

# Die Widerstandsvorgänge im Wasser an Platten und Schiffskörpern. Die Entstehung der Wellen.

*Vorgetragen von Fr. Ahlborn-Hamburg.*

## I. Untersuchungsmethoden.

Die photographischen Unterlagen für die bisherigen Untersuchungen der Widerstandsströmungen (in Band V u. VI des Jahrbuches) wurden in der Weise gewonnen, daß die photographische Kamera auf dem Wagen über den Versuchsmodellen aufgestellt war, so daß während der Fahrt keine Änderung der Lage zwischen Kamera und Modell eintrat. Die Platten und Modelle erschienen daher auf den Photogrammen in Ruhe und das Wasser in einer allgemeinen, strömenden Bewegung begriffen, obgleich in Wirklichkeit die Modelle durch ruhendes Wasser bewegt wurden.

Da die physikalischen Wirkungen zwischen Modell und Medium nach dem Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung dieselben sind, ob nun der feste Körper mit einer Geschwindigkeit  $v$  gegen die ruhende Flüssigkeit bewegt wird, oder ob das Wasser mit derselben Geschwindigkeit gegen den ruhenden Körper fließt, so dürfen unsere Photogramme als zuverlässige Darstellungen der Widerstandsströmungen betrachtet werden, wie diese erscheinen, wenn ein gleichförmig bewegter Wasserstrom auf die feststehenden Versuchskörper trifft und sie umfließt.

Unter Widerstandsströmungen sind dabei alle Richtungsänderungen und Beschleunigungen zu verstehen, die der Flüssigkeitsstrom erfährt, wenn in seinen Lauf feste Körper als Hindernisse eingeschaltet werden. Sie sind im allgemeinen abhängig von der Stromgeschwindigkeit und den physikalischen Eigenschaften des Mediums: seiner Dichte und dem Grade seiner Liquidität, sowie von der Größe, Form und Stellung des festen Körpers.

In der Diskussion meines letzten Vortrages (d. Jahrbuch 1905) wurde von einem meiner Opponenten hervorgehoben, daß die Schubkraft, welche ein Schiff zur Überwindung des Wasserwiderstandes aufwenden müsse, um im ruhenden Wasser mit der Geschwindigkeit  $v$  zu fahren, eine andere sei, als die Zugkraft, welche in der Ankerkette desselben Fahrzeuges wirke, wenn dieses in einem Strome von derselben Geschwindigkeit  $v$  festliege.

Falls diese auf den ersten Blick paradoxe Ansicht auf dynamometrischen Ergebnissen einwandfreier Schleppversuche beruhen sollte, was mir nicht bekannt ist, so würde dadurch doch kein Widerspruch gegen das von uns angewandte Prinzip der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung erwiesen sein, da jedenfalls der Nachweis fehlt, daß der Strom, in welchem das ruhende Schiff vor Anker lag, homogener Art war, d. h. daß er in seinem ganzen Querschnitt dieselbe Geschwindigkeit  $v$  hatte, mit welcher bei dem Gegenversuch das Schiff in ruhendem Wasser geschleppt wurde. Die Messung der Stromgeschwindigkeit dürfte natürlich nicht in der gewöhnlichen Art des Loggens hinter dem Schiff erfolgen, sondern sie müßte durch eine größere Zahl empfindlicher, registrierender Instrumente vor dem Fahrzeug außerhalb des Bereichs der Widerstandsströmungen ausgeführt werden und die Meßapparate müßten über den ganzen Stromquerschnitt verteilt werden, soweit das Wasser nachher an den Widerstandsströmungen teilnimmt und von ihnen merklich beeinflußt wird. Wie weit dieser Einfluß reicht, zeigt sich bekanntlich daran, daß seegehende Schiffe im flachen Wasser nicht die Fahrgeschwindigkeit erreichen können, wie im tiefen Wasser des Ozeans. Ein Schiff, das aus weitem und tiefen Wasser plötzlich in enges und flaches Gewässer eintritt, erfährt eine fast ruckweise Abnahme seiner Geschwindigkeit.

Eine genaue Messung der Stromgeschwindigkeit ist gewiß mit mancherlei Schwierigkeiten verknüpft, aber sie ist für den vorliegenden Zweck unerlässlich, und je sorgfältiger sie angestellt wird, um so besser und deutlicher wird sich zeigen, daß die Strömung nicht als homogen bezeichnet werden kann. Von der Bewegung des Wassers in Flüssen ist dies längst bekannt und auf den verzögernden Einfluß der Umgrenzungen, des Flußbettes, zurückgeführt. Ebenso weiß man, daß die Meeresströmungen an der Oberfläche andere Geschwindigkeiten und Richtungen haben können, als in der Tiefe.

Wo man aber zu Versuchszwecken in ringförmigen Wasserbehältern dadurch eine Strömung erzeugt, daß man das Wasser auf einer Seite durch Schiffsschrauben oder andere Triebmittel in kreisende Bewegung bringt, kommen außer der Reibung an den Gefäßwänden noch die sehr

beträchtlichen rotierenden und wirbelnden Bewegungen hinzu, welche durch die Antriebsvorrichtungen hervorgerufen werden. Wie weit diese sehr wesentlichen Störungen der Gleichförmigkeit des Stromes reichen, läßt sich an der blanken, wellenfreien Oberflächenbeschaffenheit des sogenannten Kielwassers ermessen, die durch derartige sekundäre Strömungen bedingt wird. Es läßt sich danach voraussehen, daß der Ankerzug eines im Strome  $v$  liegenden Schiffes ein anderer sein wird, als der Zug an der Schlepptrasse, durch welche das Schiff mit der Geschwindigkeit  $v$  durch stehendes Wasser gezogen wird, aber die Ursache liegt nicht in der Unrichtigkeit jenes allgemein gültigen physikalischen Prinzips, sondern an der mangelnden Gleichförmigkeit der natürlichen oder künstlichen Strömungen. Daher sind auch alle unter Benutzung strömenden Wassers gewonnenen Versuchsergebnisse nicht ohne weiteres auf die Bewegungen in stehendem Wasser zu übertragen, wie umgekehrt auch die in ruhendem Wasser erzielten Ergebnisse nicht ohne Vorbehalt auf fließendes Wasser anwendbar sind. Und dieses gilt auch für unsere bisherigen Strömungsphotogramme, da diese die Widerstandserscheinung in einem mit überall gleichförmiger Geschwindigkeit fließenden Strome darstellen, während die gewöhnlichen, natürlichen oder künstlichen Ströme eine solche Gleichförmigkeit nicht aufweisen, sondern je nach den örtlichen Verhältnissen in verschiedenem Grade davon abweichen. Daß dies auch für die Strömungen der Luft zutreffend ist, folgt aus dem allgemein bekannten, ungleichförmigen, böigen Charakter der Winde.

Man könnte die in der oben bezeichneten Weise erhaltenen photographischen Darstellungen der Widerstandsströmungen als solche bezeichnen, wie sie dem Beobachter erscheinen, wenn er selbst, wie etwa an Bord eines Schiffes, mit dem festen Körper über die Wasseroberfläche oder durch dasselbe fortbewegt wird, da er dann den Eindruck hat, wie wenn das Schiff stillstände und das Wasser ihm entgegenströme. Es ist nun aber offenbar von nicht minder großem Interesse, zu erfahren, in welcher Form die Widerstandsströmungen auftreten, wenn sie vom festen Standpunkte des ruhenden Wassers gesehen werden, oder wie sie sich einem am Ufer stehenden Beobachter darstellen.

Ein solches Bild ließe sich aus einer Ansicht der ersten Art prinzipiell ohne besondere Schwierigkeiten rekonstruieren, da nur die Tatsache zu berücksichtigen wäre, daß ein Wasserteilchen, das auf dem Photogramm der ersten Art in Ruhe erscheint, auf dem zweiten Bilde einen Weg gleich der Bewegung  $s$  des Schiffes zurücklegen würde, während ein anderes Teilchen,

welches auf dem Photogramm einen Weg  $s$  nach hinten beschreibt, auf dem neuen Bilde in Ruhe sein müßte usw. So ließe sich die Bahn jedes Wasserteilchens im neuen Bilde nach dem Parallelogramm der Bewegungen einwandfrei ermitteln. Aber die Arbeit würde doch eine äußerst mühsame sein, und es liegt daher viel näher, derartige Ansichten der Widerstandsströmungen durch direkte photographische Aufnahmen mit einer an festem Orte aufgestellten Kamera zu gewinnen.

Zu diesem Zweck wurde ein festes Gerüst über, neben oder unter dem Wasserbehälter hergestellt und daran die Kamera so befestigt, daß sie in richtigem Fokalabstande außerhalb der Bahn des Versuchskörpers stand. Sodann wurde die elektrische Auslösung des Blitzlichtes so eingestellt, daß sie in dem Augenblicke in Funktion trat, wenn der Versuchskörper durch die Mitte des Gesichtsfeldes der Kamera fuhr. Die Bewegungen des Wassers wurden, wie gewöhnlich, durch Bärlappmehl an der Oberfläche, und durch präparierte eichene Sägespäne im Innern der Flüssigkeit sichtbar gemacht.

Schon die ersten Aufnahmen dieser neuen Art, die wir vorerst der Kürze halber mit „B“ bezeichnen wollen, zeigten gegenüber den früheren Aufnahmen „A“ der mitfahrenden Kamera so völlig abweichende und zunächst überraschende Strömungsbilder, daß es für den Fernerstehenden aussichtslos erscheinen mußte, die Übereinstimmung der durch A und B dargestellten Vorgänge nachzuweisen, zumal zwei zu verschiedenen Zeiten, wenn auch mit gleicher Geschwindigkeit, aufgenommene Ansichten A und B wegen der in der Natur der Sache liegenden Stromschwankungen und zufällig anderer Anordnung der sichtbaren Substanzen (Bärlapp usw.) keine genau identischen Vorgänge darstellen.

Um das Letztere zu erreichen, wurden in besonderen Versuchen die Aufnahmen A und B gleichzeitig mit einer feststehenden und einer mitfahrenden Kamera gemacht, wobei beide identische Objektive erhielten und auf die gleiche Entfernung von der Wasseroberfläche eingestellt wurden. Die fahrende Kamera bewegte sich unmittelbar an der stehenden entlang und beide Objektive befanden sich im Moment des Lichtblitzes in einem Abstände von 10—15 cm nebeneinander, bei einer Entfernung von etwa 80 cm von der Wasseroberfläche. Die fahrende Kamera A stand genau über dem Versuchskörper, die stehende B hart daneben, so daß die Einzelheiten der mit B erzielten Photogramme um einen kleinen, auf allen Bildern konstanten Betrag gegen die Ansichten A verschoben erscheinen. Eine genaue Deckung wäre eben nur dann möglich gewesen, wenn die Objektive beider Instrumente

hätten dieselbe Stelle einnehmen können, was natürlich nicht möglich ist. Übrigens ließen sich nun, da in der Längsrichtung keine optischen Verschiebungen eintraten, mit Hilfe des Zirkels unschwer die von demselben Bär-lappflöckchen resp. Wasserteilchen auf beiden Photogrammen beschriebenen Bahnen oder Stromlinien identifizieren.

Hier ist es angebracht, von einer neuen Methode der Geschwindigkeitsmessung durch Funkenphotographie Mitteilung zu machen, die bei diesen Versuchen zuerst in Anwendung gebracht wurde. Die gewöhnliche Art der elektrischen Chronographie hat den Nachteil, daß die Aufzeichnungen der Registriernadeln auf einem Papierstreifband erfolgen und für jeden Versuch eine besondere Buchführung nötig machen. Die durch Ab-messen mittels Millimetermaßstabes gefundene Geschwindigkeit, welche der Wagen im Moment der Aufnahme erreicht hatte, muß dann später neben der Ordnungsnummer auf das photographische Negativ und die herzustellenden Positive überschrieben werden, wobei immerhin Irrtümer vorkommen können.

Es schien daher wünschenswert, eine Methode zu finden, bei welcher die Registrierung womöglich auf der photographischen Platte selbst erfolge und somit im Original auf jedem Strömungsphotogramm erschiene.

Hierzu wurde zunächst am Rande des Gesichtsfeldes der stehenden Kamera, dicht über der Wasseroberfläche, aber ohne Berührung mit dem Wasser, ein scharf geteilter Millimetermaßstab\*) verschiebbar angebracht. Mit dem Maßstab ist der Länge nach ein etwa 1 cm breiter schwarz lackierter oder mit schwarzem Sammetband überzogener Metallstreifen verbunden, der ebenfalls am Rande der Photographie erscheint und den Untergrund für die Funkenregistrierungen abgibt.

Über diesem schwarzen Streifen bewegt sich eine mit dem Wagen starr verbundene Funkenstrecke, in welcher, während sie sich mit dem Wagen fortbewegt, alle Zehntelsekunden ein Flaschenfunken überspringt. Die Bilder dieser Funken zeichnen sich als etwa 1 mm lange Striche neben dem Maßstabe auf der photographischen Platte ab. Ihre Abstände bezeichnen den vom Wagen in einer Zehntelsekunde zurückgelegten Weg und lassen sich an dem Maßstabe im Bilde ohne Mühe ablesen.

Zur Bestimmung des Zeitpunktes, an welchem die Aufnahme erfolgte, ist die den Funken auslösende elektrische Leitung hinter die Zündleitung der

---

\*) Der Maßstab ist am besten aus schwarzem Hartgummi auf Metallunterlage anzufertigen, mit weißen Teilstrichen und Zahlen. Schwarze Teilstriche auf weißem Untergrunde im Bilde verschwinden leicht infolge von Überstrahlung.

Blitzlampen geschaltet, so daß in dem Moment des Durchbrennens der Zünddrähte auch die Funkenbildung unterbrochen wird und aufhört. Als Geschwindigkeit des Wagens und des mit ihm fest verbundenen Versuchsmodells können ohne merklichen Fehler die in den letzten Zehntelsekunden registrierten Funkenabstände angenommen werden.

Der Apparat zur Erzeugung der isochronen Funken besteht aus einem mit zwei Leydener Flaschen verbundenen kleinen Induktor, dessen primärer Strom von einem Akkumulator geliefert wird. Vermittels eines kleinen Nebenschlußmotors mit konstanter Tourenzahl wird dieser Strom im Quecksilberunterbrecher zehn mal in der Sekunde unterbrochen. Die Regulierung auf Zehntelsekunden geschah durch geeignete Übersetzung der Tourenzahl des Motors unter Benutzung des Sekundenkontaktes einer Normaluhr. Die Leitung für den Motor ist, wie bemerkt, in die Zündleitung hinter den Blitzlampen eingeschaltet, unter Einfügung passender Glühlampenwiderstände, um die vorzeitige Entzündung des Blitzpulvers zu verhindern.

Das System der Stromverteilung für den ganzen Apparat ist in Fig. 1 skizziert. Der Ansteckdose  $s_1$  wird durch Zuleitungskabel ein Strom von 108 Volt zugeführt. Von hier gehen zwei Leitungen rechts herum, die eine, innere, mit Regulierwiderständen  $w$   $W$  für den Antriebsmotor  $M$  des Wagens über die Schleifkontakte  $k_1$  und  $k_2$  anschließend an die linksseitige Rückleitung, die andere, äußere, ohne Widerstand für die Zündung der Blitzlampen  $B_1, B_2, B_3$  über  $k_3, k_4, k_5$ . Die Zuleitungsschiene für den Schleifkontakt  $k_3$  erhält den Strom von  $d$  her und kann bei  $u_1$  und  $u_2$  durch federnde Klinken unterbrochen werden, um das Arbeiten der von dieser Leitung zu speisenden Chronographen ( $k_3 a$   $Ch$   $k_2$  und  $k_3 b$   $m$   $k_2$ ) auf kürzere oder längere Fahrstrecken zu begrenzen. Alle Leitungen zwischen  $k_1$  und  $k_3$  rechts und  $k_2, k_4$  und  $k_5$  links sind auf dem Wagen befestigt, der sich auf Schienen über dem 8 m langen Wasserbehälter bewegt. In dem Moment, wo hierbei  $k_5$  den dafür vorgesehenen Bügel der Rückleitungsschiene berührt, geht der volle Strom gleichzeitig durch alle drei Blitzlampen  $B$ , nämlich über  $k_3 B_1$  und  $B_2 c$   $k_5$  und über  $d s_3 B_3 s_3 k_4 c$   $k_5$ ; in den Lampen werden dadurch feine leicht auswechselbare Stahldrähte durchgeschmolzen und damit das Blitzlichtpulver ebenso gleichzeitig entzündet. Die Lampen  $B_1$  und  $B_2$  stehen auf beweglichen Armen seitwärts am Wagen und dienen zur Beleuchtung der Wasseroberfläche. Die große Lampe  $B_3$  kann seitwärts und unter den Wasserkasten gestellt werden und sendet ihr Licht durch Spiegelglasfenster in das Innere des Wassers.

Für die Blitzlampen wurden gewöhnliche Glühlampenverschraubungen

verwendet. Statt der Glasbirne mit dem Kohlefaden ist auf die Fassung ein Messingkasten gelötet und darin sind die Pole der Leitung mit federnden Metallklemmen für den Zünddraht verbunden. Letzterer ist nach Art einer Bleisicherung leicht auszuwechseln und liegt wohl isoliert auf einer Vulkan-

**Stromschaltungen für den Wagenmotor M, die Blitzlampen B, den Nadelchronographen Ch und den Funkenchronographen Acc-Fs.**

Näheres im Text.

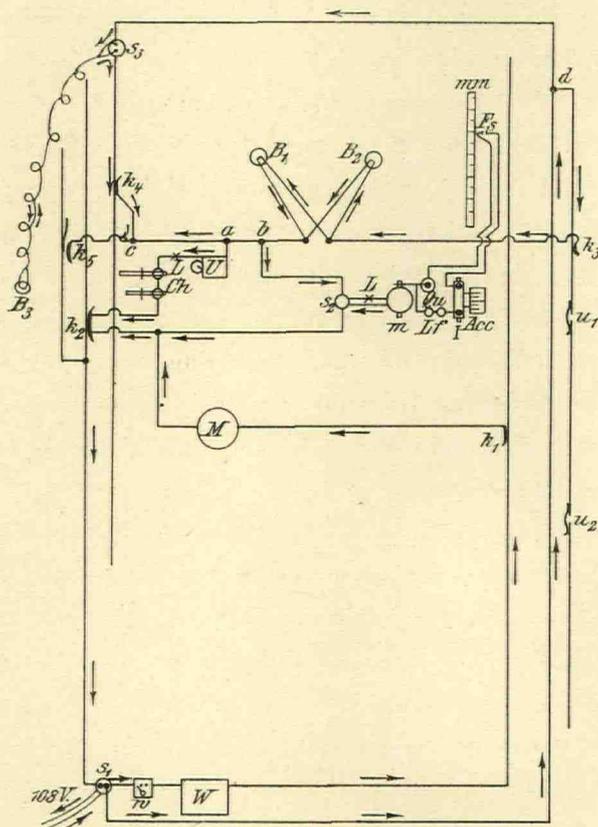


Fig. 1.

fiberplatte dicht unter dem Kastendeckel. Dieser hat in der Mitte eine kleine Öffnung, durch welche der Zünddraht eine kurze Strecke freigelegt ist, so daß er hier mit dem auf dem Deckel ausgebreiteten Blitzpulver in Berührung kommt und die Zündung bewirken kann. Durch das Einschließen in den gut abgedichteten Kasten wird die Vorrichtung vor Verbrennung und Verstaubung geschützt.

Von der Zündleitung  $k_3 k_5$  ist bei a eine Leitung für den elektromagnetischen Chronographen Ch abgezweigt, die bei  $k_2$  die Rückleitung erreicht. Der Strom wird hier durch den Lampenwiderstand L gedämpft.

Die Unruhe des Uhrwerks  $U$  schwingt im Viertelsekundentakt und trägt an ihrer Achse eine ebenso pendelnde Metallzunge, deren Platinaspitze durch einen unter Öl stehenden Quecksilbertropfen schlägt, so daß jede Viertelsekunde ein Stromstoß durch die Zunge und den Quecksilbertropfen dem Elektromagneten des Chronographen zugeführt wird. Ebensooft wird der Anker angezogen und dadurch die Registriernadel in das darunterliegende Papierband eingestoßen. Je schneller der Wagen fährt, desto weiter liegen die Stiche auseinander: ihr Abstand bezeichnet den in jeder Viertelsekunde vom Wagen zurückgelegten Weg.

Die Leitung für den Funkenchronographen zweigt bei  $b$  von der Zündleitung ab und geht über die Ansteckdose  $s_2$  zum Rückleiter  $k_2$ . Von  $s_2$  geht der Strom über den Lampenwiderstand  $L$  zum Motor  $m$  und zurück. Der Akkumulator  $Acc$  liefert den Primärstrom für den Induktor  $I$ . Der Sekundärstrom geht durch die Leydener Flaschen  $Lf$  und wird vermittels des Motors  $m$  im Quecksilberunterbrecher  $Qu$  alle Zehntelsekunden unterbrochen, so daß in demselben Rhythmus die Funkenbildung erfolgt. Die Zuleitungen zur Funkenstrecke  $Fs$  sind der hohen Spannung wegen in Glasröhren eingeschlossen; nur die geschwärtzten Enden der Drähte sind frei und so nahe gegen den Maßstab  $mm$  gebogen, daß sie noch mit im Gesichtsfelde der Kamera liegen, während die übrige Leitung außerhalb bleibt. Da die Aufnahmen im abgedunkelten Raume bei geöffneter Kamera erfolgen, so geht eine photographische Wirkung zunächst nur von den Funken aus, die sich nachher als eine Reihe gleichförmiger kurzer Querlinien auf der Platte darstellen. Alle anderen Einzelheiten des Gesichtsfeldes werden erst durch das Blitzlicht auf die Platte gebracht. Die Drahtenden der Funkenstrecke erzeugen dabei infolge ihrer fortschreitenden Bewegung in der ruhenden Kamera ein verwischtes, aber deutlich sichtbares Bild in Form einiger feinen Linien hinter dem letzten Funkenbilde, woran man mit Sicherheit erkennen kann, daß mit dem Durchbrennen des Zünddrahtes und noch vor der wirksamen Lichtentwicklung der Motor  $m$  zur Ruhe gekommen und die Funkenbildung unterbrochen worden ist. Die photographische Wirkung des Blitzlichtes beginnt in der auf den letzten Funken folgenden Zehntelsekunde und dauert bei dieser Anordnung etwa ein Zehntel bis ein Sechzehntel Sekunde.

Sollen die Funkenregistrierungen in der mitfahrenden statt in der stehenden Kamera erfolgen, so muß natürlich die Funkenstrecke unbeweglich stehen, der Maßstab aber mit dem Wagen fest verbunden werden, so daß er sich im Gesichtsfelde nicht verschiebt.

Modelle der Widerstandsströmungen.

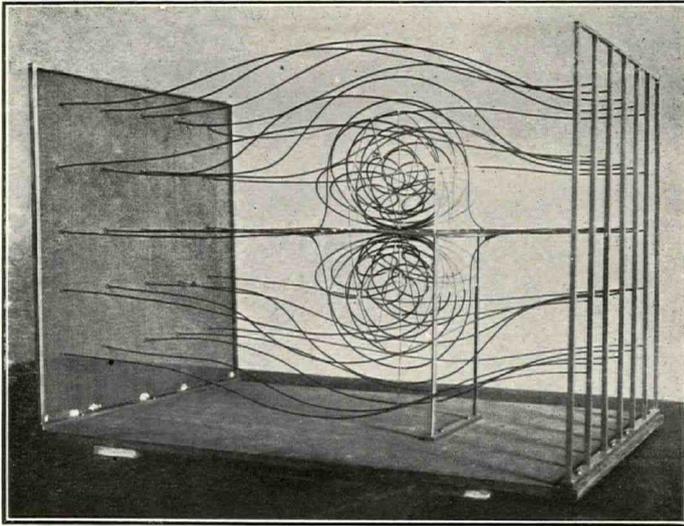


Fig. 1. Quadratische Platte in der Normalstellung.

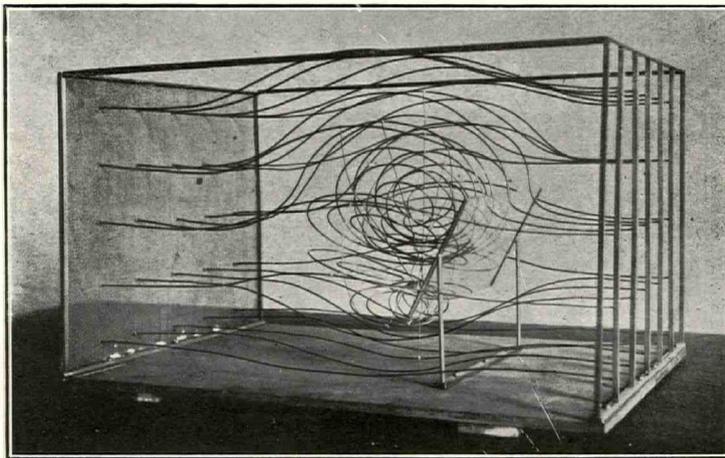


Fig. 2. Rechteckige Platte bei 60° Neigung.

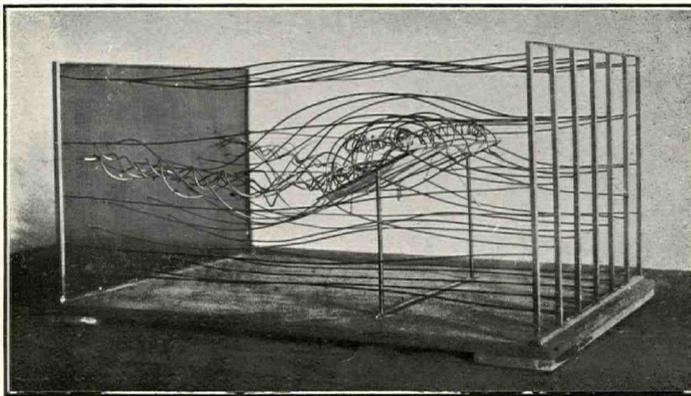


Fig. 3. Rechteckige Platte bei 30° Neigung.



Für das Studium der Vorgänge im Innern des Wassers wurden größtenteils stereoskopische Aufnahmen hergestellt, wogegen die Strömungen im Wasserspiegel der größeren Übersicht wegen von oben her meist mit einem Objektiv festgelegt wurden.

Bei völlig untergetauchten Körpern kann man durch Änderung der Stellung des Modells jede beliebige Seitenansicht der Strömungen erhalten und so in den Stereoskopen die räumliche Anordnung der Vorgänge mit voller Klarheit überblicken. Ansichten in der Fahrriichtung hätten sich wenigstens von vorn her wohl gewinnen lassen, waren aber nicht erforderlich, da die seitlichen Aufnahmen nichts zu wünschen übrig ließen.

Nur bei eingetauchten Versuchskörpern ergaben sich erhebliche Schwierigkeiten bei der Feststellung der Vorgänge in den Bugwellen, die von oben her nicht zu durchschauen waren. Um aber von der Seite her das Innere der Welle auf die Platte zu bekommen, mußte die Kamera tiefer als das Niveau gestellt werden. Dann aber reflektierte die Oberfläche der Bugwelle das Licht so stark, daß sie als weißer Hintergrund die Bahnen der beleuchteten Schwkörper unsichtbar werden ließ. Auch bei günstigster Stellung der Kamera und der Lichtquellen blieben die Einzelheiten der turbulenten Bewegungen in der Kuppe der Welle verdeckt. Durch Anwendung von Glasplatten als Versuchskörper, Durchleuchtung des Stauhügels von hinten her und Photographie in der Fahrriichtung wurden auch diese Schwierigkeiten überwunden.

Mit Hilfe des so gewonnenen Materials war es möglich, den verwickelten Strömungskomplex an plattenförmigen Versuchskörpern klarzulegen und durch Modelle darzustellen, wobei die Stromlinien, in bestimmten Abständen genommen, durch Kupferdrähte veranschaulicht wurden, die nach Maßgabe der Photogramme in die richtige Form gebogen wurden. (Taf. 1.)

Diese Methode ist natürlich auch für jede andere Art von Versuchskörpern, wie Schiffsmodelle, anwendbar, bleibt aber immer schematisch und kann wegen der schwer darstellbaren Einzelheiten die unmittelbare Beobachtung im Stereogramm nicht voll ersetzen. Ich habe daher, auch um Zeit zu sparen, bis jetzt davon abgesehen, die Schiffsströmungen in Stromlinienmodellen zur Darstellung zu bringen.

Die Arbeiten wurden in einem besonderen Laboratorium ausgeführt, dessen Einrichtung und Unterhaltung ich der Munifizienz der Direktion der Hamburg-Amerika Linie und besonders dem überaus freundlichen und bereitwilligen Entgegenkommen des Herrn Generaldirektor Ballin zu verdanken habe. Bei allen experimentellen Arbeiten wie bei der Kombination

und Ausführung der Apparate hatte ich mich der treuen und unermüdlichen Mitwirkung des Herrn Dr. Max Wagner zu erfreuen; auch ihm sei an dieser Stelle der wohlverdiente, herzliche Dank abgestattet.

## II. Widerstandserscheinungen an Platten.

Durch die Photographie der Strömungen an tief untergetauchten, normal zum Strome stehenden Platten wurde schon früher von mir festgestellt, daß die Vorgänge bei kreisförmiger oder quadratischer Plattenform einen, wie zu erwarten, völlig symmetrischen Verlauf nehmen. Der auftreffende Strom teilt sich über der Plattenmitte und bildet, indem er über die Ränder weiterfließt, einen ellipsoidischen Glockenstrom, in dessen Innerem ein Wirbelring von der bekannten Form rotiert.

Während die Strömungen an der Vorderseite der Platte immer dieselbe stationäre Erscheinung darbieten, zeigen sich hinter der Platte gewisse unregelmäßige, pulsatorische Schwankungen, die dem Wirbelring einen labilen Charakter verleihen und in denen wir die Ursachen der stets auftretenden Schwankungen der dynamometrischen Widerstandsgröße zu erblicken haben. Sie äußern sich in nicht unbeträchtlichen seitlichen Abweichungen des Nachlaufs (Fig. 1 Taf. II), sowie darin, daß der Wirbelring in der Richtung der Achse des ganzen Systems bald verlängert, bald verkürzt wird, so daß die Stromlinien bald in Form von Ellipsen, bald mehr als Kreise erscheinen. Die Vergrößerung des Wirbels kommt dadurch zustande, daß von hinten her durch den Nachlauf größere Wassermengen in die Wirbelung hineingesogen werden; die Verkürzung dadurch, daß von außen her ringsum eine schnell tiefer werdende Einschnürung auftritt, welche kleinere oder größere Teile des Wirbelringes abschnürt und in zyklodischen Bahnen nach hinten aus dem Soggebiete der Platte entweichen läßt. Zuweilen entstehen auch gleichzeitig mehrere flache Einschnürungen, und der Wirbelring erhält dadurch die Tendenz, in mehrere sekundäre Teilwirbel zu zerfallen. Die äußeren Stromlinien des Ringes nehmen dann nicht den glatten, schematischen Verlauf, sondern gestalten sich zum Teil nach Art von Epizykloiden.

Aus diesem Verhalten wird ersichtlich, warum die Wirbelung bei kleinen Platten so viel glatter und regelmäßiger verläuft, als bei größeren. Bei den kleinen genügt offenbar die Klebrigkeit oder Viskosität des Wassers, um die ganze äußere Hälfte des Wirbelringes ohne Kontinuitätsstörung durch den

Gleichzeitige Aufnahmen der Widerstandserscheinungen im Wasserspiegel an einer querstehenden Platte. Breite 10 cm, Fahrt  $v = 34$  cm-Sec.

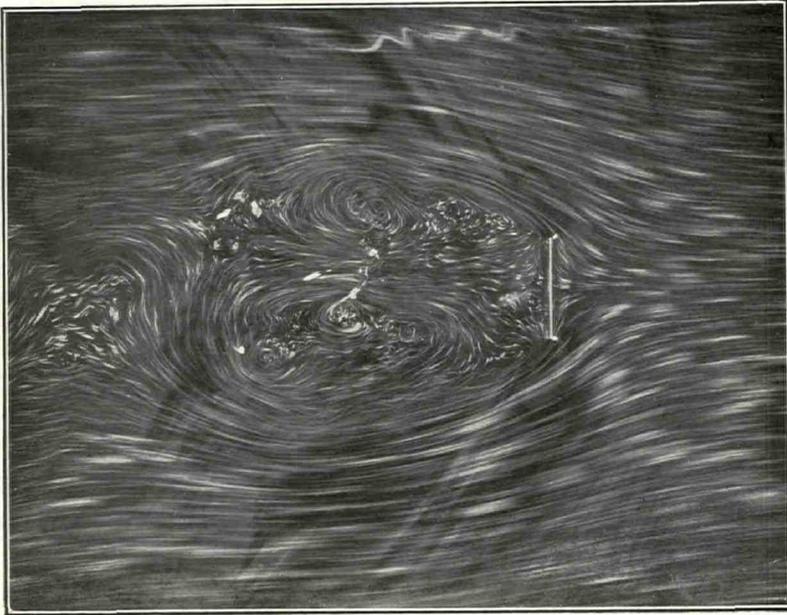


Fig. 1. Kamera mitfahrend: Stromlinien.

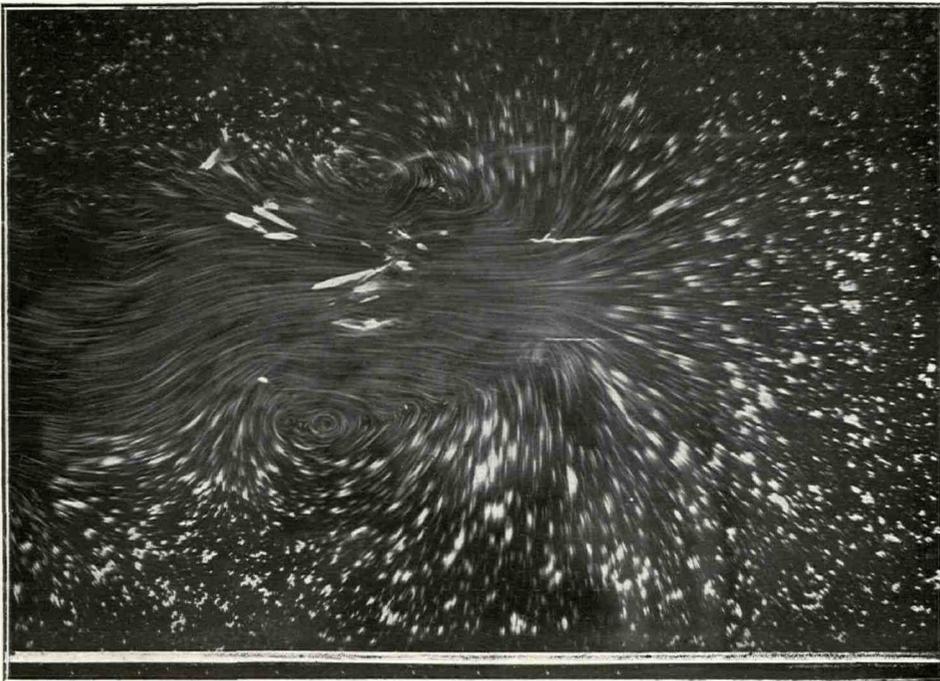


Fig. 2. Kamera am Ort feststehend: Kraftlinien.



daran entlang fließenden Glockenstrom mitziehen zu lassen, während bei größeren Platten dies nur innerhalb einer entsprechend dicken Grenzschicht möglich ist, deren Tiefe von dem Grade der Viskosität und der Geschwindigkeit des Hauptstromes abhängt. So entsteht dann hinter den Rändern großer Platten die lange Kette fortlaufender Wirbel, die zwar nicht wie bei dem hypothetischen, vollkommenen Medium der hydrodynamischen Theorie unendlich an Zahl und unendlich klein sind, aber doch nur einen geringen, beschleunigenden Einfluß auf die breite Masse des Nachlaufs ausüben, so daß dieser als sogenanntes „totes Wasser“ hinter der Plattenmitte bei geringer Fahrgeschwindigkeit kaum noch Andeutungen von der Strömung des großen Wirbelringes erkennen läßt. Immerhin bleibt auch bei großen Platten die Gesamtbewegung des Wassers an der Rückseite die eines großen Wirbelringes, der mit zunehmender Stromgeschwindigkeit immer deutlicher hervortritt.

Die früher mitgeteilten Photogramme der Strömungen an eingetauchten und untergetauchten Platten in der Normalstellung zur Fahrtrichtung sind neuerdings durch weitere stereoskopische Aufnahmen dieser Vorgänge bei mitfahrender Kamera ergänzt worden. Nach den Stereoskopen habe ich für eine quadratische Platte von 100 mm ein Modell der Stromlinien aus Kupferdraht hergestellt, wie es in Fig. 1 Taf. I abgebildet ist.

Die mit stehender Kamera gewonnenen Photogramme geben eine Ansicht der gleichen Vorgänge von einem festen Punkte außerhalb, wobei die Konturen der vorüberziehenden Platte, entsprechend der Fahrgeschwindigkeit, im Bilde verwischt erscheinen, da jeder Punkt derselben während des Blitzlichtmomentes einen bestimmten Weg zurückgelegt hat. Von dieser Art ist Fig. 2 Taf. II. Sie veranschaulicht die Bewegungen, welche eine vorüberfahrende, eintauchende Glasplatte im ruhenden Wasser am Niveau hervorruft. Die Platte selbst ist nicht sichtbar, nur der Weg, den ihre oberen Ecken während des Lichtblitzes zurückgelegt haben, ist an zwei parallel laufenden Lichtreflexen leicht im Bilde aufzufinden. Wie das Wasser aus der Bahn der Platte verdrängt wird, sieht man an den strahligen Linien, die den ganzen Raum vor und seitwärts der Bahn erfüllen. An der nach außen abnehmenden Länge der Linien sieht man, wie die Wasserteilchen bei dem Herannahen der Platte immer stärker beschleunigt werden. Hinter der Platte wenden sich die seitlichen Strahlen nach hinten und umfließen jederseits einen kräftigen Wirbel, den ersten einer langen Kette nachfolgender Wirbel, die den breiten,

der Platte nachfließenden Nachstrom\*) gegen das umgebende Wasser abgrenzen. Die Geschwindigkeit des Nachstromes nimmt in der Richtung gegen die Platte zu, wird in einem bestimmten Abstände von ihr gleich der Fahrgeschwindigkeit und dann infolge der Wirkung des Wirbelringes größer als dieselbe. Dieser letzte Teil des Nachstromes ist identisch mit dem auf die Rückseite der Tafel stoßenden „Nachlauf“ im Stromlinienbild.

Am unteren Rande des Lichtbildes befindet sich die Funkenschrift der Fahrgeschwindigkeit (34 cm). Die feine Millimeterteilung des Maßstabes, unter dem sich die  $\frac{1}{10}$  Sekundenfunken abgebildet haben, ist in der Reproduktion nicht darstellbar, da hier ein weißer Maßstab mit schwarzer Teilung benutzt wurde.

Gleichzeitig und durch denselben Lichtblitz wie Fig. 2 wurde vermittels einer über dem Plattenmodell am Wagen befestigten, mitfahrenden Kamera das Stromlinienbild Fig. 1 Taf. II aufgenommen. Diese zweite Kamera war mit einem identischen Stereo-Objektiv ausgerüstet und im gleichen Bildabstände wie die feststehende Kamera so angebracht, daß sie unmittelbar neben dieser vorüberfuhr.

Die elektrische Lichtzündung wurde hierbei so eingestellt, daß sie automatisch in dem Moment erfolgte, wo beide Kameras genau nebeneinander waren. Die beiden Photogramme stellen somit im gleichen Maßstabe einen und denselben Widerstandsvorgang dar, der aber das eine Mal als Strömung um eine ruhende Platte, das andere Mal als Bewegung im stehenden Wasser erscheint. Die Unterschiede beider Ansichten sind so außerordentlich große und die Identität des dargestellten Gegenstandes auf den ersten Blick so unwahrscheinlich, daß eine nähere Erklärung notwendig ist. Eine Ähnlichkeit besteht nur darin, daß auf beiden Bildern ein großes Wirbelpaar vorhanden ist, aber die Wirbel decken sich nicht, denn das eine Paar liegt ganz seitwärts, das andere dicht hinter der Platte. Alle anderen Strömungen zeigen kaum eine Spur von Übereinstimmung, oft scheinen sie geradezu entgegengesetzt zu sein. Dennoch würde man das zweite Bild aus dem ersten rekonstruieren können, wenn man die Stromlinien nach dem Parallelogramm der Bewegungen mit einer Komponente zusammenfaßte, die gleich und entgegengesetzt dem von der Platte während des Blitzmomentes zurückgelegten Wege ist. Würde man

\*) Das hier zuerst gebrauchte Wort „Nachstrom“ entspricht dem englischen „wake“. (Vergl. Anmerk. Seite 80 im VI. Band d. Jahrb.) Ich möchte diesem Worte gegenüber dem sonst bei uns gebräuchlichen „Vorstrom“ den Vorzug geben, da dies soviel wie „vorwärts fließender Strom“ bedeutet, was auch, wie Fig. 2 Taf. II zeigt, für das Wasser vor der Platte resp. dem Schiff zutreffen würde.

System der Kraftlinien an einer untergetauchten, normal zur Fläche fortbewegten Platte. Im Stereoskop zu betrachten.

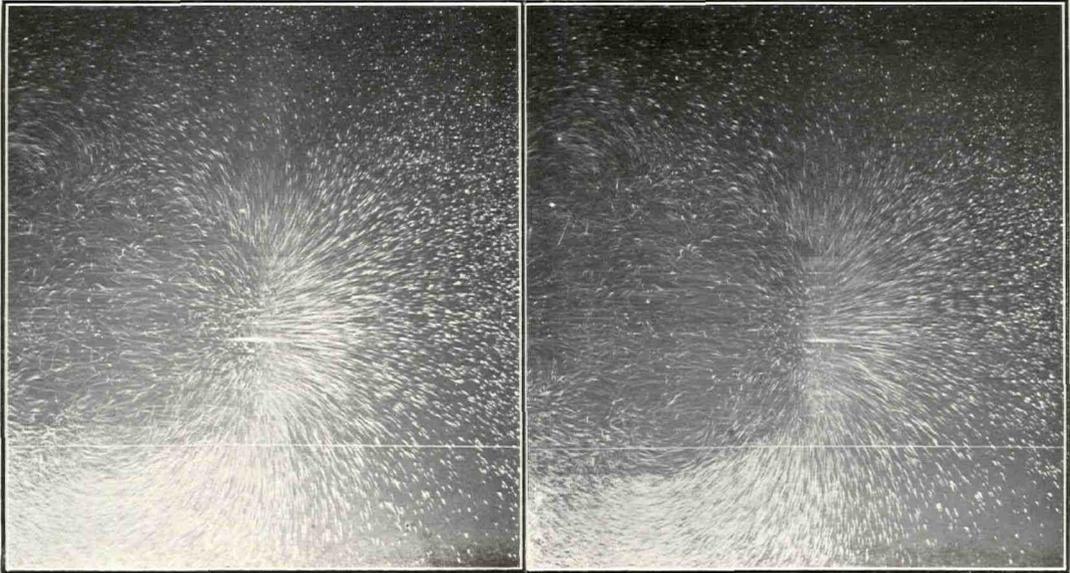


Fig. 1. Kraftlinien an der Vorderseite der Platte.

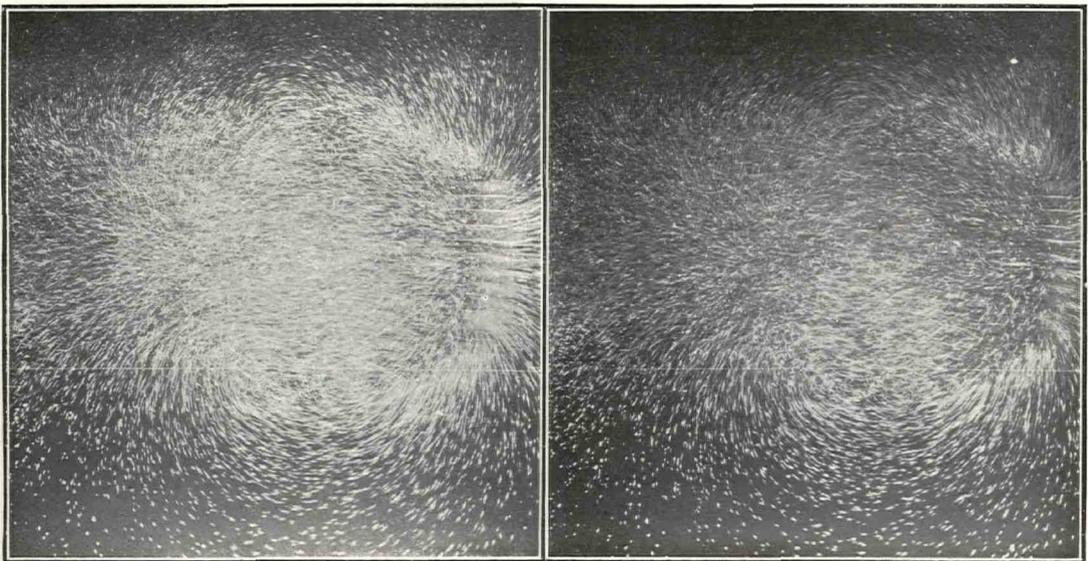
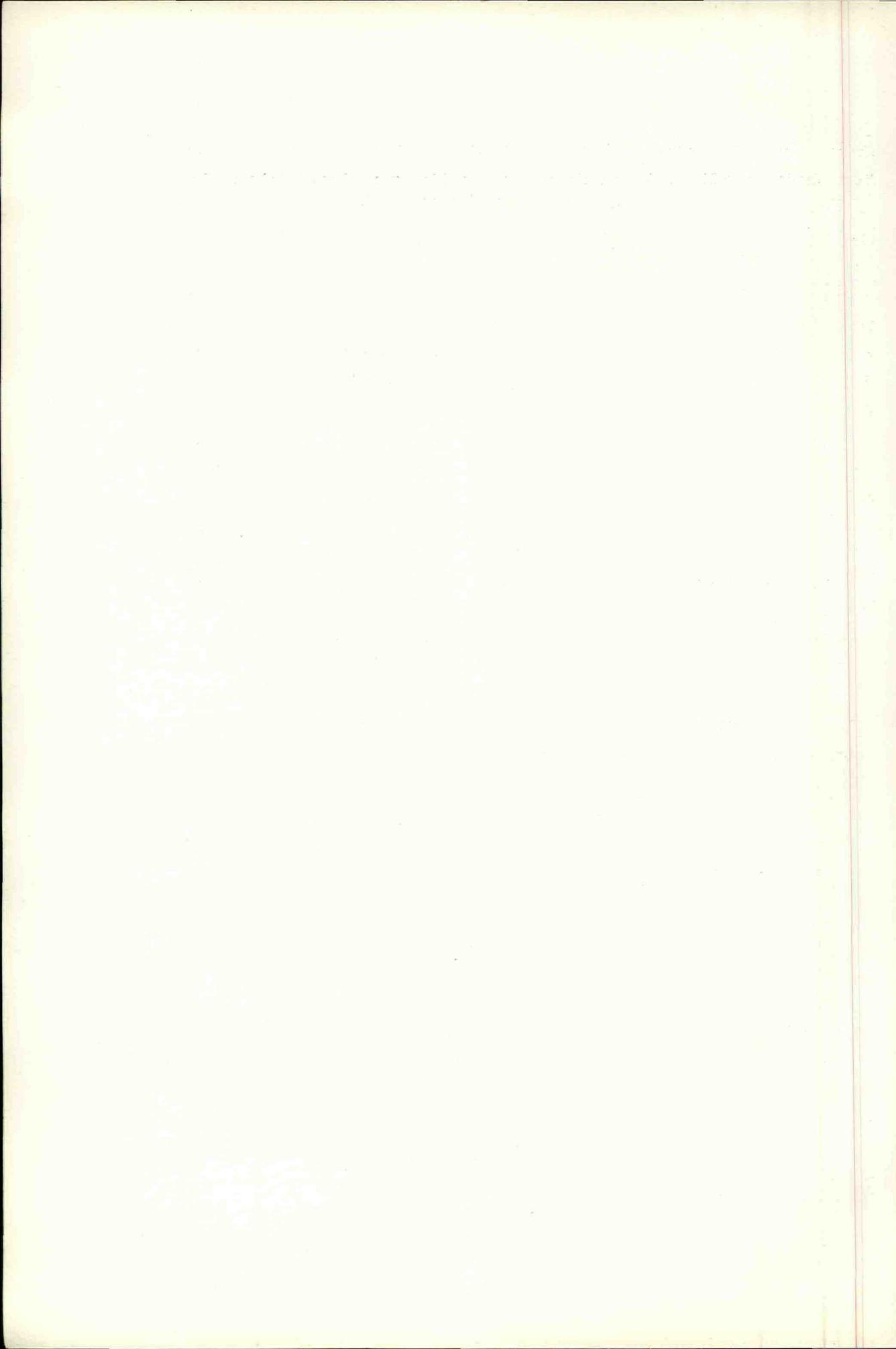


Fig. 2. Kraftlinien an der Rückseite der Platte. Die Platte selbst ist unsichtbar, ihre Bahn ist an den weißen Parallellinien im Bilde zu erkennen.



ebenso mit dem unteren Bilde verfahren, aber die der Fahrt entsprechende Komponente in gleicher Richtung wie diese mit den Kraftlinien kombinieren, so würde sich das obere Bild ergeben. Aus diesem gegenseitigen Verhältnis ergibt sich z. B., daß die ruhenden Pünktchen, die auf der oberen Abbildung die Lage des Druckmaximums (Insel) am Anfang des Nachlaufs hinter dem Wirbel bezeichnen, auf dem unteren Photogramm in ebenso lange Stromlinien ausgezogen sein müssen, wie die sichtbaren Ecken der Platte, da sie die gleiche Geschwindigkeit wie diese haben. Dasselbe gilt von den Wirbelmitten in beiden Bildern und es erklärt sich dadurch die überraschende Verschiebung der beiden Wirbelpaare.

Der Widerstandsbereich erstreckt sich vorwärts und seitwärts von der Versuchsplatte, wie auf den im größeren Format gehaltenen Originalaufnahmen zu erkennen ist, bis auf eine Entfernung gleich der fünffachen Tafelbreite und variiert natürlich mit der Fahrgeschwindigkeit.

Über die Vorgänge an untergetauchten Platten habe ich bereits im VI. Jahrg. d. Jahrbuches S. 70 Fig. 3 eine stereoskopische Aufnahme veröffentlicht, die den von der Platte mitgeführten Wirbelring und den anhängenden Teil des Nachstromes wiedergibt. Ich füge hier die Abbildungen Tafel III hinzu, die mit stehender Kamera erzeugt sind und somit der Fig. 2 Taf. II von der nur eingetauchten Platte entsprechen. Die Stelle der Platte ist im Bilde an den geraden Linien zu erkennen, die von einer auf der Platte angebrachten Zentimeterteilung herrührt. Die eine Abbildung gibt mehr die Vorgänge an der Vorderseite, die andere die hinter der Platte. Der Wirkungsbereich und die Art, wie das ruhende Medium in der Umgebung der Platte in Bewegung gesetzt wird, ist auf beiden Photogrammen im Stereoskop sehr klar zu übersehen. Die Erscheinungen haben eine große Ähnlichkeit mit den bekannten magnetischen Kraftlinien und können auch hier als Kraftlinien angesprochen werden, da sie tatsächlich die Richtungen angeben, auf denen die von der bewegten Platte auf das Medium übertragenen Kräfte zur Wirkung kommen.

Bei eintauchenden Platten stimmen die Widerstandsströmungen im Prinzip mit denen an untergetauchten Platten überein, doch bildet sich infolge des Überdruckes an der Vorderseite und des Minderdruckes an der Rückseite der Platte ein stationäres dynamisches Niveau, das gemäß den vorhandenen Druckdifferenzen eine erhebliche Verschiedenheit vom statischen Niveau haben kann. Die Abweichungen sind, wie ich früher näher gezeigt habe, naturgemäß an ihrem Ursprünge am größten, nämlich an der Platte selbst, wo sie

sich in Form einer vorderen, positiven und einer hinteren, negativen Staulinie automatisch abbilden lassen und so eine treffliche Darstellung der in der Nähe des ursprünglichen Nullniveaus vorhandenen stationären dynamischen Druck- und Widerstandsverteilung bilden. Auf Tafel IV Fig. 1 u. 2 habe ich zwei mit nahezu gleicher Geschwindigkeit gefahrene Versuche zusammengestellt, um ein stereoskopisches Bild der Stauungen an zwei Platten von ungleicher Breite zu geben.

Bei Platten oder anderen prismatischen Körpern, die nur wenig eingetaucht sind oder mit großer Geschwindigkeit durch das Wasser bewegt resp. von einem schnellen Strome getroffen werden, kann die negative Stau- oder Soglinie so weit herabsinken, daß der ganze Raum hinter der Platte mit Luft erfüllt wird und der nach unten und seitwärts ausbiegende Glockenstrom vom Plattenrande her frei zutage liegt. Ähnliche Höhlungen, wie sie Fig. 3 Tafel IV darstellt, sind leicht zu beobachten an Bootsriemen oder stehenden Drähten, Tauen und dergl., die von fahrenden Schiffen durch das Wasser gezogen werden. Auch an den Flügeln nicht genügend untergetauchter Schiffsschrauben sind sie als einfachste Form einer Kavitation bekannt und werden wegen ihrer ungünstigen Wirkung auf den Schraubenschub möglichst vermieden.

Meine früheren Mitteilungen über die Vorgänge an eingetauchten Platten gründeten sich hauptsächlich auf Beobachtungen der Oberflächenströmungen

**Längsschnitt durch die Widerstandsströmung an einer eingetauchten Platte.**

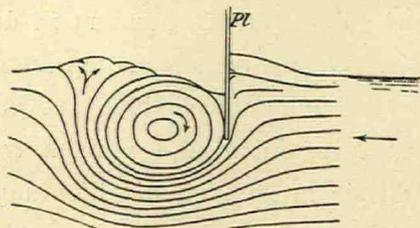


Fig. 2.

bei geringeren Fahrgeschwindigkeiten. Das dynamische Niveau bildet dann eine verhältnismäßig ruhige und glatte, überall geschlossene Fläche (Fig. 2). Steigert man nun die Geschwindigkeit, so nehmen die Strömungen einen immer unruhigeren Charakter an, bis endlich das Niveau durch die empor-schießenden Wassermassen vor und hinter der Platte aufgerissen wird und über den steilen Niveauhängen brandende, sich überschlagende Kämme ent-

## Stauungserscheinungen an Glasplatten. Stereoskopbilder.

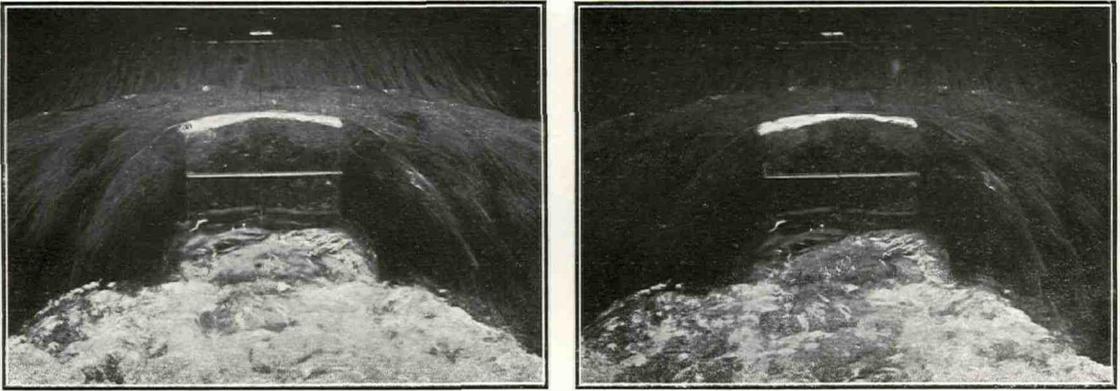


Fig. 1. Platte  $10 \times 20$  cm; ursprüngliche Tauchtiefe 10 cm, bis zur weißen Linie.  
 Fahrgeschwindigkeit  $v = 89,6$  cm.

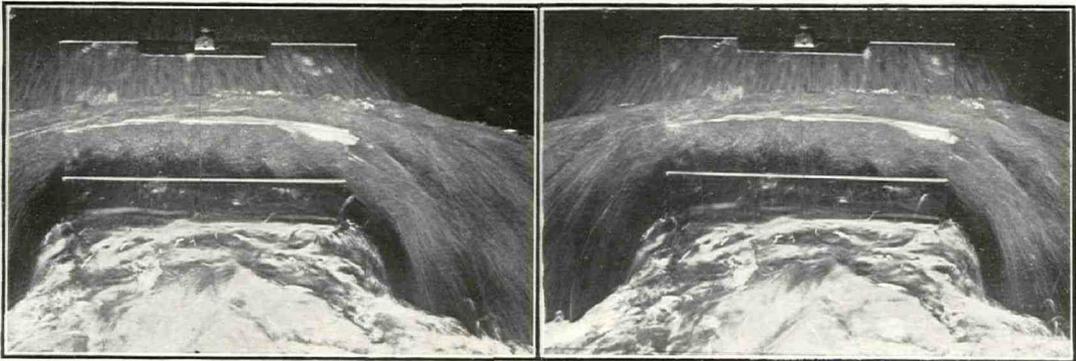


Fig. 2. Platte  $20 \times 15$  cm; Tauchtiefe 5 cm; Geschwindigkeit  $v = 90,0$  cm.

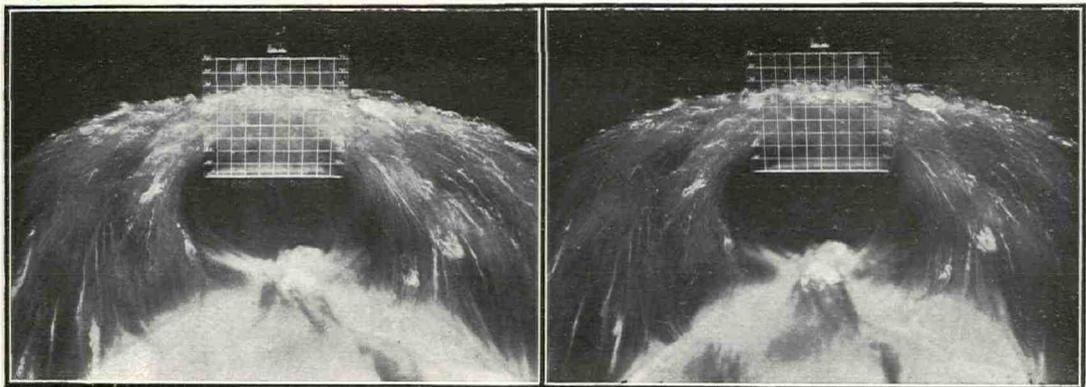
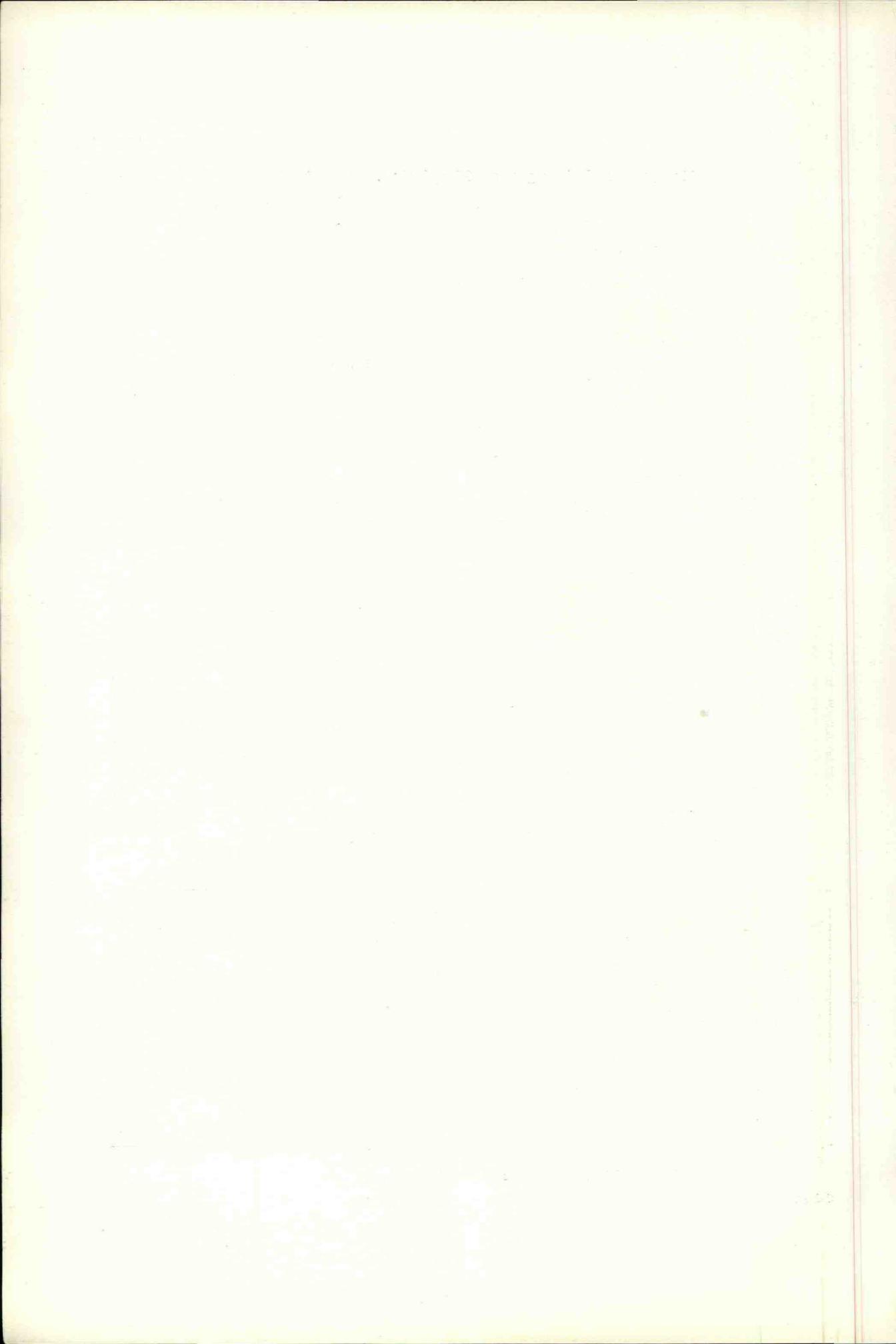


Fig. 3. Platte  $10 \times 10$  cm; Tauchtiefe 2 cm;  $v = 107$  cm.



stehen, welche die eingehüllten Luftteile mit sich führen und den Stau und Nachlauf weiß und schäumend erscheinen lassen.

Es ist einleuchtend, daß mit dem Aufbruch des Niveaus und dem Eintreten der Luft in die Strömung des Wassers eine nicht unwesentliche Änderung der Verhältnisse gegeben ist, da die eingeschlossenen Luftblasen durch ihren Auftrieb jedenfalls eine Störung des normalen Stromverlaufs verursachen. Ob aber diese Störung einen bemerkbaren Einfluß auf die Größe des Widerstandes ausübt, ist zweifelhaft. Die mir bekannten Widerstandsmessungen geben darüber keinen Aufschluß, da der Einfluß vermutlich innerhalb der Fehlergrenze der Beobachtungen liegt. Nur sehr feine und schwierige Messungen könnten eine auf den Durchbruch des Niveaus zurückzuführende Unstetigkeit der Widerstandskurve festlegen, denn da der Auftrieb nach oben gerichtet ist, ergibt er jedenfalls direkt keine horizontale Komponente, durch welche die Größe des Widerstandes einer senkrecht stehenden Platte beeinflusst werden könnte.

Die äußere Erscheinung der schäumenden Strömung an eingetauchten Platten ist neuerdings durch eine Anzahl schöner Photogramme dargestellt worden, die Herr Ing. Fr. Gebers im „Schiffbau“, Jahrg. IX No. 12 u. 13 veröffentlicht hat. Für die photographische Analyse blieben danach besonders die Vorgänge im Innern des Stauhügels und des Nachlaufs von Interesse. Durch eine größere Zahl von seitlichen Unterwasseraufnahmen mit der optischen Achse dicht unter dem Wasserspiegel, sowie durch Ansichten des Staues von hinten oben durch die freiliegende Staufläche der Glasplatten gelang es, den Gang der Bewegungen in allen Teilen sichtbar zu machen. Taf. V veranschaulicht die Strömungen vor der Platte in seitlichen Ansichten bei mitfahrender Kamera und seitlicher Beleuchtung. In Fig. 2 ist die Platte überströmt und der über den nicht sichtbaren Oberrand stürzende Strom ist hinter der Platte zu erkennen. Taf. VI zeigt in Fig. 1 den Halbwirbel hinter der Platte und in Fig. 2 die Vorgänge im ruhenden Wasser.

Die Stromteilung in den auf die Vorderseite der Platte treffenden Wassermassen erfolgt in seitlicher Richtung, bei rechtwinkliger Plattenstellung, wie zu erwarten in der vertikalen Symmetrielinie. Fig. 4, PT. Auf dieser Linie liegt der Teilpunkt T, von dem aus die Wasserteilchen nach oben und unten auseinanderweichen, in der Höhe des statischen Wasserspiegels, also am oberen Rande der anfänglichen Tauchtiefe.

An seitlichen Ansichten der Strömungen (Taf. V) kann man von dem Teilungspunkte aus unschwer die mittlere Stromlinie nach vorn verfolgen,

welche die untere Grenze der an der Bildung des Staukörpers beteiligten oberflächlichen Wasserschicht bezeichnet.

Diese mittlere Stromlinie  $m$  (Fig. 3) verläuft aus ihrer ursprünglich horizontalen Richtung in einem flach ansteigenden parabelähnlichen Bogen gegen die Platte. Die über ihr liegende Wasserschicht wird an der Plattenfläche derart

**Stauungsvorgänge vor einer eingetauchten Platte, a bei kleiner, b bei mittlerer, c bei großer Fahrgeschwindigkeit.**

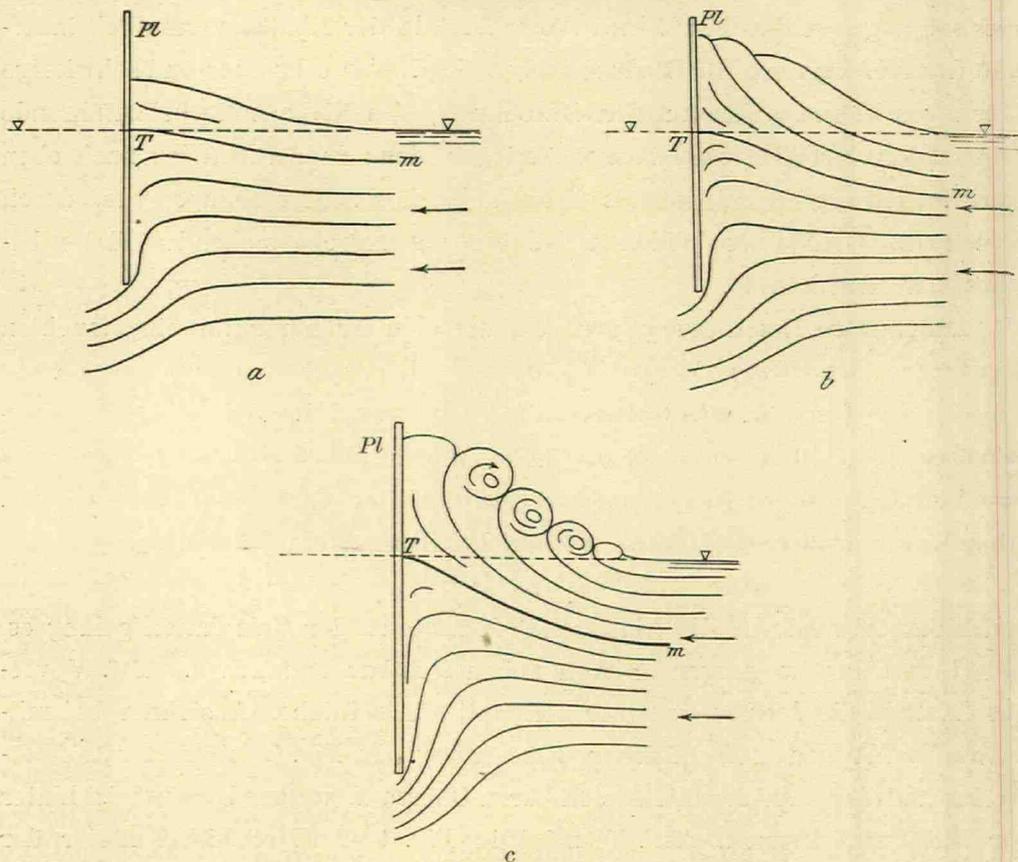


Fig. 3.

gestaut und gepreßt, daß sie in dem Raume über der statischen Niveaulinie vom Teilungspunkte aus pinselförmig auseinanderweicht. Dabei bewegen sich in großer Fahrt die der Strommitte benachbarten Wasserteile vom Teilungspunkte aus dicht über die Plattenoberfläche bis zur äußeren Grenze des Stauhügels, die nächstfolgenden stoßen gegen diese Schicht und erreichen somit nicht ganz die Platte und den Gipfel des Staus u. s. f., bis endlich die oberste Schicht schon am Fuße des Hügels aufgehalten und abgelenkt wird.

Seitenansichten der Strömungen an der Vorderseite eingetauchter Platten.  
Stereoskopbilder.

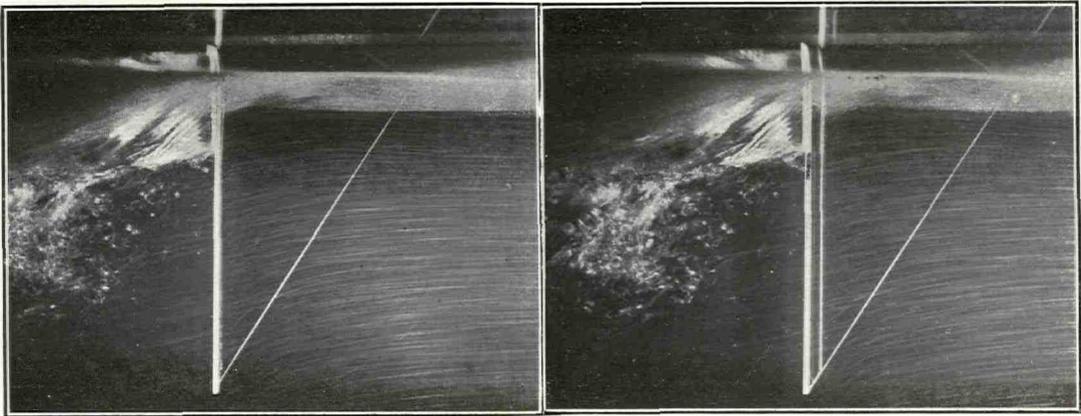


Fig. 1. Platte  $30 \times 10$  cm; Tauchtiefe 20 cm;  $v = 92$  cm.

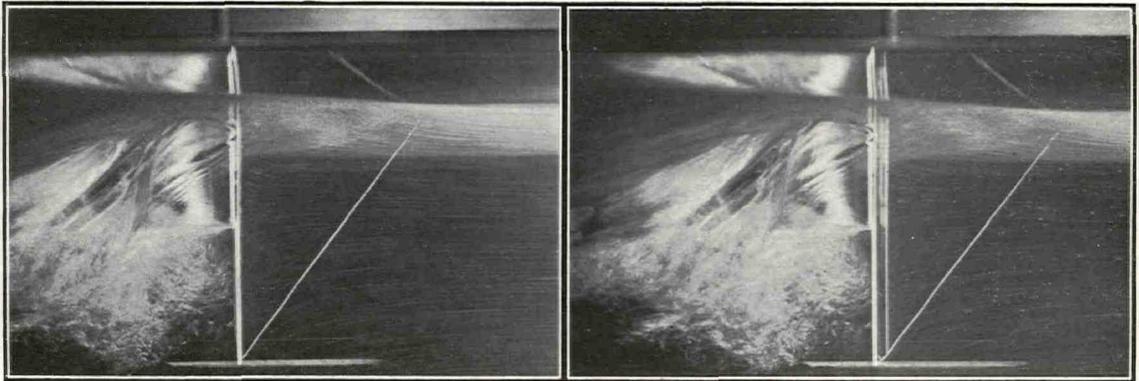


Fig. 2. Platte  $18 \times 10$  cm; Tauchtiefe 15 cm; überströmt.

Seitenansicht der Strömungen an der Rückseite eingetauchter Platten.  
Stereoskopbilder.

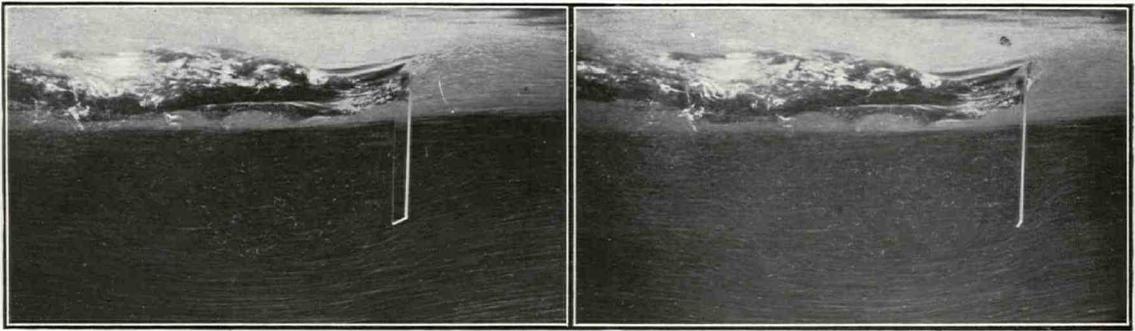


Fig. 1. Stromlinien.

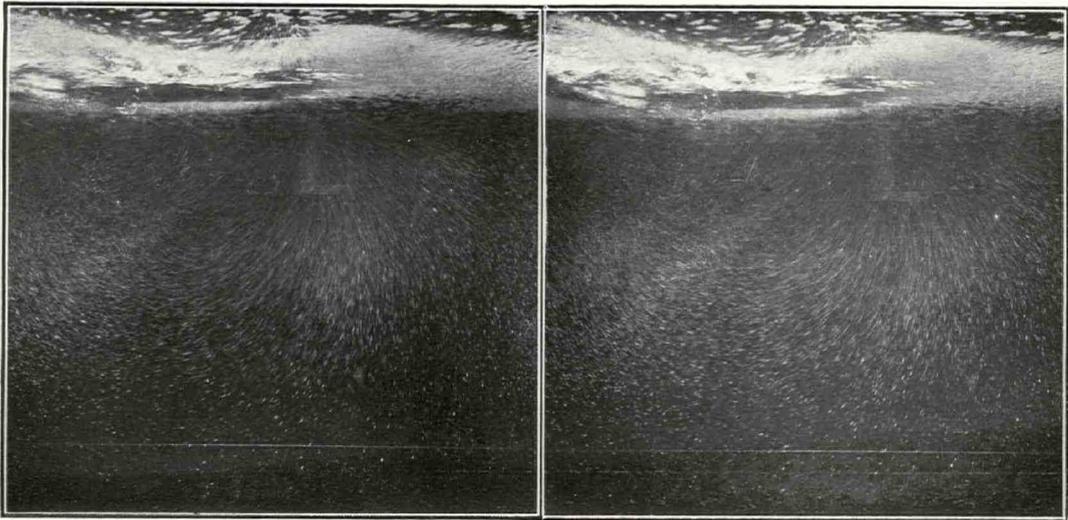
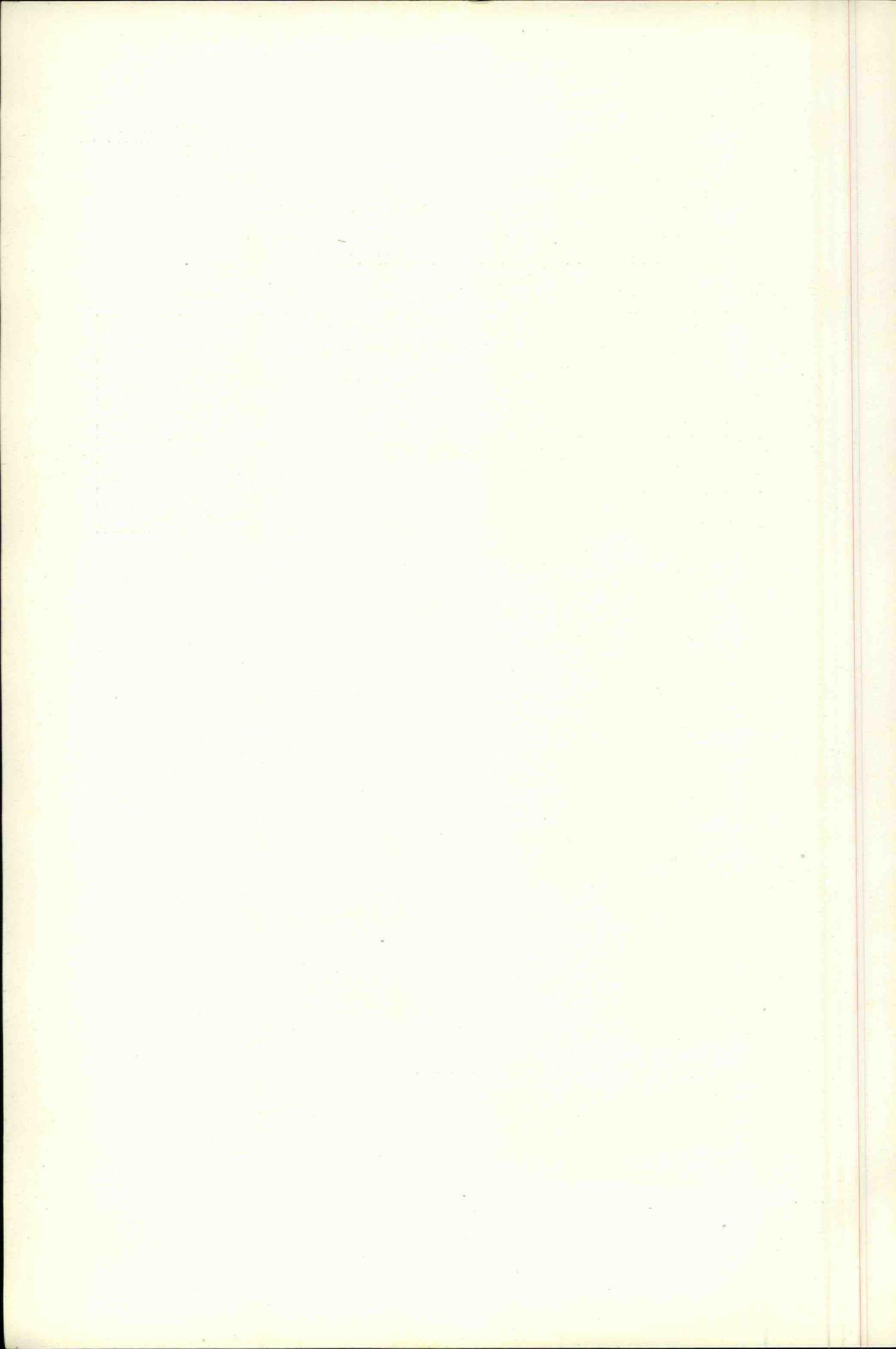


Fig. 2. Kraftlinien.



(Fig. 3 c.) So quellen bei gesteigerter Fahrgeschwindigkeit die tieferen Wasserschichten nacheinander an der Oberfläche des Stauhügels hervor, der Hügel bedeckt sich vom Gipfel aus fortschreitend mit unregelmäßigen Wulsten und Höckern, in denen pulsierend die Wasserstränge hervorbrechen; immer steiler und gratartiger gestalten sich die Gebilde, wenn die Fahrt weiter beschleunigt wird, von den Gipfeln der Höcker werden einzelne Tropfen und Fetzen emporgeschleudert, sie fallen auf den Abhang und werden wieder emporgerissen. Dann springen bald die Kämme scharf heraus und ergießen ihr Wasser wie brechende Wellen über den Hang des Stauhügels. Die eingerollte Luft reflektiert das Licht und bedeckt die Oberfläche des Hügels mit weißem Schaum. Verlangsamt man die Fahrgeschwindigkeit, so gehen auch die stürmischen Erscheinungen wieder zurück, der Hügel wird flacher und platter und die oberen Wasserschichten nähern sich der Platte und schließen den Wasserspiegel.

Photogramme, welche den Stauhügel von unten her, aus der Tiefe gesehen, abbilden (Taf. V), lassen erkennen, daß sich die sprudelnde Bewegung nur an der Oberfläche des Hügels vollzieht. Die Fläche zeigt hier flache walzenförmige Eindrücke, die gegen den Gipfel des Hügels an Breite zunehmen und um welche die nächsten Stromlinien wirbelnd emporkreisen. Die Eindrücke sind die Lager der lufthaltenden Roller, die den Hang des Hügels decken. (Fig. 3 c.)

Die Aufnahmen, welche von hinten her durch die freiliegende Staufläche einen Einblick in das Innere des Stauhügels gewähren (Taf. IV), zeigen sehr schön das strahlenförmige Auseinandergehen der Stromlinien.

In Fig. 4 sind die Richtungen eingetragen, in denen die auf eine eingetauchte Platte treffenden Stromlinien abgelenkt werden. Die Strahlen im Stauhügel sind an ihren oberen Enden in der Nähe der Oberfläche nach den Seiten abgelenkt. Dies ist der Ausdruck der eigenartigen, wälzenden Bewegung in der Kuppe des Hügels, die sich seitwärts fortsetzt und als Drehung im Innern der von den Plattenrändern abfließenden Wassermassen stereoskopisch zu verfolgen ist. (Taf. IV.)

In dem Raume unterhalb des Teilungspunktes erscheinen die Projektionen der Stromlinien durchweg als geradlinige Strahlen, die von der Mittellinie der Platte gegen die Ränder gerichtet sind. In der Symmetrieebene des Systems ziehen die Projektionen der Stromlinien rechtwinklig über die Mitte des Unterandes. Unter  $45^{\circ}$  gegen diesen Rand sind die beiden Ebenen geneigt, in denen die über die Plattenecken gehenden Linien verlaufen. Über den Seiten-

rändern aber wachsen die Winkel von hier aus gleichförmig bis zu der durch den Teilungspunkt gehenden horizontalen Ebene.

Im ganzen betrachtet vollzieht sich der Abfluß über der ursprünglich eingetauchten Fläche genau so, wie über der Hälfte einer untergetauchten Platte von doppelter Länge (Fig. 5).

Abflußrichtungen an der Vorderseite eingetauchter Platten.

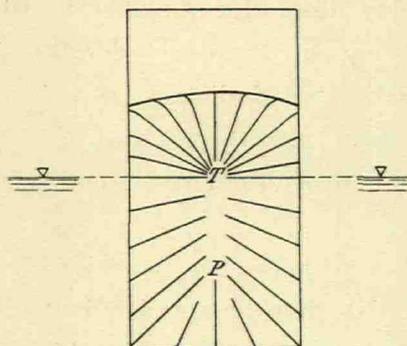


Fig. 4.

Abflußrichtungen an der Vorderseite untergetauchter Platten.

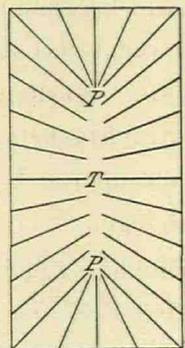


Fig. 5.

Wie die dynamischen Druckkräfte über den beiden Hälften einer solchen Platte sich das Gleichgewicht halten, so bildet bei der eingetauchten Platte der im Staukörper herrschende Druck das genaue Gegengewicht gegen die Druckkräfte über dem eingetauchten Teil der Platte.

Im Widerspiel gegen die Schwerkraft ergibt sich als Ausdruck dieses Gleichgewichtes das stationäre dynamische Niveau des Staukörpers, das sich in Berührung mit der Versuchsplatte in Form der positiven Staukurve abbildet. Die Ordinaten dieser Kurve über der statischen Niveaulinie sind als die Maße des an derselben herrschenden dynamischen Druckes zu betrachten.

Die positive Staufläche, d. h. das Flächenstück zwischen der statischen und dynamischen Niveaulinie ist somit, wie ich früher bereits ausgeführt habe, das Integral der über der statischen Nulllinie an der Vorderseite der Platte herrschenden Druckkräfte.

Aus dem Verlauf der Strömungen ergeben sich aber noch weitere Einblicke in die Verteilung der Druckkräfte auf dem eingetauchten Flächenstück. Man sieht, daß die Strömung vom Teilungspunkte T (Fig. 4) nach den Seitenrändern unter ähnlichen Verhältnissen erfolgt, wie die von P nach der

Mitte des Unterrandes, denn die Linien ziehen senkrecht über die in gleichen Abständen befindlichen Ränder. Es ist daher wahrscheinlich, daß auch die Druckkräfte über diesen Strecken nach Größe und Anordnung nicht sehr verschieden sein werden und daß über der Mittellinie TP überall nahezu derselbe Druck herrscht, wie in T, vielleicht mit einer schwachen, fallenden Tendenz gegen P hin.

Die Richtigkeit dieser Mutmaßung wurde durch folgenden Versuch bestätigt. Eine Platte von 20 cm Länge und 10 cm Breite wurde das eine Mal mit der schmalen Seite 10 cm tief eingetaucht, das andere Mal mit der breiten Seite 5 cm tief, so daß dasselbe Areal unter Wasser war und die gleichen Abflußverhältnisse vorlagen, wenn auch in anderer Symmetrielage (Fig. 6 a u. b).

**Stau- und Druckdiagramme an Platten.**

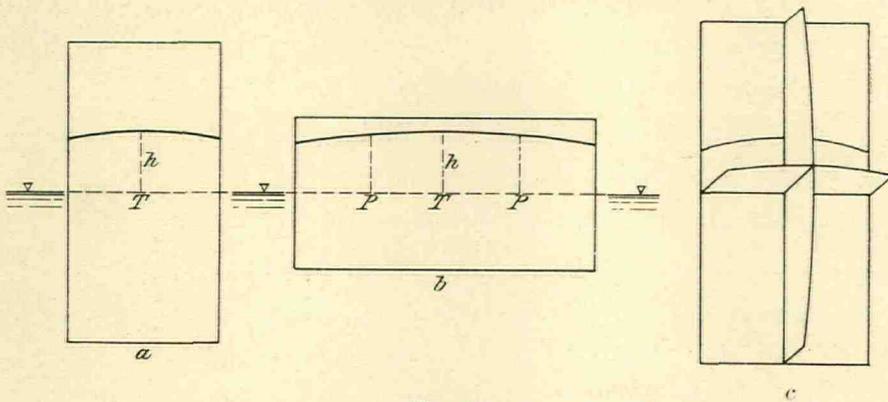


Fig. 6.

Bei gleicher Fahrsgeschwindigkeit zeigten die Photogramme der Staufflächen (Taf. IV, Fig. 1 und 2) in beiden Fällen tatsächlich die gleichen Stauhöhen im Punkte T und ein kaum merkliches Fallen des Druckes von T nach P.

Beide Staufflächen lassen sich daher als Quer- und Längsprofil des Widerstandsdruckes ansehen, und zwar wegen der vorliegenden Symmetrie nicht nur für den eingetauchten Teil, sondern auch für die ganze, völlig untergetauchte Fläche. Errichtet man hiernach über einer Symmetrielinie der Versuchsplatte die zugehörige Stauffläche als Längsprofil und benutzt die Staulinie der anderen Symmetrielinie als Streichschablone Fig. 6 c, so erhält man mit einem plastischen, auf die Platte getragenen Material einen Körper von der Form eines gegen die Ränder hin schwach abfallenden Plateaus, das seine geringste Höhe über den Ecken hat und den gesamten positiven Widerstandsdruck über der Vorderseite der Platte darstellt. Die Ordinaten der Oberfläche

dieses Körpers bezeichnen die Intensität des Druckes als Wassersäulenhöhe für jeden zugehörigen Punkt der Plattenfläche, und das Gewicht eines gleichgroßen Wasserkörpers ist somit gleich dem positiven Gesamtwiderstand.

Für die eingetauchte Platte folgt hieraus, daß der Widerstand an der Vorderseite gleich dem halben Widerstande an einer untergetauchten Platte von gleicher Breite und doppelter Länge ist, vermehrt um den gegen die Staufläche gerichteten Druck. Dieser Druck ist, wie wir sahen, an der Basis der Staufläche gleich den Ordinaten der oberen Kurve, er nimmt aber nach oben hin geradlinig, im statischen Verhältnis, ab, da das Wasser über dem Teilungspunkte senkrecht an der Platte emporgehoben wird.

Die vorangegangenen Angaben über die Lage des Stromteilungspunktes an der Vorderseite eingetauchter Platten beziehen sich auf geringe und mittlere Fahrgeschwindigkeiten, wie sie mit meinem Apparat zu erzielen waren. Für große Platten werden die Verhältnisse bei korrespondierenden Geschwindigkeiten ebenfalls Gültigkeit haben.

Führt die Fahrgeschwindigkeit zur Bildung eines sprudelnden, also an der Oberfläche stark pulsierenden Stauhügels, so ist auch die Lage des Stromteilungspunktes merklichen Schwankungen unterworfen.

An Platten von 10 cm Breite und 20 cm Tauchtiefe habe ich derartige Schwankungen, wenn die Fahrgeschwindigkeit über 1 m/Sek. war, von 10 bis nahezu 15 mm, also an 5 bis 7 % der Tauchtiefe, beobachtet. Die Verschiebung geschah in der Richtung nach unten. Es wurde also in den Stößen eine etwas dickere Wasserschicht nach oben abgelenkt, wie es normaler Weise der Fall ist. Der Druck muß daher momentan am Teilpunkt geringer geworden sein. Die höckerige, wulstige Oberflächenbeschaffenheit des sprudelnden Stauhügels ist als dynamisches Niveau das genaue Abbild der hier arbeitenden pulsierenden Druckkräfte. Diese heben das Wasser im allgemeinen auf die der Formel  $h = \frac{v^2}{2g}$  entsprechende maximale Stauhöhe an der Plattenmitte. Sobald aber einmal in einem Augenblick die Oberflächenwallung bis in die Nähe der zentralen, auf den Teilungspunkt gerichteten Stromlinien hinabschlägt und ein Teil der kinetischen Energie dieses Wassers schon vor dem Auftreffen auf die Platte zu seitlichen Bewegungen verwendet wird, kann auch durch Umwandlung des Restes dieser Energie in potentielle Energie der Druck an der Plattenfläche nicht die Höhe erreichen, die dem Drucke auf der unteren Hälfte des Stromsystems das Gleichgewicht hielte. Es muß daher in solchem Falle eine unter dem normalen Teilpunkte liegende

Wasserschicht statt seitlich nach oben abfließen und somit der Teilpunkt momentan um die Dicke dieser Schicht nach unten rücken.

Eine Verschiebung des Teilpunktes über die Linie des statischen Niveaus hinaus habe ich nie beobachtet und nehme an, daß sie auch nie eintritt, denn die Stauhöhe kann aus dem angegebenen Grunde durch vorzeitigen Energieverlust wohl geringer werden als  $h = \frac{v^2}{2g}$ , nicht aber größer, solange  $v$  konstant bleibt.

Auf eine weitere Ursache für das Herabsinken des Teilpunktes unter die normale Lage im Nullniveau sei noch hingewiesen. Wenn nämlich bei großer Fahrt und stark sprudelndem und schäumenden Stauhügel größere Luftmengen in die Stauung eingerollt werden, so müssen dieselben infolge ihres Auftriebes eine Druckverminderung bewirken, deren Korrelat eine entsprechende Erniedrigung des Teilpunktes ist.

Ist bei einem Versuch die Platte so tief eingetaucht, daß das hervorschauende Ende eine geringere Höhe hat als die der Fahrgeschwindigkeit entsprechende Stauung, so findet Überströmung statt, indem ein Teil des Stauwassers über den oberen Plattenrand hinwegfließt. Da die Stauung unter diesen Umständen nicht die volle Höhe über dem statischen Niveau erreichen kann, so ist vorauszusehen, daß dies wiederum ein teilweises Emporströmen der auf den eingetauchten Plattenteil treffenden oberen Wasserschichten zur Folge hat, daß also der Teilungspunkt entsprechend nach unten wandert. Die Photogramme von überströmten Platten bestätigen diesen Zusammenhang in trefflicher Weise (Tafel V, Fig. 2). Der Teilungspunkt ist so weit nach unten verschoben, daß die Höhe des Stauungsdruckes wieder der Fahrgeschwindigkeit entspricht.

Wenn somit unter allen Umständen an der Vorderseite der Platten die Druckhöhe  $h = \frac{v^2}{2g}$  unterhalten wird, so ist doch offenbar der gesamte Widerstandsdruck der Vorderseite nicht konstant, denn in dem Maße wie der Teilpunkt und damit die Basis des Stauhügels tiefer gesenkt wird, verkleinert sich das Areal der ursprünglich eingetauchten Plattenfläche und es scheidet somit aus dem oben entwickelten Druckkörper ein dem Druckmaximum benachbartes mittleres Stück aus. Jedes Herabsinken des Teilpunktes bedeutet also einen Verlust am Gesamtdruck, eine vorübergehende momentane, oder bei überströmten Platten eine dauernde Verringerung des positiven Normalwiderstandes der eingetauchten Platten. Daß an Platten der letzten Art bei

großer Fahrt die turbulenten Bewegungen im Stauhügel ebenfalls zu weiteren Tiefschwankungen des Teilpunktes führen können, bedarf keiner Betonung.

Nach diesen Darlegungen ist vorauszusehen, daß die mit den Verschiebungen des Stromteilungspunktes verbundenen Schwankungen des Widerstandes auch bei dynamometrischen Messungen desselben in die Erscheinung treten werden. Die beobachteten Widerstandskurven werden Schwankungen nach unten aufweisen, und die graphisch oder rechnerisch gefundenen Mittelwerte werden um einige Prozente hinter dem wahren, dem Quadrat der Geschwindigkeit proportionalen Maximalwerten zurückbleiben. Freilich ist hierbei vorausgesetzt, daß die registrierten Schwankungen nicht ihre Ursache in den Eigenschaften der messenden und aufzeichnenden Apparate oder in Unregelmäßigkeiten der Fahrt haben. Da der positive Widerstand der vorderen Plattenseite nicht getrennt von dem negativen Sogwiderstande der Rückseite mittels Dynamometer gemessen werden kann, so bleibt zu berücksichtigen, daß auch in den Vorgängen hinter der Platte bestimmte Ursachen für Schwankungen des Gesamtwiderstandes vorliegen.

An der Rückseite der eingetauchten Platten (Tafel II) sind die Strömungen ähnlich wie an der unteren Hälfte einer untergetauchten Platte, deren Höhe gleich der doppelten Tauchtiefe der ersteren ist. Der Wirbelring ist von der Wasseroberfläche quer durchschnitten, so daß die beiden Enden der Wirbelungsachse frei zutage liegen, umgeben von den früher von mir näher beschriebenen konzentrischen Stromlinien des Wirbels. Der Nachlauf strömt in der Richtung gegen die Rückseite der Platte und strebt den Raum hinter derselben aufzufüllen. Die Füllung reicht jedoch niemals bis zur Höhe der statischen Niveaulinie, sondern bleibt stets um einen erheblichen Betrag, der etwas kleiner ist als die Stauhöhe an der Vorderseite, unter der Nulllinie, so daß das dynamische Niveau hier eine sehr auffällige Depression zeigt. Die Linie, mit der sich das dynamische Niveau an der Rückseite der Platte abbildet, habe ich als Soglinie oder negative Staulinie bezeichnet. An den schmalen Seitenrändern der Platte sind die Enden der vorderen und hinteren Staulinie durch den Absturz des Niveaus geradlinig miteinander verbunden.

Das Wasser, welches aus dem Hochdruckgebiet der vorderen Plattenseite mit dem Maximaldruck  $h = \frac{v^2}{2g}$  über die Ränder der Platte und die vorgewölbte Außenfläche des Wirbels nach hinten abfließt, stößt hinter dem Wirbel zusammen und bildet hier das als „Insel“ bezeichnete Druckmaximum, das Analogon der Heckwelle. Fände auf dem Wege des Randstromes bis zur

„Insel“ kein Energieverlust (durch Reibung an der Wirbeloberfläche) statt, so müßte das hinter dem Wirbelring emporsteigende Wasser dieselbe Höhe erreichen, wie der Stauhügel vor der Platte, da beide von demselben Hochdruckgebiet ausgehen. In Wirklichkeit liegt aber die Kuppe der Insel tiefer als die des Stauhügels, und da der Nachlauf von dort gegen die Platte nach vorn fließt, also einem Druckgefälle folgt, so erklärt sich daraus die tiefe Lage der hinteren Staulinie. Die Form dieser Linie ist im Mittel keine vollkommene horizontale Gerade, denn da, wo der Nachlauf auf die Platte stößt und sich teilt, entsteht ein neues Druckmaximum, das eine zwar geringe, aber deutlich sichtbare Anstauung hervorruft und der Soglinie, entsprechend den vorhandenen Strömungen, ein schwaches Gefälle nach den Seiten erteilt. Bei schmalen Platten zeigt sich an den seitlichen Plattenrändern eine stärkere Ausbiegung der Soglinie nach unten, welche offenbar durch die an-saugende Wirkung des Randstromes verursacht wird. Die Photogramme er-gaben hier Stromlinien, die von innen her im breiten Bogen an der Platte entlang mit schnell zunehmender Geschwindigkeit nach außen ziehen. Der Bogen wird aber seitlich nicht mit der begonnenen Krümmung fortgeführt, sondern am Rande der Platte durch den Seitenstrom nach innen gedrängt und nach hinten abgelenkt. Eine geringe Druckerhöhung in den äußersten Wirbelschichten ist die Folge dieser Pressung; sie bewirkt einen kontinuierlichen Übergang des Wirbelniveaus in das des Randstromes und läßt die Soglinie von ihren tiefsten Punkten an den Plattenrändern wieder ansteigen und ohne Sprung in die seitliche Verbindungslinie mit der vorderen Staukurve übergehen.

Das absolute Druckminimum des ganzen Strömungssystems liegt in der Achse der Wirbelung stets in einem Abstände hinter der Platte. Der Widerstand hängt aber direkt nur von den an der Platte selbst herrschenden Druckverhältnissen ab, wie sie in der Form und Lage der Soglinie ihren Ausdruck finden.

Alle Punkte der Soglinie haben, gegenüber dem statischen Ruhezustande, während der Fahrt einen dynamischen Minderdruck gleich der Höhe der zugehörigen, auf das statische Niveau bezogenen Ordinaten. Dasselbe gilt für die Soglinie, die man erhält, wenn die Platte mit dem längeren Rande bis zur Hälfte ihrer Breite oder weiter eingetaucht wird, so daß die Depressionslinie auf der längeren Symmetrielinie der Platte liegt. In ähnlicher Weise, wie es oben für den Überdruck an der Vorderseite gezeigt wurde, läßt sich hiernach auch der dynamische Minderdruck an der Rückseite körperlich darstellen,

indem man die eine Sogkurve als Leitlinie, die andere als Streichschablone verwendet.

An einer nur eingetauchten Platte bedeckt das Relief des Minderdrucks nur den während der Fahrt benetzten unteren Teil der Plattenrückseite bis zur Staulinie, wie der Druckkörper der Vorderseite bis zur oberen Staulinie reicht\*). Der den Minderdruck darstellende Körper ist jedoch nach oben bis zur statischen Nulllinie T zu ergänzen, so daß hier ein dachartiger Abschluß erfolgt, denn der Minderdruck beginnt an diesem Punkte und fällt gleichförmig bis zur vollen Senkungstiefe ab. Durch entsprechende Erweiterung des Reliefs über eine zu dem ursprünglich eingetauchten Areal symmetrische Plattenhälfte erhält man den Druckkörper für den Minderdruck hinter einer untergetauchten Platte von der Größe der ganzen Fläche. Beide Druckflächen mit der dazwischenliegenden Platte umschließen einen Raum, dessen Gewicht, wenn er mit Wasser gefüllt gedacht wird, gleich dem Gesamtwiderstande der Platte ist.

Da sich der Widerstandsdruck in der Höhe des unteren dynamischen Niveaus in statischer Form darstellt, so haben schon früher französische Autoren, wie Duchemin u. a. diesen Druck durch ein Druckdreieck abgebildet und durch Multiplikation mit der Fläche des eingetauchten Areals zur Ermittlung des Gesamtwiderstandes zu verwenden gesucht.

In seiner weiter oben bereits erwähnten Arbeit hat Herr Gebers durch eine Reihe von Versuchen die Stauhöhen eingetauchter Platten photographisch festgelegt, daraus nach dem eben angedeuteten Verfahren den Widerstand berechnet und das Resultat mit dem Ergebnis der direkten dynamometrischen Widerstandsmessung verglichen. Es hat sich dabei herausgestellt, daß der so berechnete Widerstand erheblich größer war, als der gemessene. Da außerdem die aus  $h = \frac{v^2}{2g}$  errechnete vordere Stauhöhe größer war als die beobachtete, so folgert Herr Gebers, daß damit die Theorie falle, mit Hilfe der Geschwindigkeitshöhe den Widerstand der Vorderfläche einer Platte oder eines Körpers direkt zu berechnen, oder mit Hilfe der Niveaudrucke den Widerstand von Schiffen oder ähnlichen Körpern zu berechnen.

\*) Die Luft, die den austauchenden Teil der Platte umfließt, wird dort zwar ähnliche Widerstandserscheinungen hervorrufen, die aber wegen der minimalen Druckgrößen, die wahrscheinlich nur 1:750 von denen des Wassers betragen, nicht darstellbar sind und hier vernachlässigt werden können.

„Insel“ kein Energieverlust (durch Reibung an der Wirbeloberfläche) statt, so müßte das hinter dem Wirbelring emporsteigende Wasser dieselbe Höhe erreichen, wie der Stauhügel vor der Platte, da beide von demselben Hochdruckgebiet ausgehen. In Wirklichkeit liegt aber die Kuppe der Insel tiefer als die des Stauhügels, und da der Nachlauf von dort gegen die Platte nach vorn fließt, also einem Druckgefälle folgt, so erklärt sich daraus die tiefe Lage der hinteren Staulinie. Die Form dieser Linie ist im Mittel keine vollkommene horizontale Gerade, denn da, wo der Nachlauf auf die Platte stößt und sich teilt, entsteht ein neues Druckmaximum, das eine zwar geringe, aber deutlich sichtbare Anstauung hervorruft und der Soglinie, entsprechend den vorhandenen Strömungen, ein schwaches Gefälle nach den Seiten erteilt. Bei schmalen Platten zeigt sich an den seitlichen Plattenrändern eine stärkere Ausbiegung der Soglinie nach unten, welche offenbar durch die an-saugende Wirkung des Randstromes verursacht wird. Die Photogramme er-gaben hier Stromlinien, die von innen her im breiten Bogen an der Platte entlang mit schnell zunehmender Geschwindigkeit nach außen ziehen. Der Bogen wird aber seitlich nicht mit der begonnenen Krümmung fortgeführt, sondern am Rande der Platte durch den Seitenstrom nach innen gedrängt und nach hinten abgelenkt. Eine geringe Druckerhöhung in den äußersten Wirbelschichten ist die Folge dieser Pressung; sie bewirkt einen kontinuierlichen Übergang des Wirbelniveaus in das des Randstromes und läßt die Soglinie von ihren tiefsten Punkten an den Plattenrändern wieder ansteigen und ohne Sprung in die seitliche Verbindungslinie mit der vorderen Staukurve übergehen.

Das absolute Druckminimum des ganzen Strömungssystems liegt in der Achse der Wirbelung stets in einem Abstände hinter der Platte. Der Widerstand hängt aber direkt nur von den an der Platte selbst herrschenden Druckverhältnissen ab, wie sie in der Form und Lage der Soglinie ihren Ausdruck finden.

Alle Punkte der Soglinie haben, gegenüber dem statischen Ruhezustande, während der Fahrt einen dynamischen Minderdruck gleich der Höhe der zugehörigen, auf das statische Niveau bezogenen Ordinaten. Dasselbe gilt für die Soglinie, die man erhält, wenn die Platte mit dem längeren Rande bis zur Hälfte ihrer Breite oder weiter eingetaucht wird, so daß die Depressionslinie auf der längeren Symmetrielinie der Platte liegt. In ähnlicher Weise, wie es oben für den Überdruck an der Vorderseite gezeigt wurde, läßt sich hiernach auch der dynamische Minderdruck an der Rückseite körperlich darstellen,

indem man die eine Sogkurve als Leitlinie, die andere als Streichschablone verwendet.

An einer nur eingetauchten Platte bedeckt das Relief des Minderdrucks nur den während der Fahrt benetzten unteren Teil der Plattenrückseite bis zur Staulinie, wie der Druckkörper der Vorderseite bis zur oberen Staulinie reicht\*). Der den Minderdruck darstellende Körper ist jedoch nach oben bis zur statischen Nulllinie T zu ergänzen, so daß hier ein dachartiger Abschluß erfolgt, denn der Minderdruck beginnt an diesem Punkte und fällt gleichförmig bis zur vollen Senkungstiefe ab. Durch entsprechende Erweiterung des Reliefs über eine zu dem ursprünglich eingetauchten Areal symmetrische Plattenhälfte erhält man den Druckkörper für den Minderdruck hinter einer untergetauchten Platte von der Größe der ganzen Fläche. Beide Druckflächen mit der dazwischenliegenden Platte umschließen einen Raum, dessen Gewicht, wenn er mit Wasser gefüllt gedacht wird, gleich dem Gesamtwiderstande der Platte ist.

Da sich der Widerstandsdruck in der Höhe des unteren dynamischen Niveaus in statischer Form darstellt, so haben schon früher französische Autoren, wie Duchemin u. a. diesen Druck durch ein Druckdreieck abgebildet und durch Multiplikation mit der Fläche des eingetauchten Areals zur Ermittlung des Gesamtwiderstandes zu verwenden gesucht.

In seiner weiter oben bereits erwähnten Arbeit hat Herr Gebers durch eine Reihe von Versuchen die Stauhöhen eingetauchter Platten photographisch festgelegt, daraus nach dem eben angedeuteten Verfahren den Widerstand berechnet und das Resultat mit dem Ergebnis der direkten dynamometrischen Widerstandsmessung verglichen. Es hat sich dabei herausgestellt, daß der so berechnete Widerstand erheblich größer war, als der gemessene. Da außerdem die aus  $h = \frac{v^2}{2g}$  errechnete vordere Stauhöhe größer war als die beobachtete, so folgert Herr Gebers, daß damit die Theorie falle, mit Hilfe der Geschwindigkeitshöhe den Widerstand der Vorderfläche einer Platte oder eines Körpers direkt zu berechnen, oder mit Hilfe der Niveaudrucke den Widerstand von Schiffen oder ähnlichen Körpern zu berechnen.

---

\*) Die Luft, die den austauchenden Teil der Platte umfließt, wird dort zwar ähnliche Widerstandserscheinungen hervorrufen, die aber wegen der minimalen Druckgrößen, die wahrscheinlich nur 1:750 von denen des Wassers betragen, nicht darstellbar sind und hier vernachlässigt werden können.

Strömungen an einer rechteckigen Platte  $25 \times 10$  cm. Normalstellung.  
Stereoskopbilder.

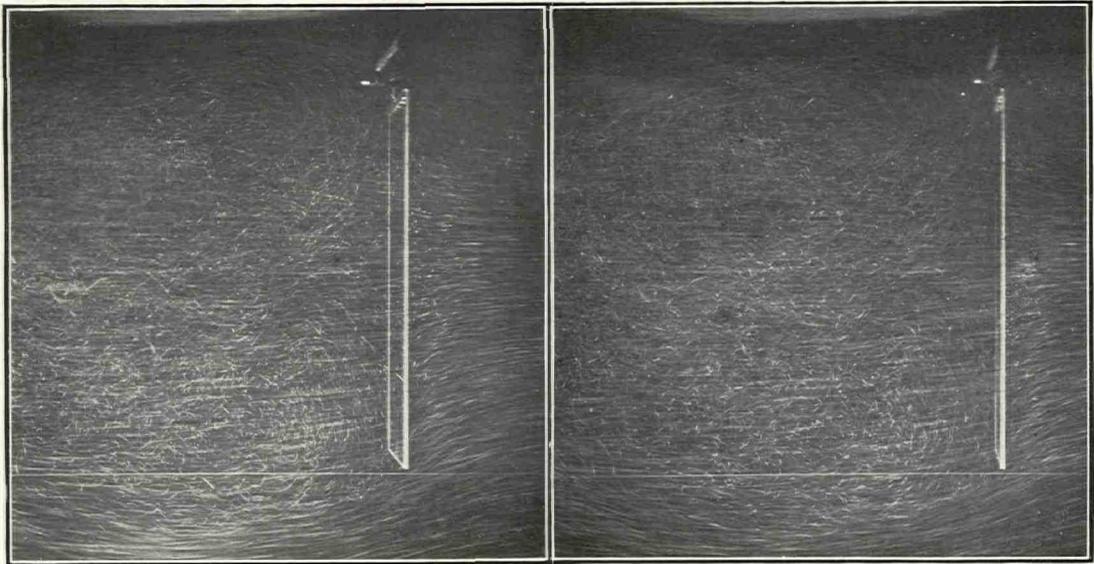


Fig. 1. Wirbelung, von der Längsseite der Platte gesehen.

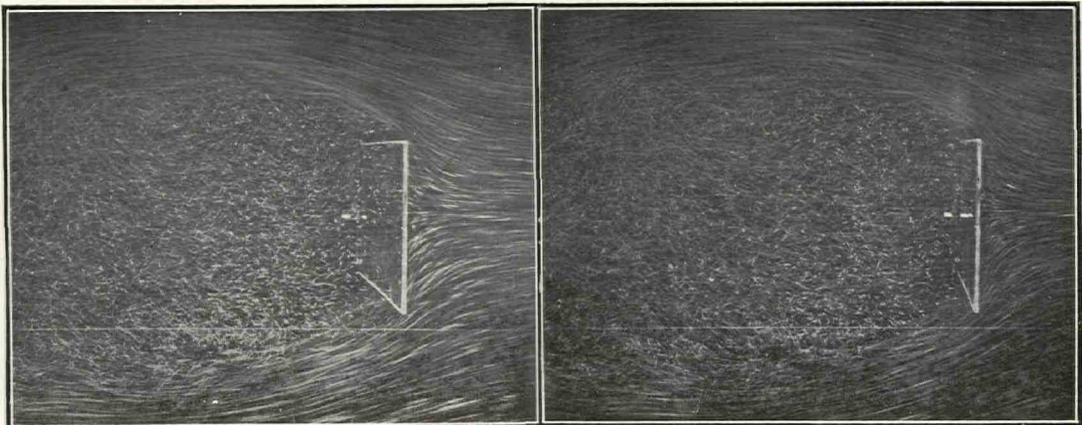


Fig. 2. Wirbelung, von der Schmalseite der Platte gesehen.



Es ist ohne weiteres zuzugeben, daß die unmittelbare dynamometrische Bestimmung des Widerstandes der einfachste und gangbarste Weg zu diesem Ziele ist, um so mehr als durch die neueren Versuche in Übigau die Zuverlässigkeit des Ähnlichkeitsgesetzes wiederum dargetan ist. Dennoch möchte ich doch bezweifeln, daß durch das summarische Verfahren des Herrn Gebers die bezeichnete Theorie gefallen und ein für allemal aus der Welt geschafft sei. Dazu reichen wenigstens die veröffentlichten Versuche jener Arbeit nicht aus; sie beweisen allenfalls, wenn man die gemessenen Größen als einwandfrei gelten läßt, daß die Niveaudrucke eben nur für das vom Wasserspiegel getroffene Areal der Platten, nicht aber für die tiefer liegenden Flächenteile Gültigkeit haben. Da die Stromlinien, wie wir gesehen haben, vom Teilungspunkte aus über dem eingetauchten Areal sämtlich mehr oder weniger nach unten geneigt sind, so ist auch ein Druckgefälle gegen den unteren Rand vorhanden, der Widerstand somit nach unten abnehmend. Daher muß der aus den mittleren Niveaudrücken berechnete Gesamtwiderstand zu große Werte ergeben. Man darf hiernach annehmen, daß die Differenz gegen den gemessenen Widerstand dem Druckverluste nach unten und seitlich zuzuschreiben ist, den wir nachgewiesen haben. Diese vorauszu sehenden Differenzen stehen im allgemeinen nicht im Widerspruch mit der Theorie, sondern bestätigen sie. Dasselbe gilt von den positiven Stauhöhen an der Vorderseite, die nach der zitierten Ansicht hinter den berechneten Geschwindigkeitshöhen zurückbleiben sollen. Es ist dabei übersehen worden, daß die Größe  $h = \frac{v^2}{2g}$  nicht die mittlere, sondern die maximale Stauhöhe im Stromteilungspunkte ist. Auf den elf im „Schiffbau“ veröffentlichten Photogrammen, auf denen die Staukuppe sichtbar ist, zeigen sechs mit Geschwindigkeiten bis ca. 2 m gefahrene Platten eine gute, zum Teil sehr genaue Übereinstimmung mit der theoretischen Stauhöhe. In einem Falle (l. c. Fig. I a No. 7) ist bei  $v = 2,36$  m/Sek. die Stauung um ca. 2 cm höher als die berechnete. Die auffällige Differenz läßt eine Wiederholung des Versuchs wünschenswert erscheinen, da auch der berechnete Widerstand ganz aus der Reihe fällt. Es wäre nachzusehen, ob die senkrechte Stellung der Platte gewahrt blieb. In den übrigen vier mit großer Geschwindigkeit gefahrenen Versuchen erklärt sich die vom statischen Niveau gemessene, geringere Stauhöhe entweder als Schwankung im photographischen Moment oder durch die eingetretene Senkung des Teilpunktes, der eben um die vorhandene Differenz tiefer lag, als das statische Niveau.

Es soll übrigens nicht verkannt werden, daß wegen der zweifellos auftretenden Schwankungen des dynamischen Niveaus und der Schwierigkeit der genaueren Höhenbestimmung an dem bei größerer Fahrt stark pulsierenden Stauhügel und Nachlauf die zahlenmäßige Auswertung der Niveaudrucke wohl nur als Mittel aus einer größeren Zahl von Versuchen möglich sein wird. Man könnte sich dabei an Stelle der Photographie der von mir früher angegebenen Methode der Selbstabbildung der Niveaulinien bedienen und ermitteln, welche Gesetzmäßigkeit zwischen dem gemessenen und dem nach Niveaudrucken errechneten Widerstande besteht und welche Variationen der Stauhöhen (über dem statischen Niveau gemessen) bei verschiedenen Tauchtiefen, namentlich in der Nähe des unteren Plattenrandes auftreten.

Über die Strömungen an untergetauchten rechteckigen Platten in der Normalstellung bleibt noch nachzutragen, daß sie an der Vorderseite auf der oberen und unteren Hälfte, wie zu erwarten, symmetrisch so verlaufen, wie über dem ursprünglich bis zur halben Höhe eingetauchten Areal einer gleich großen, eintauchenden Platte. Auch an der Rückseite ist das Strömungsbild ein symmetrisches. Die Wirbelachse hat, von hinten betrachtet (Fig. 7, I), die Form einer der Plattenlänge entsprechend gestreckten Ellipse, und demgemäß hat auch der Wirbelring in der durch den längeren Durchmesser der Ellipse gelegten Symmetrieebene eine größere Dicke als senkrecht dazu (Taf. VII, Fig. 1 Längsansicht, Fig. 2 Queransicht) neben den Längsrändern der Platte. Der ganze Wirbelring hat daher die Gestalt eines mehr oder weniger gestreckten Ellipsoids, das der Rückseite der Platte aufgedrückt ist und sich über die Ränder hervorwölbt, allseits umflossen von den Randströmen, die hinter der Wirbelmitte in dem Druckmaximum der „Insel“ zusammen stoßen, das dem Nachlauf den Ursprung gibt.

In den Stereoskopbildern tritt die eigenartige Erscheinung zutage, daß die elliptische Wirbelungsachse nicht in einer der Platte parallelen Ebene liegt, sondern in einer mehr oder weniger — je nach der Plattenlänge — gekrümmten Fläche (Fig. 7), so daß der Längsdurchmesser der Ellipse gegen die Platte konkav gekrümmt erscheint. Die langen und flachen Bogen (a und c) der Ellipse sind also nach hinten weiter von der Platte entfernt, als die den schmalen Plattenrändern benachbarten Bogen (b, d) mit der stärkeren Krümmung. Diese merkwürdige Erscheinung dürfte so zu erklären sein, daß die Wassermassen, die über die Längsränder der Platte abströmen, der hier herrschenden Druckverteilung entsprechend eine stärker absaugende Wirkung ausüben, als die der beiden Randströme. Es bleibt auch zu beachten, daß

die nach hinten verdrängten Wirbelbogen mehr exponiert, mit ihren Mitteln in der Höhe der langen Plattenränder liegen, während die Wirbelungsachse

**I. Lage der elliptischen Wirbelachse a b c d hinter einer rechteckigen Platte. II. Querschnitt des Wirbels und Seitenansicht der Achse a b c. III. Längsschnitt des Wirbels und Längsansicht der Achse d a b.**

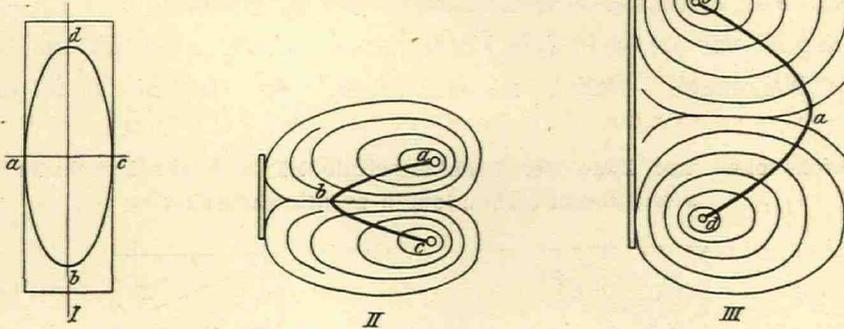


Fig. 7.

an den schmalen Enden der Platte hinter derselben geborgen sind. Die exzentrische Lage der Wirbelachsen im Quer- und Längsprofil läßt im ganzen auf einen Ausgleich der Druckdifferenzen hinter der Platte schließen.

### Strömungen an schrägen Platten.

Zur Illustration der Strömungen im Niveau an eingetauchten Platten, die gegen die Fahrriichtung geneigt sind, mögen die Lichtbilder Taf. VIII, Fig. 1 und 2 dienen, welche die Erscheinungen so darstellen, wie sie sich vom Standpunkte des ruhigen Wassers bei bewegter Platte und vom Standpunkte der in einem Wasserstrome ruhenden Platte darstellen.

Beide Aufnahmen sind wie bei der Querplatte gleichzeitig mit demselben Lichtblitz erzeugt und veranschaulichen daher genau den gleichen Vorgang, wie er sich in der Umgebung der eingetauchten Platte im Moment des Lichtblitzes im Niveau abspielte.

Für das Studium der Widerstandsvorgänge an schrägen Platten wurden rechteckige Glastafeln verwendet, deren längere Mittellinie senkrecht zur Fahrriichtung stand, während die kürzere wechselnde Winkel damit bildete. Bekanntlich teilt sich an der Vorderseite einer solchen Platte der Strom nicht mehr über der senkrechten Mittellinie, sondern der Teilungspunkt wandert gegen den voraufgehenden Plattenrand, wenn der Neigungswinkel mehr und

mehr verkleinert wird. Aus einer größeren Zahl von Photogrammen der Oberflächenströmung an eingetauchten Platten habe ich früher die Gesetzmäßigkeit dieser Verschiebung graphisch abgeleitet, und durch eine der Kardioide ähnliche Kurve dargestellt. Die nunmehr durchgeführte Photographie der Ströme im Innern des Wassers bestätigt mit voller Klarheit, daß die gleiche Gesetzmäßigkeit auch über den untergetauchten Plattenarealen herrscht. Die vorrückende Trennungslinie der Seitenströme ( $P_1 T P_1$  — Fig. 8 b) wird länger, wie sie sich dem Vorderrande nähert, mit dem sie bei ganz kleinen Neigungen endlich zusammenfällt. Sie umfaßt auch hier das

**Abflußrichtungen und Lage der Trennungslinie PP und des Druckmaximums T, a an normal stehenden, b an schrägen Platten.**

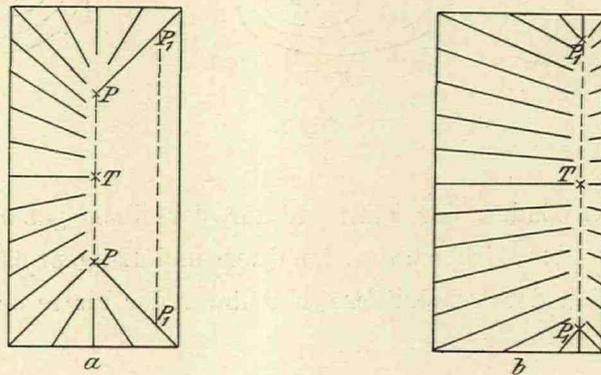


Fig. 8.

Druckmaximum, von dem die Stromlinien gegen die Plattenränder ausstrahlen, wie in Fig. 8 gezeichnet. Der dynamische Druck in der Trennungslinie bleibt dabei wie bei der Platte in der Normalstellung, nahezu derselbe, mit geringem Abfall nach den Seiten. Bei eingetauchten Platten erhalte ich dieselben maximalen Stauhöhen, wie bei querstehenden Platten, d. h. sie entsprechen der Formel  $h = \frac{v^2}{2g}$ . Infolge der Verschiebung der Teilungslinie gestaltet sich die vordere Staulinie unsymmetrisch, indem sie sich am vorangehenden Rande höher über das statische Niveau erhebt, als am Hinterrande der Platte. Dem entspricht der Druckabfall nach hinten zu und die stärkere Belastung der vorangehenden Plattenhälfte. Wie das Maximum, so wandert auch der Angriffspunkt der Resultante des Druckes, der Schwerpunkt der Stauffläche, nach vorn. Aus der Richtung der Abflußlinien, die von der Mitte des Hinterrandes ab eine zunehmende Neigung gegen die schmalen Seitenränder haben, folgt eine Druckabnahme in demselben Sinne.

Strömungen im Niveau an einer eingetauchten, schräg stehenden Platte.  
Gleichzeitige Aufnahme. Stereoskopbilder.

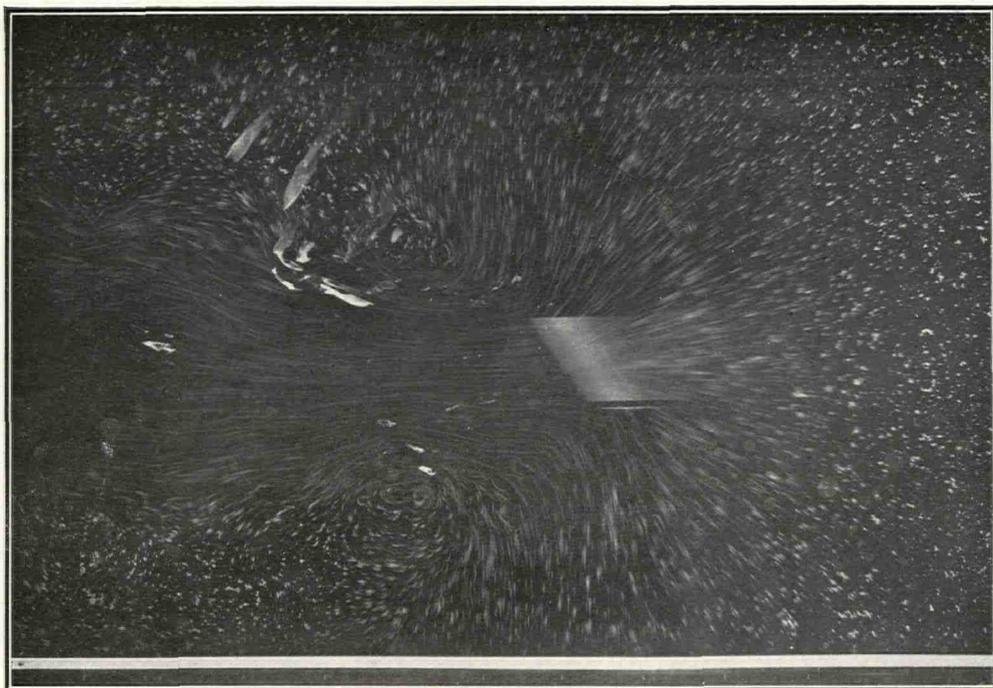
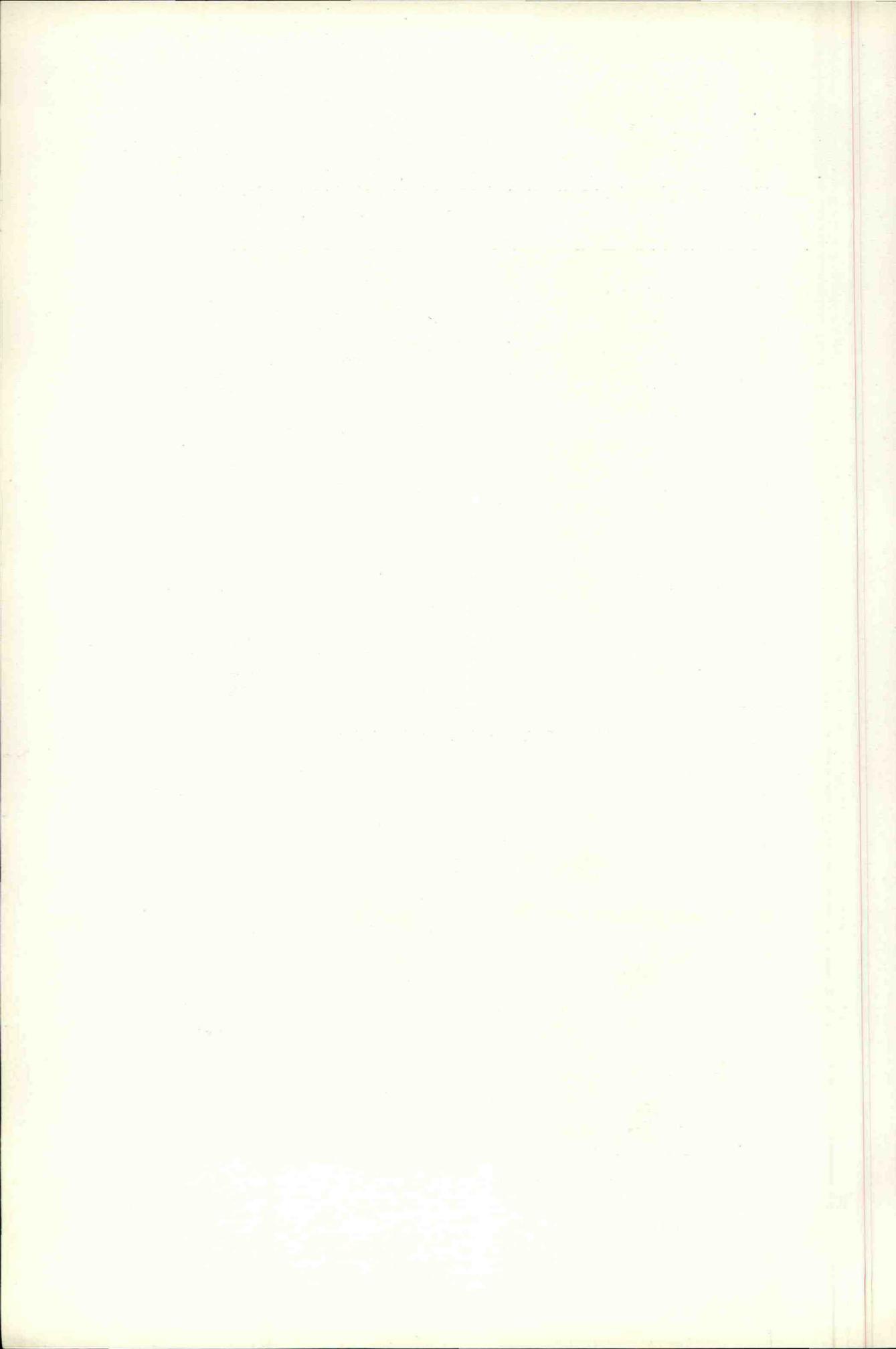


Fig. 1. Stehende Kamera: Kraftlinien.



Fig. 2. Fahrende Kamera: Stromlinien.



Die Strömungen an der Rückseite schräger Platten gestalten sich am einfachsten bei größeren Neigungswinkeln. Der Wirbelring behält dann im allgemeinen seine Stellung senkrecht zur Fahrriichtung, aber der hinter dem Vorderrande liegende Bogen wird dicker als der Bogen am Hinterrande (Fig. 2 Tafel I). Das Druckmaximum der „Insel“ an der hinteren Eintrittsstelle des Wirbels wird dadurch entsprechend gegen den Hinterrand verschoben. In dieser Lage halten sich die gegeneinander einschwenkenden Randströme im ganzen das Gleichgewicht, doch treten nicht selten Schwankungen dadurch ein, daß die Mengen des von oben und von unten (die Platte in Drachenstellung gedacht) in den Wirbel einströmenden Wassers sich vorübergehend ändern. Dies kann dahin führen, daß der Unterrandwirbel so erheblich an Umfang zunimmt, daß er den Oberrandwirbel nach oben gegen den umhüllenden Randstrom drängt und breit drückt. Der Nachlauf zwischen beiden hat dann zuerst eine Richtung nach oben, aber er wendet sich bald wieder so weit nach unten, daß die Stelle, wo er auf die Rückseite der Platte trifft, doch nur verhältnismäßig geringen Schwankungen unterworfen ist. Dieser Punkt liegt auf der Symmetrielinie der geneigten Platte ebenso weit vom Unterrande entfernt, wie die Stromtrennungslinie im Druckmaximum an der Vorderseite vom Oberrande.

An rechteckigen Platten vom Seitenverhältnis 1:2 oder 1:3, ist bei 60° Neigung die Achse des Wirbelbogens hinter der Mitte des vorangehenden Oberrandes weit nach hinten weggebogen, während sie seitwärts der unteren Hälfte des Seitenrandes nahekommt (Fig. 9). Der dünnere, untere Bogen verhält sich ähnlich dem oberen, aber die Entfernung vom Unterrande ist geringer. Die Biegungen der Wirbelungsachse entsprechen somit den Erscheinungen hinter gleichgeformten Platten, die rechtwinklig zum Strome stehen.

Bei 45° Neigung ist der Wirbel mehr und mehr in dem verschmälerten Raume hinter der Platte zusammengedrückt. Die seitlichen Bogen nähern sich den Plattenrändern und schieben sich unter immer schärferer Knickung weiter an der Platte empor in der Richtung auf die oberen Ecken (Fig. 10). So wird der Zufluß zum Wirbel fortschreitend von den Seiten her eingeeengt, während der Unterrandbogen kleiner und kleiner wird und immer weniger Wasser von hier aus in den Nachlauf übergeht. Der Nachlauf wird hiernach in der Hauptsache vom Oberstrom gespeist. Die Stromlinien des letzteren (vergl. Tafel 9 und 10) konvergieren an der Außenfläche des Wirbels und drängen das Wasser des Nachlaufs gegen die Mitte der unteren Plattenhälfte. Von dem hier in der Nähe des Randes liegenden Trennungspunkt aus bedecken

sie, indem sie nach vorn seitwärts und nach hinten umbiegen, wie ein Ährenstrauß die Rückseite der Platte, wobei sie sich von der Eintrittsstelle ab nach vorn hin in immer größeren Bogen zur Seite wenden und schließlich dicht hinter dem Vorderrande auf der Fläche in größten kreisförmigen Bahnen über die Umbiegungsstelle der Wirbelungsachse am Seitenrande hinüberziehen.

I. Querschnitt des Wirbels und Seitenansicht der Wirbelachse *a b c* an einer schrägen Platte von  $60^\circ$  und  $45^\circ$  Neigung;

II. Flächenansicht der Achsenlage.

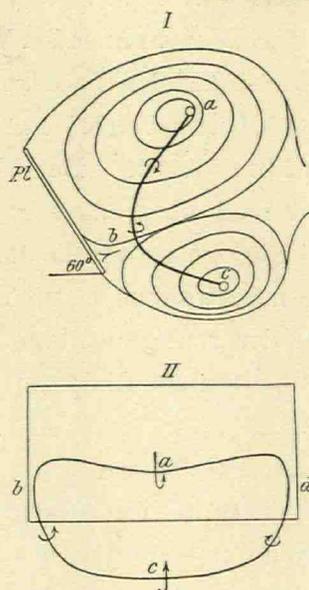


Fig. 9.

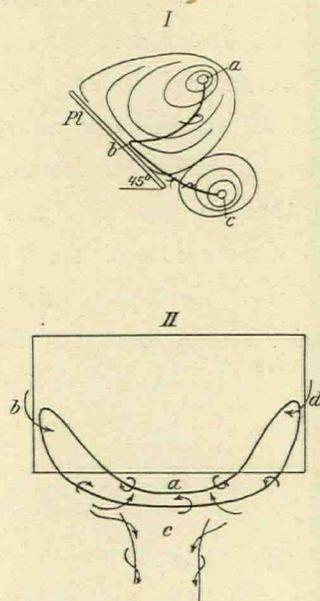


Fig. 10.

Die großen Kreisbahnen sind die Analoga der weiten Wirbel hinter den Seitenrändern normal gestellter Platten; aber während sie bei letzteren gleichmäßig den ganzen seitlichen Wirbelbogen umhüllen, sind sie hier auf die obere Hälfte, also auf die Enden des oberen Wirbelbogens beschränkt. Die unterhalb der Umbiegungsstelle liegenden Enden des unteren Bogens werden mit abnehmendem Neigungswinkel immer weniger gespeist, da mit der Neigung auch der Zufluß von den Seitenströmen immer geringer wird.

Damit ist eine wichtige und tiefgreifende Änderung des Stromsystems verbunden. Bei  $45^\circ$  Neigung tritt auf den Photogrammen klar hervor, daß dem von den Seitenrändern herzufließenden Wasser durch den Oberstrom der Eintritt in den Nachlauf erschwert wird (Tafel IX, Fig. 1). Die oberen Teile der Seitenströme treffen hinter der Wirbelmitte gegeneinander

Strömungen an untergetauchten schräg stehenden Glasplatten. Stereoskopbilder.

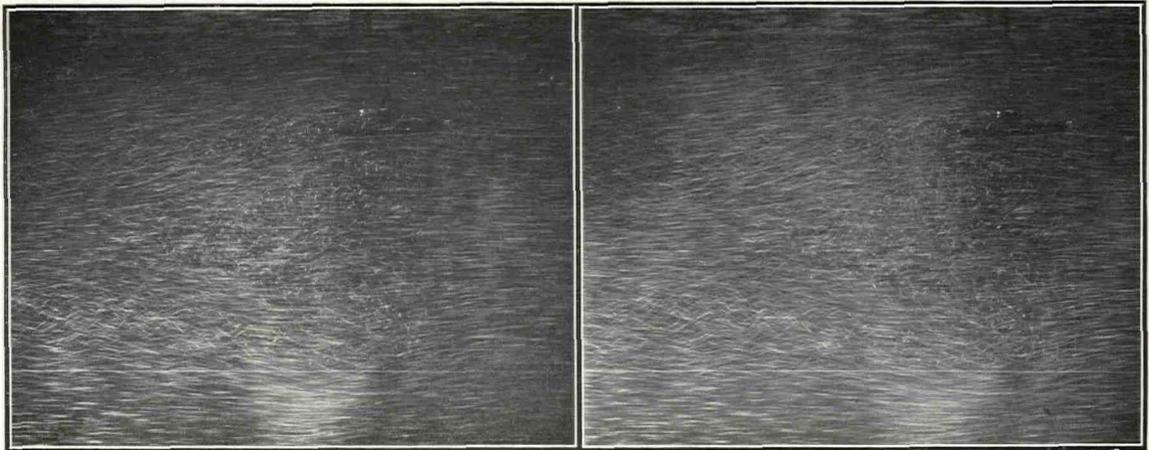


Fig. 1. Neigungswinkel  $\alpha = 45^\circ$ ; Geschwindigkeit  $v = 58$  cm.

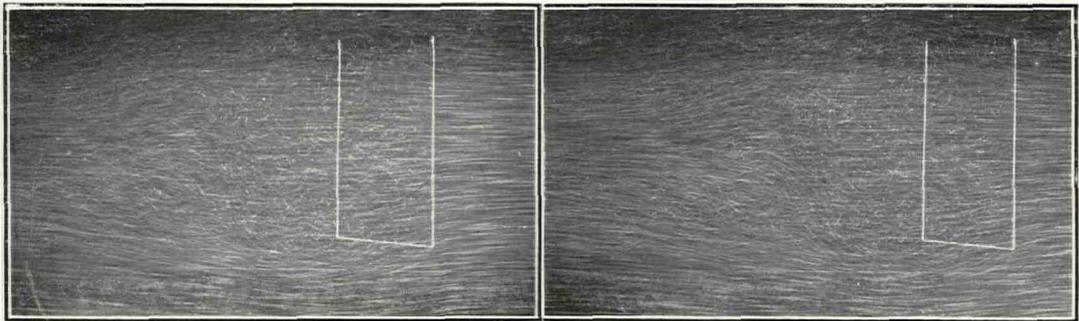
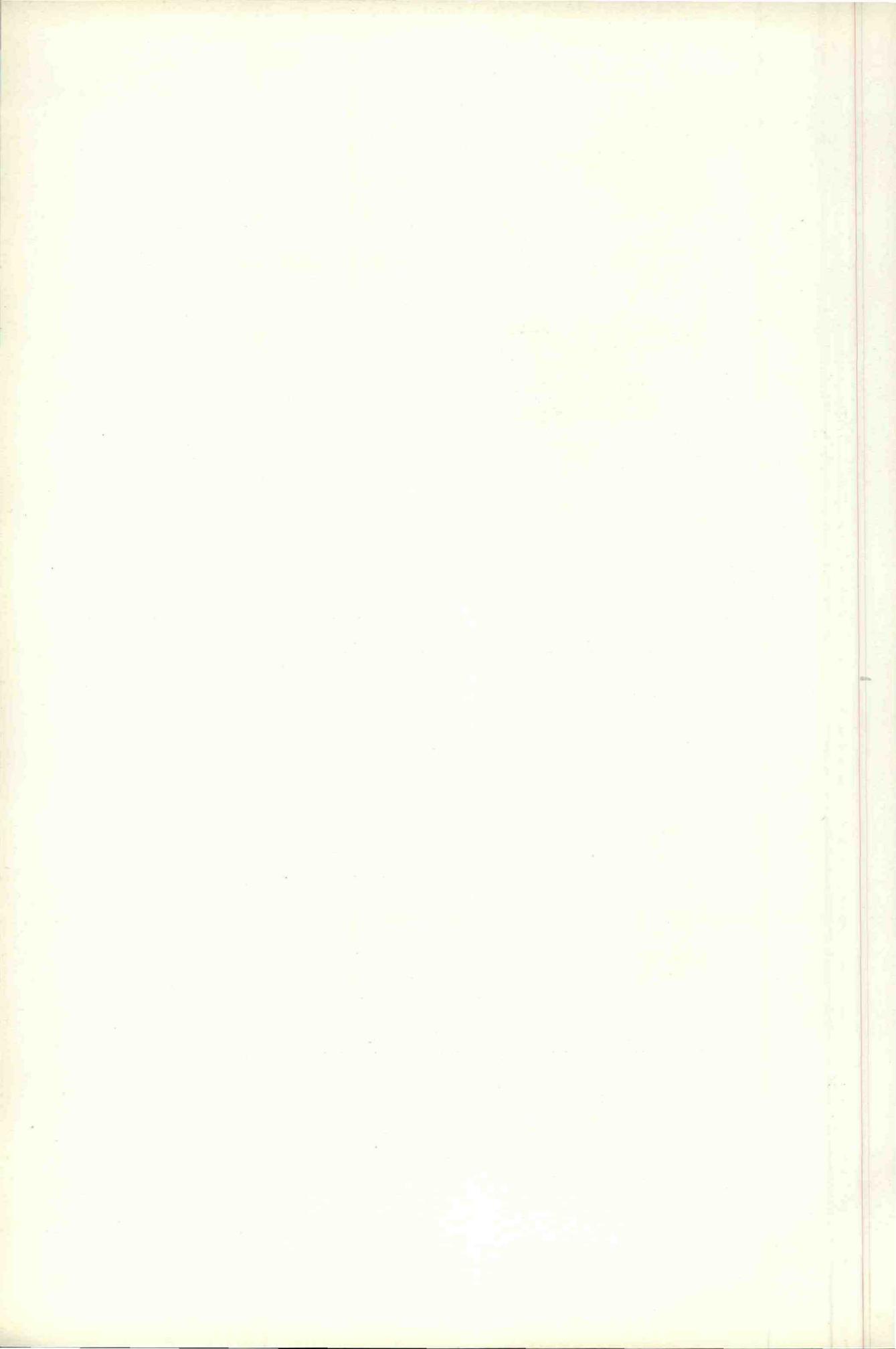


Fig. 2. Neigungswinkel  $\alpha = 40^\circ$ ; Fahrgeschwindigkeit  $v = 60$  cm.



und wenden sich unter dem Druck des herabsinkenden Oberstromes in gegenläufigen langgezogenen Spiralbahnen nach hinten. Die Spiralbewegung setzt bereits am Plattenrande ein, wo die Stromlinien von der Vorderseite nach hinten und innen herumbiegen. Die weitere Ablenkung nach unten erfolgt durch die nach innen und unten gerichteten Bahnen des Oberstromes und endlich durch den von unten nach außen und oben divergierenden Unterstrom. Bei kleineren Winkeln werden die so entstandenen Spiralströme mehr und mehr nach den Seiten gedrängt. Bei  $40^\circ$  (Tafel IX Fig. 2) sieht man sie

Letzter Rest des Unterrandwirbels *c* bei  $30^\circ$  Plattenneigung. Oberrandwirbel *a b d* beiderseits in Spiralstrudeln abfließend.

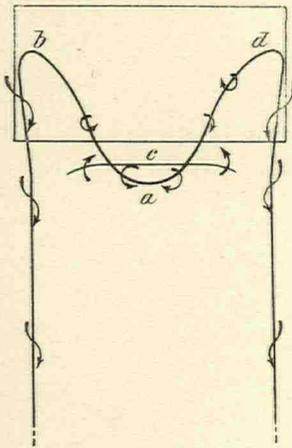


Fig. 11.

M-förmige Wirbelung ohne Unterrandwirbel bei  $25^\circ$  Neigung.

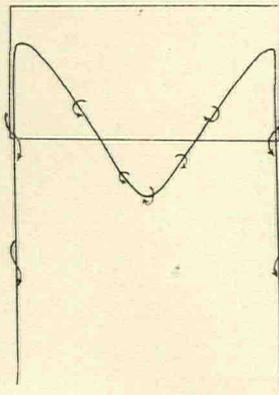


Fig. 12.

frei nebeneinander, wie zwei nachziehende Zöpfe, die mit breiter Basis den seitlichen Wölbungen des Wirbels angehängt sind. Deutlich kann man sehen, daß die axiale Wirbelung der Spiralen sich schon jetzt nach vorn erstreckt bis in die Nähe der Seitenränder und der Biegungsstelle der Achse des Wirbelringes. Nimmt nun der Neigungswinkel weiter ab, so tritt eine Verschmelzung der Zöpfe mit den seitlichen, stark verjüngten Wirbelbögen ein, so daß die Zöpfe als eine Art Fortsetzung des neben dem Rande nach hinten zurückgebogenen Vorderrandwirbels erscheinen. Der Unterrandbogen des Wirbelringes hat dabei seine Verbindung mit dem oberen Wirbelbogen verloren, er hängt nur lose, nach hinten fortgezogen, an den Zöpfen, bis er bei etwa  $35^\circ$  durch die um die Plattenecken herüberschwenkenden Randströme auch hier verdrängt wird. Seine letzten Reste schweben nun ohne seitliche

Verbindung hinter der Mitte des Tafelrandes. Zwischen  $30^\circ$  und  $25^\circ$  Neigung (Fig. 11) verschwindet der Unterrandwirbel völlig. An der Rückseite der Platte (Tafel X) sieht man den scharf nach hinten weggebogenen Oberrandwirbel mit den großen, auf der Plattenfläche kreisenden Wirbelbahnen. Seine Mitte ragt spitz über den Hinterrand hinaus, und die langen Spiralzöpfe bilden mit ihm die Figur eines M (Fig. 12; ferner Figur 1 u. 2 Tafel X).

Bei einem so verwickelten Stromsystem könnte es auf den ersten Blick aussichtslos erscheinen, daraus Anhaltspunkte für die Beurteilung der Druckverteilung zu gewinnen. Allein, dies gilt zunächst nicht für die Vorderseite, an der wir in der wohlbegrenzten und bekannten, dem Vorderrande genäherten Stromtrennungslinie die Lage des Druckmaximums kennen und aus dem einfachen, strahligen Verlauf der Stromlinien ersehen, wie der Druck gegen den Hinterrand abnimmt. Aus der Divergenz der Stromlinien über den seitlichen Arealen infolge des erleichterten Abflusses ergibt sich ferner, daß der Druck von der Mitte nach den Seiten abfällt und daß daher die Abdachung des Druckreliefs auch von geringer seitlicher Neigung begleitet ist. Die Stauflächen geben ein genaues Bild von dem Druckprofil in der Plattenmitte. Danach läßt sich annähernd das Relief des gesamten positiven Widerstandsdruckes gestalten. Das fehlende Längsprofil wird durch die Bestimmung des Maximums nach Größe und Lage hinreichend ersetzt.

Weit schwieriger liegen die Verhältnisse an der Rückseite. Sie hängen ab von der saugenden Wirkung der Randströme und von dem Grade der Auffüllung durch den Nachlauf.

Die Eigenschaften der Randströme beim Abfluß von der Vorderseite sind uns hinlänglich bekannt. Am Vorderrande finden wir in der ganzen Länge des unfernen Maximums eine ziemlich gleichartige Strömung, die mit annähernd demselben Druck und derselben Geschwindigkeit die Platte verläßt und daher auch die gleiche Saugung auf das benachbarte Wasser hinter dem Rande ausüben wird. Die seitwärts vom Maximum über die Ecken der Platte abfließenden und auseinandergehenden Wasserteile haben beim Entweichen über die Ränder abnehmenden Druck bis zu den unteren Tafelecken. Die Saugung kann deshalb an den Seitenrändern nicht so groß sein, wie hinter dem Oberrand, zumal die Stromrichtungen hierfür nach unten hin immer ungünstiger werden. Nicht sehr verschieden davon ist die Saugung am Unterrand. Sie kann auch nur eine relative geringe sein, da der entweichende Unterrandstrom durch seine Richtung am wenigsten dazu geeignet ist und auch mit dem Wasser vor der Platte unmittelbar um so weniger in Berührung

Strömungen an untergetauchten, schräg stehenden Glasplatten.

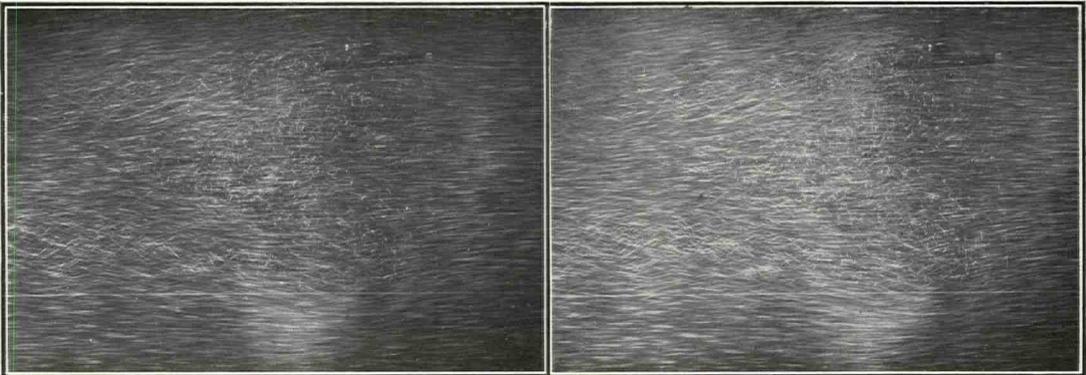


Fig. 1. Neigungswinkel  $\alpha = 30^\circ$ ; Fahrt  $v = 37,6$  cm.

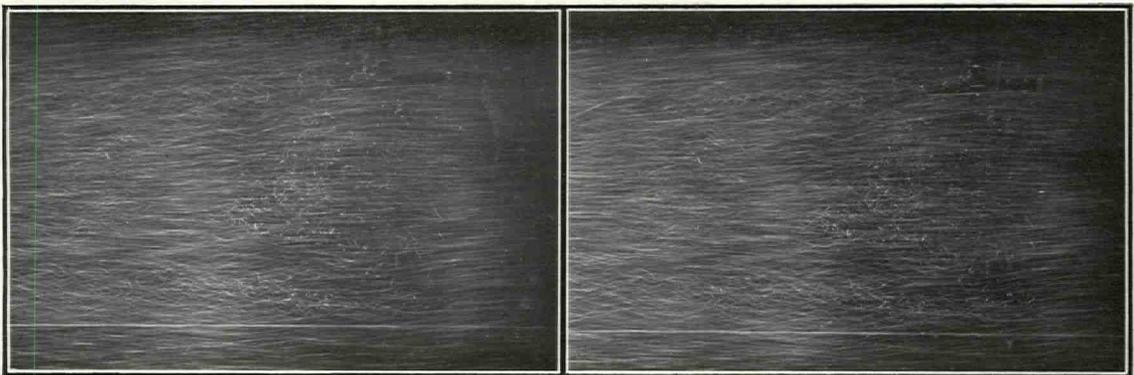
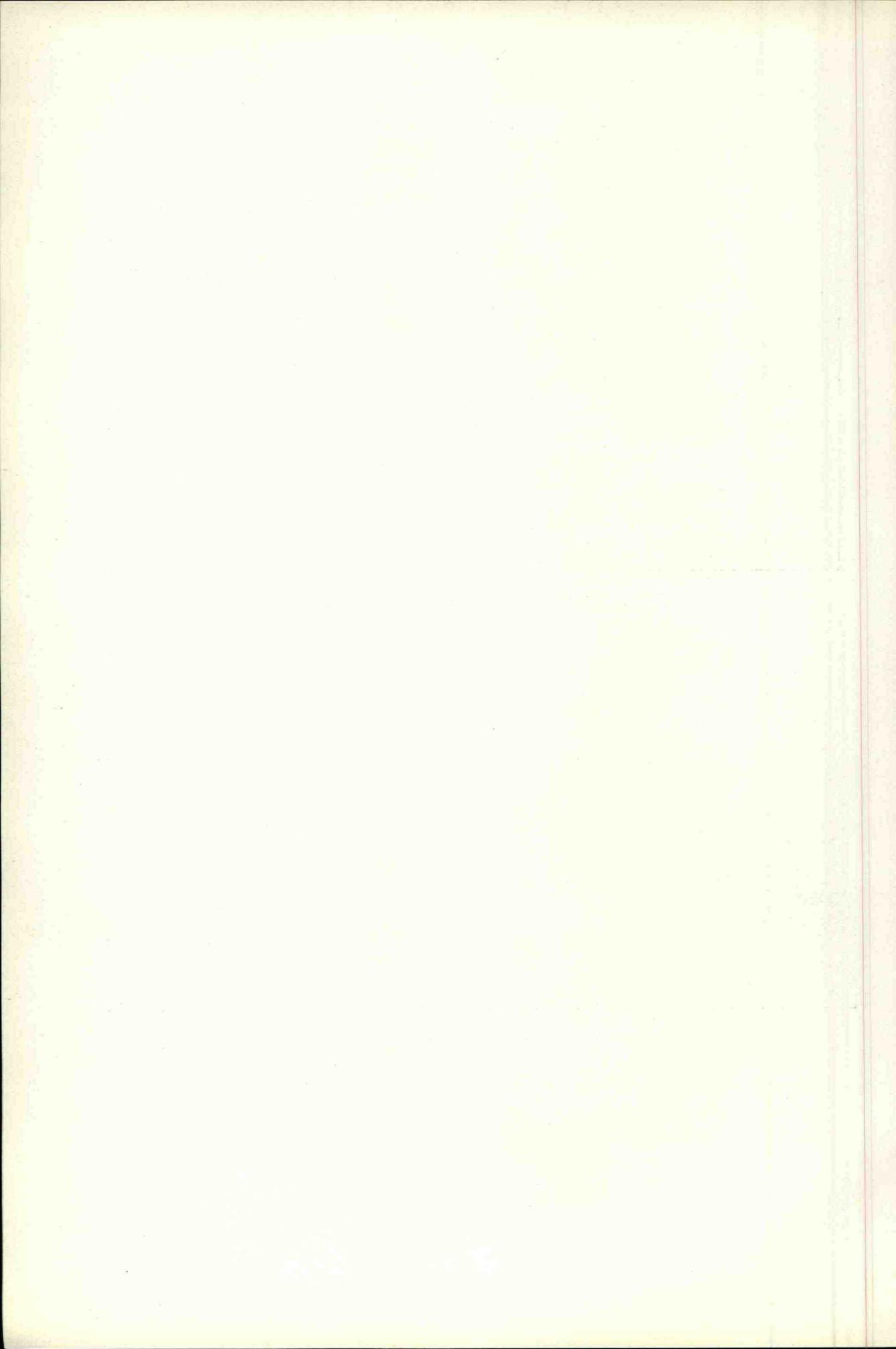


Fig. 2. Neigungswinkel  $\alpha = 22\frac{1}{2}^\circ$ ; Fahrt  $v = 64,0$  cm.



kommt, je kleiner ihr Neigungswinkel ist. Aus den Druckdifferenzen, mit denen der Unterstrom von der Vorderseite abfließt, ergibt sich zunächst eine Zunahme der Saugung von den unteren Ecken der Platte gegen die Mitte des Unterrandes. Der gesamte Minderdruck würde danach in ganz analoger Weise über die Fläche verteilt sein wie der Überdruck an der Vorderfläche, wenn er nicht durch die Auffüllungen des Nachlaufs verändert würde. Der Nachlauf trifft nun stets auf die untere Hälfte schräger Platten. In seinem Teilungspunkte auf der Mittellinie liegt auch das Maximum des Druckes, den der Nachlauf auf die Rückseite der Platte ausübt und durch den hier der

**a b** vordere, **c d** hintere Staulinie an einer schrägen Platte. **c d e f** Auffüllung durch den Nachlauf. **a e** Vorderrand der Platte.

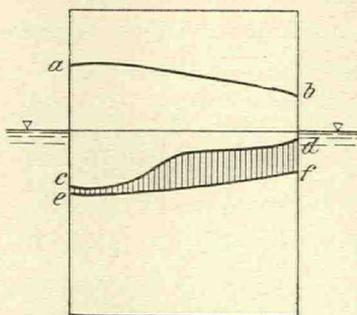


Fig. 13.

Minderdruck, die Saugung, auf ein Minimum erhöht wird. Die Staukurven zeigen dort in der Tat eine maximale Erhebung des dynamischen Niveaus, das sich plateauartig vom hinteren Rande nach vorn schiebt, um mit steil abfallender Kurve zum Druckminimum beim Vorderrande hinabzusinken. Da wir aus den Eigenschaften der Randströme zu dem Schluß kamen, daß die Saugung ursprünglich dem positiven Druck analog über die Fläche verteilt ist, so erhalten wir unter der naheliegenden Annahme, daß beide gleich und entgegengesetzt sind, eine klare Vorstellung von dem Wesen der Auffüllung des Minderdrucks durch den Nachlauf, wenn wir die positive Staukurve **a b** (Fig. 13) nach unten eintragen (**e f**). Das Flächenstück **c d e f** zwischen der so erhaltenen Linie und der beobachteten Soglinie gibt alsdann ein Bild von dem Grade der Auffüllung und Widerstandsverringerung durch den Nachlauf. Wie sie hier vom Druckmaximum des Nachlaufs gegen den Vorderrand abnimmt, so ergibt sich aus dem beschriebenen Verlauf der Stromlinien über dem seitlichen Flächenareal auch eine Abnahme der Auffüllung in seitlicher Richtung, also im gleichen Sinne, wie die ursprüngliche Saugung.

Die wichtige Frage, wie sich nun die Verteilung des Widerstandsdruckes an der Rückseite schräger Platten quantitativ gestaltet, kann auf Grund des vorliegenden Beobachtungsmaterials nicht abschließend beantwortet werden, da sich über den absoluten Betrag der Auffüllung über den Seitenarealen noch keine bestimmte Angabe machen läßt. Man wird aber auf Grund des ähnlichen Charakters der Strömung und ihrer gleichförmigen Änderung bei allmählich kleiner werdenden Neigungswinkel die Annahme machen können, daß bis zu  $45^\circ$  Neigung abwärts die Druckverteilung in seitlicher Richtung im ganzen eine ähnliche Abdachung haben wird, wie in der vollen Querstellung der Platte.

Dagegen ist es jedenfalls nicht statthaft, diese Annahme auch auf die Neigungswinkel unter  $45^\circ$  auszudehnen, da zwischen den Winkeln von  $45^\circ$  bis  $25^\circ$  die Strömungen zwar an der Vorderseite ihren Charakter nicht ändern, dagegen an der Rückseite derart tiefgreifende Umwandlungen erfahren, daß an Stelle des geschlossenen Wirbelringes ein völlig verschiedenes, seitwärts offenes Stromsystem tritt. Das Auftreten der zopförmigen Spiralwirbel und die Beseitigung des Wirbelbogens am Unterrand der Platte sind die wesentlichen Momente dieser Wandlung. Der Wirbelring ist ein Mechanismus, der durch Bildung des Nachlaufs an der Rückseite der Platte einen Teil der Kraft zurückerstattet, die an der Vorderseite zur Verdrängung des Wassers aus der Bahn aufgewendet wurde. Mit der Verdrängung und völligen Unterdrückung der einen Hälfte des Wirbelringes muß der Kraftersatz notwendig eine beträchtliche Einbuße erleiden, und da die Abschnürung an den Seitenrändern beginnt und gegen die Mitte fortschreitet, so muß der eintretende Verlust in erster Linie an den seitlichen Arealen der Platte zur Wirkung kommen. Die Abnahme des Unterrandwirbels ist zwar eine Funktion des Neigungswinkels, sie wird aber durch das Auftreten der Spiralstrudel (bei  $40^\circ$ — $45^\circ$ ) derart beschleunigt, daß sie statt bei  $0^\circ$  bereits bei  $25^\circ$ — $30^\circ$  vollendet ist. Die Widerstände einer schrägen Platte müssen daher in der unteren Hälfte des Quadranten erheblich höhere Werte haben, als bei einfacher Abhängigkeit etwa vom Sinus des Neigungswinkels.

Aber die Wirkung der Spiralwirbel ist damit nicht erschöpft. Die Kraft, welche sie dem Nachlauf und damit auch der Rückerstattung an die Platte entziehen, wird durch sie nach hinten gelenkt und muß in der Strudelbildung einen absaugenden, den Widerstand erhöhenden Einfluß auf das Wasser des Nachlaufs und der gesamten Wirbelung hinter der Platte, besonders aber an dem seitlichen Areal ausüben. Sobald bei  $45^\circ$ — $40^\circ$  die entstehenden Zöpfe

hinter dem Wirbel an der Eintrittsstelle des Nachlanfs erscheinen, muß sich auch ihre Wirkung bemerkbar machen, und diese Wirkung muß um so größer werden, je mehr sie sich seitwärts rückend der Platte nähern und ihre Saugung unmittelbar auf die Platte und die hier zögernd rotierenden Enden des oberen Wirbelbogens gerichtet ist. In dem Moment, wo jederseits die Verschmelzung der Spiralstrudel mit dem oberen Wirbelbogen erfolgt und der Strudel den Inhalt des Wirbels fortzusaugen beginnt, muß seine Wirkung maximal sein, denn das System der Widerstandsströmungen ändert von nun an nicht mehr seinen Charakter, sondern fällt gleichförmig mit abnehmendem Neigungswinkel in sich zusammen.

Wie groß der absolute Betrag ist, um den der Widerstand der Rückseite durch die Saugung der Strudel an den Seitenteilen der Platte erhöht wird, läßt sich zwar aus dem Stromverlauf nicht zahlenmäßig angeben, aber aus der ganzen Erscheinung der Vorgänge im stereoskopischen Bilde und an den von mir danach hergestellten Strommodellen läßt sich entnehmen, daß der Betrag jedenfalls ein erheblicher sein wird, der durch dynamometrische Messungen bei den verschiedenen Neigungswinkeln zu ermitteln wäre.

Leider eignet sich meine Versuchseinrichtung wegen zu geringer Länge des Wasserbehälters nicht zur Ausführung solcher Messungen. Es ist mir auch aus der Literatur über den Wasserwiderstand nicht ein Fall bekannt, in dem einer der zahlreichen Autoren, die sich mit Messungen befaßt haben, eine auffällige Erhöhung des Widerstandes zwischen  $40^\circ$  und  $30^\circ$  festgestellt hätte. Die verschiedenen Formeln ergeben immer einen sprunghaften, glatten Verlauf der Widerstandskurven, niemals ein Ansteigen zwischen den eben bezeichneten Neigungswinkeln. Wahrscheinlich hat man die beobachteten Abweichungen auf Fehler in den Instrumenten zurückgeführt und die erhaltenen Werte ausfallen lassen, oder einen glatten Kurvenverlauf durch Ausstraken erhalten, weil man einen nicht kontinuierlichen Abfall der Kurve für paradox hielt.

Wir besitzen aber in der Literatur des Luftwiderstandes die sehr bemerkenswerten Untersuchungen des englischen Forschers Dines (Proceedings of Royal Society 1890, No. 294), der die Größe des Widerstandes an schrägen Platten sehr sorgfältig gemessen hat. Dines brachte den einwandfreien Nachweis, daß der Luftwiderstand an solchen Platten mit fallendem Neigungswinkel einen ganz anderen Charakter hat, als man nach den vorhandenen Formeln anzunehmen gewohnt ist.

Er stellte fest, daß die Widerstandskurve (Fig. 14) zwischen  $40^\circ$  und  $35^\circ$  Neigung eine sehr überraschende, fast plötzliche Steigung zu einer Höhe erfährt, die noch über den Widerstand der Platte in der vollen Querstellung hinausgeht, und daß von dieser Höhe ein gleichförmiger Abfall bis  $0^\circ$  Neigung stattfindet. Das überaus merkwürdige und unerklärliche, mit allen früheren Vorstellungen über die Natur des Widerstandes in Widerspruch stehende Ergebnis veranlaßte Dines zu mehrfachen Nachprüfungen nach verschiedenen voneinander unabhängigen Methoden. Er erhielt stets dasselbe Resultat, dessen Richtigkeit füglich nicht bezweifelt werden konnte, so unnatürlich es auch zu sein schien.

Kurve des Widerstandes an schrägen Platten nach Dines.

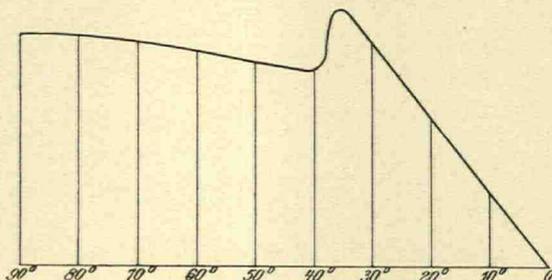


Fig. 14.

Unserer photographischen Analyse der Widerstandsvorgänge verdanken wir nunmehr die volle Aufklärung des mechanischen Zusammenhanges der Vorgänge, welche den eigenartigen Charakter der Widerstandskurve Dines' bedingen. Die Ursache der plötzlichen Erhebung der Widerstandskurve liegt in dem Auftreten der seitlichen Spiralwirbel, deren Strudel den Wirbelring sprengen und sich mit dem übrigbleibenden Oberrandbogen des Ringes zu einem M-förmigen, (offenen, durch die Spiralzöpfe abfließenden) Wirbelsystem verbinden. Sobald diese Verbindung hergestellt ist, saugen die Randstrudel das Wasser aus dem hinter der Platte verbliebenen vorderen Wirbelbogen. Da sich gleichzeitig der Zufluß des Wassers verringert, so erfolgt eine momentane Steigerung des Saugungswiderstandes, die in dem plötzlichen Ansteigen der Widerstandskurve ihren Ausdruck findet. Es bleibt besonders darauf hinzuweisen, daß sich die Messungen von Dines auf Luftwiderstand beziehen und daß daher eine Wiederholung derselben in dem Medium Wasser dringend erforderlich ist. An der Ähnlichkeit der Widerstandskurven beider Medien kann nach den vorstehenden Ausführungen wohl kaum ein Zweifel

bestehen; es wäre aber immerhin denkbar, daß infolge der hohen Elastizität und Dehnbarkeit der Luft der plötzliche Anstieg beider Kurven um eine geringe Differenz der Neigungswinkel gegeneinander verschoben wäre und im Wasser etwas höher hinauf läge als in der Luft. Ich glaube auch nach meinen Photogrammen Grund zu der Vermutung zu haben, daß eine solche Verschiebung eintritt, wenn die Fahrgeschwindigkeit wechselt, da die Entwicklung der Spiralwirbel bei höheren Geschwindigkeiten auch bereits unter etwas größeren Neigungswinkeln der Platte beginnt.

Aus den messenden Untersuchungen von Avanzini, Joëssel, Kummer, Langley u. a. Autoren ist bekannt, daß der Angriffspunkt der Resultante des Widerstandes aus dem Mittelpunkt einer Platte um so weiter gegen den

**Staulinien an schrägen Platten von verschiedener Breite.**

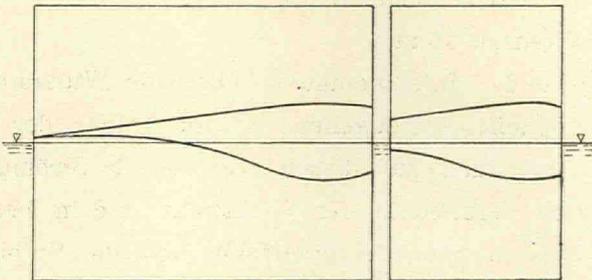


Fig. 15.

Vorderrand rückt, je kleiner der Neigungswinkel wird und daß daher die vordere Flächenhälfte stärker beansprucht wird als die hintere. Auch diese Tatsache findet in unseren Strömungsphotogrammen ihre Bestätigung und Erklärung. Das Areal der hinteren Plattenhälfte trägt nicht nur an der Vorderseite den geringen Druck, sondern wird namentlich auch an der Rückseite durch die Auffüllung des Nachlaufs stark entlastet, und so die Saugung und der Gesamtwiderstand auf ein Minimum gebracht.

An zwei rechteckigen Platten von verschiedener Breite aber gleichem spitzen Neigungswinkel erhält man Druckprofile von der Form Fig. 15. Die geringe Belastung des Hinterrandareals der breiten Fläche wird dadurch veranschaulicht. Der Gesamtwiderstand der breiten Platte würde ein erheblich größerer sein, wenn das Areal statt in der Breite, in der Länge entwickelt wäre, so daß das Auffüllungsgebiet am Hinterrande in Fortfall käme. Daher ist für die Erzielung eines möglichst großen Widerstandes bei kleinen Neigungs-

winkeln die Flächenformung immer auf große Vorderrandlängen zu richten, während bei mehr senkrechtem Auftreffen des Mediums die größere Breitenentwicklung nach der quadratischen Form hin den höheren Widerstand ergibt.

Im Schiffbau kommen diese Fragen bei der Gestaltung des Steuerruders zur Geltung. Man wird dabei zu beachten haben, daß nach der Widerstandskurve von Dines die maximale Druckwirkung bei ca.  $35^{\circ}$  Neigung erreicht wird und daß durch ein weiteres Überlegen des Ruders die Ablenkung des Schiffes nicht gesteigert werden kann.

Von großem Interesse sind sodann die mancherlei Fragen des Luftwiderstandes an Segeln, die bei der Ähnlichkeit der Vorgänge sehr gut an segelförmigen Platten im Wasser untersucht werden können. Ich habe mich in dieser Richtung bereits mit Herrn Max Oertz in Verbindung gesetzt und hoffe über die bereits in Angriff genommenen Arbeiten in einer der nächsten Versammlungen berichten zu können.

Auf weitergehende Untersuchungen über die Widerstandsvorgänge an Drachen und Flugflächen einzugehen, ist hier nicht der Ort. Erwähnen möchte ich nur, daß auch auf diesem Gebiete die Strömungsphotogramme sehr wesentlich zum Verständnis der Wirkungen und im besonderen der Bedingungen des dynamischen Gleichgewichts und der Stabilität beigetragen haben.

### III. Über die Erscheinungen der sogen. „Hautreibung“ oder des Oberflächenwiderstandes

habe ich in meinem Vortrage (Jahrbuch 1905 S. 74 ff.) Mitteilungen gemacht, die ich durch das Folgende ergänzen möchte. Die Vorgänge wurden damals an der Hand einiger Photogramme demonstriert, die mit fahrender Kamera hergestellt waren, so daß die Versuchsplanken in einem Strom zu ruhen scheinen. Besser noch als an den Reproduktionen (Fig. 5—9) zeigte sich an den Originalen der ungleiche Einfluß, den verschieden rauhe Oberflächen auf den benachbarten Strom ausüben. Die bekannte, nach hinten an Dicke zunehmende wirbelnde Wasserschicht, deren Bewegungen den auf Rechnung der sogen. Hautreibung zu setzenden Kraftverlust bedingen, war dabei an dem geschlängelten Verlauf der Stromlinien nicht besonders klar zu erkennen, da bei dieser Versuchsanordnung die kleinen wandernden Wirbel in Form feiner Zykloiden in die Erscheinung treten mußten.

Die Vorgänge der sogen. Hautreibung.

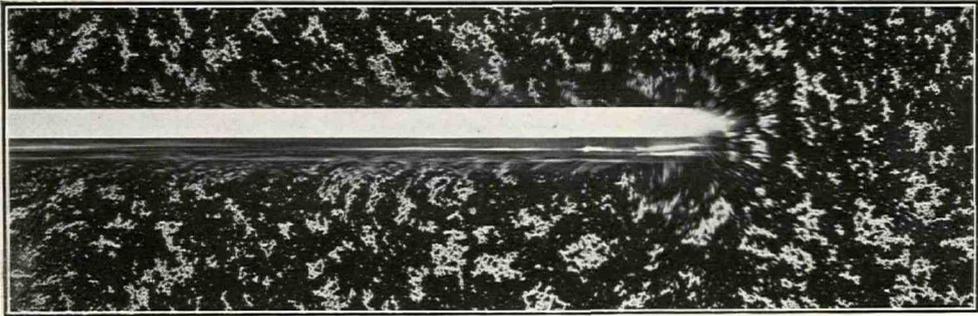


Fig. 1. Glatte Planke. Vorderende. Stehende Kamera. Fahrt  $v = 37$  cm.<sup>1</sup>

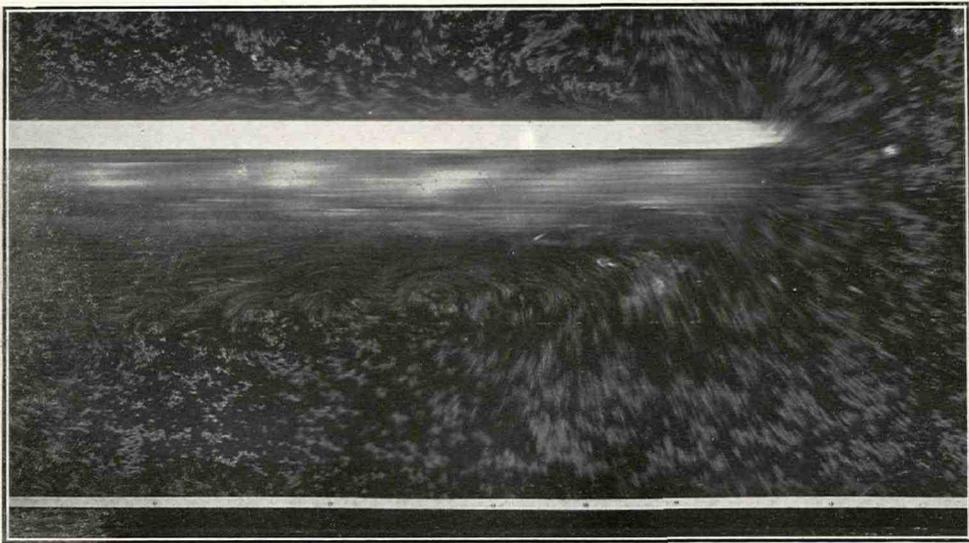


Fig. 2. Einseitig mit Seepocken (Balanen) beklebte Planke. Stehende Kamera. Fahrt  $v = 37,5$  cm.

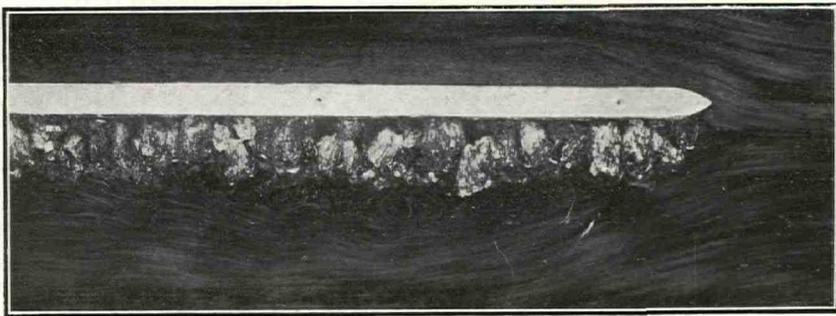
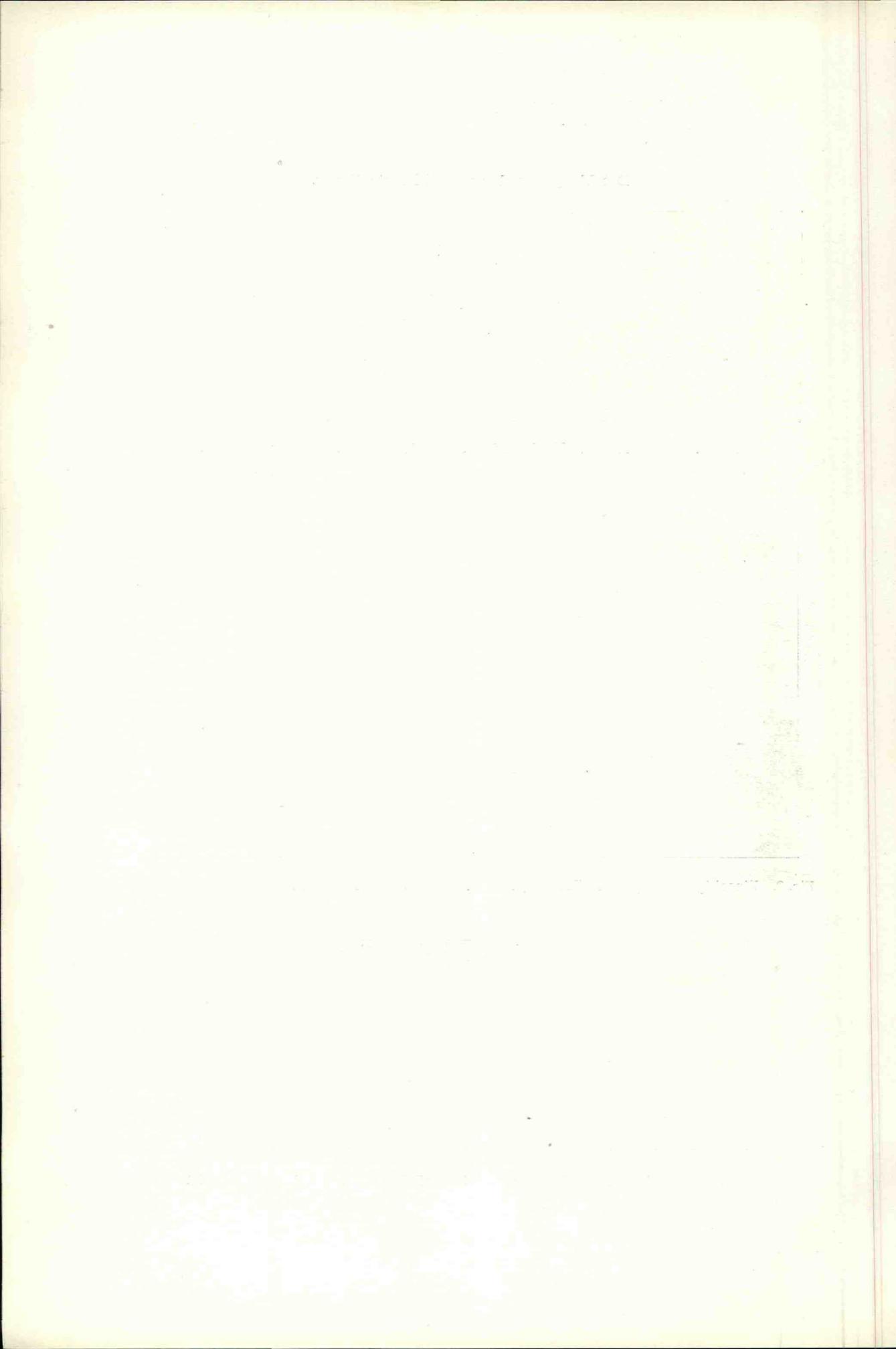


Fig. 3. Gleichzeitig mit Fig. 2 aufgenommenes Stromlinienbild. Die Balanenschicht ist sichtbar.



Um die Wirbel selbst sichtbar zu machen, habe ich seither eine Anzahl von Photogrammen mit stehender Kamera aufgenommen, auf denen somit das Wasser in Ruhe und die Modelle in der Fahrt dargestellt sind. Die Versuchsplanken wurden dabei um eine weitere von 1 m Länge vermehrt, die an der einen Seite glatt lackiert, an der anderen aber mit einer zusammenhängenden Schicht von Seepocken (*Balanus*) beklebt war. Die Balanen wurden in derselben Form benutzt und angeordnet, wie sie im Dock vom Boden eines großen Seglers, der 18 Monate gefahren hatte, beim Reinigen gewonnen waren. Dieselbe Planke wurde zum Vergleich vorher ohne den Anwuchs der Balanen mit beiderseits lackierten Oberflächen benutzt und zur Vermeidung eines zu kleinen Maßstabes so eingestellt, daß das eine Mal das Vorderende, dann die Mitte und zuletzt das Hinterende auf der Mattscheibe erschien. Sodann wurden immer gleichzeitig durch denselben Lichtblitz zwei Aufnahmen gemacht, indem eine mitfahrende Kamera unmittelbar neben einer zweiten, an einem Querbalken feststehenden entlangfuhr und die elektrische Zündung des Blitzes so eingestellt wurde, daß sie in dem Moment erfolgte, wo beide Apparate nebeneinander waren. Da es sich um Aufnahmen im Niveau handelte, so geschah die Messung der Fahrgeschwindigkeit durch Funkenchronographie (vergl. S. 7).

Auf Tafel XI habe ich zwei Abbildungen nebeneinander gestellt, welche die Widerstandsvorgänge an der glatten, sowie an der einseitig mit einer Balanenschicht bedeckten Planke wiedergeben. Das dritte Bild entstammt der fahrenden Kamera und soll neben den Stromlinien auch die Form der Planke und die Dicke der Balanenschicht veranschaulichen. Die beiden ersten, mit stehender Kamera aufgenommenen Photogramme, lassen die vorderen Konturen der Planke und die der Balanen verwischt erscheinen, da ja die Planke während der Aufnahme vorüberbewegt wurde. Es ist aber mit Hilfe des dritten Bildes leicht, auf dem zweiten den Bereich der Balanen festzustellen, da beide gleichzeitig und im gleichen Maßstabe aufgenommen wurden.

Da die Fahrgeschwindigkeit bei beiden Versuchen dieselbe war (37 cm/sek), so übersieht man mit einem Blick den mächtigen Einfluß, den eine bewachsene Schiffshaut auf die Fortbewegung ausübt. Dort, an den glatten Flächen eine kaum 1 cm dicke, nach hinten nur unmerklich dicker werdende Schicht, die zögernd der Bewegung der Planke folgt. Hier ein mächtiger Strom mitgerissenen Wassers, dessen saugende Wirkung über die schräg ansteigende Reihe der Wirbel weit in das umgebende Medium hineingreift. Die strahlen-

förmigen Stromlinien am vorderen Plattenende bezeichnen die Richtungen, in denen das Wasser aus der Bahn verdrängt wird. Die auf der zweiten Abbildung sichtbare stehende Wirbelreihe wird von der Planke am Ort ihrer Entstehung zurückgelassen. Die im dritten Bilde vorn an den Seiten der Planke liegenden Wirbel stehen um den Unterrand der Planke herum miteinander in Verbindung und entsprechen, wie ich früher nachgewiesen habe, dem halben Wirbelring hinter einer eingetauchten Platte. Sie werden in ihrer Lage durch den Sog oder Minderdruck hinter der erkennbaren Bugwelle festgehalten und daher von der Platte in gleicher Geschwindigkeit fortbewegt und mitgenommen. Zwischen diesen beiden sichtbaren Wirbelarten sind in dem Reibungsstrome selbst zahlreiche andere Wirbel vorhanden, deren Vorwärtsbewegung geringer ist als die der letztgenannten Wirbel und die daher mehr oder weniger hinter der Planke zurückbleiben. Sie sind im Bilde leicht an den geschlängelten, zyklidenartigen Linien des Reibungsstromes zu erkennen. In dieser Form erscheinen auch die stehenden Wirbel des zweiten Bildes im dritten und die mitfahrenden des dritten im zweiten. Würde man eine Kamera mit einer geringeren Fahrgeschwindigkeit als die des Wagens benutzen, so würde ein Teil der nachziehenden Wirbel in der gewöhnlichen Form erscheinen.

Die Reibungsströme an dem mittleren Teile der beiden Planken werden durch die Abbildungen (Taf. XII u. XIII) dargestellt. Die beiden ersteren mögen wieder zum Vergleich der Erscheinungen bei nahezu gleicher Geschwindigkeit (42 resp. 43 cm) dienen, die letzten beiden zeigen, daß auch bei großem Unterschied der Fahrgeschwindigkeit die Dicke der Reibungsschicht nicht merklich zunimmt, daß vielmehr nur die Beschleunigungen innerhalb derselben variieren. Eine Zunahme der Schichtdicke mit der Entfernung vom vorderen Ende der Planke tritt bei der Balanenplanke immer sehr schön hervor; bei der glatten Planke ist sie auch bei der Geschwindigkeit von 87 cm kaum zu erkennen.

Am hinteren Abschnitt der Planke bleiben die Erscheinungen ohne wesentliche Änderung (Taf. XIV) bestehen. Zuletzt vereinigen sich beide Reibungsschichten hinter dem Ende der Planke und erzeugen so einen breiten, von stehenden Wirbeln flankierten Nachstrom, dessen Bewegungsenergie der Planke entzogen ist und nach und nach durch die Wirbelungen aufgezehrt wird. Die flankierenden Wirbel sind dieselben, die durch die Stabilität ihrer Achsen am Nachlauf der Schiffe das seitliche Eindringen der rauhen Wellen verhindern und die breite Spur des Fahrzeuges noch lange blank erhalten.

Die Vorgänge der Hautreibung. Stehende Kamera.

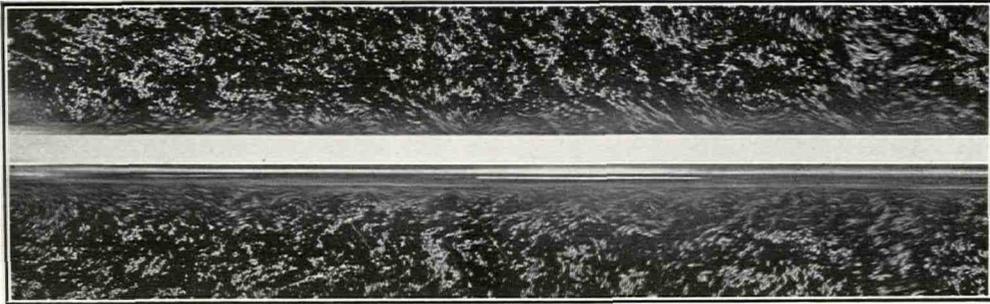


Fig. 1. Glatte Planke. Mittlerer Teil. Fahrt  $v = 42$  cm.

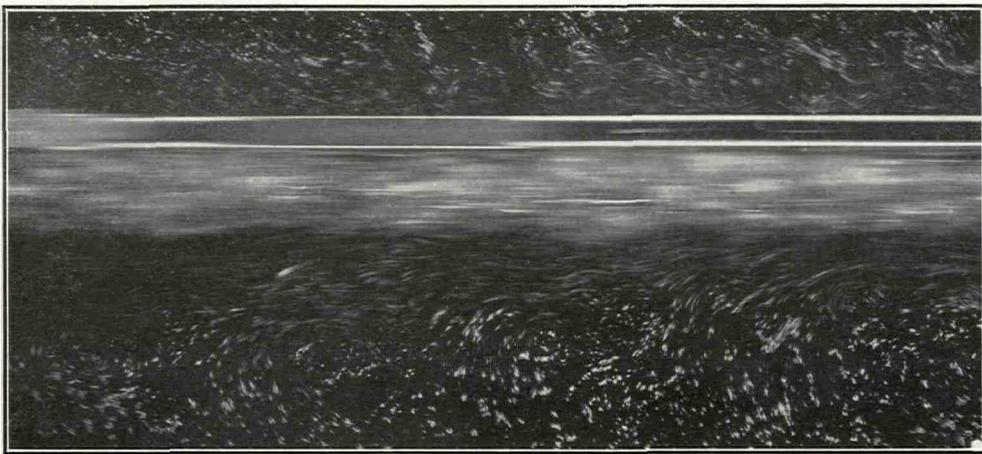
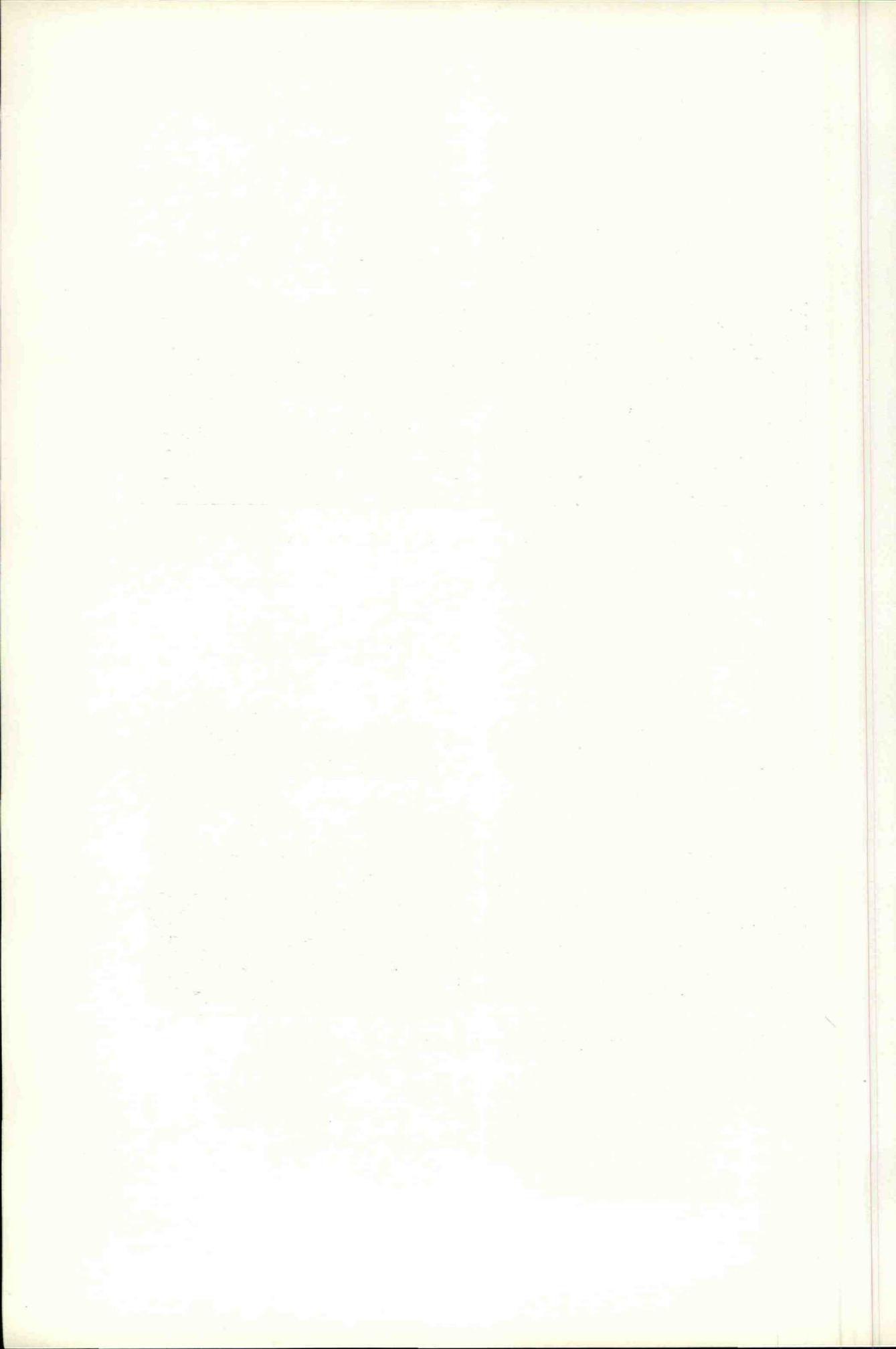


Fig. 2. Balanenplanke. Fahrt  $v = 43$  cm.



Die Vorgänge der Hautreibung. Stehende Kamera.

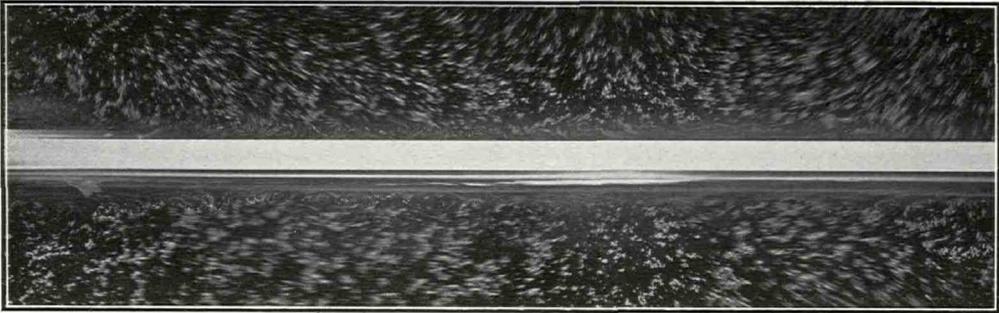


Fig. 1. Glatte Planke. Mittlerer Teil. Fahrt  $v = 87$  cm.

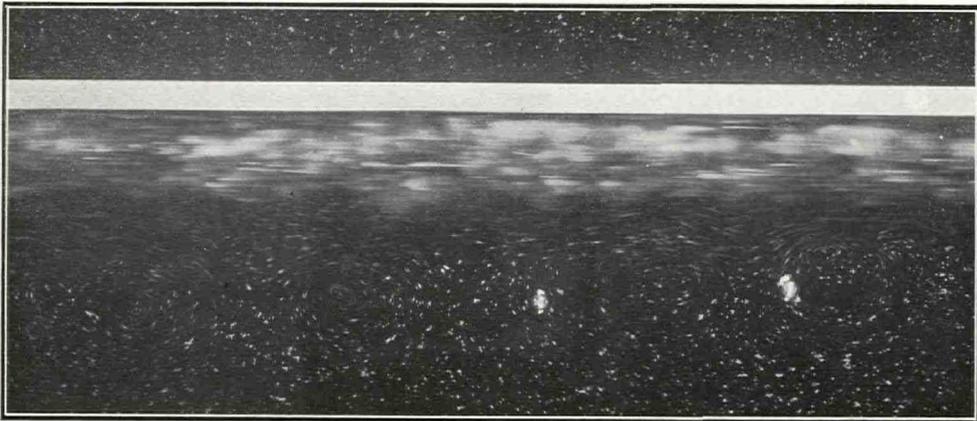


Fig. 2. Balanenplanke. Mittlerer Teil. Fahrt  $v = 27$  cm.

Die Vorgänge der Hautreibung. Stehende Kamera.

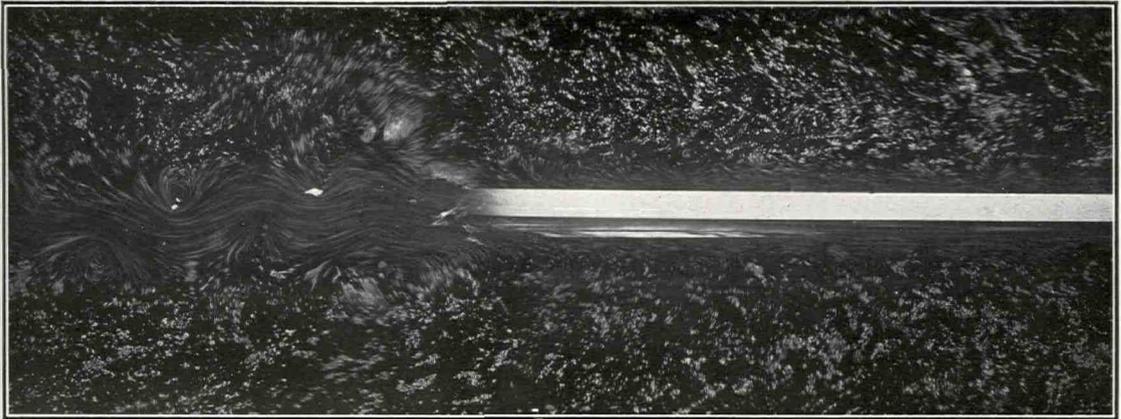


Fig. 1. Glatte Planke. Endabschnitt. Fahrt  $v = 53$  cm.

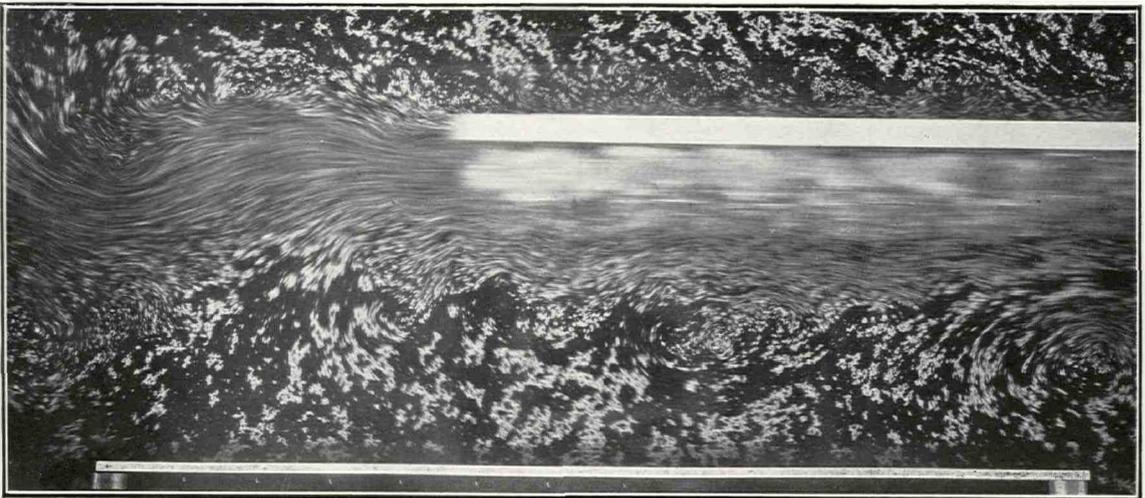
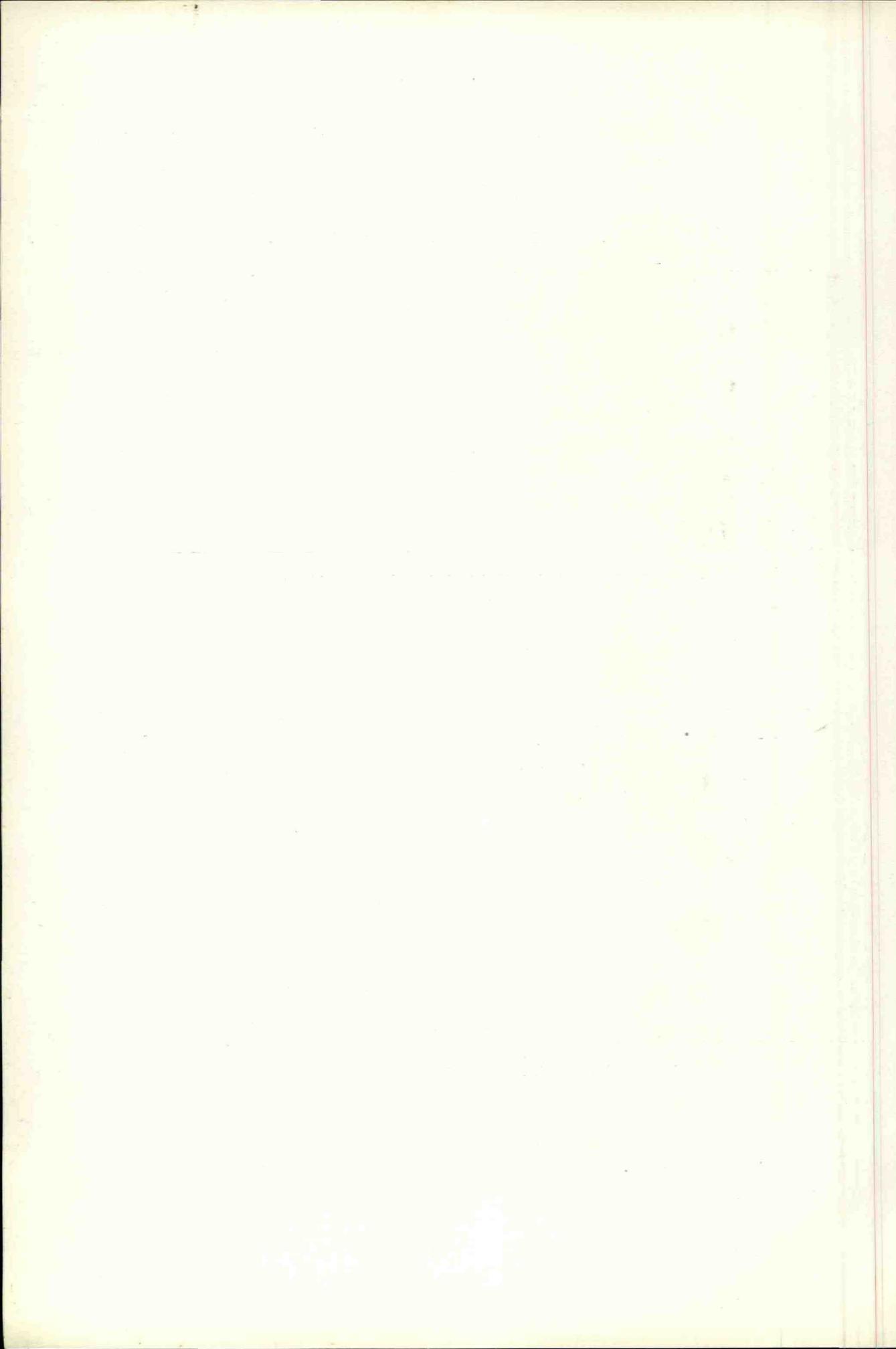


Fig. 2. Balanenplanke. Endabschnitt. Fahrt  $v = 39$  cm.



Ganz analoge Wirbelbildungen, wie sie hier mit besonderer Rücksicht auf die Vorgänge an der Schiffshaut zur Anschauung gebracht wurden, treten in der Natur überall auf, wo Wasser oder Luft an festen Körpern oder an einander entlang fließen, wie auch an der Grenze verschiedener, bewegter Flüssigkeiten oder Luftarten.

Das bekannteste Beispiel hierfür sind die Riffelungen des Sandes, die überall am Strande des Meeres oder an sandigen Ufern der Flüsse und Seen zu beobachten sind\*).

Ähnliche Riffelungen erzeugt der Wind im Sande der Dünen, und es liegt nahe, daß auch die Riffeln und Wellen an der Wasseroberfläche als Reibungsphänomene an der Grenze zweier flüssiger Medien in ähnlicher Weise zu

\*) Wie diese in ihrer Anordnung und Form so regelmäßigen Furchen entstehen und unterhalten werden, kann man am besten sehen, wenn man bei hellem und ruhigen Wetter seinen Standort im flachen Wasser über einer sandigen Fläche am Strande wählt. An den überall am Boden vorhandenen schwebenden Teilchen von pflanzlichem Detritus erkennt man leicht, daß in jeder kleinen Furche ein Wirbel rollt (Fig. 16a), der, von jeder hereinlaufenden flachen Dünungswelle angetrieben, die Sandkörnchen aus der Tiefe der Furche an dem steilen, der See hin liegenden Hange der Rille emporhebt und von dem vorüberziehenden

Riffelbildung im flachen Sande: a, durch Wirbelwellen von Wasser und Sand während des Auflaufens einer Dünungswelle, b, beim Rücklauf.

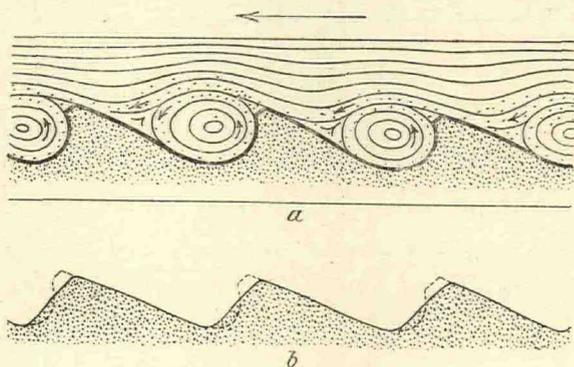


Fig. 16.

Strome über die daran liegenden Riffel, austreuen läßt. Der Grund der Furche wird dadurch der Rundung des Wirbels genau angepaßt, und wo der Wirbel sich oben von dem Steilhang der Rille entfernt, entsteht vorübergehend durch den hochgehobenen Sand ein leistenförmiger Vorsprung, der das hohle Wirbelbett nach oben scharf begrenzt. Sobald nun der Rücklauf der Dünung einsetzt, wird der Wirbel zerstört, und jene Sandleiste, die nur durch die Kraft des Wirbels getragen wurde, sinkt den Hang hinab, verschüttet die Rundung des Wirbelbettes soweit, daß die Furche unten kantig erscheint (Fig. 16b). Das Spiel wiederholt sich bei jedem Auf- und Ablauen der Dünung.

erklären sind. Das schönste und auffälligste Beispiel dieser Art ist aber die Bildung von Wellen und Reibungswirbeln an der Grenze zwischen flüssigen und gasförmiger Kohlensäure. Neigt man die Glasröhre, welche die Kohlensäure enthält, zur Seite, so bilden sich an der Oberfläche der Flüssigkeit durch die Reibung an dem nach oben gehenden Gasstrome ungemein heftige, nach oben überschießende Wellenkämme aus (Fig. 17), welche die Reibungswirbel des Gases förmlich umhüllen und mit ihnen verschmelzen. Die Ursache der überraschend lebhaften und deutlichen Art der Erscheinungen liegt offenbar in dem geringen Dichtigkeitsunterschied bei Aggregatzustände, denn je mehr sich die Temperatur der Röhre in der Hand des Beobachters den kritischen Punkt  $31^{\circ}$  nähert, an dem die Flüssigkeit gasförmig wird und der Unterschied verschwindet, um so stürmischer werden die Erscheinungen.

**Wirbelwellen zwischen flüssiger und gasförmiger Kohlensäure in einer seitwärts geneigten Gasröhre. Die dicken Linien bezeichnen die Bewegung der flüssigen, die feinen Linien die der gasförmigen Kohlensäure. (Schematisch.)**

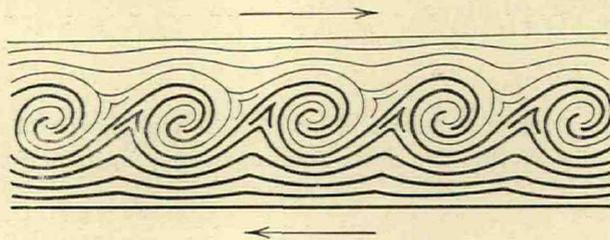


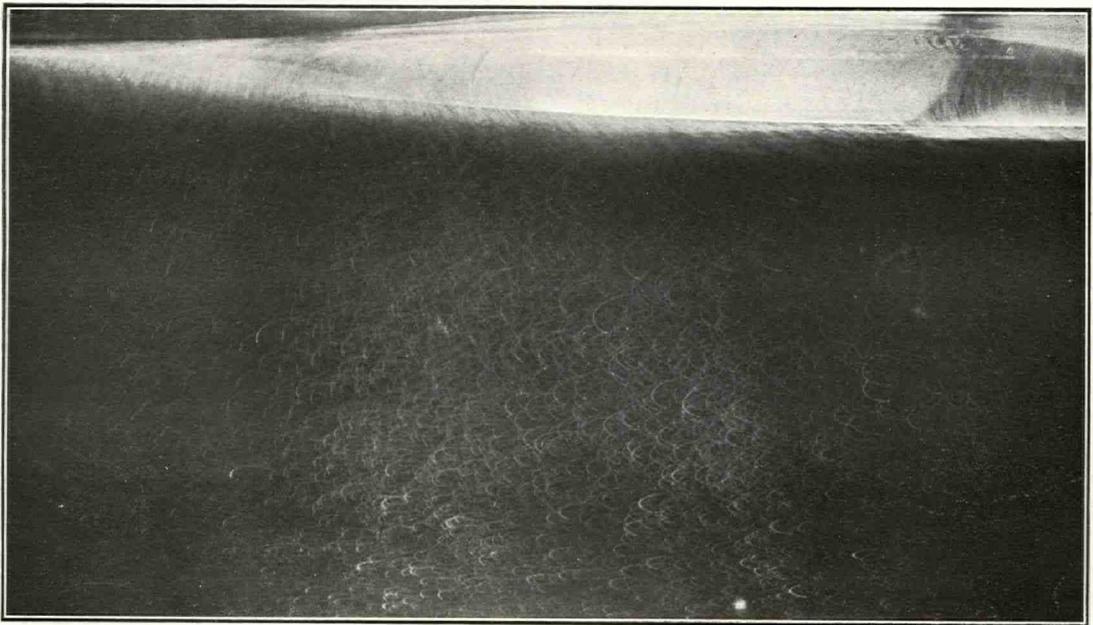
Fig. 17.

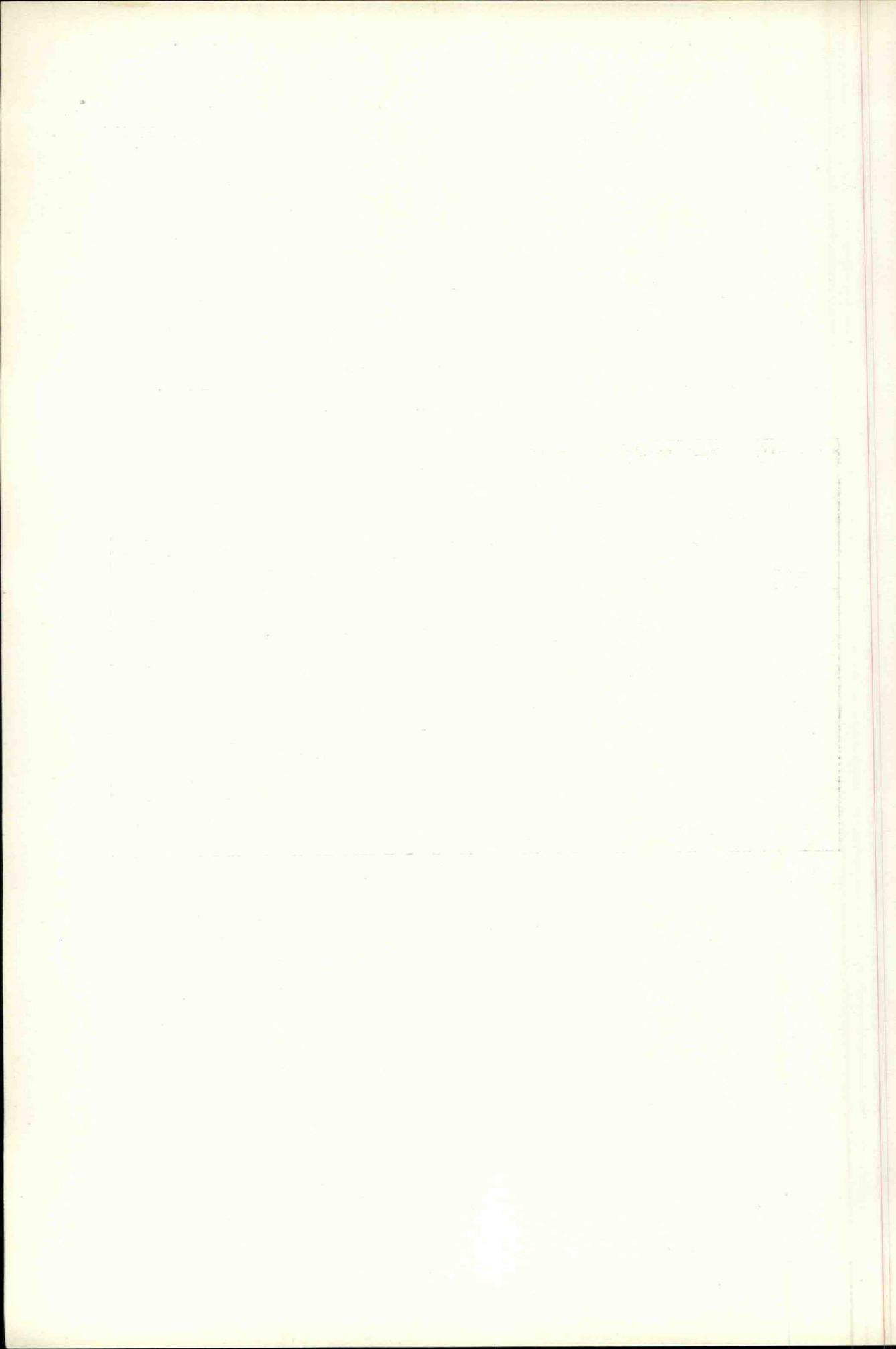
Schließlich darf ich hinzufügen, daß auch die Zirus- oder Lämmerwölkchen in unserer Atmosphäre, die zuweilen in der Anordnung eine große Ähnlichkeit mit den Sandriffeln und Wellen haben, bereits von Helmholtz als Reibungsphänomene an der Grenze zweier Luftschichten von etwas verschiedener Temperatur und Dichte gedeutet wurden. Wir hätten es demnach auch dort mit großen Reibungswirbeln zu tun, in deren Innern durch Zentrifugalwirkung Druckverminderung und Kondensation des Wassers zur sichtbaren Wolke erfolgt sei.

#### IV. Über die Vorgänge in den Wasserwellen.

Für das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen einem fahrenden Schiff und den Wellen, die dasselbe in seiner Umgebung hervorruft und unterhält, erwies sich eine nähere Untersuchung der Vorgänge in freien Wellen

Elliptische Bahnen der Wasserteilchen im Innern einer Welle während des Verlaufs  
von etwa einer halben Wellenlänge.





mit den mir zu Gebote stehenden photographischen Hilfsmitteln als wünschenswert. Die Ergebnisse führen zum Teil über den nächstliegenden Zweck hinaus, sind aber doch, wie ich glaube, hinreichend bemerkenswert, um hier kurz zusammengefaßt zu werden.

Unsere Kenntnisse über die Entstehung und die Vorgänge innerhalb der Wasserwellen verdanken wir bekanntlich der klassischen Arbeit der Gebrüder Ernst Heinrich und Wilhelm Weber, die im Jahre 1825 in einer aus Glastafeln gebildeten Wellenrinne die Bewegungen an beigemengten Bernsteinkörnchen beobachteten. Sie fanden, daß in einer Welle die oberen Wasserteilchen in elliptischen Bahnen schwingen und daß die senkrechten Achsen dieser Ellipsen nach der Tiefe zu kürzer und kürzer werden, bis endlich in der etwa hundertfachen Tiefe der Wellenhöhe die Wasserteilchen nur noch eine horizontale oszillierende Bewegung ausführen.

Vor einer Reihe von Jahren hat dann Prof. Marey in Paris versucht, die elliptischen Bahnen photographisch festzulegen. [Er bediente sich zur Sichtbarmachung der Bewegung kleiner, etwa erbsengroßer, silberglänzender Kügelchen, die auf der Wasseroberfläche in einem Glasbehälter schwammen. Zur Beleuchtung diente das Sonnenlicht, das vermittels eines Spiegels von unten her durch das Wasser geworfen wurde. Um die volle Bahn eines Wasserteilchens im Bilde zu erhalten, muß natürlich die photographische Platte auch so lange exponiert werden, wie der Vorübergang einer Welle dauert. Die in den Comptes Rendus veröffentlichten Abbildungen Mareys ließen eine Wiederholung der Versuche zweckmäßig erscheinen. Ich habe daher eine Anzahl photographischer Aufnahmen von Wellen hergestellt, die nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Innern zahlreiche sichtbare Körperchen enthielten. Die Beleuchtung erfolgte von unten mit einem Magnesium-Zeitlicht von etwa  $1-1\frac{1}{2}$  Sekunden Brenndauer. Es ergab sich eine Schwierigkeit bei der Erzeugung der Wellen. Kleine laufen voraus, andere, die nicht genau in der Längsrichtung des Kastens fortschreiten, werden seitlich reflektiert, endlich tritt Reflexion am Ende des Kastens ein, die bald im Gesichtsfeld Interferenzen aller Art hervorruft, so daß es kaum möglich ist, eine vollkommen glatte Welle zu erhalten und dabei auch den Zeitpunkt und die Dauer der Belichtung so genau zu treffen, daß eine volle, klare Welle im Bilde erscheint. Immerhin wird man aus Fig. 1 Taf. XV mit genügender Deutlichkeit die elliptische Form der Bahnen erkennen, auf denen sich die in der Welle schwingenden Wasserteilchen bewegen, man wird sehen, daß diese Bahnen im Niveau mehr kreisförmige, in der Tiefe mehr abgeplattete Ellipsen

sind; und der Vergleich der Ellipsenbogen auf der rechten und linken Seite wird die verschiedenen Schwingungsphasen der Teilchen hervortreten lassen. Daß die Ellipsen nicht geschlossen sind, liegt daran, daß die Belichtung vor Ablauf der vollen Wellenlänge beendet war; sie hätte etwa doppelt so lange währen müssen, um die ganze Schwingung auf der Platte zu zeichnen.

Außer diesen, die Beobachtungen der Gebrüder Weber bestätigenden Photogrammen der Wellenschwingungen habe ich dieselben Vorgänge auch noch durch eine Reihe von Momentaufnahmen zur Darstellung gebracht, in denen jedes sichtbare Körperchen im Wasser nur einen kleinen Bruchteil seiner elliptischen Bahn zurückgelegt hat. Diese Bilder gewähren einen so gänzlich abweichenden Eindruck gegenüber den vorangegangenen, daß man auf den ersten Blick einen durchaus verschiedenen Vorgang vor sich zu haben glaubt. (Fig. 1 u. 2 Taf. XVI.)

**System der Kraftlinien im Innern einer symmetrischen Dünungswelle. (Schematisch.)**

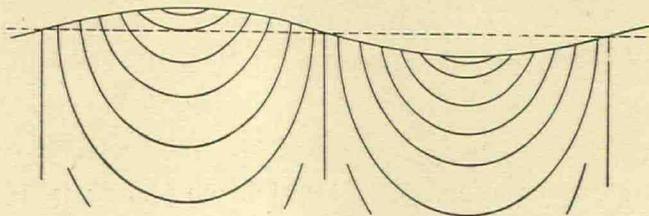


Fig. 18.

Da die Photogramme wegen der erwähnten Interferenzen im einzelnen mancherlei Unregelmäßigkeiten zeigen, füge ich der Deutlichkeit halber die schematische Textfigur 18 hinzu, deren Elemente aus mehreren Photogrammen zusammengetragen sind.

Auf dem Gipfel jedes Wellenberges und in der Tiefe jedes Tales liegt der Mittelpunkt eines Systems elliptischer, weit hinabreichender Kurven. Die Schnittpunkte der Wellenlinie mit dem Spiegel des ruhenden Wassers bezeichnen die Grenzen der hintereinander folgenden Kurvensysteme. Die Bewegungen im Wellental sind im ganzen nach hinten gerichtet, die im Wellenberg nach vorn.

Zum Verständnis dieser eigenartigen Kurvensysteme ist zunächst festzustellen, daß es sich nicht um Stromlinien in dem gewöhnlichen Sinne handelt. Kein einziges Wasserteilchen wandert auf diesen elliptischen Linien nach vorn durch den Wellenberg oder nach hinten durch das Tal. Die Linien sind nur die momentanen, in jedem Augenblick veränderten Bewegungs-

Kraftlinien im Innern der Wellen.

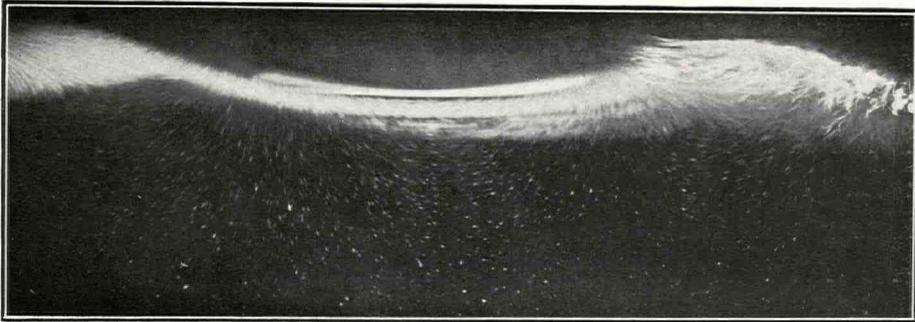


Fig. 1. Wellental zwischen zwei überschießenden Wellenbergen.

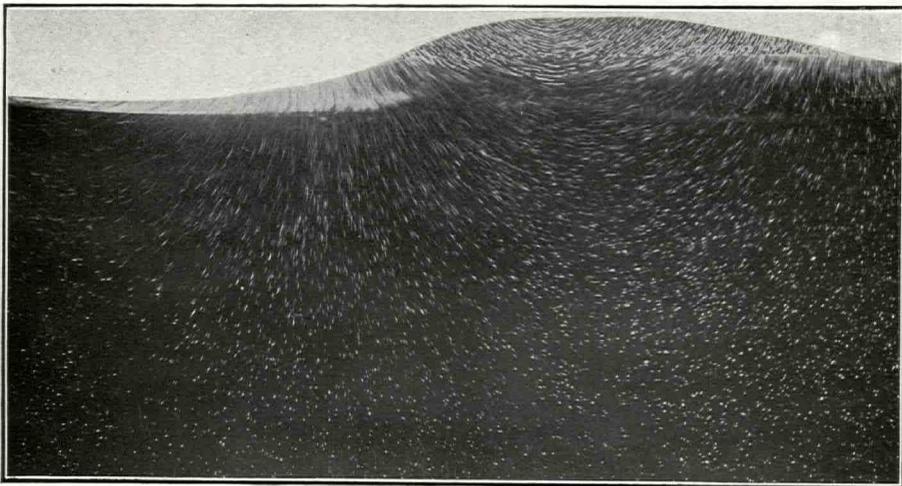
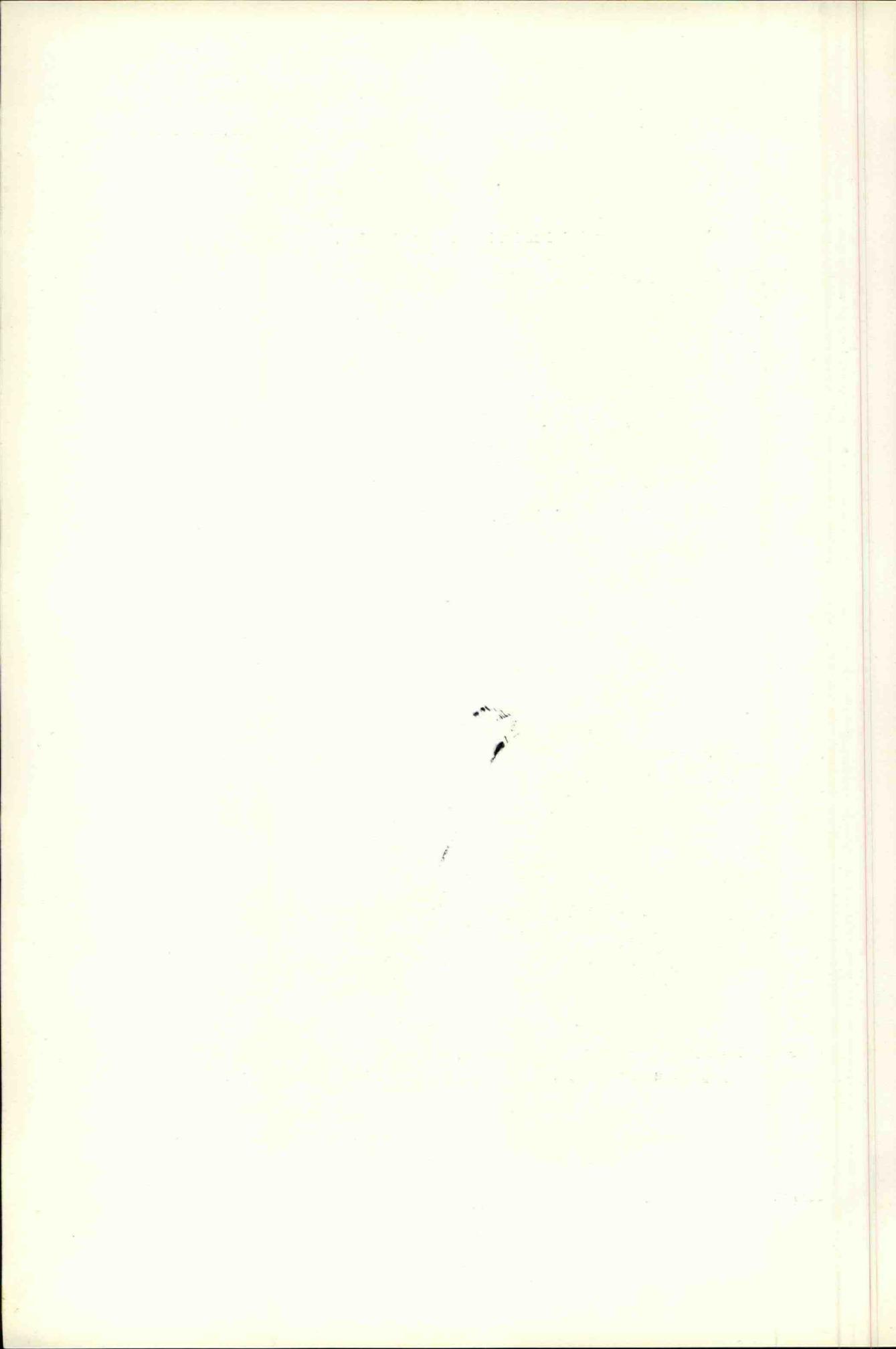


Fig. 2. Wellenberg und -tal.

(Der Gipfel des Berges gelangte in Folge der Versuchsanordnung nicht mit auf die photographische Platte und daher hier nach anderen Aufnahmen ergänzt.)



richtungen der in den verschiedenen Phasen ihrer Ellipsen schwingenden Wasserteilchen. Es sind gleichsam stationäre Kraftliniensysteme, die mit der Welle durch das Wasser fortschreiten, so daß die Flüssigkeitsteile nach und nach aus dem Bereich der vorderen Kraftlinien der Welle in den der nachfolgenden übergehen und so ihre elliptischen Schwingungen vollziehen.

Da jeder auf dem Wasser schwimmende, eingetauchte oder untergetauchte Körper unter dem Einfluß der Wellenkräfte steht, so kann man die Art der Wirkung dieser Kräfte auf den Körper erkennen, sobald sie ihrer Richtung und Größe nach gegeben sind. Unsere Photogramme zeigen mit hinreichender Klarheit die Richtung der Wellenkräfte. Die zahlenmäßige Ermittlung ihrer Größe aus der Länge der Linien wäre möglich, soll aber, weil zu umständlich, hier nicht versucht werden. Soviel ist aber jedenfalls deutlich zu sehen, daß dieselben an der Oberfläche am größten sind und nach der Tiefe zu abnehmen, was ja auch mit der Größe der elliptischen Schwingungsbahnen der Einzelteilchen übereinstimmt.

Die Wirkung der Wellenkräfte auf schwimmende Körper ist nun sehr wesentlich von dem Verhältnis der Körperlänge zur Wellenlänge abhängig. Ein kleiner Gegenstand, ein Stück Holz, das bei ruhiger Luft zwischen Dünungswellen liegt, wird nicht nur gehoben und gesenkt, sondern auch, wie die Kraftlinien zeigen, von jedem Wellenberge eine Strecke vorwärts-geschoben und von jedem Tal im allgemeinen ebensoweit rückwärts bewegt, so daß es im ganzen, wie ein Wasserteilchen, der Oberfläche eine kreisende Bahn durchläuft und an seinem Orte verharrt. Diese Bewegung ist jedermann aus eigener Beobachtung bekannt.

Ein größerer Schwimmkörper, etwa ein Balken oder ein Boot, dessen Länge gleich der Wellenlänge ist, steht gleichzeitig unter dem Einfluß beider Kraftsysteme der Welle. Es ist daher zu erwarten oder doch möglich, daß die entgegengesetzt gerichteten translatorischen Komponenten beider sich aufheben und die vertikalen Komponenten allein in einer wippenden Bewegung des Körpers, nach Art eines Wagebalkens, zur Wirkung kommen.

Schwimmende Körper, welche die Wellenlänge erheblich überschreiten oder deren Länge ein Vielfaches der letzteren beträgt, werden im allgemeinen nur wenig von den Dünungswellen beeinflußt, da sich an ihnen auch die vertikalen Komponenten der Kraftsysteme annähernd das Gleichgewicht halten können, vorausgesetzt, daß der Körper, das Schiff, die nötige Festigkeit in den Längsverbänden hat. Wie gewaltig die vertikalen Kräfte der großen

ozeanischen Dünungswellen sind und welche unmittelbare Bedeutung sie für den Schiffbau haben, braucht hier nur angedeutet werden.

Herrscht ein Wind, der die Wellen antreibt, so tritt bekanntlich eine Abdrift ein, der nicht nur die aus dem Wasser hervorragenden und direkt vom Winde faßbaren Schwimmkörper unterworfen sind, sondern auch die völlig ein- und im Wellenbereich untergetauchten Körper, ja das gesamte an den Wellenbewegungen beteiligte Wasser.

Da die Luft schneller fortschreitet als die Wellen, so entstehen an der Grenze beider Flüssigkeiten, in den Wellentälern, Reibungswirbel von ähnlicher Art, wie im Röhrchen zwischen flüssiger und gasförmiger Kohlensäure (Fig. 17), jedoch mit dem Unterschiede, daß sie bei der großen Differenz der Dichtigkeiten zwischen Wasser und Luft gewöhnlich nur in der Luft voll entwickelt werden, während das Wasser scheinbar nicht daran beteiligt ist. In Wirklichkeit nimmt das Wasser einen sehr erheblichen Anteil an den Reibungsvorgängen, denn die Ursache dieser Vorgänge, die Geschwindigkeitsdifferenz beider Medien, wirkt auch in den der Grenze benachbarten Wassermassen. Dort, in dem dünneren Medium, erzeugt sie voll entwickelte, rotierende Wirbel, hier, in dem dichteren, schwingende Wellen. Freilich rotieren auch in den Wellen die einzelnen Wasserteilchen, wir haben ihre elliptischen Bahnen gesehen; aber sie rotieren in den Wellenphasen nacheinander und die Welle im ganzen vollführt eine schwingende Bewegung, während in den Wirbeln die gesamte beteiligte Masse des Mediums gleichzeitig in drehender Bewegung begriffen ist. Die Wellenbewegung ist also gleichsam eine in die Länge gezogene Wirbelbewegung. Verschiebt man das Kraftliniensystem eines Wellenberges (Fig. 18) um eine halbe Wellenlänge über das vorangehende Wellental und dreht es um  $180^\circ$  um die horizontale Wellenachse, so wird dadurch das Kraftliniensystem des Tales zu einem vollen Wirbelsystem ergänzt.

Die Tendenz oder der Beginn einer derartigen Verschiebung scheint mir in der Natur überall vorzuliegen, wo es sich nicht um reine Dünungswellen handelt, die ein windstilles Gebiet durchlaufen. Wo immer der Wind die Wellen treibt, nehmen sie auch eine unsymmetrische Gestalt an. (Fig. 19.) Der Gipfel der Welle wird gegen das vorangehende Tal um so mehr verschoben, je größer die Windstärke wird. Die rückwärtigen Hänge der Wellen, auf die der Wind trifft, werden niedergedrückt und abgeflacht, die vorderen werden steiler und steiler, der Wellengipfel nimmt die Form eines vorgeschobenen Grates an, der schließlich im Bogen über den steilen Hang hinweg-

schießt und [mit der eingeschlossenen Luft sich wälzend und schäumend das erste sichtbare Entwicklungsstadium eines geschlossenen Reibungswirbels bildet. Das sind die „weißen Schafe“, die der „blanke Hans“ hütet, die aber zu reißenden Wölfen werden, wenn der Orkan über die Fluten fährt. Wehe dem Fahrzeuge, das dann steuerlos wird und die Windrichtung nicht halten kann: es gerät in Gefahr, von der Wirbelung der brechenden Seen ergriffen und durch besonders hohe Seen übergekippt zu werden.

In starken Orkanen verlaufen die Reibungsvorgänge zwischen Wasser und Luft mit großer Heftigkeit. Dann ist die See mit hohen und steilen Wellen bedeckt, von deren weit nach vorn hinausschießenden Kämmen die Wassermassen über die Wellentäler fortgerissen werden. Die Grenzen zwischen Wasser und Luft erscheinen verwischt und die Wellentäler erfüllt

**Kraftlinien im Innern einer unsymmetrischen Windwelle. (Schematisch.)**

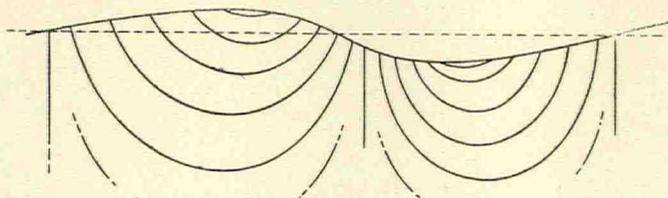


Fig. 19.

mit ungeheuren, aus Wasser und Luft gemischten, brausenden Wirbelrollen. Einen derartigen Eindruck macht die See auf einem vortrefflichen, von einem französischen Offizier als Augenzeugen gemalten Bilde, das ein Geschwader in einem Taifun der chinesischen Südsee darstellt. Ob die in der Natur vorkommenden Windstärken ausreichen, die rollende Wirbelung zwischen Wasser und Luft zu so gewaltigen Phänomenen anzutreiben, wie sie sich im kleinen Maßstabe zwischen flüssiger und gasförmiger Kohlensäure abspielen, bleibe dahingestellt. Vielleicht ist noch kein Augenzeuge der Wirkung so ungeheurer Naturkräfte mit dem Leben davongekommen.

Die Entstehung der oben erwähnten Driftströmung findet ihre Erklärung in der asymmetrischen Form der vom Winde getriebenen Wellen. Der Mittelpunkt des Winddruckes liegt an der Rückseite des Wellenberges. Die Windkräfte addieren sich daher zu den gleichfalls nach vorn gerichteten Kräften des Wellenberges, während das nach hinten gerichtete Kraftsystem des Tales seiner versteckten Lage wegen keinen oder doch nur einen geringeren, in-

direkten Zuwachs erfährt. Daher sind die Vorwärtsschwingungen der Wasserteilchen in unsymmetrischen Wellenbergen immer größer als die Rückschwingungen in den Tälern. Die Bahnen der Teilchen sind somit keine geschlossenen Ellipsen, sondern offene, in der Wellenrichtung langsam fortschreitende zyklöidische Schleifenlinien.

Die Geschwindigkeit der translatorischen Driftbewegung ist natürlich von der Windstärke abhängig; sie ist an der Oberfläche am größten und nimmt nach der Tiefe ab, wie die Wellenkräfte, die sie erzeugen.

Die großen Meeresströmungen, die in der Region der Passate und Monsune als Driften entwickelt werden, behalten ihren Charakter als Oberflächenströme auch, nachdem sie durch die Kontinente abgelenkt und weit von ihrer Ursprungsstätte entfernt sind.

Für die Navigation sind die Driftströme bekanntlich von großer Bedeutung, da sie, je nach ihrer Richtung zum Schiffskurs, die Fahrt verlangsamen oder beschleunigen, oder auch Versetzungen herbeiführen können, die event. mit großen Gefahren verbunden sind. Sie werden jedoch in dieser ihrer Wirkung maskiert durch die Windkräfte, welche die austauchenden Schiffswände, Aufbauten usw. treffen und im gleichen Sinne wie die Drift des Wassers wirken.

## V. Strömungen an schiffsförmigen Körpern.

Wichtiger als Drift und Wellen sind für die Fahrt des Schiffes die Vorgänge, die es selbst durch seine Bewegung im Wasser hervorruft, denn sie müssen aus dem Kraft- oder Kohlenvorrat des Schiffes selbst bestritten werden. Der Erbauer des Fahrzeuges wie der spätere Besitzer haben daher das größte Interesse daran, die Form des benetzten Schiffskörpers so auszubilden, daß jene Vorgänge möglichst einfach und zweckmäßig mit erreichbar geringstem Kraftverbrauch stattfinden können.

Wie eine eingetauchte Platte erzeugt auch das fahrende Schiff in seiner Umgebung ein dynamisches Niveau, das mit seinen wellenartigen Erhebungen und Vertiefungen in auffälliger Weise von dem statischen, ruhenden Wasserspiegel abweicht. Froude verdanken wir eine sehr eingehende Darstellung der Schiffswellen, von denen er außer dem System der Bug- und Heckwellen mit den anschließenden seitlichen „echellonartigen“ Stufenwellen auch noch transversale Wellen unterscheidet, die senkrecht zu den Schiff flanken stehen. Die Bug- und Heckwellen mit den nachfolgenden Stufen sind überall zu be-

obachten und bekannt. Die transversalen Wellen dagegen sind weniger auffällig und scheinen nicht notwendig bei allen Schiffsformen aufzutreten.

Die Entwicklung und Lage der Wellen hängt von der Fahrgeschwindigkeit ab. Man weiß, daß der Schiffswiderstand bei großen Geschwindigkeiten in ganz beträchtlichem Maße durch die Lage der Wellen, besonders der Heckwelle, beeinflußt wird. Ich habe daher bei meinen Versuchen, die Vorgänge unter der Wasseroberfläche festzustellen, zunächst mein Augenmerk auf die Heckströmungen gerichtet und untersucht, wie sie sich aus den Wirbelströmungen hinter einer querstehenden Platte entwickeln, wenn das gerade abgeschnittene Modell allmählich in eine angenäherte Schiffsform übergeführt wird. Der hierbei beobachtete Übergang der Wirbelung in eine glatte Wellenbewegung führte auf die nähere Untersuchung der freien Wellenphänomene. Wir fanden durch die photographische Analyse die Kraftliniensysteme der Wellen, die nun auch ein wertvolles Hilfsmittel für die Beurteilung der stationären Schiffswellen und ihre Beziehungen zum Schiff bilden.

Um recht deutliche und charakteristische Wellen zu erhalten, verwandte ich für die Untersuchungen ein Bootsmodell von „völliger“, gedrungener Gestalt, das Herr Max Oertz mir herstellen zu lassen die Güte hatte. Die Länge über Deck beträgt 460 mm, die größte Breite 135 mm. Dieses Boot wurde mit dem nötigen Bleigewicht belastet und dann frei, selbsttrimmend, geschleppt.

Die dabei auftretenden Widerstandsphänomene wurde sowohl an der Wasseroberfläche wie im Innern des Wassers durch Stromlinien- und Kraftlinienphotogramme festgelegt.

#### a) Oberflächenströmungen am Schiff.

Das Modell wurde mittels eines seitlich auf der Plattform des Wagens befestigten Auslegers vorauf geschleppt und die Kamera zunächst für Stromlinienaufnahmen im geeigneten Abstände über dem Modell an einem festen Gerüst mitgefahren.

Die so gewonnenen Bilder geben eine Übersicht über die beiden Wellensysteme, besonders schön in stereoskopischen Aufnahmen, aber fast ebenso deutlich auch im einfachen Photogramm. Die Bugwelle ist bei etwa 75 cm Fahrt — vergl. das Kraftlinienbild Fig. 2 Taf. XVII — bereits recht kräftig entwickelt und tritt weit stärker hervor als die Heckwelle. Sie hat eine parabelähnliche, im Scheitel von der Nase des Schiffes durchbrochene Form, und hinter ihren Flügeln erscheint neben der hinteren Schiffshälfte ihre erste

Stufenwelle, etwa  $30^\circ$  gegen die Fahrrichtung geneigt und der Heckwelle näher als der Bugwelle. Die Heckwelle ist noch schwächer als die Stufenwelle und hat nahezu dieselbe Flügelstellung wie diese. Die Stromlinien folgen natürlich den senkrechten Bewegungen der Wellen, haben aber daneben auch noch eine ausgesprochene seitliche Bewegung, da sie mit jedem Wellenberge nach außen, mit jedem Tal nach innen gebogen erscheinen. Diese horizontalen Ablenkungen sind es, welche die Form und Größe der Wellen auch im einfachen Flächenbilde so klar hervortreten lassen.

Mit zunehmender Fahrt werden alle Wellen verstärkt und etwas nach hinten gedrängt. Bei 92 cm Geschwindigkeit (Fig. 1 Taf. XVII) ragt die Schiffsnase weit durch den Scheitel der Bugwelle. Wie sich hier an den keilförmig gestellten Flanken das Wasser zum Gipfel der Bugwelle emporstaut, treten ähnliche Erscheinungen auf wie an einer quer im Strome stehenden Platte. Dort sahen wir, daß bei größeren Geschwindigkeiten der Gipfel des Stauhügels stets von Wassermassen gebildet wurde, die, von der Tiefe einer bestimmten Stromteilungslinie mit maximalem Druck emporgehoben, das Niveau aufbrachen und die ursprünglich über ihnen liegenden, oberflächlichen Schichten seitwärts abgleiten ließen. In ganz analoger Weise bricht auch hier am Bug des Schiffes eine scharf abgegrenzte Wasserschicht aus der Tiefe an die Oberfläche hervor, indem sie die mit sichtbaren Schwimmkörperchen bedeckten oberflächlichen Schichten zur Seite schiebt und das ganze Schiff von vorn bis hinten umhüllt.

Die zweite Stufe der Bugwelle ist jetzt soweit nach hinten gerückt, daß sie sich an die Flügel der Heckwelle anschließt. Diese selbst tritt kräftig hervor und ragt nun weiter als die Bugwelle seitlich hinaus. Erwähnt sei noch, daß bei ca. 1 m Fahrt die Enden der Heckwellenflügel nach hinten gebogen sind, daß sie aber bei 1,20 m sich hakenförmig nach vorn krümmen. Die weitere Ausgestaltung der Wellen ist in hohem Maße von der Breite und Tiefe des Fahrwassers abhängig und soll hier nicht weiter verfolgt werden.

Die mit stehender Kamera vom Wasserspiegel genommenen Kraftlinienbilder (Taf. XVII<sup>2</sup>) zeigen das mit seinen Wellen im ruhenden Wasser fortschreitende Schiff. Ähnlich wie an der Vorderseite einer Querplatte entstehen am Bug radial nach vorn gerichtete Kraftlinien, die jederseits wie ein Schwarm feiner Geschosse in das Medium vordringen und so die Bugwelle erzeugen. Das Zurückschwingen der Wasserteilchen, welche die Bugwelle durchschritten haben, ihr erneuter Anstieg zur ersten Staffelwelle und endlich zur Heckwelle, ist in allen Einzelheiten zu verfolgen. Der blanke, von zahl-

Schiffswellen an einem Bootsmodell von 460 mm Länge.

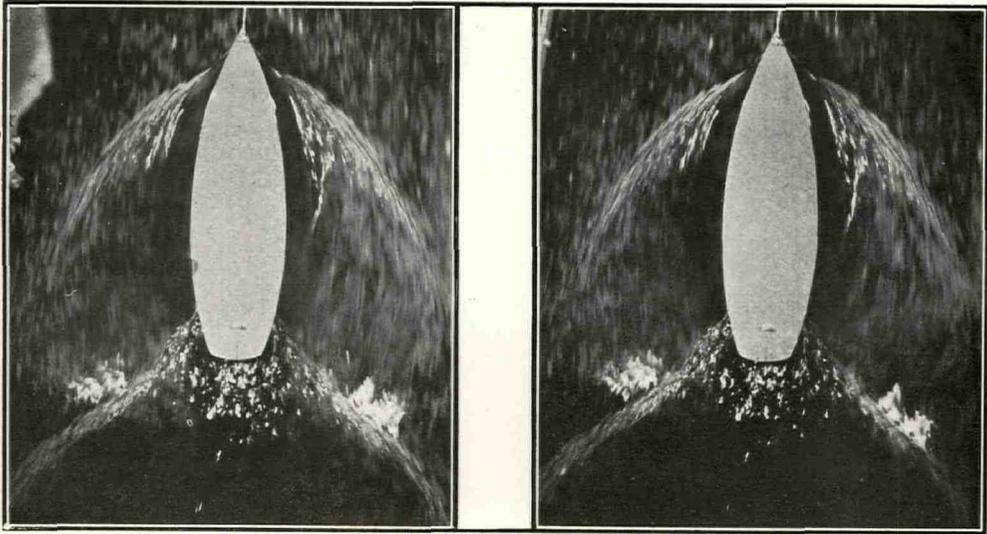


Fig. 1. Stereoskopbild der Wellen und Stromlinien im Wasserspiegel bei 92 cm/Sek. Fahrt.

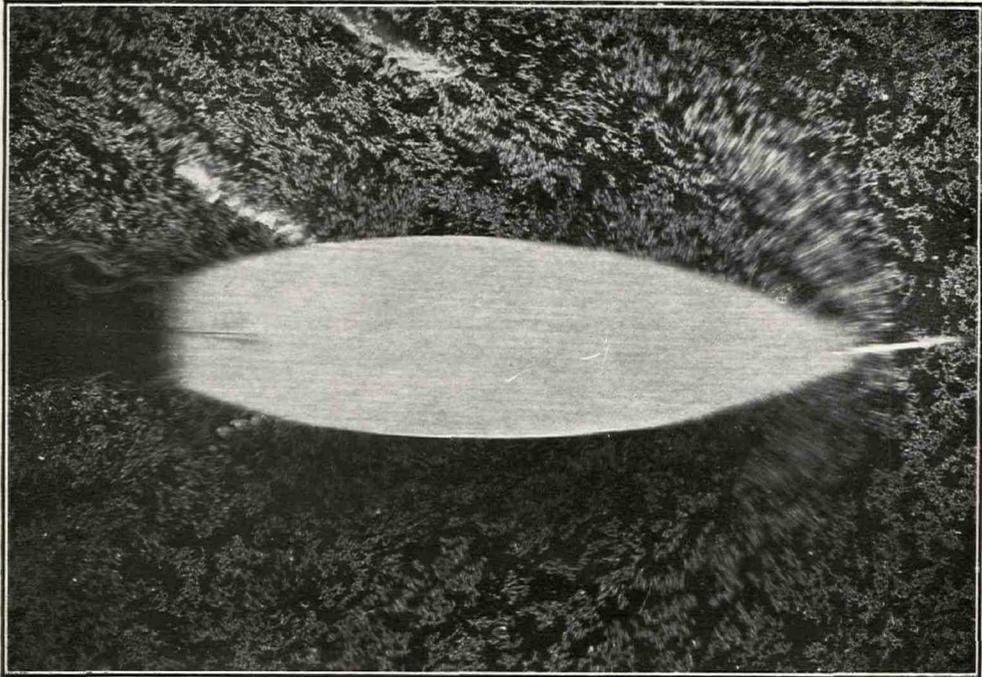


Fig. 2. Kraftlinien bei 75 cm/Sek. Fahrt.

Faint, illegible text in the upper section of the page, possibly a header or introductory paragraph.

Main body of faint, illegible text, appearing to be several paragraphs of a document.

Faint text at the bottom of the page, possibly a footer or concluding remarks.

reichen Wirbeln flankierte Nachstrom bezeichnet die Spur des Schiffes. Die saugenden Kräfte, welche die Heckwelle entstehen lassen und unterhalten, zeigen im Niveau eine ganz analoge Anordnung wie die der Bugwelle, nur ist die Richtung entgegengesetzt, da es sich hier um anziehende, dort um abstoßende Bewegungen handelt.

b) Strömungen am Schiff im Innern des Wassers.

Für die Untersuchung der Schiffsströmungen im Innern des Wassers habe ich zunächst einige einfach gestaltete Klotzmodelle anfertigen lassen, die bei quadratischem Querschnitt am vorderen Ende von den Seiten her schiffsähnlich zugespitzt waren und am hinteren Ende eine verschiedene Gestaltung erhielten. Es sollte ermittelt werden, welcher Art die so wichtigen Strömungen am Heck eines prahmartigen Schwimmkörpers sind, und wie sie sich ändern, wenn die Form des Körpers schrittweise

**Formen von Blockmodellen zur photographischen Analyse der Schiffsströmungen.**

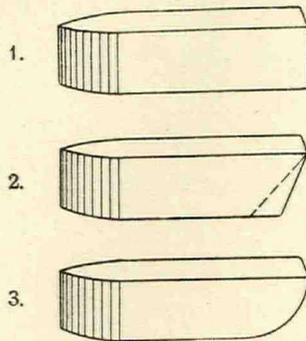


Fig. 20.

in die eines Schiffes übergeführt wird. Zu diesem Zweck wurde das eine Modell hinten gerade, das andere schräg, nach hinten übergeneigt, abgeschnitten, und das dritte erhielt eine zylindrische Abschlußfläche (Fig. 20).

Die Modelle wurden tief eintauchend in starrer horizontaler Lage durch das Wasser geführt und zunächst mit fahrender Kamera die Strömungen am Heck untersucht. Die Körper erscheinen bei dieser Anordnung, wie wenn sie in einem Strome ruhend verankert wären. An dem gerade abgeschnittenen ersten Modell (Fig. 1 Taf. XVIII) sind die Vorgänge ganz ähnlich wie hinter einer quer im Strome stehenden Platte. Ein halber Wirbelring erfüllt den Raum hinter der Endfläche. Der über die Bodenfläche gleitende Strom wendet sich hinter dem Wirbel im Bogen nach oben und erzeugt so den Kamm einer

Heckwelle wie hinter einer einfachen Querplatte. Von hier aus zieht der Nachlauf durch den Wirbelbogen gegen die Heckfläche und an dieser senkrecht nach unten bis zum Unterstrom.

An solchen Photogrammen, die mit stehender Kamera aufgenommen denselben Vorgang im ruhenden Wasser veranschaulichen tritt der ganze Halbwirbel als eine dem Modell folgende, kräftige Nachströmung in die Erscheinung, die ein wenig nach vorn herabsinkt und an ihren Grenzflächen mit feinen Wirbelrollen bedeckt ist. Daneben aber sieht man ein breites System elliptischer Stromlinien, die um jene kleinen Wirbel als Brennpunkte von den Seiten und namentlich von unten her gegen den Nachstrom einlenken, und auf denen das Wasser aus der Umgebung des schwimmenden Körpers nach-hinten gezogen wird. Wir wollen diese interessante Bewegung, die uns weiterhin näher beschäftigen wird, hier kurz als Sogstrom bezeichnen.

Das Modell mit schräg abgeschnittener Heckfläche ergab keinen wesentlichen Unterschied im Stromverlauf gegenüber dem gerade abgeschnittenen Körper. Da die Neigung der Endfläche nur  $60^\circ$  beträgt, kann sich der Wirbelring im Strome ohne erhebliche Formänderung dem einspringenden Raume hinter dem Modell anschmiegen, wie es Fig. 2. Taf. XVIII zur Anschauung bringt. Auch eine weitere Abschrägung des Hecks auf  $45^\circ$  Neigung hatte keinen anderen Erfolg, da die Stromlinienbewegung einen plötzlichen Übergang in eine andere Richtung nicht gestattet.

Ganz anderer Art sind die Erscheinungen an dem zylindrisch abgerundeten Heck. (Fig. 3 Taf. XVIII.) Der halbe Wirbelring ist völlig verschwunden. Das Wasser zieht in schön geschwungenen Bahnen vom Boden her über die gewölbte Fläche empor und wendet sich zur Bildung einer Heckwelle in schlanken S-förmigen Linien nach hinten. Der gerundete hintere Abschnitt des Schwimmkörpers nimmt somit hier die Stelle des Wirbelhalbringes ein und bedingt den glatten Aufstieg und Abfluß des Unterstromes. Von den Seitenströmen nehmen nur die innersten Schichten einen allerdings sehr auffälligen Anteil an der Heckströmung. Da ihnen im Gegensatz zum Unterstrom der Eingang in den Saugungsraum hinter dem Körper durch die scharfen Hinterkanten erschwert ist, so drängen sie zwar auch nach innen und oben, aber da die Bewegung nur in Stromlinien erfolgen kann, so entstehen schon an den unteren, nach vorn gebogenen Teilen der Hinterkanten feine spiralförmig nach oben schlängelnde Wirbelbahnen, die ansteigend immer mehr Wasser in ihre Bewegung hineinziehen und endlich am Niveau horizontal nach hinten abgelenkt werden. So hängen sie wie lange, nachschleppende Zöpfe (Fig. 21)

Strömungen am Heck der Blockmodelle. (Textfigur 20.)  
Im Stereoskop zu betrachten.

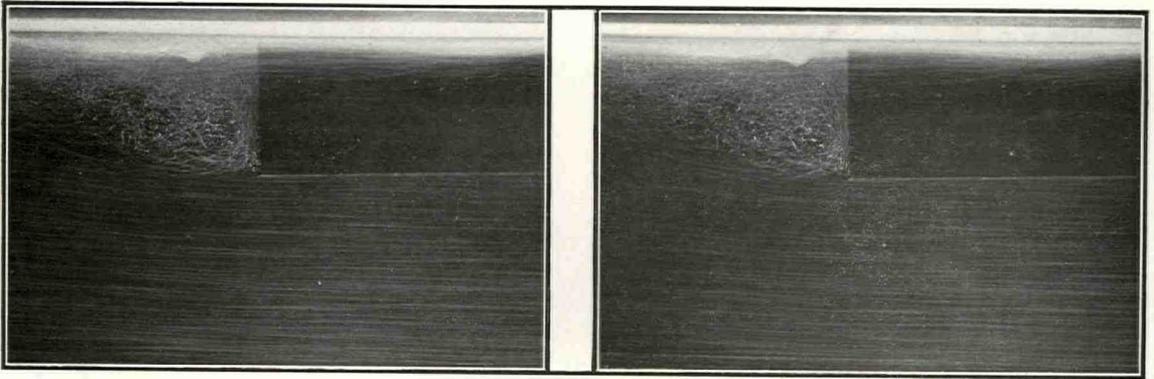


Fig. 1.

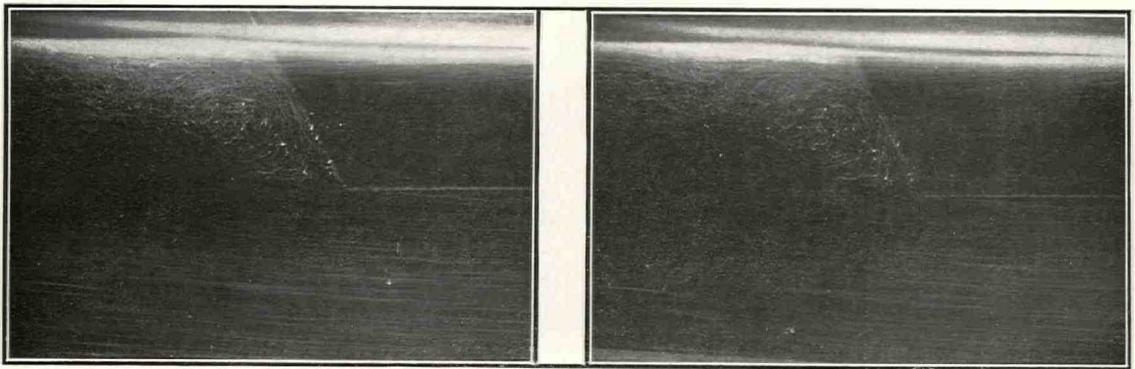


Fig. 2.

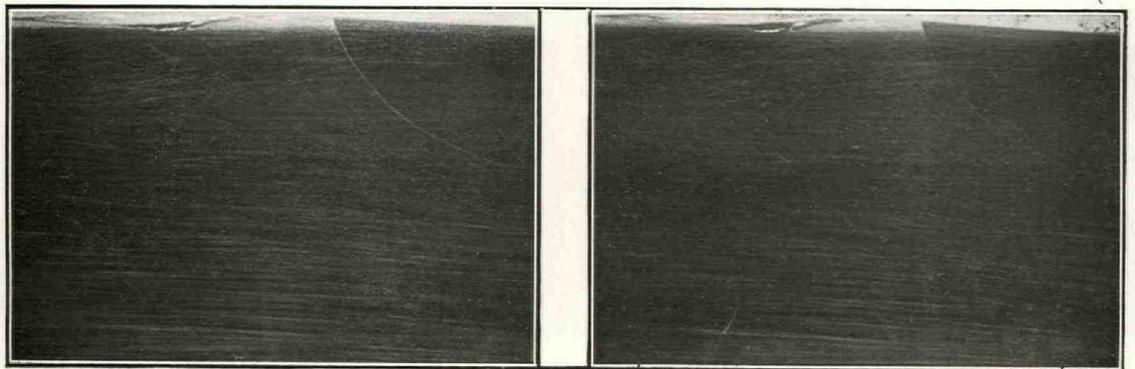
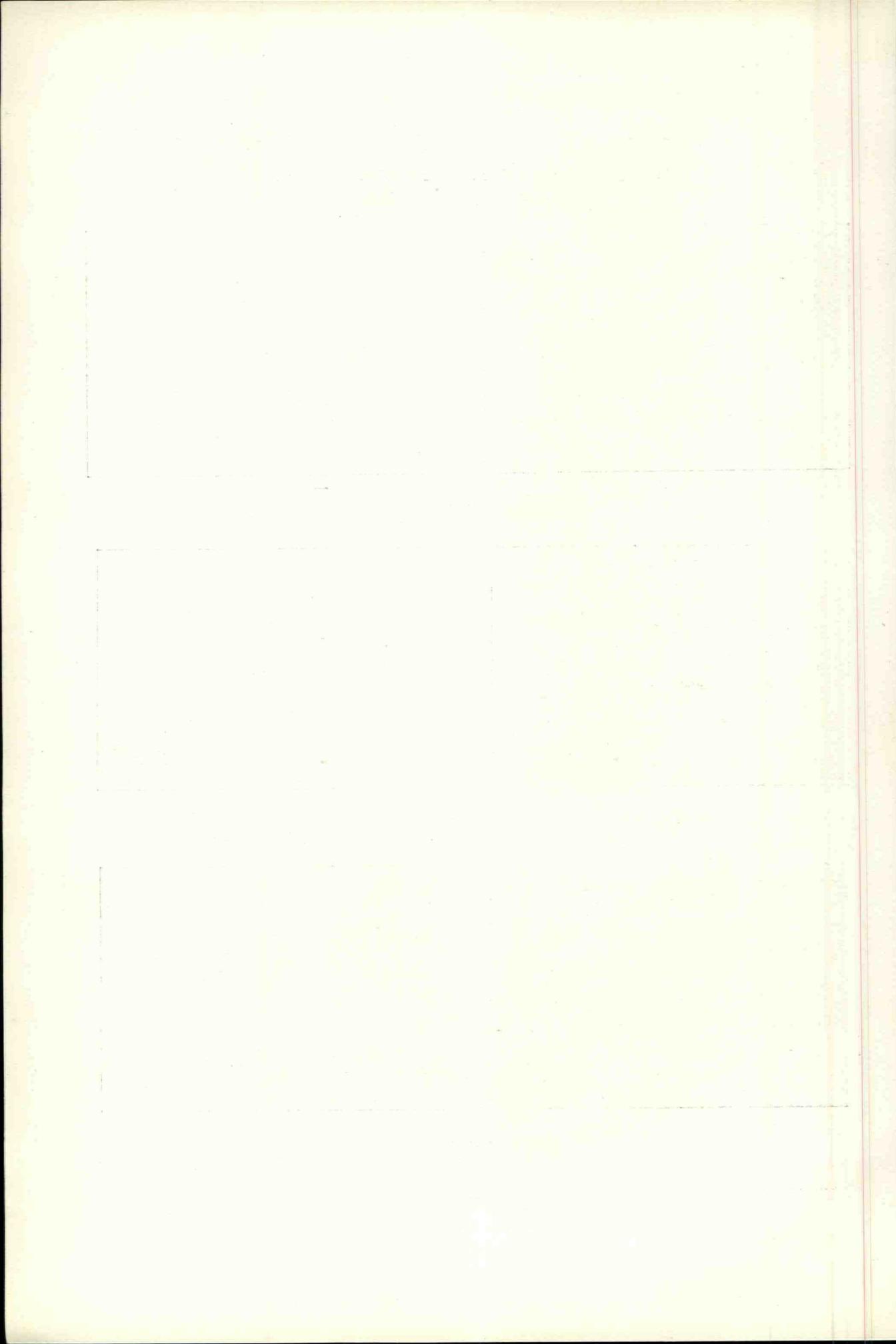


Fig. 3.



hinter den oberen Heckkanten. Die linksseitige Spiralbewegung ist die eines rechtsdrehenden, die rechtsseitige die eines linksdrehenden Strudels. Zwischen beiden erhebt sich der Unterstrom zur Kuppe der Heckwelle, und seine seitlichen Stromlinien nehmen Teil an der Strudelbewegung.

Die Vorgänge sind somit ähnlich denen an der Rückseite flach geneigter schräger Platten mit dem Unterschiede, daß hier auch der Oberrandbogen des Wirbelringes fehlt. Wenn aber der Körper so tief eingetaucht wird, daß auch die obersten, mehr senkrechten Areale der gewölbten Heckfläche benetzt werden, so treten im Niveau an diesen Flächenteilen auch wieder Reste des Wirbelbogens auf, und ebenso geschieht es, wenn durch gesteigerte Fahrt die Benetzung durch die steiler emporstrebende Heckwelle vollzogen wird.

Im ruhenden Wasser zeigen die mit stehender Kamera aufgenommenen Photogramme das typische Bild einer mit der Fahrgeschwindigkeit des Modells

**Spiralströmung an den Hinterkanten des Blockmodells Fig. 20. 3.**



Fig. 21.

fortschreitenden Welle, deren Tal an den Seiten des Schwimmkörpers liegt und deren höchste Erhebung als Heckwelle dem Körper folgt.

Die Stromlinien in der Umgebung eines normal gestalteten Schiffskörpers sind der Hauptsache nach Wellenlinien des Bug- und Heckwellensystems. Dies tritt am besten in Seitenansichten der Strömungen hervor, wie in Fig. 1 Taf. XIX. Das Schiffchen war als Hintergrund für die Stromlinien mattschwarz gestrichen, die Konturen weiß, da sich der Rumpf sonst kaum auf der Platte abgebildet haben würde. Der Blick ist schräg von unten gegen das Niveau gerichtet, um möglichst die Vorgänge in den beiden Wellenbergen mit zur Anschauung zu bringen. Die Wellennatur der gesamten Strömung tritt so klar hervor, daß sie keiner näheren Beschreibung bedarf. Von besonderem Interesse ist die Art der Stromteilung und Ablenkung am Bug. Sie wird in ähnlicher Weise eingeleitet, wie vor einer einfachen Querplatte. In einer gewissen Tiefe unter dem Niveau verlaufen die Stromlinien nahezu horizontal gegen den Steven. In der darüber liegenden Schicht werden sie nach oben bis zum Kamm der Bugwelle abgelenkt, um dann zum Wellental hinabzusinken; unterwärts erfahren sie nur eine zwar schwache Ablenkung

nach unten, aber diese tritt bereits um so weiter vor dem Steven ein, je tiefer die betreffende Wasserschicht liegt, während die Stauung der oberflächlichen Wasserschichten erst nahe am Schiff beginnt. Die gesamte Pressung des Wassers durch das Schiff ist naturgemäß am größten in der Mitte des ganzen Strömungssystems, d. h. in der vertikalen Wasserschicht, welche in der Bahn des Stevens liegt und von diesem gespalten wird. Indem die Bugflanken diese Schicht auseinanderkeilen, schmiegt sie sich der Schiffshaut an und drängt, zum Kamme der Bugwelle emporgepreßt, auch die seitlichen Wassermassen, die nicht direkt mit der Schiffshaut in Berührung kommen, nach und nach aus ihrer Bahn. Wir haben bereits bei der Betrachtung der Erscheinungen im Wasserspiegel gesehen, daß bei hinreichender Geschwindigkeit die Pressung der innersten Schicht zu einem Aufbruch der Bugwelle und zu einer seitlichen Verdrängung ihrer eignen, der Oberfläche

„Pflügende“ Bewegung im Innern der Bugwelle.

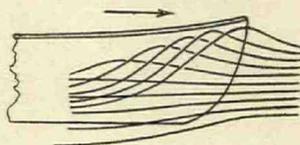


Fig. 22.

benachbarten Bestandteile führt, und daß daher dann Tiefenwasser das Schiff umhüllt. Aus seitlichen Stereoskopaufnahmen ergibt sich nun, daß die Art dieser Verdrängung am besten mit einer pflügenden Bewegung zu vergleichen ist, bei der das Unterste zu oberst gekehrt wird. Wie in Fig. 22 skizziert, wird am Steven die oberste mediale Wasserschicht durch die darunter liegende und schiffswärts hinter ihr emporsteigende Schicht von der Bugwand verdrängt und nach unten zur Tiefe abgelenkt; ebenso die zweite Schicht durch die dritte usw. Wir erhalten danach am Bug ein kreuzendes Stromliniensystem von sehr eigenartiger Form, dessen Existenz um so mehr überraschen muß, als damit eine Strömung nachgewiesen ist, die von der Höhe und dem vorderen Umfang der Bugwelle direkt unter den Schiffsboden führt. Es muß somit ein Druckgefälle in der Richtung dieser Strömung vorhanden sein, dessen Minimum unter dem Schiffsboden liegt. In der Tat zeigt der Stromlinienverlauf unter dem Schiffsboden, und der Vergleich mit der Bodenform des Modells, daß hier eine Inkongruenz vorliegt, daß die wellenförmigen Linien stärker nach unten aus-

gebogen sind als die mehr der Kiellinie folgende Schiffsform, und daß daher unter dem Boden ein nicht unbeträchtlicher Minderdruck vorhanden sein muß, dessen Saugung jenem Tiefenstrom die Richtung gab.

Bei großen Schiffen ist überall das „pflügende“ Überwerfen der Bugwelle zu beobachten, man spricht daher wohl geradezu von einem Pflügen der Schiffe durch die See. Bei manchen kleineren, breiten Fahrzeugen führt es zu einer auffällig heftigen, brausenden Wirbelung der Bugwelle. Aber nicht nur in solchen Fällen, sondern bei größerer Fahrt ganz allgemein, scheint durch diesen Vorgang Luft mitgerissen und in die Tiefe entführt zu werden. Diese Luft, im Verein mit den Luftblasen, die etwa im Innern von Reibungswirbeln oder in dem eben erwähnten Saugungsgebiet unter dem Schiffsboden aus der Lösung im Wasser entbunden sind, ist es, die man weiterhin an den Schiffsfanken überall wieder emporsteigen sieht und deren Herkunft bis dahin nicht einwandfrei festgestellt war.

In diesem Zusammenhange möge noch bemerkt sein, daß die so durch den „Pflugstrom“ bewirkte fortgesetzte Durchlüftung des Schiffsbodens nicht vorteilhaft für die Erhaltung der Schiffshaut und ihres Anstriches sein kann, da die Oxydation der Anstrichstoffe und des Metalls dadurch beschleunigt wird und da ferner jener luftführende Strom von der Oberfläche des Wassers auch das oberste Plankton, Myriaden kleiner und kleinster Organismen, niederführt und so die besten Existenzbedingungen für den mit Recht so gefürchteten Anwuchs der Seepocken schafft.

Für die Ökonomie des Schiffsantriebes sind zweifellos solche Schiffsformen die besten, welche den einfachsten und glattesten Stromlinienverlauf ergeben. Es wird daher weiterhin zu prüfen sein, ob man nicht eine Form soweit an die Stromlinien anpassen kann, daß das Wasser den Raum unter dem Boden glatt ausfüllt unter Vermeidung jenes „niedergepflügten“, besonderen Stromganges.

Verfolgt man übrigens die in die Tiefe ziehende gekreuzte Strömung unter dem Schiffsboden, so macht sie durchaus den Eindruck, wie wenn sie den in der Bugwelle empfangenen Torsionsantrieb auch fernerhin beibehielte. Man sieht, daß das Wasser neben dem Kiel mit einer schwachen drehenden Bewegung nach hinten zieht. Der Sinn der Drehung ergibt sich aus den Vorgängen in der Bugwelle, er ist also an der rechten Schiffseite linksdrehend, an der linken rechtsdrehend.

Die Drehbewegung ist somit von gleichem Sinn und gleicher Art, wenn auch weit schwächer, wie die in Fig. 3 Taf. XVIII abgebildeten Strudel an den

Hinterkanten eines gerade abgerundeten Blockmodells. Sie kann daher auch sehr wohl ihre Ursache in der „völligen“ Form des Hecks unseres Schiffchens haben, denn der wesentliche Unterschied der beiden Formen liegt doch nur darin, daß die scharfen Hinterkanten jenes Blockmodells beim Schiff abgerundet sind. Die Abrundung reicht aber offenbar noch nicht aus, um bei der gewählten Fahrgeschwindigkeit eine gute Stromlinienführung zuzulassen.

In Verbindung mit diesen Gedanken hat die Untersuchung der Stromlinien am vorderen Teil und am Boden des hinten flach abgeschrägten Blockmodells (Fig. 20 II) zu recht lehrreichen Ergebnissen geführt, die ich hier kurz mitteilen möchte.

Die bei verschiedenen Geschwindigkeiten ermittelten Stromlinien zeigen auch an diesem Modell, besonders bei größerer Fahrt, sehr deutlich die von der Bugwelle ausgehende drehende, pflügende Bewegung. Sie bleibt aber bei dem gewählten großen Tiefgange der Oberfläche nahe und zeigt nur mittschiffs stärkere Ausbuchtungen, die nicht ganz bis zum Boden hinabreichen und sich dann wieder emporschwingen.

Dagegen sieht man an den Unterkanten der Bugflächen (Fig. 2 Taf. XIX) die Stromlinien von vorn und oben gegen den Boden des Modells herumliegen und so unter dem Boden jederseits einen nach hinten ziehenden Drehstrom bilden. Von unten her treten weitere Wassermassen in den Raum zwischen den beiden Drehströmen, um mit ihnen zusammen eine Art Kalotte unter dem platten Boden zu bilden, welche von den äußeren Stromlinien glatt umflossen wird. Das Wasser formt hier also selber durch Bildung eines Supplements die schlechte Form des Schiffsbodens soweit um, wie es die Stromlinienbewegung erfordert. Aber das Wasser des Supplements ist nicht in Ruhe, sondern in lebhaft drehender Bewegung, und die zur Unterhaltung dieser Bewegung erforderliche Kraft steht im Verlustkonto des Schiffes.

Bemerkenswert ist der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die Entstehung und den Verlauf der Bodenströme. Bei geringer Fahrt vollzieht sich die Bildung der Drehströme im Bereich der vorderen Zuschärfung des Modells. Beide ziehen dann unter dem Boden entlang ohne sichtbare Einwirkung auf die Flankenströme. Sie sind noch beim Eintritt in die Heckwelle hinter dem hier vorhandenen Heckwirbel deutlich zu erkennen.

Ist dagegen die Fahrt sehr groß, in unserm Fall über einen Meter, so sieht man über die ganze Schiffslänge das Wasser von den Seiten her um die Längskanten des Bodens nach unten und innen einschwenken und sich an der Gestaltung der Drehströme beteiligen. Das Wassersupplement unter

Stromlinien im Innern des Wassers an schiffsförmigen Körpern,  
schräg von unten gesehen.

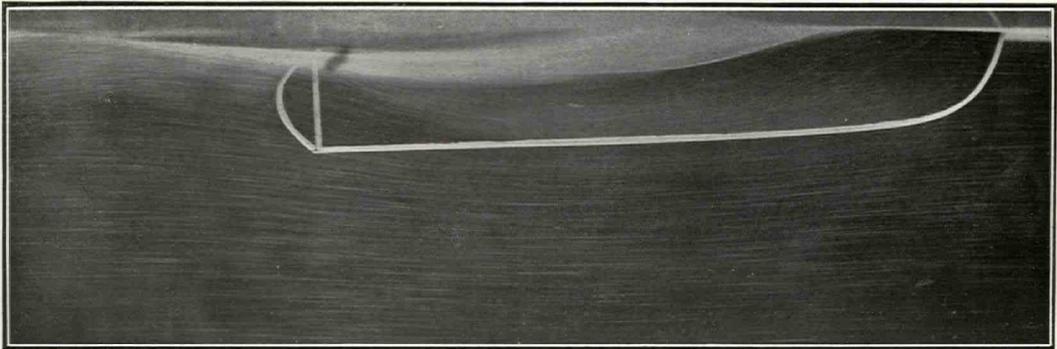


Fig. 1. Bootmodell von 460 mm Länge.

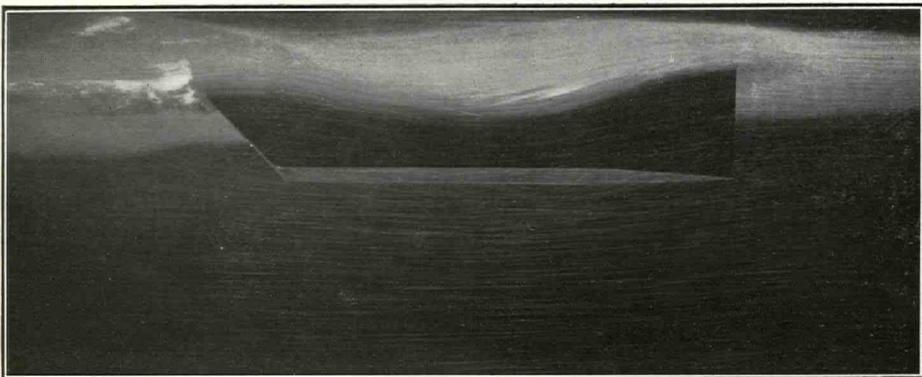
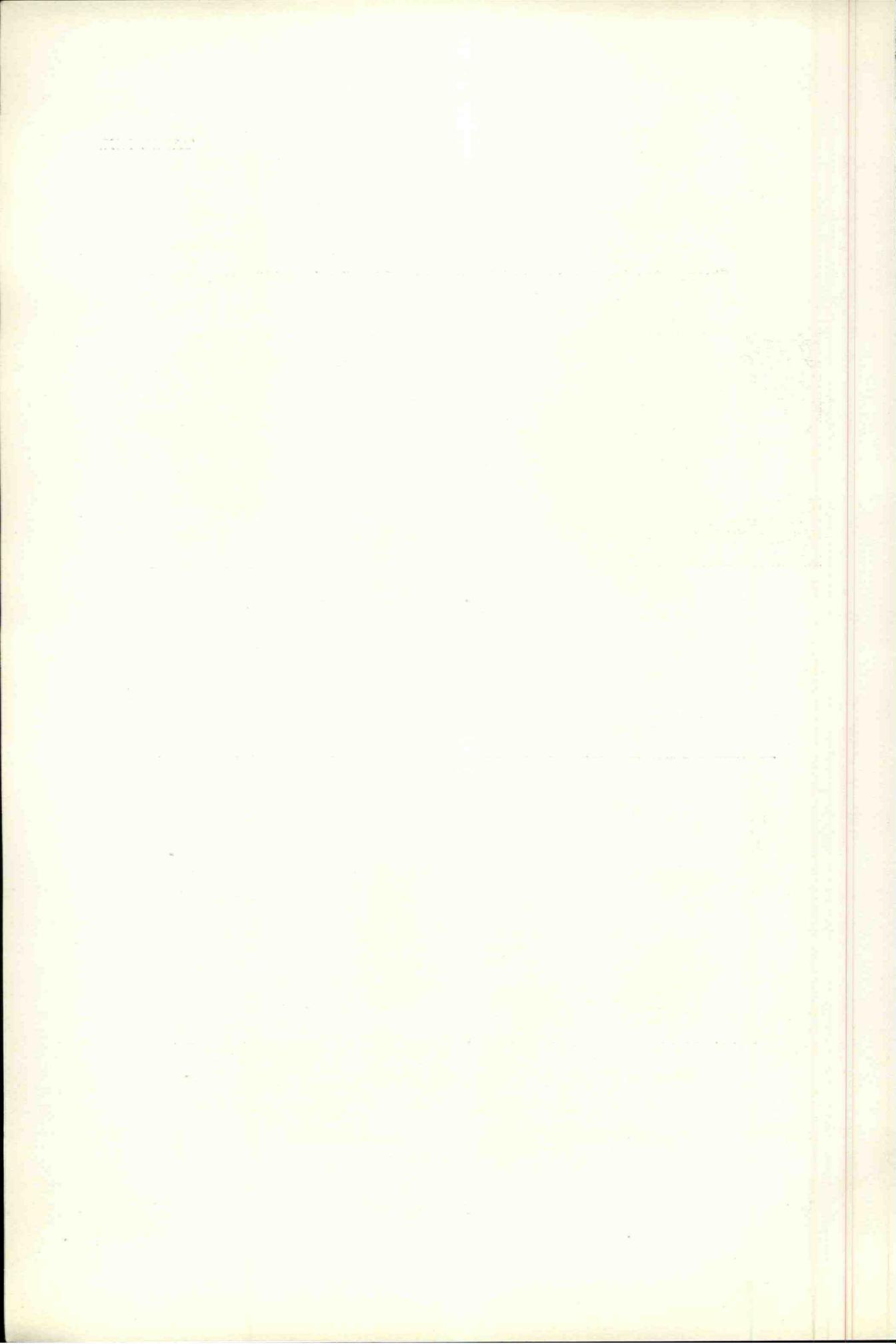


Fig. 2. Blockmodell mit plattem Boden und unter  $45^\circ$  abgeschrägter Heckfläche.



dem Boden hat dann, entsprechend dem weiten Schwung der Stromlinien seine stärkste Entwicklung erst am Heck erreicht und schmiegt sich dahinter dem Heckwirbel an.

Bei mittlerer Fahrgeschwindigkeit endlich (Fig. 2 Taf. XIX) liegt die tiefste Ausbuchtung der Stromlinien unterhalb der Mitte des Bodens. Sie ziehen dann aber nicht, wie bei langsamer Fahrt nahezu parallel zum Boden nach hinten, sondern schwingen schon vorher zur Heckwelle empor, so daß sie gegen den letzten Abschnitt des Schiffsbodens treffen und die dorthin ziehenden Drehströme verdrängen. Der Strom geht nun, umgekehrt wie am Bug, von unten um die Längskanten des Bodens zu den Flanken und wiederum unter Bildung eines Drehstromes nach außen und oben. Der Sinn der neuen Drehung ist somit entgegengesetzt wie unter dem Vorderteil des Modells.

Ein Kraftverlust war die Bildung der vorderen supplementären Drehströme; es kostet fast die gleiche Kraft, wenn die Drehung mittschiffs aufgehoben wird und wenn sie endlich am hinteren Schiffsboden vom neuen im entgegengesetzten Sinne erzeugt wird. In den Photogrammen sieht man die durch die schlechte Schiffsforn vergeudete Kraft in Gestalt der Drehströme nach hinten aus dem Bereich des Schiffes entweichen.

Die Kenntnis der Schiffsströme ist auch für das Verständnis der Propellerwirkung von nicht unerheblicher Bedeutung.

Am Heck des Bootsmodells zeigen unsere Photogramme eine ziemlich glatte vom Boden aufsteigende Stromlinienbewegung, zwar ohne Wirbelbildung, aber mit den unverkennbaren Merkmalen einer Drehung im Sinne des oben besprochenen „Pflugstromes“. Sehen wir zunächst hiervon ab, so nimmt, der Wellenform der Stromlinien entsprechend, die ansteigende, vertikale Komponente der Bewegung nach oben zu, das Wasser entfernt sich also unten schneller vom Schiff als oben. Da in diesem Strome bei großen Schiffen die Schrauben zu arbeiten haben, so ist klar, daß deren Flügel oberhalb der Welle einen größeren nützlichen Widerstand finden werden, als in dem mehr forteilenden Strome unterhalb der Welle, woraus sich die bekannte ungleichmäßige Beanspruchung der Flügel auf ihrer Kreisbahn ergibt.

Sofern auch bei großen Schiffen, woran kaum zu zweifeln, der vom Boden heraufsteigende Strom die drehende Tendenz bewahrt, die er in der Bugwelle erhalten hat, muß diese Drehung auch auf die Arbeitsweise und Beanspruchung der Propeller einen vielleicht nicht unerheblichen Einfluß ausüben. Da nämlich die Drehung auf beiden Seiten des Schiffes im entgegengesetzten Sinne verläuft, so wird eine Einzelschraube in der Mittelstellung vor dem

Rudersteven, gleichviel ob sie rechtsläufig oder linksläufig arbeitet, auf der einen Seite vom Steven mit, auf der anderen gegen die Stromdrehung wirken und demgemäß hier einen stärkeren, dort einen schwächeren Widerstand finden. Es mußte also beim Durchgang der Flügel durch die senkrechte Stellung oder durch den höchsten Punkt der Kreisbahn — unten beim Kiel arbeitet der Flügel im freien, nicht drehenden Wasser — ein plötzlicher Übergang von hoher zu tiefer Beanspruchung vorhanden sein, der sich vermutlich als Ursache von Vibrationen geltend machen würde. Es ist mir gegenwärtig nicht bekannt, ob Beobachtungen vorliegen, die diesen Schluß bestätigen. Jedenfalls scheint mir in dem unvermittelten Übergange der Flügel in entgegengesetzt geartete Strömungen weit eher ein Grund zu Vibrationen zu liegen, als in dem allmählichen Auf- und Absinken in einem gleichförmig veränderten, nicht drehenden Strome.

Stehen zwei Propeller hinter dem Schiff, so arbeitet jeder in einem gesonderten Strome und es finden so schroffe Übergänge wie bei einem Einzelpropeller nicht statt. Immerhin könnte auch hier die Stromdrehung einen gewissen Einfluß auf die Beanspruchung des oberen Flügels ausüben. Würde z. B. der rechtsseitige Propeller links drehen, so würde die Drehung des heraufkommenden Stromes, da sie entgegengesetzt ist, im ganzen vermutlich zu ihrer Einfügung in den Schraubenstrahl mehr Kraft absorbieren, als bei rechts drehe dem Propeller.

Ich möchte jedoch nicht unterlassen, zu betonen, daß über diese Fragen weitere Untersuchungen mit anderen Modellformen notwendig sind, damit man bestimmt weiß, ob bei weniger völligen Heckformen auch eine derartige Drehung in den fraglichen Strömen vorhanden ist und wie weit sie sich in den Wirkungsbereich der Schrauben erstreckt.

Von hervorragendem Interesse schien mir die Aufgabe, durch die Momentphotographie das System der Kraftlinien zu ermitteln, die mit dem Schiff auf seiner Fahrt durch das Wasser fortwandern und auf denen sich die Wechselwirkungen zwischen Schiff und Wasser vollziehen.

In Fig. 1 und 2. Taf. XX ist eine einfache und eine stereoskopische Aufnahme dieser Art reproduziert und der Deutlichkeit wegen in Fig. 23 ein schematischer, nach den Photogrammen hergestellter etwas seitlich liegender Längsschnitt durch das Kraftliniensystem hinzugefügt.

Man wolle beachten, daß die Stellung des Schiffchens im Photogramm aus der Lage der weißen Linie seines Kiels zu ersehen ist, während die Kon-

Kraftlinien im Wasser am Schiffskörper. Fahrt nach rechts.

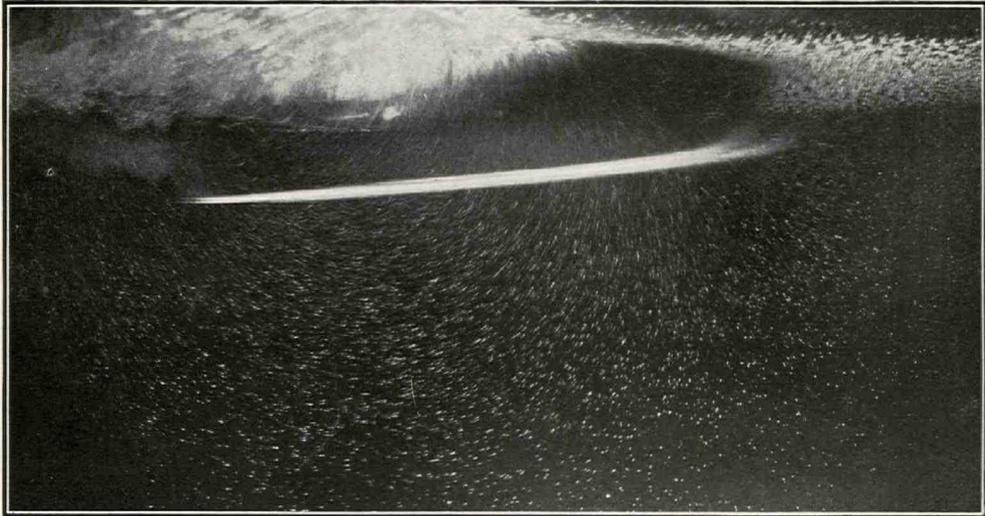


Fig. 1. Übersichtsbild, schräg von unten gesehen.

(Der in der Fahrtrichtung ansteigende weiße Streifen bezeichnet die Lage des Kiels während der Aufnahme.)

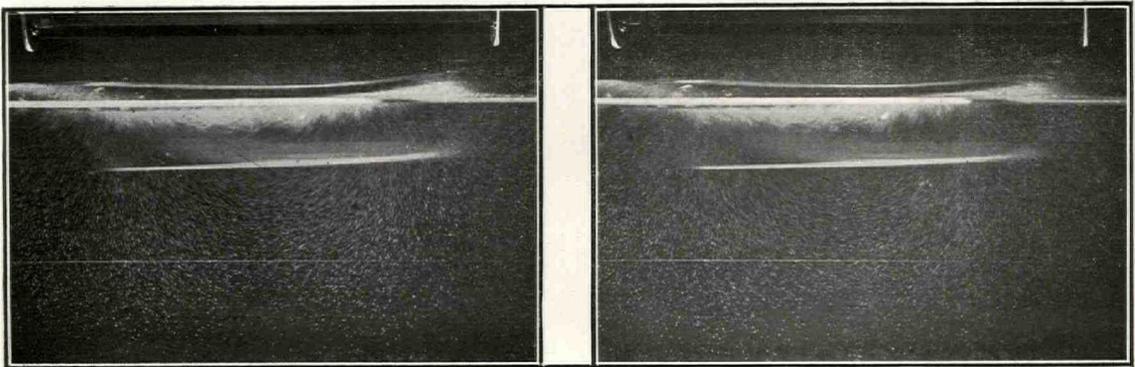
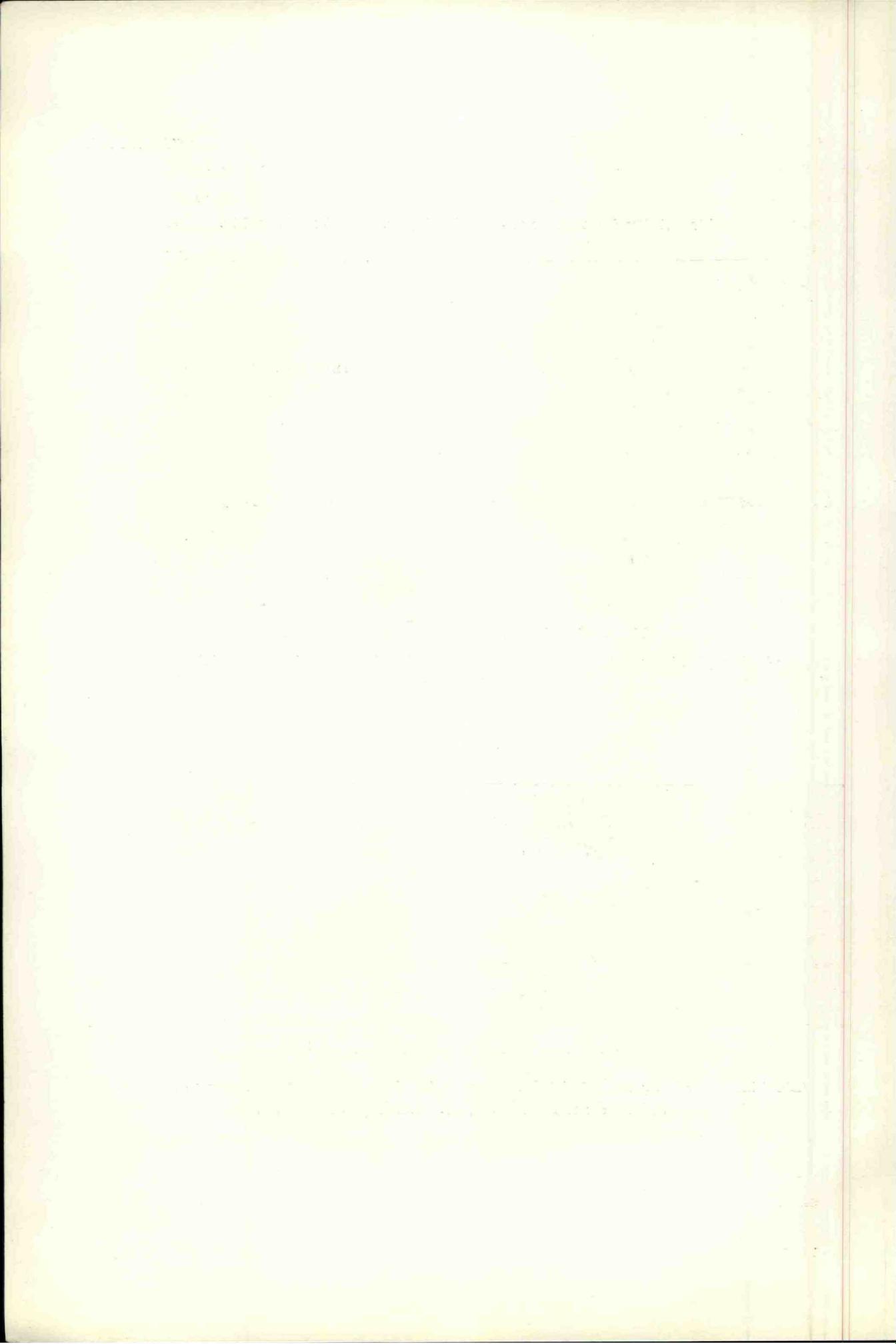


Fig. 2. Stereoskopbild, von der Seite gesehen. Fahrt  $v = 91$  cm/Sek.

(Die feine weiße Horizontallinie ist das Bild eines im Wasser ausgespannten dünnen Drahtes und dient zur Bestimmung der Trimmlage des Schiffes.)



turen von Bug und Heck infolge der Schiffsbewegung undeutlich und verwischt erscheinen. Bei der Aufnahme des stereoskopischen Bildes standen die Objektive der Kamera in der Höhe des Niveaus, während die einfache Aufnahme in größerem Maßstabe eine Ansicht von einem tieferen Standpunkte wiedergibt, so daß man schräg gegen die Unterseite des Wasserspiegels und der Bugwelle sieht.

Das Kraftliniensystem des benutzten Schiffsmodells ist das der Rückschwingung eines großen Wellentales, dem sich vorn und hinten die vorschwingenden Systeme der Bug- und Heckwelle angliedern. Die beiden Trennungs- oder Übergangslinien der drei Systeme stehen nicht senkrecht wie bei ungestörten freien Wellen, sondern sind gegen die Horizontale geneigt, die vordere stärker als die hintere. Mit zunehmender

**System der Kraftlinien eines fahrenden Bootes. (Schematischer Längsschnitt.)**

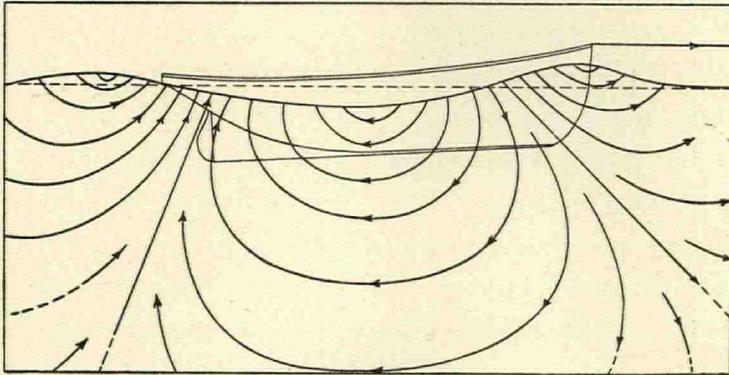


Fig. 23.

Fahrt richtet sich die vordere Linie mehr horizontal, die hintere mehr senkrecht. Zugleich wandern die Endpunkte der Übergangslinie im dynamischen Niveau weiter nach hinten. Diese Unsymmetrie ist das Zeichen der Bewegung und des aufgehobenen Gleichgewichts der Kräfte, welche an der vorderen Schiffshälfte ausgegeben und an der hinteren nur zum Teil zurück-erstattet werden. Die Kräfte am Vorderschiff wirken mehr in der Fahrtrichtung, die des Hinterschiffs mehr nach oben.

Dennoch ist die Summe der hebenden Kräfte am Vorderschiff größer als am Hinterschiff, da die hebenden Komponenten der Heckwelle nur zum Teil auf den Schiffskörper selbst gerichtet sind, zum Teil aber dahinter liegen. Das Verhältnis wird noch ungünstiger bei zunehmender Fahrt, da dann beide Wellensysteme noch weiter nach hinten verschoben und die Hubkräfte der Heckwelle noch mehr aus dem Bereich des Schiffes entrückt werden. Das

Heck sinkt daher immer tiefer hinab und der Kiel nimmt eine nach vorn ansteigende Lage an.

Die Folge dieser schrägen Stellung ist, daß auch der von dem Schiffe im Wasser durchstrichene Raum größer wird. Das Schiff fährt gleichsam immer bergauf über den Rücken der mitwandernden Bugwelle, und die Linienführung oder die Form des Rumpfes, die für horizontale Trimmlage gedacht ist, ist dann ein weiteres, die Fahrgeschwindigkeit im ungünstigen Sinne beeinflussendes Moment. Sobald die angegebenen Merkmale auffällig in die Erscheinung treten, zeigen sie, daß Schiffsform und Fahrgeschwindigkeit nicht genügend gegeneinander abgestimmt sind. Man könnte nun vielleicht die horizontale Trimmlage des Schiffes durch Verschiebung des Schwerpunktes nach vorn oder des Deplacements nach hinten erreichen, indem man, ähnlich wie bei der Tetraëderform, die Spanten im Vorschiff mehr V-förmig, die im Hinterschiff mehr U-förmig gestaltet. Es würde dann aber immer noch darauf ankommen, ob dadurch auch eine solche Lage der Heckwelle am Schiff erreicht wird, bei der ein Maximum von vorschwingender Wellenenergie direkt am Heck im Sinne der Fortbewegung dem Schiff zurückerstattet wird, oder indirekt durch die Propeller ausgenutzt werden kann.

Es ist bekannt, daß man in der Praxis durch Verlängerung an Schiffskörpern sehr günstige Fahrtergebnisse erzielt hat. Dieser Erfolg ist offenbar nur dem Umstande zuzuschreiben, daß durch das Hinausschieben des hinteren Schiffsabschnittes die Heckwelle in eine wirksamere Lage zum Schiff gebracht wurde.

Die Anordnung und der Wirkungsbereich des Kraftliniensystems der Schiffe ist von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Bei einer Fahrt wie in Fig. 1 Taf. XX reichen die Kraftlinien erheblich über die vierfache Tauchtiefe des Schiffes hinab, und wir wissen, daß ein flaches Fahrwasser einen verlangsamenenden Einfluß auf die Schiffsgeschwindigkeit ausübt. Es lag daher der Gedanke nahe, zu ermitteln, in welcher Weise sich dieser nachteilige Einfluß an dem System der Kraftlinien äußert.

Zu diesem Zwecke wurde in dem Versuchstank in einem gewissen Abstände über dem Fenster des Bodens eine große horizontale Glasscheibe angebracht und sodann bei verschiedenem Wasserstande das Kraftliniensystem des vorüberfahrenden Schiffes photographiert.

Die Wirkung der ungleichen Tiefe des Fahrwassers ergibt sich mit großer Klarheit durch den Vergleich der Fig. 1 Taf. XX und der beiden Abbildungen auf Taf. XXI. Das erste dieser drei Bilder zeigt das normale Kraft-

Einfluß der Fahrwassertiefe auf das Kraftliniensystem eines Schiffes.

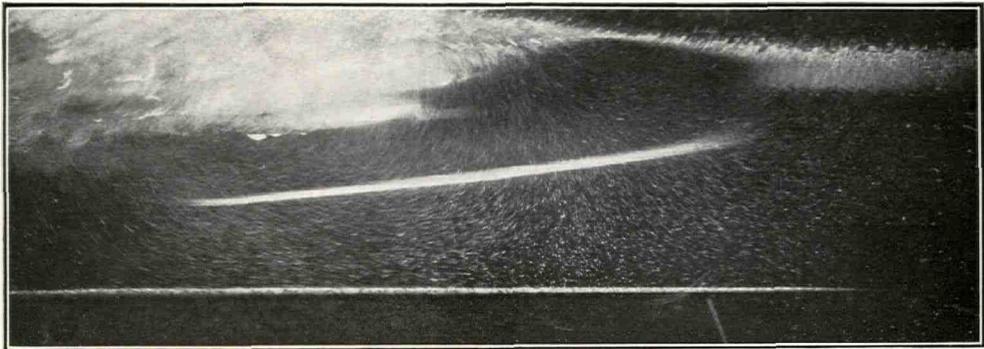


Fig. 1. Das Fahrwasser ist durch eine eingebaute Glasplatte etwa gleich dem doppelten Tiefgange des Schiffes gemacht.

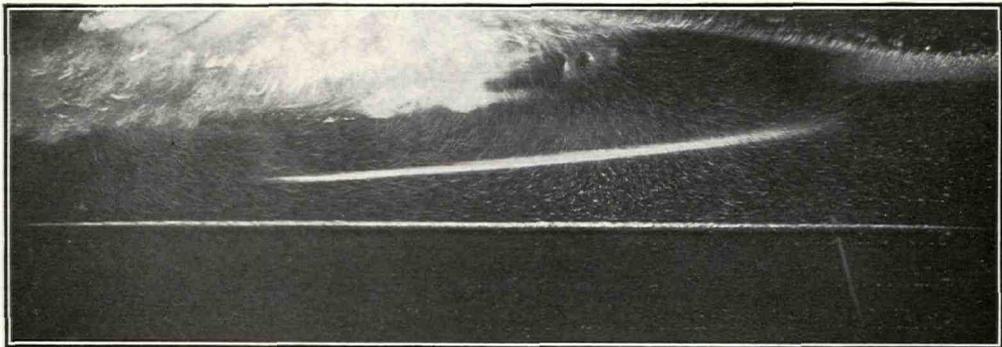


Fig. 2. Fahrwasser noch weiter verflacht.



liniensystem im tiefen Wasser, im zweiten hat das Schiff etwa soviel Wasser unter dem Kiel, wie die Tauchtiefe beträgt, im dritten nur halb soviel.

Im tiefen Wasser sieht man das gesamte Wasser unter dem Schiff in einer gleichmäßigen Wellenschwingung von vorn nach hinten begriffen. Im zweiten Bilde setzt die Bewegung in derselben Weise an den Flanken des Schiffsrumpfes ein, wird aber nur an den letzten zwei Dritteln des Schiffes unter starker Zusammenpressung der Kraftlinien und mit beschleunigter Bewegung durchgeführt, während im ersten Drittel die rückwärtige Bewegung alsbald in eine nach vorn gerichtete übergeht. Zwischen beiden entgegengesetzten Strömen ist das Wasser an der Grundfläche in Ruhe, d. h. hier befindet sich ein Druckmaximum, von dem das Wasser nach vorn und nach hinten (wie auch seitwärts) abfließt. Das Schiff muß also ein beträchtliches Quantum Wasser wie einen vorn unter seinem Kiel befestigten Hemmschuh über den Grund der Fahrrinne voraufschieben. Die hierzu verbrauchte Kraft ist verloren und wird auch nicht durch die höhere Stauung der Bugwelle und die dadurch beschleunigte Rückschwingung des Wasserrestes unter dem Hinterschiff wiedergewonnen, denn das Heck sinkt herab und die Lage des Schiffes zur Bewegungsrichtung wird eine ungünstige.

Bei noch flacherem Fahrwasser (Fig. 2 Taf. XXI) rückt das Druckmaximum unter dem Kiel noch weiter nach hinten, die Hemmung wird größer und die Rückströmung zum Heck immer geringer, bis endlich das Schiffsruder und das Kielende den Boden berühren.

Der Übergang eines Fahrzeuges aus tiefem in flaches Wasser und umgekehrt ist bisweilen mit einer fast ruckartigen Änderung der Fahrgeschwindigkeit und der Schiffswellen verbunden. Es ist daher von Interesse, die Vorgänge kennen zu lernen, die diese auffällige Widerstandsänderung bedingen. In der Versuchsrinne wurde ein Übergang vom tiefen zum flachen Fahrwasser durch die vorher benutzte Glasplatte hergestellt, die hierzu mit ihrem Ende bis in die Mitte des Gesichtsfeldes verschoben wurde.

Die Fig. 1 und 2 der Taf. XXII veranschaulichen in trefflicher Weise die Änderungen, die das Kraftliniensystem bei einer plötzlichen Verflachung oder Vertiefung des Fahrwassers erfährt. Die Vorgänge sind nach den vorangegangenen Erklärungen ohne weiteres verständlich. Es sei nur noch besonders auf das Druckmaximum hingewiesen, das im flachen Wasser unter dem Vorderschiff liegt, beim Übergang des Schiffes in tiefes Wasser aber über dem Rande der Glasplatte stehen bleibt und so unter dem vorüberziehenden Schiff entlang läuft. Das Herabsinken des Vorderschiffes in die

mehr horizontale Schwimmlage und die Verflachung der Wellen an der Wasseroberfläche gehen mit diesem Vorgange Hand in Hand.

Die eigenartigen Wirbel unter dem Rande der Glasplatte erklären sich aus den vorhandenen Strömungen. Bei der Auffahrt in das flache Wasser ist mit der vorwärts schwingenden Bewegung der Bugwelle das Wasser in der Tiefe unter die Glasplatte geschoben. Die Rückschwingung zur Heckwelle saugt es wieder hervor, wie in der Abbildung zu erkennen.

Wie die Vorgänge in einem natürlichen Gewässer erfolgen, in welchem eine schräg ansteigende Fläche einen allmählichen Übergang vom tiefen zum flachen Wasser bildet, ist auf Grund der beiden vorliegenden Photogramme leicht abzusehen.

Bei seitlicher Einengung des Fahrwassers treten bekanntlich sehr charakteristische Abänderungen der oberflächlichen Wellen ein, die offenbar auf ähnlichen Vorgängen beruhen, wie die eben besprochenen, mit denen sie meist Hand in Hand gehen. Diese Erscheinung mag späteren Untersuchungen vorbehalten sein.

---

Da das Ähnlichkeitsgesetz, das heute die Grundlage aller Modellversuche bildet, hinsichtlich der Wellenbildung jedenfalls allgemeine Gültigkeit besitzt, so sind wir in der Lage, unter Innehaltung der korrespondierenden Geschwindigkeiten sowohl das Kraftliniensystem wie den Stromlinienverlauf an großen Schiffen mit Hilfe unserer Methode der photographischen Analyse an kleinen Modellen zu ermitteln. Durch die Froudeschen Schleppversuche, die auf die Messung des Gesamtwiderstandes der Schiffe hinausgehen, ist es möglich, von zwei Schiffsförmungen diejenige ausfindig zu machen, die bei gegebener Fahrgeschwindigkeit den geringeren Widerstand im Wasser hervorruft. Man hat dabei auch bisher schon durch Photographie der Wellenlage in der Wasserlinie wertvolle Einblicke in den Widerstandsmechanismus gewonnen. Dagegen war man über die wichtigen Vorgänge im Inneren des Wassers auf Vermutungen angewiesen. Jetzt werden wir voraussichtlich in jedem einzelnen Falle angeben können, welchen Einfluß eine Änderung der Schiffsförmung auf den Gang der Strömung ausübt und ob derselbe als vorteilhaft oder nachteilig zu bezeichnen ist. Welchen praktischen Wert diese Erweiterung unserer Kenntnisse haben wird, muß die Zukunft lehren. Ich gebe mich aber der Hoffnung hin, daß die mitgeteilten Ergebnisse einer mühevollen Arbeit dem deutschen Schiffbau nicht zum Nachteil gereichen werden.

Einfluß der Fahrwassertiefe auf das Kraftliniensystem eines Schiffes.

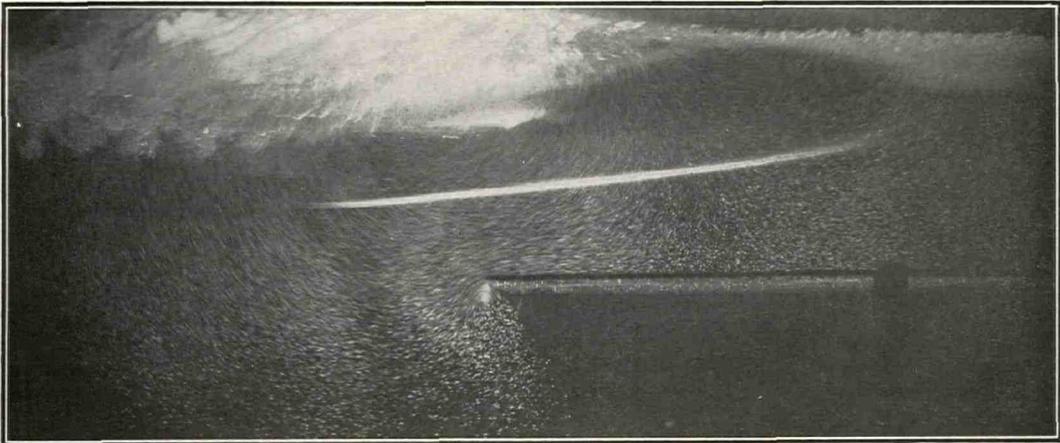


Fig. 1. Das Schiff fährt aus tiefem in flaches Wasser.

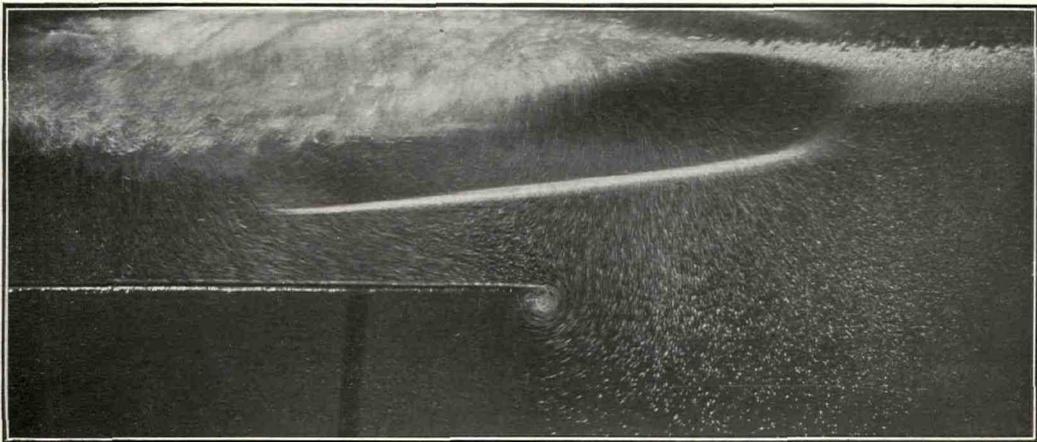
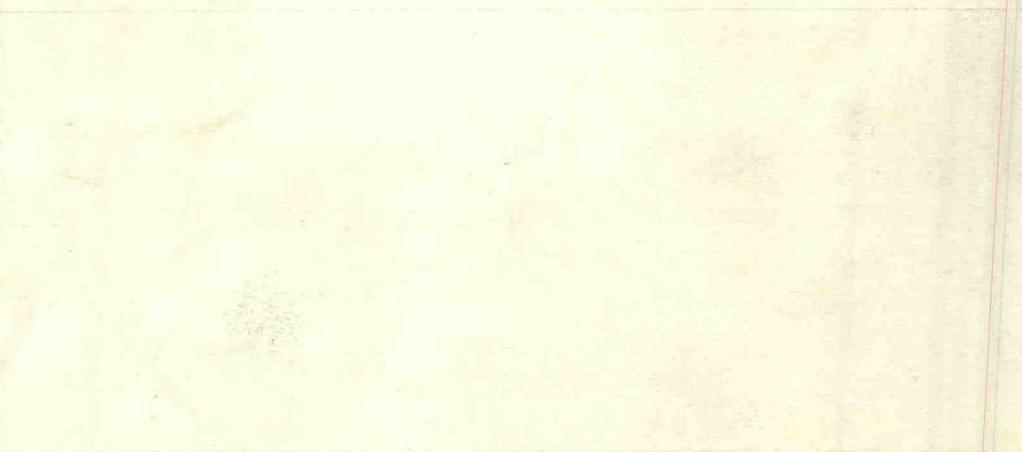


Fig. 2. Das Schiff fährt aus flachem in tiefes Wasser.

THE STATE



IN SENATE



OF THE STATE