

der Größe einer Flächeneinheit und Addition derselben oder, sofern ein Planimeter zur Verfügung steht, am raschesten und sichersten mit einem solchen.

Wassergeschwindigkeit.

Die mittlere Geschwindigkeit v des Wassers im Querprofil kann durch Rechnung oder durch Messung bestimmt werden. Bei der Ermittlung durch Rechnung sind zwei Größen maßgebend: der hydraulische Radius R und das Oberflächengefälle J . Der erstere ist definiert durch das Verhältnis

$$(1) \dots\dots\dots R = \frac{F}{p},$$

worin F in Quadratmetern und p in Metern die oben erwähnten Größen, Querschnitt des Wasserlaufes und Profillänge, bedeuten.

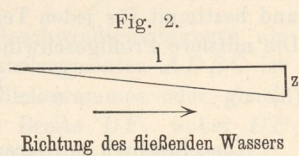
Das Oberflächengefälle, kurz Gefälle, J , genannt, ergibt sich aus zwei Messungen, und zwar derjenigen des Niveauunterschiedes z (in Meter) in zwei Querschnitten und derjenigen des Abstandes l in Meter derselben voneinander als:

$$(2) \dots\dots\dots J = \frac{z}{l} \text{ (vgl. Fig. 2).}$$

Die Geschwindigkeit v drückt sich aus durch die Formel:

$$(3) \dots\dots\dots v = c \sqrt{R \cdot J}.$$

c bedeutet hierbei einen Erfahrungswert und kann im Mittel zu 40 angenommen werden; er schwankt je nach der Rauigkeit des benetzten Umfanges in weiten Grenzen. Bazin hat durch Versuche die Werte c für verschiedene Fälle ermittelt (siehe hierüber Näheres in „Des Ing. Tasch.-B. Hütte“). c hängt aber nicht allein von der Rauigkeit der wasserberührten Fläche, sondern auch von den Größen R und J selbst ab. Diese letzten Einflüsse sind in der durch zahlreiche Messungen gewonnenen Erfahrungsformel von Ganguillet und Kutter mitberücksichtigt. Nach derselben hat der Koeffizient c den Wert:



$$(4) \dots\dots\dots c = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{J}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \text{ } ^1).$$

¹⁾ Über zeichnerische Ermittlung des Wertes von c vgl. Zeitschr. d. österreich. Arch.- u. Ing.-Vereins 1869, Bl. 9.

Hier bedeutet n den „Rauhigkeitskoeffizienten“ und hat für verschiedene Ufermaterialien den Wert:

$n = 0,010$ für sorgfältig gehobeltes Holz oder glatte Zementmauer.

$n = 0,012$ für gewöhnliche Bretter.

$n = 0,013$ für ein Bett aus gehauenen Quadern oder gut ausgefugten Backsteinen.

$n = 0,017$ für Bruchsteinmauerwerk.

$n = 0,025$ für Erdkanäle und in der Regel für gewöhnliche Bäche.

$n = 0,030$ für Gewässer mit groben Steinen oder Wasserpflanzen.

In jedem gegebenen Falle kann man n hiernach schätzen.

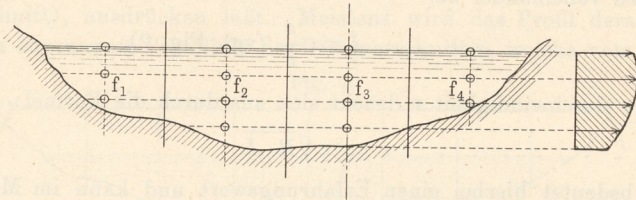
Näheres über Bestimmung von v durch Rechnung findet sich in Rühlmann, Hydromechanik.

Die mittlere Geschwindigkeit v läßt sich auch, wie schon erwähnt, durch direkte Messung ermitteln, und man benutzt hierzu verschiedene Vorrichtungen.

Die allgemeine Methode der Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit aus den an verschiedenen Stellen des Querschnittes ermittelten Werten besteht in Folgendem: Man teilt den Querschnitt F durch

Fig. 3 a.

3 b.



vertikale Linien in n Teile f_1, f_2, \dots, f_n von gleicher Breite (s. Fig. 3 a) und bestimmt für jeden Teil f die mittlere Geschwindigkeit $v_1, v_2 \dots v_n$. Die mittlere Profilgeschwindigkeit drückt sich sodann aus als

$$(5) \quad \dots \quad v = \frac{f_1 v_1 + f_2 v_2 + \dots + f_n v_n}{F}$$

Die einzelnen mittleren Geschwindigkeiten in einem Teilfelde f sind durch mehrere Messungen in verschiedenen Tiefen nach Fig. 3 a u. b zu ermitteln, da die Wassergeschwindigkeit nicht nur mit der Breite des Profils, sondern vor allem mit der Tiefe variabel ist. Fig. 3 b zeigt den normalen Verlauf der Geschwindigkeitskurve für einen Längsschnitt durch ein Feld f (vgl. auch Gieseler, „Grundlehren der Kulturtechnik“, Abschnitt Hydraulik). Die beobachteten Geschwindigkeiten müssen stets durch doppelte Messungen geprüft werden, da die Geschwindigkeit des Wassers an einer Stelle fortwährend zu wechseln pflegt.

Der bei der Geschwindigkeitsmessung herrschende Wasserstand muß notiert werden. Zur Festlegung desselben dient ein an der Meßstelle anzubringendes Pegel.

(Näheres über das Verhältnis der mittleren Geschwindigkeit in jedem einzelnen Teile f zu der maximalen und der minimalen Geschwindigkeit findet sich in „Des Ingenieurs Taschenbuch Hütte, Hydrodynamik“.)

Allgemein kann die mittlere Geschwindigkeit in einem Teile f in einem bestimmten Abstände vom Spiegel, der von der jeweiligen Tiefe des betreffenden Teiles abhängt, gemessen werden.

Zur Geschwindigkeitsmessung bedient man sich eines Schwimmers, der Pitot-Darcyschen Röhre und verwandter Apparate oder des Woltmannschen Flügels.

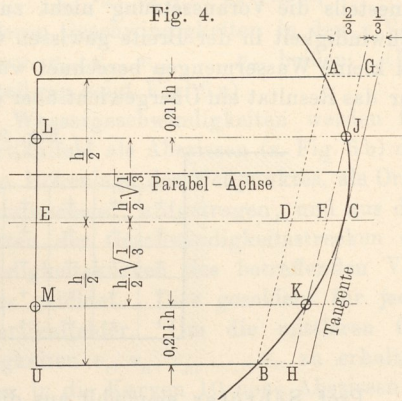
Bei Messungen von Wasserkraftanlagen liegen die Verhältnisse gewöhnlich insofern günstig, als das Profil eine einfache geometrische, meist rechteckige Form besitzt. In diesem Falle wird häufig die Teichmannsche Methode der Querschnittseinteilung mit Vorteil benutzt. Bei Anwendung derselben kann die Geschwindigkeitsmessung auf verhältnismäßig wenig Punkte beschränkt werden und führt dennoch zu genauen Resultaten.

Die Methode gründet sich darauf, daß sowohl in einem senkrechten als auch in einem horizontalen Längsschnitt durch einen Wasserlauf die Geschwindigkeitskurven (vgl. Fig. 3 b) annähernd die Gestalt von Parabeln mit horizontalen Achsen haben.

Fig. 4 stelle einen solchen senkrechten Längsschnitt dar; es sei die Geschwindigkeitskurve als Parabel angenommen. Die Fläche des Parabelsegmentes $ADBC$ ist gleich zwei Drittel des umschriebenen Parallelogrammes oder gleich einem Parallelogramm von der horizontalen Breite DF , wobei DF gleich zwei Drittel der horizontal gemessenen Höhe des Parabelsegmentes ist. Daraus folgt, daß die Geschwindigkeitsfläche $OUBCA$ gleich der Trapezfläche $OUHG$ und die Strecke EF die mittlere Geschwindigkeit in dem senkrechten Längsschnitt durch OU mißt. Es ist ohne weiteres klar, daß das Mittel aus den Geschwindigkeiten LJ und MK in den Punkten L und M ebenfalls gleich EF ist, es genügen also für den senkrechten Längsschnitt durch O die Beobachtungen in L und M . Die Lage der Punkte J und L bzw. K und M ist, wenn L die Tiefe des Wassers bedeutet, ein für allemal durch folgende Beziehungen festgelegt:

$$\begin{aligned} OE &= EU = \frac{1}{2} h, \\ LE &= EM = \frac{1}{2} h \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} = 0,289 h, \\ OL &= MU = 0,211 h. \end{aligned}$$

Fig. 4.

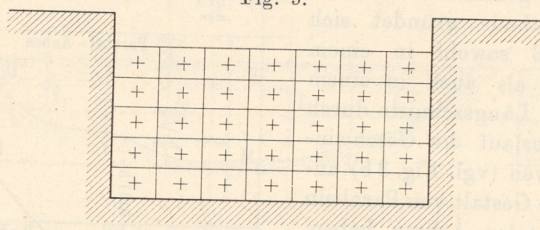


Eine analoge Betrachtung läßt sich für einen horizontalen Schnitt anstellen, und man gelangt daher zu folgendem Verfahren der Querschnittseinteilung:

Man teilt die Profilfläche in eine mäßige Anzahl Felder von der Breite b , bestimmt in jedem Felde zwei Senkrechte, welche vom Rande der Felder um $0,211 b$ abstehen, und legt auf jeder Senkrechten zwei Punkte im Abstände $0,211 h$ vom Spiegel und von der Sohle fest; h bezeichnet hierbei die Entfernung vom Spiegel bis zur Sohle. Die mittlere Geschwindigkeit in den so gefundenen vier Punkten eines Feldes kann als die mittlere Geschwindigkeit in dem betreffenden Felde angesehen werden. Näheres hierüber siehe Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 1883, S. 4.

Neuerdings wird die Zweckmäßigkeit der Teichmannschen Einteilung des Meßprofils von manchen Praktikern weniger empfohlen, da einesteils die Voraussetzung nicht zutrifft, daß die verschiedene Geschwindigkeit in der Breite gewissen Gesetzen folgt, andererseits meist zu kleine Wassermengen berechnet würden, weil die Punkte am Rande für das Resultat ein Übergewicht über die mittleren Punkte bekommen¹⁾.

Fig. 5.



Prof. Schröter empfiehlt aus diesen Gründen, eine Messung der Geschwindigkeit an zahlreicheren Punkten vorzunehmen und zu diesem Zwecke das Meßprofil in Felder von gleichmäßiger Breite und Höhe einzuteilen (s. Fig. 5). Sowohl bei dieser letzteren, als auch bei der Teichmannschen Methode vereinfacht sich die Gleichung

$$v = \frac{f_1 v_1 + f_2 v_2 + \dots + f_n v_n}{F} \quad (\text{s. S. 5}),$$

da die Flächen der Teilfelder gleich groß sind, es drückt sich die mittlere Profilgeschwindigkeit daher aus durch:

$$(6) \quad \dots \quad v = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_n}{n},$$

d. h. als Mittelwert aus sämtlichen Einzelgeschwindigkeiten an den untersuchten Profilverpunkten. Das mittlere v kann auf graphischem Wege gefunden werden, womit der Vorteil verbunden ist, daß der Überblick über die Veränderung der Geschwindigkeit von Punkt zu

¹⁾ Siehe Müller, Die Francis-Turbinen.

Punkt durch die aufgezeichneten Geschwindigkeitskurven bedeutend erleichtert wird. Das Verfahren ist, kurz gefaßt, folgendes:

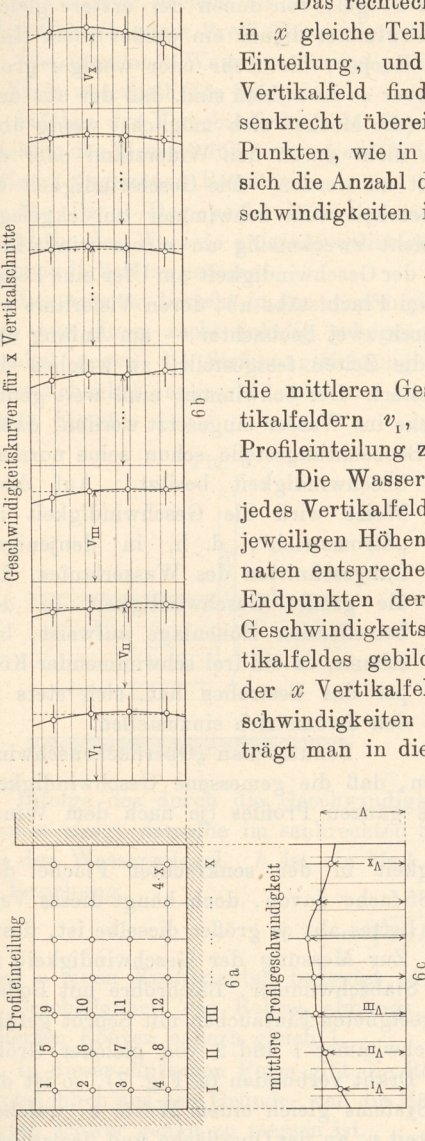
Das rechteckige Profil sei der Breite nach in x gleiche Teile (vgl. Fig. 5, Schrötersche Einteilung, und Fig. 6 a) zerlegt. In jedem Vertikalfeld findet die Messung in mehreren senkrecht übereinander liegenden, z. B. vier Punkten, wie in Fig. 6 a, statt. Daraus ergibt sich die Anzahl der Meßpunkte zu $4x$. Die Geschwindigkeiten in diesen Punkten mögen

$$\begin{matrix} v_1^1; & v_1^2 & \dots & v_1^y \\ v_{11}^1; & v_{11}^2 & \dots & v_{11}^y \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_x^1; & v_x^2 & \dots & v_x^y \text{ usw.,} \end{matrix}$$

die mittleren Geschwindigkeiten in den x Vertikalfeldern $v_1, v_{11}, v_{111} \dots v_x$ heißen. (Die Profileinteilung zeigt Fig. 6 a).

Die Wassergeschwindigkeiten werden für jedes Vertikalfeld als Abszissen (s. Fig. 6 b) der jeweiligen Höhenlage des Meßpunktes, als Ordinaten entsprechend, aufgetragen, und aus den Endpunkten der Geschwindigkeitsstrecken die Geschwindigkeitskurven des betreffenden Vertikalfeldes gebildet. Dies geschieht für jedes der x Vertikalfelder. Um die mittleren Geschwindigkeiten $v_1, v_{11}, v_{111} \dots v_x$ zu erhalten, trägt man in die Kurven 10 neue Abszissen in gleichen Abständen voneinander ein, mißt die entsprechenden Geschwindigkeiten und bildet aus den so gewonnenen 10 Abszissenwerten das arithmetische Mittel. Die Geschwindigkeiten $v_1, v_{11}, v_{111} \dots v$ werden als Ordinaten in das Profil an den x Stellen von einer gemeinsamen Abszisse aus aufgetragen und die Endpunkte derselben zu einer Kurve verbunden, Fig. 6 c.

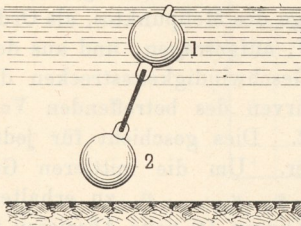
Fig. 6. Geschwindigkeitskurven für x Vertikalschnitte



Dieselbe veranschaulicht die Veränderung der Geschwindigkeit über die Breite hin. In analoger Weise, wie in Fig. 6 b geschehen, ermittelt man durch Einteilung der Breite in 10 Felder die mittlere Profilschwindigkeit.

Die zur Bestimmung der Geschwindigkeit des fließenden Wassers gebräuchlichsten Apparate sind der Schwimmer, die Pitot-Darceysche Röhre und der Woltmannsche Flügel, von denen der erstere gleichzeitig der einfachste ist. Als Schwimmer dienen ein weißes Stück Holz, eine Glasflasche, sowie andere Körper, die mehr oder weniger große Tauchtiefe besitzen, jedenfalls aber so zu wählen sind, daß der aus dem Wasser ragende sichtbare Teil (die Marke) sich möglichst wenig über den Wasserspiegel erhebt, um nicht durch den Widerstand oder die Strömungen der Luft beeinflußt zu werden. Die Geschwindigkeit ergibt sich als der in der Zeiteinheit vom Schwimmer zurückgelegte Weg. Die Beobachtung geschieht zweckmäßig an einem windstillen Tage. Man steckt zur Messung der Geschwindigkeit am Ufer eine Länge von 50 bis 100 m durch je zwei Fluchtstäbe ab, deren Visierlinie zur Flußrichtung senkrecht ist. Durch zwei Beobachter — am Anfang und Ende der Strecke — werden die Zeiten festgestellt, zu welchen der Schwimmer die Fluchtstäbe passiert. Der Schwimmer muß weit genug oberhalb der Beobachtungsstrecke ins Wasser eingesetzt werden, damit er bei Ankunft an der ersten Beobachtungsstelle schon seine normale Geschwindigkeit besitzt. Auf diese Weise wird die Geschwindigkeit im „Stromstrich“, d. h. in denjenigen Längsschnitten des Wasserlaufes, der die größte Geschwindigkeit in der betreffenden Höhenlage aufweist, bestimmt, da ein frei schwimmender Körper das Bestreben hat, sich stets in den Stromstrich einzustellen.

Fig. 7.



Benutzt man „Oberflächenschwimmer“, so ist zu berücksichtigen, daß die gemessene Geschwindigkeit auch nahezu die maximale des ganzen Profils (je nach dem Windeinfluß) ist.

Die mittlere Geschwindigkeit in der senkrechten Fläche der Schwimmlinie ist etwa das 0,85fache davon, doch hängt dieses Verhältnis von der Rauigkeit des Bettes ab; je größer dieselbe ist, desto kleiner wird der Koeffizient. Zur Messung der Geschwindigkeit in beliebigen Tiefen benutzt man Stabschwimmer, Blechrohre mit Boden und Deckel usw., die bis zum geeigneten Eintauchen mit Schrot gefüllt werden. Werden z. B. zwei Schwimmer 1 und 2 von gleicher Größe und Gestalt durch einen feinen Draht verbunden (s. Fig. 7), so ist die Geschwindigkeit eines solchen Systems gleich einem Werte v , welcher das Mittel aus der Geschwindigkeit v_1 an der Oberfläche und derjenigen in der Tiefe 2 des zweiten Schwimmers v_2 darstellt.

Es bestehen also die Beziehungen:

$$(7) \quad v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \text{und} \quad v_2 = 2v - v_1.$$

Durch gesonderte Beobachtung von v_1 und v_2 läßt sich demnach die Geschwindigkeit in beliebiger Tiefe bestimmen ¹⁾.

Schwimmer, welche bis zur Sohle des Bettes reichen, können nur bei gleichbleibendem Profil Verwendung finden.

Die maximale Wassergeschwindigkeit liegt um etwa ein Drittel der Tiefe unterhalb des Spiegels.

Infolge der Verschiedenheit der Geschwindigkeit in den einzelnen Schichten des Wassers führt naturgemäß die Messung mittels Schwimmers zu einem ungenauen Resultat.

Die Pitot-Darcysche Röhre gestattet, durch Bestimmung der Druckhöhe des Wassers an einer beliebigen Stelle des Wasserlaufes die Geschwindigkeit zu messen.

Der Apparat besteht in der ursprünglichen von Pitot angegebenen Form aus einem rechtwinkelig gebogenen Rohre, welches mit einem Schenkel gegen die Strömungsrichtung gestellt wird, während der andere Schenkel senkrecht steht und über den Wasserspiegel emporragt (s. Fig. 8).

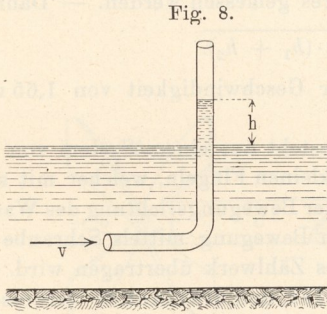


Fig. 8.

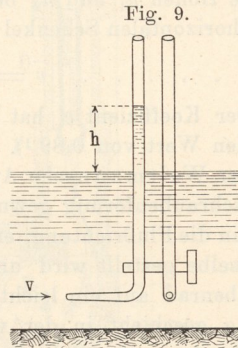


Fig. 9.

Infolge des durch die Geschwindigkeit c des Wassers bewirkten Druckes steigt dasselbe im senkrechten Schenkel bis zu einer Höhe h über den Wasserspiegel. h ist ein Maß für die Geschwindigkeit nach der Beziehung

$$(8) \quad \dots \dots \dots v = c \cdot \sqrt{2gh},$$

wobei c einen Koeffizienten bedeutet, der von den Dimensionen und der Beschaffenheit des Rohres abhängt; sein Wert ist bei gut konstruierten Röhren nahezu gleich 1.

In dieser einfachen Form gibt die Röhre keine genauen Resultate, hauptsächlich aus dem Grunde, weil die Höhe h besonders bei geringeren Werten schwer genau zu messen ist.

Eine erste Verbesserung der Pitotschen Röhre wurde durch Reichenbach eingeführt. Derselbe baute die Röhre mit einer

¹⁾ Siehe E. Gieseler, Grundlehren der Kulturtechnik, Abt. Hydraulik.

anderen gleich weiten Röhre mit seitlicher Öffnung zusammen. Bei dieser Anordnung stellt sich in der zweiten Röhre ein Wasserstand von der Höhe $h = 0$ ein; der Spiegel in der Röhre fällt mit dem mittleren Flußspiegel zusammen. Durch einen Hahn, der beide Röhren zu gleicher Zeit abzuschließen gestattet, ist man imstande, bei plötzlichem Schließen desselben die Wassersäulen in beiden senkrechten Schenkeln zu fixieren, wonach man den Apparat aus dem Wasser heben und bequem den Niveauunterschied der beiden Röhren feststellen kann. Zugleich ist man bei einer derartigen Konstruktion von der Kapillarwirkung in den senkrechten Schenkeln unabhängig, da dieselbe in beiden Röhren in gleicher Weise stattfindet und somit auf die Differenz der Spiegel keinen Einfluß hat. Der Apparat ist in Fig. 9 schematisch dargestellt. Darcy führte weitere Verbesserungen desselben ein, welche sich auf Erleichterung in der Handhabung beziehen und ihn zu einem sehr brauchbaren und genauen Meßinstrument machten.

Die Pitot-Darcysche Röhre wird auch in der Weise verwandt, daß die Höhen h_1 und h_2 bei stromaufwärts und stromabwärts gerichtetem horizontalen Schenkel des Rohres gemessen werden. — Dann gilt

$$(9) \dots \dots \dots v = c' \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 + h_2)}.$$

Der Koeffizient c' hat bei einer Geschwindigkeit von 1,65 m/sec etwa den Wert von 0,89¹⁾.

Der Woltmannsche Apparat besteht aus einem System von mehreren schraubenförmig gewundenen kleinen Flügeln, welcher mit seiner Achse in die Flußrichtung, entgegen der Bewegungsrichtung des Wassers, in dasselbe gestellt wird und dessen Bewegung mittels Schraube und Schraubenrad auf ein leicht gehendes Zählwerk übertragen wird. Die Zählung geschieht in der von Amsler und Harlacher verbesserten Form des Apparates elektromagnetisch, in der von Wagner eingeführten Form durch Schallvorrichtung. Diese Vorrichtungen zeigen je 100 Umdrehungen der Flügel automatisch an.

In Fig. 10 ist die Konstruktion eines Woltmannschen Flügels der ersteren Art ohne den reinen elektrischen Teil des Apparates — Elektromagnet und Batterie — dargestellt. Das Flügelsystem A sitzt auf der Welle B , welche in der zylindrischen Büchse C dem Wasser unzugänglich gelagert ist. Die Bewegung der Welle überträgt sich vermittelst der Schraube D auf das Schraubenrad E , das bei 100 Umdrehungen der Flügelwelle eine volle Umdrehung ausführt. Um dieses anzuzeigen, ist am Rade E eine Nase N angebracht, welche gegen eine um den Punkt P drehbare Klinke stößt und dadurch einen Kontakt bei Punkt Q herstellt.

Auf diese Weise wird der zum elektromagnetischen Anzeigen einer vollen Umdrehung nötige Stromschluß hergestellt.

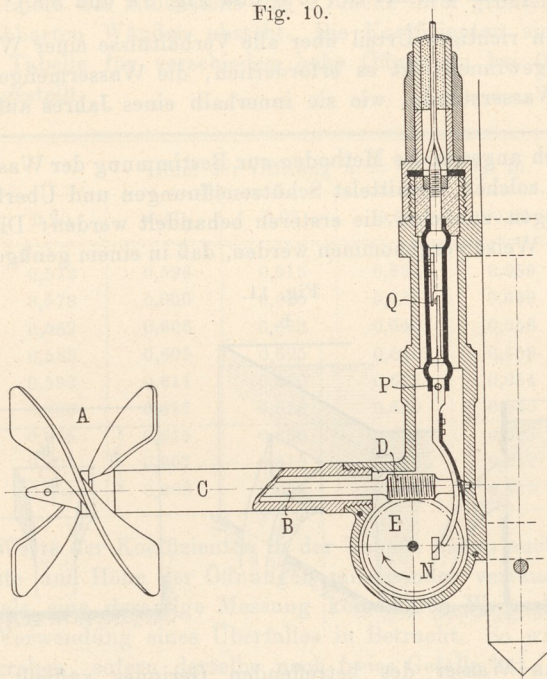
¹⁾ Des Ing. Tasch.-B. Hütte, Dynamik flüssiger Körper.

Hinsichtlich des reinen mechanischen Teiles werden auch noch andere Konstruktionen des Woltmannschen Flügels ausgeführt, z. B. wird die Welle *B* samt Schraube und Schraubenrad nicht in einem verschlossenen Gehäuse, sondern frei gelagert.

Wie aus obiger Beschreibung hervorgeht, muß eine bestimmte Beziehung zwischen der Wassergeschwindigkeit *v* und der Umlaufzahl *n* der Flügel bestehen. Dieselbe läßt sich ausdrücken durch:

$$(10) \dots\dots\dots v = \alpha + \beta \cdot n,$$

Fig. 10.



worin α und β konstante Größen sind, die experimentell gefunden werden¹⁾.

Mißt man bei einem Woltmannschen Flügel mit elektrischem Signal, z. B. nach je 50 Umdrehungen, die Zeitdauer vom Aufhören eines Signals bis zum Aufhören des nächsten Signals und nennt die verstrichene Zeit *t*, so kann man analog eine Gleichung von der Form

$$(11) \dots\dots\dots v = \alpha + \frac{\beta}{t}$$

aufstellen, worin naturgemäß α und β andere Werte haben wie in Gleichung (10).

¹⁾ Siehe hierzu auch: „Die Gleichung des Woltmannschen Flügels und die Ermittlung ihrer Koeffizienten auf graphisch-analytischem Wege.“ (Zeitschr. des Vereins deutscher Ingenieure 1895, S. 917 u. 945.)