

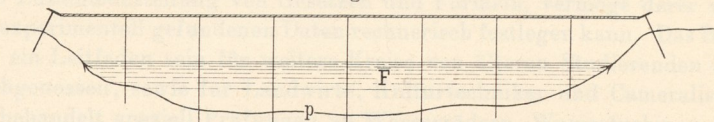
Wassermessung.

Um die durch einen Wasserlauf von der Natur gebotene Wasserkraft oder die verfügbare Leistung beurteilen zu können, ist es in erster Linie erforderlich, die Wassermenge zu ermitteln, welche pro Sekunde einen beliebigen Querschnitt desselben passiert.

Diese Wassermenge ist definiert durch das Produkt aus Querschnitt des Wasserlaufes in Quadratmetern und mittlerer Geschwindigkeit der Wasserteilchen in dem betreffenden Querschnitt.

Der Querschnitt des jeweils zur Verfügung stehenden Wasserlaufes wird im allgemeinen eine Form haben, welche sich nicht in einfacher Weise geometrisch, etwa als Produkt von Breite und Höhe (rechteckiger Querschnitt), ausdrücken läßt. Meistens wird das Profil derart sein, daß die sogenannte Profillinie des Bettquerschnittes, welche vom Wasser

Fig. 1.



benetzt ist, eine flache, unregelmäßige Kurve bildet. Die Länge derselben, der sogenannte benetzte Umfang p (siehe Fig. 1), ist im allgemeinen angenähert gleich der Breite des Spiegels. Der Querschnitt F des Wasserlaufes in Quadratmetern kann in folgender Weise bestimmt werden.

Man spannt eine Schnur mit Knoten oder Marken horizontal und quer über den Wasserspiegel aus (siehe Fig. 1). Die Knoten oder Marken haben gleiche Abstände voneinander in der Größe von etwa 1 m. An den einzelnen Marken werden die Tiefen vom Spiegel bis zum Grunde durch Loten mittels Meßplatte oder Peilstange bestimmt. Aus den erhaltenen Werten zeichnet man den Profilquerschnitt auf. Man beachte hierbei, daß die Querschnittsmessung genau senkrecht zur Stromrichtung erfolgt. Das zu messende Profil wähle man an einer geraden Strecke des Gerinnes und nicht an einer Krümmung. Bei unregelmäßiger Form der Profillinie müssen Messungen an vielen Profilmittelpunkten vorgenommen werden.

Die Ausmessung der so gefundenen Profillfläche F geschieht entweder in elementarer Weise durch Einteilung in rechteckige Felder von

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

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

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:

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

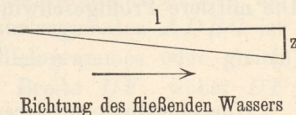
Die Geschwindigkeit v drückt sich aus durch die Formel:

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

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. Taschen-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:

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

Fig. 2.



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.

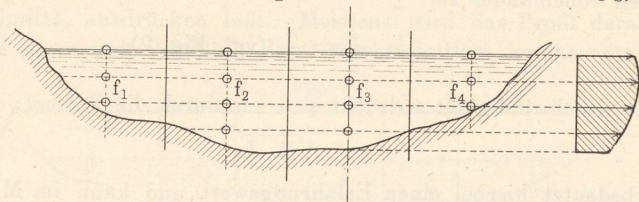
Näheres über Bestimmung von v durch Rechnung findet sich in Rühlmann, Hydromechanik.

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

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

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.

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.

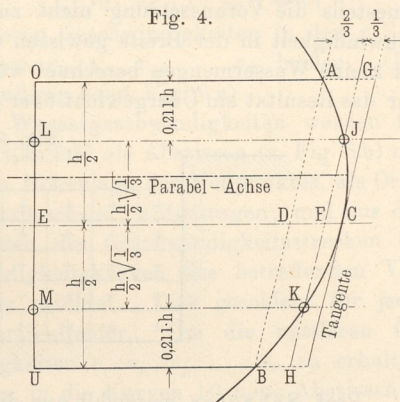
Fig. 4 stelle einen solchen senkrechten Längsschnitt dar; es sei die Geschwindigkeitskurve als Parabel angenommen. Die Fläche des Parabelsegmentes $ADBC$ ist gleich zwei Drittel des umschriebenen Parallelogrammes oder gleich einem Parallelogramm von der horizontalen Breite DF , wobei DF gleich zwei Drittel 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:

$$OE = EU = \frac{1}{2} h,$$

$$LE = EM = \frac{1}{2} h \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} = 0,289 h,$$

$$OL = MU = 0,211 h.$$

Fig. 4.

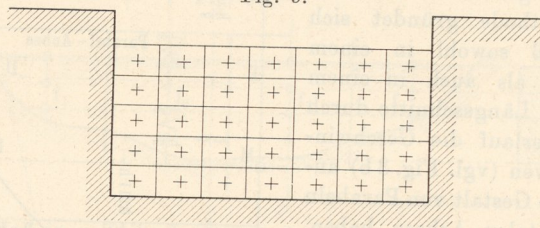


Eine analoge Betrachtung läßt sich für einen horizontalen Schnitt anstellen, und man gelangt daher zu folgendem Verfahren der Querschnittseinteilung:

Man teilt die Profillfläche 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 bekommen ¹⁾.

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 Profilpunkten. 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:

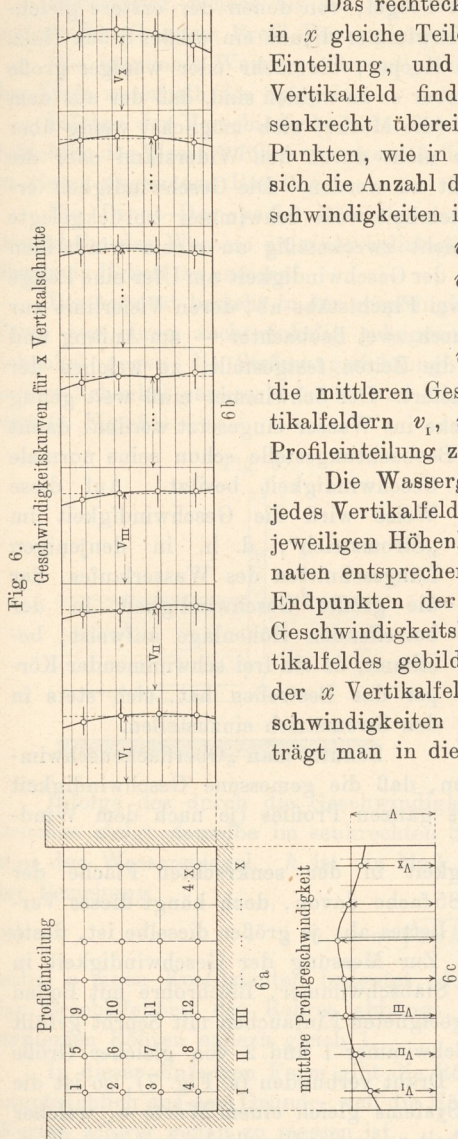
Das rechteckige Profil sei der Breite nach in x gleiche Teile (vgl. Fig. 5, Schrötersche Einteilung, und Fig. 6 a) zerlegt. In jedem Vertikalfeld findet die Messung in mehreren senkrecht übereinander liegenden, z. B. vier Punkten, wie in Fig. 6 a, statt. Daraus ergibt sich die Anzahl der Meßpunkte zu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

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

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

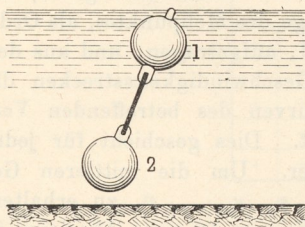
Die Wassergeschwindigkeiten werden für jedes Vertikalfeld als Abszissen (s. Fig. 6 b) der jeweiligen Höhenlage des Meßpunktes, als Ordinaten entsprechend, aufgetragen, und aus den Endpunkten der Geschwindigkeitsstrecken die Geschwindigkeitskurven des betreffenden Vertikalfeldes gebildet. Dies geschieht 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.

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-Darcysche 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

Fig. 7.



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.

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⁾.

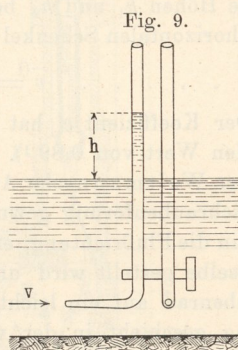
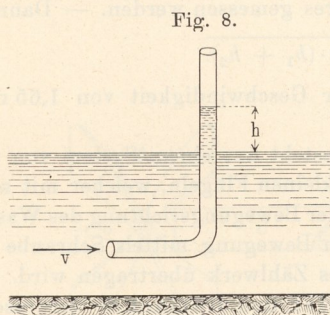
Schwimmer, welche bis zur Sohle des Bettes reichen, können nur bei gleichbleibendem Profil Verwendung finden.

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 rechtwinklig 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).



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

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

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 mittelst 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.

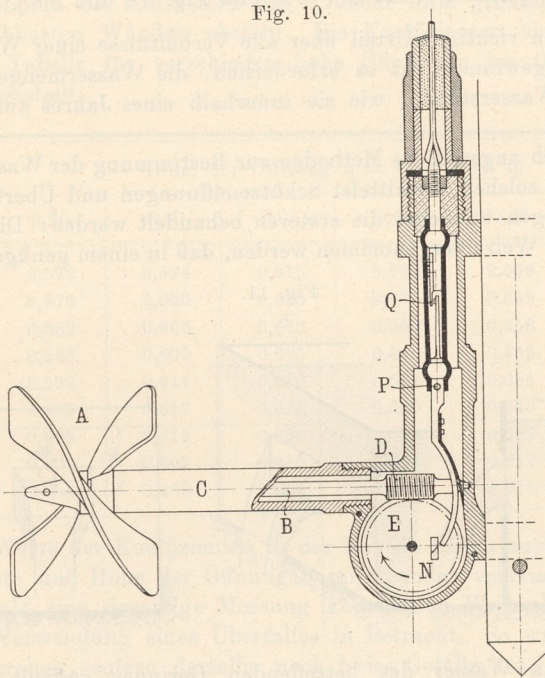
¹⁾ Des Ing. Tasch.-B. Hütte, Dynamik flüssiger Körper.

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:

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

Fig. 10.



worin α und β konstante Größen sind, die experimentell gefunden werden ¹⁾.

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

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

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.)

Wassermenge.

Wie schon in der Einleitung des Kapitels erwähnt wurde, ergibt sich die pro Sekunde durch einen Querschnitt des Flußlaufes strömende Wassermenge aus dem Querschnitt F in Quadratmetern und der mittleren Geschwindigkeit v des Profils in Meter/Sekunden, d. h.

$$(12) \quad V = F \cdot v = f_1 v_1 + f_2 v_2 + \dots + f_n v_n.$$

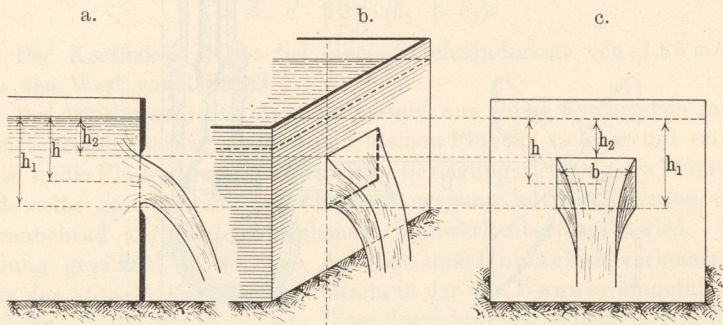
[Siehe Formel (5), S. 5 und Fig. 3 a und 3 b.]

Um ein richtiges Urteil über alle Verhältnisse einer Wasserkraftanlage zu gewinnen, ist es erforderlich, die Wassermengen für verschiedene Wasserstände, wie sie innerhalb eines Jahres auftreten, zu ermitteln.

Vielfach angewandte Methoden zur Bestimmung der Wassermengen bestehen in solchen vermittelst Schützenöffnungen und Überfällen.

Es mögen zunächst die ersteren behandelt werden: Die Messung kann in der Weise vorgenommen werden, daß in einem genügend großen

Fig. 11.



Behälter das Wasser des betreffenden Gerinnes zufließt und eine Öffnung der einen Wand von regelmäßiger Form das Wasser austreten läßt. Die Messung und Berechnung der ausfließenden Wassermengen nach den Gesetzen der Hydrodynamik erfolgt alsdann, wenn ein Behälterzustand eingetreten ist, d. h. wenn der Spiegel im Wasserbehälter weder fällt noch steigt. Die Öffnung wird gewöhnlich rechteckig gewählt, die Breite derselben sei b in Meter, der Abstand der Unterkante der Öffnung vom Spiegel h_1 in Meter, entsprechend derjenigen der Oberkante h_2 und dem Schwerpunktsabstand $h = \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)$

(s. Fig. 11 a, b, c). Die Abstände h , h_1 und h_2 sind in der Entfernung 1 bis 1,5 m von der Öffnung zu messen. Die Menge des sekundlich austretenden Wassers ist alsdann in Cubikcentimetern

$$(13) \quad V = \mu \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \mu \cdot F \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h},$$

wobei F den Querschnitt der Öffnung in Quadratmetern und μ den durch die Kontraktion des Wasserstrahles bedingten Ausflußkoeffizienten bedeutet. Der letztere hängt von der Form der Austrittsfläche und der Dicke der Wand bzw. der Schärfe der Austrittskanten ab. Poncelet und Lesbros bestimmten für senkrecht stehende rechteckige Öffnungen in dünner Wand von 0,2 m Breite bei normaler Kontraktion den Ausflußkoeffizienten μ . Normale Kontraktion tritt dann ein, wenn der Wasserspiegel in 1 m horizontaler Entfernung von der Öffnung ruhend ist und letztere um mindestens das 2,7fache ihrer größten Dimension von benachbarten Wänden absteht. Die Koeffizienten sind in nachstehender Tabelle für verschieden hohe Öffnungen bei 0,2 m Breite zusammengestellt.

h_2 m	Höhe der Öffnung $h = (h_1 - h_2)$ m					
	0,20	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01
0,02	0,572	0,596	0,615	0,634	0,659	0,694
0,03	0,578	0,600	0,620	0,638	0,659	0,688
0,04	0,582	0,603	0,623	0,640	0,658	0,683
0,05	0,585	0,605	0,625	0,640	0,658	0,679
0,10	0,592	0,611	0,630	0,637	0,654	0,666
0,50	0,603	0,617	0,628	0,630	0,640	0,644
1,00	0,605	0,615	0,626	0,628	0,633	0,632
2,00	0,601	0,607	0,613	0,612	0,612	0,611
3,00	0,601	0,603	0,606	0,608	0,610	0,609

Die Werte der Koeffizienten in der Tabelle haben auch Gültigkeit, wenn Breite und Höhe der Öffnungen miteinander vertauscht werden. Häufiger als eine derartige Messung kommt für Wasserkraftanlagen wohl die Verwendung eines Überfalles in Betracht. So wird mitunter im Untergraben, sofern derselbe noch freies Gefälle hat, die Wassermessung vorgenommen; es wird hierbei in den Untergraben ein Wehr eingezogen. Wird in einem Gerinne eine Querwand mit rechteckigem Einschnitt (s. Fig. 12 a und b), dessen horizontale Kante um die Höhe h in Meter unterhalb des Wasserspiegels liegt, eingeschoben, so ist die ausfließende Wassermenge theoretisch

$$(14a) \quad \dots \dots \dots V = \frac{2}{3} b \cdot h \cdot \sqrt{2gh}^1).$$

Praktisch ist dieser Größe noch ein Faktor μ hinzuzufügen, welcher die Kontraktion durch die Unter- und Seitenkanten berücksichtigt, d. h.

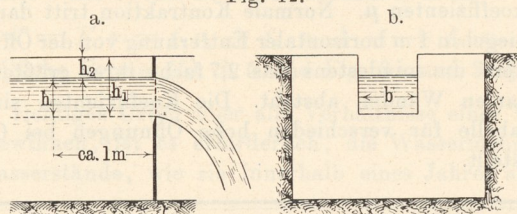
$$(14b) \quad \dots \dots \dots V = \frac{2}{3} \mu \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2gh}.$$

¹⁾ Ableitung der Gleichung siehe E. Gieseler, Grundlehren der Kulturtechnik; Abteil. Hydraulik.

Die Werte von μ sind für Überfälle mit dünner Wand mit großer Genauigkeit festgestellt, weshalb die Wassermessung mittels Überfalles für fließendes Wasser als recht zuverlässig anzusehen ist.

Lesbros hat für die verschiedenen Höhen h die Ausflußkoeffizienten von Überfällen mit dünner Wand bei normaler Kontraktion ermittelt.

Fig. 12.



— In nachstehender Tabelle ist die Messung der Größe h in 1 m Entfernung von der Überfallstelle zu verstehen, wie Fig. 12 a zeigt.

Für eine Breite $b = 0,2$ m und				Für eine Breite $b = 0,6$ m und			
$h =$	$\frac{2}{3}\mu =$	$h =$	$\frac{2}{3}\mu =$	$h =$	$\frac{2}{3}\mu =$	$h =$	$\frac{2}{3}\mu =$
0,01	0,424	0,08	0,397	0,06	0,412	0,30	0,391
0,02	0,417	0,10	0,395	0,10	0,406	0,40	0,391
0,04	0,407	0,15	0,393	0,15	0,400	0,50	0,391
0,06	0,401	0,20	0,390	0,20	0,395	0,60	0,390

Die normale Kontraktion, die hierbei vorausgesetzt ist, tritt allerdings in den meisten praktischen Fällen nicht ein, vielmehr handelt es sich meist um Kanäle, in denen das Wasser mit einer gewissen Geschwindigkeit zufließt, und kann das Wasser im Raume vor dem Überfalle nicht als stehend betrachtet werden. In diesem Falle sind die Koeffizienten nach Weisbach zu ermitteln, wie folgt:

In der nachstehenden Tabelle bedeutet:

n das Verhältnis von $b \cdot h$ zum Querschnitt des Zuflußkanales, μ_2 den Ausflußkoeffizienten für den Fall, daß b kleiner ist als die Kanalbreite, μ_3 den entsprechenden Wert für den Fall, daß b gleich der Kanalbreite ist.

$n =$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50
$\mu_2 =$	1,000 μ	1,001 μ	1,003 μ	1,007 μ	1,014 μ	1,044 μ	1,107 μ
$\mu_3 =$	0,145 μ	1,049 μ	1,056 μ	1,064 μ	1,074 μ	1,100 μ	1,133 μ

μ ist hierbei der vorhergehenden Tabelle für normale Kontraktion zu entnehmen.

Der Koeffizient μ_3 berücksichtigt, wie schon angedeutet, diejenigen Verhältnisse, bei welchen der Überfall ohne seitliche Kontraktion, d. h. über die ganze Breite des Kanales stattfindet. Derartige Überfälle kommen besonders da in Betracht, wo die zu messende Wassermenge verhältnismäßig groß ist und trotzdem kein bedeutender Rückstau durch die Überfallwand stattfinden soll.

Für Überfälle ohne seitliche Kontraktion hat ferner F. Frese eine Formel für den Koeffizienten μ aufgestellt, die bei beliebigen Wassertiefen H des Kanales und beliebigen Kanalbreiten Verwendung findet; ist h wieder die Überfallhöhe (Druckhöhe), wie oben gemessen, so ist der Koeffizient

$$(15) \quad \mu = \left(0,615 + \frac{0,0021}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{H} \right)^2 \right].$$

Besonders ausführliche Untersuchungen von Überfällen ohne Seitenkontraktion hat Hansen auf der hydraulischen Versuchsstation der Firma Briegleb, Hansen u. Co., Gotha, in den Jahren 1887 bis 1891 vorgenommen. — Über dieselben ist in der Zeitschr. d. Vereins deutsch. Ingen. 1892 ausführlich berichtet.

Nach Hansen verdienen die Überfälle ohne seitliche Kontraktion bei Wassermessungen den Vorzug, da bei solchen der Ausflußkoeffizient von der Breite des Kanales, sobald dieselbe eine gewisse untere Grenze überschreitet, als unabhängig bezeichnet und deshalb mit größerer Sicherheit festgelegt werden kann.

Bezüglich der Anordnung des Überfalles ist zu beachten, daß in den Seitenwänden unterhalb des Überfallstrahles Öffnungen für den freien Zutritt atmosphärischer Luft anzubringen sind. Da nämlich das auffallende Wasser zu Wirbelbildungen Anlaß gibt, durch welche die Luft in Form von großen und kleinen Blasen unter dem Strahle weggespült wird, so muß für beständigen Zutritt frischer Luft Sorge getragen werden (s. Fig. 13).

Die hierzu dienende Öffnung ist so nahe an der Überfallwand anzubringen, daß sie auch bei kleinen Überfallhöhen nicht vom Strahle erreicht wird.

Die von Hansen bei seinen Versuchen verwendete Überfallbreite betrug 1,0825 m. Die Höhe der Überfallwand über dem Gerinneboden 0,514 m. Die Überfallhöhe h wurde in einem Abstände von 1,095 m gemessen. Das Resultat der mit großer Sorgfalt durchgeführten Messungen ist in nachstehender Tabelle zusammengefaßt; dieselbe gibt den Zusammenhang zwischen der Überfallhöhe h in Meter und dem Koeffizienten $\frac{2}{3} \mu$:

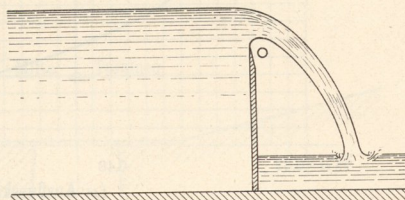


Fig. 13.

Für eine Breite $b = 0,2$ m und		Für eine Breite $b = 0,6$ m und	
$h =$	$\frac{2}{3}\mu =$	$h =$	$\frac{2}{3}\mu =$
0,01	0,4240	0,06	0,4120
0,02	0,4170	0,10	0,4060
0,04	0,4070	0,15	0,4000
0,06	0,4010	0,20	0,3950
0,08	0,3970	0,30	0,3925 ?
0,10	0,3950	0,40	0,3910
0,15	0,3930	0,50	0,3905 ?
0,20	0,3900	0,60	0,3900

Fig. 14 a.

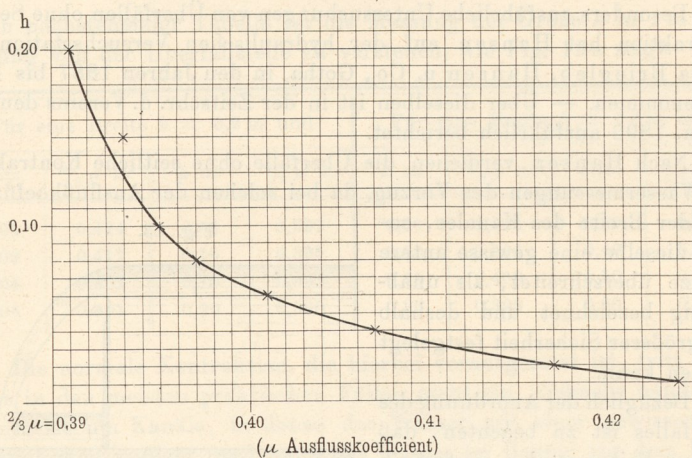
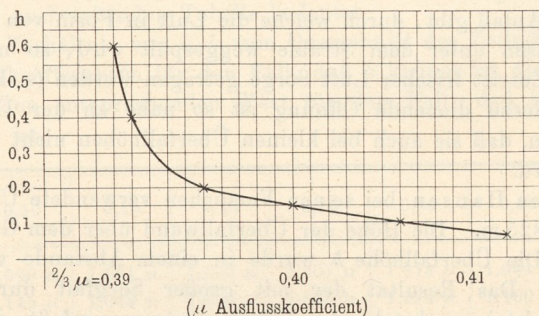
für $b = 0,20$ m

Fig. 14 b.

für $b = 0,60$ m

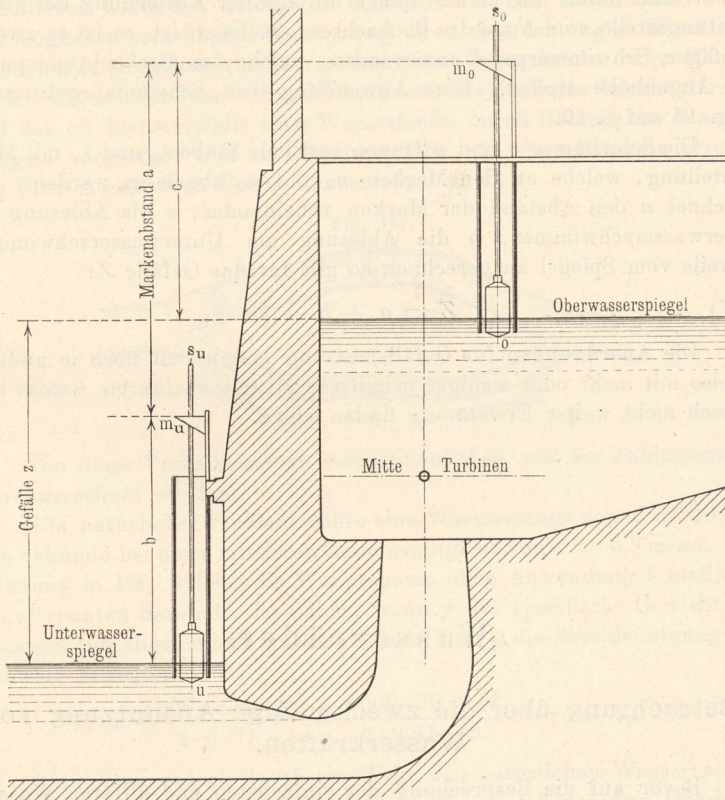
Die graphische Darstellung dieser Tabelle ist aus Fig. 14 a und b zu ersehen.

Berechnet man auf Grund obiger Werte für μ' und h die Wassermengen nach der Formel

$$(16) \quad V = \mu' \cdot b \cdot h \sqrt{2gh} = \frac{2}{3} \mu \cdot b \cdot h \sqrt{2gh},$$

so ergibt sich, daß die Kurven der überfließenden Wassermengen von etwa 0,0800 m Überfallhöhen an geradlinig verlaufen und die Überfallkoeffizienten den überfließenden Wassermengen proportional sind.

Fig. 15.



Für Wassermessungen mittels Überfällen sollten Druckhöhen unter 100 mm nicht in Anwendung kommen, schon aus dem Grunde, weil kleine Überfallhöhen nur wenig genau gemessen werden können und ein kleiner Meßfehler daher große prozentuale Fehler in den berechneten Wassermengen bedingt.

Hansen kommt auf Grund seiner Versuche zu dem Schlusse, daß die Messung der Wassermengen mittels Überfalles ohne seitliche Kontraktion eine sehr zuverlässige Methode darstellt.

Gefälle.

Im Anschluß an die Ausführungen über Wassermessungen sei noch einiges über die Messung der Gefällshöhe gesagt. Hierzu können feste, mit Centimetereinteilung versehene Pegel verwendet werden. Es wird alsdann der Stand des Wasserspiegels mit dem Pegel beobachtet. Im Oberwasserkanal und im Unterwasserkanal wird je ein solcher Pegel in möglichster Nähe der Turbine aufgestellt. Da jedoch die Beobachtung der Wasserstände direkt am Spiegel infolge der Entfernung der Beobachtungsstelle vom Auge des Beobachters erschwert ist, so ist es zweckmäßiger, Schwimmerpegel anzuwenden, welche den Beobachtungspunkt in Augenhöhe treffen. Eine Anwendung von Schwimmerpegeln zeigt Fig. 15 auf S. 19.

Die Schwimmer o und u tragen vertikale Stäbe s_o und s_u mit Maßeinteilung, welche an den Marken m_o und m_u abgelesen werden. Bezeichnet a den Abstand der Marken voneinander, c die Ablesung am Oberwasserschwimmer, b die Ablesung am Unterwasserschwimmer, jeweils vom Spiegel an gerechnet, so gilt für das Gefälle Z :

$$(17) \quad \dots \dots \dots Z = a + b - c.$$

Die Anordnungen für Gefällsmessung lassen sich noch in anderer Weise mit mehr oder weniger primitiven Mitteln ausführen, welche hier jedoch nicht weiter Erwähnung finden sollen.

Wasserräder.

Betrachtung über die zweckmäßige Ausnutzung von Wasserkraften.

Bevor auf die Besprechung der einfachsten und ältesten Wassermotoren, der Wasserräder, eingegangen wird, möge einiges über den Bau von Wasserkraftanlagen im allgemeinen und die Mittel zur zweckmäßigen Ausnutzung der Wasserkraften ausgeführt werden.

Die Arbeitsfähigkeit eines Wasserlaufes ist durch sein natürliches Gefälle, welches dem Wasser eine gewisse Geschwindigkeit erteilt, bedingt. Zur Ausnutzung der Wasserkraft wird fast in allen Fällen ein besonderer Kanal (Mühlgraben) (s. Fig. 16) angelegt und zu diesem Zwecke quer in den Fluß ein Wehr eingebaut, welches durch Stauung des Wassers die Ablenkung eines mehr oder weniger großen Wasser-