Über Wirbelbewegung.

Von

Dr. Anton Lampa,
Privatdocent an der k. k. Universität in Wien.

Vortrag, gehalten den 8. März 1899.

Mit 12 Abbildungen im Texte.

Die Bewegungen der Flüssigkeiten haben schon für das Auge einen recht verwickelten Charakter; neben fortschreitender und schwingender Bewegung der Flüssigkeitstheilchen (Strömung und Wellenbewegung) beobachtet man häufig Rotationen, welche man gemeinhin als Wirbel bezeichnet. Die Beobachtung lehrt uns, dass es die Wechselwirkung aneinander vorübergleitender Füssigkeitstheilchen, also die Reibung ist, welche derartige Rotationen hervorruft; andererseits ist leicht einzusehen, dass ebendieselbe Reibung vorhandene Wirbelbewegungen verzögernd beeinflussen und schließlich ganz aufzehren muss. Zur Untersuchung der Gesetze, welchen die Flüssigkeitsbewegungen gehorchen, hat die Wissenschaft naturgemäß zunächst solche Flüssigkeiten in Betracht gezogen, bei welchen die Stellung der Frage mit den theoretisch einfachsten Verhältnissen zu rechnen hat: das ist der Fall bei den sogenannten idealen Flüssigkeiten, welche einerseits der Reibung vollständig entbehren, andererseits absolut unzusammendrückbar sind, Eigenschaften, welche den Flüssigkeiten, welche wir beobachten können, durchaus nicht zukommen. Aus der eben gemachten Bemerkung über die Rolle der Reibung bei Flüssigkeitsbewegungen folgt schon, dass in einer idealen Flüssigkeit Wirbelbewegungen nicht entstehen und, falls solche in ihr vorhanden sind, nicht vergehen können. Wenn hienach die Auffindung der Gesetze der Wirbelbewegung in idealen Flüssigkeiten noch nicht die Lösung des verwickelteren, für die gewöhnlichen Flüssigkeiten bestehenden Problems in sich schließt, so gibt sie doch die Grundlage für dasselbe, genau so, wie die Untersuchung der Bewegung der Körper bei Außeracht-lassung von Umständen, welche in der Natur eine wichtige Rolle spielen, wie der Luftwiderstand, die Reibung u. s. f., die Anhaltspunkte für die Lösung der allgemeineren Aufgabe, die Bewegung der Körper mit Berücksichtigung aller dieser Factoren zu studieren, geliefert hat. Neben dieser praktischen hat jedoch die Theorie der Flüssigkeitsbewegung, und zwar jene der Wirbelbewegung insbesondere, eine hohe theoretische Bedeutung, wie sich aus der Anwendung ergibt, welche einer der originellsten Denker unserer Zeit, Lord Kelvin (früher Sir William Thomson), von ihr zur Aufstellung einer eigenthümlichen Ansicht, die Theorie der Materie betreffend, gemacht hat.[1] Durch diese Anwendung gewinnen die Resultate der Forschung, welche die Wirbelbewegung betreffen, ein über das unmittelbare, physikalische hinausgehendes Interesse; aus diesem Grunde schöpfe ich die Berechtigung, meine verehrten

---

[1] Kelvin, Popular lectures and adresses, Vol. I. Constitution of matter. London, Macmillan and Com. 1889.

Zuhörer, Ihre Aufmerksamkeit für dieses schwierige Capitel der theoretischen Physik in Anspruch zu nehmen.

Ehe ich darangehen kann, Ihnen einige der Resultate darzulegen, welche wir einer Untersuchung von Helmholtz,[1]) welcher in dieses Gebiet bahnbrechend eindrang, verdanken, ist es nothwendig, genau zu definieren, was der Physiker unter Wirbelbewegung versteht. Zu diesem Zwecke empfiehlt es sich, vorher in aller Kürze die charakteristischen Eigenschaften der Flüssigkeitsströmung zu besprechen, umsomehr, als sich dabei die Gelegenheit bietet, gewisse Begriffe, von welchen bei der Schilderung der Wirbelbewegungen Gebrauch gemacht werden muss, festzustellen.

Die genaue Definition einer Flüssigkeitsbewegung welche wir als Strömung bezeichnen, ergibt sich durch die Erfassung der bei der Stömung nachweisbaren charakteristischen Eigenthümlichkeiten. Verbinden wir zunächst mit dem Worte Strömung die Vorstellung einer Flüssigkeitsbewegung, welche auch der Laie auf Grund seiner nicht in die Einzelheiten eindringenden Beobachtung mit diesem Worte verbindet, etwa die Bewegung des Wassers in einem Flusse. Man bezeichnet eine Strömung als stationär, wenn die Geschwindigkeit an jedem Orte in der Flüssigkeit der Größe und Richtung nach constant ist; fassen wir irgend einen Punkt in der sta-

---

[1]) Helmholtz, Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche Wirbelbewegungen entsprechen. Ges. Abhandlungen I, S. 101.

tionär strömenden Flüssigkeit ins Auge: es herrscht nicht Ruhe in demselben, denn ein Theilchen geht, ein anderes kommt; aber das neu angekommene Theilchen hat in dem betrachteten Punkte eine Geschwindigkeit, welche gleich groß und gleich gerichtet ist wie jene, welche das weggehende Theilchen in diesem Punkte gehabt hat. Wie hieraus hervorgeht, vollzieht sich die Bewegung bei der stationären Strömung — und es genügt, diese zu betrachten — in ganz bestimmten Linien, welche im allgemeinen krumm sind. Man nennt sie Strömungslinien. Sucht man eine große Anzahl von Strömungslinien auf, so erhält man ein sehr anschauliches Bild der Strömung. Experimentell lässt sich dies annähernd realisieren, indem man in der Flüssigkeit sehr kleine Körperchen suspendiert und deren Bewegung verfolgt.

Construiert man eine Fläche, welche alle Stromlinien senkrecht durchschneidet, so erhält man einen sogenannten Stromquerschnitt. Denkt man sich aus dem Stromquerschnitte eine kleine Fläche herausgeschnitten, so wird durch die Strömungslinien, welche durch den Rand dieser Fläche hindurchgehen, ein Raum begrenzt, welchen man als Stromröhre, und falls diese Fläche sehr klein genommen wurde, als Stromfaden bezeichnet. Es wurde erwähnt, dass die Geschwindigkeit in jedem Punkte einen constanten Wert hat, daraus folgt aber nicht, dass sie in allen Punkten denselben Wert haben muss. Es ist im Gegentheile leicht einzusehen, dass die Geschwindigkeiten an verschiedenen

Stellen eines Stromfadens sich umgekehrt verhalten wie die Querschnitte des Stromfadens an diesen verschiedenen Stellen. Dies ergibt sich einerseits daraus, dass die Begrenzung eines Stromfadens sich verhält wie eine feste Wand, denn keine Strömungslinie, welche an einer Stelle außerhalb des Stromfadens liegt, tritt in denselben ein, keine, welche an einer Stelle innerhalb des Stromfadens liegt, tritt aus demselben aus; andererseits aus der Incompressibilität der Flüssigkeit und der Lückenlosigkeit ihrer Bewegung. Es müssen durch irgend zwei beliebige Querschnitte eines Stromfadens in gleichen Zeiten gleiche Flüssigkeitsmengen transportiert werden; dies ist nur möglich, wenn die Geschwindigkeit, mit welcher die Flüssigkeit durch den größeren Querschnitt strömt, geringer ist als die Geschwindigkeit, mit welcher sie durch den kleineren Querschnitt strömt.

Um eine klare Vorstellung von der charakteristischen Eigenthümlichkeit zu gewinnen, welche die Wirbelbewegung von der Strömung abgrenzt, ist es zweckmäßig, dem eben besprochenen Satze, dass die Geschwindigkeiten an verschiedenen Stellen eines Stromfadens umgekehrt proportional sind den Querschnitten an diesen Stellen, eine andere Fassung zu geben. Zur Erläuterung derselben mag ein concreter Fall herangezogen werden. Wir untersuchen die Strömung in einem von parallelen Wänden begrenzten sehr langen Canal, der in der Mitte eine in Fig. 1 dargestellte Erweiterung besitzt. Zwischen den parallelen Wänden sind die Strömungslinien zur Wand parallele Gerade.

Ihr Verlauf in der Erweiterung ist in der Figur dargestellt. Beachtet man zunächst den Stromquerschnitt 1, so ergibt sich Folgendes: Die Strömungslinien sind in gleichen Abständen gezeichnet, die Querschnitte q_1 und q_2 einander gleich. Es werden demzufolge, da die Strömungsgeschwindigkeit im ganzen Querschnitte 1 dieselbe ist, durch q_1 und q_2 in der Zeiteinheit dieselben Flüssig-

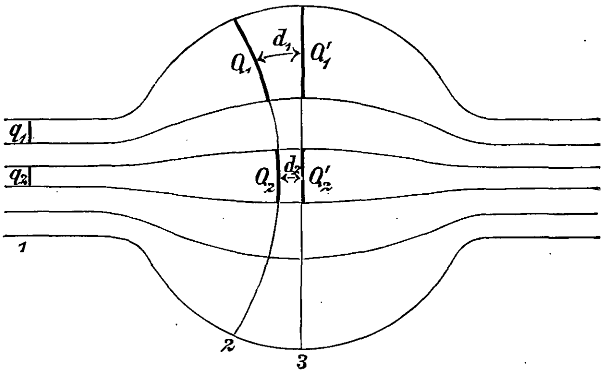

Fig. 1.

keitsmengen transportiert. Daher müssen auch dieselben Flüssigkeitsmengen durch die Querschnitte Q_1 und Q_2 transportiert werden. Nach dem Früheren ist aber die Geschwindigkeit in Q_1 kleiner als in q_1 und in Q_2 ebenfalls kleiner als in q_2. Da ferner Q_1 größer als Q_2, folgt mit Rücksicht auf die Gleichheit der Strömungsgeschwindigkeiten in q_1 und q_2 sofort, dass die Strömungsgeschwindigkeit durch Q_1 kleiner ist als durch Q_2. Achtet man nun auf die Abstände der Querschnitte Q_1 und Q'_1 einerseits und Q_2 und Q'_2 andererseits, welche in der Figur mit d_1 und d_2 bezeichnet sind, so sieht man, dass d_1 größer ist als d_2. Wir erhalten somit das Resultat, dass die Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Stellen des zwischen den beiden benachbarten Querschnitten 2 und 3 eingeschlossenen Raumes um so geringer sind, je größer die Abstände der Querschnitte 2 und 3 an diesen Stellen sind. Damit haben wir die Exemplification eines Satzes gefunden, welcher die Strömung vollständig charakterisiert. Er lautet: E i n e F l ü s s i g k e i t s b e w e g u n g b e z e i c h n e t m a n a l s S t r ö m u n g, w e n n d i e G e s c h w i n d i g k e i t e n a n z w e i v e r s c h i e d e n e n S t e l l e n e i n e s v o n z w e i b e n a c h b a r t e n S t r o m q u e r s c h n i t t e n b e g r e n z t e n R a u m e s s i c h u m g e k e h r t v e r h a l t e n w i e d i e A b s t ä n d e d e r S t r o m q u e r s c h n i t t e a n d i e s e n b e i d e n S t e l l e n.

Wenn ich hieran noch die Definition des Begriffes C i r c u l a t i o n anschließe, so erscheint alles erschöpft, was für die Darlegung der Eigenthümlichkeiten der Wirbelbewegung nothwendig ist. Wir verstehen unter Circulation eine Flüssigkeitsströmung, bei welcher die Stromlinien in sich selbst zurücklaufen. Als Beispiel für eine Circulation mag die Circulationsbewegung in der Atmosphäre angeführt werden, durch welche ein Austausch der kalten Luftmassen der Polargegenden und der warmen der Äquatorialgegenden herbeigeführt wird. Man bezeichnet, wie bekannt, den an der Erdoberfläche vom Pole gegen den Äquator hinstreichenden

Theil dieser Circulation als den unteren, den in den oberen Luftschichten vom Äquator gegen den Pol hinziehenden als den oberen Passat.

Die charakteristische Eigenthümlichkeit einer Wirbelbewegung leiten wir zweckentsprechend wieder von einem concreten Falle ab. Wir füllen ein cylindrisches Gefäß zum Theile mit einer Flüssigkeit und versetzen es mit Hilfe der Schwungmaschine um eine Achse in Rotation. Man bemerkt, dass sich in kurzer Zeit ein stationärer Zustand ausbildet; die Flüssigkeit rotiert mit dem Gefäße so, als wenn sie selbst fest wäre. Bei constant gehaltener Rotationsgeschwindigkeit lässt sich dieser Zustand beliebig lange erhalten. Wir können ihn dadurch charakterisieren, dass wir sagen: alle Flüssigkeitstheilchen machen Kreisbewegungen, sind aber relativ in Ruhe, das heißt ändern nicht ihre gegenseitige Lage. Untersuchen wir nun diesen Fall mit Hilfe der früher definierten Begriffe. In der Fig. 2 sind die Strömungslinien zweier in einer Ebene liegenden Flüssigkeitstheilchen eingezeichnet, welche die Abstände r_1 und r_2 vom Gefäß-, das ist dem Drehungsmittelpunkte, haben. 1 und 2 stellen uns zwei

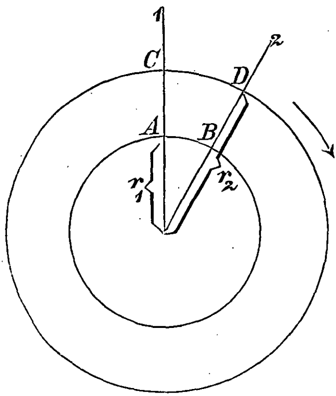

Fig. 2.

benachbarte Stromquerschnitte dar. Da die beiden Flüssigkeitstheilchen, welche wir herausgegriffen haben, in einer Ebene liegen sollen, so müssen sie, da ihre relative Lage durch die Rotation nicht geändert wird, stets in demselben Querschnitte liegen, also im Querschnitte 1 in den Punkten A und C, im Querschnitte 2 in den Punkten B und D. Den Übergang vom Querschnitte 1 in den Querschnitt 2 vollzieht das erste Flüssigkeitstheilchen längs des Bogens AB, das zweite längs des größeren Bogens CD. Da dieser Übergang von beiden Theilchen in derselben Zeit bewerkstelligt wird, folgt unmittelbar, dass sich das zweite Theilchen mit einer größeren Geschwindigkeit als das erste bewegt. Achtet man gleichzeitig auf die Abstände der beiden Stromquerschnitte an den fraglichen Stellen, so ergibt sich sofort, dass die Strömungsgeschwindigkeit an der Stelle, wo der Abstand der Querschnitte größer ist, eine größere ist als die Geschwindigkeit an der Stelle, wo der Abstand der Querschnitte kleiner ist; diese Bewegung fügt sich, wie man sieht, nicht mehr der für die Strömung charakteristischen Geschwindigkeitsvertheilung, sie gibt uns den Typus einer neuen Art der Flüssigkeitsbewegung, welche als Wirbelbewegung bezeichnet wird. Es ist, wie man einsieht, nicht jede Flüssigkeitsbewegung, bei welcher die Flüssigkeitstheilchen Rotationen ausführen, eine Wirbelbewegung; es muss stets noch früher untersucht werden, ob die charakteristische Eigenthümlichkeit der Strömung vorhanden ist oder nicht; ist dies der Fall, so hat man es mit einer Circulation, ist dies nicht der Fall, so hat man es mit einer Wirbelbewegung zu thun.

In dem betrachteten Beispiele hat die gesammte Flüssigkeit an der Wirbelbewegung Antheil genommen. Dies ist aber durchaus nicht nothwendig; es können innerhalb einer Flüssigkeitsmasse Wirbelbewegungen stattfinden, an welchen nicht die gesammte Flüssigkeit theilnimmt; stets sind jedoch die Wirbelbewegungen mit Strömungen verbunden. Unsere weiteren Betrachtungen sollen sich an den speciellen Fall anschließen, dass die Wirbelbewegung auf abgegrenzte Theile der Flüssigkeit beschränkt ist, welche die Gestalt dünner Röhren von kreisförmigem Querschnitt haben. Man nennt diese in Wirbelbewegung begriffenen Theile kurzweg Wirbel, die Achse, um welche die Rotationen der Theilchen ausgeführt werden, die Wirbelachse. Die röhrenförmige Grenzfläche, welche den wirbelnden Theil der Flüssigkeit von den nicht wirbelnden scheidet, bezeichnet man als Wirbelröhre; wenn der Querschnitt derselben klein ist im Vergleiche zur Länge, spricht man von einem Wirbelfaden.

Die Wirbelachse muss nicht geradlinig sein, sie braucht keine fixe Lage in der Flüssigkeit zu haben und kann auch ihre Gestalt mit der Zeit ändern. Charakteristisch für den Wirbel ist es aber, dass die Flüssigkeitstheilchen, welche die Wirbelbewegung vollführen, stets dieselben bleiben, welche Lagen- und Gestaltsänderungen die Wirbelachse auch immer erleiden mag. Die Continuität der Bewegung verlangt, dass ein Wirbelfaden innerhalb der Flüssigkeit nicht aufhören kann; entweder endigt er an zwei Stellen der Begrenzung der Flüssigkeit, oder er läuft in sich selbst zurück.

Um eine weitere wichtige Eigenschaft eines Wirbelfadens darzulegen, führen wir den Begriff der Winkelgeschwindigkeit ein, das ist den Quotienten des unendlich kleinen Winkels, um welchen sich ein Querschnitt des Wirbels in einer unendlich kleinen Zeit verdreht, dividiert durch eben diese unendlich kleine Zeit. Die Eigenschaft, um welche es sich handelt, lässt sich dann durch den Satz ausdrücken: Der Querschnitt des Wirbels multipliciert mit seiner Winkelgeschwindigkeit ist eine Constante. Dieses Product ändert niemals seinen Wert, was auch immer mit dem Wirbelfaden sonst geschehen mag; wenn sich — was auch vorkommen kann — sein Querschnitt ändert, so ändert sich immer auch in entsprechender Weise seine Winkelgeschwindigkeit; dieselbe wird kleiner, wenn der Querschnitt größer, größer, wenn der Querschnitt kleiner wird.

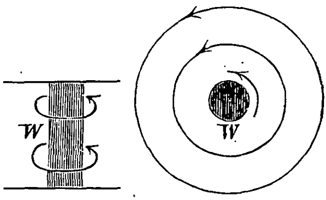

Fig. 3. Fig. 4.

Treten wir nun an die Darlegung einiger wichtiger specieller Fälle heran. Es bestehe zunächst in einer idealen Flüssigkeit, die durch zwei parallele Ebenen begrenzt sei, ein geradliniger Wirbelfaden *W* (Fig. 3). Derselbe steht in der Flüssigkeit still; in der umgebenden Flüssigkeit besteht dann eine Circulationsbewegung (Fig. 4 stellt den

Wirbel von oben gesehen dar); auch außerhalb des Wirbels vollführen die Flüssigkeitstheilchen Rotationen, doch gehorchen sie dabei dem Gesetze der Strömung; ihre Geschwindigkeit ist um so geringer, je weiter sie von dem Wirbelfaden abstehen. Eine Folge dieser Circulationsbewegung ist es, dass Körper, welche in die Umgebung des Wirbels gelangen, von demselben Bewegungsantriebe im Sinne der vorhandenen Circulation erfahren.

Die letztere Bemerkung gestattet uns, das Verhalten zweier ganz gleicher geradliniger und paralleler Wirbelfäden zu übersehen. In Fig. 5 sind zwei derartige Wirbelfäden W_1 und W_2 von gleicher, durch die Pfeile angedeuteter Rotationsrichtung dargestellt. W_1 übt auf W_2 einen Bewegungsantrieb im Sinne des Pfeiles P_1, W_2 auf W_1 einen gleich großen Antrieb im Sinne des Pfeiles P_2 aus. Diese Bewegungsantriebe wirken als ein Kräftepaar, welches Drehung hervorruft; die Wirbelfäden W_1 und W_2 werden infolge dessen um einander rotieren. Wenn die Rotationsrichtung der Wirbelfäden entgegengesetzt ist (Fig. 6), so äußert W_1 auf W_2 einen Bewegungsantrieb im Sinne des Pfeiles P_1, W_2 auf W_1 einen gleich großen Antrieb im Sinne des Pfeiles P_2. Die Folge da-

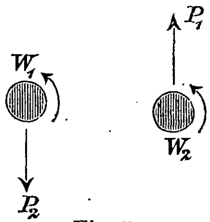

Fig. 5.

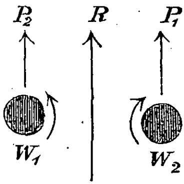

Fig. 6.

von ist, dass die beiden Wirbel in der Flüssigkeit in constanter Entfernung von einander im Sinne des Pfeiles *R* fortschreiten.

Der soeben betrachtete Fall zweier gleicher, paralleler und geradliniger Wirbelfäden ist für uns von besonderem Interesse. Wir ergänzen das Gesagte durch Darlegung der mit demselben verbundenen Circulationsbewegung. Durch die Eigenbewegung der Wirbel wird auch die Circulation, welche jeder von ihnen für sich allein (also feststehend) in der Flüssigkeit hervorrufen würde, beeinflusst, so dass die Circulation beider zusammen nicht einfach durch die Summierung der Circulationen zweier Einzelwirbel erhalten werden kann. Die für diesen Fall bestehenden Verhältnisse sind in Fig. 7 wiedergegeben. Um die beiden Wirbelfäden herum erscheint ein verticaler Cylinder von ovalem Querschnitt abgegrenzt, in welchem die Circulation stattfindet. Dieser ganze Cylinder schreitet, stets von denselben Flüssigkeitstheilchen erfüllt, mit den beiden Wirbeln durch die Flüssigkeit fort; man bezeichnet ihn als den Wirbelkörper. Außerhalb des Wirbelkörpers werden beim Fortschreiten desselben Strömungen hervorgerufen, welche für uns von geringerem Interesse sind. Die Circulation innerhalb des Wirbelkörpers wird durch die Figur deutlicher als durch eine langathmige Beschreibung in Worten. Es mag bloß noch darauf hingewiesen werden, dass die Geschwindigkeit der Circulation sehr nahe bei der Symmetrielinie der Wirbel viermal so groß ist als die Geschwindigkeit, mit welcher der Wirbelkörper in der Flüssigkeit fortschreitet.

Denkt man sich Fig. 7 um die Achse *AB* gedreht, so gibt sie uns die Verhältnisse, welche bei einem kreis-

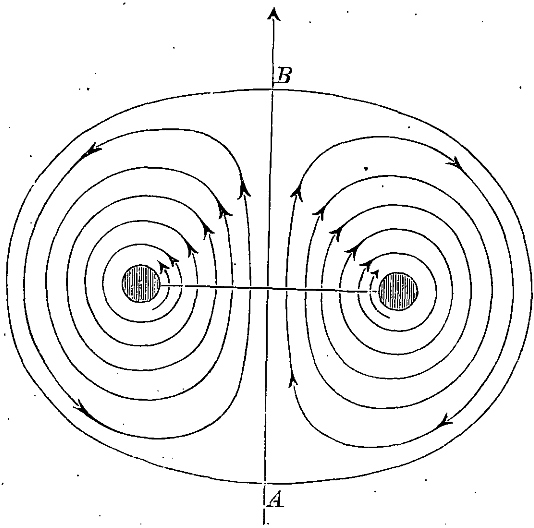

Fig. 7.

förmigen Wirbelfaden bestehen. Ein solcher wird als geschlossener Wirbelfaden ganz in dem Innern der Flüssigkeit bestehen. Experimentell sind solche Wirbelfäden am leichtesten zu realisieren. Durch die Mitte des Bodens eines cylindrischen, mit Wasser gefüllten Gefäßes *F* (Fig. 8) ragt ein enges Rohr, welches durch ein mit einem Hahne *H* versehenes horizontales Verbindungsrohr mit der Röhre *R* verbunden ist. Diese ist mit gefärbtem Wasser höher als *F* gefüllt. Öffnet man den Hahn für einen Moment, so tritt infolge des Überdruckes etwas gefärbtes Wasser unter Bildung eines kreisförmigen Wirbels in *F* ein. Ich projiciere die Erscheinung auf einen Schirm, um sie dem ganzen Auditorium sichtbar zu machen. Man sieht ganz deutlich die Wirkung des bei dem stoßweisen Austreten des gefärbten Wassers hervorgerufenen Wirbelfadens. Untersucht man die Flüssigkeitstheilchen, welche sich in einem bestimmten Augenblick in der durch den kreisförmigen Wirbelfaden gelegten Ebene befinden, zu späteren Zeiten, so findet man, dass diese Ebene durch die Wirkung der Circulation rasch geändert wird. Fig. 9 gibt eine beiläufige Vorstellung von dieser stetig zunehmenden Deformation, wie sich dieselbe auch auf dem Projectionsschirm verfolgen lässt.

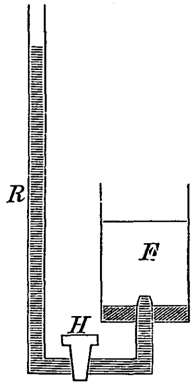

Fig. 8.

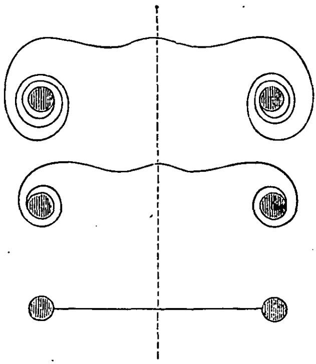
Fig. 9.

Für die weiteren Versuche verwende ich einen anderen Apparat, welcher sich von dem soeben benützten principiell gar nicht unterscheidet. Die Flüssigkeit, in welcher die kreisförmigen Wirbelfäden hervorgerufen werden, ist nun die atmosphärische Luft. Der Apparat besteht aus einem hölzernen Kasten (Fig. 10),

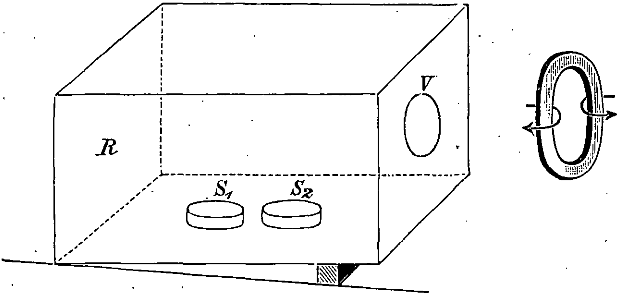

Fig. 10.

dessen Rückwand R von einem straff gespannten Tuche gebildet wird, dessen Vorderwand V einen kreisförmigen Ausschnitt hat. In das Innere des Kastens stelle ich zwei Schalen, von welchen die eine ammoniakhältiges Wasser, die andere Kochsalz mit Schwefelsäure übergossen enthält. In dieser Schale entwickeln sich Dämpfe von Chlorwasserstoff, welche sich mit dem Ammoniak, welches aus der ersten Schale entweicht, zu festem Chlorammonium verbinden; die Theilchen, aus welchen dieses besteht, sind aber so klein, dass sie durch die Reibung an den Lufttheilchen als dichter Nebel oder Rauch an der Luft hängen bleiben. Dieser Chlorammoniumnebel ersetzt den Farbstoff, welcher in dem ersten Apparate benützt wurde. Versetzt man nun der Rückwand einen Schlag, so tritt aus der kreisförmigen Öffnung ein Wirbelring aus, dessen Rotationsrichtung in der Figur angegeben ist. Er schreitet wie ein unabhängiger fester Körper durch den Luftraum fort; von der Circulation in seiner Umgebung kann man sich, nachdem sie nicht sichtbar ist, überzeugen, indem man sein Gesicht in den

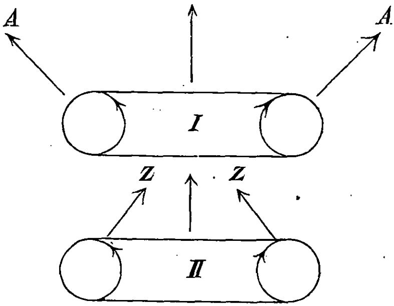

Fig. 11.

Weg eines dieser Luftwirbelringe bringt; sobald der Ring dem Gesichte sehr nahe gekommen ist, fühlt man einen durch das Centrum des Ringes gerichteten Luftstoß.

Die Kenntnis der Circulationsbewegung um einen Wirbelring setzt uns in den Stand, das gegenseitige Verhalten zweier Wirbelringe zu übersehen, welche einander auf der selben Figurenachse genügend nahe kommen, um sich merklich zu beeinflussen. Betrachten wir zunächst zwei Wirbelringe, welche gleichen Rotationssinn haben

(Fig. 11). Der Wirbelring *II* übt durch seine Circulation auf den Wirbelring *I* längs dessen ganzer Peripherie Einwirkungen im Sinne der Pfeile *A* aus, der Wirbelring *I* hingegen auf *II* Einwirkungen im Sinne der Pfeile *ZZ*. Die Folge davon ist eine Erweiterung des Ringes *I* und eine Verengerung des Ringes *II*. Helmholtz hat gezeigt, dass mit einer Erweiterung eines Wirbelringes eine

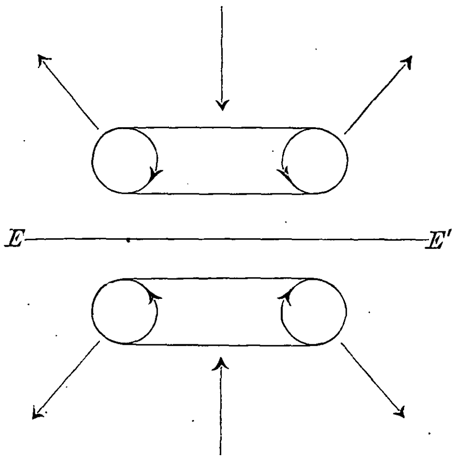

Fig. 12.

Verlangsamung, mit einer Verengerung eine Beschleunigung seiner fortschreitenden Bewegung verbunden ist. Die Folge davon ist, dass der Ring *II* durch den Ring *I* hindurchschlüpft. Kaum ist das geschehen, so wiederholt sich das gleiche Spiel; der eben durchgeschlüpfte Ring erweitert sich unter Verlangsamung seiner Bewegung, der andere verengert sich unter Beschleunigung und schlüpft durch den ihm soeben vorangeeilten durch u. s. f. Mit einiger Geduld lässt sich dies auch mit zwei Wirbelringen, welche man unmittelbar hintereinander aus dem Kasten hervortreibt, experimentell verificieren. Betrachten wir ferner zwei Wirbelringe, welche gegen einander rotieren (Fig. 12). Durch die Circulation übt hier jeder der beiden Wirbel auf den anderen Kräfte aus, welche Erweiterung des anderen hervorrufen. Dabei wird ihre Bewegung immer langsamer. In der Mittelebene EE' herrscht vollkommene Ruhe. Wir können sie daher, ohne etwas zu ändern, durch eine feste Wand ersetzen und erhalten so das Verhalten zweier Wirbelringe, welche gegen eine feste Wand anlaufen, während die Circulation in ihrem Innern gegen die Wand gerichtet ist. Wir können aber auch einen der beiden Wirbelringe ganz fortlassen, da ja durch die feste Wand eine gegenseitige Einwirkung der Wirbelringe unmöglich gemacht ist, und erhalten so einen Fall, welcher dem Experimente leicht zugänglich ist. Wenn ich einem Wirbelringe, den ich aus dem Kasten herausgetrieben habe, eine Glasscheibe in den Weg stelle, so sehen Sie deutlich, wie er sich, der Platte nahe gekommen, erweitert.

Diese Wirbelringe aus Chlorammoniumgas geben uns einen guten Begriff von den Wirbelatomen Lord Kelvins. Wenn wir annehmen, dass der Weltraum mit einer Substanz, dem Äther, erfüllt ist, die wir nicht mit der gewöhnlichen Materie identificieren dürfen, und dieser Substanz die Eigenschaften einer idealen Flüssigkeit zuschreiben, so könnten geschlossene Wirbelfäden, als deren einfachste Form der Wirbelring zu betrachten ist, sehr gut die Grundlage dessen sein, was sich unseren Sinnen als Materie darstellt. Die Verschiedenheiten der chemischen Elemente ließen sich durch eine Verschiedenheit der Gestalten der geschlossenen Wirbelfäden deuten; wenn wir auch, wie es den Anschein hat, nicht im Stande sind, andere als einfache Wirbelfäden zu erzeugen, so sind doch solche, wie die mathematische Betrachtung lehrt, möglich. Sie können sehr verwickelte Gestalten haben, es können geschlossene Wirbelfäden mit beliebig vielen Knoten und Windungen existieren: nur können wir solche nicht realisieren. Dass solche Wirbelringe die Eigenschaft der Unzerstörbarkeit und Unerzeugbarkeit, wie sie aus der Empirie den Atomen zugeschrieben wird, besitzen, erhellt aus der eingangs gemachten Bemerkung über Wirbelbewegungen in idealen Flüssigkeiten. Aber noch mehr; die Wirbelatome würden uns auch die Elasticität, welche wir an den materiellen Körpern beobachten, verständlich machen, ohne dass wir zu besonderen Hypothesen Zuflucht nehmen müssten. Wenn zwei Wirbelringe zusammenstoßen, verhalten sie sich wie zwei feste elastische Körper; sie vibrieren nach dem Zusammenstoße wie zwei feste Kautschukringe. Vibrationen eines Wirbelringes lassen sich leicht erzeugen, indem man das kreisförmige Loch des Kastens durch ein quadratisches ersetzt; die Gleichgewichtsgestalt des einfachen Wirbels ist der Kreis; erzeugt man einen einfachen Wirbel von nicht kreisförmiger Gestalt, so vibriert er um die Kreisform wie um eine Gleichgewichtslage. Ein geschlossener Wirbelfaden ist aber auch untheilbar; wenn wir ihn durchschneiden wollen, so bewegt er sich einfach von dem Messer weg oder windet sich um dasselbe herum; er verhält sich also im wörtlichsten Sinne als ein Atom, d. i. als etwas Unzerschneidbares.

Ob nun die Atome, zu deren Annahme uns die empirische Wissenschaft geführt hat, wirklich Ätherwirbelfäden sind oder nicht, mag dahingestellt bleiben. Der Wert der Kelvin'schen Gedanken liegt darin, dass sie uns die Möglichkeit zeigen, ein Weltbild zu entwerfen, welches dem Ideale der Wissenschaft nach Einfachheit in den Voraussetzungen näher kommt als das jetzt noch gebräuchliche, welches neben dem Äther eine besondere Materie anzunehmen genöthigt ist. Kelvins Hypothese der Wirbelatome beweist uns, dass Heinrich Hertz mit Recht die Worte sprechen durfte:[1] „Die Quintessenz uralter physikalischer Lehrgebäude ist uns in den Worten aufbewahrt, dass alles, was ist, aus dem Wasser, aus dem Feuer geschaffen sei. Der heutigen Physik liegt die Frage nicht mehr ferne, ob nicht etwa alles, was ist, aus dem Äther geschaffen sei?“ Sie beweist uns, dass die Physik in ihrem Schoße die Möglichkeit zur Beantwortung dieser Frage birgt, mag dieselbe vielleicht auch dereinst auf anderem Wege gesucht, in anderer Form gegeben werden, als Kelvin es versucht hat.

---

[1]) Hertz, Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektricität. Werke I, S. 339.