**7. *Über Flüssigkeitsbewegungen, welche durch
Rotation fester Körper verursacht werden;
von A. L. Holz.***

Auf die Analogie der Wirbelbewegungen des Wassers mit den elektromagnetischen Wirkungen elektrischer Ströme hat H. v. Helmholtz in seiner Untersuchung: „Über die Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen“¹⁾ zuerst hingewiesen und die Gesetze entwickelt, welchen die geradlinigen und kreisförmigen Wirbeläden unterworfen sind.

Die hieraus gewonnenen Resultate schienen mir für die Kenntnis der mechanischen Vorgänge, die zunächst bei magnetischen Anziehungskräften stattfinden, von solcher Bedeutung, daß ich eingehende Versuche über Wirbelbewegungen angestellt habe und zu dem Ergebnis gelangt bin, daß durch Rotation fester Körper, welche zur Lösung meiner Aufgabe in geeigneten Formen angewendet wurden, ähnliche Wirbelfiguren erzeugt werden können, wie uns solche an den Kraftlinien der stab- und kugelförmigen Magnete bekannt sind. Man nimmt an, daß diese Kraftlinien aus dem Nordpol eines Stabmagneten heraustreten und symmetrisch im Bogen nach dem Südpol hinziehen, von diesem durch die magnetische Achse den Nordpol erreichen, um aus demselben sich wieder nach dem Außenraum zu bewegen; in diesem Sinne wird die Bewegung der Kraftlinien so lange fortgesetzt, bis sie durch geeignete Kräfte geändert oder vernichtet wird.

Durch die in vorliegender Mitteilung beschriebenen Versuche kann man eine Bewegung der Wasserteilchen herstellen, die eine ähnliche Wirbelform erzeugt, wie sie die magnetischen

1) H. v. Helmholtz, Wissenschaftliche Abhandlungen 1. p. 101.

Kurven besitzen, wobei wir jedoch, wenn wir eine Verwandtschaft beider Formen annehmen, berücksichtigen müssen, daß einige Begleiterscheinungen, die nur bei unseren Versuchen und nicht an magnetischen Kurven gefunden werden, in unserer Versuchsanordnung ihren Grund haben und zwar in erster Reihe in der Form des angewendeten Apparates und der von festen Wänden eingeschlossenen Flüssigkeit, während die magnetischen Kraftlinien in einem unbegrenzten Raum im Äther erzeugt werden, der alle Körper zu durchfließen imstande ist; ziehen wir noch den Einfluß der Schwere des Wassers und den des Luftdruckes auf dasselbe in Betracht, dann wird die Ursache der Verschiedenheit beider Erscheinungen zum großen Teil in der Verschiedenheit der beiden Materien zu suchen sein.

Das Ergebnis der Untersuchung ist folgendes:

1. Findet in einer Flüssigkeit die Rotation einer Kreiskeibe um ihre Achse statt, die senkrecht zur Kreisebene steht, so bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen oberhalb wie unterhalb der Keibe vertikal zu ihrer Ebene hin; es steht deshalb die Bewegungsrichtung der Flüssigkeit senkrecht zur Ebene der rotierenden Keibe und allgemein bei allen zur Untersuchung angewendeten Körpern, auch senkrecht zur Ebene der mit ihr parallel liegenden Flächenteilchen rotierender Körper.

2. Wird ein geeigneter Hohlkörper in einer Flüssigkeit in Rotation versetzt, so ziehen bei einer bestimmten Richtung der Rotation die Teilchen der Flüssigkeit von oben hinein und in Richtung der Rotationsachse von unten heraus, um im Bogen um den Körper an die obere Öffnung desselben zu gelangen; kehrt man nur die Rotationsrichtung des Körpers um, so findet auch die Bewegungsrichtung der Wasserteilchen im entgegengesetzten Sinne statt, es strömen dann die Teilchen von unten in den Rotationskörper hinein und ziehen durch die Achse von oben heraus.

3. Während der Rotation der angewendeten Hohlkörper zeigen die in Bewegung befindlichen Wasserteilchen das Bestreben, nach dem Mittelpunkt der Rotationsachse des rotierenden Körpers hinzuziehen, wodurch eine radiale Strömung der Flüssigkeitsteilchen erzeugt wird. Die an die Rotationsachse hinströmende Flüssigkeit besteht aus den Wirbelfäden, die sich

um die Wirbelachse spiralförmig herumbewegen und bei fortgesetzter Rotation einen Kreislauf vollziehen; ein Teil der heranströmenden Wirbelfäden wird von den festen Teilen des Rotationskörpers aufgefangen und ihrer Fortbewegung zur Rotationsachse zu gelangen, Widerstand geleistet; diese abgestoßenen Flüssigkeitsteilchen bewegen sich in Richtung der Rotation entweder auf- oder abwärts vor dem Außenraum des Rotationskörpers und ziehen bei fortgesetzter Rotation im Bogen herum, als wären sie auf dem Wege durch die Rotationsachse aus einem Pol herausgekommen. Dieser Vorgang lehrt, daß fortdauernd Flüssigkeitsteilchen nach einem Rotationszentrum hinströmen können, ohne eine Überfüllung an demselben zu verursachen.

4. Die durch Rotation bewegte Flüssigkeit bildet rings um den Rotationskörper einen Wirbel, dessen Achse durch das Innere des Rotationskörpers läuft; die Fäden, aus welchen dieser Wirbel besteht, bewegen sich in Ebenen, die senkrecht zur Rotationsrichtung des rotierenden Körpers stehen. Bringt man in die Teile der Flüssigkeit, welche an den Rotationskörper heranströmt, rings um denselben an dünnen Fäden hängende Körperchen, so werden, wie vorausszusehen ist, letztere in radialer Richtung an den rotierenden Körper hingezogen.

Zu diesen Untersuchungen benutzte ich ein dem Zimmeraquarium ähnliches Wasserbecken, dessen vier Wände aus 60 cm breiten und 40 cm hohen Glasscheiben bestanden. An zwei gegenüberstehenden Teilen des Eisenrahmens befanden sich nach oben gerichtete Eisenstäbe zur Aufnahme der Umdrehungsachse, die eine Kreisscheibe von 17 cm Durchmesser trug, durch welche die Umdrehung auf eine horizontal liegende Kreisscheibe von 3 cm Durchmesser übertragen werden konnte, in deren Achse ein Messingrohr zur Aufnahme der Führungsstäbe sich befand, an welchen die Rotationskörper befestigt waren. Auf den beiden anderen Teilen des oberen Eisenrahmens befand sich ein als Brücke dienender Stab, auf dem die kleinere Kreisscheibe befestigt war. An einem Ende der Umdrehungsachse stand senkrecht auf einer Kreisscheibe die Kurbel, durch welche die an den Führungsstäbchen hängenden Körper in Rotation versetzt werden konnten.

Zur Beobachtung der Bewegung der Wasserteilchen wurde

für den ersten Teil der Untersuchungen Bernsteinsand in das Wasser geschüttet, später jedoch weiße Papierschnitzel in der Größe von 1 bis 1,5 mm im Quadrat zu gleichem Zweck verwendet.

Um die vertikale Strömung der Wasserteilchen zur Ebene der rotierenden Kreisscheibe zu erhalten, ist es erforderlich, die Flüssigkeit stets zur Ruhe kommen zu lassen, bevor die erneute Rotation beginnt, denn die durch vorhergehende Versuche dem Wasser erteilte Bewegung, die noch einen entsprechenden Zeitraum nach dem Aufhören der Rotation vorhanden ist, wirkt sehr störend und läßt eine präzise Vertikalbewegung der Wasserteilchen nicht aufkommen. Befinden sich dieselben in Ruhe, so beobachtet man hauptsächlich die ersten Rotationen der Kreisplatte, an welche die Flüssigkeitsteilchen von unten auf- und von oben abwärts in vertikaler Richtung hinziehen; bei fortgesetzter Rotation geht die vertikale Strömung der Teilchen in eine immer weiter sich ausdehnende spiralförmige über, die jedoch ebenfalls das Bestreben zeigt, die Wasserteilchen an die rotierende Platte heran zu bewegen.

Der Durchmesser der Kreisplatte, mit welcher die meisten Rotationsversuche angestellt wurden, betrug 15 cm, doch auch kleinere und größere Platten wurden im Laufe der Untersuchungen benutzt, die alle dieselben Resultate ergaben.

Um die Bewegungen der Flüssigkeitsteilchen zu beschleunigen und dieselben in größerer Menge in Bewegung zu bringen, waren die Rotationsplatten an ihrem Umfang an einigen Stellen mit sehr kleinen Zacken versehen; der Führungstab stand senkrecht zur Ebene der Kreisplatte mit dieser fest verbunden und wie bei allen anderen Rotationskörpern in der Hülse befestigt, welche in der Achse der auf der Brücke sitzenden kleineren Kreisscheibe sich befand. Der Führungstab konnte in der Hülse auf- und abwärts verschoben werden, wodurch die Höhe des Rotationskörpers im Wasser nach Erfordern geändert werden konnte.

Wird eine hohle Kugelhaube auf gleiche Weise wie die Kreisplatte in Rotation versetzt, so ziehen die Flüssigkeitsteilchen von allen Seiten *in radialer Richtung* an den Rotationskörper hin; denkt man sich in den Strömungsrichtungen die

einzelnen Wirbelfäden oberhalb der Kugelhaube durch die Fläche hindurch verlängert oder ihren Weg fortgesetzt, so würden sie die Rotationsachse erreichen.

Setzen wir einen Hohlzylinder, in dessen Achse der Führungsstab sich befindet, in Rotation und ist am oberen wie am unteren Kreisumfang ein entsprechend dünner Kranz mit 1 cm großen Zacken befestigt, die alle nach einer bestimmten Richtung aufgebogen sind, so ziehen die Wasserwirbel in das Innere des Zylinders von einer Seite hinein, bewegen sich durch die Rotationsachse und kommen auf der entgegengesetzten Seite heraus, um außerhalb des Zylinders im Bogen wieder an die Eintrittsstelle zu gelangen. Wollen wir diese Bewegungsrichtung umkehren, so müssen wir die Rotationsrichtung ändern und den Zylinder nur in entgegengesetzter Richtung in Rotation bringen, wie bereits im zweiten Satz bemerkt wurde. Bei diesem Vorgange beobachten wir, daß die austretenden Wirbel nicht mehr in derselben Menge erscheinen, wie die eintretenden, und daß ein Teil derselben durch die Widerstände, die im Innern des Rotationskörpers vorhanden sind, in ihrer Bewegungsrichtung verändert wird. Der zu diesen Versuchen dienende Hohlzylinder hatte einen Durchmesser von 7,5 cm und eine Höhe von 6,9 cm. Bezeichnen wir die Austrittsstelle der Wirbelfäden mit *Nordpol*, die Eintrittsstelle mit *Südpol*, so können wir durch Umkehrung der Rotationsrichtung die beiden Pole umkehren. Wenn die erste Rotation, welche oben den Nordpol erzeugte, eine rechtsdrehende war, so werden wir an derselben Stelle einen Südpol herstellen, wenn eine linksdrehende Bewegung stattfindet. Dieser Versuch erinnert uns an die Umkehrung der magnetischen Pole durch Umkehrung des elektrischen Stromes beim Magnetisieren eines Stabmagneten.

Während der Rotation der Hohlkörper ziehen die austretenden und die übrigen außerhalb der Körper befindlichen Flüssigkeitsteilchen im Bogen bis an die Wände des Wasserbeckens, um wieder nach fortgesetzter Bewegung an den Rotationskörper zu gelangen. Bei andauernder Rotation nimmt die Wasserschicht, welche durch Adhäsion mit den Körpern zusammenhängend rotiert, immer mehr und mehr zu und die heranströmenden Wirbelfäden und weiteren Flüssigkeitsteilchen

bewegen sich deshalb ebenfalls in einem immer größer werdenden Bogen um den Rotationskörper herum, weshalb die heranströmenden Wasserteilchen, die in radialer Richtung die Fläche der rotierenden Körper zu erreichen bestrebt sind, von der zunehmenden Wasserschicht in ihre rotierende Bewegung mitgenommen werden und dann ebenfalls in einem weiten Bogen um den Rotationskörper ihren Weg fortsetzen. Werden in diese Flüssigkeitsbewegungen an dünnen Fäden hängende Körperchen herabgelassen, so ziehen die letzteren ganz im Sinne der bewegten Flüssigkeitsteilchen zuerst radial und dann im Bogen um den Rotationskörper herum.

Dasselbe Resultat, welches durch die Rotation des Hohlzylinders geliefert wird, erhalten wir mit der Hohlkugel, wenn wir rings um die beiden Polausschnitte ähnliche nach einer Seite aufgebogene Zacken anbringen, wie dies bei dem Zylinder stattgefunden hat; es erscheinen nur infolge der Krümmung der Kugeloberfläche die radial heranströmenden Wirbelfäden in entsprechenden Neigungen, die jedoch an den Körpern schärfer hervortreten, an welchen die mit Zacken versehenen Ringe fehlen, die nur den Zweck hatten, eine Umkehrung der Pole sichtbar zu machen.

Bei den bis hierher beschriebenen Versuchen spielt die feste Fläche des Rotationskörpers eine störende Rolle, wenn man die Erscheinung der radialen Bewegung der Wasserteilchen möglichst gut ausgeprägt erhalten will, denn die erwähnte Fläche, an welcher durch Adhäsion die anliegende Flüssigkeitsschicht hängt, verursacht, wie bereits auf p. 391 näher beschrieben, bei fortgesetzter Rotation ein Anwachsen weiterer Wassermengen, die mit dem Körper in Rotation gelangen und eine Annäherung der radialen Strömung an die Fläche der Rotationskörper zu verhindern suchen; in solchem Falle beobachtet man, wie die herabhängenden Körperchen, sobald sie in die Nähe der rotierenden Wassermasse gelangen, nicht mehr die begonnene Richtung der radialen Bewegung beibehalten, sondern im Bogen um den Rotationskörper und zwar in Richtung des rotierenden Wassers herumziehen. Diesen Einfluß der undurchdringlichen Fläche suchte ich dadurch zu vermindern, daß ich Rotationskörper anwendete, die aus dünnen Flachringen bestanden und aus dem schwächsten, käuflichen

Eisenblech geschnitten waren; ihr Durchmesser betrug 10 cm und ihre Ringbreite 1 cm; eine entsprechende Anzahl solcher Ringe war übereinander an einem Führungsstab so befestigt, daß dieser die Achse des Hohlzylinders bildete, dessen Zylindermantel durch die Abstände der übereinander sitzenden Ringe genügend durchbrochen war, damit die Wasserteilchen, die in radialer Bewegung begriffen waren, ohne den bereits erwähnten Widerstand bis dicht an den Umfang der Ringe heranströmen konnten, die Entfernungen derselben voneinander waren für die verschiedenen zu den Versuchen benutzten Rotationszylinder 1, 1,5 und 2 cm. Jeder einzelne Ring besaß drei bis vier kreisförmige Vorsprünge an seinem Umfang, die je nach Erfordern aufgebogen werden konnten, um die Größe der Wasserströmung zu verändern und die Umkehrung der Pole zu ermöglichen.

Zur Herstellung eines kugelförmigen Körpers wurden diese Flachringe in so verschiedenen Größen angewendet, wie diese zur Herstellung der kugelähnlichen Form erforderlich erschienen; die beiden Ringe an den Polen waren daher die kleinsten und die Durchmesser der übrigen Ringe nahmen im Verhältnis bis zu dem Äquatorring um soviel zu, wie zur Erreichung der Kugelform nötig war. Unter Anwendung solcher Flachringe erhielt ich Rotationskörper, die bei fortgesetzter Rotation nicht so große Flüssigkeitsmengen in ihrer einmal eingenommenen Richtung mitziehen, sondern eine besser hervortretende Radialströmung zustande kommen lassen und ermöglichen, daß die Flüssigkeitsteilchen in vollständig radialer Richtung bis an den Umfang der Ringe sich bewegen. Aus demselben Grund bewegen sich auch die im Wasser herabhängenden Körper im gleichen radialen Sinne bis an den Rotationskörper heran. Bei geradliniger Fortbewegung fester Körper ohne Rotation derselben werden in der Flüssigkeit Wirbel erzeugt, die der Körper so lange hinter sich herzieht, wie er in Bewegung sich befindet; in solchem Falle wird ebenfalls eine Anziehung verursacht, jedoch nur in der linearen Richtung, in welcher die fortschreitende Bewegung des Körpers andauert, eine radiale Strömung der Wasserteilchen findet hier nicht statt.

Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt uns, wenn man

der Flüssigkeit, in welcher ein Körper in Rotation sich befindet, einen freien Durchgang bis zur Rotationsachse des ersteren gewährt, daß die Teilchen des Wassers bei fortgesetzter Rotation das Bestreben haben, nach dem Mittelpunkt des Rotationskörpers sich hinzubewegen und andere Massen, die sich in entsprechenden Entfernungen in der Flüssigkeit befinden, in der eingenommenen radialen Richtung mitzuziehen. Wir erhalten hierdurch das Bild einer nach dem Mittelpunkt des Körpers gerichteten, radialen Anziehung, die durch ein zwischenliegendes Medium, das für unsere Untersuchung das Wasser ist, vermittelt wird. Stellen wir uns den Äther als das Medium vor, das den Weltraum erfüllt, so erhalten wir auf Grund der beobachteten Radialströmung eine Analogie unseres Ergebnisses mit dem freien Fall der Körper im Weltraume.

(Eingegangen 7. September 1905.)