher Drehungsgeschwindigkeit nimmt die Centrifugalkraft mit der Entfernung vom Mittelpunkte zu.

Versuch. Setzt man eine wagerechte Stange, auf welcher zwei ungleichschwere, durch einen Faden verbundene Körper (Kugeln oder Holzcylinder) verschiebbar sind, mittels der Schwungmaschine in Drehung um ihre Mitte, so fliegen die Körper nach der Seite des schwereren, wenn sie gleichweit von der Mitte entfernt sind; sie bleiben im Gleichgewicht, wenn die schwerere um eben so viel näher an der Mitte sich befindet, als sie schwerer ist.

Folgerung. Bei gleicher Drehungsgeschwindigkeit nimmt die Centrifugalkraft mit der Masse zu. Sie ist proportional dem Produkte aus Masse und Entfernung.

§ 32. Bestätigende und erläuternde Versuche und Erfahrungen. 1) Versuch zum Beweise der Abplattung der Erde. — 2) Regulator der Dampfmaschinen. — 3) Die Centrifugalkraft vermag die Schwerkraft zu überwinden. (Ein an der Axe der Schwungmaschine aufgehängter Ring stellt sich bei geeigneter Drehungsgeschwindigkeit wagerecht, an welcher Stelle seiner Ebene er auch befestigt sein mag.) — 4) Versuch mit verschieden schweren Flüssigkeiten in einem kugelförmigen Gefäss. — 5) Centrifugal-Trockenmaschine. — 6) Ventilatoren. — 7) Reiten im Kreise, Bogen beim Schlittschuhlaufen, Bogenfahren auf dem Zweirad, Lage der Schienen bei einer Curve der Eisenbahn u. s. w.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

B. Mechanik flüssiger Körper.

Oberfläche.

§ 33. Erfahrung. Die Oberfläche einer ruhenden Flüssigkeit bildet eine wagerechte Ebene (Horizont, Niveau). Wird das Gleichgewicht gestört, so kehren die Teilchen nach längerem Schwingen in die alte Lage zurück.

Erläuterung. Wegen der leichten Verschiebbarkeit der Teilchen rollen dieselben, wenn sie über die wagerechte Ebene erhoben werden, infolge der Schwerkraft so tief wie möglich hinab; die Bewegung wird also aufhören, wenn kein Teilchen mehr im Stande ist, eine tiefere Lage einzunehmen, d. h., wenn die Oberfläche wagerecht ist.

Anwendungen. Wasserwage zum Wagerechtstellen ebener Flächen künstlicher Horizont.

Fortpflanzung des Drucks.

§ 34. Versuche. 1) Schlägt man auf einen senkrecht stehenden Stab von Holz oder Eisen, während man ihn mit der Hand hält, mit einem Hammer, oder übt in anderer Weise in der Längsrichtung einen Druck aus, so spürt man in der Hand nur wenig von diesem Drucke. — 2. Ein kugelförmiges Gefäss, welches eine Anzahl feiner, nach verschiedenen Seiten gerichteter Ausflussöffnungen besitzt, ist mit einem cylinderförmigen Ansatz versehen, in welchem sich ein Kolben wasserdicht bewegen lässt. Füllt man das Gefäss mit Wasser und drückt den Kolben hinein, so strömt das Wasser aus allen erwähnten Oeffnungen mit gleicher Stärke heraus.

Folgerung. Ein auf einen festen Körper ausgeübter Druck pflanzt sich vorzugsweise in der Druckrichtung fort. Ein auf eine Flüssigkeit ausgeübter Druck pflanzt sich nach allen Seiten gleichmässig fort.

Anwendung: 1) **Die hydraulische Presse.** Sie besteht aus zwei cylinderförmigen Gefässen von ungleichem Querschnitt, die derartig mit einander verbunden sind, dass das durch einen im engeren Rohr sich bewegenden Kolben in das weitere Gefäss hereingepresste Wasser beim Rückgange des Kolbens nicht zurückfliessen kann, während durch eine Pumpe neues Wasser in das engere Gefäss hineinströmt. Das Wasser in dem weiteren Rohr schiebt einen Kolben vor sich her, der den gewünschten Druck ausübt.

Gesetz. Bei der hydraulischen Presse ist die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Beweis. Ist beispielsweise der Querschnitt des weiteren Rohrs 100 mal so gross als der des engeren, so verhundertfacht sich der vom Kolben ausgeübte Druck. Drückt nun der Kolben eine bestimmte Wassermenge aus dem engeren Rohr in das weitere hinüber, so verteilt sich diese Wassermenge auf einen hundertmal so grossen Querschnitt, ihre Höhe muss also hundert mal so klein werden, demnach bewegt sich der Kolben in dem weiteren Rohre mit der hundertfachen Kraft, aber nur $^1|_{100}$ so weit, als der in dem engeren Rohre.

Benutzung der hydraulischen Presse: zum Pressen von Heu für den Versand, Auspressen von Tuch, Wolle, des Safts aus Zuckerrüben u. s. w.

2) Probiren der Dampfkessel durch Wasserdruck.

Innere Druckverhältnisse. Boden- und Seitendruck.

§ 35. Gesetz. Bei einer im Gleichgewicht befindlichen Flüssigkeit ist der Druck in jeder wagerechten Schicht überall derselbe; er nimmt aber in den einzelnen Schichten von oben nach unten zu.

Beweis. Wäre der Druck in einer Schicht nicht überall gleich, so würde wegen der leichten Verschiebbarkeit der Teilchen eine Störung des Gleichgewichts eintreten. Der zweite Teil des Gesetzes ist selbstverständlich.

Gesetz. Der Druck auf irgend eine wagerechte Schicht innerhalb einer ruhenden Flüssigkeit (in einem beliebig gestalteten Gefässe) ist gleich dem Gewichte der Flüssigkeitssäule, welche die gedrückte Fläche zur Grundfläche und ihren Abstand von der Oberfläche zur Höhe hat.

Beweis. a) Ist das Gefäss so beschaffen, dass wenigstens eine Flächeneinheit der gedrückten Fläche bis zur Oberfläche eine ununterbrochene Flüssigkeitssäule über sich hat, so ist wegen der senkrechten Richtung der Schwerkraft der Druck auf diese Einheit gleich dem Gewichte der erwähnten Flüssigkeitssäule. Wegen der Gleichheit des Drucks innerhalb derselben wagerechten Schicht ist aber der Druck auf jede andere Einheit (wenn dieselbe auch keine ununterbrochene Flüssigkeitssäule über sich hat) gerade so gross. b) Ist das Gefäss so beschaffen, dass keine Einheit der gedrückten Fläche eine bis zur Oberfläche reichende Flüssigkeitssäule senkrecht über sich hat, so lassen sich immer so viele wagerechte Schichten dazwischen annehmen, dass für jede folgende in Beziehung auf die vorhergehende die erwähnte Bedingung erfüllt ist. Nun pflanzt sich aber der auf der der Oberfläche benachbarten Schicht ruhende Druck unverändert auf die zweite Schicht fort; zu ihm kommt hier der Druck der zwischen der ersten und zweiten Schicht liegenden Flüssigkeitssäule hinzu; diese Drucksumme pflanzt sich unverändert auf die dritte Schicht fort u. s. w. bis zur letzten Schicht.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

§ 36. Folgerungen. 1. Der Druck auf den Boden eines Gefässes ist gleich dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule, welche die Bodenfläche zur Grundfläche und ihren Abstand von der Oberfläche zur Höhe hat. In einem geraden Gefässe ist demnach der Druck auf den Boden gleich dem Gewichte der ganzen Flüssigkeit; in einem nach oben sich erweiternden Gefässe ist er kleiner, in einem nach oben sich verengernden Gefässe ist er grösser als das Gewicht der Flüssigkeit.

Erläuterung. In einem geraden Gefässe sind die senkrecht zu den Seitenwänden stehenden Drucke in derselben Horizontalschicht wagerecht gerichtet, sie heben sich also auf; in einem nach oben sich erweiternden Gefässe sind diese Drucke schräg nach unten gerichtet, sie vermehren also den Druck auf die Wagschale; in einem nach oben sich verengernden Gefässe sind die Seitendrucke schräg nach oben gerichtet, sie vermindern also den Druck auf die Wagschale.

Bestätigender Versuch. Haldatscher Apparat. Eine kurze senkrechte Messingröhre ist oben mit einem Schraubengewinde versehen, in welches Glasgefässe von verschiedener Form eingeschraubt werden können, unten kann sie durch eine mittels eines Hebels anzudrückende Platte geschlossen werden. Füllt man die Gefässe der Reihe nach mit Wasser, so findet man, dass die Bodenplatte jedesmal bei derselben Höhe der Wassersäule abgedrückt wird.

Folgerung 2. Der Druck auf eine Stelle der Seitenwand hängt ebenfalls von der Grösse der gedrückten Fläche und ihrem Abstande von der Oberfläche ab. (Es wird später gezeigt werden, dass hier der Abstand des Schwerpunktes zu nehmen ist.) — Bei einem Gefässe mit geraden Wänden heben sich die Seitendrucke in derselben wagerechten Ebene auf. Vermindert man an einer Stelle durch eine Oeffnung den Druck, so entsteht auf der entgegengesetzten Seite ein Ueberdruck, der sich bei hinreichend beweglichem Gefässe durch eine Bewegung desselben bemerklich macht.

Bestätigende Versuche. 1. Hängt man ein cylinderförmiges Gefäss, welches in der Nähe des Bodens eine Oeffnung hat, an einem Faden auf und füllt es mit Wasser, so weicht es nach der dem ausströmenden Wasserstrahl entgegengesetzten Seite von der senkrechten Richtung ab.

2. Ein um seine senkrechte Axe drehbarer Cylinder ist an seinem unteren Ende mit einer Anzahl wagerechter Ausflussröhren mit seitlichen Ausflussöffnungen versehen. Die Ausflussöffnungen sind alle nach einer Seite gerichtet. Füllt man das Gefäss mit Wasser, so dreht es sich in der den Ausflussöffnungen entgegengesetzten Richtung. Segnersches Wasserrad.

Anwendung. Apparat zum Bespritzen von Rasenflächen, Turbinen.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

§ 37. Versuch. Ein beiderseits offener Glascylinder werde am unteren Ende durch eine in der Mitte an einem Faden befestigte Platte verschlossen, indem man den durch den Cylinder hindurchgehenden Faden anzieht. Alsdann tauche man den Cylinder senkrecht ins Wasser. Der Faden kann jetzt losgelassen werden, da die Platte fest am Cylinder haftet. Um die Grösse des Drucks zu bestimmen, giesse man Wasser in den Cylinder. Die Platte fällt ab, wenn der innere Wasserspiegel nahezu die Höhe des äusseren erreicht hat. (Die Höhe würde genau gleich sein, wenn die Platte kein Gewicht hätte.)

Folgerung. Jede wagerechte Schicht im Innern einer Flüssigkeit erfährt von unten einen Druck, welcher genau gleich dem Drucke ist, den sie von oben erleidet.

Erläuterung. Die Thatsache erklärt sich durch die gleichmässige Druckfortpflanzung.

Zusammenhängende (communicirende) Röhren, Archimedisches Princip. Auftrieb.

§ 38. Gesetz. In zusammenhängenden Gefässen steht dieselbe Flüssigkeit überall gleich hoch.

Beweis. Betrachtet man irgend einen Querschnitt, so muss im Gleichgewichtszustande der Druck von unten gleich dem Drucke von oben sein. Da jeder dieser Drucke aber nur abhängt von der Grösse der gedrückten Fläche und ihrem Abstande von dem entsprechenden Spiegel, die gedrückte Fläche aber dieselbe ist, so müssen auch die Abstände gleich sein.

Bestätigung. Durch den Versuch.

Gesetz. In zusammenhängenden Gefässen verhalten sich die Höhen verschiedener Flüssigkeiten umgekehrt wie die specifischen Gewichte.

Beweis. G sei der Querschnitt, welcher die beiden Flüssigkeiten trennt; sein Abstand von der Oberfläche der Flüssigkeit mit dem specifischen Gewichte L sei H, der entsprechende Abstand in der anderen Flüssigkeit, deren spezifisches Gewicht s ist, sei h. Dann ist der Druck von der einen Seite G . H . S, an der andern G . h . s. Da beide gleich sein müssen, so ist H . S = h . s; H : h = s : S.

Versuch. Ein hohes Gefäss ist in der Nähe des Bodens mit einer seitlichen Ausflussröhre, deren enge Spitze nach oben gerichtet ist, versehen. Füllt man das Gefäss mit Wasser, so erhebt sich aus der Oeffnung ein Wasserstrahl, welcher bis etwa $^2/_3$ Höhe des Wasserspiegels im Gefässe emporsteigt.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

Folgerung. Eine Flüssigkeit, welche unter einem Drucke durch eine Röhrenleitung fliesst, oder frei emporsteigen kann, sucht die frühere Druckhöhe wieder zu erreichen. Infolge der Reibung und des Widerstands der Luft wird die frühere Höhe nicht ganz wieder erreicht.

Anwendung. Springbrunnen, Wasserleitung, Artesische Brunnen.

§ 39. **Das archimedische Princip.** Jeder Körper verliert in einer Flüssigkeit so viel an seinem Gewicht, als die verdrängte Flüssigkeit wiegt.

Beweis. a) Ein prismatischer Körper vom spezifischen Gewichte S, dessen Grundfläche G, dessen Höhe H ist, sei in einer Flüssigkeit vom specifischen Gewichte s so weit eingetaucht, dass seine obere Grundfläche den Abstand h von der Oberfläche hat. Dann erleidet die untere Grundfläche von oben den Druck $G.h.s + G.H.S$ (Gewicht der über dem Körper befindlichen Flüssigkeit vermehrt um das Gewicht des Körpers), von unten erhält sie dagegen den Druck $G.(H+h).s = G.H.s + G.h.s$. Der Ueberschuss des Drucks von oben über den von unten ist demnach $G.H.S - G.H.s$, d. h. Körpergewicht vermindert um das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit.

b) Jeder Körper kann aus unendlich vielen, unendlich niedrigen Prismen zusammengesetzt gedacht werden; daher gilt das Gesetz allgemein.

Bestätigende Versuche. 1) An die eine Seite einer (hydrostatischen) Wage hänge man einen hohlen, unten geschlossenen Cylinder, an diesen einen massiven Cylinder, welcher in die Höhlung des vorigen genau hineinpasst und bringe die Wage ins Gleichgewicht. Stellt man dann unter die Cylinder ein Gefäss mit einer Flüssigkeit derart, dass der massive Cylinder in dieselbe eintaucht, so wird das Gleichgewicht gestört. Es kann dadurch wieder hergestellt werden, dass man den hohlen Cylinder genau bis zum Rande mit Flüssigkeit derselben Art anfüllt. — 2. Man hängt an die eine Seite der Wage mittels eines Fadens einen etwas grossen Körper, bringt ihn ins Gleichgewicht und lässt ihn dann in das im § 9 beschriebene, mit seitlichem Ausfluss versehene Gefäss eintauchen. Zur Wiederherstellung des Gleichgewichts kann man Gewichte wegnehmen oder auf der Seite des Körpers zulegen. Bestimmt man das Gewicht des ausgeflossenen Wassers, so ergibt sich die Gleichwertigkeit desselben mit dem Gewichtsverluste des Körpers.

Anwendung des archimedischen Princips zur Bestimmung des specifischen Gewichts: a) Feste Körper. Man bestimmt das absolute Gewicht und den Gewichtsverlust im Wasser. Da der letztere gleich dem Gewichte eines gleichen Volumens Wasser ist, so ergibt sich das specifische Gewicht durch Division beider Zahlen.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

b) Flüssiger Körper. Man bestimmt den Gewichtsverlust eines beliebigen Körpers einmal in Wasser und dann in der zu untersuchenden Flüssigkeit. Durch Division der letzteren Zahl durch die erstere erhält man das specifische Gewicht.

§ 40. Begriffsbestimmung. Unter Auftrieb im Speciellen versteht man den Ueberschuss des Drucks, den ein in einer Flüssigkeit befindlicher Körper von unten erfährt, über den, welchen er von oben erleidet.

Gesetz. Ein Körper steigt in einer Flüssigkeit, schwebt oder sinkt, je nachdem sein specifisches Gewicht kleiner, gleich oder grösser als dasjenige der Flüssigkeit ist.

Beweis. Das Verhalten des Körpers hängt von seinem Auftriebe ab, welcher nach § 39, wenn mit V das Volumen des Körpers, mit S sein spezifisches Gewicht und mit s das spezifische Gewicht der Flüsssigkeit bezeichnet wird, durch den Ausdruck bestimmt ist: $V.s - V.S = V(s - S)$. Ist der Ausdruck positiv ($S < s$), so ist der Druck von unten grösser, es ist also ein Auftrieb vorhanden, der Körper steigt. Ist der Ausdruck gleich 0 ($S = s$), so sind die beiden Drucke gleich, der Körper schwebt. Ist endlich der Ausdruck negativ ($S > s$), so überwiegt der Druck von oben, der Körper sinkt.

Das Schwimmen der Körper.

§ 41. Gesetz. Das Gewicht der von einem schwimmenden Körper verdrängten Flüssigkeit ist gleich seinem eigenen Gewichte.

Beweis wie in § 39. Der Druck von oben ist aber gleich dem Gewichte des Körpers, der Druck von unten gleich dem Gewichte der verdrängten Flüssigkeit.

Bestätigender Versuch. In das mehrfach benutzte Gefäss mit seitlicher Ausflussöffnung (§ 9) tauche man einen schwimmenden Körper von bekanntem Gewichte. Das Gewicht des ausfliessenden Wassers ergiebt sich als gleich dem Gewichte des Körpers. (Zweckmässig ist der schwimmende Körper ein cylinderförmiges, hohles Blechgefäss, dessen Gewicht man durch hineingelegte Kugeln verändern kann.)

§ 42. Gesetz. Die Volumina, welche derselbe schwimmende Körper in verschiedenen Flüssigkeiten verdrängt, verhalten sich umgekehrt wie die specifischen Gewichte der Flüssigkeiten.

Beweis. Das Gewicht des Körpers sei P, das Volumen der verdrängten Flüssigkeit vom spec. Gew. S sei V, das der Flüssigkeit vom spec. Gew. s sei v. Dann muss nach § 41 $P = V.S = vs$ sein, mithin $V : v = s : S$.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Bestätigender Versuch. In ein mit Weingeist gefülltes grösseres Probierröhrchen tauche man ein kleineres und beschwere es derart mit Schrot, dass es eben noch schwimmt. Dann fülle man das grössere Gläschen mit Wasser, später mit concentrirter Kochsalzlösung und tauche das kleinere wieder hinein. Es wird in den letztgenannten Fällen entsprechend den specifischen Gewichten verschieden hoch emporragen.

Molekularverhältnisse flüssiger Körper. Haarröhrchenkraft (Kapillarität), Lösung, Diffusion, Endosmose.

§ 43. **Haarröhrchenkraft.** Versuch. Taucht man verschieden weite aber enge Röhren in eine in einem weiten Gefässe enthaltene, benetzende Flüssigkeit (Wasser, Weingeist), so steht die Flüssigkeit in den Röhrchen höher als in dem Gefässe und zwar um so höher, je enger das Röhrchen (Haarröhrchen) ist. Die Oberfläche der Flüssigkeit in dem Röhrchen ist eingebogen (concav).

Folgerung. Stehen enge Röhrchen (Harröhrchen) mit der Oberfläche einer Flüssigkeit, welche die Röhrchen netzt, in Verbindung, so steigt die Flüssigkeit in den Röhrchen über den Flüssigkeitsspiegel und zwar um so höher, je enger dieselben sind.

Erklärung. Die Adhäsion an die Röhrchenwand, welche stärker als die Kohäsion der Flüssigkeit ist, zieht die nächstliegenden Teilchen empor. Diese ziehen infolge der Kohäsion die mittleren Teilchen mit. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis das Gewicht der Flüssigkeitssäule gleich den nach oben gerichteten Spannkräften geworden ist.

Versuch. Taucht man dieselben Röhrchen in eine Flüssigkeit, welche sie nicht benetzt, so steht die Flüssigkeit in den Röhrchen tiefer als in dem grossen Gefässe und zwar um so tiefer, je enger die Röhrchen sind. Die Oberfläche der Flüssigkeit in den Röhrchen ist ausgebogen (convex).

Folgerung. In engen Röhrchen, welche in eine sie nicht benetzende Flüssigkeit eintauchen, steht die Flüssigkeit tiefer als in dem umgebenden Gefässe und zwar um so tiefer, je enger die Röhrchen sind.

Erklärung. Da die Kohäsion der Flüssigkeit grösser ist als die Adhäsion an die Wände des Röhrchens, so suchen sich die in der Nähe befindlichen Teilchen zur Kugel zu formen. Infolge dessen entwickeln sich Spannkräfte nach unten, welche die Flüssigkeitssäule hinabdrücken.

Bestätigende Erfahrungen. Aufsaugen des Kaffees durch Zucker, Feuchtwerden der Wände, welche in nassem Boden stehen (Verhinderung), Wirkung des Löschpapiers, des Lampendochts u. s. w.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

§ 44. **Lösungen.** Erfahrung. Verschiedene Stoffe lassen sich in Wasser oder anderen Flüssigkeiten lösen. In einer bestimmten Menge Flüssigkeit von bestimmter Temperatur lässt sich aber nicht mehr als eine bestimmte Menge des Lösungsstoffs auflösen. Bringt man mehr hinein, so bleibt der Rest ungelöst.

Folgerung. Die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und dem Lösungsstoff ist so gross, dass sie die Kohäsion der festen Teilchen des Stoffs überwindet.

Begriffsbestimmung. Eine Lösung heisst gesättigt, wenn die Flüssigkeit keinen Stoff mehr zu lösen vermag; im anderen Falle heisst sie ungesättigt.

Versuch. Man löse 100 bis 200 g Kalisalpeter (oder Alaun) in gleichviel Wasser, indem man die Flüssigkeit erwärmt, und lasse dann die Lösung ohne Erschütterung abkühlen. Es bilden sich viele schöne Krystalle.

Folgerung. Die (meisten) Stoffe lösen sich in der Wärme leichter und in grösserer Menge auf als in der Kälte. — Aus gesättigten Lösungen scheiden sich viele Stoffe, wenn die Flüssigkeit erkaltet oder verdunstet, in Form von Krystallen aus.

§ 48. **Diffusion.** Versuch. Man bringe in ein Fläschchen Wasser und Oel übereinander, in ein anderes Wasser (gefärbt) und Spiritus und lasse dieselben längere Zeit stehen. Wasser und Oel bleiben ungemischt, dagegen durchdringen sich Wasser und Spiritus (unter Raumverminderung, § 6) gegenseitig. (Abänderung: in ein Becherglas schütte man concentrirte Schwefelsäure und darüber Wasser.)

Folgerung und Begriffsbestimmung. Bei manchen Flüssigkeiten ist die gegenseitige Adhäsion grösser als die Kohäsion jeder einzelnen. Das hierdurch veranlasste Uebergehen der einen Flüssigkeit in die andere heisst Diffusion. Solche Flüssigkeiten heissen vollständig mischbar.

§ 46. **Endosmose.** Versuch. In ein Gefäss mit Wasser hänge man einen Lampencylinder, der oben in ein enges Rohr übergeht, unten durch eine Tierblase geschlossen und mit einer concentrirten Lösung von Kupfervitriol bis zur engen Röhre gefüllt ist. Nach einiger Zeit ist die Flüssigkeit in der engen Röhre gestiegen, und das Wasser in dem grossen Gefässe hat sich bläulich gefärbt. (Statt Kupfervitriol kann man irgend eine andere mit Wasser mischbare Flüssigkeit nehmen.)

Folgerung und Begriffsbestimmung. Mischbare Flüssigkeiten mischen sich auch durch eine poröse Scheidewand hindurch. Die Diffusion durch eine poröse Scheidewand heisst Endosmose.

Bedeutung für das Wachstum der Pflanzen.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

C. Mechanik gasförmiger Körper.

§ 47. Vorbemerkung. Da bei den Gasen die Teilchen noch leichter beweglich sind als bei den Flüssigkeiten, so gelten alle Gesetze über flüssige Körper, welche auf der leichten Beweglichkeit der Teilchen beruhen, auch für die Gase; im Besonderen:

1. Ein auf eine Gasmenge ausgeübter Druck pflanzt sich nach allen Seiten hin gleichmässig fort.
2. Alle in derselben Horizontalschicht einer im Gleichgewicht befindlichen Gasmenge gelegenen Teilchen stehen unter demselben Druck.

Die Gase unterscheiden sich von den Flüssigkeiten wesentlich durch die im § 3 nachgewiesene leichte Zusammendrückbarkeit und Ausdehnbarkeit. Hieraus ergeben sich abweichende Erscheinungen.

§ 48. Begriffsbestimmung. Die **Luftpumpe** ist eine Maschine, mittels welcher die Luft aus einem Raume zum grössten Teil entfernt werden kann. Der zu entleerende Raum steht mit einem Cylinder (dem Stiefel), in welchem sich ein Kolben luftdicht auf und ab bewegen lässt, in Verbindung. An der Ansatzstelle der Verbindungsröhre ist ein Hahn angebracht, welcher derartig durchbohrt ist, dass man entweder den Stiefel mit dem zu entleerenden Raume (dem Recipienten) oder mit der äusseren Luft (bei luftdichter Abschliessung des Recipienten) in Verbindung setzen kann.

Wirkung der Luftpumpe. Verbindet man den Stiefel mit dem Recipienten, während der Kolben sich unten befindet, und zieht den letzteren in die Höhe, so verbreitet sich die in dem Recipienten und der Verbindungsröhre enthaltene Luft infolge der Expansion in den Stiefel, wird also verdünnt. Verbindet man jetzt den Stiefel mit der äusseren Luft, wodurch zugleich der Recipient abgeschlossen wird, so treibt der Kolben bei seinem Niedergange die in den Stiefel eingedrungene Luft nach aussen. Verbindet man jetzt wieder den Recipienten mit dem Stiefel und zieht den Kolben in die Höhe, so wiederholt sich der vorige Vorgang und die Luft im Recipienten wird nochmals verdünnt. Durch öftere Kolbenzüge kann man die Verdünnung bis zu einem hohen Grade treiben. (Schädlicher Raum.)

Anmerkung. Wenn eine Wasserluftpumpe vorhanden ist, so nehme man an dieser Stelle den § 62 voraus und benutze für die folgenden Versuche dieses bequemere Instrument.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Gewicht der Luft. Archimedisches Princip.

§ 49. Versuch. Ein kugelförmiges Gefäss, welches durch einen Hahn verschliessbar ist und mit der Luftpumpe verbunden werden kann, werde luftleer gemacht. (Obgleich eine vollständige Leere nicht erzeugt werden kann, so wollen wir doch im Folgenden uns der Kürze halber dieses Ausdrucks bedienen.) Nun wiege man das Gefäss, indem man es an die eine Seite einer Wage hängt. Lässt man darauf die Luft einströmen, so sinkt das Gefäss. Die Zulagegewichte, welche nötig sind, um das Gleichgewicht wieder herzustellen, geben das Gewicht der Luft an.

Anmerkung. Der Versuch kann auch ohne Luftpumpe angestellt werden, indem man eine dünnwandige Kochflasche von mindestens 1 l Inhalt in der in § 4 beschriebenen Weise luftleer macht, wiegt und nachher durch Oeffnen des Quetschhahns die Luft einströmen lässt. Fasst die Flasche 1 l, so muss man 1 g zulegen.

Folgerungen. 1. Die Schwerkraft überwindet die Expansion der Luft. Die Luft ist schwer. 1 l Luft wiegt ungefähr 1 g (genauer 1,293 g).

2. Der Druck auf ein Flächenstück ist gleich dem Gewichte einer Luftsäule, welche die gedrückte Fläche zur Grundfläche und die Höhe der Atmosphäre zur Höhe hat. (§ 36.)

Bestätigende Versuche. 1. Haften des Recipienten am Teller. — 2. Magdeburger Halbkugeln. — 3. Sprengen einer Blase oder Glasplatte. — 4. Quecksilberregen (Hinweis auf § 6). — 5. Umkehren eines gefüllten Wasserglases, nachdem ein Papier über die Oeffnung gelegt worden ist.

3. Jeder Körper verliert in der Luft soviel von seinem Eigengewichte, als die verdrängte Luftmenge wiegt.

Bestätigender Versuch. An einem von einem Säulchen getragenen kleinen, empfindlichen Wagebalken hängt einerseits ein Messinggewicht, andererseits ein hohler, luftdicht verschlossener Glaskörper von solchem Gewichte, dass in der Luft Gleichgewicht vorhanden ist. Bringt man den Apparat (Dasymeter, Baroskop) unter die Glocke der Luftpumpe und entleert, so sinkt der Glaskörper. (Erklärung!)

4. Ein Körper schwimmt in der Luft, sinkt oder steigt, je nachdem sein specifisches Gewicht gleich, grösser oder kleiner als das der Luft ist.

Bestätigender Versuch. Mit Leuchtgas (oder Wasserstoff) gefüllte Seifenblasen steigen. — Luftballon.

§ 50. **Luftpumpenversuche über die Ausdehnbarkeit (Expansion) der Luft.** 1. Eine nur zum Teil mit Luft gefüllte und dann geschlossene Blase dehnt sich unter der Glocke aus, ebenso ein welker Apfel. — 2. Dichter Seifenschaum, welcher ein Gefäss nur teilweise füllt, dehnt sich aus und füllt

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

dasselbe ganz. — 3. Ein nicht ganz mit Wasser gefülltes und dann umgekehrt in ein Gefäss mit Wasser gestelltes Probierröhrchen entleert sich beim Auspumpen und füllt sich beim Wiederzulassen der Luft. — 1. Stellt man ein nicht ganz mit Wasser gefülltes Kölbchen, durch dessen Korkverschluss ein oben in eine Spitze ausgezogenes Röhrchen bis fast auf den Boden reicht (Heronsball), unter die Glocke, so springt beim Entleeren das Wasser in einem Strahl aus der Spitze. — 5. Setzt man in dasselbe Kölbchen statt der Spitze eine Röhre, welche fast bis zum Boden reicht und aussen heberförmig umgebogen ist, so fliesst beim Auspumpen fast sämtliches Wasser aus dem Kölbchen. War das Wasser in ein besonderes Gefäss geflossen, bis zu dessen Boden das Ende des Röhrchens reichte, so tritt beim Wiederzulassen der Luft fast das ganze Wasser wieder in das Kölbchen zurück.

§ 51. Ergänzungsversuch zu § 19. In ein ungefähr 1 m langes Rohr, welches mit der Luftpumpe in Verbindung gesetzt und durch einen Hahn verschlossen werden kann, sind verschiedene schwere Körper hineingebracht (Stückchen von Blei, Holz, Kork, Watte). Pumpt man die Luft aus und kehrt die losgeschraubte Röhre rasch um, so erreichen alle Körper das andere Ende in derselben Zeit.

Folgerung. Im luftleeren Raum fallen alle Körper gleich schnell.

Grösse des Luftdrucks. Barometer.

§ 52. Torricellischer Versuch. Man fülle eine ungefähr 1 m lange Glasröhre, welche an einem Ende (am besten durch Ausziehen) geschlossen ist, mit Quecksilber, verschliesse das offene Ende mit dem Finger und bringe die umgekehrte Röhre mit dem zugehaltenen Ende unter Quecksilber. Nach Wegnahme des Fingers sinkt das Quecksilber so weit, dass der Abstand der Oberfläche des Quecksilbers in der Röhre und derjenigen in dem Gefässe ungefähr 760 mm beträgt. Der obere Raum ist luftleer. (Torricellische Leere.)

Folgerung. Die Luft ist im Stande, einer Quecksilbersäule von 760 mm Höhe das Gleichgewicht zu halten. Der Druck auf 1 qcm beträgt demnach 1,033 kg. Da das Wasser 13,6 mal so leicht ist als das Quecksilber, so hält die Luft einer Wassersäule von $13{,}6 \times 760$ mm $= 10{,}3$ m Höhe das Gleichgewicht.

Bestätigender Versuch. Bricht man nach Ausführung des vorigen Versuchs das obere Ende der Röhre mit einer Drahtzange ab, so dass die Luft zutreten kann, so sinkt das Quecksilber in der Röhre bis zur Oberfläche des Quecksilbers im Gefässe.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

§ 53. Begriffsbestimmung. Eine Torricellische Röhre, welche mit einer Skala zum Ablesen des Abstands der beiden Quecksilberspiegel versehen ist, heisst Quecksilber-Barometer. Der Abstand heisst Barometerstand. Nach der Form unterscheidet man Gefäss- und Heberbarometer. (Feste oder verschiebbare Skala.)

Das Metallbarometer besteht der Hauptsache nach aus einer luftleer gemachten Büchse, deren gewellter Deckel sich bei zunehmendem Luftdrucke etwas einbiegt und bei abnehmendem Luftdrucke durch eine Feder zurückgezogen wird. Die Bewegungen des Deckels werden durch Hebel (bezw. durch Hebel und Rollen) auf einen Zeiger übertragen, dessen Bewegungen an einer Skala abgelesen werden können. Die Graduierung der Skala geschieht nach einem guten Quecksilberbarometer (empirisch).

Anmerkung. Das Metallbarometer ist besonders für Reisen bequemer, bedarf aber einer öfteren Vergleichung mit dem Quecksilberbarometer.

Folgerung. Da mit zunehmender Höhe die drückende Luftsäule abnimmt, so steht das Barometer an höher gelegenen Orten tiefer. Wäre der Barometerstand an allen Punkten gleicher Höhe immer derselbe, so würde die Luft in vollkommener Ruhe sein. Das ist nicht der Fall. Zur Ausgleichung der verschiedenen Druckverhältnisse setzt sich die Luft in Bewegung. (Winde.) Die Ursache der ungleichen Druckverteilung wird in der Wärmelehre erkannt werden.

Beziehung zwischen Druck und Volumen.
Mariottesches Gesetz.

§ 54. Versuch. Eine beiderseits offene, U-förmig gebogene Röhre mit einem längeren und einem kürzeren Schenkel ist derartig an einer senkrechten Latte befestigt, dass die Länge der einzelnen Röhrenteile mittels einer auf der Latte angebrachten Scala bestimmt werden kann. Der kürzere Schenkel ist durch einen Hahn luftdicht verschliessbar. Bringt man bei geöffnetem Hahn Quecksilber in die Röhre, so steht dasselbe in beiden Schenkeln gleich hoch: schliesst man dann den Hahn (sperrt also Luft von dem Drucke einer Atmosphäre ab) und giesst in den längeren Schenkel mehr Quecksilber (oder hebt bei anderer Einrichtung die Oberfläche dieses Quecksilberarms), so findet man, dass bei doppeltem Drucke das Volumen der Luft

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

auf die Hälfte, bei dreifachem Drucke auf ein Drittel des ursprünglichen zusammengedrückt wird u. s. w.

Folgerung. 1. **Mariottesches Gesetz.** Druck und Volumen einer Gasmasse stehen in umgekehrtem Verhältnisse. Das Produkt aus Druck und Volumen ist constant.

2. Das specifische Gewicht eines Gases ist dem Drucke direkt proportional.

Erläuterung. Drückt man eine bestimmte Gasmenge von bekanntem spezifischen Gewichte zusammen, so dass das Volumen nur noch $^1/_2$, $^1/_3$.... $^1/_n$ des ursprünglichen beträgt, so wird das spezifische Gewicht 2, 3...n mal so gross als es ursprünglich war. Diese Volumenänderung wird aber durch den 2, 3...., nfachen Druck bewirkt.

Anmerkung. Das spezifische Gewicht der Atmosphäre nimmt mit der Höhe nach einem bestimmten Gesetze ab. (Barometrische Höhenmessung. Näheres hierüber später.)

Apparate, welche auf dem Luftdrucke und dem Mariotteschen Gesetze beruhen.

§ 55. Der **Heronsball** besteht aus einem teilweise mit Wasser gefüllten Gefässe, durch dessen Hals luftdicht schliessend eine beiderseits offene Glasröhre geht, deren unteres Ende in das Wasser hineinragt, während das obere in eine Spitze ausgezogen ist.

Wirkung. Bläst man in die Röhre hinein, so verdichtet man die Luft; diese treibt dann vermöge ihres grösseren Drucks das Wasser in einem Strahle heraus. (Vergl. § 50.)

Der Heronsbrunnen. Wird das Zusammendrücken der Luft im Heronsball durch den Druck einer Wassersäule bewirkt, so heisst der Apparat Heronsbrunnen.

§ 56. Der **Stechheber** besteht aus einem birnförmigen Gefässe, welches unten konisch in eine Spitze ausläuft und oben mit einer Oeffnung versehen ist, welche beim Halten des Gefässes mit dem Daumen verschlossen werden kann.

Wirkung. Man taucht den geöffneten Heber in die Flüssigkeit, verschliesst die obere Oeffnung mit dem Daumen und hebt den Heber heraus. Es läuft zunächst etwas Flüssigkeit heraus, dann aber bleibt der Rest so lange in dem Heber, als die obere Oeffnung verschlossen ist.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

Erklärung. Im Momente des Herausnehmens erhält die untere Oeffnung von oben den Druck einer Atmosphäre vermehrt um das Gewicht der Flüssigkeitssäule, von unten aber den Druck einer Atmosphäre; es muss also Flüssigkeit herausfliessen. Dadurch wird aber das Volumen der abgeschlossenen Luft vermehrt, ihr Druck also vermindert, so dass bald der Fall eintritt, dass die beiden erwähnten Drucke sich das Gleichgewicht halten.

Anmerkung. Die Anwendung der Pipette beruht auf demselben Vorgange. In der Regel wird hier die Luft im Innern erst durch Saugen verdünnt.

§ 57. Der Saugheber besteht aus einer U-förmig gebogenen beiderseits offenen Röhre, welche dazu dient, Flüssigkeit aus einem höher gelegenen Gefässe in ein tiefer liegendes überzuführen.

Wirkung. Man setzt den Heber mit dem einen Ende in das zu entleerende Gefäss und saugt an dem tiefer als der Wasserspiegel gelegenen anderen Ende. Der Heber füllt sich, und die Flüssigkeit läuft ununterbrochen aus, so lange als das Ausflussende tiefer liegt als der Flüssigkeitsspiegel in dem Gefässe. Anstatt zu saugen, kann man auch den Heber mit Flüssigkeit füllen und die Oeffnungen so lange zuhalten, bis er in die Flüssigkeit eingesetzt ist. Der Heber hört auf zu fliessen, wenn die Ausflussöffnung eben so hoch liegt als der Flüssigkeitsspiegel im Gefässe; die Flüssigkeit fliesst rückwärts (der Heber entleert sich), wenn die Oeffnung höher liegt als der Spiegel.

Erklärung. Liegt der höchste Punkt des Hebers um die Höhe h über dem Spiegel des Gefässes und um h' über der Ausflussöffnung, so erhält die letztere von oben den Druck einer Atmosphäre vermehrt um eine Flüssigkeitssäule $h' - h$, von unten dagegen nur den Druck einer Atmosphäre. So lange $h' > h$ ist, ist also von oben ein Ueberdruck vorhanden.

Anmerkung. Die Röhre kann durch einen Schlauch ersetzt werden. Giftheber.

§ 58. Die **Sturzflasche** dient dazu, um den Spiegel einer ausfliessenden Flüssigkeit längere Zeit auf derselben Höhe zu erhalten (z. B. beim Filtrieren).

Wirkung. Die zu filtrierende Flüssigkeit wird in eine Kochflasche gegeben; die letztere wird dann mit dem Finger oder einem Stück Papier geschlossen, umgekehrt und mittels eines Retortenhalters so in dem Trichter befestigt, dass die Mündung in die Höhe des beabsichtigten Spiegels kommt. Zunächst füllt die Flüssigkeit den

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Trichter bis zur Mündung der Sturzflasche; fliesst dann Flüssigkeit durch den Trichter ab, so ergänzt sie sich aus der Sturzflasche, indem als Ersatz Luftblasen in dieselbe hineinsteigen.

§ 59. Die **Mariottesche Flasche.** Dieselbe besteht aus einer Flasche mit seitlicher Ausflussöffnung. Durch den Hals geht luftdicht ein beiderseits offenes Glasrohr, welches bis in die Flüssigkeit ragt.

Wirkung. Lässt man die Flüssigkeit ausströmen, so bleibt der Strahl so lange unverändert (fliesst unter demselben Druck aus), als der Spiegel der Flüssigkeit das untere Ende des Glasrohrs noch nicht erreicht hat.

Erklärung. Zunächst steht die Flüssigkeit in der Röhre ebenso hoch als in der Flasche; sobald aber Flüssigkeit ausströmt, dehnt sich die Luft über derselben aus; infolge dessen überwiegt der äussere Luftdruck und es strömt Luft durch die Röhre in die Flasche. Es muss mithin der Druck, welchen die eingeschlossene Luft und die über dem unteren Ende der Röhre befindliche Flüssigkeitssäule auf dieses und damit auf jeden Flächenteil der durch das Ende gehenden Horizontalschicht ausüben, gleich dem von aussen stammenden Druck der Atmosphäre sein. Der Druck an der Ausflussöffnung ist daher um das Gewicht der Flüssigkeitssäule, welche den Abstand dieser Oeffnung von der unteren Oeffnung der Röhre zur Höhe hat, grösser als eine Atmosphäre. — Schiebt man die Röhre so tief hinab, dass ihre untere Oeffnung in die Höhe der Ausflussöffnung zu liegen kommt, so hört das Fliessen auf.

§ 60. Der **Kartesianische Taucher.** Derselbe ist ein kleiner, unten mit einer kleinen Oeffnung versehener und so weit mit Wasser gefüllter Hohlkörper, dass er eben noch schwimmt.

Wirkung. Setzt man denselben in einen mit Wasser gefüllten Glascylinder, über welchen eine Tierblase gespannt ist, und drückt auf die Blase, so taucht er unter.

Erklärung. Der auf die Tierblase ausgeübte Druck pflanzt sich durch das Wasser auf die Luft im Taucher fort; dieselbe wird zusammengepresst und es dringt mehr Wasser in den Taucher ein; dadurch wird er schwerer und sinkt. Lässt der Druck nach, so dehnt sich die Luft im Taucher wieder aus, treibt Wasser hinaus und macht den Taucher leichter.

Anmerkung. In der Regel haben die Taucher die Gestalt kleiner Teufelchen.

§ 61. Die **Saugpumpe** besteht aus einem cylinderförmigen Rohre (dem Stiefel), in welchem sich ein Kolben luftdicht auf- und

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

abbewegen lässt und welches nach unten in ein in das Wasser reichendes Saugrohr übergeht. In dem durchbohrten Kolben und zwischen Saugrohr und Stiefel befindet sich je ein Ventil, welches sich nur nach oben öffnen kann. Im oberen Teile des Stiefels, etwas über der Hubhöhe des Kolbens, befindet sich ein seitliches Ausflussrohr.

Wirkung. Zieht man den Kolben in die Höhe, so entsteht unter ihm ein luftverdünnter Raum. Infolge dessen treibt der äussere Luftdruck das Wasser in dem Saugrohre in die Höhe. Geht der Kolben wieder hinunter, so schliesst sich das Saugventil und die Luft im Stiefel entweicht durch das Kolbenventil. Bei weiteren Kolbenzügen tritt das Wasser in den Stiefel, dann über den Kolben und wird beim Aufgange des letzteren bis zur Ausflussöffnung gehoben.

Die **Druckpumpe** weicht von der Saugpumpe darin ab, dass der Kolben massiv ist, das seitliche Ausflussrohr im oberen Stiefel fortfällt, am unteren Ende des Stiefels aber ein nach aussen und oben führendes Rohr, welches gegen den Stiefel durch ein nach aussen sich öffnendes Ventil verschlossen werden kann, angesetzt ist.

Wirkung. Sobald Wasser über das Saugventil getreten ist, wird es beim Niedergange des Kolbens durch das seitliche Ventil in das Steigrohr gepresst und kann wegen des Ventilverschlusses nicht mehr zurück.

Anmerkung. Das Saugrohr einer Pumpe darf nach dem Früheren nicht über 10 m hoch sein.

Die **Feuerspritze** besteht aus einer Druckpumpe in Verbindung mit einem Heronsball (Windkessel). Die Druckpumpe treibt das Wasser zunächst in den Windkessel; aus ihm wird es dann durch den Druck der zusammengepressten Luft in den Spritzenschlauch hineingepresst. In der Regel sind 2 Druckpumpen in der Art mit einander verbunden, dass beim Niedergange des einen Kolbens der andere sich hebt. Hierdurch wird ein regelmässigeres und reichlicheres Ausströmen veranlasst.

Saugerscheinungen beim Ausströmen.

§ 62. Versuche. 1. Bläst man mit einem Röhrchen an einer Flamme vorbei (wobei man die Spitze des Röhrchens etwas über die Flamme hinaushält), so neigt sich die Flamme nach dem Luftstrom hin. — 2. Ein sich erweiterndes Rohr hat am Anfange der Erweiterung ein rechtwinkeliges Ansatzrohr, welches in Wasser reicht. Bläst man nun vom engeren Teile des Rohrs her kräftig in dasselbe hinein, so steigt das Wasser in dem Ansatzrohre in die Höhe. — 3. Bläst man über die Mündung eines in eine

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Spitze auslaufenden Röhrchens, welches in ein Gefäss mit Flüssigkeit taucht mittels eines zweiten Röhrchens einen kräftigen Luftstrom, so steigt die Flüssigkeit in dem ersten Röhrchen (Zerstäubungs-Apparat, Inhalations-Apparat). — 4. Lässt man durch die in 1 beschriebene Röhre einen Wasserstrahl voll ausfliessen (was dadurch zu erreichen ist, dass man die Oeffnung für einen Augenblick zuhält), so steigt ebenfalls das Wasser in dem Ansatzrohre.

Folgerung. Geht ein Strom tropfbarer Flüssigkeit oder eines Gases aus einer Röhre in eine weitere oder in die freie Luft über, so entsteht infolge der verminderten Geschwindigkeit der Teilchen in der Nähe der Uebergangsstelle eine Saugwirkung.

Bestätigender Versuch von Clément und Deformes. Eine Pappscheibe ist in der Mitte mit einem Loch und einem in dasselbe mündenden Ansatzrohre versehen; eine zweite Pappscheibe ist durch 3 Stifte mit der ersten so verbunden, dass sie sich längs dieser Stifte etwas verschieben kann. Hält man den Apparat senkrecht (so dass die Scheiben wagerecht liegen) und bläst durch das Röhrchen gegen die bewegliche Scheibe, so wird dieselbe entgegen der Schwere gegen die feste Scheibe gedrückt.

Anwendungen. 1. Die Zerstäubungs- und Inhalations-Apparate.

2. Die **Wasserluftpumpe.** Sie besteht aus zwei birnförmigen Gefässen, die in folgender Weise mit einander und mit dem zu entleerenden Gefässe verbunden sind. Das obere Gefäss kann durch ein Ansatzröhrchen mittels Gummischlauch mit dem zu entleerenden Raume verbunden werden. Unten läuft es in eine Spitze aus, die in das zweite Gefäss hineinragt. Sie wird dort umschlossen von dem oberen, trichterförmig erweiterten Ende einer Röhre, welche mittels eines Schraubengewindes im Boden des Gefässes befestigt ist. Das zweite Gefäss lässt sich mittels eines seitlichen Ansatzes mit der Wasserleitung in Verbindung setzen.

Wirkung. Lässt man das Wasser in das untere Gefäss einströmen, so dringt es in den Trichter ein und reisst die Luft aus der Spitze mit sich fort.

Molekularverhältnisse gasförmiger Körper.

Versuch. Man fülle ein Probiergläschen, welches mit der abwärts gekehrten Oeffnung in Quecksilber taucht, mit Kohlensäure. (Herstellung, indem man in einen Gasentwicklungsapparat eine Anzahl haselnussgrosser Stücke Marmor, oder ungebrannten Kalk oder allenfalls Kreide bringt, die Flasche halb mit Wasser füllt und dann langsam Salzsäure zusetzt.) Bringt man dann ein Stückchen ausgeglühter Holzkohle in das Gläschen hinein, so füllt nach kurzer Zeit das Quecksilber fast das ganze Gläschen aus.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

Folgerung. Gasförmige Körper werden von festen verschluckt (absorbirt). Besonders stark ist das Absorptionsvermögen der Holzkohle gegenüber Kohlensäure.

Versuch. Schreibt man auf eine reine Glastafel (die jedoch nicht frisch geputzt sein darf) und haucht darauf, so erscheinen die Schriftzüge.

Erklärung. Durch das Schreiben hat man die am Glase haftende Luft weggekratzt, infolge dessen schlägt sich der Wasserdampf an dieser Stelle anders nieder als an den mit Luft bedeckten. Hauchbilder.

Folgerung. Gasförmige Körper adhärieren an festen.

Bestätigende Erfahrung. Das Hängen des Nebels und der Wolken an Bäumen und Bergen.

Versuche. 1. Man erwärme frisches Wasser in einem Probierglase (nicht zum Kochen); es steigen eine Menge Luftblasen auf. — 2. Man bringe frisches Wasser unter die Glocke der Luftpumpe und pumpe aus. Die vorige Erscheinung findet in verstärktem Masse statt. — 3. Man fülle ein Probierglas (welches man eben noch mit dem Daumen schliessen kann unter Wasser zu $^3/_4$ mit Kohlensäure, verschliesse die Oeffnung mit dem Daumen, hebe das Glas heraus und schüttle Gas und Wasser durch einander. Senkt man das Glas jetzt wieder in umgekehrter Lage in die Flüssigkeit hinein, so sieht man, dass die Kohlensäure weniger Raum einnimmt. Wiederholt man den Versuch mehrmals, so erfüllt schliesslich das Wasser fast das ganze Gefäss.

Folgerung. Auch zwischen flüssigen und gasförmigen Körpern findet Adhäsion statt. (Das Gas wird gebunden.)

Anwendung. Kohlensäurehaltige Getränke.

§ 64. Versuche. 1. Man füllt ein grosses Glas mit Kohlensäure, indem man den Schlauch des Kohlensäure-Entwicklungs-Apparats bis zum Boden desselben führt. (Nachweis, dass das Gefäss gefüllt ist, mittels einer brennenden Kerze.) Lässt man das Gefäss ruhig stehen, so befindet sich (wie man auf dieselbe Weise nachweisen kann) nach einiger Zeit keine Kohlensäure mehr darin. — 2. Durch den Kork eines Heronsballs geht ein zweites langes Rohr, welches die Luft in dem Heronsball mit derjenigen in einem auf dem andern Ende des Rohrs aufgesteckten, oben geschlossenen Toncylinder in Verbindung setzt. (Durch einen Retortenhalter wird das Rohr in senkrechter Stellung gehalten.) Stülpt man nun über den Toncylinder ein unten offenes Gefäss, welches durch einen Verbindungsschlauch mit der Gasleitung in Verbindung gesetzt werden kann, und lässt Gas einströmen, so fängt der Heronsball an zu springen. (Das Gas diffundiert durch die Poren der Scheidewand in die Luft des Tongefässes und vermehrt dadurch den Druck der Luft im Heronsball derart, dass das Wasser in einem Strahl hinausgetrieben wird.)

Folgerung. Gase diffundieren sehr leicht, auch durch poröse Scheidewände hindurch.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

III. Die Lehre vom Schall (Akustik).

1. Entstehung des Schalls.

§ 1. Beobachtung. Der Schall geht immer von einem tönenden Körper aus. Durch das Gefühl kann man wahrnehmen, dass der letztere in zitternder Bewegung ist. (Resonanzboden, Kasten einer Geige, Stiel einer Stimmgabel, Glocke u. s. w.) Hält man die schwingenden Teile fest, so hört der Schall auf.

Folgerung. Der Schall entsteht durch schwingende Bewegungen eines Körpers.

2. Fortpflanzung des Schalls.

§ 21. Versuch. Ein durch mechanische Vorrichtung längere Zeit tönender Körper wird unter die Glocke einer Luftpumpe gebracht. Darauf wird dieselbe leer gepumpt, nachher dann die Luft wieder zugelassen. Man hört den Schall allmählich abnehmen und schliesslich fast ganz verschwinden. Beim Zulassen der Luft nimmt er wieder zu bis zur alten Stärke.

Folgerung. Der Schall wird hauptsächlich durch die Luft bis zu unserem Gehörorgan fortgepflanzt. Die Schwingungen des tönenden Körpers müssen sich auf die Luft, die der Luft auf das Trommelfell und die des Trommelfells endlich durch Vermittelung des übrigen Gehörapparats auf die Enden des Gehörnerven übertragen.

Versuch. Man lege eine Uhr in solcher Entfernung auf eine Tischplatte, dass man am Ende derselben das Ticken durch die Luft gar nicht oder nur sehr schwach hören kann, darauf lege man das Ohr an diesem Ende auf die Tischplatte. Man hört jetzt das Ticken der Uhr ganz deutlich durch das Holz. (Statt des Tickens der Uhr kann auch eine andere Schallerregung benutzt werden.)

Folgerung. Der Schall pflanzt sich auch durch feste Körper fort.

Beobachtung. Schlägt man unter Wasser 2 Steine oder sonstige harte Gegenstände an einander, so hört man den Schall deutlich ausserhalb des Wassers.

Folgerung. Der Schall pflanzt sich auch durch flüssige Körper fort.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Vergleichung der Schallbewegung in der Luft mit der Wellenbewegung des Wassers.

§ 3. 1. Mitteilung. Sorgfältige Versuche haben ergeben, dass die Wasserwellen durch kreisförmige Bewegung der einzelnen Teilchen, so zwar, dass jedes folgende Teilchen seine Bewegung etwas später anfängt als das vorhergehende, zu Stande kommen.

Zeichnung. Durch eine Reihe von Zeichnungen wird erläutert, wie auf die erwähnte Weise Wasserwellen zu Stande kommen.

Benennungen. Die Erhöhungen heissen Wellenberge, die Vertiefungen Wellenthäler; ein Wellenberg und ein Wellenthal machen zusammen eine Welle (Wellenlänge) aus.

Folgerung. Die Welle schreitet vorwärts, die einzelnen Teilchen dagegen verlassen, abgesehen davon, dass sie eine Kreisbahn durchlaufen, ihren Ort nicht.

Bestätigung. Ein auf dem Wasser schwimmendes Stück Holz, unter welchem Wellen sich fortbewegen, schwimmt nicht vorwärts, sondern geht nur auf und ab.

---

1. Zeichnung. Durch eine Reihe von Zeichnungen wird erläutert, wie durch einen schwingenden Körper die Luft zusammengedrückt wird, wie infolge der Elasticität der Luft diese Verdichtung fortschreitet, wie endlich infolge des Zurückschwingens des tönenden Körpers hinter der Verdichtung eine Verdünnung entsteht, die dann ebenfalls fortschreitet.

Folgerung. Die Schallwellen in der Luft kommen dadurch zu Stande, dass die einzelnen Teilchen nach einander sich in geraden Linien und zwar in der Richtung, in welcher der Schall sich fortpflanzt, hin- und herbewegen (schwingen). Dadurch entstehen Verdichtungen und Verdünnungen, welche in gleichen Abständen hinter einander herziehen. Die Verdichtungen und Verdünnungen liegen bei gleichmässiger Beschaffenheit der Luft auf concentrischen Kugelschalen, die sich stetig erweitern. Die Verdichtungen entsprechen den Wellenbergen, die Verdünnungen den Wellenthälern.

---

3. Versuch mit dem Luftstossapparat. Ein cylinderförmiges Blechgefäss, welches an dem einen Ende durch einen in der Mitte mit einem kreisförmigen Loche versehenen Blechdeckel, an dem anderen Ende durch ein Trommelfell geschlossen ist, wird mit Rauch gefüllt. Schlägt man mit einem Klöppel gegen die Mitte des Fells, so entsteht ein Schall, während aus der gegenüberliegenden Oeffnung ein Rauchring herausgestossen wird. — Man hört den Schall, ehe der Rauchring die Stelle erreicht, an der wir uns befinden. Eine Kerzenflamme, welche in die Richtung der Axe des Instru-

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

ments gestellt wird, zuckt zusammen, sobald der Schall ertönt, sie wird aber erst zur Seite oder gar ausgeblasen, wenn der Rauchring sie erreicht (was später geschieht).

Folgerung. Die Schnelligkeit, mit welcher der Schall sich fortpflanzt, ist grösser als diejenige, mit welcher der aus der Oeffnung herausgetriebene Luftstrom sich vorwärts bewegt.

Geschwindigkeit der Fortpflanzung.

§ 4. Beobachtung. Bei geringen Entfernungen nehmen wir keinen Zeitunterschied zwischen dem Sehen der Schallerregung und der Empfindung des Schalls wahr. Bei grösseren Entfernungen verfliesst zwischen der Gesichts- und Gehör-Wahrnehmung eine merkbare Zeit.

Folgerung. Der Schall pflanzt sich ziemlich schnell, aber viel langsamer fort als das Licht.

Mitteilung. Nach genauen Versuchen ist die Geschwindigkeit des Lichts (40000 Meilen in der Secunde) so gross, dass die Zeit, welche das Licht gebraucht, um irdische Entfernungen zu durchlaufen, als Null angesehen werden kann. (Sie ist für uns unmessbar.)

Folgerung. Die Zeit, welche zwischen der erwähnten Gesichts- und Gehörs-Wahrnehmung verfliesst, kann als die Zeit angesehen werden, welche der Schall gebraucht, um die zwischen dem Beobachter und dem schallerregenden Körper liegende Strecke zu durchlaufen. Misst man diese Strecke und die Zeit genau, so kann man daraus die Geschwindigkeit des Schalls berechnen.

Mitteilung. Durch genaue Beobachtung der Zeit, welche zwischen dem Sehen des Blitzes und dem Hören des Knalls einer in einer grossen, aber genau gemessenen Entfernung abgefeuerten Kanone verging, hat man die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft zu durchschnittlich 340 m in der Secunde gefunden. (In kälterer Luft ist sie etwas kleiner.)

Fortpflanzung des Schalls in festen Körpern.

§ 5. Versuch. Mit einem guten Fadenfernsprecher werden Versuche auf Entfernungen gemacht, in welchen der erzeugte Schall durch die Luft nicht mehr hörbar ist. Durch den Fernsprecher wird der Schall deutlich vernommen (Flüstern, leises Klopfen).

Folgerung. Der Schall pflanzt sich in festen Körpern besser fort als in der Luft.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

Bestätigende Versuche. Nimmt man einen Faden, an welchem ein Metallstab (Stocheisen) befestigt ist, zwischen die Zähne und schlägt mit einem metallenen Gegenstand gegen den frei hängenden Stab, so hört man den Ton von der Stärke eines Glockentons. Hält man eine Uhr an die Stirn oder nimmt sie zwischen die Zähne, so hört man das Ticken viel stärker als durch die Luft u. s. w.

Fortpflanzung des Schalls in Röhren.

§ 6. Beobachtung. Das an einem Ende eines Schallrohrs, welches verschiedene Räume eines Hauses mit einander verbindet, gesprochene Wort wird an dem anderen Ende mit fast unverminderter Stärke vernommen. Schwerhörige hören viel besser, wenn sie das Ende einer Röhre an das Ohr halten, in deren anderes Ende hineingesprochen wird. (Hörrohr.) Mittels eines Sprachrohrs kann man sich auf viel weitere Entfernuugen vernehmbar machen als ohne dasselbe.

Folgerung. Die Stärke des Schalls nimmt wenig ab, wenn er sich nicht nach allen Seiten ausbreiten kann. — Zum Teil beruht hierauf die bessere Fortleitung des Schalls in festen Körpern. — Grund. Wenn der Schall sich ungehindert ausbreiten kann, so setzt die ursprüngliche Schwingung eine viel grössere Anzahl von Luftteilchen in Bewegung, als wenn die Fortpflanzung auf eine Richtung beschränkt bleibt; infolge dessen muss im ersten Falle die Bewegung der einzelnen Teilchen schwächer sein als im zweiten Falle.

Zurückwerfung des Schalls.

§ 7. Versuch. Man klopfe auf den einen Resonanzkasten eines Fadenfernsprechers, bei welchem der Faden durch einen Eisendraht von einigen 100 m Länge ersetzt ist, mit einem Stäbchen einmal kräftig auf. Der Schlag wird an jedem Ende 6 bis 8 mal gehört.

Folgerung. Trifft der Schall auf eine feste Grenze, so wird er zurückgeworfen.

Beobachtuug. Erzeugt man in grösserer Entfernung von einem Hause, einer Felswand, einem Waldrande einen Ton, so hört man denselben einmal oder (bei grösserer Entfernung) mehrmals von der festen Fläche zurückkommen.

Folgerung. Treffen die Schallwellen in der Luft auf eine feste Wand, so werden sie von derselben zurückgeworfen. Echo (einfaches, mehrfaches, einsilbiges, mehrsilbiges).

Beobachtung. Erzeugt man nahe an einer solchen Wand einen Ton, so hört man kein Echo, höchstens einen Nachhall.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Folgerung. Bei kleinerer Entfernung von der zurückwerfenden Wand durchläuft der Schall den Weg so schnell, dass das Echo so kurz nach dem Ton unser Ohr erreicht, dass dasselbe nicht getrennt von demselben wahrgenommen werden kann.

Mitteilung. Genaue Versuche haben gezeigt, dass zwischen 2 Schallerregungen mindestens ein Zeitraum von $^1/_{10}$ Sekunde verfliessen muss, wenn dieselben getrennt empfunden werden sollen.

Folgerung. Ein Echo kann erst entstehen, wenn die zurückwerfende Wand mindestens 17 m von dem Beobachter entfernt ist. Ist die Wand nicht ganz 17 m entfernt, so entsteht ein Nachhall. (Grössere Räume, Säle, Kirchen. Verhinderung desselben durch Zerstreuen der Schallwellen.)

3. Die Töne.

Entstehung der Töne.

§ 8. Versuch. Eine Scheibe, welche derart mit concentrischen Lochreihen versehen ist, dass die Löcher in jeder Reihe gleichen Abstand von einander haben, kann um eine durch den Mittelpunkt gehende Axe gedreht werden; bläst man nun, während die Scheibe erst langsam, dann immer schneller gedreht wird, mittels eines Röhrchens gegen eine Reihe, so hört man zuerst nur einzelne Luftstösse, dann einen tiefen Ton, der bei der Zunahme der Drehung immer höher wird. Einfache Lochsirene.

Folgerung. Ein Ton entsteht durch regelmässige, schnell auf einander folgende Verdichtungen und Verdünnungen der Luft (schnelle, regelmässige Schwingungen); seine Höhe hängt von der Zahl der Stösse (Schwingungen in einer bestimmten Zeit — Sekunde —) ab. Der Ton ist um so höher, je grösser seine Schwingungszahl ist.

Anmerkung. Bei schiefer Bohrung der Löcher kann die Scheibe durch den aus einem Windkasten in zweckmässiger Weise durch die Löcher geleiteten Luftstrom selbst in Bewegung gesetzt werden. Regelmässige Luftstösse können auch durch die gegen ein Kartenblatt anschlagenden Zähne eines um seine Axe drehbaren Zahnrads erzeugt werden. Savarts Zahnradsirene. Die Sirenen sind häufig mit einem Zählwerk verbunden, um die Schwingungszahl der Töne bestimmen zn können. Grenzen der Hörbarkeit (16 u. 40000 Schwingungen in der Sekunde).

Consonante Töne.

§ 9. Versuch. Hat eine Sirene 4 Lochreihen, deren Lochzahlen sich wie 4:5:6:8 verhalten, so giebt die zweite Reihe die Terz, die dritte die Quint

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

und die vierte die Octave des durch die erste Reihe erzeugten Tons (Grundtons), welche Höhe dieser auch haben mag. Werden 2 dieser Töne gleichzeitig angeblasen, so machen sie einen angenehmen Eindruck auf unser Ohr (Consonanz), alle zusammen erzeugen den Dur-Accord. Der dritte Ton steht zum zweiten im Verhältnis der kleinen Terz, der vierte zum zweiten im Verhältnis der Quart.

Folgerung. Die Schwingungszahlen consonanter Töne stehen im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen (1 bis 6, Pythagoras), und zwar macht die kleine Terz $^6/_5$, die grosse $^5/_4$, die Quart $^4/_3$, die Quint $^3/_2$ und die Octave 2 mal so viel Schwingungen als der Grundton.

Tonerregung durch Transversalschwingungen.

§ 10. **Platten.** Versuch. Platten, die an einem Punkte in horizontaler Lage festgeklemmt und mit einem Violinbogen angestrichen werden, erzeugen Töne. Streut man Sand auf die Platten, so sammelt sich derselbe in bestimmten Linien, die bei demselben Ton immer denselben Verlauf zeigen. Jede Platte kann bei derselben Befestigung durch passende Berührung mit dem Finger verschiedene Töne erzeugen. Ändert man den Befestigungspunkt, so ändert sich die Tonreihe.

Folgerung. Eine tönende Platte schwingt in mehreren Abschnitten, die durch ruhende Linien (Knotenlinien) getrennt sind. Die Teilchen eines Abschnitts schwingen gleichzeitig nach oben und unten, die des benachbarten Abschnitts entgegengesetzt. Die Zahl der Abschnitte wächst mit der Höhe des Tons.

Begriffsbestimmung. Schwingungen eines Körpers, bei welchen einzelne Teilchen in Ruhe bleiben, die zwischenliegenden aber gleichzeitig ihre Schwingungen vollführen, heissen stehende Schwingungen. Geschehen die Schwingungen in der Richtung der Verbindungslinie zweier benachbarten Teilchen, so heissen die Schwingungen longitudinal; geschehen sie quer zu dieser Verbindungslinie, so heissen sie transversal.

Versuch. Eine mit einem Fusse versehene, nach oben offene Glasglocke fülle man zu $^2/_3$ mit Wasser und streiche den Rand mit einem Fidelbogen an. Im Wasser bilden sich dann von 4 gleichen Abschnitten der Glockenwand aus 4 Wellensysteme, die sich in 4 Knotenlinien schneiden. Durch angemessene Berührung des Randes mit 2 Fingern kann man eine grössere Anzahl Knotenlinien und höhere Töne erzeugen.

Folgerung. Eine Glocke kann als eine gewölbte Platte angesehen werden.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

§ 11. **Stäbe.** Versuch. Befestigt man einen Stab an einem Ende (Stricknadel) und schlägt ihn an, so giebt er einen Ton. Der Ton wird höher, wenn man den Stab in einem $^1/_4$ bis $^1/_5$ seiner Länge vom Ende entfernten Punkte befestigt und in der Mitte anschlägt.

Folgerung. Stäbe können mit 1, 2 u. s. w. Knoten schwingen.

Versuch. Befestigt man eine Stimmgabel an einem Punkte der einen Zinke, welcher in der Nähe der einen Biegung liegt, so giebt die Stimmgabel den ihr eigenen Ton; befestigt man sie an einem Punkte, der näher an dem Ende der Zinke liegt, so giebt sie keinen Ton. (Der Knoten muss durch den Versuch ermittelt werden.)

Folgerung. Eine Stimmgabel kann als ein gekrümmter Stab angesehen werden, welcher mit 2 in der Nähe der Biegung liegenden Knoten schwingt.

Versuch. Setzt man die tönende Stimmgabel auf einen festen Gegenstand (Tisch, Kasten), so wird der Ton verstärkt.

Folgerung. Der mit dem mittleren Teil der Stimmgabel auf und ab schwingende Stiel überträgt seine Schwingungen auf die Unterlage, indem diese sich dem Tone entsprechend teilt und in ihren einzelnen Abschnitten mitschwingt. Da infolge dessen eine grössere Luftmasse in Bewegung gesetzt wird, so wird der Ton verstärkt. (Resonanz.)

Anmerkung. Die Bewegungen der Stimmgabel können sichtbar gemacht werden, indem man mit einer an der einen Zinke befestigten Spitze über ein berusstes Brett hinfährt.

§ 12. **Saiten.** Versuch. Eine auf einen Resonanzkasten gespannte Saite (Monochord) werde durch Zupfen oder Streichen mit dem Violinbogen in Schwingungen versetzt. Spannt man die Saite stärker, so wird der Ton höher. Eine schwere Saite giebt bei gleicher Spannung einen tieferen Ton.

Folgerung. Eine in transversale Schwingungen versetzte Saite gibt einen Ton, der um so höher ist, je grösser die Spannung und je kleiner das Gewicht der Saite ist.

Versuch. Lässt man die Hälfte der Saite schwingen (indem man durch Unterschieben eines Stegs oder durch Berühren mit dem Finger in der Mitte einen Knoten erzeugt), so hört man die Octave des Tones, den die ganze Saite giebt; lässt man $^2/_3$ der Saite schwingen, so hört man die Quint, bei $^3/_4$ die Quart u. s. w.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Folgerung. Die Schwingungszahl des Tones einer Saite ist ihrer Länge umgekehrt proportional.

Anwendung. Hierauf beruht das Spielen der Instrumente mit wenigen Saiten.

Versuch. Erzeugt man durch Berühren der Mitte einer Saite und Anstreichen die Octave und nimmt dann den Finger weg, so tönt die Octave weiter, die Saite schwingt also mit einem Knoten in der Mitte. Macht man denselben Versuch, indem man die Saite in einem Punkte berührt, welcher um $^1/_3$, $^1/_4$ u. s. w. der Länge von dem einen Ende absteht, und setzt auf die Punkte, welche die Saite in 3 bezw. 4 u. s. w. Teile teilen, sowie auf zwischenliegende Punkte Papierreiter, so bleiben während des Tönens die auf die Teilpunkte gesetzten Reiter sitzen, während die anderen abgeworfen werden.

Folgerung. Eine Saite kann mit 1, 2, 3 u. s. w. Knoten schwingen. Die bei 2, 3 u. s. w. Knoten erzeugten Töne haben die 2, 3 u. s. w. fache Schwingungszahl des Grundtons.

Begriffsbestimmung. Die höheren Töne, welche ein Körper ausser seinem Grundtone zu geben vermag, heissen Obertöne; sind die Schwingungszahlen der Obertöne ganze Vielfache des Grundtons, so heissen sie harmonisch.

Tonerregung durch Longitudinalschwingungen.

§ 13. Versuch. Führt man gegen das eine freie Ende einer an Fäden aufgehängten (elastischen) Drahtspirale (Longitudinal-Wellenmaschine) kurze Schläge in regelmässigen Zwischenzeiten, so kann man stehende Schwingungen der einzelnen Spiralwindungen erzeugen. Entweder bleiben die mittleren Windungen in Ruhe (Knoten) und die anderen schwingen abwechselnd nach diesen hin und von ihnen fort, oder es bilden sich wenn die Schläge rascher erfolgen, 2, 3 u. s. w. Knoten.

Folgerung. Erzeugt man an dem einen Ende einer beiderseits freien elastischen Schichtenreihe Stösse in regelmässiger Wiederkehr, so wird die Reihe in stehende Longitudinalschwingungen versetzt. Die Entfernung der Knoten von dem Ende der Reihe beträgt $^1/_2$, $^1/_4$, $^1/_6$ u. s. w. der Reihenlänge.

Versuch. Befestigt man das eine Ende der Spirale und verfährt wie vorher, so erhält man wieder stehende Schwingungen. Bei der einfachsten Form schwingen alle Teile nach dem befestigten Ende hin und von demselben fort, bei den folgenden bilden sich im Innern 1, 2 u. s. w. Knoten, von denen der dem freien Ende benachbarte um $^1/_3$, $^1/_5$ u. s. w. der Länge von diesem absteht.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Folgerung. Erzeugt man an dem freien Ende einer halb freien Schichtenreihe in regelmässiger Wiederkehr Stösse, so wird die Reihe in stehende Longitudinal-Schwingungen versetzt. Die Entfernung der Knoten von dem freien Ende beträgt $^1/_3$, $^1/_5$ u. s. w. der Reihenlänge.

§ 14. Versuch. Man befestige einen Stab (Glasstab, Holzstab) an einem Ende und reibe ihn der Länge nach (Glas mit feuchtem Kork, Holz mit geharztem Lappen), so erzeugt derselbe einen Ton. Befestigt man den Stab in der Mitte, so wird durch Reiben ein höherer Ton erzeugt.

Folgerung. Stäbe können auch in Longitudinal-Schwingungen versetzt werden, sie schwingen mit 1, 2 und mehr Knoten.

§ 15. Versuch. Streicht man eine Saite mit 2 mit Kolophonium bestrichenen Fingern, so hört man einen hohen Ton.

Folgerung. Saiten können auch longitudinal schwingen.

§ 16. Versuch. Bringt man eine Stimmgabel vor dem offenen Ende einer Röhre in Schwingungen, so wird der Ton bei passender Länge der in der Röhre enthaltenen Luftsäule verstärkt. (Die passende Länge kann man empirisch finden, wenn man in einen grösseren Standcylinder so lange Wasser giesst, bis die Verstärkung des Tons eintritt.)

Folgerung und Begriffsbestimmung. Ganz und halb freie Luftsäulen können durch an dem einen Ende erzeugte Stösse in stehende Schwingungen versetzt werden. Eine Luftsäule, welche an beiden Enden frei ist (frei schwingen kann), heisst eine offene, eine solche, welche nur an dem einen Ende frei ist, eine gedeckte (gedackte) Pfeife. Die Obertöne sind harmonisch, offene Pfeifen geben sämtliche Obertöne, die gedeckten nur diejenigen, deren Schwingungszahlen ungerade Vielfache der Schwingungszahl des Grundtons sind. (§ 13.)

Anwendungen und Bestätigung. Die Stösse (abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen) können ausser durch Resonanz auf verschiedene Art erzeugt werden: a) durch einen schräg über die Oeffnung der Röhre streichenden Luftstrom. (Der Teil des Stroms, welcher in die Röhre hineingeht, erzeugt eine Verdichtung; dadurch wird der ganze Strom gezwungen, über die Röhre hinwegzustreichen, er reisst die Luft in der Röhre mit sich und erzeugt eine Verdünnung. Dann dringt der Strom wieder in verstärktem Masse in die Röhre und so wiederholt sich das Spiel. — Die Flöte.

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

b) Durch einen aus einer schmalen Spalte gegen die scharfe Kante einer seitlichen Oeffnung geblasenen Luftstrom. Signalpfeife, Lippenpfeife.

c) Durch eine im unteren Ende der senkrecht gehaltenen Röhre brennende kleine Flamme — singende Flammen — oder durch ein glühendes Drahtnetz während des Erkaltens. (Die Ursache ist noch nicht aufgeklärt.)

Die vorher gefundenen Gesetze über die Obertöne lassen sich durch Versuche mit Pfeifen leicht bestätigen.

Versuch. Fasst man eine Pfeife während des Tönens an verschiedenen Stellen an, so wird der Ton dadurch nicht verändert.

Folgerung. Die Röhren, in welchen eine Luftmasse eingeschlossen ist, nehmen an der Tonbildung nicht teil.

Versuch. Man lasse Pfeifen tönen, deren Längen sich wie $1:{}^4|_5:{}^2|_3:{}^1|_2$ verhalten; sie geben die Töne eines Durdreiklangs.

Folgerung. Die Schwingungszahlen von Luftsäulen verhalten sich umgekehrt wie ihre Längen (also auch umgekehrt wie die Wellenlängen).

Versuch. Man lasse eine offene und eine gedeckte Pfeife von gleicher Länge tönen. Die offene Pfeife giebt die Octave der gedeckten.

Folgerung. Eine gedeckte Pfeife kann als eine halbe offene von doppelter Länge angesehen werden.

Tonerregung durch Transversalschwingungen von Platten in Verbindung mit Longitudinalschwingungen von Luftsäulen.

§ 17. Versuch. Man erzeuge dadurch, dass man einen Luftstrom zwischen den mässig geschlossenen Lippen (oder zwischen den zusammengedrückten Rändern eines Röhrchens aus Weidenrinde — Huppe) hindurchpresst, einen Ton. Er ist unrein, von wechselnder Höhe und ohne Wohlklang. Bläst man in derselben Weise in ein Glasrohr (2 cm weit, ca. 50 cm lang), so hört man einen kräftigen reinen Ton.

Folgerung. Weiche elastische Teile, welche so aneinander liegen, dass sie beim Auseinandergehen einen Spalt bilden, können durch einen zwischen denselben hindurch gehenden Luftstrom in stehende Schwingungen versetzt werden. (Die Luft dringt ähnlich

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

wie bei der Sirene stossweise durch.) Die Schwingungen sind unregelmässig, sie werden aber regelmässig, wenn durch die Stösse eine Luftsäule in stehende Schwingungen versetzt wird, die die Bewegungen der elastischen Teile regeln.

Anwendungen. Die Blasinstrumente. Bei den Messingblasinstrumenten bilden die Lippen, bei den Holzblasinstrumenten (Klarinette u. s. w.) bilden dünne Holz- oder Rohrblättchen die weichen schwingenden Teile. Die weichen Blättchen heissen Zungen. Die verschiedenen Töne eines Instruments werden durch verschiedene Vorrichtungen zu Stande gebracht. In der Regel ist das Rohr lang, so dass bei geeignetem Anblasen eine ganze Reihe von Obertönen erzeugt werden kann. Ausserdem aber kann es verkürzt werden entweder durch Aus- und Einziehen einzelner Teile (Posaune) oder durch Ventile (Klappen-Trompete) oder durch Öffnen seitlicher Löcher, welche mit den Fingern zugehalten werden. (Holzblasinstrumente.)

§ 18. Versuch. Setzt man die Zunge des Mundstücks einer Zungenpfeife dadurch in Bewegung, dass man sie aufhebt und dann vermöge der Elasticität schwingen lässt, so hört man keinen oder nur einen sehr schwachen Ton. Setzt man sie aber dadurch in Bewegung, dass man sie anbläst (ohne Schallbecher), so hört man einen lauten, ziemlich scharfen Ton, der entweder derselbe ist, den die Zunge vorher gab, oder tiefer als dieser.

Folgerung. Der Ton einer Zungenpfeife kommt dadurch zu Stande, dass die Zunge die Spalte des Fusses abwechselnd schliesst und (vermöge der Elasticität zurückgehend) öffnet und dadurch in regelmässiger Wiederkehr Verdichtungen und Verdünnungen erzeugt. Stimmt der Ton des Schallbechers mit dem der Zunge überein, so wird der letztere einfach verstärkt; stimmen sie nicht überein, so wird der erste Ton ausserdem erniedrigt. (Die Erklärung der letzteren Erscheinung kann erst später gegeben werden.)

Mittönen, Resonanz, Klangfarbe.

§ 19. Versuche. 1. Nimmt man 2 Saiten eines Monochords gleich und streicht die eine an, so gerät die andere von selbst in Schwingungen. Dies geht daraus hervor, dass, wenn man die erste Saite nach dem Streichen festhält, der Ton doch anhält, auch können Schwingungen durch aufgesetzte Reiter sichtbar gemacht werden. Das ist der Fall, mag die erste Saite als Ganzes oder in Abteilungen schwingen. — 2. Stellt man zwei gleichgestimmte Stimmgabeln, welche sich auf einerseits offenen Resonanzkästen befinden, so einander gegenüber, dass die Öffnungen der Kästen einander zugekehrt

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

sind und streicht die eine Gabel an, so tönt die andere mit. (Der Ton dauert an, wenn man die erste Gabel nach dem Anstreichen festhält. Die Schwingungen der zweiten Gabel kann man durch die Bewegungen eines an einem Faden aufgehängten Kügelchens, welches die zweite Gabel im Ruhezustande eben berührt, sichtbar machen.)

Folgerung. Treffen Schallwellen einen Körper, der im Stande ist, Schwingungen zu vollführen, welche den Schwingungen der Schallwellen entsprechen, so tönt derselbe mit. Wird dieses Mittönen dazu benutzt, um einen Ton zu verstärken, so heisst es Resonanz (§ 11). Da unregelmässig gestaltete Platten auf sehr viele Arten schwingen können, so eignen sie sich besonders zu Resonanzböden.

Erläuterung. Beim Monochord wird die Bewegung der einen Saite durch die Holzteile auf die andere übertragen. Bei den Stimmgabeln überträgt sich die Bewegung der einen zunächst auf den hölzernen Kasten, von diesem auf die eingeschlossene Luftsäule, dann auf die Luft im zweiten Kasten u. s. f. Der Kasten muss demnach so gebaut sein, dass die eingeschlossene Luftsäule dieselben Schwingungen zu vollführen im Stande ist wie die Gabel. Die schwachen Stösse des ersten tönenden Körpers vermögen starke Schwingungen des starren resonirenden Körpers hervorzurufen, weil jeder folgende Stoss die Wirkung des vorhergehenden um ein Weniges verstärkt. (Ein Kind vermag eine schwere Glocke durch richtiges Ziehen in Bewegung zu setzen.)

Versuch. Berührt man die mit Reitern besetzte zweite Saite eines Monochords in einem Teilpunkte, während die erste Saite ihrer ganzen Länge nach schwingt, so schwingt die zweite Saite mit.

Folgerung. Ein tönender Körper vermag nicht nur dann einen anderen in Schwingungen zu versetzen, wenn der letztere denselben Ton hat wie der erstere, sondern auch, wenn er einen der harmonischen Obertöne giebt. Da aber ein Körper nur dann mitschwingen kann, wenn er dieselbe Schwingungszahl hat, wie die Schallwellen, welche ihn treffen, so muss geschlossen werden, dass der erste Körper, während er als Ganzes schwingt, gleichzeitig in Unterabteilungen in Bewegung ist, dass also mit dem Grundtone gleichzeitig Obertöne mittönen.

Bestätigende Versuche. 1. Ein geübtes Ohr vermag einzelne Obertöne zu hören. 2. Schwingt eine Saite als Ganzes und berührt man sie in einem Knotenpunkte, so hört man den entsprechenden Oberton. Berührt man die Saite in der Mitte, so bleiben die Obertöne, welche 4, 6, 8 . . . mal so viel Schwingungen machen als der Grundton. Dass die Obertöne nicht bei der Berührung der Saite entstehen, geht daraus hervor, dass, wenn man sie in einem Knotenpunkt streicht oder zupft und an derselben Stelle berührt, der

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Ton sofort vollständig verschwindet. 3. Schlägt man auf dem Klavier einen tiefen Ton an, so findet man leicht die Obertöne, wenn man der Reihe nach die höheren Tasten vom Dämpfer befreit (ohne sie anzuschlagen). Die Saiten, welche die Obertöne geben, tönen noch fort, nachdem man die Tasten des Grundtons losgelassen, diesen also zum Schweigen gebracht hat.

Erfahrung. Töne von gleicher Höhe, welche auf verschiedenen Instrumenten erzeugt werden, unterscheiden sich abgesehen von der Stärke noch durch eine besondere Eigentümlichkeit der Gehörempfindung, welche man Klangfarbe nennt.

Erläuterung. Die Klangfarbe rührt hauptsächlich von der Zahl der Obertöne her, welche zugleich mit dem Grundtone tönen. (Ausserdem von begleitenden Geräuschen, von der Schnelligkeit, mit welcher die Tonstärke abnimmt.)

Stimmorgan.

§ 21. Der wesentlichste Bestandteil des menschlichen Stimmorgans sind die Stimmbänder, zwei häutige Streifen, welche zwischen den Knorpeln des Kehlkopfs am oberen Ende der Luftröhre sitzen und dieselbe bis auf eine schmale Ritze schliessen können. Werden sie gespannt, so erzeugt ein hindurchgehender Luftstrom einen Ton, dessen Höhe wesentlich von der Spannung der Stimmbänder abhängt. Die Veränderung der Mundhöhle durch die beweglichen Teile derselben (Gaumensegel, Zunge, Unterkiefer, Lippen) erzeugt die Klangfarbe der einzelnen Töne (Vocale). Die Konsonanten sind keine Töne, sondern Geräusche.

Schwebungen, Consonanz, Dissonanz.

§ 22. Versuche. 1. Streicht man zwei genau gleichgestimmte Stimmgabeln an, so hört man einen gleichmässigen verstärkten Ton. Befestigt man an einem Zinken der einen Gabel ein Stückchen Wachs oder beschwert sie in anderer Weise (durch Ueberziehen eines Gummirings), so erniedrigt man ihren Ton. Streicht man jetzt beide Gabeln an, so hört man einen Ton, der anschwillt und abnimmt. Das Zu- und Abnehmen nennt man eine Schwebung (die Zunahme Stoss, die Abnahme Pause). Die Schwebungen folgen um so rascher auf einander, je verschiedener die Töne der beiden Stimmgabeln sind. 2. Denselben Versuch kann man mit zwei Saiten machen. (Man zupfe sie in der Mitte, um die geradzahligen Obertöne zum Fortfall zu bringen.)

Erläuterung. Wenn zwei Körper denselben Ton geben, so fallen die von dem ersten in der Luft erzeugten Verdichtungen

Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf

und Verdünnungen immer genau auf dieselben Stellen der von dem zweiten herrührenden Wellen (z. B. Verdichtung auf Verdichtung, Verdünnung auf Verdünnung). Sind die Töne dagegen nicht gleich, so haben die Verdichtungen der einen Welle einen andern Abstand als die der anderen. Es fallen also die Verdichtungen der einen der Reihe nach auf sämmtliche Stellen der anderen Welle. Die Töne verstärken und schwächen sich demnach abwechselnd.

Erfahrung. Manche besonders nahe Töne geben zusammen einen Missklang (Dissonanz), andere dagegen rufen einen Wohlklang hervor (Consonanz, § 9).

Erläuterung. Langsame Schwebungen sind für das Ohr nicht unangenehm. Folgen sie so schnell aufeinander, dass sie das Ohr nicht mehr unterscheiden kann, so machen sie einen unangenehmen Eindruck auf dasselbe. Die Dissonanzen werden also hauptsächlich durch die von den Grundtönen und ihren mitklingenden Obertönen erzeugten Schwebungen hervorgerufen.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf