

V o r t r ä g e.

Über den Druck, den das fließende Wasser senkrecht zu seiner Stromrichtung ausübt.

Von **Prof. Dr. C. Ludwig** und **Dr. J. Stefan**.

(Vorgelesen in der Sitzung vom 29. April 1855.)

(Mit 3 Tafeln.)

I. ABHANDLUNG.

Druckmessungen, welche mit wandständigen Manometern an solchen Stellen gemacht wurden, an denen ein Stromrohr sich plötzlich erweitert oder verengt, sind in den letzten Jahrzehnten sehr häufig in der physiologischen Literatur besprochen worden, theils um aus ihnen für die thierische Functionenlehre Folgerungen zu ziehen, theils auch um die an solchen Orten sich darbietenden Erscheinungen aus den bis dahin bekannten hydraulischen Fundamentalsätzen zu erklären. Aus beiden Gründen wurde derselbe Fall von uns in Untersuchung gezogen, da sowohl eine kurze Überlegung als auch eine vorläufige Ansicht der Sache zeigten, dass bisher manches wesentliche Moment bei der Untersuchung dieses Falles unbeachtet geblieben ist. Dieses gilt namentlich von der Erscheinung, dass die Curve, deren zur Stromaxe als Axe der Abscissen gehörige Ordinaten Wanddrücke des strömenden Wassers bedeuten, an der Stelle einer plötzlichen Verengung oder Erweiterung des Stromrohres nicht ebenfalls so plötzlich einen Sprung mache, sondern innerhalb des weiten Rohres nur allmählich von einer kleinern zu einer grösseren Ordinate aufsteige.

Dies liess eigenthümliche Strömungsvorgänge am Anfange des weiteren Röhrenstückes vermuthen. Als wir, um diesen näher zu kommen, dem Wasser Bärlappsamen beimischten, bemerkten wir in der That, dass die Wirbel, welche um die Einflussmündung aus dem engen in das weitere Röhrenstück entstehen, durchaus nicht jene einfache Form annehmen, wie sie gewöhnlich von den Hydraulikern

beschrieben werden. Im Gegensatz zu den gewöhnlichen Angaben boten die an der Umgrenzung des Wirbels gelegenen Bahnen der Wassertheilchen Ähnlichkeit mit der Begrenzungslinie eines Birnendurchschnittes dar, den man sich in das Stromrohr so gelegt denken muss, dass der breitere Scheitel desselben nach der Einflussmündung (also nach der engen Mündung) hinschaut. Diese Wirbel liessen somit dem fortschreitenden Strome ein allmählich sich erweiterndes Bett frei. In diesem bewegt sich der fortschreitende Strom aber weder mit constanter Geschwindigkeit, noch auch parallel den Wandungen des Bettes, sondern in Schwingungen, deren Ebenen die Axe des Stromrohres unter einem Winkel schneiden, der einem rechten schon nahe kömmt. Diese Erscheinung, welche in Fig. 1 versinnlicht wird, liess vermuthen, dass die Spannung in demselben Röhrenquerschnitte nicht überall dieselbe sei und dass diese Verschiedenheit der Spannung an verschiedenen Orten einen grossen Theil der vorkommenden Erscheinungen bedinge. Ein Manometer erfüllte auch die Erwartung, indem es nahe an der Einflussmündung mitten durch die Röhre geführt den Druck an der Wand höher als an der Stelle zwischen dem fortschreitenden Strome und dem Wirbel, in der Mitte des fortschreitenden Stromes am niedrigsten und auf der andern Seite wieder höher zeigte. Diese Erfahrung bewog uns, die Abnahme des Druckes von der Wand gegen die Axe zuerst in einer horizontalen, durchweg gleich weiten Röhre, die von einem beharrenden constanten Strome durchflossen wird, aufzusuchen und auch hier zeigte das Manometer senkrecht gegen die Stromrichtung geführt nach der Axe zu einen bedeutend abnehmenden Druck. — Während der Herstellung zur Messung geeigneter Apparate brachte der Leipziger Monatskatalog die Ankündigung von Darcy's ¹⁾ Werk, dessen Durchsicht uns überzeugte, dass dieser Hydrauliker dieselbe Erfahrung schon gemacht habe, die er in einem Anhange zu seinem Werke mittheilt. Da aber Darcy die Bedeutung dieser Beobachtung nicht in gehörigem Maasse würdigt, sondern trotz ihr annimmt, dass der Seitendruck auf allen Orten eines Querschnittes, der senkrecht zur Stromrichtung geht, derselbe sei, so sahen wir uns nicht veranlasst, von der Verfolgung unseres Fundes

¹⁾ Recherches experimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux. Paris 1837. (Separatdruck aus dem XV. Bande der Memoiren der kais. Akademie der Wissenschaften.)

abzustehen. Wir gehen nun sogleich zur Beschreibung unserer Versuche über.

Der Behälter, aus welchem der Strom gespeist wurde, hatte die gewöhnliche Einrichtung, — ein mit ihm communicirendes zu seiner Basis senkrechtes Glasrohr zeigte die Höhe des Wasserstandes über der horizontalen Axe des sehr weit gebohrten Hahnes an, durch welchen das Stromrohr und das Druckgefäss mit einander verbunden waren. Wenn die mittlere Geschwindigkeit im Stromrohr gemessen wurde, so wurde gleichzeitig der Wasserstand zu Beginne und zu Ende der Messung beobachtet, der Unterschied beider Stände betrug selbst bei der grössten gemessenen Geschwindigkeit nur wenige Millimeter. Sollte dagegen der Wasserdruck in dem Strome gemessen werden, so ergoss sich der letztere in eine Pumpe. Aus dieser wurde das Wasser in den Behälter zurückgeführt, und zwar in der Art, dass die Pumpe in stetigem und gleichmässigem Gange verharrte und der Wasserspiegel in dem Behälter immer in derselben Höhe blieb. Dies geschah mit der Vorsicht, keine allzu grossen Schwankungen durch den eingepumpten Wasserstrahl in dem Behälter selbst zu erzeugen, was so weit gelang, dass in dem etwa 10 Millimeter weiten Manometer des Druckgefässes während des Einpumpens keine sichtbaren Bewegungen zum Vorschein kamen. Das verwendete Wasser war bei allen Versuchen, bei deren Vorführung im Folgenden nicht das Gegentheil bemerkt ist, filtrirt.

Die gebrauchten Stromröhren waren von Glas oder Messing mit polirter innerer Oberfläche; ihre Länge schwankte von 1 bis 2 Meter, der Durchmesser derselben war nie unter 7·5 Millimetern. Die Messingröhren waren durchweg gleichweit, die Glasröhren (aus einem grossen Vorrathe ausgesucht) waren dies mindestens sehr annähernd. Vor jeder Versuchsreihe gab man der betreffenden Röhre sorgfältig die horizontale Lage. An den Wänden der Röhren befanden sich in genau gemessenen Abständen Öffnungen, durch welche die Manometerröhren an den Strom oder in denselben geführt werden konnten. Da es unsere Versuche erheischten, den Druck auf demselben Stromschnitte an mehreren Orten zu messen, so befanden sich öfters zwei, zuweilen drei Öffnungen auf demselben Kreisumfange, und zwar so, dass sie um die halbe Peripherie, im letzteren Falle um je einen Quadranten, von einander abstanden.

Ausserdem wurde dafür gesorgt, dass die auf derselben Röhrenseite befindlichen Öffnungen genau in einer geraden Linie lagen.

Die Manometer, welche wir gebrauchten, waren entweder nur zum Ein- oder zum Durchschieben durch das Stromrohr eingerichtet. Die ersteren bestanden aus einem feinen cylindrischen Röhrechen, welches in das Stromrohr eingeschoben werden sollte. Dieses war an der vordern Mündung frei, an der hintern an einen durchbohrten Metalleylinder angelöthet, an welchen letzteren das druckmessende Glasrohr befestiget werden konnte. Diese Befestigung geschah entweder durch Verkittung oder es wurde die Verbindung zwischen dem Metalleylinder und dem Druckmesser durch ein langes bewegliches Kautschukröhrechen hergestellt, in welchem letzteren Falle dann das Druckrohr aufgehängt wurde. Um das Manometerröhrechen mit der Wand des Stromrohres so zu verbinden, dass eine wasserdichte Führung des ersteren bis zu jeder beliebigen Stelle des Stromquerschnittes möglich war, wurde von aussen an das Stromrohr eine schmale lange Messingplatte mit Drath aufgebunden, nachdem vorher zwischen beide einander zugewendete Flächen eine Kautschukplatte gelegt war. Von der Platte erhob sich ein kurzes auf ihr senkrechtcs Rohr, das mit Kork gefüttert war; in diesem lief der oben angegebene durchbohrte Metalleylinder, an den das Manometerröhrechen angelöthet war, und machte die Erreichung des Bezweckten möglich. Später zogen wir es vor, das feine Manometerröhrechen länger zu machen und dieses gerade in einen gut durchbohrten Kork zu führen. Das Manometerröhrechen, welches in das Stromrohr eingeführt wurde, ging immer durch den grössten Durchmesser desselben, und wenn mehrere auf derselben Kreisperipherie sich befanden, so waren sie mit Sorgfalt so gestellt, dass alle in derselben zum Rohre senkrechten Ebene blieben, sich also bei gleich tiefem Eindringen je um den Halbmesser der Röhre in der Axe derselben begegneten.

Um den Druck durch die Erhebung des Wassers im senkrechten Manometerschenkel zu messen, hingen wir hinter demselben einen auf Glas getheilten Massstab auf, dessen Zahlen durch das Manometer gesehen und abgelesen werden konnten. War dagegen der aufsteigende Schenkel durch eine Kautschukröhre mit dem verschiebbaren Theile des Manometers verbunden, so hingen wir gleich diesen mittelst eines feinen Drathes auf, so dass er sich von selbst vertical

stellen und der Druck auf der getheilten Manometerröhre selbst abgelesen werden konnte. Wenn, wie es sich häufig ereignete, der Seitendruck im Strome negativ wurde, so brachten wir mit dem verschiebbaren Theile des Manometers ein heberförmig gekrümmtes Rohr in Verbindung.

Damit die Tiefe, bis zu welcher das freie Endröhrchen in den Strom eintauchte, bestimmt werden konnte, befand sich entweder auf dem in der Wand verschiebbaren Stücke selbst eine Theilung, oder es war unter der für das Manometer bestimmten Öffnung an der Röhre ein Millimetermassstab angebracht, auf welchen ein feiner an das Manometerröhrchen senkrecht angefügter Stift herunter zeigte.

Bei jenen Manometern, welche durch zwei gegenüberstehende Öffnungen des Stromrohres und zwar senkrecht zur Axe und durch diese geschoben werden sollten, wurden statt der cylindrischen platte Röhrchen angewendet. Um diese mit Sicherheit während des Durchschiebens im grössten Durchmesser zu erhalten, waren sie beiderseits an zwei Platten angeschraubt, welche durch zwei Stahlstangen verbunden waren. Diese letzteren liefen wieder durch zwei zu den vorigen parallele Platten, je eine auf einer Seite der Röhre, die an dem Metallgehäuse, in welchem das dünne Röhrchen lief, befestigt waren. Das dünne Röhrchen hatte an der Seite eine kleine Öffnung, so dass diese in dem Strom hin- und hergetragen werden konnte. Da ausserdem das Röhrchen in seiner Führung noch drehbar war, so konnte die Öffnung in verschiedene Stellungen zur Stromrichtung gebracht werden.

Die beigegebenen Figuren werden diese Einrichtungen erläutern. In Fig. 2 ist *A* das Gestell, auf welches die Röhre gelegt wurde; *a, b, c* sind die drei an demselben äquatorialen Röhrenquerschnitt angebrachten Manometer; *e* der Stift, der dazu diente, an dem unterhalb befestigten Massstabe *f* anzuzeigen, wie tief man das Manometerröhrchen in das Stromrohr eingeschoben hatte. Fig. 3 und 4 geben eine perspectivische Ansicht, wie die durchschiebbaren Manometer eingerichtet waren, und ein Längenprofil, welches das dünne Röhrchen in seiner Führung darstellt.

Einer Aufsuchung des Druckes innerhalb des Stromes mit einem Manometer musste die Untersuchung der Störungen vorausgehen, welche ein solches Rohr im Strome erzeugen kann. Um diese aufzufinden, verfahren wir auf verschiedene Weisen.

1. Wir suchten die mittlere Geschwindigkeit des Stromes vor und nach dem Einschieben eines cylindrischen Röhrens in den Strom auf. Der Strom, an welchem diese Versuche ausgeführt wurden, hatte 7·8 Millim. Durchmesser, das eingeschobene Röhrechen besass einen Durchmesser von 0·7 Millim. War die Stromgeschwindigkeit 2236 Millim., die Secunde als Zeiteinheit genommen, so wurde sie durch das Einschieben des Röhrens um 3 Millim. auf 2122 Millim. und durch Einschieben des Röhrens um 6 Millim. auf 2069 herabgedrückt. Als sich dagegen die Geschwindigkeit in dem Falle, als das Röhrechen eingeschoben nicht war, auf 1606 Millim. belief, wurde sie durch das um 6 Millim. eingeschobene Röhrechen auf 1560 Millim. erniedrigt. Diese Thatsachen, welche wir aus nahe liegenden Gründen nicht häufen wollen, lassen erkennen, dass ein solches Einschiebsel einen sogar die mittlere Geschwindigkeit in der Röhre merklich modificirenden Widerstand leistet, der in raschem Verhältnisse mit der Stromgeschwindigkeit selbst wächst.

2. Um die Störung zu ermitteln, welche der Gesamtstrom in dem Querschnitte erfuhr, in welchen das Manometer eingeführt wurde, bedienten wir uns weiter zweier andern auf denselben Querschnitt gesetzten Manometer, wovon das eine um einen, das andere um zwei Quadranten von dem ersteren abstand. Hiebei stellte sich für das gegenüber liegende um 180° entfernte Manometer heraus, dass das Einschieben des ersten Manometers eine Verminderung des Wanddruckes auf der gegenüberstehenden Seite zur Folge habe. Dieser Abzug, der von der Wandspannung gemacht wurde, erwies sich als abhängig: von der mittleren Geschwindigkeit des Stromes, von der Höhe des ursprünglichen Wanddruckes, so wie von dem Zwischenraum, der zwischen den beiden Manometermündungen noch übrig blieb. Heben wir diesen letzteren heraus, so zeigt sich, dass bei Änderung des Abstandes von seinem Maximalwerthe bis etwa zur Hälfte desselben der Druck an der gegenüberliegenden Wand nur sehr allmählich und ungefähr proportional der Annäherung abnahm; war aber dieser mittlere Werth des Abstandes überschritten, so sank der Druck in der gegenüberliegenden Seite rasch und namentlich rascher, als die Annäherung geschah. Dabei ist noch die Thatsache sehr merkwürdig, dass trotz des Sinkens der Druckhöhe im gegenüberstehenden Manometer die Differenz zwischen dieser Druckhöhe und der im eingeschobenen Manometer immer grösser

wurde, je näher man mit dem eingeschobenen Manometer an den gegenüberstehenden rückte, eine Thatsache, welche zeigt, dass die in der Richtung eines Durchmessers in den Strom eingeführte Hemmung sich in ihrer Wirkung auf diesen ganzen Durchmesser erstreckt, jedoch nicht alle Theile desselben gleichmässig afficirt. Wenn daher in jenem Theile des Durchmessers, der zwischen die Mündung des eingeschobenen Manometers und die gegenüberliegende Wand fällt, eine Stromschnelle entsteht, so kömmt dieser nach ihrer ganzen Breite nicht dieselbe Geschwindigkeit zu, sondern an der Mündung des eingeschobenen Manometers eine grössere, an der Mündung des gegenüberliegenden wandständigen hingegen eine kleinere. — Um noch die beiden anderen die Druckabnahme in dem wandständigen Manometer modificirenden Umstände zu beachten, führen wir an, dass die absoluten Werthe des Abfalles, welche für gleiche Annäherungen aufgezeichnet wurden, bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit grösser wurden bei grösserem ursprünglichen Drucke; also grösser an einem der Einflussmündung näher gelegenen Querschnitte als an einem entfernteren sich erwiesen. An einem und demselben Querschnitte endlich aber nahmen sie zu mit der mittleren Geschwindigkeit. Als Beispiele geben wir folgende Zahlen.

Rohrweite 7·8 Millim. Mittlere Geschwindigkeit bei ganz freiem Rohre 1606 Millim. Der Querschnitt, an dem die Manometer eingesetzt waren, war von der Einflussmündung entfernt um 518 Millim. Druckhöhe bei freier Röhre 380 Millim.

Als das Manometer eingeschoben wurde um	sank das gegenüberstehende um
1·5 Millim.,	0 Millim.
2·5 " "	1 " "
3·4 " "	3 " "
4·5 " "	7 " "
5·5 " "	42 " "

Rohrweite und Geschwindigkeit wie früher. Abstand des Querschnittes von der Einflussmündung 963 Millim. Druckhöhe bei freier Röhre 209 Millim.

Als das Manometer eingeschoben wurde um	sank das gegenüberstehende um
1·5 Millim.,	0 Millim.
2·5 " "	2 " "
3·5 " "	3 " "
4·5 " "	6 " "
5·5 " "	14 " "

Mittlere Geschwindigkeit bei freier Röhre 2236 Millim. Entfernung des Abstandes von der Einflussmündung 963 Millim. Ursprüngliche Druckhöhe bei freier Röhre 356 Millim.

Als das Manometer eingeschoben wurde um	sank das gegenüberstehende um
1·5 Millim.,	2 Millim.
2·5 „	6 „
3·5 „	8 „
5·5 „	18 „
6·5 „	36 „

Unterzogen wir bei ähnlichen Versuchen den um 90° entfernten Manometer der Betrachtung, so zeigte sich, dass durch das Einschoben des einen Manometerrohrens auch an der um 90° entfernten Wandstelle desselben Röhrenquerschnittes eine Druckverminderung hervorgebracht werde, jedoch nach anderen Regeln von der Grösse der Einschiebung abhängige, als an der um 180° entfernten Stelle. Es beginnt nämlich schon ein merkliches Sinken in dem um 90° abstehenden Manometer, wenn das andere auch nur noch wenig eingeschoben ist, und der Abfall wird grösser und grösser, je weiter das Manometer gegen die Mitte des Stromes geschoben wird. Bewegt sich das Röhren noch weiter gegen die gegenüberliegende Wand, so ändert sich der Druck in dem beobachteten Manometer nur mehr wenig. Beispielsweise führen wir folgende Zahlen an.

Geschwindigkeit in der freien Röhre 1606 Millim. Entfernung des Manometers von der Einflussmündung 518 Millim. Ursprünglicher Wasserstand im Manometer bei freier Röhre 372 Millim.

Als das Manometer eingeschoben wurde um	sank das um 90° abstehende Manometer um
0·5 Millim.,	3 Millim.
1·5 „	5 „
2·5 „	7 „
3·5 „	12 „
4·5 „	13 „

Auch hier zeigte es sich, dass der Unterschied zwischen den Druckhöhen in den zwei um 90° von einander abstehenden Manometern grösser wurde, je mehr das eine Manometer in den Strom geschoben wurde.

Ausser diesen Versuchen wurden noch mehrere ähnliche gemacht, da drei Manometer auf einem Querschnitte betreffs der Verschiebungen vielerlei Combinationen zulassen; wir unterlassen ihre Mittheilung an diesem Orte, so bemerkenswerth sie auch an und für sich zu sein scheinen.

3. Um in den inneren Hergang, durch welchen die bisher betrachteten Störungen veranlasst werden, näher einzudringen, brachten wir in den Strom einen Coconfaden oder Bärlappsaamen und beobachteten das Verhalten desselben in der Nähe des eingeschobenen Röhrens.

Um den Coconfaden in den Strom hängen zu können, durchbohrten wir das Glasrohr nahe an der Einflussöffnung und führten durch diese Öffnung einen sehr feinen Drath ein, der an seinem in dem Strome befindlichen Ende in einen Haken umgebogen war; an diesen befestigten wir den Coconfaden, der die Länge des Rohres hatte, so dass er, wenn der Strom in Gang gesetzt wurde, aus dem entgegengesetzten Röhrenende hervorragte. Dieser Faden stellte sich von selbst in die Axe der Röhre, bis auf einige Centimeter vom Ende derselben, wo er sich schräg nach unten zu wendete und an die concave Seite des ausfließenden Strahles anlegte. Bewegten wir nun das in den Strom einschiebbare Röhren mit seinem Ende (der Basis) gegen den Faden, so verliess dieser, wenn ihm das Röhren bis etwa 1·5 Millim. genähert wurde, plötzlich seine Lage und legte sich, gleichsam als wie von dem Röhren angezogen, an die Basis desselben an; zog man dieses wieder zurück, so kehrte auch der Faden in seine alte Lage zurück. Hinter dem Röhren erhob sich der Faden etwas, ohne jedoch in die Lage der Axe zurückzukehren, sondern er senkte sich schon von hier an schräg der unteren Wandseite zu. (Die Fig. 5 bildet dieses Verhalten ab.) Brachten wir statt der Basis die Seitenwand des Röhrens dem Faden gegenüber, so entfernte sich der letzte abermals rasch aus seiner ursprünglichen Lage, wobei er jedoch, statt dem Röhren sich zu nähern wie früher, von demselben sich entfernte und um dasselbe eine kleine Curve bildete, deren Concavität gegen das Röhren hinsah.

Die Strömungsvorgänge in der Nähe des Röhrens wurden sehr aufgehellt durch das Verhalten der dem Strome beigemengten Bärlappkörperchen, vorausgesetzt, dass der Strom eine geringe Geschwindigkeit besass und zugleich luftfreie und lufthaltige, zu

Klümpchen zusammengeballte und endlich auch sehr fein vertheilte Samenkörperchen enthielt. Diese verschiedene Beschaffenheit der Bärlappkörperchen erzeugt man sehr leicht, wenn man den Bärlappsamensamen, bevor man ihn in den Wasserbehälter gibt, mit Wasser erwärmt, theils aber ihn frisch in dasselbe wirft. Im Strome vertheilt sich der Samen so, dass auf dem untersten und obersten Theile der Röhre zwei lange feine Faden sich bewegen, während der mittlere Stromtheil in regelmässiger Weise von den feinsten Körperchen durchsetzt ist.

Die Veränderungen, welche an diesen Bärlappströmen zu beobachten waren, stellten sich als sehr verschieden heraus, je nachdem man cylindrische oder platte Röhrechen in den Strom einschob. Wir beginnen mit den cylindrischen. Wurde ein solches durch den ganzen Strom hindurchgeführt, so dass es an dem gegenüberstehenden Wandtheile anstand oder über dasselbe hinausragte, so bildete die obere und untere fadenförmige Bärlappschiebt um das Röhrechen herum eine Figur von der in Fig. 6 gezeichneten Form. Die in der Richtung des Stromes anlangenden Massen blieben, so wie sie dem Röhrechen gegenüber kamen, einen Moment lang stehen, von hier ab theilte sich der Strom in einen Ast rechts und einen links, welche hinter dem Röhrechen wieder zusammenstrebten, als wollten sie einen Hof um dasselbe bilden, bevor sie sich aber erreicht, gingen sie allmählich wieder aus einander und näherten sich wieder, nachdem sie ein Maximum der Abweichung erfahren, allmählich bis zur gänzlichen Vereinigung. In dieser eigenthümlichen Figur waren die Bärlappkörperchen angehäuft an der Stelle *a*, wo sich der Strom zuerst theilte und dann in den beiden Winkeln *b*, die sich beim Übergange vom ersten Zusammengehen der Theilströmungen zum zweiten Auseinandergehen derselben bildeten. Was die Ausmaasse dieser Figur betrifft, so ist der Abstand vom vordern Punkte *a* bis zum Mittelpunkte der Basis des eingeschobenen Röhrechens *c* kleiner, als der Abstand von diesem Punkte zu dem Seitenpunkte *d*, so dass sich *ac* zu *dc* verhält, wie etwa 3 zu 4. Der Abstand von *c* bis zum Halbirungspunkte der die beiden Winkelpunkte *b* verbindenden Geraden ist grösser als das Doppelte der Linie *cd* und erst in einer Distanz, die etwa zehnmal grösser ist, als die Entfernung von *c* zum Halbirungspunkte der *bb*, vereinigen sich die beiden Theilströme wieder zu einem Ganzen. Die Dimensionen *ac*, *cd* wachsen, wenn die

Geschwindigkeit grösser wird, jedoch nur unmerklich und ebenso der Abstand vom Halbirungspunkte von *bb* bis zum Vereinigungspunkte der beiden Theilströme.

Hinsichtlich der Bewegung in dieser Figur ist zu bemerken, dass in *a* die ankommenden Theilehen, wie schon gesagt wurde, eine kurze Zeit ruhig bleiben, wesshalb sich auch bei *a* Theilehen anhäufen, dann aber von den hintennach kommenden weggedrängt in beschleunigter Bewegung der Verengungsstelle zueilen, wo sie ihre Geschwindigkeit zum Theile verlieren und entweder in den hinter dem Röhrechen stattfindenden Wirbel hineingerissen werden oder in langsamer Bewegung in den beiden Fäden fortgehen, welche Bewegung, wenn die mittlere Geschwindigkeit grösser ist, nicht nur als fortschreitende, sondern als eine zitternde erscheint, indem die Theilehen verhältnissmässig rapide Schwingungen senkrecht zur Stromrichtung executiren. Bei grösserer mittlerer Geschwindigkeit tritt noch ausserdem die Erscheinung ein, dass die ganze Figur in periodisch wiederkehrenden Zeitpunkten sich plötzlich verkleinert und die an den Punkten *a* und *b* angesammelten Theilehen mit vermehrter Geschwindigkeit fortgerissen werden. Der Wirbel, der sich hinter dem Röhrechen bildet, bezieht seine Elemente aus den an der Seite des Röhrechens vorbeigehenden Theilehen, und es entsteht eine doppelte Bewegung, und zwar gegen das Röhrechen zurück in den mittleren Stromfäden und gegen die Axe des Stromes, worin die Theilehen aus den oberen sowohl als auch aus den unteren Stromfäden wandern, und zwar aus den Anhäufungen an den Winkelpunkten *b* der Figur. Da sich die Theilehen in der Nähe des Röhrechens und vor demselben bis zu dem Punkte *a* auf der Seite bis zu den Punkten *d* nicht bewegen, so staut sich das Wasser vor dem Röhrechen gleichsam zu einem dasselbe einhüllenden festen Mantel an, so dass die vorne bei *a* ankommenden Theilehen gegen *d* hin gewiesen dem Röhrechen ausweichen, hinter demselben sich wieder zu vereinigen streben, aber eben wegen der entgegengesetzten Richtung ihrer Bewegungen in der Linie zwischen den Winkelpunkten eine Spannung erzeugen, die ihre wirkliche Vereinigung nicht nur hindert sondern die Theilehen selbst wieder weiter aus einander treibt.

Wenn man das Röhrechen nicht wie bisher durch den ganzen Strom sondern nur zum Theile in denselben schiebt, so ereignet sich hinter dem Röhrechen dasselbe wie früher, nur dass der Wirbel

von dem Theile des Stromes, in den das Röhrechen nicht eingeschoben ist, keinen Zufluss erhält; zugleich lässt sich aber an dem Wandstrome, der der Mündung des eingeschobenen Röhrechens gegenübersteht, bemerken, dass die Theilchen daselbst eine Beschleunigung erfahren. Wird aber das Röhrechen von der Seite eingeführt, so dass der die lufthaltigen Bärlapptheilchen enthaltende Stromfaden um 90° von der Einführungsöffnung des Röhrechens absteht, so wird dieser Stromfaden abgelenkt, wenn das Röhrechen gegen die Mitte des Stromes vorgeschoben wird, und zwar in demselben Sinne, in welchem das Röhrechen eingeschoben wird. Diese Ablenkung erhält ihr Maximum, wenn das Röhrechen bis zur Mitte geschoben wird, nimmt dann, wenn das Röhrechen noch weiter vorgeschoben wird, ab und verschwindet, wenn das Röhrechen bis an die gegenüberliegende Wand gelangt ist. Dafür erfährt der Stromfaden an jener Stelle statt der Ablenkung eine Beschleunigung.

Sehr viel einfacher gestaltet sich die Erscheinungsreihe, wenn man statt des cylindrischen Röhrechens ein feines Platinblechstreifen, dessen Querschnitt die Form einer stark excentrischen Ellipse bietet, und zwar so in den Strom schiebt, dass die zugeschärften Seiten den Strom theilen, wobei also die grössere, die Breitendimension des Plättchens mit der Richtung des Stromes zusammenfällt. Unter diesen Bedingungen werden die durch den Strom gehenden Körperchen bis vor die Schneide des Plättchens geführt und umziehen dieses in einem sich an das Plättchen fast ganz anschliessenden Bogen, um sich hinter demselben wieder zu vereinigen. Diesem entsprechend wird auch die Stromschnelle, die an der gegenüberliegenden Wand sichtbar wird, wenn das Plättchen nicht ganz durchgeschoben ist, viel unbedeutender, als in dem Falle, wenn ein cylindrisches Röhrechen eingeschoben wurde. Die Erscheinungen nehmen aber nahezu denselben Charakter an, wie bei diesem, wenn man das Plättchen so einschreibt, dass seine grössere Dimension in der Breite senkrecht gegen die Stromrichtung steht.

Nach diesen Ermittlungen war es gewiss, dass durch Einführung eines Manometerrohres in den Strom der dort vorhandene wahre Seitendruck, wenn man unter dem wahren Seitendrucke denjenigen versteht, der vor der Einführung des Röhrechens an einem Orte vorhanden war, nicht gemessen werden konnte. Aber immerhin schien es wenigstens möglich, durch das Manometer Nachricht darüber zu

erhalten, ob in einem senkrecht zur Stromrichtung geführten Schnitte der Druck angebar variabel ist oder nicht, vorausgesetzt, dass man die den Druck auffangende Öffnung des Manometerrohres in der Art in den Strom bringt, dass nicht Componenten der um das Rohr stattfindenden Strömungen gegen die Mündung oder von derselben weg gerichtet erscheinen. Obwohl auch dieser Bedingung vollkommen nie genügt werden kann, so kann man sie doch annähernd erfüllen entweder dadurch, dass ein cylindrisches Röhrechen, das an der Basis offen war, senkrecht gegen die Axe des Stromes und am besten in einem grössten Durchmesser des letztern in ihn geführt wurde oder dadurch, dass ein plattes Röhrechen, welches eine spaltförmige Öffnung an einer seiner breiteren Flächen trug, in den Strom gebracht wurde auf die Weise, wie es schon früher (Fig. 3 und 4) beschrieben wurde.

Wir theilen zuerst die Resultate mit, welche sich bei Anwendung cylindrischer Röhrechen ergaben.

Entfernung von der Wand	Manometer 518 ^{mm} v. Einfluss			Manometer 963 ^{mm} v. Einfluss			Manometer 1408 ^{mm} v. Einfluss		
	Wahrer Stand	Differenz für		Wahrer Stand	Differenz für		Wahrer Stand	Differenz für	
		0.3 ^{mm}	1.0 ^{mm}		0.3 ^{mm}	1.0 ^{mm}		0.3 ^{mm}	1.0 ^{mm}
I. Reihe.									
0.0 ^{mm}	656.0	64.2	110.8	380.0	37.5	69.0	85.0	46.2	73.0
0.5	591.8	46.6		342.5	31.5		12.0	38.8	
1.0	545.2	27.2	32.0	311.0	20.0	38.2	— 3.5	15.5	33.0
1.5	518.0	4.8		291.0	18.2		— 21.0	17.5	
2.0	513.2	8.4	20.4	272.8	10.0	17.8	— 54.0	20.0	33.0
2.5	504.8	12.0		262.8	7.8		— 57.0	3.0	
3.0	492.8	18.8	32.8	255.0	12.0	19.8	— 71.0	14.0	17.0
3.5	474.0	14.0		243.0	7.8		— 89.0	18.0	
4.0	460.0	24.0		235.2	7.2	15.2			
4.5	436.0			228.0	8.0				
5.0				220.0					
II. Reihe.									
0.0	494.0	50.2	77.0	275.0	22.6	43.7	65.0	28.0	51.4
0.5	443.8	26.8		252.4	21.1		37.0	23.4	
1.0	417.0	14.0	24.4	231.3	13.7	24.5	13.6	11.6	18.4
1.5	403.0	10.4		217.6	10.8		2.0	6.8	
2.0	392.6	9.2	18.2	206.8	5.8	14.2	— 4.8	2.8	7.2
2.5	383.4	9.0		201.0	8.4		— 7.6	4.4	
3.0	374.4	9.4	24.0	191.6	5.2	13.0	— 12.0	5.0	14.8
3.5	365.0	14.6		186.4	7.8		— 17.0	9.8	
4.0	350.4	30.4		178.6	7.2	15.2	— 26.8	10.6	21.1
4.5	320.0			171.4	8.0		— 37.4	10.5	
5.0				163.4			— 47.9		

Entfernung von der Wand	Manometer 518 ^{mm} v. Einfluss			Manometer 963 ^{mm} v. Einfluss			Manometer 1405 ^{mm} v. Einfluss		
	Wahrer Stand	Differenz für		Wahrer Stand	Differenz für		Wahrer Stand	Differenz für	
		0.5 ^{mm}	1.0 ^{mm}		0.5 ^{mm}	1.0 ^{mm}		0.5 ^{mm}	1.0 ^{mm}
		der Einschiebung			der Einschiebung			der Einschiebung	
III. Reihe.									
0.0	330.0	28.0	} 40.0	183.0	9.0	} 31.3	45.0	13.0	} 26.5
0.5	302.0	12.0		174.0	22.3		32.0	13.5	
1.0	290.0	7.8	} 14.6	152.7	7.9	} 11.7	18.5	13.1	} 15.7
1.5	282.2	6.8		144.8	3.8		5.4	2.6	
2.0	275.4	5.4	} 9.8	141.0	6.6	} 8.1	2.8	2.0	} 3.9
2.5	270.0	4.4		134.4	1.7		0.8	1.9	
3.0	265.6	4.7	} 10.2	132.7	1.7	} 6.2	— 2.7	4.5	} 9.3
3.5	261.9	5.5		131.0	4.5		— 7.2	4.8	
4.0	256.4	13.8		126.5	7.9	} 12.7	— 12.0	2.2	
4.5	242.6			118.6	4.8		— 14.2		
5.0				113.8					

Diese Beobachtungen geben zunächst zu der Frage Veranlassung, ob die gewonnenen Zahlen auch in der That die Seitendrücke angeben, welche während der Anwesenheit des Manometers in den bezeichneten Orten des Stromes wirklich vorhanden sind, und dann, in welcher Beziehung diese Zahlen zu den Seitendrücken stehen, welche an den bezüglichen Stromorten stattfinden, wenn kein störendes Manometerrohr eingeführt ist. Die Antwort auf die erste Frage, deren Erledigung allein von der sorgfältigen Ausführung des Apparates, namentlich von einer genauen Messung der Einschiebung und einer genau horizontalen Führung der von der Seite des Stromes eingeschobenen Röhre abhängt, konnte nach der Einrichtung des uns zu Gebote stehenden Apparates nicht in vollkommener Weise gegeben werden. Wir waren beim Beginn unserer Arbeit auf eine so bedeutende Variation des Druckes nicht gefasst, also auch auf die so nothwendige Einführung von Mikrometersehrauben und langer horizontaler Führungsstäbe nicht bedacht. Der Natur der Zahlen nach werden also für gleiche Fehler in den Angaben der horizontalen Verschiebung die in den Angaben des Druckes um so grösser sein, je näher sich das Manometer noch an der Wand befindet, da die Differenzen der Drücke von einem zum andern Zehnthel eines Millimeters in der Einschiebungsgrösse hier am bedeutendsten sind. Es werden daher sowohl die absoluten als auch die Differenzzahlen am Beginn einer jeden Reihe die am wenigsten sicheren sein, und

zwar kann man sich einen ungefähren Massstab für die Fehler, welche an diesen Zahlen haften, machen, wenn man als möglichen Fehler in der Angabe der Einschiebungsgrösse 0.1 Millim. annimmt, der in unserem Falle auch als wirklich vorhanden betrachtet werden kann.

Die andere Frage, ob die mittelst des eingeführten Manometers gemessenen Drücke denen gleich seien, welche an den bezüglichen Orten vor Einführung des Manometers stattfanden, lässt sich einfach verneinen. Die früher mitgetheilten Zahlen können daher keinen andern Sinn haben, als nachzuweisen, dass in einem senkrecht zur Richtung des Stromes geführten Querschnitte desselben der Seitendruck an verschiedenen Stellen verschieden sein kann, und zugleich dazu, um einige Andeutungen darüber zu erhalten, wie sich innerhalb eines Stromes in einer cylindrischen Röhre die Druckvertheilung stellt. Da wir nämlich weder bei Anwendung von Bärlappkörperchen noch bei Anwendung des Coconfadens gewahr wurden, dass eine Strömung zu oder von der Mündung des Manometers, welcher den Seitendruck aufzufangen hat, stattfindet, so müssen wir wohl die Annahme machen, dass die Störungen in den Angaben abhängig sind von der Gesamtstörung, welche eingeführt wird, die wir also bemessen konnten durch die schon angegebenen Veränderungen in den Ständen des um ein oder um zwei Kreisviertel entfernten Manometers während der Einschiebung des messenden. Hieraus ergab sich, dass durch das Vordringen des messenden Manometers eine Stromschnelle im Querschnitt erzeugt wurde, welche sich an den feststehenden Manometern um so mehr geltend machte, je näher der störende Wirbel an ihrer Mündung war, und je tiefer das Manometer in das Stromrohr geschoben wurde, und endlich je beträchtlicher die mittlere Geschwindigkeit anwuchs. Daraus folgt für das bewegliche Manometer, dass sich in ihm schon eine Störung geltend machen muss sogleich mit Beginn der Einschiebung, wenn auch in dem um 90° oder 180° entfernten Rohr noch keine Veränderung hervor gebracht wird, weil ihm immer der hemmende Wirbel sehr nahe anliegt. Da aber die ursprüngliche Geschwindigkeit der Wandfäden ebenso wie die Störung der mittleren Geschwindigkeit eine geringe ist, so wird auch hier die Störung des Seitendruckes ein Minimum sein, während das Maximum derselben erst erreicht sein wird, wenn das Manometer die gegenüberliegende Wand nahezu berührt. Denn

dort häufen sich alle den Seitendruck erniedrigenden Umstände. Halten wir, was bisher besprochen wurde, als sehr wahrscheinlich aufrecht, so dürfte aus den mitgetheilten Zahlen für die Beurtheilung der wahren Seitendrücke wenigstens so viel hervorgehen, dass er sich von der Wand ab ungemein rasch ändere, gegen die Mitte hin aber annähernd constant bleibe.

Um uns wenigstens vorläufig zu überzeugen, dass er hier ein Minimum erreicht, bedienten wir uns zur Druckmessung der in Fig. 3 und 4 beschriebenen Röhre von 12 Millim. Durchmesser. Sie geniesst vor der andern den Vorzug, dass die aus ihrer Einführung hervorgehende Störung der mittleren Geschwindigkeit möglichst gering war und für alle Zeiten der Beobachtung constant blieb. Hierbei erhielten wir folgendes Resultat:

Rechts an der Wand 171	Millim. Druckhöhe
3·0 Millim. von der Wand . .	139	” ”
6·0 ” ” ” ” . .	143	” ”
9·0 ” ” ” ” . .	155	” ”
12·0 ” ” ” ” . .	192	” ”

Wir sind geneigt, die Abweichung von dem wirklich erwarteten Resultat dem Umstande zuzuschreiben, dass das durchbohrte Plättchen nicht vollkommen horizontal durch den Strom geführt wurde.

Da nun aber doch einmal aus den beobachteten Daten die wahre Curve nicht hervorgehen kann, so legen wir für diesmal nur Werth auf den Beweis der Thatsache, dass der Seitendruck auf einem Normalschnitt eines Stromes nicht durchweg derselbe zu sein braucht. Zur Entscheidung dieser Frage haben wir noch folgende Mittel in Anwendung gebracht:

1. Es gelingt um den Querschnitt des Stromes einen äussern Kreisstrom von dem Ort seines höchsten zu dem seines niedersten Seitendruckes zu führen. Hierzu verbindet man die freien Enden zweier Manometer, die auf demselben Querschnitte sich befinden, durch ein Kautschuckrohr, in das an einer beliebigen Stelle ein Glasrohr eingeschaltet ist. Darauf lässt man das eine Manometer unverrückt an der Wand stehen, während das andere in den Strom geschoben wird. Augenblicklich beginnt eine Bewegung in dem Verbindungsstück der Manometer, und zwar in dem Sinne, welchen der in den Manometern gemessene Druckunterschied verlangt. Schiebt man gleichzeitig die beiden Manometer in den Strom, so kann man es

leicht dahin bringen, den Seitenstrom nach Belieben bald nach rechts bald nach links zu kehren.

2. Man kann in einem von zwei an entgegengesetzten Wandstellen desselben Querschnittes eingefügten Manometern den Druck beträchtlich über den normalen steigern oder denselben unter ihn erniedrigen, ohne dass das entgegenstehende Manometer wesentlich davon afficirt wird, wie folgende Tabelle zeigt.

Grösse der Einschiebung	M a n o m e t e r s t a n d , wenn auf der gegenüberliegenden Öffnung ein Druck unterhalten wurde	
	von + 103·5 Millim.	von — 740 Millim.
0·0	503·0	503·0
0·5	468·4	456·0
1·0	438·4	426·0
1·5	422·4	405·6
2·0	412·0	400·8
2·5	402·7	391·0
3·0	394·2	380·8
3·5	381·0	376·8
4·0	364·0	372·4
4·5	336·5	345·0

Zum Verständniss dieses Zahlenbeispiels führen wir an, von zwei um 180° von einander abstehenden Manometern gab das eine den Seitendruck des Stromes an entweder an der Grenze oder innerhalb desselben je nach der Stellung, das andere dagegen, welches unverrückt an der Wand festgestellt wurde, diente dazu, um den Druck auf diese Stromstelle beliebig zu ändern. Sollte ein den Seitendruck übertreffender angewendet werden, so befestigten wir auf dem senkrechten Schenkel des Manometers ein langes Rohr, das an seinem freien Ende ein weites Glasgefäss trug. Da sich durch die Manometeröffnung hindurch das in das aufgesetzte Druckgefäss gefüllte Wasser allmählich in den Strom entleerte, so musste durch allmähliches Nachgiessen von Wasser dafür gesorgt werden, dass sein Spiegel mindestens $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Stunde hindurch unverändert blieb. Sollte dagegen ein negativer Druck an der genannten Wandstelle erzeugt werden, so bogen wir den senkrechten Schenkel einfach so um, dass sein freies Ende gegen den Stubenboden sah; aus dem freien Ende

floss dann das Wasser aus, welches ihm vom Stromrohre geliefert wurde.

Färbt man, oder noch besser, vermischt man mit Samen die Flüssigkeit, welche den Überdruck ausübt und aus dem Manometerröhrchen in den Strom geht, so zeigt sich, dass die Körperchen nur auf eine kurze Strecke hin den Strom durchschneiden, dann aber werden sie von diesem umgebogen und in seiner Richtung weiter geführt. Hier lässt sich nun leicht sehen, dass derselbe Überdruck die Körperchen um so weiter gegen die Axe des Stromes führt, je weniger geschwind der letztere ist u. s. w.

3. Endlich wendeten wir uns auch an den freien Strahl, um zu erfahren, ob an verschiedenen Orten eines Querschnittes desselben der Druck verschieden sei. Indem wir ein plattes sehr schmales Röhrchen, welches den Strahl nicht spaltete und namentlich keine Luft in ihm einführte, durch den Strom schoben, fanden wir, dass der Seitendruck von der Mitte gegen den Umfang des Stromes hin zunahm. Im Centrum war er, wie zu erwarten, beträchtlich negativ, Thatsachen, welche mit den von Magnus¹⁾ in einer ausgezeichneten Abhandlung niedergelegten in Übereinstimmung sind.

¹⁾ Poggen dorff's Annalen, LXXX. Bd.

Fig. 1

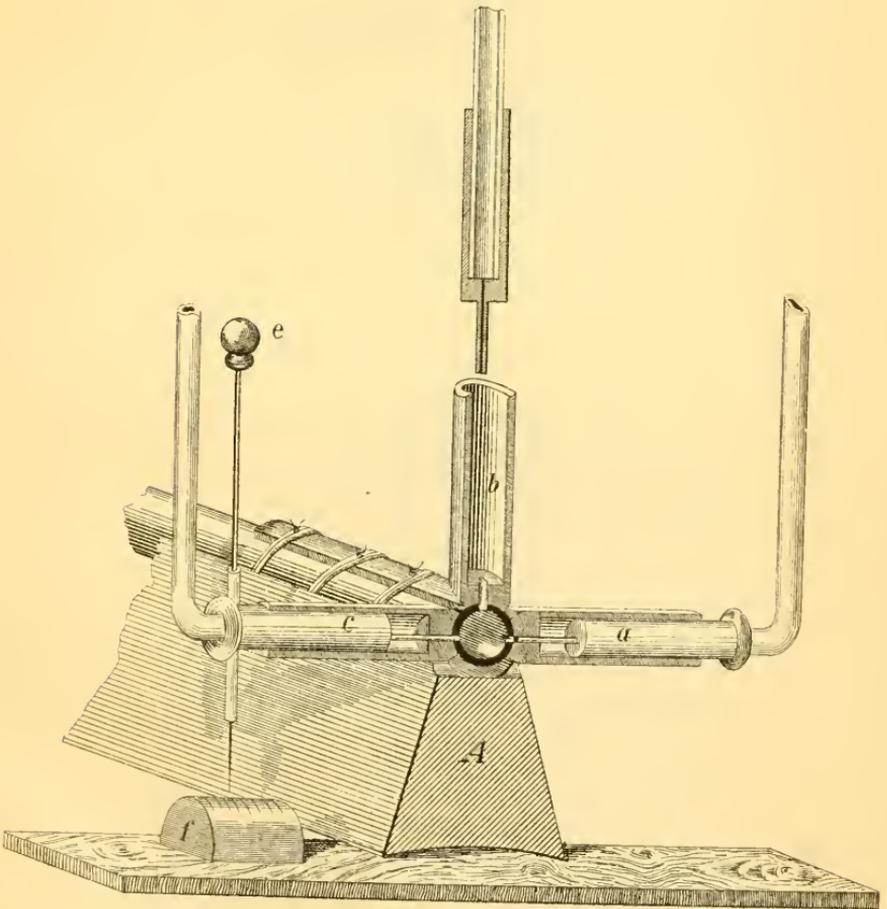
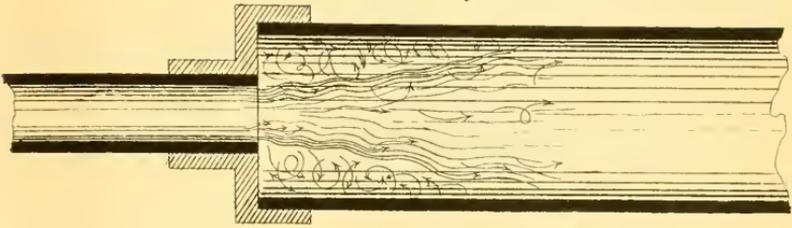


Fig. 2

Fig. 3

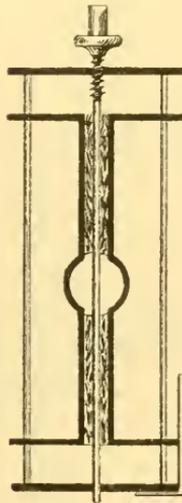
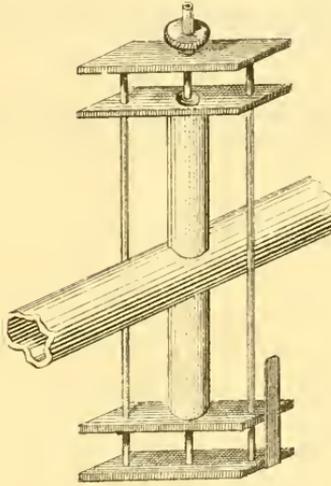


Fig. 4

Fig 5

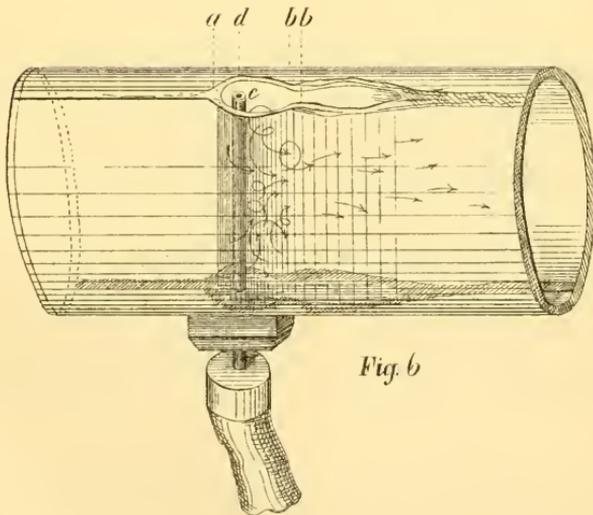
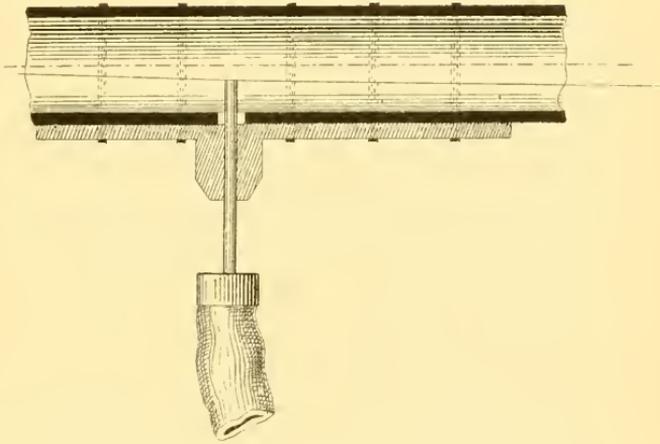


Fig 6

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1858

Band/Volume: [32](#)

Autor(en)/Author(s): Stefan Josef, Ludwig Carl Friedrich Wilhelm

Artikel/Article: [Über den Druck, den das fließende Wasser senkrecht zu seiner Stromrichtung ausübt. \(Mit 3 Tafeln\). 25-42](#)