Theoretische Maschinenlehre

in 4 Bänden

Theorie der Getriebe und der mechanischen Messinstrumente

Grashof, Franz

Leipzig, 1883

III. Instrumente zur Messung von Geschwindigkeiten. (Tachometer.)

urn:nbn:de:bsz:31-282938

III. Instrumente zur Messung von Geschwindigkeiten. (Tachometer.)

§. 158. Uebersicht.

Die Instrumente zur Messung von Geschwindigkeiten, welch letztere dabei immer als relative Geschwindigkeiten in Betracht kommen, sind hauptsächlich verschieden, jenachdem es sich um die relative Geschwindigkeit von zwei festen Körpern oder eines festen Körpers und einer Flüssigkeit handelt. Der erstere Fall interessirt hier nur bezüglich der relativen Geschwindigkeit von Theilen einer Maschine, indem darauf auch andere hierher gehörige Fälle von technischer Wichtigkeit zurückgeführt werden können. So ist die relative Geschwindigkeit eines Eisenbahnzuges gegen die Schienenbahn bestimmt durch die Winkelgeschwindigkeit, mit welcher die auf letzterer ohne Gleitung rollenden Locomotiv- oder Wagenräder sich um ihre Axen relativ gegen den Rahmen der Locomotive bezw. des Wagens drehen, oder durch die relative Geschwindigkeit der Kolben gegen die mit dem Locomotivrahmen fest verbundenen Cylinder.

Die relative Geschwindigkeit von festen Körpern und Flüssigkeiten hat technisches Interesse nicht nur bezüglich der strömenden Bewegung von Flüssigkeiten gegen die Erde oder gegen feste Leitungswände, insbesondere der strömenden Bewegung des Wassers in Fluss- und Canalbetten, der freien Luft als Wind, der Verbrennungsluft bei Feuerungsanlagen u. s. f., sondern auch bezüglich der relativen Bewegung von Schiffen, wenigstens von Seeschiffen, gegen das Wasser. Die letztere relative Bewegung kann deshalb nicht, wie die eines Eisenbahnzuges gegen die Schienenbahn, auf die gegenseitige Bewegung von Maschinentheilen zurückgeführt werden, weil die Bewegung des Schiffspropellers (Schaufelrad, Schraube) gegen das Wasser nicht ebenso einfach und a priori bekannt ist wie die rollende Bewegung der Räder auf den Schienen.

Hiernach sollen im Folgenden besprochen werden:

a. Tachometer für Maschinen,

b. Instrumente zur Messung der relativen Geschwindigkeit von festen Körpern und Flüssigkeiten, insbesondere Instrumente zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in Canälen (Strommesser im engeren Sinne), zur Messung der Luftgeschwindigkeit (Anemometer) und zur Messung der Schiffsgeschwindigkeit auf See.

In allen Fällen können die Instrumente bezw. die Messungsmethoden mit denselben entweder so beschaffen sein, dass sie die augenblicklich stattfindende Geschwindigkeit, oder so, dass sie die mittlere Geschwindigkeit für ein gewisses Zeitintervall bezw. für einen gewissen Weg erkennen lassen, wonach momentan wirkende und totalisirende Instrumente zu unterscheiden sind, sofern sich im letztern Falle das Gesammtresultat einer Reihenfolge von Geschwindigkeiten ergiebt. Je nach den Umständen kann jene oder diese Messungsweise vorzuziehen sein, so dass in dieser Hinsicht solche Instrumente als die vollkommensten erscheinen, welche sowohl eine momentane, als eine totalisirende Messung gestatten, wie es dann der Fall ist, wenn die betreffende Folge von Geschwindigkeiten durch eine Curve verzeichnet wird, deren Abscissen den verflossenen Zeiten oder durchlaufenen Wegen und deren Ordinaten den betreffenden Geschwindigkeiten proportional sind.

a. Tachometer für Maschinen.

§. 159. Totalisirende Tachometer.

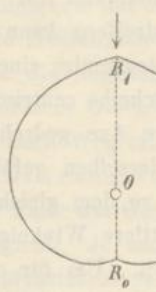
Um die mittlere Geschwindigkeit eines rotirenden oder schwingenden Maschinentheiles für einen Zeitraum zu messen, in welchem eine grössere Zahl von Rotationen bezw. Schwingungen stattfindet, bedarf es natürlich nur eines Zählwerkes (§. 130) in Verbindung mit einer Uhr. Gewöhnlich enthält die Maschine eine rotirende Welle A, deren Winkelgeschwindigkeit die Ganggeschwindigkeit der Maschine charakterisirt, und wenn dann von A aus durch Zahnräder- oder Schneckengetriebe oder auf sonstige Weise eine andere Welle B bewegt wird, deren Winkelgeschwindigkeit zu der von A in constantem Verhältnisse steht, von B aus aber ein prismatisch geführtes Glied C so bewegt wird, dass seine Progressivgeschwindigkeit der Winkelgeschwindigkeit von B und folglich auch von A in bekanntem Verhältnisse proportional ist, so kann man mit C einen Zeichenstift S verbinden und längs demselben nach einer zu seiner Bewegungsrichtung OS senkrechten Richtung OT durch das Uhrwerk einen Papierstreifen mit gleichförmiger Bewegung fortziehen lassen, um so auf diesem als relative Bahn von S eine Curve zu erhalten, deren entsprechende Coordinatenänderungen Δs und Δt den Winkelweg der Welle A in einer gewissen Zeit und somit ihre mittlere Winkelgeschwindigkeit für dieselbe ergeben. Anstatt des geradlinig bewegten Papierstreifens kann auch mit Vortheil für die compendiöse Ausführung des Instrumentes eine runde Metallscheibe, auf welcher eine entsprechende Papierscheibe centrisch zu befestigen ist, vom Uhrwerke aus gleichförmig um ihre Axe gedreht werden, und wenn dann S in radialer Richtung längs derselben geführt wird, so liefert das Verhältniss des Weges Δs von S zu dem gleichzeitigen Winkelwege $\Delta\varphi$ der Scheibe ein Maass für die mittlere Winkelgeschwindigkeit der Welle A während der betreffenden Zeit. Um für eine längere Zeit andauernde Messung den Zeichenstift S seinen hinlänglich grossen Weg innerhalb einer Strecke von mässiger Länge durchlaufen zu lassen, ist es passend, ihn durch ein Curvenschubgetriebe von der Welle B aus geradlinig so hin und her zu führen, dass er (unbeschadet beständiger Proportionalität seines Weges und des Winkelweges von B) abwechselungsweise für eine halbe Umdrehung von B im einen, für die folgende halbe Umdrehung im anderen Sinne bewegt wird.

Von solcher Art ist z. B. der Geschwindigkeitsmesser für Eisenbahnfahrzeuge von Dorpmüller.* Dabei wird die Bewegung von einer Fahrzeugaxe aus auf die erste Welle des Instruments durch eine Kautschukschnur und von dieser durch dreifaches Schneckengetriebe auf die letzte Welle B desselben so übertragen, dass B eine Umdrehung macht, während sich der Radumfang auf einer Strecke = 6 Kilometer der Schienenbahn abwälzt. In derselben Zeit bewegt sich der Schreibstift S radial längs der Papierscheibe von 300 Millimeter Durchmesser nahe ihrer Peripherie um eine Strecke von 50 Millimeter einmal hin und her. Erfolgt dann eine Umdrehung der Scheibe etwa in 6 Stunden, so kann das Instrument selbst für noch längere Zeit ohne Erneuerung der Papierscheibe functioniren, sofern nicht zufällig in den ersten 6 Stunden die durchfahrene Strecke gerade ein ganzes Vielfaches von 6 Kilometern beträgt, in welchem Falle die zickzackförmige relative Bahn von S für die folgenden 6 Stunden, von demselben Anfangspunkte ausgehend, von der früheren vielleicht nicht genügend zu unterscheiden wäre, obschon das wegen verschieden lange dauernder und in verschiedenen Zeitintervallen eintretender Stationsaufenthalte (welchen auf dem Papierstreifen geradlinige, auf der Papierscheibe kreisförmige Curven-

* Wochenschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Jahrg. 1879, S. 364.

stücke entsprechen) selbst bei übrigens nahe gleicher Fahrtgeschwindigkeit nicht zu erwarten ist.

Fig. 171.

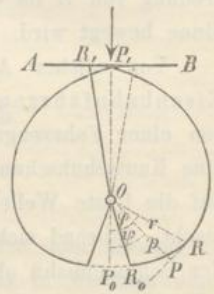


Wenn die auf der Welle B sitzende Curvenscheibe gegen eine Angriffskante des von einer Feder beständig gegen die Scheibe angedrückten Stiftträgers C wirkt (nach Art des Curvenschubgetriebes Fig. 72, S. 199, mit den Gliedern a, c, d), so muss natürlich die Scheibe nach zwei symmetrisch liegenden archimedischen Spiralen profilirt werden mit den Polargleichungen:

$$r = r_0 + h\frac{\varphi}{\pi} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1),$$

unter r_0 den willkürlich anzunehmenden Minimalwerth des Fahrstrahles r und unter h die verlangte Schublänge des Stiftes S verstanden. Siehe Fig. 171, wo $OR_0 = r_0 = h$ genommen ist, also $OR_1 = r_0 + h = 2h$.

Fig. 172.



Soll aber wegen zu schneller Abnutzung einer Angriffskante des Stiftträgers C dieselbe durch eine zur Schubrichtung von C senkrechte ebene Angriffsfläche AB, Fig. 172, ersetzt werden, so können die zwei symmetrisch gleichen Curven R_0R_1 nicht eine Fläche umschliessen, muss also die einzige Herzscheibe des vorigen Falles durch zwei Scheiben ersetzt werden, von denen die eine die Bewegung von C im einen, die andere im umgekehrten Sinne vermittelt. Was die Form der Profile R_0R_1 dieser Scheiben betrifft, so sei $OR = r$ irgend ein Fahrstrahl, $OP = p$ das vom Drehungsmittelpunkte O auf die Tangente für den Punkt R gefällte Perpendikel, P_0P_1 die den Punkt O enthaltende gerade Verbindungslinie der Lagen des Punktes P, welche den äussersten Lagen R_0, R_1 des Punktes R entsprechen, ferner der Winkel $P_0OR = \varphi$, Winkel $P_0OP = \psi$. Während dann im Falle von Fig. 171 der Differentialquotient $\frac{dr}{d\varphi}$ einen constanten Werth haben musste, muss hier $\frac{dp}{d\psi}$ eine Constante, folglich

$$p = p_0 + h\frac{\psi}{\pi} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

sein, wenn h dieselbe Bedeutung hat wie in Gl. (1). Hiernach kann die Curve als Umhüllungslinie einer Schaar von Geraden PR verzeichnet werden, die durch $OP = p$ und Winkel $OPR = 90^0$ für verschiedene Werthe von ψ durch Gl. (2) bestimmt sind. Uebrigens wird die Zeichnung der Curve durch die Bemerkung erleichtert, dass die Strecke PR einen constanten Werth hat. Indem nämlich

$$p = r \sin(ORP) = r \sin\tau,$$

also

$$dp = r \cos\tau\, d\tau + \sin\tau\, dr$$

$$= r \cos\tau \left(d\tau + tg\,\tau \frac{dr}{r} \right)$$

und

$$tg\,\tau = \frac{r\,d\varphi}{dr} = \frac{r}{dr} d\left(\psi + \frac{\pi}{2} - \tau\right),$$

also

$$tg\,\tau \frac{dr}{r} = d\psi - d\tau$$

ist, so folgt:

$$PR = r \cos\tau = \frac{dp}{d\psi} = \frac{h}{\pi} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (3).$$

Die Curve $R_0 R R_1$ wird also aus der durch Gl. (2) bestimmten archimedischen Spirale $P_0 P P_1$ dadurch abgeleitet, dass in deren Punkten P_0, P, P_1 normal zu den betreffenden Fahrstrahlen OP_0, OP, OP_1 die gleichen Strecken $P_0 R_0 = PR = P_1 R_1 = \frac{h}{\pi}$ angetragen werden. In Fig. 172 ist $OP_0 = p_0 = h$, also $OP_1 = p_0 + h = 2h$ angenommen worden.

Bei anderen solchen Fahrtmessern für Eisenbahnzüge, z. B. bei dem Instrument von Dato, ist die Einrichtung so getroffen, dass in den mit gleichförmiger und bekannter Geschwindigkeit bewegten Papierstreifen ein durch einen entsprechenden Mechanismus von der Wagenaxe aus bewegter Stift ein kleines Loch sticht, so oft ein Punkt der betreffenden Radperipherie einen gewissen Weg, z. B. 1 Kilometer durchlaufen hat. Die Entfernungen der in gerader Linie aufeinander folgenden Löcher ergeben dann unmittelbar die Zeiten, in welchen die betreffenden Kilometer von jenem Punkte durchlaufen, also auch bei gleitungslos rollender Bewegung der Räder auf den Schienen vom Zuge durchfahren wurden.

Im Falle der Verzeichnung einer zusammenhängenden Curve, wie bei dem Instrument von Dörpmüller, ergiebt zwar die Richtung ihrer Tangente im Princip auch die augenblickliche Geschwindigkeit; indessen müsste doch die Curve in unpraktisch grossen Verhältnissen gezeichnet werden, um grössere Genauigkeit auch für solche Verwendung des Instrumentes zu verbürgen, da die Richtung einer Curve in einem gewissen Punkte derselben nicht mit ebenso grosser Zuverlässigkeit gemessen werden kann wie eine Länge, z. B. eine Coordinate jenes Punktes.

§. 160. **Centrifugaltachometer.**

Die veränderliche Winkelgeschwindigkeit ω einer rotirenden Welle, die entweder der betreffenden Maschine selbst oder, mit proportionaler Geschwindigkeit rotirend, einem mit der Maschine verbundenen Messinstrumente angehören mag, kann dadurch bezüglich ihrer jeweiligen Grösse sichtbar gemacht und in jedem Augenblicke gemessen werden, dass man mit der Welle eine Masse rotiren lässt, deren relative Gleichgewichtslage in bekannter Weise durch ω bestimmt wird, so dass umgekehrt jene Lage, bezw. die durch dieselbe bestimmte Configuration des Mechanismus, welcher die Masse mit der Welle verbindet, einen Schluss auf die Grösse von ω gestattet. Bei den auf diesem Princip beruhenden Instrumenten befindet sich die fragliche Masse unter der Einwirkung von zwei Kräften, deren eine von ω abhängig und deren andere von ω unabhängig ist. Als erstere bietet sich am unmittelbarsten die Centrifugalkraft dar, so dass die danach als Centrifugaltachometer zu bezeichnenden betreffenden Instrumente sich hauptsächlich nur dadurch unterscheiden, dass diese Centrifugalkraft entweder mit der Schwerkraft oder mit einer Federkraft als von ω unabhängiger Kraft in Gleichgewicht gebracht, und dass als Masse selbst entweder ein fester Körper oder eine Flüssigkeit benutzt wird.

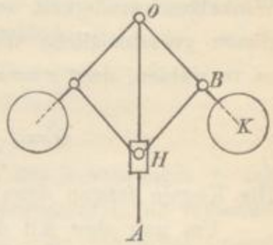
1. Die üblichen Centrifugaltachometer mit fester rotirender Masse, deren Centrifugalkraft mit der Schwerkraft im Gleichgewicht ist, beruhen auf dem Princip des conischen Pendels, nämlich eines schweren Körpers, welcher mit der in diesem Falle verticalen mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotirenden Welle durch ein Charnier verbunden ist, dessen Axe OY die verticale Wellenaxe OZ rechtwinklig (in O) schneidet. Unter der Voraussetzung, dass, wenn S der Schwerpunkt des Körpers, die Masse desselben in Bezug auf die Ebenen ZOS und YOS symmetrisch vertheilt ist, besteht nämlich im Gleichgewichtszustande und abgesehen von Bewegungswiderständen nach §. 140, Gl. (5) die Beziehung:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l \cos \alpha}} \quad \text{mit} \quad l = \frac{Q-q}{mr} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1),$$

unter g die Beschleunigung der Schwere, α den Winkel ZOS, r die Strecke OS, m die Masse des Körpers, Q sein Trägheitsmoment für die Charnieraxe OY und unter q das Doppelte seines Trägheitsmomentes für die Ebene YOS verstanden. Wenn insbesondere, wie gewöhnlich, das Pendel aus einer cylindrischen Stange mit einer am Ende derselben befindlichen Kugel besteht, so ergiebt sich für l der Ausdruck (7) in §. 140.

Hiernach ist der Winkel α ein Maass für die Winkelgeschwindigkeit ω. Indem sich aber α bei dem rotirenden Pendel nur schätzen, nicht messen lässt, wird, um eine Messung möglich zu machen, das Pendel gemäss Fig. 173 verdoppelt und an den Kugelstangen OK vermittels der Stangen BH eine auf der rotirenden Welle OA verschiebliche Hülse aufgehängt, deren Bewegung bei Veränderung von ω durch einen geeigneten Mechanismus auf einen Zeiger oder auch auf einen Registrirapparat übertragen werden kann, dessen Bleistift z. B. eine Curve verzeichnet, deren Abscissen und Ordinaten proportional den Zeiten und den Verschiebungen der Hülse auf der Welle OA sich ändern, so dass diese Curve einen zu beliebig späterer Zeit abzulesenden Bericht erstattet über das Gesetz, nach welchem sich die Geschwindigkeit der Maschine in einem gewissen Zeitintervall unter gewissen Umständen geändert hatte. Wenn man zudem die Hülse mit verschiedenen Gewichten Q belastet, erhält man dadurch ein Mittel, das Instrument für verschiedene Geschwindigkeiten zu adjustiren, so dass es stets die nöthige Empfindlichkeit behält. Nach §. 114, Gl. (4) besteht nämlich für einen mittleren, d. h. solchen Gleichgewichtszustand, bei welchem die Reibungen weder im einen, noch im umgekehrten Sinne entwickelt sind, und wenn vorläufig von den Gewichten der Stangen abgesehen wird, die Gleichung:

Fig. 173.



$$\omega^2 = \frac{g}{h}\left(1 + \frac{a}{l}\frac{Q}{G}\right)$$

mit $OB = BH = a$, $Ok = l$ und unter Q das Gewicht nebst Belastung der Hülse, G das Gewicht einer Kugel, g die Beschleunigung der Schwere und unter h die Projection von OK auf OA verstanden. Letztere ist, wenn die Strecke OH mit x bezeichnet wird,

$$h = \frac{l}{a}\frac{x}{2}$$

und deshalb auch

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{x}\frac{a}{l}\left(1 + \frac{Qa}{Gl}\right)} = \sqrt{\frac{C}{x}} \qquad (2),$$

d. h. ω umgekehrt proportional $\sqrt{x}$.

Diese Messung von ω durch $OH = x$ ist um so genauer, je grösser die Aenderung von x ist, welche einer gewissen Aenderung von ω entspricht. Aus der Gleichung $\omega^2 x = C$ folgt aber

$$\omega^2 dx + 2\omega d\omega \cdot x = 0, \text{ also } \frac{dx}{d\omega} = -\frac{2x}{\omega} \quad \ldots\ldots (3)$$

absolut genommen um so grösser bei gegebenem ω, je grösser x. Ist somit ω_0 der kleinste Werth einer mit dem Instrumente zu messenden Winkelgeschwindigkeit ω und x_0 der bei übrigens gegebenen Dimensionen grösstmögliche Werth von x, so ist die Belastung Q der Hülse so zu wählen, dass $x = x_0$ und $\omega = \omega_0$ entsprechende Werthe sind, also

$$Q = \left(\frac{C}{2g}\frac{l}{a} - 1\right)\frac{l}{a} G \text{ mit } C = \omega_0^2 x_0 \ldots\ldots\ldots (4).$$

Die Kugeln fangen dann erst bei $\omega > \omega_0$ an auseinander zu gehen.

Um nun aber mit dem so bestimmten Instrumente eine zuverlässige Messung von $\omega = \sqrt{\frac{C}{x}}$ auszuführen, ist die Berücksichtigung des bis dahin ausser Acht gelassenen Einflusses der Schwerkräfte und Centrifugalkräfte der verschiedenen Stangen unerlässlich, was näherungsweise nach den Angaben im §. 114 geschehen kann, besser aber dadurch geschieht, dass x bei bekannten Werthen von ω beobachtet und damit $C = \omega^2 x$ berechnet wird, am besten als Mittelwerth aus mehreren Beobachtungen, welche weit auseinander liegenden solchen Werthen von ω entsprechen, zu deren Messung das Instrument bestimmt ist.

Fig. 120.

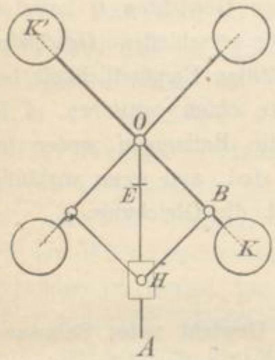
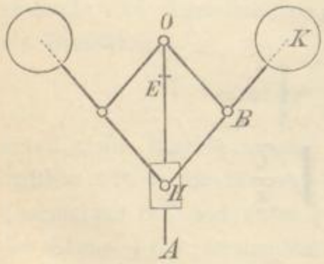


Fig. 121.



Wenn dasselbe bei nicht verticaler Lage der Welle OA, insbesondere also bei Maschinen benutzt werden soll, welche nicht eine feste Lage haben, z. B. auf Schiffen, Eisenbahnfahrzeugen u. s. f., so muss die Schwerkraft ausgeglichen und durch Federkraft ersetzt werden, etwa gemäss den im §. 121 besprochenen, durch die Figuren 120 u. 121 dargestellten Anordnungen. Dabei ist E ein Vorsprung auf der mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotirenden Welle OA, zwischen welchen und die Hülse H eine die Welle umgebende Spiralfeder eingefügt ist, die auf H den Druck Q

ausübt. Ist dann ferner G das Gewicht einer Kugel (Fig. 121) oder die Summe der Gewichte beider an derselben Stange sitzenden Kugeln (Fig. 120), e die Entfernung von O, bis zu welcher die ungespannte Feder reicht, und Q_1 die Kraft, durch welche sie um die Längeneinheit zusammengedrückt wird, endlich $OB = BH = a$, $Ok = l$, $OH = x$ und g die Beschleunigung der Schwere, so ist nach §. 122, Gl. (4) für den mittleren, nämlich reibungslosen Gleichgewichtszustand:

$$\omega = \sqrt{2g\frac{Q_1 a^2}{Gl^2}\frac{e-x}{x}} = \sqrt{C\frac{e-x}{x}} \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

Durch Aenderung von e, also durch Verstellung des Vorsprunges E auf der Welle OA kann hier die Adjustirung des Instrumentes für verschiedene Geschwindigkeiten ω bewirkt werden, um eine möglichst grosse Empfindlichkeit, wachsend mit $\frac{dx}{d\omega}$, zu erzielen. Dieser Differentialquotient ergiebt sich aus

$$\omega^2 = C\frac{e-x}{x}, \text{ also } 2\omega\, d\omega = -\frac{Ce}{x^2}dx$$

$$\frac{dx}{d\omega} = -\frac{2\omega x^2}{Ce} = -\frac{2\omega}{C}\frac{x}{\frac{\omega^2}{C}+1} = \frac{-2x}{\omega + \frac{C}{\omega}} \quad \ldots\ldots\ldots (6),$$

absolut genommen wachsend unter übrigens gegebenen Umständen mit x. Ist also wieder x_0 der grösstmögliche Werth von x, den das Instrument gestattet, und ω_0 die kleinste Winkelgeschwindigkeit, welche mit ihm messbar sein soll, so ist der Vorsprung E so zu reguliren, dass

$$e = x_0\left(\frac{\omega_0^2}{C}+1\right) \text{ mit } C = 2g\frac{Q_1 a^2}{Gl^2} \quad \ldots\ldots\ldots (7)$$

wird. Für den Gebrauch des so vorgerichteten Instruments zur Messung von ω gemäss Gl. (5) ist es am besten, beide Constante C und e dieser Gleichung aus den für bekannte Werthe von ω beobachteten Werthen von x abzuleiten.

Die Vergleichung der Ausdrücke (3) und (6) von $\frac{dx}{d\omega}$ lässt übrigens erkennen, dass die Empfindlichkeit eines solchen Centrifugaltachometers unter sonst gleichen Umständen bei Federkraftwirkung kleiner ist, als bei Schwerkraftwirkung, so dass letztere vorzuziehen ist, sofern sie nicht, wie auf Schiffen und Eisenbahnfahrzeugen, durch die veränderliche Lage der rotirenden Welle und durch den Einfluss von Stössen verboten wird, oder sofern es nicht auf ein sehr weites Umfangsgebiet der Geschwindigkeiten ω ankommt, welche mit demselben Instrument von mässigen Dimensionen bei unveränderter Adjustirung messbar sein sollen. Insbesondere sind beliebig kleine Geschwindigkeiten ω nur durch das Instrument mit Federkraftwirkung messbar, da x in Gl. (5) wohl $= e$, nicht aber in Gl. (2) unendlich gross werden kann.

Bei der Verwendung für Eisenbahnzüge und auf Seeschiffen können übrigens auch bei vollkommener Ausgleichung der Schwerkräfte Störungen verursacht werden durch Stösse, besonders wenn dieselben bei der einfacheren Anordnung gemäss Fig. 121 parallell der Axe OA stattfinden und somit von gleicher Wirkung auf beide Kugeln sind. In solchen Fällen ist deshalb die weniger einfache Construction nach Fig. 120 vorzuziehen und zugleich eine solche Anordnung rathsam, dass die Axe OA im Mittel horizontal zu liegen kommt, weil die Stösse in den genannten Fällen vorzugsweise nach verticaler Richtung stattfinden. Auch ist es dann zweckmässig, den Kugeln möglichst grosse Masse zu geben.

Diese Erwägungen liegen dem Geschwindigkeitsmesser für Eisenbahnzüge von Finckbein und Schäfer* zu Grunde, bei welchem die Bewegung der Hülse theils durch einen Zeiger auf einem Gradbogen zu augenblicklicher Ablesung markirt, theils durch einen Schreibstift auf einem durch ein Uhrwerk geradlinig bewegten Papierstreifen oder auf einer dadurch in gleichförmiger Rotation erhaltenen Scheibe registrirt wird. Ein Glied des Mechanismus, welcher die Bewegung von der Hülse auf den Zeiger und auf den Schreibstift überträgt, kann durch eine feine Schraube so verlängert oder verkürzt werden, dass auch bei veränderlicher Grösse des Radumfanges (wegen Abnutzung oder Abdrehung des Radreifens) und somit bei veränderlichem Verhältnisse der Fahrgeschwindigkeit zur Winkelgeschwindigkeit der betreffenden Radaxe und der ihr proportionalen Winkelgeschwindigkeit der Welle OA des Instruments doch eine bestimmte Fahrgeschwindigkeit immer denselben Stellungen des Zeigers und des Schreibstiftes entspricht.

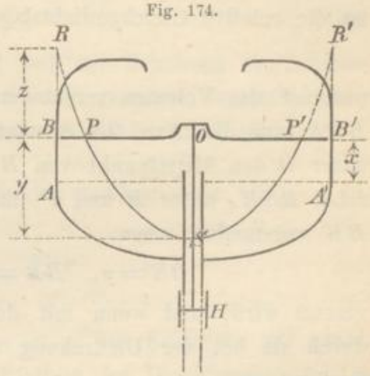
2. Centrifugaltachometer mit flüssiger rotirender Masse, als welche gewöhnlich Quecksilber verwendet wird behufs grösstmöglicher Wirksamkeit bei mässigen Dimensionen, können auch entweder so ausgeführt werden, dass die Centrifugalkraft mit der Schwere oder so, dass

---

* Wochenschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Jahrg. 1879, S. 466.

sie mit einer Federkraft im Gleichgewicht ist. Als Beispiel des ersten Falles diene das durch Fig. 174 im Princip dargestellte, von Stenberg zu seinem sogenannten hydroparabolischen Regulator* benutzte Tachometer von folgender Einrichtung. Ein als Umdrehungskörper gestaltetes Gefäss rotirt mit der zu messenden Winkelgeschwindigkeit ω um seine verticale Axe und enthält Quecksilber, das für $\omega = 0$ mit horizontaler ebener Oberfläche bis AA' reichen mag, für $\omega > 0$ aber sich mit parabolischer Oberfläche in der Mitte senkt und am Rande erhebt, indem es durch radiale Rippen am Gefässboden gezwungen wird, jeder Aenderung von ω sofort zu folgen.

Fig. 174.



Die das Gefäss tragende Welle ist in ihrem oberen Theile hohl und ragt bis etwas über AA' in das Gefäss hinein. Letzteres ist oberhalb AA' cylindrisch gestaltet, insoweit darin der vom Quecksilber getragene scheibenförmige Schwimmer BB' auf und nieder beweglich ist; dieser ist am Umfange durch eine Membran mit der Gefässwand verbunden, um seine reibungslose Beweglichkeit mit dichtem Abschlusse des Quecksilbers unter ihm zu vereinigen. Von der Mitte des Schwimmers reicht ein Stab abwärts in die Höhlung der Welle hinein und ist am Ende durch einen kurzen Querstab, der zwei diametral gegenüberliegende Längsschlitze der Wand dieser Welle durchdringt, mit der auf ihr verschieblichen Hülse H verbunden. Die somit an der Hülse sichtbar gemachte Bewegung des Schwimmers kann durch die üblichen Mittel auf einen Zeiger oder auf den Schreibstift eines Registrirwerkes übertragen werden.

Um die Beziehung zwischen der Winkelgeschwindigkeit ω des Instrumentes und der Erhebung $AB = x$ des Schwimmers auszudrücken, sei Q die Belastung incl. Eigengewicht des letzteren, γ das specifische Gewicht des Quecksilbers und PSP', Fig. 174, die parabolische Meridianlinie der freien Quecksilberoberfläche, welche, über BB' hinaus fortgesetzt, den cylindrischen Theil der Gefässwand in einem horizontalen Kreise RR' schneiden würde. Indem nun der Druck in jedem Punkte der ringförmigen Berührungsfläche zwischen dem Quecksilber und dem

* Wochenschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Jahrg. 1878, S. 392.

Schwimmer ebenso gross ist, wie er an derselben Stelle dann sein würde, wenn ohne Schwimmer sich das Quecksilber bis zum Kreise RR' erstreckte, ist die relative Gleichgewichtslage charakterisirt durch die Gleichung:

$$Q = \gamma V,$$

unter V das Volumen verstanden, welches durch Umdrehung der Fläche BPR um die Axe OS erzeugt werden würde. Dieses Volumen ist, unter O den Mittelpunkt von BB', unter S den Scheitelpunkt der Parabel RSR', unter P und P' ihre Durchschnittspunkte mit der Geraden BB' verstanden, wenn

$$OS = y, \quad BR = z, \quad OB = r, \quad OP = p$$

gesetzt wird, und wenn mit den betreffenden Flächen der Figur die durch sie bei der Umdrehung um OS erzeugten Volumina bezeichnet werden,

$$V = BRR'B' + PSP' - RSR'$$

oder wegen $PSP' = ABB'A'$

$$V = ARR'A' - RSR'$$

$$= \pi r^2\left(x + z - \frac{y+z}{2}\right) = \pi r^2\left(x + \frac{z-y}{2}\right) \quad \ldots\ldots (8).$$

Um hierin y und z durch x auszudrücken, hat man nach der Gleichung der Parabel RSR' (siehe Bd. I, §. 55, Gl. 6):

$$r^2 = \frac{2g}{\omega^2}(y + z)$$

sowie mit Rücksicht auf die Gleichheit der Volumina $ABB'A'$ und PSP', von denen letzteres = der Hälfte des Cylinders mit der Höhe OS auf der Grundfläche PP' ist,

$$r^2 x = \frac{1}{2} p^2 y = \frac{g}{\omega^2} y^2.$$

Aus beiden folgt:

$$y = r\omega\sqrt{\frac{x}{g}}; \quad z = \frac{r^2\omega^2}{2g} - r\omega\sqrt{\frac{x}{g}} \quad \ldots\ldots\ldots (9)$$

$$\frac{z-y}{2} = \frac{r^2\omega^2}{4g} - r\omega\sqrt{\frac{x}{g}}$$

und damit nach Gl. (8):

$$Q = \gamma V = \gamma\pi r^2\left(x + \frac{r^2\omega^2}{4g} - r\omega\sqrt{\frac{x}{g}}\right)$$

$$= \gamma\pi r^2\left(\frac{r\omega}{2\sqrt{g}} - \sqrt{x}\right)^2.$$

In der hieraus folgenden Gleichung

$$\frac{r\omega}{2\sqrt{g}} = \pm\frac{1}{r}\sqrt{\frac{Q}{\gamma\pi}} + \sqrt{x}$$

gilt natürlich nur das obere Vorzeichen, weil zur Erhebung des Schwimmers auf eine gewisse Höhe x eine um so grössere Geschwindigkeit nöthig, je grösser seine Belastung Q ist. Somit ist schliesslich:

$$\omega = \frac{2}{r^2}\sqrt{\frac{gQ}{\gamma\pi}} + \frac{2}{r}\sqrt{gx} = a + b\sqrt{x} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

mit $$a = \frac{2}{r^2}\sqrt{\frac{gQ}{\gamma\pi}} \text{ und } b = \frac{2\sqrt{g}}{r}.$$

Für den Gebrauch des Instrumentes ist es mit Rücksicht auf untergeordnete Umstände, welche, wie der Einfluss des Durchmessers der in das Gefäss hineinreichenden hohlen Welle, bei obiger Entwicklung unberücksichtigt geblieben sind, wieder am besten, die Constanten (hier a und b) der nur ihrer allgemeinen Form nach zu Grunde gelegten Gleichung zwischen ω und x aus solchen Werthen von x abzuleiten, welche für bekannte Werthe von ω beobachtet werden. Bei der Herstellung des Instrumentes für einen gewissen Zweck ist aber von der kleinsten und grössten Geschwindigkeit bezw. $= \omega_0$ und ω_1 auszugehen, welche, entsprechend angenommenen Grenzwerthen x_0 und x_1 von x, mit dem Instrument messbar sein sollen. Durch die Gleichungen

$$\omega_0 = a + b\sqrt{x_0} \text{ und } \omega_1 = a + b\sqrt{x_1}$$

sind dann a, b und dadurch r, Q bestimmt. Die Annahme $x_0 = 0$ ist hierbei nicht rathsam, weil aus Gl. (10) sich

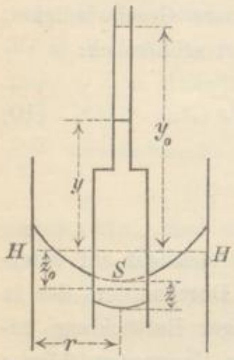
$$d\omega = \frac{b}{2}\frac{dx}{\sqrt{x}}, \text{ also } \frac{dx}{d\omega} = \frac{2\sqrt{x}}{b} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

$= 0$ für $x = 0$, d. h. die Genauigkeit der Messung verschwindend klein ergeben würde. Selbst abgesehen davon ist der kleinste messbare Werth von $\omega > a$; so lange $\omega < a$ ist, wird die parabolische Krümmung der Quecksilberoberfläche und entsprechende Erhebung der Schwimmerscheibe durch das Gewicht der letzteren verhindert.

Von der letztgenannten Beschränkung frei ist eine Einrichtung, welche zugleich ohne Anwendung von mit Reibungswiderständen verbundenen Mechanismen die durch die Rotation bewirkte Deformation der Quecksilberoberfläche in vergrössertem Maassstabe sichtbar macht, aber nur zu augenblicklicher Ablesung, nicht zur Registrirung geeignet ist.

In das um seine verticale Axe rotirende Gefäss mit Quecksilber ist nämlich coaxial von oben her eine am Gefässe befestigte beiderseits offene Röhre bis unter die Quecksilberoberfläche eingesenkt, welche nach oben in eine engere Glasröhre ausläuft und bis in diese hinein mit Wasser (unter entsprechender Depression des Quecksilbers im unteren Theile der Röhre) gefüllt ist. Die Beziehung zwischen der Winkelgeschwindigkeit ω des Gefässes und dem Wasserstande in der Röhre ergiebt sich dann durch folgende Entwicklung mit Bezugnahme auf Fig. 175 und unter der Voraussetzung, dass, insoweit die Veränderungen der Flüssigkeitsoberflächen sich erstrecken, die innere Wandfläche des Gefässes (Radius $= r$) und die Wandflächen der Röhre coaxiale cylindrische Flächen sind. Es sei

Fig. 175.



m das Verhältniss des Querschnittes des zwischen der Innenwand des Gefässes und der Aussenwand des unteren Röhrenstückes befindlichen cylindrischen Raumes zum inneren Querschnitte $= F$ dieses unteren Theiles der Röhre,

n das Verhältniss von F zum inneren Querschnitte des engeren oberen Röhrenstückes,

δ das Dichtigkeitsverhältniss von Quecksilber und Wasser;

ferner für den Zustand der Ruhe ($\omega = 0$):

HH die horizontale Oberfläche des Quecksilbers im Gefässe,

y_0 die Höhe der Wasseroberfläche in der Röhre über HH,

z_0 die Tiefe der Quecksilberoberfläche in der Röhre unter HH;

dagegen für den Gleichgewichtszustand bei der Rotation des Gefässes:

s die Tiefe des Scheitelpunktes S der (durch die Röhre fortgesetzt gedachten) Quecksilberoberfläche im Gefässe unter HH,

y die Höhe der Wasseroberfläche in der Röhre über HH,

z die Tiefe des Scheitelpunktes der Quecksilberoberfläche in der Röhre unter S.

Würde nun im Zustande der Ruhe das Wasser aus der Röhre beseitigt und durch ein bis HH reichendes Quecksilbervolumen $= Fz_0$ ersetzt, so erführe der Scheitelpunkt S der Quecksilberoberfläche durch die Rotation eine Senkung

$$= \frac{r^2 \omega^2}{4g} \text{ (siehe Bd. I, §. 55, Gl. 7).}$$

Um dann aber den thatsächlichen Zustand herzustellen, muss mit der Wiedereinfüllung des Wassers in die Röhre aus dem Innenraume derselben das Quecksilbervolumen Fz, aus dem äusseren Gefässraume folglich das Quecksilbervolumen $F(z_0 - z)$ weggenommen werden, wodurch der Scheitelpunkt S die weitere Senkung $= \frac{z_0 - z}{m}$ erfährt und somit

$$s = \frac{r^2 \omega^2}{4g} + \frac{z_0 - z}{m} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

wird. Mit Rücksicht darauf, dass die Quecksilberoberfläche in der Röhre nur sehr wenig gekrümmt ist, hat man auch

$$y_0 - y = n(s + z - z_0) \ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

und endlich folgt aus

$$\delta = \frac{y_0 + z_0}{z_0} = \frac{y + s + z}{z}$$

$$\delta - 1 = \delta' = \frac{y_0}{z_0} = \frac{y + s}{z}$$

$$z_0 - z = \frac{y_0 - y - s}{\delta'} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (14).$$

Durch die Gleichungen (12), (13) und (14) sind s, $z_0 - z$ und $y_0 - y$ bestimmt; insbesondere findet man:

$$y_0 - y = x = \frac{1 + \frac{m-1}{1 + m\delta'}}{\frac{1}{n} + \frac{m-1}{1+m\delta'}} \frac{r^2 \omega^2}{4g}$$

$$\omega = b\sqrt{x} \text{ mit } b = \frac{2}{r}\sqrt{g \frac{\frac{1}{n} + \frac{m-1}{1+m\delta'}}{1 + \frac{m-1}{1+m\delta'}}} \ldots\ldots (15).$$

Für $n = 1$, einer oben und unten gleich weiten Röhre entsprechend, wäre $b = \frac{2\sqrt{g}}{r}$ wie in Gl. (10) mit $a = 0$; die Wasserfüllung der Röhre hätte dann nur den Zweck, die Flüssigkeitsoberfläche an eine sichtbare Stelle zu verlegen. Durch Erweiterung der Röhre unten, also durch Vergrösserung von n, wird aber b verkleinert und somit die einer gewissen Geschwindigkeit ω entsprechende Aenderung x des Wasserstandes vergrössert.

Anstatt die Röhre mit dem Gefässe rotiren zu lassen, wodurch die Ablesung des Wasserstandes (an einer dicht neben der Glasröhre befestigten Skala) erschwert wird, wenn die Röhrenaxe nicht ganz genau mit der Rotationsaxe zusammenfällt, könnte man auch die Röhre ausserhalb des Gefässes befestigen, doch würde dann die Reibung zwischen dem mitrotirenden Quecksilber und der unbeweglichen Röhre die einfache Beziehung (15) stören. —

Solche Flüssigkeits-Centrifugaltachometer, bei denen die Elasticität als die mit der Fliehkraft im Gleichgewicht befindliche Kraft benutzt wird, sind in der Weise (von Schäffer und Budenberg) ausgeführt worden, dass das um eine verticale Axe rotirende Gefäss an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen mit Ansätzen versehen ist, die sich nach aussen trichter- oder schüsselförmig erweitern und hier durch runde gewellte (concentrische Wellen bildende) dünne Stahlbleche abgeschlossen sind, während oben in den Deckel des Gefässes coaxial mit demselben ein offenes Glasrohr eingesetzt ist. Je schneller dann die Rotation stattfindet, desto mehr werden die Bleche durch die Fliehkraft des Quecksilbers nach aussen hin durchgebogen, muss also letzteres aus dem Glasrohre in das Gefäss eintreten, um dessen vergrösserten Hohlraum gefüllt zu erhalten. Der Quecksilberstand in der Röhre wird an einer dicht daneben befestigten Skala abgelesen, die hier natürlich eine ganz empirische Theilung erhalten muss. Die Schwere des Quecksilbers ist bei diesem Instrumente zwar auch mit einem Theile der Federkraft der Stahlbleche im Gleichgewicht, spielt aber, wenn die Quecksilbersäule in der Röhre nicht überflüssig hoch ist, eine um so mehr untergeordnete Rolle, je weiter die Stahlbleche von der Axe entfernt sind, so dass dann auch durch etwas geneigte Lage der Axe die Ablesungen nicht wesentlich geändert werden. Hierdurch erhält das Instrument, ähnlich wie das früher besprochene Centrifugaltachometer mit Federkraftwirkung und mit Schwungkugeln, deren Schwerkräfte vollständig ausgeglichen sind, allgemeinere Brauchbarkeit bis auf den Umstand, dass es nur zu augenblicklicher Messung, nicht zugleich zur Registrirung der Geschwindigkeit geeignet ist.

Uebrigens haben Centrifugaltachometer mit flüssiger rotirender Masse bisher nur geringere Verbreitung gefunden. Die Gefahr einer nicht hinlänglich schnell erkennbaren Aenderung durch willkürlich herbeigeführte oder zufällige Aenderung der Flüssigkeitsmenge lässt sie in den meisten Fällen als weniger zuverlässig erscheinen.

b. Instrumente zur Messung der relativen Geschwindigkeit von festen Körpern und Flüssigkeiten.

Die hierher gehörigen Messinstrumente beruhen im Allgemeinen auf denselben Principien wie gewisse Arten der vorzugsweise ausgebildeten und technisch wichtigen, im engeren Sinne sogenannten Strommesser, welche zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in Canälen, d. h. in oben offenen Leitungen dienen. Von diesen wird deshalb hier zunächst die Rede sein. Aehnlich wie die Tachometer für Maschinen lassen sie sich als totalisirende und als momentan wirkende Instrumente (§. 158) unterscheiden.

§. 161. **Totalisirende Strommesser.**

Wegen mannigfacher Störungen, denen die Gleichförmigkeit der Wasserbewegung eines Canals, besonders eines natürlichen Flusses stets unterworfen ist, kommt es hier meistens weniger auf die Kenntniss einer augenblicklich stattfindenden Strömungsgeschwindigkeit, als auf diejenige ihres Mittelwerthes an, und sind deshalb den momentan wirkenden Strommessern im Allgemeinen die totalisirenden, d. h. solche vorzuziehen, deren Angaben auf einer längere Zeit dauernden Einwirkung beruhen. Durch dieselben wird die mittlere Geschwindigkeit gemessen, welche während einer gewissen Zeit entweder in einem bestimmten Punkte herrscht oder in einer Folge von gleich gelegenen Punkten aller Querschnitte einer gewissen Canalstrecke. Die erstere Wirkungsweise hat namentlich der hydrometrische Flügel, die letztere ein Schwimmer, der zwar als einfacher ungegliederter Körper nicht eigentlich als Instrument zu bezeichnen ist, jedoch als ein wichtiges Hülfsmittel zu dem hier in Rede stehenden Messungszwecke vor Allem Erwähnung verdient.

1. Schwimmer. — Wenn man einen Körper auf dem Wasser eines natürlichen oder künstlichen Canals (ein Strom, Fluss, Bach wird als natürlicher Canal verstanden) schwimmen lässt und die Zeit t beobachtet, in welcher der Körper von einem gewissen Querschnitte F_0 einer geraden und möglichst gleichförmig profilirten Canalstrecke bis zu einem andern F gelangt, der in der abgemessenen Entfernung s von jenem sich befindet, so ist die mittlere Geschwindigkeit des Wassers an den vom Körper passirten Stellen $=\frac{s}{t}$, falls die Geschwindigkeit des

Körpers stets derjenigen des Wassers an derselben Stelle gleich gesetzt werden darf. Damit dies mit genügender Sicherheit geschehen könne, muss der Schwimmer schon aus mässiger Entfernung oberhalb F_0 herkommend diesen Querschnitt passiren; auch muss er von passender mässiger Grösse sein, weil ein zu grosser schwimmender Körper, z. B. ein Schiff, durch seine Geschwindigkeit diejenige der Strömung nicht für eine bestimmt angebbare Stelle des Wasserquerschnittes erkennen lässt, ein sehr kleiner aber zu leicht durch zufällige Umstände in seiner Bewegung gestört wird; endlich soll der Körper nur wenig aus dem Wasser hervorragen, um dem Einflusse des Luftzuges nicht wesentlich ausgesetzt zu sein. Bei merklichem Winde sind dergleichen Schwimmerbeobachtungen ganz zu vermeiden.

Als schwimmenden Körper kann man ein Stück Holz, eine verschlossene Glasflasche, auch eine besonders dazu hergestellte Kugel verwenden von 10 bis 20 Centimeter Durchmesser, entweder massiv von Holz, auffällig angestrichen und nach Erforderniss durch eingetriebene Eisenkeile, eingegossenes Blei etc. beschwert, oder hohl von Blech und mit einer verschliessbaren Oeffnung zum Einfüllen von Sand, Schrot oder Wasser versehen.

Sofern ein solcher Schwimmer nur wenig eingetaucht ist, findet man damit die Oberflächengeschwindigkeit an einer gewissen Stelle des Wasserquerprofils, d. h. für eine gewisse Entfernung vom einen oder anderen Ufer, vorausgesetzt dass diese während des Schwimmens längs der Strecke $F_0 F = s$ unverändert bleibt. Letzteres ist aber deswegen oft nicht genügend der Fall, weil das Wasser eines Flusses in den oberen Schichten eine gewisse gegen den Stromstrich, d. h. gegen den Ort der grössten Geschwindigkeit hin gerichtete Seitengeschwindigkeit zu haben pflegt. Dieselbe, welche mit der Strömungsgeschwindigkeit nach der Längenrichtung des Flusses wächst und durch Unregelmässigkeiten des Flussbettes beträchtlich verstärkt werden kann, ertheilt einem ausserhalb des Stromstriches schwimmenden Körper den Antrieb zur Annäherung an denselben, so dass ein Schwimmer mit Sicherheit nur zur Messung der Geschwindigkeit im Stromstriche dienen kann, falls nicht das Flussbett bei schwacher Strömung sehr regelmässig gestaltet ist. Hierdurch wird ein Hauptwerth des Schwimmers nicht beeinträchtigt, welcher darin besteht, dass er ein einfaches Mittel darbietet, um durch vergleichende Messungen im Stromstriche die Constanten anderer Instrumente zu bestimmen, die zu Geschwindigkeitsmessungen an beliebigen Stellen des Wasserquerschnittes geeigneter sind.

Um die Stromgeschwindigkeit w in der Tiefe x unter der Oberfläche durch einen Schwimmversuch zu finden, kann man zwei gleich grosse, aber ungleich schwere Schwimmkugeln durch einen Faden oder Draht von solcher Länge verbinden, dass der Mittelpunkt der unteren, stärker belasteten Kugel in der Tiefe x, derjenige der oberen aber dicht unter der Oberfläche des Wassers sich befindet, während das System beider Kugeln mit geringer Neigung des Fadens oder Drahtes gegen die Lothrechte schwimmt. Geschieht das mit der gemessenen Geschwindigkeit w_1, während die Oberflächengeschwindigkeit mittels einer schwimmenden Kugel $= w_0$ für denselben Längenschnitt gefunden ist, und setzt man dann

$$w_1 = \frac{w_0 + w}{2}, \text{ so folgt } w = 2w_1 - w_0.$$

Diese Berechnung von w beruht indessen auf einer zweifelhaften Voraussetzung, und ist es namentlich bei den ausgedehnten hydraulischen Untersuchungen am Mississippi (Bd. I, S. 726) vorgezogen worden, zu fraglichem Zwecke einen Doppelschwimmer zu benutzen, der aus einer kleinen, passend beschwerten Tonne bestand, die durch eine Schnur mit einem viel kleineren, an der Oberfläche schwimmenden Körper von Kork, leichtem Holz oder hohl aus Blech hergestellt verbunden war. Je kleiner dieser obere im Vergleich mit dem unteren Schwimmer ist, mit desto geringerem Fehler kann die Wassergeschwindigkeit an der Stelle des letzteren der gemessenen Geschwindigkeit des Doppelschwimmers gleich gesetzt werden.

Wenn die Messungen dazu dienen sollen, das den Querschnitt F in der Zeiteinheit durchfliessende Wasserquantum $Q = Fu$ zu bestimmen, unter u die mittlere Geschwindigkeit des ganzen Querschnittes verstanden, so ist dazu die Kenntniss der mittleren Geschwindigkeit v in senkrechten Geraden dieses Querschnittes erforderlich, welche zwar nach Bd. I, §§. 124 und 125 aus den Geschwindigkeiten w für einzelne Punkte derselben abgeleitet, jedoch auch unmittelbar mit Hülfe von Schwimmstäben gefunden werden können, wie sie als einfache, am unteren Ende mit Eisen beschlagene Holzstäbe, die schwimmend bis fast an den Boden reichen, u. A. von Wiebeking, in neuerer Zeit von Grebenau bei ausgedehnten Strommessungen im Rheine benutzt wurden. Behufs leichter Anpassung an verschiedene Wassertiefen kann auch der Schwimmstab als Blechröhre von 3 bis 4 Centimeter Durchmesser aus mässig langen Stücken zu geeigneter Länge zusammengeschraubt und im untersten, durch einen Boden geschlossenen Stücke mit Schrot oder dergl. beschwert werden.

2. Der **hydrometrische Flügel** ist dasjenige Instrument, welches, seit dem Ende des vorigen Jahrhunderts von Woltmann in Hamburg zuerst zu diesem Zwecke vorgeschlagen und benutzt, zur Zeit als Strommesser am allgemeinsten in Anwendung ist. Sein hauptsächlichster Bestandtheil ist ein Flügelrädchen von 10 bis 15 Centimeter Durchmesser mit 2, 3 oder 4 gleichförmig ringsum vertheilten schraubenflächigen oder schräg gestellten ebenflächigen Flügeln; der Lagerkörper seiner Welle ist gewöhnlich mittels einer Hülse um einen mit einer Theilung versehenen hölzernen Stab von kreisförmigem Querschnitte drehbar, der unten mit einer eisernen Spitze versehen ist und beim Gebrauche vertical auf den Boden des Canalbettes aufgesetzt wird, indem ein auf diesem Stabe an verschiedenen Stellen festzuklemmender Ring die Hülse unterstützt. Die Axe des Flügelrades ist dadurch in einer horizontalen Ebene in willkürlich abzuändernder Tiefe unter der Wasseroberfläche beweglich und wird durch einen nach der Richtung dieser Axe sich erstreckenden ebenen Steuerflügel, der auf der andern Seite mit der Hülse verbunden ist, in die Strömungsrichtung so eingestellt, dass der Wasserstrom im Sinne vom Flügelrade längs der Welle desselben gegen den Stab und längs dem Steuerflügel hin gerichtet ist. Die Umdrehungen des Flügelrades werden durch ein Zählwerk registrirt, dessen erstes Rad gewöhnlich ein mit einem Schraubengewinde, einer sogenannten Schnecke, auf der Flügelradwelle in Eingriff zu bringendes Schneckenrad ist. Um dieses Zählwerk willkürlich in und ausser Gang setzen zu können, sind seine Räder nicht im Lagerkörper des Flügelrades, sondern auf einem Hebel gelagert, der selbst gegen jenen Lagerkörper um eine die Flügelradaxe rechtwinklig kreuzende Axe zwischen Anschlägen etwas drehbar ist, und zwar pflegt die Einrichtung so getroffen zu sein, dass für gewöhnlich durch den auf jenen Lagerhebel ausgeübten Druck einer Feder das Schneckengetriebe ausgerückt ist, dass aber durch den Zug an einer von oben her mit dem Hebel verbundenen Schnur entgegen dem Drucke jener Feder die Einrückung bewirkt wird.

Zum Gebrauche des Instruments wird bei kleinen Flüssen ein Steg querüber vorgerichtet, von welchem aus die Operationen besorgt werden. Bei grösseren Flüssen kann ein Seil quer über den Fluss gespannt werden, um längs demselben mittels einer Rolle und eines Anhängeseils ein Boot hin und her zu führen, von dessen Bug bezw. einem darüber hinausragenden Brette aus der das Instrument tragende Stab in das Wasser hinabgesenkt wird. Der Durchbiegung des Leitseiles entsprechend ist dabei das Anhängeseil gegen die Strommitte hin so zu verkürzen, dass sich der Bug des Bootes in dem Querschnitte bewegt, für welchen die Messungen ausgeführt werden sollen. Auch kann man sich bei grossen Flüssen zweier unter sich durch einen Steg verbundener Kähne bedienen, die successive an verschiedenen Stellen der Flussbreite vor Anker gelegt werden. In allen Fällen wird dann mit Hülfe einer Secundenuhr so operirt, dass die in einem gewissen Augenblicke plötzlich angezogene Schnur während einer gewissen Zahl von (etwa 30, 45 oder 60) Secunden angespannt gehalten und plötzlich wieder nachgelassen, endlich zur Ablesung der unterdessen veränderten Zeigerstellung des Zählwerkes das Instrument mit dem Stabe heraufgeholt wird, um es in gleicher Weise an einer anderen Stelle dem Einflusse des Wasserstroms zu unterwerfen, falls nicht zur Erlangung eines von Fehlern möglichst freien Mittelwerthes die Messung an derselben Stelle wiederholt werden soll.

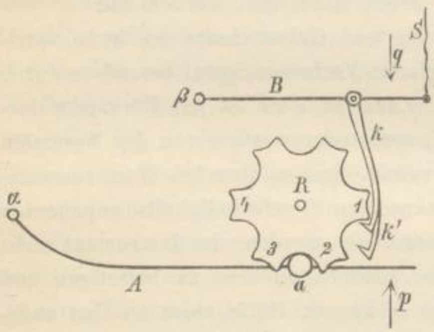
Uebrigens haben die Einrichtung und Gebrauchsart des hydrometrischen Flügels in neuerer Zeit mehrfache Verbesserungen, besonders durch Prof. Amsler-Laffon,* erfahren. Zunächst kann es mit Rücksicht darauf, dass die Strömungsrichtung oft mehr oder weniger von der Normalen zum ebenen Wasserquerschnitte abweicht, dass es aber bei Wassermessungen nur auf die zu demselben senkrechten Geschwindigkeitscomponenten anzukommen pflegt, mit Amsler vorgezogen werden, das Instrument nicht um den Stab drehbar einzurichten, sondern an ihm zu befestigen und diesen dann jeweils so aufzustellen (etwa mit Hülfe eines an ihm angebrachten Visirs und zweier an den Ufern aufgerichteter Markirstäbe), dass die Flügelradwelle in die Längenrichtung des Flusses, also senkrecht zum Querschnitte zu liegen kommt. Auch kann in diesem Falle statt des kreisrunden Querschnitts des eingetheilten Stabes ein ovaler oder linsenförmiger Querschnitt vorgezogen werden, so dass dieser Stab, wenn er mit einer am vorderen Rande befindlichen Spitze auf den Boden aufgesetzt wird, schon an und für sich unter dem Einflusse der Strömung insoweit wie ein Steuerflügel wirkt, als es auch in diesem Falle zur Erleichterung seiner sicheren Haltung erwünscht ist. Uebrigens kann die Wahl eines runden Querschnittes durch den Umstand veranlasst sein, dass mit Amsler als Stab ein eisernes Rohr (Gasrohr von etwa 20 Millimeter Weite) benutzt wird, um darin die Zugschnur von dem das Zählwerk tragenden Hebel nach oben hinaus und über eine Leitrolle zu führen und sie so dem Einflusse des Wasserstroms zu entziehen, durch

* Der hydrometrische Flügel mit Zählwerk und elektrischer Zeichengebung von J. Amsler-Laffon in Schaffhausen. 1877.

welchen bei starker Strömung und grosser Tiefe unwillkürlich eine ähnliche Anspannung der Schnur wie durch einen willkürlichen Zug an derselben bewirkt werden könnte.

Auch die Unbequemlichkeit, dass bei der gewöhnlichen Einrichtung die Zugschnur beständig angespannt gehalten werden muss, so lange das Zählwerk laufen soll, ist von Amsler vermieden worden durch einen Mechanismus von solcher Art, dass es nur eines kurzen ruckweisen Zuges an der Schnur bedarf, um das ausgerückte Zählwerk einzurücken oder umgekehrt, während zugleich durch Sperrung der eine oder andere Zustand bei ungespannter Schnur so lange erhalten bleibt bis die Aenderung durch neuen Anzug bewirkt wird. Fig. 176 lässt den Mechanismus

Fig. 176.



im Princip erkennen. A ist der um α drehbare Hebel, welcher das Zählwerk trägt und durch eine Feder im Sinne des Pfeils p stets so weit aufwärts gedrückt wird, wie es die Stützung des an A sitzenden cylindrischen Stiftes a gegen das Sternrädchen R gestattet. B ist ein Hebel, der um die Axe β innerhalb eines durch Anschläge begrenzten kleinen Winkels schwingen kann; eine Feder drückt ihn im Sinne des Pfeils q abwärts, so lange nicht ein überwiegender Zug an der Schnur S die entgegengesetzte Bewegung bewirkt. Von diesem Hebel B hängen zwei Schaltklinken k, k' herab, deren Längen um die halbe Theilung des Sternrades R verschieden gewählt sind. Wenn nun bei dem in der Figur dargestellten Zustande, wobei das Zählwerk eingerückt ist, durch einen Zug an der Schnur S der Hebel B aufwärts gedreht wird, so greift k unter den Zahn 1 und dreht R um eine halbe Theilung um, wobei der Zahn 3 durch seine Wirkung auf den Stift a den Hebel A abwärts drückt und das Zählwerk auslöst bis a auf der etwas ausgehöhlten Stirnfläche des Zahnes 3 aufliegt und die Sperrung zur Erhaltung dieses Zustandes bewirkt. Das Nachlassen des Zuges an S veranlasst dann nur die rückläufige Schwingung von B infolge des Federdruckes q, wobei k' unter den Zahn 2 greift zur Vorbereitung einer weiteren Drehung von R um eine halbe Theilung durch einen Zug an S, damit a in die Lücke zwischen den Zähnen 3 und 4 einfällt und das

Zählwerk abermals eingerückt wird u. s. f. Bei der Einsenkung des Instrumentes in das Wasser muss natürlich das Zählwerk ausgerückt und sein Zeigerstand vorher notirt worden sein.

Bei der Benutzung des hydrometrischen Flügels zu Geschwindigkeitsmessungen in vielen verschiedenen Punkten eines grösseren Flussquerschnittes ist es besonders mühsam und zeitraubend, das Instrument zu jeder Ablesung aus dem Wasser heben zu müssen, und ist es ausserdem nachtheilig, dass sich in der zwischen der ersten und letzten Messung liegenden längeren Zeit der Zustand des Flusses in dem betreffenden Querschnitte wesentlich geändert haben kann. Auch dieser Uebelstand ist von Amsler beseitigt worden, nämlich durch einen elektrischen Signalapparat, welcher dem Beobachter durch Glockensignale die Augenblicke markirt, in denen das Flügelrad je 100 Umdrehungen vollendet hat. Von den beiden Poldrähten eines am Beobachtungsorte über Wasser befindlichen galvanischen Elementes ist nämlich der eine mit dem das Instrument tragenden eisernen Rohre leitend verbunden, der andere mit Guttapercha umhüllt durch das Wasser hindurch geführt und so mit dem Instrumente verbunden, dass die Schliessung des Stromes und entsprechende Erregung eines die Signalglocke zum Tönen bringenden Elektromagneten jeweils nach 100 Umdrehungen des Flügelrades, nämlich nach einer Umdrehung des in seine Schnecke eingreifenden 100zähnigen Schneckenrades dadurch herbeigeführt wird, dass ein von diesem Rade hervorstehender Stift einen betreffenden Contact herstellt. In den Zwischenzeiten ist zwar der Strom in Folge der Nebenschliessung durch das Wasser nicht ganz unterbrochen, jedoch nicht kräftig genug, um den Elektromagnet bis zur Anziehung seines Ankers zu erregen. Eines Zählwerkes mit Zeigern zur Ablesung und einer Schnur zur Aus- und Einrückung desselben bedarf es in diesem Falle nicht; sind aber diese Theile vorhanden, um das Instrument bei kleinen Gewässern auch ohne den elektrischen Signalapparat gebrauchen zu können, so wird bei Benutzung des letzteren vor der Einsenkung ins Wasser das Zählwerk eingerückt, und sind dann nur die Zeiten zu notiren, die den erfolgenden Glockensignalen entsprechen.

Auf diese Weise würde indessen nicht viel gewonnen werden, wenn das Instrument noch behufs seiner Einstellung auf eine andere Tiefe aus dem Wasser heraufgeholt werden müsste, wie es dann nöthig wäre, wenn es von einem bei der Messung unten aufstehenden Stabe (eisernen Rohre) getragen würde. Vermieden wird dies aber dadurch, dass der Stab, an welchem nahe seinem unteren Ende das Instrument befestigt ist, nach und nach weiter in das Wasser hinabgesenkt wird bis zur Berührung eines an verschiedenen Stellen auf ihm festzuklemmenden Ringes mit der Wasseroberfläche, so dass er nur bei einer Messung in grösstmöglicher Tiefe auf dem Boden aufsitzt. Freilich wird dadurch die sichere Haltung des Stabes und die Vermeidung störender Durchbiegung und Vibration desselben erschwert, überhaupt die Anwendbarkeit des Verfahrens auf Wassertiefen bis zu etwa 2 Metern beschränkt.

Zur Messung in grossen Tiefen benutzt Amsler einen verzinnten Eisendraht, der durch einen Haspel mehr oder weniger tief in das Wasser hinabgelassen werden kann und vermittels eines Karabinerhakens unten das Instrument trägt, während an diesem mit einem gleichen Haken ein linsenförmiges Belastungsgewicht von etwa 40 Kgr. hängt, um den Draht nahe lothrecht gespannt zu erhalten; dieser dient zugleich ebenso zur Leitung des galvanischen Stroms, wie im früheren Falle der röhrenförmige Eisenstab. Natürlich ist es im vorliegenden Falle nicht möglich, die Flügelaxe normal zur Querschnittsebene festzuhalten, und wird sie deshalb in die Strömungsrichtung eingestellt durch einen Steuerflügel, dem hier mit Rücksicht auf die allseitige Beweglichkeit des Instruments die Gestalt eines mit dem Flügelrade coaxialen Hohlkegels gegeben wurde. Der auf einem Kahne aufgestellte Haspel, mit welchem der Aufhängungsdraht in das Wasser hinabgelassen wird, gestattet zugleich die Ablesung der jeweiligen Tiefe der Flügelaxe mit Hülfe eines Zifferblattes und eines Zeigers, welcher, mit Reibung drehbar, auf Null gestellt wird, wenn die Flügelaxe in der Wasseroberfläche liegt. Insbesondere ist dann die ganze Wassertiefe an der betreffenden Stelle = der unveränderlichen Höhe der Flügelaxe über dem tiefsten Punkte des linsenförmigen Belastungsgewichtes *plus* der am Zifferblatte des Haspels in dem Augenblicke abgelesenen Tiefe, in welchem das Gewicht den Boden erreicht; dieser Augenblick kann durch ein besonderes Glockensignal sehr sicher markirt werden in Folge eines Stromschlusses, der dadurch automatisch ermöglicht ist, dass das Gewicht am unteren Karabinerhaken vermittels einer Spiralfeder hängt, die sich durch Entlastung verkürzt, wenn das Gewicht vom Boden getragen wird.

Um die Geschwindigkeiten w in verschiedenen Punkten einer Verticalen zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit v in dieser zu messen, kann nun so verfahren werden, dass, nachdem die ganze Wassertiefe $= H$ auf die so eben erwähnte Weise gemessen ist, zuerst für eine grösste Tiefe $= h_1$ der Flügelaxe die Zeitdauer von 100 Flügelumdrehungen $= t_1$, dann für die Tiefe $h_2 = h_1 - e$, $h_3 = h_2 - e \ldots$ die entsprechende Zeit $= t_2, t_3 \ldots$ beobachtet wird, bis $h_n < e$ geworden ist. Die stets gleiche Erhebung des Instrumentes um die Strecke e ist leicht durch eine stets gleiche Zahl von Kurbelumdrehungen des Haspels zu erzielen, und kann diese Erhebung immer im Augenblicke des Glockensignals bewirkt werden, so dass die ganze Dauer der Messungen für dieselbe Verticale nur $= t_1 + t_2 + \ldots + t_n$ sein würde, wenn es nicht rathsam wäre, die Zeiten t_1 und t_n als Mittelwerthe von mehreren solchen Zeitbeobachtungen in den Tiefen h_1 und h_n abzuleiten, während kleine Fehler der übrigen Zeiten durch Uebertragung im umgekehrten Sinne auf die folgenden sich grösstentheils ausgleichen. Aus diesen Zeiten ergeben sich dann die Geschwindigkeiten $w_1, w_2 \ldots w_n$ auf sogleich anzugebende Weise, und daraus mit meistens genügender Annäherung die mittlere Geschwindigkeit der Verticalen:

$$v = \frac{1}{H}\left[e(w_1 + w_2 + \cdots + w_n) + \left(H - h_1 - \frac{e}{2}\right)w_1 + \left(h_n - \frac{e}{2}\right)w_n\right] \ldots (1).$$

Ohne das Instrument aus dem Wasser zu heben, wird dann das Boot bis zur nächsten Verticalen verfahren und hier dieselbe Operation wiederholt. So geht das Messungsgeschäft sehr schnell von Statten, und giebt z. B. Amsler an, die Strömungsgeschwindigkeit für 278 Punkte in 26 Verticalen eines Wasserquerschnittes des Rheins bei Schaffhausen in 4 Stunden gemessen zu haben. —

Schliesslich ist zu erwähnen, dass Prof. v. Wagner neuerdings die einzelnen Umdrehungen der Flügelwelle für das Ohr wahrnehmbar gemacht hat dadurch, dass an ihrer Rotation ein kleiner Hammer Theil nimmt, der bei jeder Umdrehung einmal gegen eine Feder von ungeglühtem Eisendrahte schlägt und dass der dadurch erzeugte Ton, vermittels eines mit der Feder verbundenen anderen Drahtes zum Standorte des Beobachters fortgepflanzt, hier durch einen Resonanzkasten verstärkt wird. Die Zählung dieser Töne während einer gewissen Zeit ersetzt die Ablesung der betreffenden Umdrehungszahl an einem Zählwerke. —

Mag nun bei dem Strommesser mit elektrischem Signalapparat die Zeit beobachtet werden, in welcher das Flügelrad eine bestimmte Zahl von Umdrehungen macht, oder die Zahl von Umdrehungen während einer bestimmten Zeit (nach dem gewöhnlichen Verfahren) am Zählwerke abgelesen, bezw. nach dem Verfahren v. Wagner's akustisch ermittelt werden, so ergiebt sich dadurch im einen wie im andern Falle die Umdrehungszahl $= n$ des Flügelrades pro Secunde, und kommt es also nur noch darauf an, die Beziehung zu kennen, welche zwischen n

und der Strömungsgeschwindigkeit $= w$ stattfindet, die das Wasser längs der Axe des Flügelrades besitzt. Sind die Flügelflächen Theile einer Schraubenfläche mit der Ganghöhe h, so wäre ohne Widerstände:

$$w = nh.$$

In der That aber wirkt der Drehung ein Widerstandsmoment entgegen, welches, unter α und β Constante verstanden, proportional

$$\alpha + \beta n^2$$

gesetzt werden kann, da es aus dem Zapfenreibungsmoment der Welle und aus dem Moment des hydraulischen Widerstandes gegen die drehende Bewegung der Flügel im Wasser besteht, ersteres aber constant, letzteres proportional n^2 zu setzen ist. Unter diesen Umständen ist nun auch $w - nh$ nicht $=$ Null, sondern die positive relative Geschwindigkeit des Wassers gegen das Flügelrad nach der Richtung seiner Axe. Derselben Grösse ist die relative Normalgeschwindigkeit des Wassers gegen die Flügelfläche in irgend einem Punkte derselben proportional (in verschiedenen Punkten nach verschiedenen Verhältnissen), so dass der Normaldruck des Wassers auf ein Element der Flügelfläche und die auf die Axe bezogene Momentensumme dieser Normaldrucke für alle Flächenelemente zusammen proportional $(w - nh)^2$ gesetzt werden kann. Im Beharrungszustande ist dieses auf Umdrehung des Flügelrades wirkende Kraftmoment mit obigem Widerstandsmoment im Gleichgewicht, also

$$(w - nh)^2 = \alpha + \beta n^2$$

$$w = hn + \sqrt{\alpha + \beta n^2} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (2).$$

Diese von Baumgarten aufgestellte Formel kann bei passender Bestimmung der Constanten h, α, β zwar auch im Falle ebener Flügel zu Grunde gelegt werden, doch ist eine ebenso grosse Annäherung dann nur zu erwarten, wenn die Werthe jener Constanten für verschiedene Intervalle von n besonders bestimmt werden. Schraubenflächige Flügel werden deshalb in neuerer Zeit vorgezogen. Uebrigens beruht auch für diesen Fall die Formel (2) auf zweifelhaften Annahmen, so dass es gerechtfertigt ist, statt ihrer sich der fast allgemein üblich gewordenen, durch die Erfahrung hinlänglich bewährten einfacheren Gleichung:

$$w = a + bn \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots (3)$$

zu bedienen, indem die wahrscheinlichsten Werthe ihrer Coefficienten a, b nach der Methode der kleinsten Quadrate aus einer grösseren Zahl von Beobachtungen zusammengehöriger Werthe von w und n abgeleitet werden, die innerhalb des verlangten Gültigkeitsbereiches der Formel möglichst weit auseinander liegend zu ermitteln sind. Die Werthe von w können dabei entweder durch andere Messungsmethoden der Stromgeschwindigkeit oder noch besser dadurch erhalten werden, dass das Instrument mit bekannter Geschwindigkeit nach der Richtung der Flügelaxe gleichförmig durch stehendes Wasser bewegt wird in der hinlänglich begründeten Annahme, dass es hier nur auf die relative Geschwindigkeit ankommt, einerlei wie dieselbe aus den Einzelgeschwindigkeiten beider Theile, des Instrumentes und des Wassers, hervorgeht.

Zweifelhaft kann es aber erscheinen, ob den Coefficienten a, b der Gleichung (3) hinlänglich gleiche Werthe zukommen, jenachdem das Instrument bei einem kleineren Canal (Gerinne) oder bei einem grossen Flusse, ob es nahe der Oberfläche, an einer mittleren Stelle des Querschnitts oder nahe der Canalwand zur Messung benutzt wird, weil diese Fälle sich bezüglich der Leichtigkeit seitlicher Ausweichung des Wassers unterscheiden, die natürlich stattfindet, sofern $w > nh$ ist. Dieser Zweifel wird ausgeschlossen, wenn man das Flügelrad gemäss einem Vorschlage von Treviranus coaxial in einem beiderseits offenen kurzen Hohlcylinder rotiren lässt, um es so in stets gleiche Umstände zu versetzen. Nur ist es dann nöthig, die Axe dieses Hohlcylinders und des Flügelrades möglichst genau in die Strömungsrichtung (nicht in die davon vielleicht abweichende Richtung der Normalen zum Canalquerschnitte) einzustellen, weil sonst durch jenen Hohlcylinder ein Theil des Wasserstromes, der ohne ihn die Flügel getroffen hätte, von der Wirkung auf dieselben abgehalten werden könnte.

§. 162. Momentan wirkende Strommesser.

Instrumente, welche die an einer gewissen Stelle augenblicklich stattfindende Stromgeschwindigkeit des Wassers anzeigen, sind von sehr mannigfach verschiedener Einrichtung ersonnen und von älteren Hydraulikern vorzugsweise benutzt worden. Sie beruhen darauf (Bd. I, §§. 153, 154), dass der Druck P des Wasserstroms auf einen ihm ausgesetzten Körper dem Quadrat der relativen Geschwindigkeit beider, also bei ruhendem Körper dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit w des Wassers proportional gesetzt und somit gefolgert werden kann:

$$w = C\sqrt{P} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1),$$

unter C einen empirisch zu bestimmenden Coefficienten verstanden, der von der Form und den Dimensionen des Körpers abhängt. Die betreffenden Instrumente unterscheiden sich im Wesentlichen nur theils durch die Art des dem Drucke P unterworfenen Körpers, der insbesondere fest oder flüssig sein kann, theils durch die Art der Messung des Druckes P. Diejenigen dieser Messungsmethoden, welche auf dem Princip der Hebelwaage mit veränderlichem Gegengewichte an unveränderlichem Angriffspunkte, wie bei der sogenannten Wasserfahne von Ximenes, oder auf dem Princip der Schnellwaage, d. i. einer Hebelwaage mit unveränderlichem Gegengewichte an veränderlichem Angriffspunkte beruhen, wie Michelotti's hydraulische Schnellwaage, Lorgna's Wasserhebel und Brüning's Tachometer,* sind heutzutage nicht mehr gebräuchlich. Abgesehen von übermässigen Reibungswiderständen, womit die meisten dieser Instrumente behaftet sind, leiden sie an dem Uebelstande, dass es schwierig ist, mit der Aenderung des Gegengewichtes oder seines Angriffspunktes den Variationen der Stromgeschwindigkeit w hinlänglich schnell zu folgen, um eine jederzeit zutreffende Ablesung zu verbürgen. Die heutzutage noch üblichen Messungsmethoden des Druckes P beruhen auf dem Princip der Zeigerwaage, wobei ohne vorbereitende Aenderung eines Gegengewichtes oder seines Angriffspunktes lediglich aus der von selbst eintretenden Gleichgewichtslage eines dem Drucke P und ausserdem seiner Schwere unterworfenen Körpers auf die Grösse von P geschlossen wird. Instrumente solcher Art sind das hydrometrische Pendel und die Pitot'sche Röhre; bei jenem ist der betreffende Körper eine starre Kugel, bei dieser eine Flüssigkeit, nämlich ein Theil des strömenden Wassers selbst.

1. Das hydrometrische Pendel oder der Stromquadrant beruht darauf, dass, wenn eine an einem Faden befestigte Kugel, die specifisch schwerer als das Wasser ist, in einen Fluss gehalten wird, der Faden in einer mit der Stromrichtung parallelen Verticalebene von der Lothrechten abgelenkt wird um einen Winkel α, der nach einem gewissen Gesetze mit der Stromgeschwindigkeit wächst. Bei einer zweckmässigen Ausführung dieses Instrumentes nach Bauernfeind** wird es von einem Arme getragen, der auf passend angeordnetem Brette festzuschrauben ist, und kann es gegen jenen Arm durch Drehung (mit etwas Reibung) um zwei sich rechtwinklig schneidende horizontale Axen sowie um eine verticale Axe so eingestellt werden, dass die Ebene des zur Ablesung des Winkels dienenden eingetheilten Gradbogens vertical und mit der Stromrichtung parallel wird, und dass sein Mittelpunkt, in

* In Betreff der Einrichtung dieser Instrumente sei auf Rühlmann's Hydromechanik, 2. Aufl., §. 125 verwiesen.

** Elemente der Vermessungskunde, 2. Aufl., §. 230.

welchem der die Kugel tragende Seidenfaden befestigt ist, vertical über dem Nullpunkte der Theilung zu liegen kommt. Diese letztere Einstellung kann genauer, als die übrigen, auf die es nur näherungsweise ankommt, durch eine feine Regulirungsschraube mit Hülfe einer Libelle bewirkt werden. Auch ist dadurch, dass der Faden durch einen Stöpsel im Mittelpunkte der Kreistheilung festgeklemmt wird, seine Länge leicht so zu reguliren, dass die Kugel in verlangter Tiefe unter der Wasseroberfläche sich befindet. Ist nun

G das Gewicht der Kugel im Wasser, d. i. der Ueberschuss ihres Eigengewichtes über das Gewicht des (bei voller Eintauchung) verdrängten Wassers,

P der horizontale Druck des Wasserstroms auf die Kugel,

d ihr Durchmesser,

$F = \frac{\pi d^2}{4}$ der Inhalt eines grössten Kreises, also das Volumen der Kugel $= \frac{1}{6} \pi d^3 = \frac{2}{3} F d$,

γ das specifische Gewicht des Wassers,

δ das Massenverhältniss der Kugel und des verdrängten Wassers,

so ist für die Stromgeschwindigkeit w nach Bd. I, §. 153, Gl. (1):

$$P = \vartheta \gamma F \frac{w^2}{2g}$$

und deshalb für den Gleichgewichtszustand:

$$tg\,\alpha = \frac{P}{G} = \frac{\vartheta \gamma F \frac{w^2}{2g}}{(\delta - 1)\gamma \cdot \frac{2}{3} F d} = \frac{3\vartheta}{4g(\delta - 1)d} w^2 \quad \ldots\ldots (2)$$

$$w = k\sqrt{tg\,\alpha} \quad \text{mit} \quad k = \sqrt{\frac{4g(\delta - 1)}{3\vartheta}\, d} \quad \ldots\ldots\ldots (3).$$

Die Unsicherheit des Werthes von ϑ macht es übrigens nöthig, die Constante k der Gleichung $w = k\sqrt{tg\,\alpha}$ aus Beobachtungen von α abzuleiten an solchen Stellen, wo w anderweitig, durch Schwimmer oder durch Messung mit anderen schon controlirten Geschwindigkeitsmessinstrumenten bekannt ist. So fand z. B. Bauernfeind für einen Stromquadrant, bei welchem

$$d = 0{,}087 \text{ Mtr. und } \delta = 2{,}55$$

war und w zwischen den Grenzen 0,43 und 1,14 Mtr. pro Secunde mit einem Woltmann'schen Flügel (§. 161) gemessen wurde,

$$k = 1,62$$

entsprechend nach Gl. (3): $\vartheta = \frac{4.9,81.1,55}{3(1,62)^2} \cdot 0,087 = 0,67.$

Auch in anderen Fällen ergiebt sich hier ϑ ungefähr $= {}^2/_3$ und kann dann dieser Werth, wenn schon nicht zu hinlänglich zutreffender Bestimmung des Coefficienten k, so doch zur Bestimmung passender Grösse und Schwere der Kugel dienen, wenn die ungefähren Geschwindigkeitsgrenzen gegeben sind, für welche das Instrument bestimmt ist. Zunächst kann man bemerken, dass im Princip, d. h. ohne Rücksicht auf störende Umstände, die Empfindlichkeit der Messung von w mit dem Stromquadranten um so grösser wäre, je grösser und also je zuverlässiger messbar die durch eine kleine Aenderung von w bedingte Aenderung von α, d. h. je grösser der Differentialquotient $\frac{d\alpha}{dw}$ ist, für welchen aus der Gleichung

$$w^2 \, cotg \, \alpha = k^2 = \text{Const.}$$

durch Differentiation sich ergiebt:

$$w^2 \frac{-d\alpha}{sin^2 \alpha} + 2 w dw \, . \, cotg \, \alpha = 0$$

$$\frac{d\alpha}{dw} = \frac{2 \, cotg \, \alpha \, sin^2 \alpha}{w} = \frac{sin \, 2\alpha}{w} = max \text{ für } \alpha = 45^0$$

bei gegebenem Werthe von w. In der That aber findet man, dass die das Ablesen störenden Schwankungen der Fadenrichtung mit dem Winkel α so wachsen, dass es besser ist, diesen nicht über 30^0 hinaus wachsen zu lassen. Ist allgemein α' der angenommene Maximalwerth von α für das Maximum w' von w, so folgt aus Gl. (2):

$$\delta = 1 + \frac{3\vartheta}{2 \, tg \, \alpha'} \frac{w'^2}{2g} \frac{1}{d},$$

etwa

$$\delta = 1 + 0,1 \frac{w'^2}{d} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4),$$

entsprechend $\alpha' = 27^0$ für $\vartheta = {}^2/_3$. Danach würden z. B. mit der oben erwähnten Kugel des Bauernfeind'schen Instrumentes ($d = 0,087$ und $\delta = 2,55$) nur etwa bis

$$w' = \sqrt{\frac{1,55.0,087}{0,1}} = 1,16 \text{ Mtr.}$$

Stromgeschwindigkeit genügend sichere Ablösungen zu erwarten sein, ganz in Uebereinstimmung mit Bauernfeind's Wahrnehmungen.

Aus dem nach Gl. (4) für einen gegebenen Werth von w' und angenommenen Werth von d berechneten Werthe von δ ergiebt sich leicht die Wanddicke x, mit welcher die Kugel als Hohlkugel aus einem Metall von der Dichte Δ herzustellen wäre, nämlich gemäss der Gleichung:

$$\Delta\left[\frac{2}{3}Fd-\frac{2}{3}F\left(\frac{d-2x}{d}\right)^2(d-2x)\right]=\delta\cdot\frac{2}{3}Fd$$

$$1-\left(1-\frac{2x}{d}\right)^3=\frac{\delta}{\Delta}$$

$$x=\frac{d}{2}\left(1-\sqrt[3]{1-\frac{\delta}{\Delta}}\right)\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5).$$

Das hydrometrische Pendel ist nur zur Messung von w dicht unter der Wasseroberfläche geeignet, weil sonst auch der Faden dem Einflusse der Strömung wesentlich mit unterliegen und dann durch seine Biegung der am Gradbogen abzulesende Winkel α nach einem nur schwierig in Rechnung zu bringenden Gesetze modificirt werden würde. Es könnte zwar der Faden durch einen Draht ersetzt werden von hinlänglicher Dicke, um eine merkliche Biegung auszuschliessen, doch würde damit bei grösserer Tiefe der Kugel im Wasser eine wesentliche Störung des einfachen Abhängigkeitsgesetzes (3) zwischen w und α verbunden sein.

Auch bei der beschränkten Anwendung zur Messung der Oberflächengeschwindigkeit des Wassers ist der Stromquadrant zu den vollkommneren Instrumenten nicht zu zählen wegen der leicht bis zu 2^0 betragenden Schwankungen des Fadens. Nimmt man an, dass bei $\alpha=27^0$ der dem augenblicklichen Gleichgewichtszustande entsprechende Werth dieses Winkels mit einer Genauigkeit von 1^0 abgelesen werden könne (mit entsprechend grösserer Genauigkeit bei $\alpha<27^0$), so wäre allein aus diesem Grunde auf einen verhältnissmässigen Fehler von w

$$=\frac{\sqrt{tg\,28^0}-\sqrt{tg\,27^0}}{\sqrt{tg\,27^0}}=\sqrt{\frac{tg\,28^0}{tg\,27^0}}-1=0{,}022$$

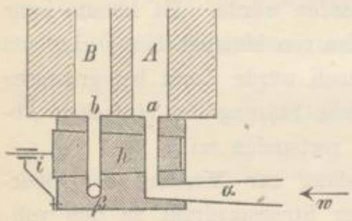
zu rechnen. Unter diesen Umständen und bei der Unbequemlichkeit der Ablesung an dem dicht über der Wasseroberfläche befindlichen Gradbogen ist das hydrometrische Pendel z. Z. fast vollständig ausser Gebrauch gekommen.

2. Die Pitot'sche Röhre besteht in ihrer einfachsten Form in einer rechtwinklig umgebogenen beiderseits offenen Röhre von solcher Lage, dass der kürzere untere Schenkel sich horizontal unter Wasser befindet und der Strömung entgegen gerichtet ist, während der andere

vertical aufwärts gerichtet aus dem Wasser herausragt. Im letzteren erhebt sich dann das Wasser bis zu einer gewissen Höhe h über das äussere Niveau nach Massgabe der Geschwindigkeit w des gegen die Oeffnung des horizontalen Schenkels gerichteten Wasserstroms. Durch verschiedene Verbesserungen dieses einfachen Instruments sind die ihm anhaftenden Mängel zu beseitigen gesucht worden, die in dem störenden Einflusse der Capillarität und in den die Ablesung erschwerenden Schwingungen der Wassersäule im verticalen Röhrenschenkel sowie in der Unbequemlichkeit und Unsicherheit solcher Ablesung nahe über der Wasseroberfläche begründet sind.

Der Einfluss der Capillarität kann dadurch eliminirt werden, dass statt einer Röhre deren zwei nahe neben einander liegend benutzt werden, die sich bis zu gleicher Tiefe abwärts in das Wasser erstrecken, so jedoch, dass nur die eine Röhre A, Fig. 177, eine dem Wasserstrom entgegen gerichtete Umbiegung α besitzt, während die andere unten mit zwei seitlich gegenüber liegenden Oeffnungen oder kurzen Rohransätzen β versehen ist, deren gemeinsame Axe die Axe des Rohrstückes α rechtwinklig schneidet. Indem dann jetzt unter h die Höhendifferenz der Wasseroberflächen in A und B verstanden wird, ist allerdings dieses h auch abgesehen vom Einflusse der Capillarität nicht mit dem obigen, d. i. mit der Höhe der Wassersäule in A über dem äusseren Niveau identisch, vielmehr im Allgemeinen grösser infolge einer Art von saugender Wirkung, welche der Wasserstrom an den Oeffnungen β der Röhre B theils wegen vergrösserter Geschwindigkeit, theils wegen auswärts convex gekrümmter Bahnen der Wassertheilchen ausüben kann; doch ist dieser Umstand, sofern er in allen Fällen auf gleiche Weise sich geltend macht, deshalb ohne Nachtheil, weil die Beziehung zwischen w und h bei der einen und anderen Bedeutung von h doch nur empirisch bestimmbar ist. Die Schwankungen der Wasserstände in den Röhren können durch Einschnürungen derselben, bezw. durch verengte Einmündungen a, b, Fig. 177, beliebig ermässigt werden; und wenn dann noch eine Einrichtung der Art getroffen wird, dass beide Röhren gleichzeitig durch einen Hahn h abgesperrt werden können, gewinnt man den Vortheil, dass die Ablesung von h bequem und sicher geschehen kann, nachdem das Instrument aus dem Wasser heraufgeholt wurde.

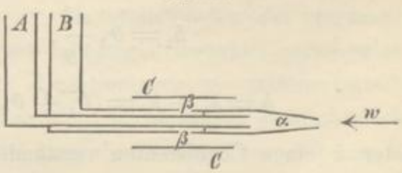
Fig. 177.



Auf diesen Erwägungen beruht die verbesserte Pitot'sche Röhre, welche als Reichenbach'scher Strommesser Anwendung gefunden hat. Die Glasröhren A, B, Fig. 177, von etwa 8 Millim. Weite sind dabei seitlich in einen hölzernen Schaft von linsenförmigem Querschnitte eingebettet; zwischen ihnen ist ein Massstab angebracht, dessen Nullpunkt in der Horizontalebene $\alpha\beta$ liegt, so dass die Ablesung nicht nur die Höhendifferenz h, sondern zugleich die Tiefe ergiebt, für welche die zu ermittelnde Geschwindigkeit w gilt. Der Hahn h kann an einem bei i befindlichen Arme durch einen aufwärts reichenden Draht gedreht werden; das Instrument wird mit offenem Hahn eingesenkt und dieser dann nach kurze Zeit lang ruhiger Haltung durch Anziehen des Drahtes geschlossen. Die verticale Haltung in solcher Lage, dass die Axe des Röhrenstücks α in die Stromrichtung fällt, kann ausser durch die flache Form des Schaftes noch weiter durch einen jenem Röhrenschenkel α entgegen gerichteten Steuerflügel unterstützt werden. Auch wird wohl die Metallfassung mit den Canälen $a\alpha$, $b\beta$ und dem Hahne h unten mit einem stabförmigen Fortsatze von regulirbarer Länge versehen, um damit das Instrument beim Gebrauche auf den Boden aufsetzen zu können.

Eine sehr wesentliche Verbesserung, wodurch das zeitraubende Herausheben des Instrumentes aus dem Wasser behufs jeder Ablesung vermieden wird, ist von Darcy angegeben worden und besteht darin, dass die Röhren A, B oben durch eine gemeinsame Fassung verbunden sind, vermittels welcher durch Saugen mit dem Munde an einem angesetzten Kautschukschlauch die Luft in beiden Röhren gleichzeitig in gleichem Maasse verdünnt und dadurch das Wasser ohne Aenderung der Niveaudifferenz h bis zu bequemer Beobachtungshöhe gehoben werden kann. Durch Drehung eines unterhalb dieser Stelle befindlichen Hahnes werden die gehobenen Wassersäulen abgesperrt, um nach Einstellung des Saugens die Ablesung vornehmen zu können; die Röhren A, B brauchen dann auch nur oberhalb der den Absperrhahn enthaltenden Fassung von Glas zu sein.

Fig. 178.



In Verbindung mit diesem Saugwerke ist von Prof. Amsler auch die Einrichtung der unteren Röhrenenden zweckmässig abgeändert worden.* Der verengte horizontale Schenkel des Rohres A ist nämlich, wie

* Rühlmann, Hydromechanik, 2. Aufl., §. 129.

Fig. 178 im Princip erkennen lässt, durch einen gleichfalls horizontalen Schenkel des Rohres B coaxial hindurchgeführt und der so entstandene enge hohlcylindrische Raum an einer gewissen Stelle (rechts von $\beta\beta$ in Fig. 178) abgeschlossen, dicht davor aber mit dem äusseren Wasser durch Oeffnungen β, β in Communication gesetzt, die in Fig. 178 als oben und unten liegend angegeben sind, in der That aber seitlich sich befinden. Endlich sind an dieser Stelle die genannten horizontalen Rohrschenkel durch einen mit ihnen coaxialen beiderseits offenen Hohlcylinder C umgeben worden, der das Wasser zwingt, in geradlinigen Bahnen an den Oeffnungen β vorbeizufliessen. Dadurch wird nicht nur die saugende Wirkung des Wasserstroms auf die in B befindliche Wassersäule vermindert, sondern auch namentlich unabhängig gemacht von der Stelle, wo die Geschwindigkeit w, ob nahe der Canalwand oder an einer mittleren Stelle, gemessen werden soll.

Was nun die Beziehung zwischen h und w betrifft, so sei

F_1 die Grösse der dem Wasserstrome entgegen gerichteten Mündung des Rohrs A,

F_2 die Gesammtgrösse der seitlichen Mündungen β, β des Rohrs B,

h_1 die Erhebung des Wassers in A über das äussere Niveau,

h_2 die Senkung des Wassers in B unter das äussere Niveau,

γ das specifische Gewicht des Wassers,

g die Beschleunigung der Schwere,

so entsprechen dem Gleichgewichtszustande die Gleichungen:

$$\vartheta_1 \gamma F_1 \frac{w^2}{2g} = \gamma F_1 h_1 \quad \text{und} \quad \vartheta_2 \gamma F_2 \frac{w^2}{2g} = \gamma F_2 h_2,$$

unter ϑ_1 und ϑ_2 Coefficienten verstanden, die von der Beschaffenheit des Instrumentes, von w aber nur in untergeordnetem Grade abhängen, so dass sie innerhalb mässig weiter Grenzen von w als constant für das betreffende Instrument zu betrachten sind. Aus jenen Gleichungen folgt:

$$h_1 = \vartheta_1 \frac{w^2}{2g}, \qquad h_2 = \vartheta_2 \frac{w^2}{2g}$$

$$h = h_1 + h_2 = (\vartheta_1 + \vartheta_2)\frac{w^2}{2g} = \frac{w^2}{k^2}; \; w = k\sqrt{h} \; . \; . \; . \; . \; . \; (6),$$

unter k einen Coefficienten verstanden, der für jedes Instrument besonders aus bekannten zusammengehörigen Werthen von w und h abgeleitet werden muss. In der Regel liegt er zwischen 3,5 und 4, wenn w und h in Metern ausgedrückt sind, entsprechend

$$\vartheta_1 + \vartheta_2 = \frac{2g}{k^2} = 1{,}6 \text{ bis } 1{,}2.$$

Der verbesserten Pitot'schen Röhre wird der Rang als brauchbarer Strommesser nur durch den hydrometrischen Flügel streitig gemacht. Letzterem kann sie dann vorgezogen werden, wenn es sich um Messungen handelt, die sehr nahe an der Canalwand ausgeführt werden sollen, besonders wenn zugleich durch mehrmalige Wiederholung der Messung an derselben Stelle behufs Gewinnung eines Mittelwerthes von h jener Mangel thunlichst ausgeglichen wird, der einem momentan wirkenden Strommesser im Gegensatze zu einem totalisirenden eigenthümlich ist.

§. 163. Anemometer.

Instrumente zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Luft oder überhaupt von Gasen* können zwar im Allgemeinen nach denselben Principien eingerichtet und benutzt werden wie die in den vorigen Paragraphen besprochenen im engeren Sinne sogenannten Strommesser, doch kommen dabei auch manche Unterschiede in Betracht, bedingt theils durch die viel grössere Leichtigkeit der Luft im Vergleich mit Wasser, theils durch die abweichende Art der Begrenzung, die bei als Wind bewegter freier atmosphärischer Luft gar nicht angebbar, in anderen Fällen aber so beschaffen ist, dass sie im Gegensatze zu dem in offenen Canälen strömenden Wasser eine von aussen her seitliche Einführung des Messinstrumentes in den Luftstrom ausschliesst. Die Benutzung eines Schwimmers, der hier ein im Luftstrome frei schwebender Körper sein müsste, ist deshalb kaum thunlich, weil, wenn es auch möglich wäre, den Körper so herzustellen, dass er beständig genau so schwer wie die verdrängte Luft ist, derselbe allen Störungen der regelrechten Strömung nachgeben und dann meistens nicht gestatten würde, aus seiner beobachteten Bewegung auf die Strömungsgeschwindigkeit der Luft nach bestimmter Richtung mit der nöthigen Sicherheit zu schliessen.

Uebrigens können die Anemometer von totalisirender oder von momentaner Wirkung und können sie ferner mit Registrirwerken versehen sein, letzteres namentlich bei dauernder Functionirung zu meteorologischen Zwecken, nämlich zur Aufzeichnung der wechselnden atmosphärischen Windgeschwindigkeit. Dabei sind die Instrumente entweder so beschaffen, dass ihre Wirksamkeit von der horizontalen, überhaupt von der in einer

* Geschichtliche Daten und Quellenangaben enthält u. A. Rühlmann's Hydromechanik, 2. Aufl., §. 208.

Ebene variablen Windrichtung unabhängig ist, oder sie stellen sich automatisch, etwa mit Hülfe eines Steuerflügels in die jeweils herrschende Windrichtung ein; letzteren Falles ist bei den Anemometern meteorologischer Observatorien die Richtung des Instrumentes als betreffende Windrichtung gleichfalls zu registriren, während im ersteren Falle besondere Instrumente dazu vorhanden sind. Bei den zu technischen Zwecken dienenden Anemometern, um welche es sich hier hauptsächlich handelt, können dergleichen Complicationen meistens wegfallen, indem dabei die Strömungsrichtung gegeben zu sein pflegt (z. B. mit der Richtung eines Ventilationscanals, des Zu- oder Ableitungscanals der Verbrennungsluft einer Feuerung u. s. f.) und auch meistens die Messung für eine kürzere Zeit in Gegenwart eines Beobachters genügt.

Für solchen Fall der Strömung in einem röhrenförmigen Canal hat die Kenntniss der Luftgeschwindigkeit in der Regel nur mittelbares Interesse zur Bestimmung der Luftmenge, die in der Zeiteinheit einen Canalquerschnitt durchströmt. Dazu sind totalisirende Instrumente am geeignetsten und auch vorzugsweise in Benutzung, nämlich als rotirende Anemometer, deren Rotationsaxe entweder die Richtung der Luftströmung hat (anemometrischer Flügel) oder senkrecht zu derselben ist (Robinson's Anemometer). Für meteorologische Observatorien würden zwar momentan wirkende Anemometer insofern vorzuziehen sein, als das mit einem solchen verbundene Registrirwerk unmittelbar den stetigen Verlauf der Windgeschwindigkeit aufzeichnen könnte; indessen sind solche bis jetzt weniger ausgebildet und deshalb auch zu diesem Zwecke fast ausschliesslich jene Windräder, besonders das Robinson'sche Anemometer in Gebrauch, obschon dann die Registrirung (neben derjenigen der wechselnden Windrichtung) unmittelbar nur die mittleren Windgeschwindigkeiten in aufeinander folgenden endlichen Zeitintervallen betrifft.

1. Der anemometrische Flügel ist sowohl an sich wie bezüglich seines Zählwerkes von gleicher Form und Einrichtung wie der hydrometrische Flügel (§. 161), nur leichter in allen Theilen construirt entsprechend der geringeren Masse und somit auch dem bei gleicher Geschwindigkeit kleineren Drucke bewegter Luft im Vergleich mit Wasser. Uebrigens ist nicht der anemometrische Flügel dem hydrometrischen, sondern umgekehrt dieser, von welchem als Woltmann'schem Flügel erst seit 1790 die Rede ist, jenem nachgebildet, der insbesondere als ein von dem damaligen Professor Wolff in Halle benutztes Instrument schon in Leupold's im Jahre 1724 erschienenem Werke „theatrum machinarum generale“ neben anderen Anemometern besprochen wird. Ebenso wie

beim hydrometrischen Flügel sind auch hier schraubenförmige Flügelflächen den ebenen vorzuziehen, indem dadurch theils der Luftwiderstand gegen die Rotation des Flügelrades vermindert, also die Empfindlichkeit erhöht, theils die Brauchbarkeit der Formel

$$w = a + bn \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

gesteigert wird, durch welche hier wie dort die Beziehung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit w und der Umdrehungszahl n pro Secunde dargestellt werden kann, unter a und b Constante verstanden, die für jedes Instrument besonders bestimmt werden müssen.

Diese Bestimmung erfordert eine nähere Besprechung, weil sich die dazu dienenden zusammengehörigen Werthe von w und n hier nicht so einfach und sicher wie beim hydrometrischen Flügel gewinnen lassen. Eine andere Messungsmethode zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit w ist hier nicht anwendbar, weil es eine zuverlässigere, als mit dem anemometrischen Flügel selbst, nicht giebt und bei Benutzung eines solchen Instrumentes, für welches die Constanten a, b der Gleichung (1) früher ermittelt waren, die ihnen anhaftenden Fehler mit weiteren Bestimmungsfehlern verbunden auf die Constanten des neuen Instrumentes übertragen werden würden. Analog dem Verfahren, den hydrometrischen Flügel im Sinne seiner Axe mit bekannter Geschwindigkeit w durch stehendes Wasser zu bewegen, um so zusammengehörige Werthe von w und n zu erhalten, könnte man das Anemometer vermittels eines mit bekannter Geschwindigkeit auf einer Eisenbahn laufenden Wagens durch möglichst ruhige Luft bewegen; allein abgesehen davon, dass dieses Hülfsmittel selten zur Verfügung wäre, würden auch wahrscheinlich durch das Fahrzeug mehr störende Bewegungen in der davor befindlichen Luft, als durch einen Kahn in dem voraus befindlichen Wasser verursacht werden. Eine Commission, die vom sächsischen Ingenieur- und Architekten-Verein seit längerer Zeit zum Studium der Prüfungsmethoden von Anemometern eingesetzt worden ist, hat zu dem Ende durch ein Versuchsrohr, in welchem das zu untersuchende Anemometer angebracht wurde, bekannte Luftmengen theils durch eine niedersinkende Gasometerglocke hindurchgepresst, theils später durch Ablassen von Wasser aus einem geschlossenen Gefässe hindurchgesaugt; allein wenn auch dadurch ein Luftstrom von hinlänglich bekannter mittlerer Geschwindigkeit zu erhalten war, so blieb doch das Vertheilungsgesetz der Geschwindigkeiten im Querschnitte und somit das Verhältniss jener bekannten mittleren zu der durchschnittlichen Geschwindigkeit der die Flügel treffenden Lufttheilchen so unsicher, dass diese Prüfungsmethode von der Commission später als unzuverlässig auf-gegeben und mit dem zu diesem Zwecke fast allgemein üblichen Verfahren vertauscht wurde.

Dasselbe besteht darin, dass eine verticale Welle W in möglichst gleichförmige Rotation versetzt wird, nachdem zuvor auf einem mit ihr rotirenden horizontalen Arme das Instrument so angebracht wurde, dass die Flügelaxe tangential an den vom Flügelmittelpunkte durchlaufenen Kreis gerichtet ist. Wenn nicht eine durch Elementarkraft in gleichförmiger Drehung befindliche Welle zur Verfügung ist, von welcher aus mit regulirbarem Umsetzungsverhältnisse die Welle W umgetrieben werden kann, diese vielmehr wie gewöhnlich durch Handbetrieb mit Kurbel und geeigneter Transmission bewegt werden muss, so ist bei einiger Uebung eine genügend gleichförmige Drehung dadurch zu erzielen, dass die hörbaren Stösse von einigen gleichförmig ringsum vertheilten (etwa 4, je einer Viertelumdrehung entsprechenden) Anschlagstiften der Welle W gegen eine am Gestell feste Feder F mit den Pendelschlägen eines Metronoms im Einklang erhalten werden. Aus dem beobachteten Winkelwege der Welle W während einer gewissen Zeit t und dem bekannten Radius der kreisförmigen Bahn des Flügelmittelpunktes ergiebt sich dann die Geschwindigkeit dieses Punktes $= w_0$, während die entsprechende Umdrehungszahl des Flügelrades (daraus n durch Division mit t) an einem Zählwerke abzulesen ist. Die Ein- und Ausrückung des letzteren zu Anfange bezw. zu Ende der Zeit t kann entweder, wie bei dem Apparate der oben erwähnten sächsischen Commission, durch mechanische Transmission von der Welle W aus längs dem das Instrument tragenden Arme bewirkt werden, oder besser durch elektrische Ströme, wie z. B. bei einem seit 1862 von Rühlmann und v. Quintus-Icilius eingerichteten Apparat der technischen Hochschule zu Hannover.* Am genauesten dürfte das von Recknagel benutzte Verfahren elektrischer Bestimmung zugleich von w_0 und von n sein, darin bestehend,** dass in einen mit bekannter gleichförmiger Geschwindigkeit durch ein Uhrwerk fortbewegten Papierstreifen durch Stromschluss je ein Nadelstich gemacht wird, so oft das Flügelrad eine gewisse Zahl von Umdrehungen (in jenem Falle 25) gemacht hat, während gleichzeitig die Stösse vorgenannter Anschlagstifte der Welle W gegen die Feder F andere Stromschlüsse und dadurch eine zweite Reihe von Nadelstichen im Papierstreifen, die zur Bestimmung von w_0 dienen, zur Folge haben.

---

* Mittheilungen des Hannov. Gewerbevereins, 1862, S. 264.

** Annalen der Physik und Chemie. 1880. Neue Folge. Bd. X, S. 677.

Mögen nun aber auch die zusammengehörigen Werthe von w_0 und n noch so zuverlässig gefunden sein, so entsteht doch die Frage, ob es zulässig ist, jenem w_0 die relative Geschwindigkeit w der Luft gegen den Flügel im Sinne der Axe desselben gleich zu setzen, und ob ferner die Beziehung zwischen diesem w und n dieselbe ist, wie sie im Falle einer geradlinigen statt kreisförmigen Bewegung des Instrumentes in der Luft sich ergeben hätte. Letzteres wird besonders deshalb nicht ganz der Fall sein, weil durch die Centrifugalkraft des Flügels in Folge seiner Drehung um W, sowie durch den ungleichen Luftdruck auf die in ungleichen Abständen von W befindlichen Flügeltheile die Reibung der Flügelwelle in ihren Lagern nothwendig vergrössert, folglich auch die Constante a in Gl. (1) etwas zu gross gefunden wird. Indem übrigens diese Constante bei grösseren Geschwindigkeiten w überhaupt nur von untergeordneter Bedeutung ist, kann man passend so verfahren, dass man mit einem erfahrungsmässig angenommenen Mittelwerthe von a, etwa $a = 0{,}2$ Mtr., zuerst nur den Werth von b aus den Versuchen ableitet und mit diesem dann einen corrigirten Werth von a aus den Versuchen mit kleinen Geschwindigkeiten w, für welche die genannten Störungen von geringerer Bedeutung sind.

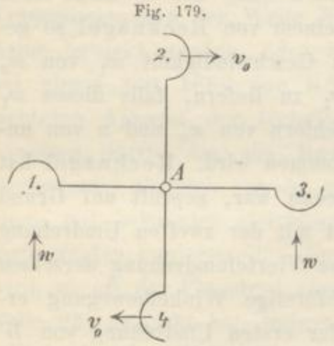
Wichtiger ist die Frage nach der Zulässigkeit der Gleichung $w = w_0$. In der That wird nämlich die Luft durch die Arme der Welle W und durch die von ihnen getragenen Instrumente selbst in Bewegung versetzt, so dass die letzteren nach einer vollen Umdrehung um W nicht mehr ruhende Luft vor sich haben, sondern in einem von Recknagel so genannten Mitwinde sich bewegen, dessen Geschwindigkeit w_1 von w_0 abgezogen werden muss, um $w = w_0 - w_1$ zu liefern, falls dieses w_1 nicht etwa im Vergleich mit Bestimmungsfehlern von w_0 und n von unerheblicher Grösse ist, wie meistens angenommen wird. Recknagel hat diese Annahme genauer, als seither geschehen war, geprüft auf Grund der Erwägung, dass fraglicher Mitwind erst mit der zweiten Umdrehung der Welle W beginnt und dass schon eine Viertelumdrehung derselben bei einiger Uebung die hinlänglich gleichförmige Winkelbewegung erzielen liess, bei welcher die übrigen $^3/_4$ der ersten Umdrehung von W ausreichend waren, um aus den entsprechenden ungefähr 50 Umdrehungen des von Recknagel benutzten Anemometers einen Werth von n ohne Mitwind zu erhalten, der dann nur mit dem bei unveränderter Winkelgeschwindigkeit der Welle W, also unveränderter Grösse von w_0 gefundenen Werthe von n für die folgenden, also unter Einfluss des Mitwindes stattfindenden Umdrehungen verglichen zu werden braucht, um daraus auf w_1 schliessen zu können. So ergab sich für 0,3 Mtr. Höhe der Flügelwelle über dem das Instrument tragenden Arme und für 2 Mtr. Abstand von der Welle W die Geschwindigkeit w_1 des Mitwindes nahe proportional der 1 bis 6 Mtr. betragenden Geschwindigkeit w_0, und zwar im Mittel

$$w_1 = 0,05\, w_0, \quad \text{entsprechend} \quad w = 0,95\, w_0 \;\ldots\ldots\; (2).$$

Als aber das Anemometer in nur 1 Mtr. Entfernung von der Wellenaxe wieder 0,3 Mtr. über dem Arme befestigt wurde, war bis zu $w_0 =$ 4,7 Mtr. ein Mitwind nicht wahrzunehmen, indem die gefundenen kleinen Werthe von w_1 theils positiv, theils negativ waren und innerhalb der wahrscheinlichen Fehlergrenzen lagen. Die der Luft mitgetheilte Bewegung scheint danach von eigenthümlicher Art, innen vorwiegend radial gerichtet zu sein und nur nach aussen hin mehr und mehr zugleich tangential zu werden, so dass auch die Beziehung (2) nicht als allgemein gültig zu betrachten, vielmehr besser für jeden Fall einer besonderen Controle zu unterwerfen sein wird.

2. Bei dem Robinson'schen Anemometer besteht das Windrad aus 4 hohlen Halbkugeln, welche, von einem rechtwinkligen Armkreuze getragen, um eine verticale Axe A in dem Sinne durch den Winddruck in Rotation versetzt werden, dass ihre convexen Seiten vorausgerichtet sind: siehe Fig. 179, in welcher mit v_0 die dieser Drehung entsprechende Geschwindigkeit der Halbkugelmittelpunkte bezeichnet und ferner eine solche augenblickliche Lage des Windrades vorausgesetzt ist, dass die Windgeschwindigkeit w die Richtung von der Halbkugel 4 gegen die Halbkugel 2 hat. Indem sich diese Lage des Windrades stetig ändert, ist sein Gesammtverhalten für jede Viertelumdrehung von der horizontalen Windrichtung ganz unabhängig und dadurch der Vortheil dieses Instrumentes zur Geschwindigkeitsmessung horizontaler Strömungen der freien Luft von beliebig variabler Richtung begründet, während es zu Messungen in Canälen sich weniger eignet, als der anemometrische Flügel.

Fig. 179.



Was die Beziehung zwischen w und v_0 betrifft, so sei v_1 die Geschwindigkeit, in welche, abgesehen von der Windgeschwindigkeit w, die Luft durch die Drehung des Rades und zwar in dem von den Halbkugelmittelpunkten durchlaufenen Kreise versetzt wird. Dann ist mit Rücksicht auf w die Geschwindigkeit der Luft am Orte der Halbkugel $1 = w + v_1$ und ihre relative Geschwindigkeit gegen diese Halbkugel

$$= w + v_1 - v_0 = w - (v_0 - v_1) = w - v,$$

wenn $v_0 - v_1 = v$ gesetzt wird. Dagegen ist die Geschwindigkeit der Luft am Orte der Halbkugel $3 = w - v_1$ und ihre relative Geschwindigkeit gegen dieselbe

$$= w - v_1 + v_0 = w + v.$$

Der Ueberschuss des Momentes, mit welchem der Luftdruck auf die Halbkugel 1 die Drehung des Rades zu beschleunigen strebt, über das Moment des wiederstehenden Luftdrucks gegen die Halbkugel 3 kann somit

$$= a_1 (w - v)^2 - a_2 (w + v)^2$$

gesetzt werden, wo a_1 wesentlich $> a_2$ ist, indem die relativen Luftgeschwindigkeiten $w - v$ und $w + v$ beziehungsweise gegen die concave und gegen die convexe Seite gerichtet sind. Die Halbkugeln 2 und 3 erfahren zusammen einen Widerstand, dessen Moment $= 2 a_2 v^2$ gesetzt werden kann, jedoch unter Einrechnung des durch das Armkreuz verursachten Widerstandes $= a v^2$ gesetzt werden mag, so dass sich das resultirende Moment des Luftdrucks auf das ganze Windrad

$$= a_1 (w - v)^2 - a_2 (w + v)^2 - a v^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

ergiebt, freilich zunächst nur für die aus Fig. 179 ersichtliche Lage. In anderen Lagen ist der relative Luftstrom für zwei Halbkugeln schräg gegen die concaven Hinterflächen, für die zwei anderen schräg gegen die convexen Vorderflächen gerichtet, so dass während jeder Vierteldrehung sich das resultirende Moment etwas ändern und das Windrad thatsächlich einen periodisch etwas veränderlichen Gang annehmen kann. Wenn indessen hiervon abgesehen und mit vermuthlich kleinem Fehler der mittlere Zustand als dauernd vorhanden betrachtet wird, so ist der Ausdruck (3) mit entsprechenden Werthen der Coefficienten a, a_1 und a_2 auch für den Mittelwerth des betreffenden Momentes als näherungsweise gültig zu betrachten, und weil dann derselbe für den Beharrungszustand dem Reibungsmomente der Welle A gleich sein muss, das unter Einrechnung des Widerstandes eines Zählwerkes mit a_0 bezeichnet sei, ergiebt sich die Gleichung:

$$a_1 (w - v)^2 - a_2 (w + v)^2 - a v^2 = a_0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4),$$

aus welcher folgt:

$$(a_1 - a_2)w^2 - 2(a_1 + a_2)wv + (a_1 - a_2 - a)v^2 = a_0$$

$$w = \frac{a_1 + a_2}{a_1 - a_2}v \pm \sqrt{\left[\left(\frac{a_1 + a_2}{a_1 - a_2}\right)^2 - 1 + \frac{a}{a_1 - a_2}\right]v^2 + \frac{a_0}{a_1 - a_2}}$$

$$= \frac{a_1 + a_2}{a_1 - a_2}v + \sqrt{\left(\frac{4a_1a_2}{(a_1 - a_2)^2} + \frac{a}{a_1 - a_2}\right)v^2 + \frac{a_0}{a_1 - a_2}} \quad \ldots (5).$$

Das Wurzelglied kann hier nur das positive Vorzeichen haben, weil aus Gl. (4) folgt:

$$a_1(w - v)^2 > a_2(w + v)^2; \qquad \frac{w - v}{w + v} > \frac{\sqrt{a_2}}{\sqrt{a_1}}$$

$$\frac{w}{v} > \frac{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}}{\sqrt{a_1} - \sqrt{a_2}}, \text{ d. i. } > \frac{(\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2})^2}{a_1 - a_2} > \frac{a_1 + a_2}{a_1 - a_2}.$$

Bei Vernachlässigung des verhältnissmässig kleinen Gliedes mit a_0 würde aus Gl. (5) sich w proportional v ergeben, insbesondere z. B. mit den der Wahrheit vermuthlich nahe kommenden Verhältnissen

$$a = 2a_2 \quad \text{und} \quad a_1 = 4a_2$$

$$w = \left(\frac{5}{3} + \sqrt{\frac{16}{9} + \frac{2}{3}}\right)v = \frac{5 + \sqrt{22}}{3}v = 3{,}23\,v.$$

Robinson giebt an: $w = 3v_0$, so dass dann

$$v = \frac{3}{3{,}23}v_0 = 0{,}93\,v_0, \quad \text{also} \quad v_1 = 0{,}07\,v_0$$

wäre. Bei der Zweifelhaftigkeit dieser Annahme ist übrigens aus Gl. (5) selbst bei Voraussetzung der Proportionalität zwischen v und v_0 und somit zwischen v und der Umdrehungszahl n pro Secunde nur zu folgern, dass, unter γ, β, α Constante verstanden, die von den Dimensionen des betreffenden Instrumentes abhängen, die Beziehung zwischen w und n näherungsweise die Form hat:

$$w = \gamma n + \sqrt{\beta n^2 + \alpha} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

in Uebereinstimmung mit Gl. (2) in §. 161. Wegen Kleinheit von α kann dafür in erster Annäherung $w = bn$ gesetzt werden oder besser:

$$w = a + bn \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1),$$

wie für den anemometrischen Flügel, unter a und b auch hier wieder Constante verstanden, deren wahrscheinlichste Werthe für jedes Instrument besonders aus Versuchen abgeleitet werden müssen.

Ebenso wohl begründet, wie dort, ist indessen die Gleichung (1) hier namentlich deshalb nicht, weil ihr die zweifelhafte Annahme der

Proportionalität von v und v_0, also von v und n zu Grunde liegt. Auch ist die versuchsmässige Bestimmung der Constanten a, b hier mit grösseren Schwierigkeiten verbunden. Der zu Versuchen mit anemometrischen Flügeln dienliche Rotationsapparat ist hier nicht wohl brauchbar, weil das von ihm mit verticaler Axe in einer Cylinderfläche herumgeführte Robinson'sche Anemometer sich hierbei unter Verhältnissen befinden würde, die von denen, in welchen es sich später beim Gebrauche befindet, allzu sehr verschieden sind. Die geradlinige Fortbewegung mit Hülfe eines Wagens, der eine bekannte Weglänge in einer gewissen zu beobachtenden Zeit durchfährt, erscheint hier als das geeignetste Mittel, um brauchbare, zusammengehörige Werthe zur Bestimmung der Constanten zu gewinnen.

3. Momentan wirkende Anemometer können nach denselben Principien hergestellt werden, welche im §. 162 für momentan wirkende Strommesser besprochen wurden. Auch hier gilt die Gleichung:

$$w = C\sqrt{P},$$

unter C eine empirisch zu bestimmende Constante und unter P den Druck des Luftstroms von der Geschwindigkeit w auf einen ihm ausgesetzten festen oder flüssigen Körper verstanden. Wenn C bekannt ist. erfordert dann die Bestimmung von w nur die jeweilige Messung von P, am besten nach dem Princip der Zeiger- oder Federwaage in der Weise, dass P von selbst mit einer bekannten Schwerkraft oder Federkraft in Gleichgewicht kommt und nur eine Skalenablesung erforderlich ist, um daraus auf die betreffende Gleichgewichtslage, somit auf P und auf w schliessen zu können.

Schon Leupold hat in seinem im Jahre 1724 erschienenen „theatrum machinarum generale" ein solches Anemometer angegeben. Eine von einem kleinen Rollwagen getragene ebene Tafel wird dabei rechtwinklig dem Luftstrome ausgesetzt und das Gleichgewicht des jeweiligen Druckes P auf dieselbe mit einem constanten Gegengewichte G dadurch vermittelt, dass beide Kräfte in entgegengesetztem Sinne drehend auf eine horizontale Welle W wirken, P an einem constanten, G an einem variablen Hebelarme. Die Welle W trägt nämlich neben einander eine Kreisscheibe und eine Spiralscheibe je mit einer am Umfange befestigten, sich auf- oder abwickelnden Schnur; die Schnur der Kreisscheibe ist andrerseits so am Rollwagen befestigt, dass sie durch P gespannt wird, während die Schnur der Spiralscheibe das Gewicht G trägt. Die ganze Vorrichtung ist in einem Rahmen angebracht, welcher, um eine verticale Axe drehbar, vermittels eines Steuerflügels in die Windrichtung sich einstellt, Einfacher und praktischer ist es, nach dem Vorgange von Bouguer (1746 und 1775), den Winddruck P sich mit dem Drucke einer auf denselben Körper in entgegengesetztem Sinne wirkenden Feder in Gleichgewicht setzen zu lassen, das dann bei einer von P abhängigen und umgekehrt diesen Druck P bestimmenden Lage des Körpers eintritt.

Alle diese Instrumente leiden indessen an dem Uebelstande, dass ihre Angaben von Reibungswiderständen beinflusst werden, die von schwankender Grösse, insbesondere abhängig von der Genauigkeit sind, mit welcher das Instrument in die Windrichtung eingestellt und somit ein seitlicher Druck auf den ihm ausgesetzten in Führungen beweglichen festen Körper ausgeschlossen ist. Besser in dieser Hinsicht ist die Benutzung eines flüssigen Körpers ähnlich wie bei der als Strommesser dienenden Pitot'schen Röhre (§. 162), also die manometrische Messung des der Luftgeschwindigkeit w entsprechenden Druckes. Denkt man sich nämlich ein Manometer gebildet aus zwei Glasröhren a, b, welche in verticaler Stellung unten durch eine gemeinschaftliche Metallfassung (oder auch als die beiden Schenkel einer U-förmig gebogenen Röhre) communiciren und bis zu gewisser Höhe mit einer tropfbaren Flüssigkeit, insbesondere z. B. mit Wasser gefüllt sind, und von diesen Manometerröhren die eine, etwa a, am oberen Ende durch einen Schlauch mit dem einen Ende einer Röhre A verbunden, die am andern Ende mit ihrer Mündung dem betreffenden Luftstrome entgegengerichtet ist, so wird durch letzteren in der Röhre A eine Druckzunahme der Luft bewirkt, die sich durch den Schlauch mit gleicher Stärke auf die Wasseroberfläche in der Manometerröhre a überträgt und hier eine Senkung, in der Röhre b eine entsprechende Hebung der Wasseroberfläche zur Folge hat; die Höhendifferenz beider $= h$ gestattet dann einen Schluss auf die Luftgeschwindigkeit w, mit welcher sie nach einem gewissen Gesetze zunimmt. Freilich wird es hierbei oft der Fall sein, dass der atmosphärische Druck an der Wasseroberfläche im Manometerrohre b von dem Drucke der das Rohr A an seiner Mündung umgebenden Luft wesentlich verschieden ist, und dass diese Differenz folglich wesentlichen Antheil an der manometrischen Höhendifferenz h hat; um aber diesen Einfluss zu eliminiren, bedarf es nur einer ähnlichen Einrichtung, wie bei der verbesserten Pitot'schen Röhre, nämlich der Anordnung eines zweiten Rohres B neben dem Rohre A, welches durch eine seitliche Oeffnung oder mehrere dergleichen mit dem betreffenden Luftstrome communicirt, etwa nach Art der Figur 178, und der Verbindung des anderen Endes dieser Röhre B durch einen Schlauch mit dem oberen

Ende des Manometerrohrs b. Ist dann analog den Bezeichnungen im §. 162 für die Pitot'sche Röhre

h_1 die Höhe einer Wassersäule (überhaupt einer Säule der manometrischen Flüssigkeit, durch welche die Druckvermehrung in den Röhren A, a gemessen wird),

h_2 die ebenso verstandene Höhe, welche der etwaigen Druckverminderung in den Röhren B, b entspricht,

γ das specifische Gewicht des Wassers (überhaupt der manometrischen Flüssigkeit),

λ das specifische Gewicht der Luft,

so kann, unter ϑ_1 und ϑ_2 erfahrungsmässige Constante verstanden, die von der Beschaffenheit des Instruments, insbesondere von der Beschaffenheit der Röhren A, B an ihren mit dem Luftstrome communicirenden Mündungen abhängen, gesetzt werden:

$$\vartheta_1 \lambda \frac{w^2}{2g} = \gamma h_1 \quad \text{und} \quad \vartheta_2 \lambda \frac{w^2}{2g} = \gamma h_2,$$

woraus sich die resultirende manometrische Höhendifferenz

$$h = h_1 + h_2 = (\vartheta_1 + \vartheta_2) \frac{\lambda}{\gamma} \frac{w^2}{2g} \dots\dots\dots (7)$$

ergiebt, also

$$w = k \sqrt{\frac{h}{\lambda}} \quad \text{mit} \quad k = \sqrt{\frac{2g\gamma}{\vartheta_1 + \vartheta_2}} \dots\dots (8).$$

Ein Uebelstand ist es, dass die Höhe h nach Gl. (7) im Verhältnisse $\lambda : \gamma$, d. i. etwa im Verhältnisse $1:800$ kleiner ist, als sie bei der einem Wasserstrome ausgesetzten Pitot'schen Röhre unter sonst gleichen Umständen sein würde. Jedenfalls sind deshalb besondere mikrometrische Hülfsmittel erforderlich, um die Grösse h mit der nöthigen Genauigkeit messen zu können, z. B. zugespitzte Mikrometerschrauben, die von oben her zur Berührung mit den Wasseroberflächen in den Manometerröhren a, b gebracht werden, oder wenigstens eine solche Mikrometerschraube, falls das Querschnittsverhältniss der Röhren a, b hinlänglich constant und bekannt ist. Ist die Ganghöhe der Schraube etwa $= 0{,}5$ Millim. und ihre Mutter mit einer Kreistheilung versehen, welche 0,01 Umdrehung abzulesen gestattet, so würde die Höhenlage der betreffenden Wasseroberfläche bis auf 0,005 Millim. genau bestimmt werden können, falls andere störende Umstände, z. B. die Capillarität durch grosse Rohrweiten, fern gehalten sind.

Die oben erwähnte Anemometer-Prüfungscommission des sächsischen Ingenieur- und Architektenvereins ermittelte z. B. für die von ihr benutzten Röhren A, B die Formel:

$$w = 4{,}785 \sqrt{\frac{h}{\lambda}} \text{ Mtr.},$$

falls die manometrische Druckhöhendifferenz h in Millimetern Wassersäule und das specifische Gewicht λ der Luft in Kilogrammen pro Cubikmeter ausgedrückt sind. Danach wäre, wenn h in Metern ausgedrückt ist,

$$k = 4{,}785 \sqrt{1000}$$

und würde sich damit aus Gl. (8) mit $\gamma = 1000$ ergeben:

$$\vartheta_1 + \vartheta_2 = \frac{2g \,.\, 1000}{k^2} = \frac{2 \,.\, 9{,}81}{(4{,}785)^2} = 0{,}86.$$

Bei den Versuchen, aus welchen der Coefficient 4,785 abgeleitet wurde, lagen die Werthe von w zwischen 1 und 10 Metr. pro Secunde, erhalten mit Hülfe desselben Rotationsapparates, der auch zur Prüfung der anemometrischen Flügel diente. Auf demselben wurde die Röhre A mit horizontal voraus gerichteter, die Röhre B mit vertical gerichteter und durch einen horizontalen dünnwandigen Flansch eingefasster Mündung befestigt, während die von diesen Röhren andrerseits ausgehenden Schläuche unter Glocken mündeten, welche mit geeigneten Wasserverschlüssen über der Mitte des Rotationsapparates angebracht waren und von welchen aus andere Schläuche die Verbindung mit den Manometerröhren a, b herstellten. Uebrigens war es die Rotationsgeschwindigkeit der Röhrenmündungen A, B, welche mit Vernachlässigung eines etwaigen Mitwindes als relative Windgeschwindigkeit w bei diesen Versuchen angenommen wurde. Bei Voraussetzung eines Mitwindes von 5% dieser Rotationsgeschwindigkeit wäre

$$w = 0{,}95 \,.\, 4{,}785 \sqrt{\frac{h}{\lambda}} = 4{,}55 \sqrt{\frac{h}{\lambda}},$$

entsprechend

$$\vartheta_1 + \vartheta_2 = \frac{2 \,.\, 9{,}81}{(4{,}55)^2} = 0{,}95.$$

Während bei dem anemometrischen Flügel die als Maass von w dienende Umdrehungszahl n pro Secunde nur der ersten Potenz von w angenähert proportional ist, ist hier h proportional w^2 und deshalb bei Bestimmung der Proportionalitätsconstanten ein Messungsfehler von w hier von grösserem Einflusse, insbesondere auch bei Benutzung des Rotationsapparates die unsichere Kenntniss des Mitwindes hier nachtheiliger, als dort. In der Regel wird es deshalb vorzuziehen sein, die Bestimmung der Constanten k in Gl. (8) durch Vergleichung des betreffenden Instruments mit einem sorgfältig geprüften anemometrischen Flügel auszuführen.

Schliesslich ist zu bemerken, dass alle hier besprochenen momentan wirkenden Anemometer den Uebelstand gemein haben, bezüglich ihrer Angaben vom specifischen Gewichte λ der in Strömung begriffenen Luft abhängig zu sein. Bei den totalisirenden Instrumenten unter 1. und 2. ist das nicht der Fall; z. B. ist beim Robinson'schen Anemometer nach Gl. (5) die Beziehung zwischen w und v nur von den verhältnissmässigen Grössen der Coefficienten a, a_1 und a_2 abhängig, welche zwar einzeln mit λ veränderlich sind, aber alle in gleichem Verhältnisse. Ebenso kann auch beim anemometrischen Flügel die Beziehung (1) zwischen w und n nur in ganz untergeordnetem Maasse durch die jeweilige Dichtigkeit der Luft beeinflusst werden, sofern die letztere nicht zwischen sehr weiten Grenzen veränderlich ist.

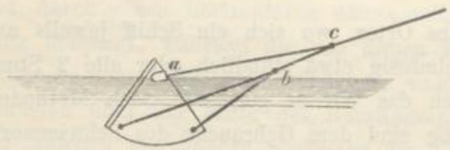
§. 164. Instrumente zur Messung der Schiffsgeschwindigkeit auf See.

Zu beständiger Controle des Ortes, wo sich ein Schiff jeweils auf dem Meere befindet, wird regelmässig etwa stündlich oder alle 2 Stunden seine Geschwindigkeit gegen das Wasser gemessen nach Methoden und mit Hülfsmitteln, die analog sind dem Gebrauche des Schwimmers, des hydrometrischen Flügels oder der Pitot'schen Röhre zur Messung der Geschwindigkeit des in offenen Canälen strömenden Wassers. Wenn dann gleichzeitig auch die Richtung aufgezeichnet wird, in welcher das Schiff nach dem Compass anliegt, d. h. der Winkel, den die Kielrichtung mit dem Meridiane bildet, und dieser Winkel, um die Richtung der Wasserbahn des Schiffes gegen die Erde zu erhalten, nöthigenfalls (bei starkem seitlichem Winde) mit Rücksicht auf die gepeilte Abtrift, d. h. mit Rücksicht auf den Winkel corrigirt wird, unter welchem die Kielrichtung gegen das sogenannte Kielwasser (einen mehr oder weniger weit vom Hintertheile des Schiffes aus sichtbaren, seine Wasserbahn anzeigenden Streifen gekräuselten Wassers) geneigt ist, so leuchtet ein, wie daraus durch Construction oder Rechnung der ganze Schiffsweg im Wasser während eines (von Mittag zu Mittag gerechneten) seemännischen Tages gefunden werden kann, der schliesslich noch im Falle von Meeresströmungen von bekannter Richtung und Stärke mit Rücksicht auf diese und auf die Zeit, während welcher sich das Schiff in ihrem Bereiche befunden hat, zu corrigiren ist, um als Weg des Schiffes gegen die Erde gelten zu können. Mit diesem corrigirten Tageswege und dem bekannten Schiffsorte vom vorigen Mittag macht man das sogenannte Besteck, d. h. bezeichnet auf der Karte den Schiffsort des betreffenden Tages.

Ein Instrument zur Messung der Schiffsgeschwindigkeit auf See wird als Log, das Messen mit demselben als „loggen" bezeichnet. Die mancherlei Mängel des Besteckmachens mit Compass und Log machen es zwar nöthig, bei längeren Reisen das so erhaltene Besteck thunlichst oft durch astronomische Beobachtungen zu controliren, die geographische Breite täglich durch Beobachtung der Mittagshöhe der Sonne, die Länge in mehrtägigen Fristen mit Hülfe des Chronometers (§. 141); indessen darf andrerseits wegen der Ungewissheit, ob die Witterung am nächsten Tage und vielleicht in mehreren Tagen eine astronomische Beobachtung möglich machen wird, das Besteckmachen mit Compass und Log als Nothbehelf auf offener See niemals unterlassen werden.

1. Das gewöhnliche Log, wie es seit Jahrhunderten gebräuchlich ist, besteht aus dem Logbrettchen, der Logleine und der Logrolle.

Fig. 180.



Das Logbrett (Fig. 180) ist ein hölzerner Sextant von 12 bis 15 Centimeter Radius und etwa 12 Millimeter Dicke, am Bogenrande durch einen Bleistreifen so beschwert, dass es in verticaler Lage mit nur etwas hervorragender Spitze a schwimmt.

Die Logleine ist mit den Ecken des Logbrettes durch 3 Zweigschnüre verbunden, an der Spitze a lösbar durch eine in ein entsprechendes Loch daselbst gesteckte hölzerne etwas conische Pinne, die sich am Ende der oberen Zweigschnur ac befindet; durch einen Ruck an der Logleine entgegen dem Widerstande des Wassers kann diese Verbindung gelöst werden, um das Logbrett flach liegend mit kleinem Widerstande einzuholen. Auch ist wohl bei fester Verbindung an der Stelle a die lösbare Pflockverbindung zwischen b und c angeordnet, wodurch theils der dieselbe lösende Zug an der Leine eine weniger schräge und zu Klemmung Veranlassung gebende Richtung erhält, theils die Einholung des Logbrettes mit vorausgerichteter Spitze noch etwas leichter geschehen kann. Die Leine ist durch Knoten (eingedrehte Zeugstreifen von verschiedener Farbe) in Strecken von je $\frac{1}{240}$ oder $\frac{1}{120}$ Seemeile getheilt, also, da eine Seemeile $= \frac{1}{4}$ geographische Meile $= 1855$ Meter ist, in Strecken von

$$\frac{1855}{240} = 7{,}73 \text{ bezw. } 15{,}46 \text{ Meter}$$

Länge. Indessen befindet sich zwischen dem Logbrette und dem ersten Knoten eine Strecke von 20 bis 40 Metr. je nach der Grösse des Schiffes, damit durch diesen sogenannten Vorlauf das Log dem Einflusse des unruhigen Kielwassers hinlänglich entzogen und die Neigung der Leine gegen den Horizont hinlänglich klein geworden sei, wenn mit dem Ablaufe des ersten Knotens von Bord des Schiffes die eigentliche Messung beginnt. Letztere dauert 15 oder 30 Secunden, d. i. $^1/_{240}$ oder $^1/_{120}$ Stunde, jenachdem die Strecke zwischen zwei aufeinander folgenden Knoten der Leine $= \frac{1}{240}$ oder $= \frac{1}{120}$ Seemeile gewählt ist, und zwar ist es üblich, dieses Zeitintervall hier vermittels einer Sanduhr, des sogenannten Logglases, abzumessen.

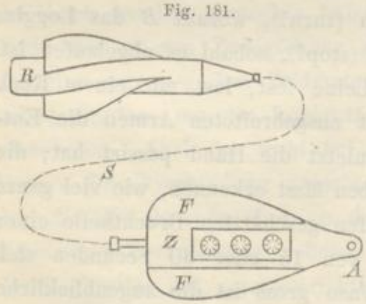
Die Logrolle ist eine leicht construirte länglich cylindrische Rolle, die um einen an den Enden mit Handgriffen versehenen cylindrischen Stab als Axe leicht drehbar und auf welche die Logleine in losen Windungen aufgewickelt ist, um beim Loggen von der sich entsprechend drehenden Rolle mit nur kleinem Widerstande ablaufen zu können.

Zur Ausführung des Loggens dienen 3 Personen A, B, C; A hält den Stab, um welchen die Rolle drehbar ist, horizontal zwischen den Händen, B nimmt das Logglas, die mit Sand gefüllte Abtheilung nach unten gekehrt, C wirft das Logbrett mit eingesteckter Pinne vom Hintertheil des Schiffes aus über Bord und lässt sich die Leine leicht durch die hohle Hand laufen. Wenn C sieht oder fühlt, dass der erste Knoten die Hand passirt, giebt er ein Zeichen (turn!), worauf B das Logglas dreht und seinerseits ein Zeichen giebt (stop!), sobald es abgelaufen ist. Auf dieses Zeichen hält C sofort die Leine fest, löst mit einem Ruck die Pinne und misst durch Greifen mit ausgebreiteten Armen die Entfernung bis zu dem Knoten ab, der zuletzt die Hand passirt hat; die Farbe und sonstige Beschaffenheit desselben lässt erkennen, wie viel ganze Knotenlängen ausser dem durch Abgreifen geschätzten Bruchtheile einer solchen während der Beobachtungszeit von 15 oder 30 Secunden sich von der Rolle abgewickelt haben. Ebenso gross ist die augenblickliche Schiffsgeschwindigkeit in Knoten, d. i. in Seemeilen pro Stunde. Wegen des Zeitverlustes durch die Commando's (turn, stop) und durch die darauf folgenden Handlungen, der im Ganzen zu einer Secunde geschätzt wird, ist übrigens das Logglas so justirt, dass thatsächlich der Sand nicht in 15 bezw. 30 Secunden, sondern in 14 bezw. 29 Secunden aus der einen in die andere Abtheilung abläuft.

Im Princip ist offenbar dieses Loggen nichts anderes, als die Umkehrung einer Stromgeschwindigkeitsmessung mit Schwimmer. Auch könnte zu letzterem Zwecke ein Schiffslog in der That benutzt werden, indem es etwa von einer festen Brücke aus ebenso in den Wasserstrom eines Flusses, wie sonst vom fahrenden Schiffe aus in das ruhende Meer geworfen wird, wenn nicht die Abmessung einer Flussstrecke am Ufer und die Zeitmessung mittelst einer guten Uhr viel genauer wäre. Grösser noch ist die Ungenauigkeit des Loggens auf dem Meere. Wenn insbesondere bei hoher See ein Schiff vor dem Winde und den Wellen segelt, findet man durch das Loggen die Geschwindigkeit zu klein, wenn es beim Winde und gegen den Wellenschlag segelt, zu gross, weil das kleine Logbrett der in den obersten Schichten der Wellenberge bis zu gewissem Grade stattfindenden fortschreitenden Bewegung des Wassers folgt. Die dadurch bedingte Correction kann bis 10% des Werthes betragen und wird nach Schätzung angebracht. Weitere Fehler werden durch die Reibung der Rolle, durch die Reibung der Leine in der Hand, sowie durch ihre Trägheit verursacht in verhältnissmässig um so grösserem Betrage, je kleiner die Schiffsgeschwindigkeit ist.

2. Zum Ersatze des gewöhnlichen Logs sind vielfach vollkommnere Geschwindigkeits-Messinstrumente vorgeschlagen worden, die meistens auf dem Princip des hydrometrischen Flügels beruhen. Das erste solche Log, das besonders in Amerika mehrfach Anwendung gefunden hat, ist Massey's Patent-Log vom Jahre 1834, seitdem jedoch wiederholt in seiner Form modificirt und verbessert. Es besteht (Fig. 181) aus zwei Theilen: dem rotirenden Körper R und dem Zählwerke Z. Ersterer ist eine mit schraubenförmigen Flügeln besetzte, vorn conisch zulaufende, geschlossene Messingröhre von solcher Wanddicke, dass ihr Gewicht dem Auftriebe des Wassers nahe gleich ist. Das Zählwerk, in eine längliche Büchse mit zwei ebenen Flügeln F, F (zur Verhütung ihrer Rotation) eingeschlossen, wird durch ein an der Spitze des Rotators R befestigtes, hinlänglich steifes Stück Manilaseil S (in Fig. 181 ausgestreckt zu denken) in Bewegung gesetzt, indem dasselbe andrerseits

Fig. 181.



mit der Welle einer zum Zählwerke gehörigen Schraube ohne Ende verbunden ist. Der ganze Apparat, bei A an einer Leine von 20 bis 30 Meter Länge befestigt, wird über Bord geworfen und die Zeit beobachtet, während welcher er sich, vom Schiffe hinter sich her gezogen, im Wasser befindet. Die Ablesung des wieder an Bord geholten Instruments geschieht infolge entsprechender Einrichtung des Zählwerkes unmittelbar in Theilen einer Seemeile gemäss der Annahme, dass die Umdrehungszahl dem Wege im Wasser (nach einem durch Versuche festzustellenden Verhältnisse) proportional gesetzt werden kann. Die Fehler, welche dadurch verursacht werden, dass der Rotator sich anfangs zu langsam, später beim Einholen des Instrumentes zu schnell dreht, heben sich theilweise auf und haben übrigens um so geringeren Einfluss auf das Ergebniss der Division des abgelesenen Weges durch die beobachtete Zeit, je länger das Instrument im Wasser belassen wird.

Compendiöser, als das erwähnte, ist Walker's harpoon-log,* wobei unter Beseitigung des Manilaseilstücks der Rotator mit dem Zählwerke unmittelbar verbunden ist, indem die nach vorn verlängerte Röhre des ersteren in die Büchse des letzteren hineinreicht, ähnlich wie übrigens auch schon Massey sein Instrument später modificirt hatte. Eine Abänderung desselben in entgegengesetztem Sinne stellt Reynold's sogenanntes pendant-log** dar, indem dabei das Zählwerk an Bord des Schiffes sich befindet unter entsprechender Verlängerung des als Transmissionswelle dienenden Seils von etwa 12 Millim. Dicke, während der Rotator aus 3 einen Holzcylinder von 50 Millim. Dicke und 400 Millim. Länge umgebenden Schraubenflügeln von 70 Millim. grösstem Radius gebildet ist. Diese Einrichtung gewährt den Vortheil, dass sich die Augenblicke der In- und Aussergangsetzung des Zählwerkes dem Anfang und Ende der Beobachtungszeit präciser anpassen lassen, und dass eine anderenfalls bis zu gewissem Grade immerhin mögliche Rotation der das Zählwerk enthaltenden Büchse ganz ausgeschlossen ist. — In Friend's Log ist der rotirende Körper eine hohle, mit radialen Schaufeln nach Art eines unterschlächtigen Stossrades besetzte Trommel, die am hinteren Ende in der das Zählwerk enthaltenden, nach vorn zugeschärften Büchse quer mit horizontaler Axe so gelagert ist, dass stets nur einige Schaufeln aus einem Einschnitte an der Unterfläche der Büchse hervorragen.

Wenn übrigens alle diese Instrumente doch nur zu ausnahmsweisem

---

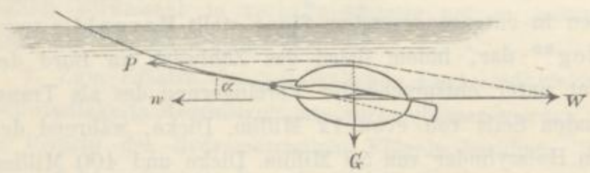
* Rühlmann's „Allgemeine Maschinenlehre“, 2. Aufl., Bd. I, S. 139.

** Rühlmann's Hydromechanik, 2. Aufl., S. 365.

Gebrauche gekommen sind und das gewöhnliche Log nicht zu verdrängen vermocht haben, so liegt der Grund theils darin, dass sie eine sorgfältigere und subtilere Behandlung erfordern, als auf welche an Bord eines Schiffes gewöhnlich zu rechnen ist, theils darin, dass die Annahme beständiger Proportionalität des durchlaufenen Weges und der Umdrehungszahl des rotirenden Körpers nur bei mittleren Geschwindigkeiten und ziemlich ruhigem Wasser so angenähert zutrifft, dass diese Instrumente wesentlich genauere Resultate, als das gewöhnliche Log gewähren. Bei kleinen Geschwindigkeiten wird die schwankende Grösse der Reibungswiderstände von allzu bedeutendem Einflusse, während bei grossen Geschwindigkeiten und hohen Wellen das Instrument sich nicht selten vorübergehend aus dem Wasser erhebt, indem es von Welle zu Welle springend durch die Luft hindurch fortgezogen wird.

Der letztgenannte Uebelstand kann freilich dadurch vermieden werden, dass das Instrument schwerer, als das verdrängte Wasser gemacht wird, so dass es nicht an der Oberfläche, nur beinahe ganz eingetaucht, schwimmt, sondern infolge des Ueberschusses G seiner Schwere über den Auftrieb so tief untersinkt (Fig. 182), dass diese Verticalkraft G mit der Resultanten des horizontalen Widerstandes W und der unter einem gewissen Winkel α gegen den Horizont geneigten Zugkraft P des Seiles im Gleichgewicht ist. Indessen wird dann die Rotation des Rotators, sofern der Schnittpunkt der Kraftrichtungslinien G, W als in seiner Axe liegend, diese folglich als Richtungslinie von P anzunehmen ist, nur durch die Geschwindigkeitscomponente $w \cos \alpha$ vermittelt, welche, da

Fig. 182.



$$\alpha = arc\ tg \frac{G}{W}$$

vom Widerstande W und folglich von der Schiffsgeschwindigkeit w abhängt, ein veränderliches Verhältniss zu w hat, so dass die vorausgesetzte Proportionalität zwischen w und der auf eine gewisse Zeit bezogenen Umdrehungszahl des Rotators schon aus diesem Grunde nicht erwartet werden kann.

3. Bei der Führung eines Schiffes ist es oft erwünscht, die Wirkung sofort erkennen zu können, welche eine angeordnete Maassregel,

z. B. das Beisetzen oder Bergen eines Segels, eine Veränderung der Segelstellung durch Brassen, des Expansionsgrades der Maschine u. s. w. auf die Geschwindigkeit des Schiffes ausgeübt hat. Die bisher besprochenen totalisirenden Instrumente, die zur Messung einer wesentlichen Zeit bedürfen und auch nur die während derselben stattfindende mittlere Geschwindigkeit angenähert ergeben, sind weniger dazu geeignet, als momentan wirkende Instrumente, die eine beständige Beobachtung der augenblicklichen Geschwindigkeit gestatten.

Jener Anforderung entspricht und zwar, wie versichert wird,* in sehr befriedigender Weise das Log von Berthon (Patente von 1849 und 1850). Es beruht auf dem Princip der Pitot'schen Röhre und besteht in einem cylindrischen, unten geschlossenen und nur mit einer kleinen Seitenöffnung o am untern Ende versehenen Rohre R, welches durch eine verticale Durchbohrung des Kiels ungefähr in der Mitte des Schiffes so hindurchgesteckt ist, dass es um 15 bis 20 Centimeter unten hervorragt und die an dieser Hervorragung befindliche Oeffnung o nach vorn gekehrt ist. Berthon fand durch eine grosse Zahl von Beobachtungen bei verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten, dass unter solchen Umständen in der für die Pitot'sche Röhre geltenden Gleichung:

$$h = \vartheta \frac{w^2}{2g}$$

fast genau $\vartheta = 1$ gesetzt werden kann. Weil nun aber die Geschwindigkeit w eines Seedampfers bis zu etwa 18 Knoten

$$= \frac{18 \,.\, 1855}{60 \,.\, 60} = 9{,}275 \text{ Mtr. pro Sec.}$$

betragen kann, somit die Erhebung des Wassers in der Röhre über das Meeresniveau bis $h = \frac{w^2}{2g} = 4{,}38$ Mtr., so ist eine Reduction der Skala unerlässlich, welche dadurch erreicht wird, dass die Röhre von unten in einen Windkessel W mündet, in welchem das Wasser nur bis zu einem gewissen Niveau reicht, da ein weiteres Emporsteigen durch entsprechende Compression der darin befindlichen Luft ersetzt wird, deren Druck durch ein oben vom Windkessel ausgehendes Rohr L weiter fortgepflanzt wird bis zum oberen Ende des einen Schenkels S einer U-förmig gebogenen, in ihrem unteren Theile Quecksilber enthaltenden Glasröhre M. Im

* Vortrag von Herrn Vaughan Pendred in der Sitzung vom 6. December 1869 der Society of Engineers, publicirt im betreffenden Jahresberichte dieser Gesellschaft.

anderen Schenkel S' der letzteren wird dann das Quecksilber emporgedrückt, so dass die Niveaudifferenz in beiden im Verhältnisse 13,25 (Dichtigkeitsverhältniss von Quecksilber und Seewasser) kleiner als $h - x$ ist, unter x die Höhe der Wasseroberfläche in W über dem Meeresniveau verstanden, somit höchstens etwa

$$= \frac{4,38}{13,25} = 0,33 \text{ Mtr.}$$

Durch Compassaufhängung kann das passend beschwerte Manometerrohr M mit seiner Skala in verticaler Lage erhalten werden, indem durch einen biegsamen Schlauch die Verbindung mit dem Luftrohre L vermittelt wird; letzteres kann beliebig im Schiffe fortgeführt werden, so dass die Ablesung an einem bequemen Orte, z. B. in der Capitänscajüte, im Maschinenraume u. s. w., jederzeit geschehen kann.

Um die Aenderungen von x, welche durch Spannungs- und Volumenänderungen der Luft in L, also besonders durch Aenderungen des Tiefganges des Schiffes, sowie durch Temperatur-Einflüsse bedingt sind, möglichst unschädlich und event. die Messung von x entbehrlich zu machen, muss vor Allem die Leitungsröhre L so eng und der Windkessel W so weit sein, dass eine beträchtliche Spannungs- und Volumenänderung jener Luft eine nur kleine Wasserstandsänderung in W zur Folge hat. Ausserdem ist dicht neben der Röhre R noch eine zweite R' mit jener verbunden durch die Kieldurchbohrung hindurchgesteckt, in deren unter dem Kiel hervorragendem unteren Ende sich jedoch die seitliche Oeffnung o' an einer solchen Stelle befindet, dass die Bewegung des Schiffes auf das Wasser in R' weder eine empordrückende noch umgekehrt eine saugende, niederziehende Wirkung ausübt; auch dieses Rohr mündet in einen Windkessel W', welcher, dicht neben W ungefähr in der Höhe des Meeresniveaus im Schiffsraume befindlich, durch ein Luftrohr L' mit dem Schenkel S' der Manometerröhre M vermittels eines biegsamen Schlauches communicirt. Auf diese Weise sind die Wirkungen der erwähnten Umstände in den Luftröhren L, L' und somit in beiden Schenkeln S, S' der Manometerröhre M stets gleichzeitig, aber in entgegengesetztem Sinne vorhanden, so dass sie sich theilweise aufheben. Ist dann y die (positive oder negative) Höhe der Wasseroberfläche in W' über dem Meeresniveau, so ergiebt sich die beobachtete Niveaudifferenz der Quecksilbersäulen in M bei Vernachlässigung des specifischen Gewichtes der Luft gegen das des Wassers:

$$m = \frac{(h-x)-(0-y)}{13,25} = \frac{h-(x-y)}{13,25}$$

und daraus mit $x - y = h'$

$$h = \frac{w^2}{2g} = 13{,}25\, m + h'.$$

Die Höhe h' der Wasseroberfläche in W über derselben in W' ist weniger veränderlich, als x, und ausserdem leichter zu messen durch Vergleichung von neben einander befindlichen Wasserstandszeigern beider Windkessel. Eine Aenderung kann h' allerdings namentlich durch Verluste an comprimirter Luft in L erfahren; wenn aber nur von Zeit zu Zeit diese Luft mit Hülfe einer kleinen Luftpumpe so ergänzt und regulirt wird, dass h' stets nahe = Null bleibt, wird die Berücksichtigung von h' zur Ableitung von w aus m in den meisten Fällen entbehrlich sein.

Wenn die unter dem Kiel hervorragenden Rohrstücke durch einen Zufall beschädigt werden sollten, müssen sie leicht und unter solchen Umständen durch andere ersetzt werden können, dass unterdessen kein Wasser in das Schiff eindringt. Zu dem Ende ist die Kieldurchbohrung mit einem Messingrohre dicht ausgefüttert, welches, über den inneren Schiffsboden etwas hinaufgeführt, mit einem Absperrhahn und oben mit einer Stopfbüchse versehen ist; das Doppelrohr RR' geht nun von oben wasserdicht durch diese Stopfbüchse in das feste Messingrohr hinein und durch die Bohrung des entsprechend gestellten Hahnkörpers quer hindurch, so dass es unten um die erwähnten 15 bis 20 Centimeter vor der Unterfläche des Kiels hervorragt. Wird es bis unter die Stopfbüchse, aber über den Hahnkörper hinaufgezogen, so kann dieser um 90^0 gedreht, somit das äussere Wasser abgesperrt und das untere Stück des Doppelrohrs durch ein neues ersetzt werden.

Bezeichnet α den Winkel, um welchen das Rohr R oder R' aus der Lage heraus gedreht wird, bei welcher die kleine Oeffnung o bezw. o' gerade voraus gerichtet ist, so besteht bei gegebener Geschwindigkeit w zwischen α und der positiven oder negativen Erhebungshöhe h des Wassers in der betreffenden Röhre gemäss den Beobachtungen von Berthon eine merkwürdige Beziehung, die schon in Bd. I, §. 153 besprochen wurde. Insbesondere ist $h = 0$ für $\alpha = 41\frac{1}{2}$ Grad, und wird deshalb diese Lage dem Rohre R' bezüglich seiner Oeffnung o' gegeben.

Die grosse Empfindlichkeit der in einer solchen Röhre gehobenen Wassersäule in Betreff der Lage der kleinen Seitenöffnung kann auch zur Messung der Abtrift eines Schiffes dienen, indem die Röhre drehbar eingerichtet wird. Die Abtrift ist dann = dem Winkel, um welchen die Röhre von derjenigen Stellung aus, bei welcher die Oeffnung kielwärts vorausgerichtet ist, gedreht werden muss, um das Maximum der Erhebungshöhe der Quecksilbersäule zu ergeben.

Das Berthon'sche Log hat sich in der Praxis den hier benutzten Angaben zufolge bewährt, und es wird von Seeoffizieren besonders die Sicherheit gerühmt, womit es beim Brassen der Raaen jederzeit die den Umständen entsprechende beste Segelstellung sofort erkennen lässt. Dieselbe ist abhängig von dem Neigungswinkel der Windrichtung gegen die Schiffsrichtung und vom Verhältnisse der Wind- zur Schiffsgeschwindigkeit. Sie wird meistens einfach geschätzt, und wenn auch der Seemann hierin grosse Uebung erlangen kann, besonders dann, wenn das Schiff nur unter Segeln fährt und somit die Schiffsgeschwindigkeit bei einer bestimmten Segelstellung nur von der Richtung und Stärke des Windes abhängt, so wird doch diese Schätzung wesentlich schwieriger und unsicherer, wenn das Schiff zugleich unter Dampf ist und somit die Schiffsgeschwindigkeit zugleich vom Effect der Schaufelräder oder der Schraube mit abhängt; denn jenachdem ein Dampfschiff nur unter Segeln oder zugleich mit Dampf fährt, ist trotz derselben Richtung und Stärke des Windes die günstigste Segelstellung verschieden.

Würde das Berthon'sche Log mit einer passenden Selbstregistrirung der Quecksilberniveaudifferenz in den Manometerröhren S, S' ausgestattet, so würde es dadurch zugleich ein sehr vollkommenes totalisirendes Instrument zur Bestimmung der mittleren Schiffsgeschwindigkeit und somit des Schiffsweges während einer beliebig langen Zeit.

IV. Waagen.

§. 165. Uebersicht.

Waagen sind Instrumente, die unmittelbar zur Vergleichung der Gewichte (Grössen der Schwerkräfte) von Körpern und dadurch mittelbar zur Vergleichung ihrer Massen dienen, welchen die betreffenden Gewichte an demselben Orte proportional sind. Indem man behufs dieser Vergleichung sogenannte Gewichtstücke benutzt, deren Massen bekannte Vielfache oder aliquote Theile der Masseneinheit sind, ergiebt ihre Vergleichung mit der Masse eines anderen Körpers K durch Wägung, nämlich durch Vergleichung der Gewichte vermittels der Waage, auch das Verhältniss der Masse m des Körpers K zur Masseneinheit, d. h. die Maasszahl dieser Masse m.