

II. Naturwissenschaftlicher Kurs.

(Wärmelehre, März 1920.)

gedruckt

VI. Vortrag.

Stuttgart, den 6. März 1920. (a)

Meine lieben Freunde!

Wir werden heute zunächst einige Erscheinungen anschauen, welche aus dem Gebiet sind der Zusammengehörigkeit von Wärme, Druck und Ausdehnung der Körper. Denn Sie werden sehen, dass durch die zusammenschauenden Betrachtungen desjenigen, was wir erfahren können an solchen Erscheinungen, sich uns gerade der Weg eröffnen wird zum Verständnis dessen, was das Wärmewesen eigentlich ist. Wir werden zunächst einmal die Erscheinung betrachten, die sich hier ergibt durch den Inhalt dieser drei Röhren. In der ersten Röhre rechts haben wir eine Quecksilbersäule, wie man sie in einer Barometerröhre hat, und oben etwas Wasser. Wasser, welches in einer solchen Weise in einem Raum drinnen ist, verdunstet fortwährend. Wir haben das Wasser in dem sogenannten Vakuum, in dem leeren Raum, und wir können sagen: Wasser verdunstet; die kleine Menge Wassers, die drinnen ist, verdunstet fortwährend. Wir können diese Verdunstung durch die Anwesenheit des Wasserdampfes, der drinnen ist, konstatieren. Wenn Sie vergleichen die Quecksilbersäule in ihrer Höhe, wie sie hier in dieser Röhre ist, mit der Quecksilbersäule hier drinnen, die unter dem normalen Luftdruck steht, über welcher also hier kein verdunstendes Wasser, also kein Wasserdampf ist, so werden Sie sehen, dass diese Quecksilbersäule tiefer steht wie jene. (Fig. 1a und 1b). Diese Quecksilbersäule kann natürlich nur tiefer stehen als diejenige im Barometer, wenn der Druck, der oben ausgeübt wird, vorhanden ist, während hier oben kein Druck vorhanden ist von irgend etwas, es ist ein leerer Raum, sodass diese Quecksilbersäule nur entgegensteht dem äußeren Atmosphärendruck, als ihm das Gleichgewicht haltend. Hier wird sie heruntergedrängt. Wenn wir abmessen, werden wir finden, dass wir hier ~~gerade~~ von dieser Höhe ab ~~nur~~ eine höhere Queck-

silbersäule haben. Um was sie hier höher ist, wird durch den Druck die sogenannte Spannkraft des darin befindlichen verdunsteten Wassers bewirkt. Das heisst, es wird die Quecksilbersäule mehr heruntergedrängt. Wir sehen also, dass Dampf immer auf die Wände drückt, und zwar wird ein bestimmter Druck unter einem bestimmten Wärmezustand ausgeübt. Das können wir dadurch konstatieren, dass wir den oberen Teil dieser Glasröhre erwärmen. Sie werden sehen, wenn die Temperatur höher wird, wird die Quecksilbersäule sinken, d.h.: der Druck wird grösser werden. Wir werden also sehen, dass ein Dampf umso mehr auf die Wand drückt, je höher seine Temperatur ist. Sie sehen die Quecksilbersäule jetzt schon sinken, und sehen, wie die Spannkraft, die Druckkraft mit der Temperatur wächst, das Volumen, das dann der Dampf einnehmen will, wird vergrössert.

In der zweiten Röhre haben wir über dem Quecksilber Alkohol (Fig. 1c). Wiederum sehen Sie den Alkohol da drinnen flüssig, einen gewissen Rauminhalt hindurch. ~~Er verdunstet ebenfalls.~~ Er verdunstet ebenfalls, daher ist auch diese Säule weniger hoch als die linke am Barometer. Wenn ich abmesse, werde ich aber auch finden, dass sie hier weniger hoch ist, als früher die Quecksilbersäule unter dem Einfluss des verdunsteten Wassers war. Wir müssen warten, bis hier die Säule wiederum so hoch steigt, als sie vor der Erwärmung war. Dann werden wir finden, dass abhängt die Spannung auch von der Substanz selber, die wir verwenden. Diese Spannung ist also grösser bei Alkohol als bei Wasser. Auch hier könnte ich wiederum denselben Versuch machen. Sie werden sehen, dass die Spannung ~~stark~~ wesentlich höher wird, wenn wir die Temperatur erhöhen. Wenn wir den Dampf soweit abkühlen, dass wir ihn wieder haben unter derselben Temperatur wie früher, dann steigt das Quecksilber, also bei geringerem Druck, geringerer Spannkraft. Sie sehen, die Säule steigt, d. h.: die Spannkraft beim Alkoholdampf ist wesentlich grösser.

In der dritten Röhre haben wir unter sonst gleichen Verhältnissen Aether eingefüllt, der wiederum verdunstet. (Fig. 1d.) Sie sehen,

die Säule ist hier sehr niedrig. Daraus ersuchen Sie, dass, wenn wir Aether unter sonst gleichen Verhältnissen zum Verdunsten bringen, drückt er wesentlich anders, als verdunstendes Wasser drückt. Es hängt also ab der Druck, der auf die Umgebung von einem Gase ausgeübt wird, von der Temperatur, aber auch von der Substanz selber. Auch hier können Sie sehen, dass das Volumen wesentlich grösser wird, dass ~~das~~^{der} Verdunsten-des Aethers also wesentlich stärker drückt. Wir wollen auch hier wiederum die Erscheinungen festhalten, ~~xxxxxx~~^{da wir} gerade durch die Ueberschau über die Erscheinungen zu unserem Resultat kommen wollen.

Nun eine Erscheinung, die ich Ihnen besonders ~~vi~~ verführen will, ist diese: Sie wissen aus den vorhergehenden Betrachtungen und auch sonst aus der Elementarphysik, dass wir feste Körper in flüssige, flüssige in feste Körper überführen können, indem wir sie über den sogenannten Schmelzpunkt bringen nach oben oder unten. Nun, wenn ein flüssiger Körper wiederum fest wird, also unter den Schmelzpunkt herabgebracht wird, so tritt er uns zunächst als fester Körper entgegen. Das Merkwürdige, und das was wir wieder ins Auge zu fassen haben bei unserer Ueberschau ist dieses, dass, wenn wir jetzt beim festen Körper einen stärkeren Druck anwenden als derjenige war, unter dem er sich verfestigt hat, kann er wiederum flüssig werden. Also er kann unter einer tieferen Temperatur wieder flüssig werden, als diejenige ist, in der er zum festen Zustand übergeht. Sie wissen, bei 0° geht Wasser über ⁱⁿ den festen Zustand, wird zu Eis. Es müsste also das Eis bei allen Temperaturgraden, die unterhalb null liegen, ein fester Körper sein. Wir werden nun hier an diesem Eis ein Experiment machen, durch das Sie sehen werden, dass, ohne dass wir die Temperatur erhöhen - würden wir es unter gewöhnlichen Verhältnissen flüssig machen wollen, so würden wir die Temperatur erhöhen müssen - aber wir werden die Temperatur nicht erhöhen, sondern wir werden auf das Eis einen mächtigen Druck ausüben. Diesen Druck üben wir dadurch aus, dass wir das Gewicht hängen. Es wird hier das Eis zerschmelzen. Sie werden also sehen, dass

das Eis hier durchgeschnitten wird, weil es sich unter dem von dem Drahte ausgeübten Druck verflüssigt. Sie werden nun erwarten, dass, indem dieser Eisblock durch den Druck zu Wasser wird in der Mitte, nun links und rechts die beiden Eisstücke herunterfallen. Wenn wir schneller machen würden, würden wir das Experiment gelingen sehen. (Anm.: Das Zerschneiden des Eisblockes geht so langsam vor sich, dass ^{erst} am Ende der Stunde darüber folgendes hinzugefügt wird): Wenn Sie jetzt hierhertreten, werden Sie sehen, dass, wenn Sie auch warten würden, bis der Schnitt richtig durchgeführt ist, Sie doch nicht zu fürchten hätten, dass zwei Eisstücke herunterplumpsen würden. Es wird sofort wiederum über dem Draht das Eis zusammenwechseln, und der Draht geht ganz durch, fällt unten durch, und der Eisblock bleibt ganz. - Sie sehen daraus, dass da, wo der Druck ausgeübt wird durch Vermittelung des Drahtes, Flüssigkeit entsteht. Aber in dem Augenblick, wo der Druck wieder nicht ausgeübt wird darüber, hat sich die Flüssigkeit sogleich wiederum zum Eis verfestigt, d. h.: es wächst wiederum zusammen. Diese Verflüssigung des Eises durch den Druck hält eben nur stand, wenn die Temperatur dieselbe bleibt, unter dem Einfluss des betreffenden Druckes. Man kann also auch einen festen Körper ~~unterhalb seines Schmelzpunktes zurückverflüssigen~~ unterhalb seines Schmelzpunktes zurückverflüssigen. Er braucht aber dann die Fortdauer dieses Druckes, um flüssig zu bleiben. Hört der Druck auf, dann tritt wiederum der feste Zustand ein. - Das ist das, was Ihnen entgegengetreten sein würde, wenn Sie hier noch einige Stunden warten würden.

Das dritte, was wir uns vor Augen führen wollen, und was eine weitere Stütze sein~~x~~ wird für unsere Betrachtungen, das ist das folgende: Wir könnten nehmen irgendetwelche geeignete Körper, denn im Prinzip gilt es eigentlich für alles, was wir betrachten wollen, für alle diejenigen Körper, die miteinander eine Legierung eingehen, d. h. sich ^{so} verbinden können, dass sie sich durchdringen, ohne chemische Verbindung zu werden. Wir haben hier in einem Probiergläschen B l e i . Blei ist nun ein Kör-

per, der bei 327° C. schmilzt, also übergeht aus dem festen in den flüssigen Zustand. In einem anderen Probiergläschen haben wir Wismuth, das bei 269° C. schmilzt und hier haben wir Zinn, das bei 232° C. schmilzt. Wir haben also drei Körper, welche alle Schmelzpunkte haben über 200° C. Wir werden nun diese drei Körper, indem wir sie zuerst schmelzen, also in flüssigen Zustand überführen, miteinander zu einer Legierung verbinden, sodass sie dann durcheinandergelangen, ohne eine chemische Verbindung zu werden. (Anm.: Die drei Metalle werden einzeln geschmolzen und zusammengegossen.)

Sie werden nun sich leicht denken können: Wenn wir irgend eines dieser drei Metalle, die ja durchaus einen Schmelzpunkt über 200° C. haben, einfach in kochendes Wasser hineintun, so bleibt ^{es} ~~es~~ fest, denn das ~~kalte~~ Wasser hat nur einen Schmelzpunkt von 0° und einen Siedepunkt von 100° , ^e ~~es~~ kann also keines dieser drei Metalle in diesem Wasser zum Schmelzen kommen. Nun werden wir aber den Versuch machen, in eben ^{In-AN} siedendes Wasser die Legierung, die ~~Aus-~~ ^{zu} ~~einander-~~ ^{hinein-} ~~f~~ ^{zu} ~~hinein-~~ ^{hinein-} ~~bringen~~ ^{bringen}, also in Wasser von 100° C. Schon jetzt kann konstatiert werden, was da eigentlich zu Grunde liegt. Wir halten das Thermometer herein in die Legierung der drei Metalle und stellen fest in dem noch flüssigen Metallgemisch drinnen eine Temperatur von 175° . Sie sehen daraus: keines der einzelnen Metalle würde bei dieser Temperatur noch flüssig sein, jedes wäre schon fest. Die Legierung der drei Metalle ist noch flüssig. Sodass wir schon daraus sagen können: Wenn wir Metalle durcheinandermischen, so kann die Erscheinung eintreten, dass der Schmelzpunkt, der Punkt, bei dem das Metallgemisch flüssig wird, eigentlich tiefer ist als der Schmelzpunkt eines jeden der einzelnen Metalle. Sie sehen also, wie sich Körper gegenseitig beeinflussen. Und wir werden gerade aus dieser Erscheinung eine wichtige Grundlage zu schöpfen haben in unserer Ueberschau über die Wärmeerscheinungen.

noch flüssige

Nun geben wir die Metalllegierung bei 100° glatt hinein in das

siedende Wasser, das also ebenfalls 100° C. hat. Und jetzt lassen wir das Wasser auskühlen. Beobachten wir nun die Temperatur. Es ist die Metalllegierung noch drinnen flüssig, sie wird dann fest werden. Das heisst: wir kommen zum Schmelzpunkt herunter, und wir können dann, indem das Wasser unter den Siedepunkt geht, konstatieren an dem Punkt der Temperatur, auf dem das Wasser angekommen ist, wann die Metalllegierung fest wird, also wo sie ihren Schmelzpunkt hat. Sie sehen also: der Schmelzpunkt des Metallgemisches ist ~~eigentlich~~ tiefer als der Schmelzpunkt jedes einzelnen Metalls.

Nun, wir haben diese Erscheinungen wiederum zu den anderen hinzugefügt, um eben eine weiter ausgebreitete Grundlage für die Ueberschau zu haben, und wir können jetzt noch einige Betrachtungen anknüpfen an dasjenige, was wir uns schon gestern vor Augen geführt haben über den Unterschied des festen, des flüssigen, des gas-oder dampfförmigen Zustandes. Sie wissen, dass feste Körper, namentlich eine grössere Anzahl von Metallen und andere mineralische Körper, nun nicht in unbestimmter Gestalt, sondern in ganz bestimmten Gestalten, in sogenannten Kristallen, auftreten. Sodass wir sagen können: Unter den gewöhnlichen Verhältnissen, unter denen wir auf der Erde leben, treten uns die festen Körper in Kristallform, also in ganz bestimmten Gestaltungen entgegen. Das muss natürlich darauf aufmerksam machen, nachzudenken darüber, wie solche Kristallgestaltungen entstehen, welche Kräfte bei diesen Kristallgestaltungen zu Grunde liegen. Wir müssen nun, um Vorstellungen über diese Dinge zu gewinnen, darauf sehen, wie sich nun etwa die ganze Summe von auf der Erdoberfläche befindlichen, und nicht mit der Erdenmasse direkt zusammenhängenden festen Körpern verhalten.

Sie wissen, wenn wir einen festen Körper irgendwo in der Hand halten, und lassen ihn los, so fällt er zur Erde. Man deutet das in der Physik gewöhnlich so, dass man sagt: die Erde zieht diese festen Körper an, sie übt einen ^{Kraft} ~~Druck~~ aus; ~~wie~~ unter dem Einfluss dieser Kraft, der Schwerkraft oder Gravitation, fällt der Körper zur Erde.

Wenn wir irgendeinen flüssigen Körper haben und ihn dann abkühlen, so wird er uns, wenn er fest wird, auch auftreten können in bestimmten Kristallgestalten.

Die Frage wird nun entstehen: Wie ist überhaupt das Verhältnis derjenigen Kraft, welcher alle festen Körper zunächst unterliegen, der Schwerkraft, zu den Kräften, welche ja doch auch da sein müssen, und auf eine bestimmte Art bewirken müssen, dass sich feste Körper in kristallinen Gestalten ausleben. Sie können sich leicht denken, die Schwerkraft als solche, ^{durch die} ein Körper zur Erde fällt (wenn wir überhaupt von einer solchen Schwerkraft reden wollen zunächst) sie kann es nicht sein, die zu gleicher Zeit mit der Bildung der Kristallformen etwas zu tun hat. Denn dieser Schwerkraft unterliegen alle Kristallformen; Wie ein Körper auch äußerlich gestaltet sein mag, er folgt dieser Schwerkraft. Wir finden, wenn wir eine Anzahl von festen Körpern so behandeln, dass wir ihnen ihre Unterlage entziehen, dass sie alle in parallelen Linien zur Erde fallen. Wir können dieses Fallen etwa in der folgenden Weise darstellen. (Fig. 3.)

Wir können sagen: Welche Gestalt auch immer irgendwelche feste Körper haben, sie fallen in der Richtung einer Senkrechten auf die Erdoberfläche zur Erde. (~~Senkrechte a-b~~) Wenn wir nun andererseits wiederum die Senkrechte ziehen auf diese zueinander parallelen Linien, bekommen wir eine parallele Fläche zur Erdoberfläche. ^(Linie a, b in Fig. 3) Wir können alle möglichen ^S Senkrechten Schwerlinien, die wir durch irgendwelche Körper bekommen, so behandeln, dass wir eine gemeinsame, zur Erdoberfläche parallele, auf diese Schwerlinie senkrechte Fläche ziehen. Diese Fläche ist zunächst eine gedachte. Wir fragen uns: Wo ist diese Fläche wirklich? Sie ist bei flüssigen Körpern wirklich. Eine Flüssigkeit, die nun ich nehme, die ich in ein Gefäß gebe, bei der kann ich sehen, wie das, was ich sonst als eine Senkrechte auf die einzelne Schwerlinie ziehe, als Flüssigkeitsniveau wirklich vorhanden ist. ^(Linie c d e f. in Fig. 3)

Wie ist denn das eigentlich? Was bedeutet das denn eigentlich?

Dies, was wir jetzt zusammengestellt haben, ist etwas ungeheurer Schwierigendes. Denn denken Sie sich einmal das folgende: Es würde jemand sagen, wie um Ihnen zu erklären, wie es sich verhält mit der Niveaufläche der Flüssigkeit: Da ist ein Gefäß, da drinnen habe ich eine Flüssigkeit, die bildet eine Niveaufläche. Jedes Teilchen der Flüssigkeit hat das Bestreben, zur Erde hinzufallen. Dadurch, dass die Kräfte in der Flüssigkeit selber verhindern, dass die Teilchen zur Erde hinfallen, dadurch wird die Niveaufläche gebildet; ^d Sie ist da wirklich vorhanden, und die Flüssigkeit macht, dass das entsteht.

Denken Sie, wenn Sie nun die ^{lange} Anlage von festen Körpern nehmen, die Sie fallen lassen, so zeichnet Ihnen die Natur selber das hin, was Sie hier behufs dieser Erklärung hingezeichnet haben. (Fig. 4.) Und Sie müssen sich die Niveaufläche dazudenken. Ich sagte daher früher: Bei festen Körpern ist die Niveaufläche zunächst gedacht als die Senkrechte auf die Schwerlinie. Wenn Sie diesen Gedanken durchdenken, finden Sie das Merkwürdige, dass dasjenige, was Sie sonst machen, um Gedanken hineinzubringen in die Flüssigkeit, das macht eine Anzahl von festen Körpern vor Ihnen. Die zeichnen Ihnen gewissermaßen das auf, was in der Flüssigkeit materiell da ist. Wir können sagen: Der Körper von niedrigerem Aggregatzustand, der feste Körper in seinem Verhalten auf der Erdoberfläche, der verrät uns, wie im Bilde dasjenige, was eigentlich bei der Flüssigkeit da ist. Was ^{beim} bei der Flüssigkeit materiell ist, ^{die Verwickelung} das Wasser, das ~~dieser~~ Linie verhindert als Falllinie, das wird bildlich, wenn ich den festen Körper in seinem ganzen Verhältnis zur Erde betrachte.

Denken Sie, was ich dadurch kann. Dadurch würde ich, wenn ich mir aufzeichne die Schwerlinien, die Niveaufläche unter dem Druck eines Falles, eines Systems von festen Körpern, dadurch würde ich ein Bild bekommen der Schwerkraftwirkung. Das würde direkt ein Bild sein von der flüssigen Materie.

Wir können weitergehen. Wenn wir bei irgend einer Temperatur das Wasser nur genügend lang da drinnen lassen (deshalb sagte ich, die

Dinge sind alle relativ,/) so trocknet es aus. Irgendwie verdunstet das Wasser immer, d. h. es ist eigentlich nur ein relativer Zustand vorhanden, bei dem wir sagen können: Das Wasser bildet eine Nivesaufläche. Es muss nur in seiner Form von den anderen Seiten gehalten werden, während es nach der einen Seite eine Nivesaufläche bildet. Es verdunstet fortwährend, im Vakuum also schneller. Deshalb können wir sagen: Wenn wir hier Linien ^{nach denen das Wasser eigentlich fortwährend strebt,} zeichnen (Fig. 4.),/so müssen das Kraftlinien des Wassers sein, deren Richtung als Weg dann wirklich auch eingehalten wird, wenn das Wasser verdunstet. Wenn ich aber diese Linien, nach denen das Wasser strebt, einzeichne, bekomme ich nichts anderes als ein Bild eines Gases, das in einem allseitig geschlossenen Raum ist, und nach allen Seiten wirklich strebt, nach allen Seiten zerstreut. (Fig. 5.) An der Oberfläche des Wassers ist ein Streben danach, das, wenn ich es einzeichne, um das Streben zu erklären, ein Bild ist von dem, was wirklich vorgeht, wenn ich ein Gas freilasse, und es sich nach allen Seiten verbreitet. So dass ich wieder sagen kann: Dasjenige, was ich an der Flüssigkeit bemerke als Kraft, das ist mir ein Bild desjenigen, was beim Gas wirklich ist, was beim Gas materielle Wirklichkeit ist.

in

Wir haben eine kuriose Tatsache: Wenn wir einer gewissen Weise richtig Flüssigkeiten betrachten, so nehmen wir wahr in diesen Flüssigkeiten Bilder des gasförmigen Zustandes. Wenn wir feste Körper richtig betrachten, nehmen wir wahr Bilder des flüssigen Zustandes. In jedem folgenden Zustand nach unten entstehen Bilder des vorhergehenden Zustandes. Dehnen wir das bis nach oben aus. Wir können sagen:

Im festen Körper entdecken wir die Bilder des Flüssigen.

Im flüssigen Körper entdecken wir die Bilder des Gasförmigen.

Im gasförmigen Körper entdecken wir die Bilder der Wärme.

Das wird dasjenige sein, was wir insbesondere morgen näher durchzuführen haben werden. Aber ich will noch das sagen: wir haben verwacht, heute den

Gedankenübergang zu finden von den Gasen zur Wärme. Es wird morgen schon noch klarer werden. Und wenn wir diesen Gedankenweg weiter verfolgen werden:

Im Festen die Bilder des Flüssigen.
Im Flüssigen die Bilder des Gasförmigen.
Im Gasförmigen die Bilder der Wärme,

denn haben wir ja einen wichtigen Schritt gemacht. Wir haben die Möglichkeit gewonnen, an den Bildern, die sich uns an dem Gaszustande ergeben werden, in dem menschlichen Beobachtungsfelde Offenbarungen der Wärme, und zwar des wirklichen Wärmewesens dann zu haben. Wir gewinnen ^{sagen} die Möglichkeit, das, wovon wir jetzt immer ~~apropos~~ ^{sagen} mussten, dass es ein zunächst Unbekanntes ist, dadurch aufzuklären, dass wir in der richtigen Weise seine Bilder im gasförmigen Zustand suchen. Wir müssen die Bilder des Wärmewesens bei den Körpern des gasförmigen Zustandes suchen. Allerdings - wir müssen das richtig tun. Wenn man einfach den Umfang der Erscheinungen, den wir schon beobachtet haben, so beschreiben, wie es die gegenwärtige Physik gewohnt ist, wenn man so von den Gasen redet, kommt man zu nichts. Aber wenn man richtig ins Auge fasst dasjenige, was sich uns für Körper unter dem Einfluss von Druck und Temperatur ergeben hat, dann werden wir sehen, wie wir tatsächlich vor dem Ergebnis stehen werden, dass uns zunächst das Gasige verrät: was eigentlich das Wärmewesen ist.

Nun wirkt aber das Wärmewesen weiter beim Erkalten in flüssige und feste Zustände hinein. Und wir werden in die Notwendigkeit versetzt werden, nun zu verfolgen, - am gasigen Zustand werden wir am besten sehen können, anschaulich, - was das Wärmewesen ist; am flüssigen und festen Zustand werden wir sehen müssen, ob das Wärmewesen eine besondere Veränderung für sich selbst erlebt, um dann herauszubekommen, ~~wie~~ durch diesen Unterschied, ^{wie} wo es sich offenbart im Gasförmigen, wo es uns seine Bilder zeigt, und ^{im} im Flüssigen und Festen, auf das wirkliche Wesen der Wärme selbst zu kommen.

Zu Vortrag VI. vom 6. März 1920.

Fig. 1.

Barometer - Wasser - Alkohol - Aether

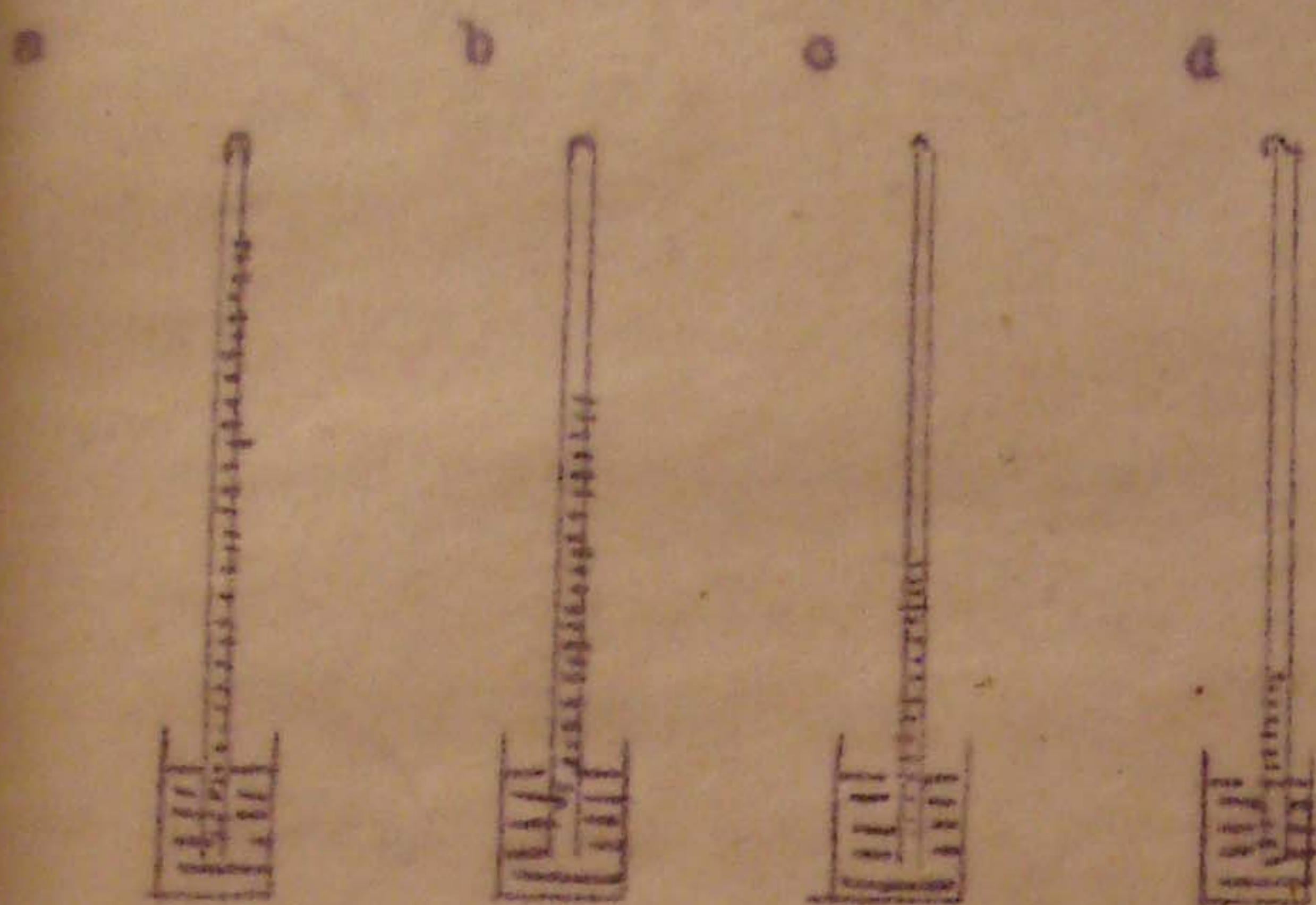


Fig. 2.

Schmelzpunkte.

Wismuth.....	269° C.
Blei.....	327° C.
Zinn.....	232° C.

Rose's Metall

Schmelzpunkt...	94° C.
Wismuth.....	2 Teile
Blei.....	1 Teil
Zinn.....	1 Teil

Fig. 3.

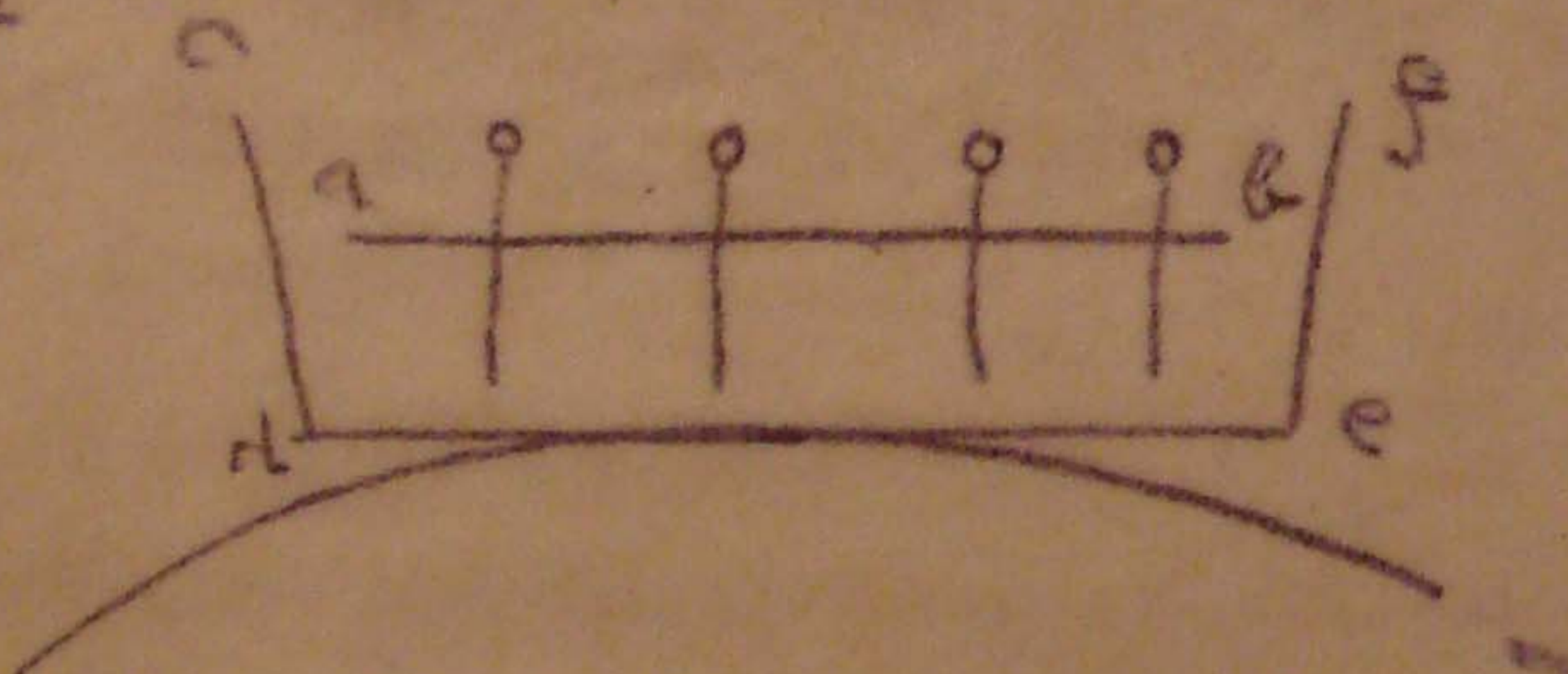


Fig. 4.

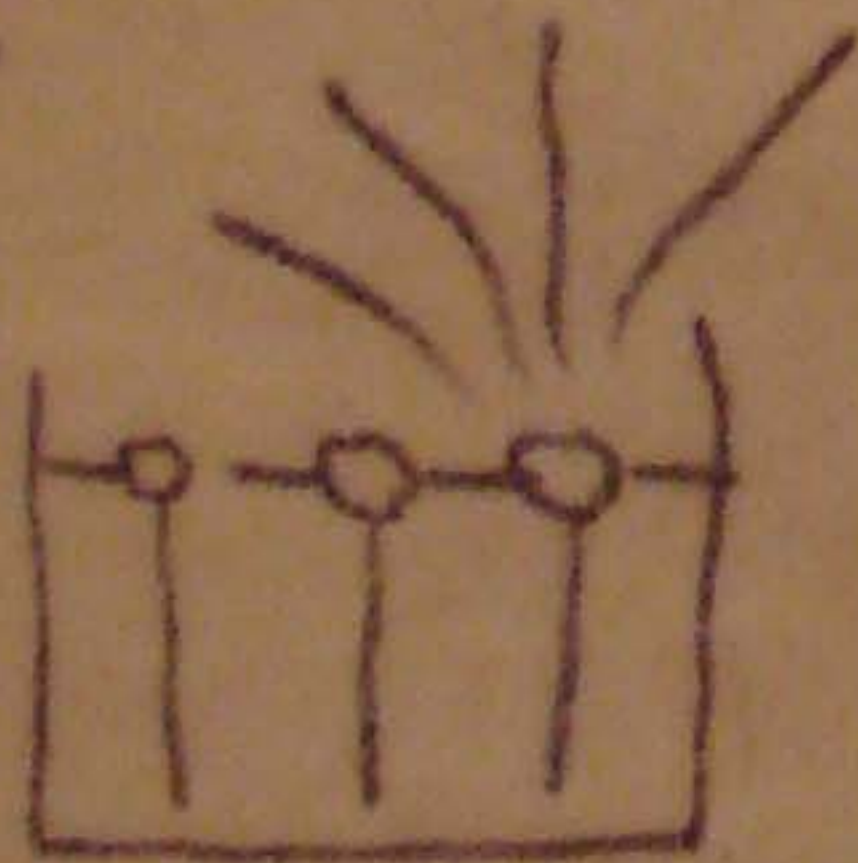


Fig. 5.

