

$$\int_0^{\infty} x^{a-1} e^{mx} dx = \frac{\Gamma(a)}{(-m)^a}$$

wenn längs des positiven Integrationswegs auch von der vieldeutigen Function  $x^{a-1}$  stets der positive Werth und bei der Potenzirung der complexen Zahl  $-m$  (deren reelle Componente positiv sein soll) ihre zwischen  $-\frac{\pi}{2}$  und  $\frac{\pi}{2}$  liegende Phase genommen wird.

Wenn die positive Zahl  $a$  kleiner als 1 ist, so ist auch ein rein imaginärer Werth von  $m$  gestattet. Denn in diesem Falle kann das positive  $k$  immer gross genug gemacht werden, damit

$$\int_k^{\infty} x^{a-1} e^{ix} dx = -i(1-a) \int_k^{\infty} \frac{e^{ix}}{x^{2-a}} dx$$

beliebig klein werde.

## Ueber die Struktur und Bewegung der Gletscher; von John Tyndall und Thomas H. Huxley.

Aus den Philosophical Transactions of the Royal Society of  
London for the year 1857 im Auszuge mitgetheilt  
von R. Clausius.

Hiezu Tafel II.

Die schönen Untersuchungen der Hrn. Tyndall und Huxley über die Gletscher müssen ausser dem Interesse, welches sie für die Wissenschaft im Allgemeinen darbieten, für das Land, welches die meisten und grossartigsten Gletscher besitzt, noch einen besondern Werth haben, und ich glaube daher dem wis-

senschaftlichen Publikum der Schweiz einen Dienst zu erweisen, wenn ich in dieser Vierteljahresschrift jene Arbeiten in möglichst vollständigen Auszügen wiedergebe. Die wichtigsten Stellen, besonders diejenigen, in welchen die Verfasser ihre eigenen experimentellen Untersuchungen beschreiben, werden in wörtlichen Uebersetzungen mitgetheilt, was durch die beigefügten Anführungszeichen kenntlich gemacht wird.

---

1. In einer am 6. Juni 1856 in der Royal Institution gehaltenen Vorlesung hatte Hr. Tyndall gewisse Ansichten über die Schieferspaltung ausgesprochen.<sup>1)</sup> Kurze Zeit darauf wurde er von Hrn. Huxley darauf aufmerksam gemacht, dass die streifige oder schichtenartige Struktur des Gletschereises sich vielleicht auf dieselbe Weise erklären lasse. Bei näherer Vergleichung der hierüber bisher gemachten Beobachtungen wurde ihnen die Richtigkeit dieser Vermuthung so wahrscheinlich, dass sie verabredeten, selbst einige der schweizerischen Gletscher zu besuchen. Diese Verabredung kam noch in demselben Sommer zur Ausführung, und es wurden an den Grindelwald- und Aargletschern, sowie am Rhonegletscher Beobachtungen angestellt. Nach der Rückkehr nach England verfolgte Hr. Tyndall, dessen wissenschaftlichem Beschäftigungskreise dieser Gegenstand näher liegt, die Untersuchung noch weiter, welche allmählig nicht bloss die ursprünglich ins Auge gefasste Erscheinung, sondern alle Hauptpunkte des Problemes über die Struktur und Bewe-

---

<sup>1)</sup> Proceedings of the Royal Institution, Juni 1856; und Philosophical Magazine, Juli 1856.

gung der Gletscher umfasste. Ein Bericht über diese theils gemeinsam, theils von einem allein ausgeführten Beobachtungen und Versuche, und über die daraus gezogenen Schlüsse befindet sich in der hier zunächst in Rede stehenden, im Januar 1857 der Royal Society vorgelegten Abhandlung.

**2. Zähigkeitstheorie der Gletscher.** Der Gletscher ist bekanntlich eine Eismasse, welche an ihrem oberen Ende mit dem Schnee zusammenhängt, der die weiten Gebirgsbassins ausfüllt und mit ihrem unteren Ende bis tief unter die Schneegrenze hinabreicht und in fortwährender langsamer Bewegung begriffen ist, wodurch die unten abschmelzenden Theile immer wieder von oben her ersetzt werden. Dabei folgt er den Krümmungen des Thales, welches er ausfüllt, und fügt sich den Unregelmässigkeiten des Bodens. Zur Erklärung dieser Thatsache hat man sich der Ansicht zugewandt, dass der Gletscher als eine zähe Masse zu betrachten sei. Rendu vergleicht ihn mit einem weichen Teige, und Forbes, welcher diese Theorie besonders entwickelt hat, sagt: ein Gletscher ist eine unvollkommene Flüssigkeit oder ein zäher Körper, welcher über schräge Flächen von einer gewissen Neigung durch den gegenseitigen Druck seiner Theile herabgedrängt wird.

Zur Bestätigung seiner Ansicht führt Forbes ausser der schon erwähnten Thatsache auch manche Einzelheiten über die Art der Bewegung an, die ganz denen entsprechen, welche man z. B. bei der Bewegung eines mässig dicken Mörtels beobachten würde, der in einen geneigten Kanal ausgegossen wäre. So besonders den Umstand, dass der Gletscher sich in

der Mitte schneller bewegt, als an den Rändern, wie man es durch direkte Beobachtungen festgestellt hat, und auch aus der Form der sogenannten Schmutzzonen erkennen kann.

Aber trotz der unbestreitbaren und grossen Aehnlichkeit, welche die Bewegung des Gletschers äusserlich mit der einer zähen Masse zeigt, tritt jener Ansicht doch eine bedeutende Schwierigkeit entgegen. Nämlich die, dass die Annahme der Zähigkeit mit dem sonstigen Verhalten des Eises als eines spröden, brüchigen Körpers unvereinbar zu sein scheint. Es fragt sich nun, ob nicht eine andere Eigenschaft existirt, welche dem Eise wirklich nachweisbar zukommt, und welche ebenfalls geeignet ist, die Art der Gletscherbewegung zu erklären. Eine solche Eigenschaft haben die Verfasser aufgefunden und durch eine Reihe interessanter Versuche nachgewiesen, welche im folgenden § beschrieben werden sollen.

### **3. Das Wiederzusammenfrieren des Eises und seine Anwendung auf die Gletschererscheinungen.**

„In einer Vorlesung, welche Faraday am 7. Juni 1850 in der Royal Institution hielt, und über welche im Athenaeum und in der Literary Gazette von demselben Monate kurz berichtet ist, wurde gezeigt, dass, wenn zwei Eisstücke bei  $0^{\circ}$  mit feuchten Flächen unter einander in Berührung gebracht wurden, sie zusammenhafteten, indem die dünne Wasserhaut zwischen ihnen gefror. War die Temperatur unter  $0^{\circ}$  und das Eis daher trocken, so fand kein Zusammenhaften statt. Faraday erinnerte zur Erläuterung dieser Erscheinung an den bekannten Versuch Schneebälle zu machen. Bei kaltem Wetter wollen die Theilchen nicht zusammenhängen, aber wenn der Schnee im Thauen be-

griffen ist, kann man ihn durch Drücken in eine harte kompakte Masse verwandeln.“

„An einem der wärmsten Tage des letzten Juli, als das Thermometer im Schatten  $27^{\circ}$  C. und in der Sonne über  $38^{\circ}$  C. zeigte, sah einer von uns in einem Ladenfenster eine Säule von Eisstücken, und es schien ihm interessant, zu untersuchen, ob die Stücke an ihren Berührungsstellen sich vereinigt hätten. Als er das oberste Stück erfasste und es zu heben suchte, hob er die ganze Masse, welche aus mehreren grossen Stücken bestand, als ein zusammenhängendes Ganzes aus dem Gefäss. Selbst bei dieser hohen Temperatur waren die Stücke an den Kontaktstellen zusammengefrören, obwohl das Eis rund um diese Stellen fortschmolz, so dass die Stücke in einigen Fällen nur durch dünne Eiscylinder vereinigt blieben. Den gleichen Versuch kann man in Wasser machen, welches so warm ist, wie die Hand es ertragen kann. Zwei Eisstücke werden zusammenfrören und zuweilen in dem Wasser so zusammengefrören bleiben, bis, wie in dem vorher erwähnten Falle, die rund um die Berührungsstelle stattfindende Schmelzung die Stücke nur durch dünne Säulen der Substanz zusammenhängen lässt.“

„Mit diesen Thatsachen bekannt geworden, kamen wir auf den Gedanken, zu untersuchen, inwiefern in Folge dieser Eigenschaft die Gestalt des Eises verändert werden könnte, ohne dass die schliesslich stattfindende Kontinuität darunter leide. Es wurde erwartet, dass, obwohl durch grossen Druck eine Zerquetschung verursacht würde, doch neue Verbindungen entstehen würden, indem die getrennten Flächen wieder zusammenfrören; so dass der schliessliche Effekt dem ähnlich wäre, welcher durch Viscosität entstehen

würde. Um die Richtigkeit dieser Erwartung zu prüfen, wurden folgende Versuche angestellt.“

„Zwei Stücke von Buchsbaumholz, 4 Zoll im Quadrat und 2 Zoll dick, wurden jedes mit einer Vertiefung versehen, so dass, wenn sie auf einander gelegt wurden, ein linsenförmiger hohler Raum zwischen ihnen blieb, wie Fig. 1 im Querschnitt zeigt. Eine Kugel von kompaktem durchsichtigem Eise von einem Volumen, das etwas mehr als hinreichend war, um die Höhlung auszufüllen, wurde zwischen die Holzstücke gebracht, und diese dann dem Drucke einer kleinen hydraulischen Presse ausgesetzt. Das Eis brach, wie erwartet, aber bald vereinigte es sich wieder, und nachdem der Druck noch wenige Sekunden fortgesetzt war, hatte sich die Kugel in eine durchsichtige Linse von der Gestalt und Grösse der angewandten Form verwandelt.“

„Diese Linse legten wir in eine cylindrische Vertiefung von 2 Zoll Durchmesser um  $\frac{1}{2}$  Zoll Tiefe, welche in ein anderes Holzstück eingeschnitten war, und über welche eine Holzplatte mit ebener Fläche gelegt wurde, wie Fig. 2 im Querschnitt zeigt. Bei angewandtem Drucke brach die Linse, wie vorher die Kugel, aber die Stücke fügten sich in ihrer neuen Lage wieder zusammen, und nach weniger als einer halben Minute wurde ein durchsichtiger cylindrischer Eiskuchen aus der Form genommen.“

„Die Sache wurde einer noch strengern Prüfung unterworfen. In einem Stück Buchsbaumholz wurde eine halbkugelförmige Vertiefung ausgehöhlt, und ein zweites Stück wurde so abgedreht, dass eine halbkugelförmige Erhöhung blieb. Die letztere Halbkugel

hatte einen etwas kleineren Radius als die erstere, so dass, wenn die Holzstücke so auf einander gelegt wurden, dass die Erhöhung konzentrisch in die Vertiefung reichte, zwischen beiden ein schalenförmiger Raum von  $\frac{1}{4}$  Zoll Dicke leer blieb. Fig. 3 zeigt die Anordnung im Querschnitte. Die Messingstifte a b, welche an dem Stücke A B befestigt waren und in entsprechende Vertiefungen des Stückes CD passten, dienten dazu, die beiden Flächen konzentrisch zu erhalten. Ein Stück klares Eis wurde in die vertiefte Halbkugel gebracht, und die erhöhte Halbkugel darauf gelegt und nun das Ganze dem Drucke der hydraulischen Presse unterworfen. Nach kurzer Zeit wurde es aus der Presse genommen und nach Wegnahme des oberen Holzstückes zeigte sich eine glatte Eisfläche. Durch Klopfen an den Pflock p liess sich das Eis aus der Höhlung loslösen, und das Eisstück war durch den Druck in eine harte durchsichtige Schale von Eis verwandelt.“

„Die Anwendung der erhaltenen Resultate auf die bei Gletschern vorkommenden Gestaltveränderungen wird vielleicht noch erleichtert durch folgende hinzugefügte Versuche.“

„Zwei Stücke Buchsbaumholz, jedes 4 Zoll lang, 3 Zoll breit und 3 Zoll dick, waren so geformt, dass das eine an seiner einen Fläche eine schwache cylindrische Konkavität, das andere eine ebensolche Konvexität hatte, so dass beide in einander passten. In das konkave Stück wurde eine longitudinale Rinne eingeschnitten einen Zoll breit und einen Zoll tief. Fig. 4<sub>a</sub> zeigt die konkave Fläche, auf welcher die Rinne durch punktirte Linien angedeutet ist, und Fig. 4<sub>b</sub> die Anordnung beider Stücke. Es wurde nun ein gerades

Prisma von klarem Eise, 4 Zoll lang, 1 Zoll breit und etwas mehr als 1 Zoll dick, in die Rinne gelegt und das konvexe Holzstück darüber. Als diese Form, wie in den früheren Fällen, dem hydraulischen Drucke ausgesetzt wurde, zerbrach natürlich das Prisma, aber da seine Masse etwas mehr als hinreichend war, um die Rinne auszufüllen, und daher über die Ränder hervorstand, so wurden durch den Druck die Theile wieder aneinander gefügt, und die Continuität des Eises wieder hergestellt. Nach wenigen Sekunden konnte man es aus der Form nehmen, gebogen wie eine plastische Masse. Drei andere Formen wurden dann angewandt, der vorigen ähnlich, nur mit stufenweise wachsender Krümmung, und dasselbe Prisma musste sie nacheinander durchlaufen. Am Ende des Versuches kam das ursprüngliche Prisma, gebogen zu einem durchsichtigen Halbringe von festem Eise, heraus.“

Diese Beobachtungen, welche schon an sich, abgesehen von allen speziellen Anwendungen, für die Physik von grossem Interesse sind, wenden nun die Verfasser an, um die Gestaltänderungen, welche bei Gletschern vorkommen, und aus welchen man auf die Plasticität der Masse geschlossen hat, zu erklären.

Wenn man bei den vorher beschriebenen Versuchen nur den Anfangs- und Endzustand des Eises hätte beobachten können, so würde man vielleicht auch aus ihnen schliessen, dass das Eis eine plastische Masse sei. In der Wirklichkeit aber konnte man in diesen Fällen das Zerbrechen des Eises hören und fühlen. Bei der allmäligen Wirkung des Druckes hörte man einen Krach nach dem andern, die zuletzt so schnell auf einander folgten, dass sie ein knisterndes Geräusch



gaben, und sich in manchen Fällen fast zu einem musikalischen Tone vereinigten. Denkt man sich bei dem zuletzt beschriebenen Versuche, dass die Gestaltänderung in viel kleineren Absätzen vor sich gegangen wäre, dass man statt vier, vielleicht vierhundert aufeinanderfolgende Formen angewandt hätte, oder noch besser, dass ein und dieselbe Form ganz allmählig und stetig ihre Gestalt geändert hätte, so würden die einzelnen Brüche äusserlich weniger merkbar gewesen sein, und der Vorgang hätte noch mehr der Biegung einer plastischen Masse geglichen.

Mit diesem letzten hypothetischen Falle sind die Vorgänge innerhalb des Gletschers zu vergleichen. Eine auf der Längenrichtung des Gletschers senkrechte Eisschicht befindet sich zwischen der vor und hinter ihr liegenden Eismasse wie in einer Presse, und wenn diese Eismassen sich in der Mitte schneller bewegen, als an den Rändern, so gibt das eine Gestaltänderung der Form, welcher die Eisschicht folgen muss, und die dabei entstehenden Risse und Brüche werden durch den Druck wieder geschlossen, so dass die Kontinuität der Masse darunter nicht dauernd leidet.

Hiermit stimmt es auch überein, dass Forbes, als er an einer Reihe im Eise befestigter Pflöcke, welche ursprünglich eine gerade Linie bildeten, die allmähliche Krümmung verfolgte, kleine und unregelmässige Abweichungen von einer vollkommenen Kurve bemerkte. Dieses entspricht mehr der hier aufgestellten Ansicht über die Art, wie die Gestaltänderung entsteht, als der Annahme einer zähen Masse.

Was das Geräusch anbetrifft, welches man wegen der fortwährend stattfindenden Risse und Brüche des Eises vermuthen darf, wenn es nicht wegen der aus-

serordentlichen Langsamkeit, mit welcher die Bewegung und Formveränderung stattfindet, zu unbedeutend wird, um wahrnehmbar zu sein, so haben die Verfasser selbst bei ihrer Anwesenheit auf den Gletschern nicht darauf geachtet; sie glauben aber aus einigen Ausdrücken von Forbes schliessen zu dürfen, dass es existirt. Dieser nennt den Gletscher a crackling mass, und bezeichnet das Eis als cracking and straining forwards und sagt von ihm: it yields groaning to its fate.

Zum Schlusse dieses § führen die Verf. noch eine Stelle des interessanten Werkes von A. Mousson: die Gletscher der Jetztzeit an. Es heisst in demselben auf S. 13, nachdem davon gesprochen ist, dass der Gletscher sich bei seiner Bewegung allen Unregelmässigkeiten des Thalbettes auf das Innigste anschmiegt: „Mit dieser Fähigkeit der Formveränderung verbindet das Gletschereis noch ein anderes Vermögen, das an den flüssigen Zustand erinnert, nämlich die Fähigkeit des Verwachsens und Verschmelzens mit anderem Eise. So sieht man getrennte Gletscherzweige sich vollständig in Einen Stamm vereinigen, regenerirte Gletscher aus losen Trümmern sich bilden, Spalten und Klüfte sich wieder ausfüllen, und Aehnliches mehr. Diese Erscheinungen deuten augenscheinlich auf eine freilich nur langsam sich offenbarende Beweglichkeit der Theilchen, woraus der Gletscher besteht, so befremdend eine solche an einer festen, schwere Felstrümmer tragenden, in Spalten aufspringenden, daher spröden Masse, wie das Gletschereis, erscheinen mag. Die Lösung dieses Widerspruches bildet einen der schwierigeren Punkte in der Erklärung der Gletscher.“

„Wenn die hier angeführten Erscheinungen,“ fügen

die Verf. zu dieser Stelle hinzu, „unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Experimente über das Wiederausammenfrieren des Eises betrachtet werden, so scheint es, als ob der von dem Autor erwähnte Widerspruch eine genügende Lösung gefunden hat. Das Gletscherthal ist eine Form, durch welche das Eis durch seine eigene Schwere gepresst wird, und welcher es sich anschmiegen wird, ohne seine allgemeine Kontinuität zu verlieren, wie es die kleinen Stücke thun bei den Formen, die in den Experimenten angewendet wurden. Zwei Zweiggletscher vereinigen sich zu Einem Stamm durch das Wiederausammenfrieren der gepressten Vereinigungsflächen. Spalten werden geschlossen aus derselben Ursache; und das zerbrochene Eis eines Gletscherbruches stellt sich wieder her, wie ein Haufen Stücke unter der Presse in eine einzige Masse vereinigt wird.“<sup>1)</sup>

**4. Band-Struktur der Gletscher.** Auf diese Band- oder Schichten-Struktur der Gletscher hat zuerst Guyot 1838 aufmerksam gemacht. Er sah die Oberfläche des Bettelmatten-Gletschers mit regelmässigen Furchen von 1–2 Zoll Breite bedeckt, welche in eine halb schneeige Masse eindringen, und von einander getrennt waren durch hervorstehende Platten von mehr hartem und durchsichtigem Eise. Als er an eine weite Spalte kam,

---

<sup>1)</sup> Vielleicht kann man die Art, wie die verschiedenen Umwandlungen des Gletschers vor sich gehen, noch genauer darstellen, wenn man einen Unterschied in der Erklärung zulässt. Bei kleinen, sehr langsam stattfindenden Formveränderungen scheint mir ein plastisches Nachgeben des Eises nicht unmöglich zu sein; auf die grösseren Umänderungen dagegen findet wahrscheinlich die neue Erklärungsweise Anwendung, und füllt eine wesentliche Lücke in der bisherigen Theorie aus.

konnte er dieselbe Struktur bis tief in den Gletscher hinein beobachten. „So weit mein Blick reichen konnte,“ sagt er, „sah ich die Masse des Gletschers zusammengesetzt aus einer Menge von Schichten von schneeigem Eise, je zwei getrennt durch eine der erwähnten Platten (von mehr festem Eise), so dass ein regelmässig geschichtetes Ganzes gebildet wurde von der Art wie gewisse Kalkschiefer.“ Die theoretische Wichtigkeit dieser Erscheinung ist dann zuerst besonders von Forbes hervorgehoben.

Ausser der von Guyot beschriebenen regelmässigen Schichtung kommen auch noch andere Formen dieser Struktur vor, wie die Verf. im Folgenden beschreiben. „Bei unserem Aufenthalte auf dem unteren Grindelwaldgletscher lösten wir Eisplatten, senkrecht gegen die Schichtung des Gletschers los. Der Anblick, welchen sie darboten, wenn man durch sie hindurch sah, ist in Fig. 5 angedeutet. Die Schichten von durchsichtigem Eise schienen eingebettet in eine allgemeine milchige Masse; durch die ersteren konnte das Licht zum Auge dringen, während es durch die letztere aufgefangen wurde. Einige der durchsichtigen Theile waren scharf begrenzt, und boten länglich ovale Querschnitte dar, ähnlich dem einer doppelt konvexen Linse, und wir nannten daher diese Anordnung der Bänder die linsenartige Struktur. In anderen Fällen war die Schärfe der Begrenzung nicht vorhanden, aber es war doch noch eine Annäherung an die Linsenform zu erkennen, indem die Bänder in manchen Fällen als verwaschene blaue Streifen endigten.“ Die Grösse der beobachteten Linsen war sehr verschieden von 1 Zoll Länge und  $\frac{1}{12}$  Zoll Dicke bis 2 Fuss Länge und 2 Zoll Dicke; ja sie kommen vor von 10 Fuss Länge und 1

Fuss Dicke. „Diese Art der Struktur ist wahrscheinlich dieselbe, welche Forbes am Glacier des Bossons beobachtete, und mit folgenden Worten beschreibt: Die Adern und Bänder sind bei diesem Gletscher nicht durch eine einfache Abwechslung paralleler Schichten gebildet, sondern die Eisbänder haben alle das Ansehen von späterer Infiltration, verursacht durch Spalten, welche sich an beiden Seiten verengen.“<sup>1)</sup>

Forbes giebt von dieser Schichtung des Gletschers folgende Erklärung: Durch die ungleiche Bewegungsgeschwindigkeit der verschiedenen Theile des Gletschers wird in der halbfesten Masse an einzelnen Stellen der Zusammenhang zerstört, die dadurch entstehenden Spalten füllen sich mit Wasser, welches im Winter gefriert, und so die blauen Bänder bildet.<sup>2)</sup>

Gegen diese Theorie lassen sich unter anderen folgende Einwendungen machen:

1) Die Kälte des Winters dringt nur bis auf eine geringe Tiefe in den Gletscher ein; Saussure nahm als Grenze 9 Fuss an. Die blauen Bänder dagegen findet man in jeder Tiefe, in welcher man das Eis untersuchen kann; Agassiz beobachtete sie bis 120 Fuss tief.

2) Die durch die blauen Bänder angedeutete Struktur kann, wie oben erwähnt, auch eine andere Form annehmen, als die, welche Guyot beschreibt, wo sie in einer durchgehenden Schichtung besteht, nämlich

1) Forbes, Travels 181.

2) Ebendasselbst S. 377.

die, dass linsenförmige Massen von durchsichtigem Eise in der allgemeinen Masse von weissem Eise eingebettet sind. Nun scheint es aber mechanisch unmöglich, dass die Trennung der Kontinuität, welche Forbes annimmt, in der Weise eintreten könnte, dass sie gesonderte linsenförmige hohle Räume bildete.

3) Die Spalten, welchen die blauen Bänder ihre Entstehung verdanken sollen, werden als eine Folge der Bewegung des Gletschers betrachtet. Da nun die Bewegung Winter und Sommer stattfindet, so müssten auch die Spalten in beiden Jahreszeiten entstehen: Nun aber können sie sich im Winter nicht mit Eis füllen, weil es an Wasser fehlt, womit sie sich zuerst füllen müssten, und im Sommer wiederum fehlt die Kälte, durch welche das Wasser frieren könnte. Demnach müssten zu Ende jedes Sommers die während des ganzen Jahres entstandenen Spalten vorhanden sein, angefüllt mit Wasser. Das ist aber nicht der Fall. Die linsenförmigen durchsichtigen Eiskörper kommen in beträchtlichen Grössen vor bis zu 10 Fuss Länge und 1 Fuss Dicke; ebenso gross müssten also auch die Höhlungen sein, die zu Ende des Sommers mit Wasser gefüllt wären. Solche Höhlungen könnten der Beobachtung nicht entgehen, wenn sie existirten, und doch sind sie nie beobachtet.

**5. Beziehung zwischen der Schieferspaltung und der Bandstruktur.** Es hat sich in den letzten Jahren eine mechanische Theorie der Spaltung des Schiefers Geltung verschafft, welche zuerst von Daniel Sharpe aufgestellt zu sein scheint, und welche darauf beruht, dass die Spaltbarkeit des Schiefers durch einen Druck entstanden ist, welcher in einer zu seinen jetzigen Spaltungsflächen senkrechten Richtung auf ihn gewirkt

hat. Verschiedene in dem Schiefer befindliche fremdartige Körper legen durch die Art der Gestaltveränderung, welche sie erlitten haben, ein unzweifelhaftes Zeugniß davon ab, dass ein solcher Druck stattgefunden hat. Es entsteht nun aber die Frage: kann durch Druck eine Spaltbarkeit hervorgebracht werden? Man hat bisher geglaubt, dass sich diese Frage nicht würde experimentell lösen lassen, weil wir nicht im Stande wären, einen so mächtigen Druck hervorzubringen, und ihn so lange wirken zu lassen, wie es hierzu nöthig wäre.

Die Schwierigkeiten sind indessen nicht so gross, als man glaubte, und es ist Hrn. Tyndall i. J. 1855, als er den Einfluss des Druckes auf Magnetismus untersuchte, gelungen, in weissem Wachs und andern Körpern eine Spaltbarkeit von überraschender Feinheit durch Druck hervorzubringen. Dieses Resultat wandte er in der anfangs erwähnten Vorlesung auf die Schieferspaltung und andere Erscheinungen an. Das Wesentlichste der dort vorgelegten Theorie ist folgendes:

„Wenn ein Stück Thon, Wachs, Marmor oder Eisen zerbrochen wird, so ist die Bruchfläche nicht eine Ebene, auch ist es nicht eine Fläche, die nur von der Form des Körpers und der Kraft, welcher er unterworfen wurde, abhängt; sondern sie ist zusammengesetzt aus unzähligen Einzahnungen oder kleinen Facetten, deren jede eine Fläche schwacher Cohäsion andeutet. Der Körper hat nachgegeben, wo er am leichtesten nachgeben konnte, und durch die Blosslegung dieser Facetten, welche in manchen Fällen crystallinisch, in anderen rein mechanisch sind, erkennt man, dass der Körper aus einem Aggregat unregel-

mässig gestalteter Theile besteht, welche von einander durch Flächen schwacher Cohäsion getrennt sind. Eine solche Beschaffenheit muss in hohem Grade der Schlamm, aus welchem die Schieferfelsen gebildet sind, besessen haben, nachdem das Wasser, mit dem er zuerst gesättigt gewesen ist, ausgetrocknet war; und ein auf eine solche Masse ausgeübter Druck muss die Wirkung hervorbringen, dass ein blättriges Gefüge entsteht, wie es im Kleinen so vortrefflich im weissen Wachs erzeugt wurde. Eine Ursache der Spaltbarkeit kann also, allgemein ausgedrückt, die sein, dass die unregelmässigen Flächen schwacher Cohäsion durch den Druck in Ebenen verwandelt werden. Um in einem compacten Körper, wie Wachs, ein blättriges Gefüge zu erzeugen, muss er natürlich, während er in einer Richtung einem Druck nachgiebt, in einer darauf senkrechten Richtung ausweichen können; das dadurch entstehende seitliche Gleiten der Theilchen mag eine zweite Ursache sein, welche zur Hervorbringung von Spaltbarkeit sehr wirksam ist.“

Diese zweite Ursache, das seitliche Gleiten, braucht nicht unter allen Umständen denselben Erfolg zu haben. „Wenn ein voller Cylinder von ein Zoll Höhe durch senkrechten Druck in einen Kuchen von  $\frac{1}{4}$  Zoll Höhe zusammengepresst wird, so ist es physikalisch unmöglich, dass die in einer Vertikallinie befindlichen Theilchen sich alle mit gleicher Geschwindigkeit seitwärts bewegen. Wenn sie dieses aber nicht thun, so muss die Cohäsion zwischen ihnen vermindert oder aufgehoben werden. Der Druck wird dafür neuen Contact hervorbringen, und wenn der neue Contact dieselbe Cohäsionskraft hat, wie der alte, so kann diese Ursache keine Spaltbarkeit erzeugen. Die



relative Fähigkeit der verschiedenen Stoffe, Spaltbarkeit anzunehmen, scheint zum grossen Theile auf ihrem verschiedenen Verhalten in dieser Beziehung zu beruhen. In Butter zum Beispiel sind die neuen Verbindungen gleich oder nahe gleich den alten, und die Spaltbarkeit ist daher unmerklich; in Wachs scheint dieses nicht der Fall zu sein, und hierauf grossentheils beruht die Vollkommenheit seiner Spaltung. Die fernere Untersuchung dieses Gegenstandes verspricht interessante Resultate.“ Als eine dritte Ursache der Spaltbarkeit wird endlich noch angeführt, dass kleine Höhlungen innerhalb der Masse flach gedrückt werden.

Um den Zusammenhang zwischen dieser Theorie und den Gletscherphänomenen nachweisen zu können, wurde ein Versuch angestellt, welcher geeignet ist, die mechanischen Bedingungen, unter denen der Gletscher steht, klar zu machen, und welcher in ähnlicher Weise auch schon von Forbes zum Beweise seiner Zähigkeitstheorie angewandt ist. Obwohl, wie oben gezeigt wurde, der innere Vorgang bei den Gestaltänderungen des Gletschers ein durchaus anderer ist, als bei einer zähen Masse, z. B. einem Schlammstrom, so sind doch die äusseren Erscheinungen zum Theil gleich, und der Schlammstrom wird dazu dienen können, die Kräfte, welche an verschiedenen Stellen wirken, zu beurtheilen.

Es wurde ein Holztrog verfertigt, welcher in Fig. 6<sub>a</sub> im Grundriss und in Fig. 6<sub>b</sub> im vertikalen Längsschnitt dargestellt ist. Die Seitenwände waren nicht überall parallel, sondern bildeten an einer Stelle eine Verengung, an einer andern eine Erweiterung, wie es die doppelt ausgezogenen Linien AC und BD zeigen. Der Boden war gleichfalls nicht eben, sondern

mehrfach gebrochen, wie es durch die doppelte Linie GH angedeutet ist. Das Rechteck ABFE bedeutet ein besonderes Gefäss, welches von dem übrigen Trog abgeschlossen, oder durch das Brett AB schleusenartig geöffnet werden konnte, wie in Fig. 6, deutlich zu sehen ist. Dieses Gefäss wurde mit einer Mischung von feinem Pfeifenthon und Wasser gefüllt, und dann die Schleuse so weit geöffnet, dass der Schlamm gleichmässig in den Trog abfloss. Auf die Oberfläche des langsamen weissen Stromes wurden dann farbige Kreise aufgedrückt und beobachtet, wie diese allmählig ihre Gestalt änderten.

Der mittlere Kreis c wurde, wie die Figur zeigt, abwechselnd in eine verkürzte und eine verlängerte Ellipse verwandelt, wobei der Uebergang natürlich jedesmal durch die Kreisform stattfand. Die ersten Veränderungen entstanden nur durch die verschiedene Neigung des Bodens, welche abwechselnd Druck oder Zug veranlasste. Bei den letzten Veränderungen dagegen wirkte auch die seitliche Verengung und Erweiterung des Troges mit.

Die in der Nähe der Trogwände aufgedrückten Kreise liessen durch ihre Gestaltänderungen den Einfluss der durch die Adhäsion bewirkten Verzögerung der seitlichen Theile des Stromes erkennen. Wie man sieht, sind die Kreise nicht nur in längliche Gestalten verwandelt, sondern diese auch gegen die Axe des Troges geneigt. Die Wirkung, welche dadurch entstehen muss, dass nebeneinander befindliche Theile des Stromes verschiedene Geschwindigkeit haben, wird vielleicht durch die in Fig. 7, A, B und C dargestellten Anordnungen anschaulich werden. In A sind nebeneinander drei Linien gezogen, deren Richtung parallel der

Bewegungsrichtung sein soll; und auf jeder sind in gleichen Abständen drei Punkte markirt  $a, b, c; a', b', c'; a, b, c$ . Denkt man sich nun, dass diese Linien sich, ohne dass ihre Länge verändert wird, verschiedenschnell vorwärts bewegen, so erhält man nach einiger Zeit die Anordnung B. Hier hat offenbar in der Richtung  $a'b'c'$  eine Verlängerung der ursprünglichen Abstände stattgefunden, und in der Richtung  $a,b,c'$  eine Verkürzung. Nimmt man an, die Gestaltänderung sei noch so gering, dass sie noch kein wirkliches Gleiten der Theilchen veranlasst habe, sondern der Stoff durch seine Elasticität so weit habe nachgeben können, so befindet sich dieser natürlich in einem gespannten Zustande, indem er in der Richtung  $a'b'c'$  eine Dehnung und gleichzeitig in der Richtung  $a,b,c'$  eine Zusammenrückung erlitten hat. Die Anordnung C endlich stellt den Fall dar, wo die einzelnen Linien ihrer Länge nach verkürzt und zugleich durch verschiedene Bewegungsgeschwindigkeit gegeneinander verschoben sind. Auch hier findet nach verschiedenen Richtungen gleichzeitig Verlängerung und Verkürzung der ursprünglichen Abstände statt. Die Richtungen grösster Verlängerung und Verkürzung, welche man erhält, wenn man ausser den neun markirten Punkten auch alle übrigen Punkte der Masse mit berücksichtigt, sind wieder auf einander senkrecht, aber sie haben eine andere Lage, als im vorigen Falle, etwa so, wie es in der Figur durch die punktirten Linien angedeutet ist.

Um nun die durch Beobachtung des Schlammstromes gewonnenen Resultate auf den Gletscher anwenden zu können, muss zuerst ein Hauptunterschied hervorgehoben werden. Wo ein Druck wirkt, werden im Eise die Theile in ähnlicher Weise ihre Lage än-

dern, wie im Schlamm, wenn auch der dabei stattfindende innere Vorgang ein anderer ist; wo dagegen ein Zug wirkt, wird das Eis nicht nachgeben, wie der zähe Schlamm, sondern es wird zerreißen, und man erhält so die an den Gletschern beobachteten Spalten.

Verfolgen wir nun die Gestaltänderungen der Kreise in Fig. 6<sub>a</sub> so ergibt sich, wenn wir die im Troge bewegte Masse als einen Gletscher betrachten, unmittelbar Folgendes. Zwischen AB und ef können, wenigstens in der Mitte des Gletschers, keine Spalten entstehen. Auf dem Abhange zwischen ef und gh werden sich Spalten bilden, und zwar in der Mitte senkrecht zur Längenrichtung des Gletschers, nach den Rändern zu dagegen in schräger Richtung, nämlich senkrecht zur Längsaxe der dort schräge liegenden Figuren. Zwischen gh und ik werden sich die Mittelspalten wieder schliessen, die Randspalten dagegen können zum Theil offen bleiben. Zwischen ik und mn werden sich neue Mittelspalten bilden, und jenseit mn werden, wegen der seitlichen Ausbreitung des Gletschers, auch Längsspalten entstehen, wodurch die transversalen Eisrücken in prismatische Blöcke zerissen werden, die sich weiterhin durch die Wirkung der Sonne in glänzende Spitzsäulen verwandeln. Alles dieses entspricht im Wesentlichen dem wirklichen Verhalten der Gletscher.

Einen andern Gegenstand der Vergleichung bildet nun die Schichtenstruktur der Gletscher. Wenn der obigen Theorie gemäss die Schichtung ähnlich wie beim Schiefer durch Druck entsteht, so muss die Richtung der Schichten, oder der blauen Bänder, welche die Lage der Schichten andeuten, senkrecht auf der Richtung des Druckes sein. Dabei muss aber berück-

sichtigt werden, dass eine einmal entstandene Schichtenstruktur auch noch fort dauern kann, wenn das Eis durch seine Bewegung an eine Stelle gelangt ist, wo kein Druck mehr stattfindet, und dass die Schichten durch die Bewegung auch ihre Richtung ändern können. Man muss also bei der Untersuchung dieses Gegenstandes nicht bloss den augenblicklichen, sondern auch den frühern Zustand des Eises in Betracht ziehen.

Es ist oben gezeigt, dass in der Nähe der Ränder, wegen der verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeit ein Zustand entstehen kann, in welchem das Eis gleichzeitig in einer Richtung gedehnt und in einer anderen, darauf senkrechten zusammengedrückt ist. Hier können also Spalten und innere Schichten zugleich entstehen, und beide werden im Allgemeinen gegen die Längenrichtung des Gletschers geneigt und auf einander senkrecht sein. Dieses entspricht in der That der Erfahrung. Wenn in der Mitte eines Gletschers, wo nur ein longitudinaler Druck stattfindet, Schichtung entsteht, so muss diese transversal sein, wie es ebenfalls wirklich beobachtet wird. Ausserdem können lokale Hindernisse, welche einen Druck verursachen, dadurch auch Ursache einer besonderen inneren Struktur sein, welche auch hier, so weit die Beobachtung reicht, mit der Theorie übereinstimmt.

Ein schönes Beispiel für die Bildung der Schichten- oder Bandstruktur ist diejenige, welche durch den gegenseitigen Druck zweier zusammenfliessender Gletscher entsteht. Ein solcher Fall ist die Vereinigung des Lauteraar- und Finsteraargletschers zum Unteraargletscher. Dieser Fall ist, ähnlich wie früher ein einfacher Gletscher, durch einen Versuch mit fliessendem Thonschlamm nachgeahmt. Die Anordnung wird

aus Fig. 8 ohne weitere Erläuterung leicht ersichtlich sein. In den beiden Zweigen bald nach dem Ausfluss aus den Schleusen NF und UL wurde die Oberfläche des Thones mittelst einer in farbige Flüssigkeit eingetauchten Glasröhre mit geraden Reihen kleiner farbiger Kreise bedeckt, wie *ab* und *a'b'*, und die Figur zeigt, wie diese Kreise ihre Gestalt und ihre Anordnung zu einander im Verlauf der Bewegung änderten. An der Stelle des Zusammentreffens beider Ströme sind die Kreise bis zu Linienzusammengedrückt. Dem entspricht es ganz, dass auf dem wirklichen Gletscher unter und neben der Mittelmoräne, welche die Vereinigungslinie der beiden Gletscherzweige kenntlich macht, die Bandstruktur am deutlichsten ausgeprägt ist, und die Bänder der Moräne parallel sind. Zwischen der Moräne und den Rändern des vereinigten Gletschers ist die Bandstruktur sehr unvollkommen ausgeprägt, was dem Resultate des Versuches entspricht, indem in der Mitte jedes der beiden vereinigten Ströme die Kreise fast ungeändert sind. Man mag vielleicht sagen, dass die Bandstruktur an der Vereinigungslinie beider Gletscher dadurch entstehe, dass der eine schneller fließt, als der andere, und sie daher an einander gleiten. Indessen findet man auf der Karte von Agassiz verzeichnet, wie eine gerade Linie, welche quer über den Unteraargletscher markirt war, sich im Verlauf von drei Jahren bog. Diese Kurve zeigt aber an der Grenzlinie der beiden vereinigten Gletscher keine Unterbrechung der Stetigkeit, wie es sein müsste, wenn ein Gleiten der Gletscher aneinander stattfände.

**6. Schmutzzonen der Gletscher.** „Wo die Bandstruktur eines Gletschers stark entwickelt ist, wird die Oberfläche des Eises durch die Wirkung des Wet-

ters in Uebereinstimmung mit der darunter befindlichen Schichtung gefurcht. Diese Furchen sind manchmal fein, wie mit einem Stift gezogen, und haben in manchen Fällen eine auffallende Aehnlichkeit mit denen, welche ein Rechen auf einer mit Sand bedeckten Fläche macht. Da die feineren Theile des auf dem Eise befindlichen Schmutzes sich vorzugsweise in den Furchen lagern, so wird dadurch die Richtung derselben, welche immer mit der der blauen Bänder übereinstimmt, so kenntlich, dass ein geübter Beobachter vom blossen Anblicke der Oberfläche des Gletschers sogleich die Richtung der Schichten angeben kann. Aber ausser diesen schmalen Vertiefungen werden zuweilen auch grössere Flecke beobachtet, auf welchen das Eis seine reine Farbe verloren hat, welche die Form von Kurven annehmen, breit genug, um Hunderte oder Tausende der schmaleren zu bedecken. Für ein Auge, welches sich über dem Gletscher, auf dem sie vorhanden sind, in hinlänglicher Höhe befindet, ist ihre allgemeine Anordnung und ihre Richtung deutlich sichtbar.“

Forbes, welcher auf diese sogenannten Schmutzzonen zuerst aufmerksam gemacht hat, hat auch sie mit der innern Struktur des Eises in Verbindung gebracht. Er meinte, dass der Schmutz sich am meisten an solchen Stellen festsetze, wo das Eis am porösesten sei, und dass die Schmutzzonen daher Anzeichen dafür seien, dass die Masse des Gletschers in diesen Richtungen durchzogen werde von Eisstreifen, welche eine vorzugsweise porös gebänderte Struktur haben. Er betrachtete später den Abstand je zweier Schmutzzonen als das jährliche Wachsen des Gletschers und verglich sie daher mit den Jahresringen der Bäume. Diese Erklärung können die Verfasser wenigstens nicht als all-

gemein gültig anerkennen. Ohne zu bestreiten, dass es breitere Schmutzstreifen auf den Gletschern geben könne, deren Anordnung mit der innern Struktur des Eises zusammenhängt, glauben sie sich doch überzeugt zu haben, dass in manchen Fällen die Schmutzzonen eine ganz andere Ursache haben.

„Als wir an einer Stelle standen, welche die Aussicht über den Rhonegletscher beherrscht, sowohl oberhalb als unterhalb des Gletscherbruches, beobachteten wir, dass über das oberhalb befindliche weite Eisfeld Sand und Trümmer ohne Regelmässigkeit zerstreut waren. Am oberen Rande des Eisfalles verengt sich das Thal zu einer Schlucht und bildet für eine gewisse Strecke einen steilen Abhang. Indem das Eis über diesen hinabsteigt, wird es stark zerklüftet. Schon am oberen Theil der Neigung entstehen mehrere Querspalten im Gletscher und beim weiteren Hinabsteigen wird er zerrissen in unregelmässige Grate und Spitzen, getrennt durch Zwischenräume, wo die Masse ganz in Stücke zerbrochen ist. Durch dieses Zerbrechen des Eises erleidet der Schmutz an seiner Oberfläche eine neue Vertheilung; statt gleichmässig über den Abhang verbreitet zu sein, erblickt man Räume, die ganz frei von Schmutz sind, während andere Räume damit bedeckt sind, aber ohne einen Anschein von Regelmässigkeit in dieser Vertheilung. An manchen Stellen erscheinen grosse unregelmässige Flecke, an anderen langgestreckte Räume, die mit Schmutz bedeckt sind. Am Fuss des Eisfalles ändert sich der Anblick, aber die Veränderung würde noch ohne Bedeutung sein, wenn das Auge nicht durch das, was es weiter unten sieht, belehrt wäre. Wenn das Eis ganz aus der Schlucht hervorgetreten ist, und nun in dem



unteren Thale Raum hat, sich frei auszubreiten, werden die Schmutzflecke durch den hinter ihnen wirkenden Druck zusammengedrückt, und seitlich in schmale Streifen ausgezogen, welche quer über den Gletscher gehen; und da der mittlere Theil sich schneller bewegt als die Seiten, so gestalten sich diese die Eisfarbe verdeckenden Streifen zu Kurven, deren Convexität nach unten gekehrt ist, und bilden so das, was, wie wir glauben, Forbes als Schmutzzonen bezeichnet hat. Am Grindelwaldgletscher, wo einer von uns bei der Untersuchung der Streifen von Dr. Hooker begleitet war, war diese Veränderung in der Vertheilung des Schmutzes, — nämlich das Zusammendrücken und seitliche Ausziehen der Flecken und ihre Biegung weiter abwärts vom Eisfall, — besonders auffällig.“

Auch diese Erscheinung haben die Verfasser durch einen Versuch im Kleinen nachgemacht. Fig. 9<sub>a</sub> zeigt den Grundriss und Fig. 9<sub>b</sub> den vertikalen Längsschnitt eines Troges, welcher im Groben den Rhonegletscher darstellen soll. AEFC ist das obere Bassin; zwischen EF und GH verengt sich der Trog und sein Boden nimmt zugleich eine starke Neigung an, wodurch der Eisfall angedeutet ist; endlich GBDH stellt das erweiterte und verhältnissmässig ebene Thal dar, in welchem der Gletscher sich ausbreitet, und den Theil bildet, den die von der Grimsel oder der Furka kommenden Reisenden sehen. ALMC ist das mit einer Schleuse versehene Gefäss, aus welchem, wie bei den früheren ähnlichen Versuchen, der Thonschlamm ausfloss. Während der Schlamm in langsamer Bewegung war, wurde seine Oberfläche in dem Raume AEFC mit dunkelfarbigem Sande bestreut, welcher die auf

dem oberen Theile des Gletschers unregelmässig zerstreuten Trümmer darstellte. Während des Durchganges von EF zu GH wurde die Masse unregelmässig zerhackt, um die Ortsveränderung der Eismassen in dem Bruche nachzuahmen, wodurch auch eine ungleichmässige, verworrene Vertheilung des Sandes entstand. Weiter unten wurde die Masse sich selbst überlassen. Da nahmen die dunklen Flecke und weissen Zwischenräume bald zierliche, symmetrische Formen an. Sie wurden der Länge nach zusammengedrückt und seitlich ausgezogen, und zugleich durch die verschiedene Bewegungs-Geschwindigkeit in nach unten convexe Kurven gebogen, so dass zuletzt ein System von Streifen entstand, welches ein treues Miniaturbild der Streifen des Gletschers darbot. Fig. 9<sub>a</sub> giebt einen rohen Abriss dieser Kurven. Diese Experimente wurden noch in verschiedenen Weisen abgeändert, wobei das Resultat im Allgemeinen immer dasselbe blieb.

Zum Schlusse mag hier gleich noch erwähnt werden, dass die beiden Forscher in Begleitung eines dritten, des Hrn. Hirst, i. J. 1857 abermals eine Reise nach den Alpen unternommen haben, um eine Reihe von Fragen, welche sich ihnen im Verlaufe ihrer Untersuchungen dargeboten hatten, durch direkte Beobachtungen an den Gletschern zu erledigen. Sie haben eine bedeutende Zeit zu Beobachtungen und Versuchen an den Gletschern des Chamouny-Thales verwandt, deren Resultate in den folgenden Heften dieser Vierteljahresschrift ebenfalls mitgetheilt werden sollen.

Fig. 1.

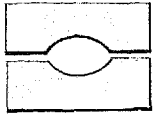


Fig. 2.



Fig. 3.

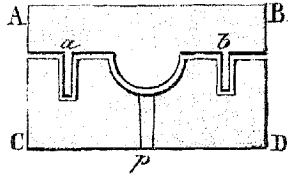


Fig. 4a.

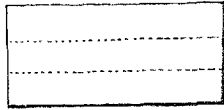


Fig. 4b.

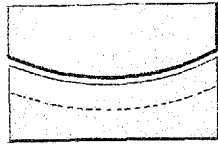


Fig. 6a.

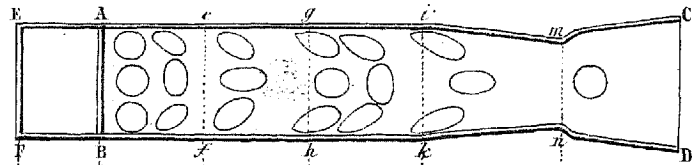


Fig. 6b.

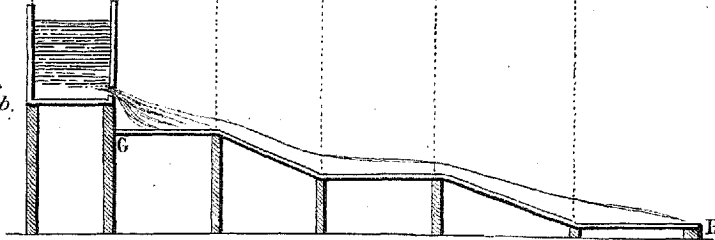


Fig. 5.

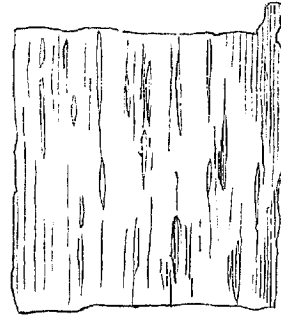


Fig. 8.

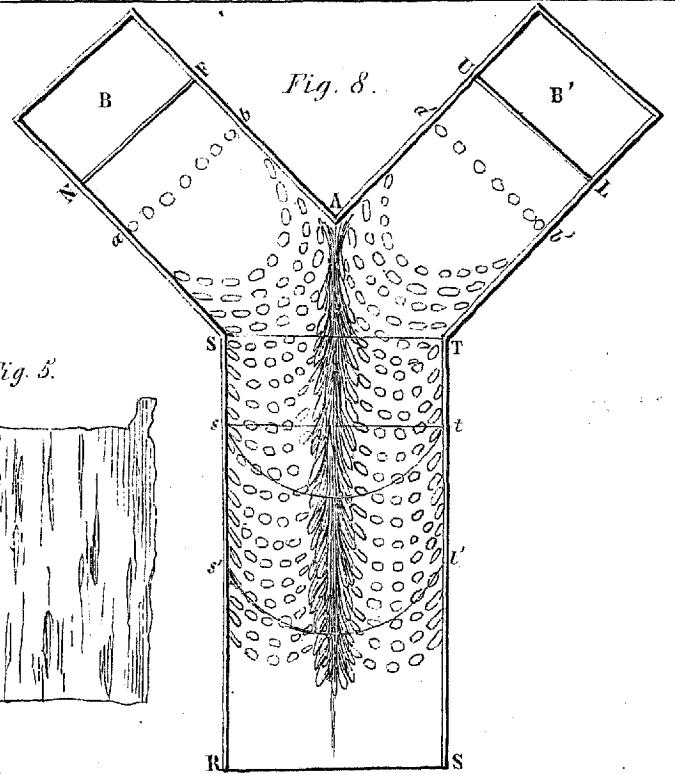


Fig. 9a.

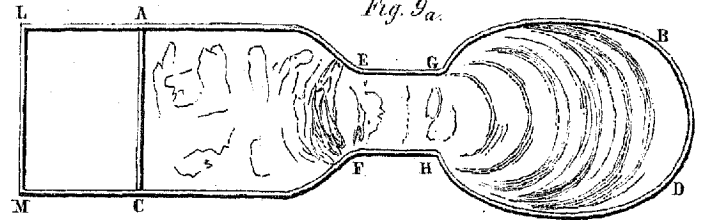


Fig. 9b.

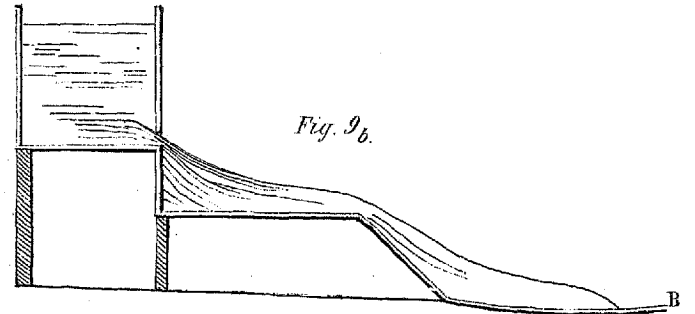


Fig. 7.

