

Der Genauigkeitsgrad von Flügelmessungen bei Wasser- kraftanlagen

Von

Prof. Dr.-Ing. A. Staus

Mit 15 Textabbildungen
und 4 Zahlentafeln



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
1926

Der Genauigkeitsgrad von Flügelmessungen bei Wasser- kraftanlagen

Von

Prof. Dr.-Ing. A. Staus

Mit 15 Textabbildungen
und 4 Zahlentafeln



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1926

ISBN 978-3-662-24321-3 ISBN 978-3-662-26438-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-26438-6

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

Copyright 1926 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1926

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
1. Wahl der Meßstelle	3
In Rohrleitungen 3. — In offenen Gerinnen 3.	
2. Die Profilaufnahme	4
Genauigkeitsgrad der direkten Ausmessung 4. — der zeichnerischen Darstellung 5. — Genauigkeitsgrad der Planimetrierung 5.	
3. Der hydrometrische Flügel	6
Eichung in geraden Gerinnen 6, — mit Rundlaufvorrichtungen 6. — Einfluß der Gerinnebreite 6. — Beispiele von Eichkurven 7. — Eichung der Flügel an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten 8. — Eppersche Gipsformen 8. — Mittlerer Fehler von Flügeleichungen 8. — Einfluß von Schrägströmungen 10. — Messung in turbulenten Strö- mungen 12. — Einfluß der Wandungsnähe 13. — Einfluß der Pulsation 17. — Messung der Pulsation nach Harlacher 17, mit dem DBF-Flügel 17. — Meßdauer eines Punktes 17. — Messung abnorm großer und kleiner Geschwindigkeiten mit dem Flügel 18.	
4. Die Zeitmessung	18
Die Stoppuhr 19. — Persönliche Gleichung 19. — Genauigkeitsgrad der normalen Stoppuhr 19. — Die neue Stoppuhr von Ott 19. — Der Chronograph 20. — Sein Genauigkeitsgrad 21.	
5. Art und Durchführung der Geschwindigkeitsmessung	21
Die Punktmeßmethode, das Integrierverfahren nach Harlacher, die Querfahrtmessung nach Ott 21. — Profileinteilung mit Rücksicht auf die numerische und graphische Berechnung 21. — Dauer einer Gesamt- messung 22. — Abkürzung der Meßdauer durch Verwendung mehrerer Flügel 22. — Beobachtung des Pegelstandes 22.	
6. Die Berechnungsverfahren	23
a) Für Wassermessungen in offenen Gerinnen.	23
Numerisches Verfahren nach den Schweizer Normen 23, — nach Streiff 23. — Graphisches Verfahren 24. — Vergleichsmessungen 25.	
b) Für Wassermessungen in Rohrleitungen	26
7. Der Gesamtgenauigkeitsgrad	26
Zahlenbeispiele von Vergleichsmessungen zwischen Flügel und anderen Verfahren 26.	
Anhang und Literaturnachweis	31

Einleitung.

Auf dem europäischen Kontinent behauptet der hydrometrische Flügel zu Wassermessungen bei Wasserkraftanlagen die erste Stelle, so daß dagegen alle anderen Meßverfahren in den Hintergrund treten. Mit vollem Recht. Denn abgesehen von dem verhältnismäßig einfachen instrumentalen Aufwand ist bei der erforderlichen Sorgfalt und Erfahrung mit der Flügelmessung ein hoher Genauigkeitsgrad verbunden, was zwar den wirklich geübten Beobachtern auf diesem Gebiet längst bekannt ist, aber trotzdem noch hie und da unberechtigten Zweifeln begegnet¹⁾. Es erscheint daher nicht unzweckmäßig, den Ursachen im einzelnen nachzugehen, die von Einfluß auf den Genauigkeitsgrad sind, auch die Fehlerquellen aufzudecken, die zu einem Mißerfolg führen können, und schließlich den Genauigkeitsgrad zahlenmäßig zu belegen.

In Nordamerika bringt man bisher der Flügelmessung weniger Vertrauen entgegen. Man mißt dort in offenen Gerinnen vielfach mit dem Überfall, oft von erheblicher Breite, und hat für geschlossene Rohrleitungen andere Verfahren, so das von Gibson²⁾ und die Salz-Geschwindigkeitsmethode von Allen und Taylor³⁾ zu entwickeln versucht, die bei uns bis jetzt wenig Anwendung gefunden haben und voraussichtlich auch wenig finden werden, weil sie in der Ausführung durchaus nicht einfacher, in ihren Ergebnissen keineswegs genauer und im Zeitaufwand nicht günstiger als die Flügelmessungen sind. Das Streben nach einem neuen Meßverfahren findet m. E. seine Erklärung in dem in den Vereinigten Staaten und den davon abhängigen Ländern hauptsächlich verwendeten Geschwindigkeitsmesser, dem Price-Flügel⁴⁾. Dieses Instrument, dem Robinsonschen Schalenkreuz-Anemometer nachgebildet, verdiente es wirklich, daß es trotz seiner mehrtausendfachen Verbreitung bis auf einige Museumsstücke als Kuriosa einer im Prinzip verfehlten Konstruktion aus der Meßtechnik verschwände. Der grundsätzliche und hauptsächlichste Mangel des Price-Flügels beruht darin, daß er nur auf die Intensität der Strömung reagiert, die Stromrichtung aber unberücksichtigt läßt, genau wie das Schalenkreuz-Anemometer, das jedoch nur die absolute Windgeschwindigkeit, die Windstärke, messen soll. Dem Price-Flügel ist es ganz gleichgültig, ob das Wasser von hinten oder vorn, von rechts oder links oder in einer sonst beliebigen Richtung seiner Rotationsebene auf ihn zuströmt; er läuft immer mit der maximalen Geschwindigkeit in dem betreffenden

¹⁾ Die Hinweisziffern ¹⁾ ²⁾ usw. im Text beziehen sich auf den Anhang und Literaturnachweis S. 31.

Punkt, statt nur die senkrechte Komponente zum Meßquerschnitt zu messen. Für mich besteht kaum ein Zweifel, daß gerade die mit ihm bei Turbinenprüfungen erhaltenen, oft unwahrscheinlichen Resultate (siehe das Beispiel auf S. 29) das Vertrauen der amerikanischen Ingenieure in die Flügelmessung bei Wasserkraftanlagen so erschütterten, daß sie, wie erwähnt, begonnen haben, sich auf andere Meßverfahren zu besinnen. Zwar hat sich in den letzten Jahren auch manche Stimme in den Vereinigten Staaten zugunsten der Schraubenflügel erhoben, und ein Umschwung in dieser Richtung scheint sich anzubahnen, wenn mir auch außer einer leider nicht im Druck erschienenen Dissertation von Gunn⁵⁾ keine Arbeit zu Gesicht gekommen ist, die in nackten dürren Worten auf das grundsätzlich Unzulängliche des Price-Flügels hinweist. —

Alle unsere Beobachtungen sind stets mit unvermeidlichen Fehlern behaftet, deren Ursache in der Unvollkommenheit der verwendeten Instrumente, in einem unrichtig angewendeten Verfahren oder in der Mangelhaftigkeit der menschlichen Sinne liegt. Den absoluten Betrag dieser Fehler so klein zu erhalten, daß die endgültig gesuchte Größe der Wahrheit möglichst nahe kommt, dem wahrscheinlichsten Wert entspricht, ist Sache der richtigen Wahl der Instrumente und ihrer Handhabung, der Anwendung geeigneter Verfahren, der unbedingt erforderlichen Sorgfalt bei der Durchführung der Versuche und schließlich der Fehlerausgleichung. Die unvermeidlichen Fehler sind im allgemeinen der numerischen oder graphischen Ausgleichung zugänglich, sofern nur eine Anzahl überschüssiger Beobachtungen vorliegt. Gefährlicher sind die systematischen Fehler, wenn sie nicht erkannt werden, unbedenklich dagegen meist die groben Fehler, weil sie ohne weiteres in die Augen springen und bei der erforderlichen Sorgfalt auch leicht vermieden werden können⁶⁾.

Es schien mir mit Rücksicht auf das Folgende zweckmäßig, diese allgemeinen Bemerkungen vorzuschicken.

Wenn wir nun ein Urteil über den Genauigkeitsgrad von Wassermessungen mit dem hydrometrischen Flügel gewinnen wollen, so müssen wir alle die hierzu notwendigen Instrumente und Verfahren, die wir als bekannt voraussetzen dürfen, unter die kritische Lupe nehmen.

Der Genauigkeitsgrad einer Wassermessung mit dem hydrometrischen Flügel ist abhängig von

1. der Wahl der Meßstelle,
2. der Profilaufnahme,
3. dem hydrometrischen Flügel,
4. der Zeitmessung,
5. der Art und Durchführung der Geschwindigkeitsmessung,
6. dem Berechnungsverfahren.

1. Wahl der Meßstelle.

Die besten Instrumente und die geeignetsten Verfahren nützen nichts, wenn die Meßstelle unzweckmäßig ausgewählt wird, oder wenn etwa an der einzig möglichen Meßstelle Strömungsverhältnisse herrschen, die von vornherein ein unsicheres Ergebnis erwarten lassen. Bis vor nicht langer Zeit hat man beim Entwurf von Wasserkraftanlagen auf die später doch meist notwendig werdende Wassermessung wenig oder gar keine Rücksicht genommen. Doch hat sich hier in letzter Zeit, und zwar direkt aus Betriebserfordernissen heraus, ein Wandel vollzogen. Man will nicht nur gelegentlich das Wasser messen können, man ist vielmehr bei großen und größten Anlagen, wie bekannt, zur ständigen Betriebskontrolle des Wasserverbrauchs übergegangen, nicht zuletzt auch aus dem Grund, um jederzeit über den augenblicklichen Wirkungsgrad der Turbinen im Bild zu sein und eine allenfalls notwendig werdende Auswechslung der Laufräder zeitgerecht vornehmen zu können. Neben dem Venturimeter für geschlossene Rohrleitungen wird auch mit bestem Erfolg der hydrometrische Flügel in besonderer konstruktiver Ausbildung als Dauermesser, selbst, was weniger bekannt sein dürfte, in offenen Gerinnen verwendet.

In Rohrleitungen ist grundsätzlich jede längere gerade Strecke für die Meßstelle geeignet. Orte unmittelbar nach Krümmern wird man vermeiden. In einer geraden Strecke pflegt sich nach Versuchen von Fellenius⁷⁾ die Wasserströmung nach einem Krümmer in einer Entfernung gleich dem 40fachen Rohrdurchmesser parallel zu richten und so auszugleichen, daß sich Punkte gleicher Geschwindigkeit annähernd konzentrisch zur Rohrachse verteilen, daß also bereits die Messung auf einem Rohrdurchmesser ein brauchbares Ergebnis zeitigt. Will man sicherer gehen, mißt man in zwei zueinander senkrechten Durchmessern. Die deutschen Normen für Leistungsversuche an Wasserkraftanlagen empfehlen die Messung im letzten Teil einer geraden Rohrstrecke von einer Länge ungefähr gleich dem 20fachen Durchmesser, und in möglichst großem Abstand von scharfen Krümmungen vorzunehmen⁸⁾. Bei Hochdruckanlagen wird man im allgemeinen aus praktischen Gründen wegen der Abdichtung der die Rohrwandung durchsetzenden Stange die Meßstelle in einer Zone geringeren Druckes aufsuchen⁹⁾.

Durchschnittlich wesentlich ungünstiger liegen die Verhältnisse bei offenen Gerinnen. Sind mehrere Turbinen vorhanden, so hat wohl eine jede ihr eigenes, wenn auch kurzes Zu- und Ablaufgerinne. Letzteres

wird in der Regel als Meßstelle kaum benutzt werden können, weil in ihm das Wasser so turbulent zu sein pflegt, daß von einer einigermaßen unter sich parallelen Strömung wenig zu merken ist. Im Zulaufgerinne können sich unter ungünstigen Umständen große stationäre Wirbel ausbilden, die eine zuverlässige Messung unmöglich machen. Nur wenn an keiner Stelle des Meßprofils die Strömung um mehr als 15° bis 20° von der Senkrechten zum Meßprofil abweicht, läßt sich noch mit dazu geeigneten Instrumenten die Wassermenge mit hinreichender Zuverlässigkeit bestimmen. Trifft diese Bedingung nicht zu, so kann manchmal mit bestem Erfolg durch geeignete Holzeinbauten die Meßstelle so umgeformt werden, daß die Wasserströmung in ihr für die Messung mit dem hydrometrischen Flügel genügend regelmäßig verläuft¹⁰⁾.

Der Einfluß der Meßstelle auf den Genauigkeitsgrad läßt sich zahlenmäßig nicht angeben.

2. Die Profilaufnahme.

Bedeutet F den vom Wasser durchströmten Querschnitt in qm, v_m die mittlere Geschwindigkeit in m/sek, dann ist die Wassermenge Q selbst

$$Q = F \cdot v_m \text{ (cbm/sek).}$$

Das Profil F hat daher auf die Wassermenge Q genau denselben Einfluß wie die Geschwindigkeit v_m , und es ist mit derselben Sorgfalt wie diese aufzunehmen. Eiserne Rohrleitungen lassen sich unschwer auf ± 1 mm genau ausmessen, das bedeutet bei 1 m Rohrdurchmesser eine Unsicherheit von $\pm 0,1\%$ für diesen, bei größerem Durchmesser entsprechend weniger, für den Rohrquerschnitt oder das Durchflußprofil rund $\pm 0,2\%$.

Auch betonierte Kanäle lassen sich mit ähnlicher Zuverlässigkeit ausmessen, wenn sie nicht gefüllt sind. In gefülltem Zustand macht die genaue Messung der senkrechten oder schrägen Wandungen einige Schwierigkeiten, während die Bodenbegrenzung z. B. mit Hilfe der Epperschen Nivellierlatte und einem Nivellierinstrument auch dann auf ± 1 mm aufgenommen werden kann.

Die das Profil oben begrenzende Wasserspiegellinie ist bei nicht genau konstanter Abflußmenge Änderungen in ihrer Höhenlage unterworfen, die bei Wassermessungen in Abhängigkeit von der Zeit beobachtet werden müssen. Bei ruhigem Wasserspiegel läßt sich selbst nach dem einfachen Verfahren des Abstechens von einem festen Punkt der Wasserstand auf ± 1 mm genau angeben. Schwimmer oder Registrierpegel in geeigneter Form und Anordnung (geschützte Lage des Schwimmkörpers) ermöglichen auch bei unruhiger Wasseroberfläche mindestens dieselbe Genauigkeit zu erreichen.

Welchen Genauigkeitsgrad besitzt nun die Berechnung einer Profilfläche F ?

Nimmt man beispielsweise an, die Kanalbreite sei zu $b = 3000$ mm mit einem mittleren Fehler von $m_b = \pm 3$ mm, die Wassertiefe h zu 2000 mm mit einem mittleren Fehler von $m_h = \pm 4$ mm gemessen, so ist zunächst der mittlere prozentuale Fehler μ für die Breite b :

$$\mu_b = \frac{m_b}{b} 100 = \pm \frac{3}{3000} \cdot 100 = \pm 0,1\%$$

und für die Tiefe h :

$$\mu_h = \frac{m_h}{h} 100 = \pm \frac{4}{2000} \cdot 100 = \pm 0,2\%.$$

Nach dem Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz ist der prozentuale mittlere Fehler, nach Happach⁶⁾ auch die mittlere Zuverlässigkeit genannt, in der rechnerischen Bestimmung des Durchflußprofils gleich

$$\mu_F = \pm \sqrt{\mu_b^2 + \mu_h^2} = \pm \sqrt{0,1^2 + 0,2^2} = \pm 0,224\%.$$

Muß das Profil auf Grund einer zeichnerischen Darstellung ermittelt werden, so geschieht dies bei nicht ganz regelmäßigen Profilen am raschesten und genauesten mit dem Planimeter. Hier spielen Zeichenfehler, Instrumentalfehler und Fehler beim Umfahren der Fläche eine Rolle. Genau dieselben Fehlerquellen treten auch später bei der Auswertung der Geschwindigkeitsflächen auf.

Als Grenze der Genauigkeit beim Auftragen kann 0,1 mm angenommen werden, ein bei einiger Sorgfalt zu erreichender Wert. Würde man das oben angenommene Profil in beiden Dimensionen im Maßstab 1:10 auftragen und würde dabei die Unsicherheit sogar 0,2 mm betragen, so würde der prozentuale Fehler für die Breite $\pm \frac{0,2}{300} 100 = \pm 0,066\%$ und für die Tiefe $\pm \frac{0,2}{200} 100 = \pm 0,10\%$ und nach obigen Ausführungen für die Profilfläche $\pm \sqrt{0,066^2 + 0,10^2} = \pm 0,12\%$ groß sein.

Die Instrumentalfehler sind bei gut justierten Polarplanimetern so gering, daß sie gegenüber den Fehlern, die beim Umfahren der Fläche gemacht werden, völlig verschwinden. Aber auch diese sind bei der erforderlichen Sorgfalt nicht groß. Montigel¹¹⁾ hat auf Grund von 64000 Planimetrierungen gefunden, daß der mittlere prozentuale Fehler in runden Zahlen bei einer Flächengröße von

10	25	100 qcm
$\pm 1,0$	0,5	0,2 %

beträgt.

In der Regel wird das aufgezeichnete Profil noch über 100 qcm groß sein, so daß der prozentuale Fehler durch das Planimetrieren noch geringer ausfällt.

3. Der hydrometrische Flügel.

Es gibt Instrumente, zu welchen man ein steigendes Zutrauen gewinnt, je mehr man sich mit ihnen befaßt. Zu diesen gehört für mich u. a. der hydrometrische Flügel. Seine Eigenschaften lernt man allerdings erst dann recht kennen, wenn man nicht nur mit ihm mißt, sondern wenn man ihn auch selbst eicht. Auf diesem Gebiet stehen mir zwar nur Erfahrungen mit Ott-Flügeln zur Verfügung, ich habe aber keinen Grund zur Annahme, daß sich Flügel anderer Herkunft und guter Konstruktion wesentlich anders verhalten sollen.

Die Schaufeln moderner Flügel sind in der überwiegenden Mehrzahl nach Schraubenflächen gekrümmt. Andere Flächen haben Schraubenflächen gegenüber m. E. keine Vorzüge. Die Flügelachse muß leicht beweglich und die Schaufel mit ihr so ausbalanciert sein, daß sie in jeder Winkelstellung im Gleichgewicht ist und durch leichtes Anblasen in Drehung versetzt werden kann.

Der Zusammenhang zwischen Drehzahl n /sek des Flügels und der Wassergeschwindigkeit v in m/sek wird, wie bekannt, durch Schleppversuche in stillstehendem Wasser festgestellt. Die meisten Schleppversuchsanstalten haben gerade Gerinne von mindestens 1 m Breite und ähnlicher Wassertiefe. Bei wesentlich breiteren und tieferen Gerinnen tritt der Mißstand ein, daß das Wasser lange Zeit braucht, bis es sich für eine neue Schleppfahrt beruhigt hat. Im großen Berliner Schleppgerinne beispielsweise ist die Wassergeschwindigkeit auch nach sehr langen Ruhepausen zwischen zwei Fahrten nicht kleiner als $\pm 0,002$ m/sek, meist aber erheblich größer.

Aus dem gleichen Grunde halte ich die hie und da getroffene Anordnung, den Flügel an seiner Stange in einem größeren Wasserbecken um eine feste Achse im Kreise zu bewegen, für unzuweckmäßig¹²⁾. Denn in einem solchen, womöglich noch kreisrunden Behälter bilden sich bald Strömungen aus, deren Einfluß auf die Eichkurve des Flügels vollkommen unkontrollierbar ist. Die mit solchen Einrichtungen erhaltenen, mir bekannt gewordenen Eichkurven bestätigen diese Ansicht und sind wenig befriedigend.

Nach Versuchen in Wien¹³⁾ macht sich eine Verminderung der Gerinnebreite in der Eichkurve erst bemerkbar, wenn das Gerinne schmaler als 0,7 m ist. Die hiervon abweichenden Ergebnisse im Wasserbaulaboratorium Stockholm¹⁴⁾ bedürfen m. E., schon wegen ihrer hohen Beträge, noch der Aufklärung oder Nachprüfung.

Werden die Eichfahrten auch nur einigermaßen sorgfältig ausgeführt, die dabei erhaltenen Chronographenstreifen aber peinlich genau ausgewertet, so liegen die Versuchspunkte meist so verblüffend regelmäßig, daß es für praktische Zwecke nur einer einfachen graphischen Aus-

gleichung bedarf, um die Eichkurve so genau zu erhalten, als es die Sache erfordert. Ich verweise hierfür auf einige von mir veröffentlichte Eichkurven, von welchen zwei in Abb. 1 und 2 wiedergegeben sind ¹⁵⁾.

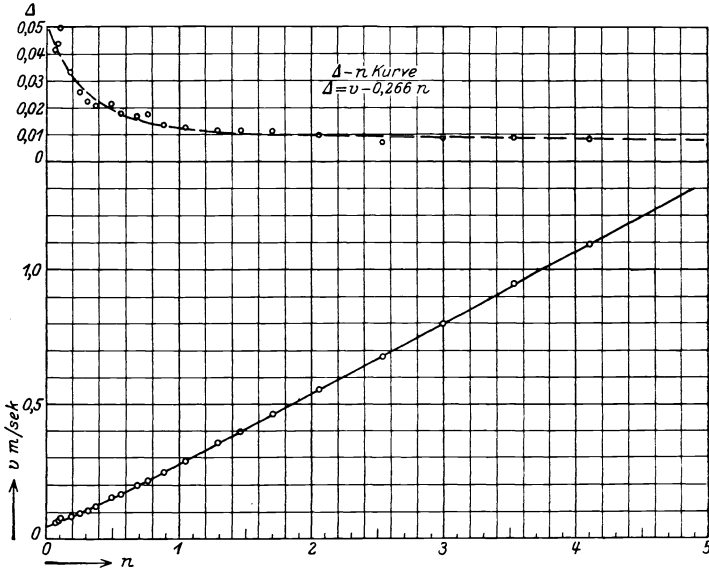


Abb. 1. Eichkurve des Ott-Flügels Nr. 3233, Typ IX c, Schaufeldurchmesser 90 mm.

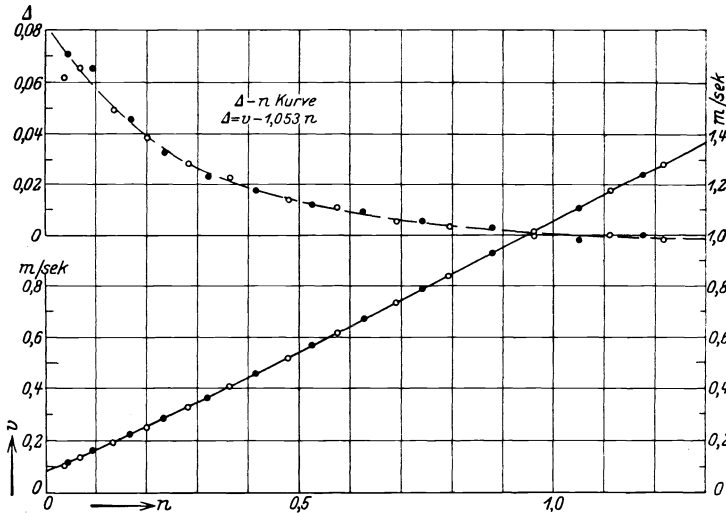


Abb. 2. Eichkurve des Ott-Flügels Nr. 3668, Schaufeldurchmesser 300 mm.

Die Aufstellung der exakten und angenäherten Flügelgleichungen nach dem überaus einfachen und eleganten Verfahren von Ott ¹⁶⁾ bietet bei sorgfältiger Eichung keinerlei Schwierigkeiten.

Der Einwand, daß systematische Fehler unterlaufen können, wird dadurch widerlegt, daß die Flügel auch nach jahrelangem Gebrauch bei Neueichungen immer wieder dieselben Eichkurven geben¹⁷⁾, daß auch Eichungen ein und desselben Flügels an verschiedenen Orten zu genau demselben Ergebnis führen¹⁸⁾. Aus meiner eigenen Erfahrung möchte ich unter andern den Ott-Flügel Nr. 3233, Typ IXc, nennen, den ich alle halben Jahre durch Schüler eichen lasse, wobei sich für die Eichkurve stets genau dieselbe Lage ergibt. Selbstverständlich ist für die Konstanz der Flügelgleichung Bedingung, daß die Schaufel zweckmäßig konstruiert und eine genügende mechanische Festigkeit besitzt. In dieser Hinsicht sind Schaufeln aus Aluminiumblech oder mit weit nach hinten auskragenden und freiliegenden Endflächen nicht unbedenklich und leichter unerwünschten Formänderungen ausgesetzt. Sie sollten beim Flügelbau vermieden werden.

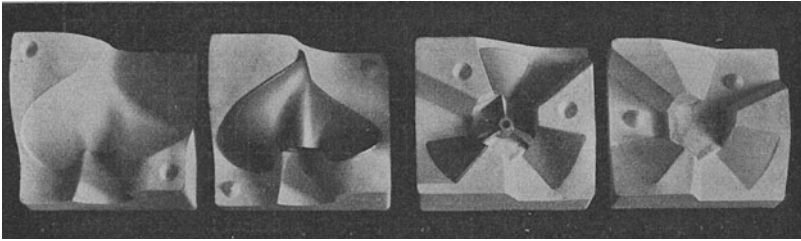


Abb. 3. Kontroll-Gipsformen für Flügelschaufeln; linke Schaufel nach Abb. 10, rechte nach Abb. 8.

Eine sorgfältige Behandlung der Instrumente, auch in der Praxis, ist eine *conditio sine qua non*, eine selbstverständliche Forderung. Wer sie nicht erfüllen kann, soll sich besser mit dem hydrometrischen Flügel gar nicht befassen. Denn der Flügel erhält seine Konstante nur dann, wenn die Flügelschaufel ihre Form unabänderlich so bewahrt, wie sie bei der Eichung war. Läßt sich, wie Epper vorgeschlagen hat¹⁹⁾, von der Flügelschaufel eine zweiteilige Gipsform anfertigen, Abb. 3, so kann man damit die Erhaltung der Schaufelform kontrollieren: Solange sich die Schaufel zwanglos in die Gipsform einlegen läßt, hat sie ihre Gestalt bewahrt. Dieses einfache und zweckmäßige Kontrollverfahren kommt neuerdings mehr und mehr in Aufnahme und ist sehr zu empfehlen. —

Der mittlere Fehler guter Flügeleichungen bewegt sich zwischen $\pm 0,001$ bis $\pm 0,004$ m/sek; er ist jedoch kein Maß für den Absolutfehler des Flügels, sondern nur ein Maß für die Genauigkeit der Durchführung des Schleppversuchs. Die Streuung der Versuchspunkte kann in der zeichnerischen Darstellung oft nur dadurch sichtbar gemacht werden, daß man die Abweichung der Versuchspunkte von der an die ausgleichende Eichkurve (eine Hyperbel) gelegten Asymptoten be-

rechnet und in etwa 10fachem Maßstab zweckmäßig aufträgt²⁰⁾. Diese Streuung ist zweifellos weniger dem Instrument zu Lasten zu schreiben, als vielmehr den bei der Eichung vorhandenen unvermeidlichen Beobachtungsfehlern, auch dem bereits erwähnten Umstand, daß das Wasser im Schleppgerinne fast nie ganz zur Ruhe kommt und die Geschwindigkeit Null hat.

Nimmt man daher für den Flügel einen mittleren prozentualen Fehler einer Einzelmessung von $\pm 0,5\%$ an, so ist das für die Beur-

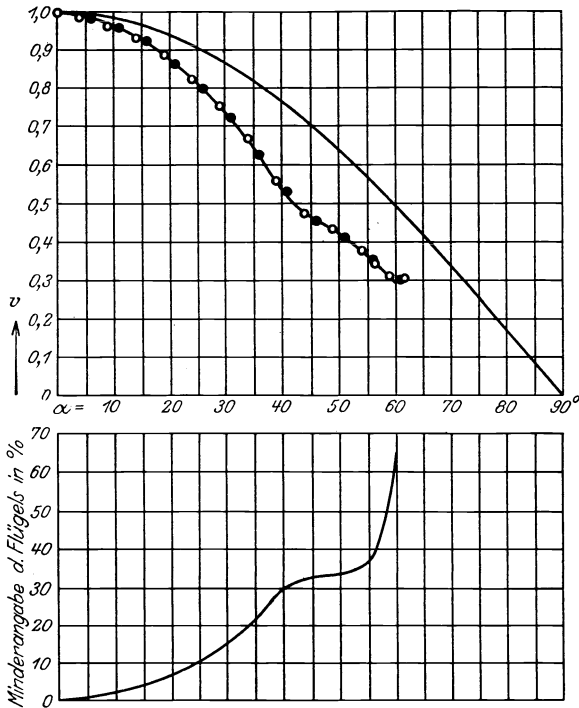


Abb. 4. Einfluß von Schrägströmungen auf den Ott-Flügel Nr. 2492, Typ IVb, mit zweiteiliger schräkantiger Schaufel von 25 cm Steigung, wie bei Abb. 7.

teilung des Genauigkeitsgrades weit mehr als ausreichend. Strickler²¹⁾ gibt für mehrere Flügel verschiedener Herkunft die durchschnittlichen prozentualen Abweichungen der Eichpunkte von den aus den ausgleichenden Geraden berechneten Punkten folgende Mittelwerte an:

Geschwindigkeitszone	0,25—0,50	0,50—1,00	1,00—2,00	2,00—4,00	m/sek
Mittl. proz. Abweichung	0,47	0,25	0,16	0,05	%

Flügel mit ersichtlich geringerer relativer Meßgenauigkeit sind für Messungen bei Turbinenanlagen unbrauchbar und verdienen kein Vertrauen.

Eine größere Fehlerquelle kann von Schrägströmungen im Meßprofil herrühren. Bekanntlich soll die Flügelachse stets senkrecht zum Meßprofil gehalten werden. Bildet die ankommende Strömung einen α mit der Flügelachse, so soll der Flügel nur die Geschwindigkeitskomponente $v \cdot \cos \alpha$ angeben. Es ist bis heute noch nicht gelungen, eine sogen. Komponentenschaufel zu bauen, die das Gesetz $v \cdot \cos \alpha$ für alle Winkel von 0° bis 90° streng befolgt.

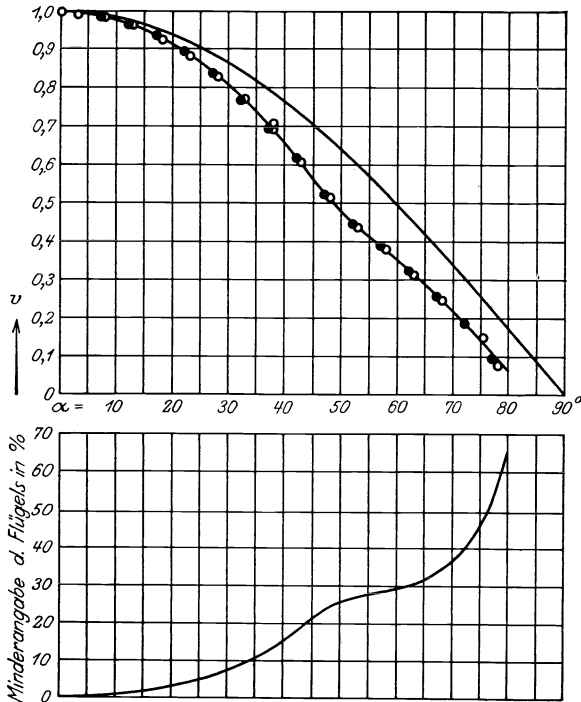


Abb. 5. Einfluß von Schrägströmungen auf den Ott-Flügel Nr. 2492, Typ IVb, mit dreiteiliger Speichenschaufel von 25 cm Steigung, wie bei Abb. 8.

Zur Veranschaulichung dieser Verhältnisse sind in Abb. 4 bis 6 drei diesbezügliche Versuchsreihen mit drei Schaufeltypen nach bisher unveröffentlichten, mir zur Verfügung gestellten Versuchen von L. A. Ott aus dem Jahre 1914 graphisch wiedergegeben. Die untersuchten Schaufeln in Verbindung mit Instrumenten zeigen Abb. 7 bis 9. In den graphischen Darstellungen sind als Abszissen die Winkelstellungen der Flügelachse mit der Strömungsrichtung aufgetragen, als Ordinaten in der oberen Hälfte der Abbildungen die bei den verschiedenen großen Winkelstellungen gemessenen Geschwindigkeiten, wobei die Geschwindigkeit bei Parallelströmung als Einheit gesetzt wurde. Die mittlere

Wassergeschwindigkeit bei den Versuchen betrug rd. 1,0 bis 1,1 m/sek. — Die ausgefüllten Versuchspunkte entsprechen einer Schwenkung der Flügelachse nach links, die nicht ausgefüllten einer solchen nach rechts. Würden die Schaufeln dem Kosinusetz streng folgen, so müßten die

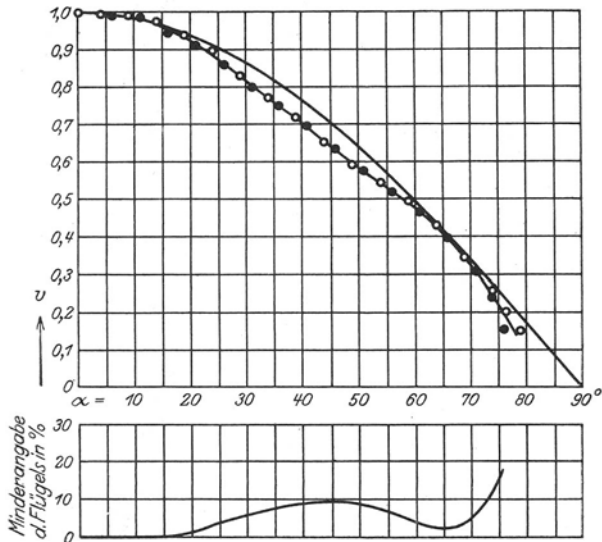


Abb. 6. Einfluß von Schrägströmungen auf den Ott-Flügel Nr. 2543, Typ IX c mit Schutzring, mit dreiteiliger Schaufel von 25 cm Steigung, wie bei Abb. 9.

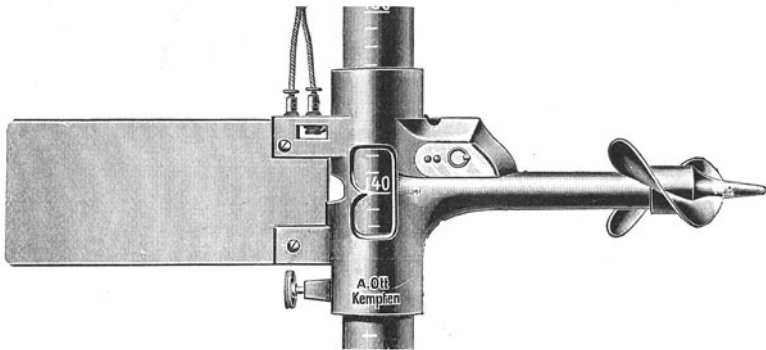


Abb. 7. Ott-Flügel, Typ IVa, mit zweiteiliger, schrägkantiger Schaufel.

Versuchspunkte auf der oberen $v \cdot \cos \alpha$ -Kurve, der Kosinuslinie, liegen. Alle drei untersuchten Schaufeln zeigen jedoch Abweichungen in dem Sinne, daß sie bei Schrägströmungen eine kleinere Geschwindigkeit angeben. In der unteren Hälfte der Abb. 4 bis 6 sind als Ordinaten die prozentualen Minderangaben bei den entsprechenden Winkelstellungen aufgetragen.

Am größten ist die Abweichung bei der schrägkantigen Schaufel, Abb. 7 und Abb. 3, linker Teil, wesentlich besser ist die Speichen-

schaufel, Abb. 8 und Abb. 3, rechter Teil, weitaus am günstigsten zeigt sich die Schaufel im Schutzring, Abb. 9, die noch bis zu 15° Schrägströmung das Kosinusgesetz streng befolgt und auch darüber hinaus sich der Kosinuslinie am besten anschmiegt.

Es ist hiernach auch klar, warum ein Flügel in Profilen mit Schrägströmungen von größerem Betrag oder gar mit rückläufigen Stellen niemals genau messen kann. —

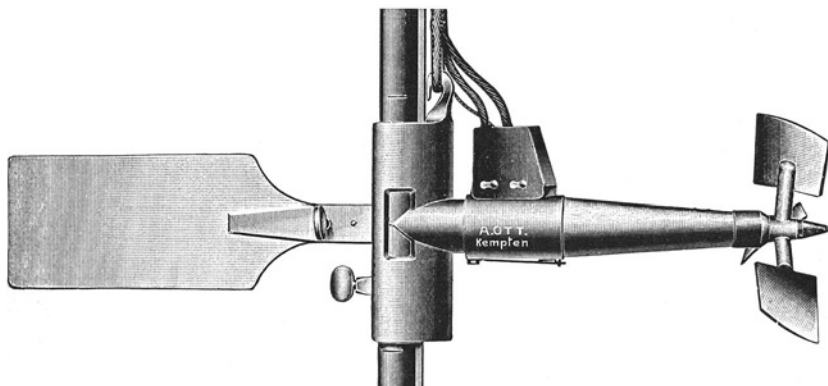


Abb. 8. Ott-Flügel, Typ VIb (Magnetflügel), mit dreiteiliger Speichenschaufel.

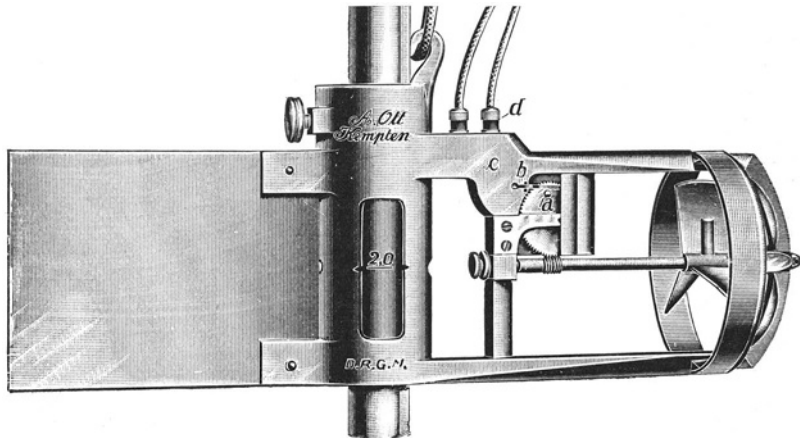


Abb. 9. Ott-Flügel Typ IXc, mit Schutzring.

Für turbulente Strömungen, in welchen sich die Strömungsrichtung fortwährend um einen gewissen kleinen Betrag ändert, soll man nach den Schweizer Normen²²⁾ bzw. nach Strickler²³⁾ dadurch besonders gute Resultate erhalten, daß man an dem Messungsergebnis des Flügels eine Korrektur anbringt, die sich aus dem Verhalten des Flügels in den vier unter je 5° gegenüber der Normalstellung geneigten Hauptstellungen — horizontal und vertikal — des Flügels ergibt. Zum Auffinden des Korrekturfaktors müßte man also außer der normalen

Eichung des Flügels noch vier weitere Eichungen in den vier Hauptstellungen unter einem Winkel von je 5° zwischen Flügelachse und Kanalachse durchführen. — Dieses Verfahren dürfte bei Flügeln, die schon bei 5° eine erkennbare Abweichung vom Kosinusetz aufweisen, wie es bei manchen Konstruktionen der Fall ist, tatsächlich sehr empfehlenswert sein.

Eine weitere Frage, die besonders bei Messungen in Rohrleitungen von Wichtigkeit ist, ist die, wie sich der Flügel in unmittelbarer Wandungsnähe verhält.

Die Geschwindigkeit nimmt gegen die Wandung zu sehr rasch ab, ist in der Wandung selbst gleich Null. Da der Flügel nicht imstande ist, die Geschwindigkeit in einem Punkt zu messen, sondern entsprechend seinem Schaufelddurchmesser eine bestimmte Querschnittsfläche bestreicht, so kann diese Frage exakt nur durch Versuche in einer Rohrleitung mit strömendem Wasser gelöst werden, wobei die Ergebnisse der Flügelangaben etwa mit den Angaben von Stau-(Pitot-)Rohren zu vergleichen wären. Erschwerend ist allerdings dabei der Umstand, daß Staurohre in der Nähe von Wandungen eine geringe Meßgenauigkeit haben bzw. großen Störungen in der Anzeige unterliegen. Besser wären daher Messungen mit dem Hitzdraht-Anemometer, mit dem man bis zu einem Abstand von 0,03 mm an die Wand herankommen kann²⁴).

Diesbezügliche Versuche im Schleppgerinne, wie sie nachstehend kurz mitgeteilt sind, können nur annähernd einen Überblick über das Verhalten des Flügels geben; denn in diesem Fall treffen auf jeden Punkt der ganzen Schauffläche relativ überall genau gleich große Geschwindigkeiten, was in Rohren oder Kanälen nicht zutrifft.

Die erwähnten Versuche habe ich mit drei Ott-Flügeln, die mit drei verschiedenartigen Schauffeln ausgerüstet waren, während des Mai und Juni 1926 im Eßlinger Schleppgerinne durchgeführt. Die drei Instrumente waren:

- a) Flügel Nr. 3233, Typ IXc, mit Schutzring und Schaufel von rd. 25 cm Steigung, Abb. 9.
- b) Flügel Nr. 3363, Typ V, mit frei liegender schrägkantiger Schaufel von rd. 25 cm Steigung, Abb. 10.
- c) Flügel Nr. 1416, Typ VI, sogen. Magnetflügel, mit dreiteiliger Speichenschaufel von rd. 50 cm Steigung, Abb. 8.

Mit jedem Flügel wurden in jedem Punkt sieben Fahrten bei Geschwindigkeiten von rd. 0,12 bis 1,1 m/sek durchgeführt. Die Lage der Punkte im Gerinnequerschnitt sind auf den Abb. 11 bis 13 angegeben. Es wurde hiernach in drei Vertikalen *M*, *R*, *L* gefahren. *M* entspricht der mittleren Vertikalen, *R* einer Vertikalen in 8 bzw. 10 cm Abstand von der rechten Wand, *L* in denselben Abständen von der linken Wand.

Ferner wurden drei Höhenlagen für die Flügel gewählt, 1 befand sich in einem Abstand von 8 bzw. 10 cm vom Boden, 2 in der mittleren Tiefe, 3 10 cm unter der jeweiligen Wasseroberfläche. Der Punkt *M* 2 ent-

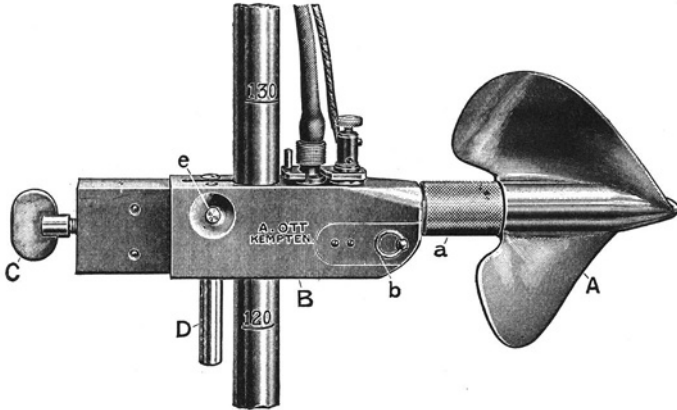


Abb. 10. Ott-Flügel, Typ V, mit zweiteiliger, schräkantiger Schaufel.

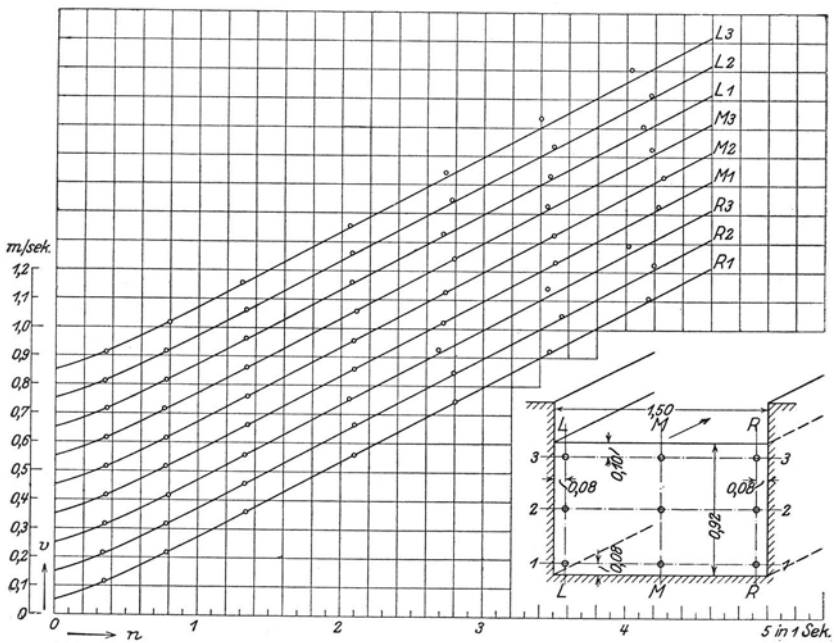


Abb. 11. Einfluß der Wandungsnähe beim Ott-Flügel Nr. 3233, Typ IXc mit Schutzring.

spricht der Lage des Flügels bei seiner normalen Eichung, der Punkt *M* 1 jener bei Messung in einer Rohrleitung längs eines Durchmessers, in der Nähe der Wand.

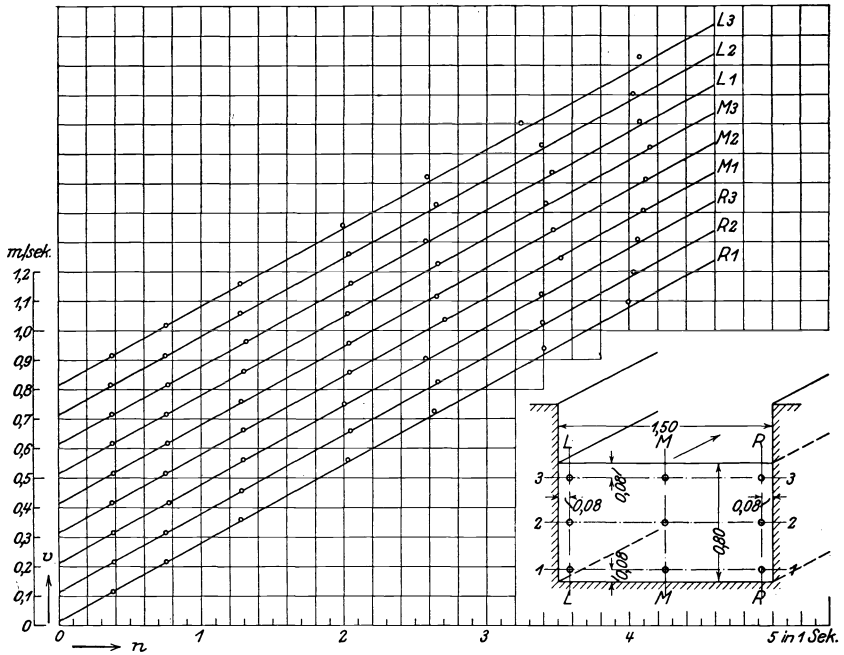


Abb. 12. Einfluß der Wandungsnähe beim Ott-Flügel Nr. 3363, Typ V, mit zweiteiliger, schrägkantiger Schaufel.

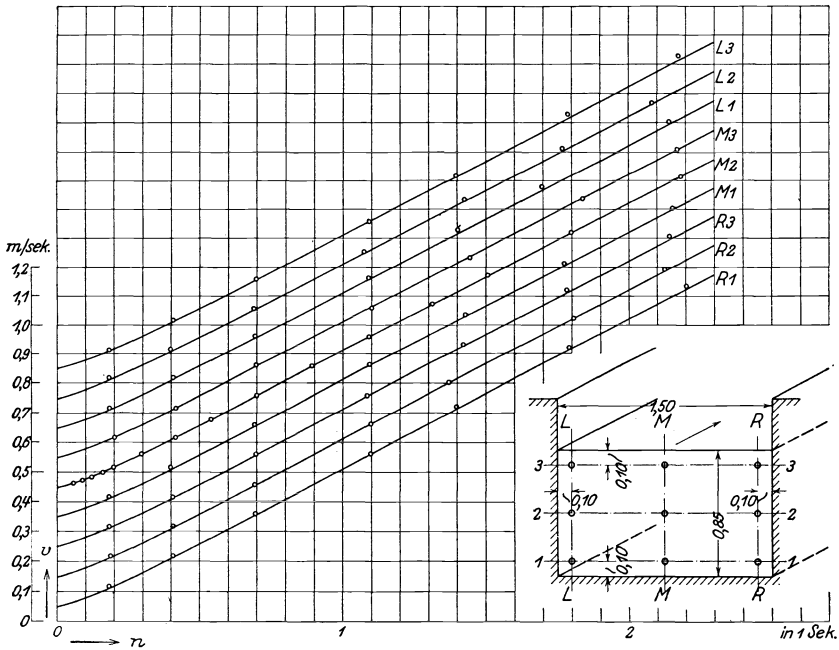


Abb. 13. Einfluß der Wandungsnähe beim Ott-Flügel Nr. 1416, Typ VI, mit dreiteiliger Speichenschaukel.

In den Abb. 11 bis 13 sind die Ergebnisse sämtlicher Eichfahrten für die drei Flügel graphisch zusammengestellt. Um die Unterschiede der Flügelangaben gegenüber der normalen Eichung (in Punkt *M* 2 des Profils) deutlich zu machen, sind jeweils die normalen Eichkurven eingezeichnet, wobei die Ordinaten-Nullpunkte der verschiedenen Eichkurven bzw. ihre Abszissenachsen immer um eine Einheit der angegebenen Ordinatenteilung in Höhe verschoben sind, während die Abszissentheilung für alle Kurven eines Flügels dieselbe bleibt.

Aus den Versuchen lassen sich, kurz zusammengefaßt, folgende Schlüsse ziehen:

Alle Flügel liefen dicht an der Wandung, dem Boden oder unter der Oberfläche bei denselben Geschwindigkeiten langsamer als in der Profilmittle, d. h. sie zeigen bei derselben Drehzahl/sek eine zu kleine Geschwindigkeit an.

Dicht unter der Oberfläche sind die Unterschiede größer als in Bodennähe. Sie betragen z. B. bei Flügel Nr. 3323 mit dem Schutzring im Mittel 3,0% in Wandungsnähe und gleichzeitig dicht unter der Oberfläche, gegenüber 1,1% dicht über dem Boden in Lage *M* 1. Etwas kleinere Unterschiede gibt die schrägkantige Schaufel von Flügel Nr. 3363, noch kleinere, rd. 1,1 bzw. 0,8% die dreiteilige Speichenschaufel von Flügel Nr. 1416, der überhaupt von der Wandungs- oder Bodennähe am wenigsten beeinflußt wird⁵³).

Soviel die Versuche erkennen lassen, ist dieser prozentuale Unterschied unabhängig von der Schleppgeschwindigkeit, denn die sieben Eichpunkte einer Eichkurve liegen, abgesehen von den unvermeidlichen Beobachtungsfehlern, durchaus gesetzmäßig, ähnlich wie bei der normalen Eichkurve des Punktes *M* 2.

Wenn das Ergebnis dieser Versuche auf wirkliche Wassermessungen anwendbar wäre, würde das bedeuten, daß die Flügel in unmittelbarer Wandungsnähe etwas zu wenig Wasser anzeigen. Frühere Autoren, insbesondere Rateau²⁵), stellten die Behauptung auf, daß der Flügel in Zonen mit örtlich stark veränderlicher Geschwindigkeit, wie sie in der Nähe einer Wand immer herrscht, mehr als die mittlere Geschwindigkeit anzeigt, nachdem der Wasserdruck auf die Flügelschaufel nicht proportional dem Quadrat der mittleren Geschwindigkeit, sondern dem Mittel aus den Quadraten der Geschwindigkeiten sei. Dabei haben sie allerdings übersehen, daß eine zu schnell laufende Schaufel als Pumpe wirken müßte, was nicht wohl angenommen werden kann. Wie dem auch sei, so scheinen sich nach allen Beobachtungen die verzögernden und beschleunigenden Einflüsse in ausreichendem Maße zu kompensieren, so daß auch in Wandungsnähe die in normaler Weise bestimmte Flügelgleichung anwendbar bleibt. Vielleicht geben darüber neue, in der Schleppversuchsanstalt der Firma Ott eingeleitete Versuche weiteren

Aufschluß, bei denen gleichzeitig mit dem Flügel eine nach unten hängende Rohrschale von 1,3 m Durchmesser und 2,6 m Länge aus Eisenblech von 1 mm Stärke mitgeschleppt wird. —

Eine weitere vermeintliche Fehlerursache liegt in der Pulsation des Wassers. In einem offenen Gerinne — in geschlossenen Rohrleitungen dürfte diese Erscheinung weniger zu merken sein — ändert das Wasser seine Geschwindigkeit in ein und demselben Punkt mit der Zeit, besonders gegen die Sohle oder die Wandung hin: es strömt bald langsamer, bald schneller, was sich auch unmittelbar am Flügel, sofern er im Wasser sichtbar, leicht beobachten läßt. Der Flügel hat die Aufgabe und löst sie auch wirklich mit bewundernswerter Genauigkeit, diese veränderliche Geschwindigkeit nach der Zeit zu integrieren. Je länger ein Flügel an Ort und Stelle mißt, um so mehr wird sich der Wert für die mittlere Geschwindigkeit dem wahrscheinlichsten Mittelwert nähern. An Punkten starker Pulsation muß man die Meßdauer u. U. auf einige Minuten ausdehnen.

Über das Vorhandensein und die Größe der Pulsation kann man ziemlich genau, wenn auch auf etwas umständlichem Wege, Aufschluß erhalten, wenn man jede einzelne Flügelumdrehung mit dem Chronographen registriert, wie es bereits Harlacher²⁶⁾ getan hat, oder annähernd, wenn man die Zeiten der Zwischensignale beobachtet. Bei den Messungen mit Klingensignalen empfiehlt es sich immer, die Zeiten für einige Zwischensignale zu beobachten, damit man einen Überblick über die Größe der Pulsation bekommt und die Möglichkeit hat, auf Störungen in der Signaleinrichtung aufmerksam zu werden. Streuen die Versuchspunkte mehr als 10⁰/₀ des Mittelwertes, so ist nach ⁸⁾, S. 7, Nr. 42, das gewählte Meßprofil für eine genaue Wassermengenbestimmung ungeeignet.

Ein geradezu idealer Pulsationsschreiber, der mühelos und exakt Größe und Dauer der Pulsationen aufzeichnet, dürfte der neue von R. Dubs, S. Bitterli und R. Fischer konstruierte „DBF“-Flügel werden, sobald die Registriereinrichtung dazu fertig sein wird²⁷⁾. Mit diesem Instrument werden sich sehr wertvolle Aufschlüsse über die Art der Strömung und die Verteilung der Pulsation im Meßquerschnitt ohne großen Zeitaufwand ergeben. — Auch Schoklitsch hat sich schon erfolgreich mit der Aufnahme von Pulsationskurven befaßt²⁷⁾.

Die erforderliche Meßdauer ist bereits kurz gestreift worden. An Punkten starker Pulsation soll sie länger sein als in Punkten ohne solche. Bei den Messungen der Rheinstrombauverwaltung Coblenz auf dem Rhein²⁸⁾ und anderer Strombauverwaltungen werden z. B. automatisch die Anzahl Flügelumdrehungen während 100 oder 200 Sekunden Beobachtungsdauer registriert, obwohl in einem natürlichen Flußlauf die

Pulsation in geraden Strecken bei weitem nicht so groß zu sein pflegt wie in künstlichen Gerinnen. Keinesfalls sollte man, auch bei flüchtigen Messungen, unter 30 bis 40 Sekunden Beobachtungsdauer gehen, und auch dann nur eine so kleine Meßdauer wählen, wenn die Wasserströmung sehr regelmäßig verläuft. — Diese Frage hängt auch eng mit dem Genauigkeitsgrad der Zeitmessung zusammen.

Die Frage, bis zu welchen größten Geschwindigkeiten hydrometrische Flügel noch zuverlässig und brauchbar sind, hat F. Kuntschen durch Versuche beantwortet²⁹⁾. In dem Wasserwerk des Molliats, das die Gemeinde La Chaux de Fonds mit Wasser versorgt, stürzt das Wasser aus dem Ablaufkanal der Turbinen einen rd. 45° geneigten offenen Kanal am Berghang herunter, um sich in die Areuse zu ergießen. Dieses geneigte Gerinne endigt kurz vor seiner Mündung in die Areuse in einem nur schwach geneigten Kanal, in dem die Wassergeschwindigkeit mittels Oberflächenschwimmer zu beiläufig 10 m/sek bestimmt wurde. Hier wurden im Juli 1924 Vorversuche bei Wassergeschwindigkeiten bis zu 13 m/sek gemacht, mit dem Ergebnis, daß selbst normale Flügel diese außerordentlich hohe Geschwindigkeit nicht nur anstandslos aushielten (über 50 bzw. 100 Umdrehungen der Flügel in 1 Sekunde!), sondern daß sogar nach dieser Gewaltprobe ihre Konstante noch vollständig unverändert war. Auch die normale Signaleinrichtung genügte allen Anforderungen. Weitere systematische Versuche im Jahre 1925 an der gleichen Stelle haben die Ergebnisse der Vorversuche in vollem Umfang bestätigt und insbesondere gezeigt, daß die Extrapolation der Flügelgleichung bis zu 12 m/sek durchaus zulässig ist. Wegen weiterer Einzelheiten verweise ich auf die sehr interessante Originalabhandlung.

Daß der hydrometrische Flügel auch für das andere Extrem, Geschwindigkeiten bis Null herunter, mit praktisch genügender Genauigkeit zu messen geeignet ist bzw. dafür eingerichtet werden kann, habe ich in Verfolg einer Idee von E. B. H. Wade in einer Untersuchung über „die Messung kleinster Wassergeschwindigkeiten mit dem hydrometrischen Flügel“ nachzuweisen vermocht³⁰⁾. Das Verfahren besteht in Kürze darin, daß man durch ein in die Flügelachse eingreifendes kleines zusätzliches konstantes Drehmoment den Flügel schon bei der Geschwindigkeit Null in Bewegung setzt und die Steigerung der Drehgeschwindigkeit durch die Strömung beobachtet. Ein Messungsergebnis mit diesem Verfahren ist auf S. 30 aufgeführt.

4. Die Zeitmessung.

Als Instrumente für die Zeitmessung bei Wassermessungen mit dem hydrometrischen Flügel kommen fast nur die Stoppuhr und der Chronograph in Verbindung mit einer Sekundenuhr in Betracht.

Mein Vertrauen in die Stoppuhren ist umgekehrt wie beim Flügel mit der Zeit beträchtlich gesunken, und ich verwende sie bei meinen Untersuchungen nur notgedrungen, d. h. nur dann, wenn der Gebrauch der normalen Taschenuhr zu umständlich oder auf die Dauer zu nervenanspannend wäre, ein Fall, der gerade bei Wassermessungen leider vorliegt. Um jedoch zu einem Urteil über die erzielbare Genauigkeit bei der Zeitmessung zu kommen, soll eine technisch einwandfreie Stoppuhr vorausgesetzt werden.

Bei der Zeitmessung mit der Stoppuhr spielt die sogen. persönliche Gleichung, d. h. der Zeitunterschied zwischen dem Eintreten eines Ereignisses und der Wahrnehmung und Feststellung durch unsere Sinne, eine Folge der verhältnismäßig geringen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Empfindungen in den Nervenbahnen, keine Rolle, da es sich um Differenzmessungen handelt. Zwar ist die persönliche Gleichung bei ein und demselben Individuum auch Änderungen unterworfen, doch innerhalb der verhältnismäßig kurzen Beobachtungszeit von maximal nur einigen Minuten als konstant anzusehen.

Bei einer Stoppuhr mit $\frac{1}{5}$ Sekunden Hemmung rückt der Sekundenzeiger immer nur alle 0,2 Sekunden vor. Um diesen Betrag kann also ungünstigsten Falles die Zeitmessung, soweit die Uhr in Frage kommt, falsch werden. Bei einer Meßdauer von 20, 40, 60, 120 Sekunden würde der dadurch bedingte prozentuale Fehler im Maximum $\pm 1,00, 0,50, 0,33, 0,17\%$ betragen können. Man sieht hieraus, wie mit zunehmender Meßdauer der Fehler sinkt, die Genauigkeit steigt. Nun lehrt aber die Wahrscheinlichkeitsrechnung, daß es einer sehr großen Anzahl von Beobachtungen bedarf, um diesen Maximalfehler auch nur einmal zu erreichen. Mit anderen Worten: Selbst wenn wir Unvollkommenheiten in der Uhr, unvermeidliche Fehler beim Abstoppen und beim Ablesen des Zeigerstandes voraussetzen, so liegt es doch in unserer Macht, die prozentualen Fehler bei der Zeitmessung mit der Stoppuhr durch längere Beobachtungsdauer in erträglichen Grenzen zu halten. —

Die vielfach wenig günstigen Erfahrungen mit normalen Stoppuhren hat die Firma A. Ott, Kempten, in jüngster Zeit zum Bau einer neuen Stoppuhr veranlaßt, die, soviel ich mich bis jetzt überzeugen konnte, wirklich ausgezeichnete Eigenschaften besitzt und mein Vertrauen in Stoppuhren wieder gehoben hat. Das neue Modell, Abb. 14, hat $\frac{1}{30}$ Sekunden Hemmung, der große Zeiger macht eine Umdrehung schon in 10 Sekunden, so daß direkt die Zehntel-Sekunden abgelesen werden können,



Abb. 14. Neue Stoppuhr von Ott.

Bruchteile davon noch zu schätzen sind. Der kleine Zeiger hat nicht Minuten-, sondern Dezimalzählung der Sekunden und zählt bei einer Umdrehung 300 Sekunden, durch eine zweite Bezifferung mit roten Zahlen 600 Sekunden. Über diese Zeitdauer hinaus verliert in der Regel die Anwendung einer Stoppuhr ihre Berechtigung. In solchen Fällen sollte man die gewöhnliche Taschenuhr mit möglichst großem Sekundenzifferblatt, wie es z. B. die sogen. Deckchronometer besitzen, verwenden. Denn bei 600 Sekunden bedeutet selbst eine Sekunde Fehlablesung nur 0,16% Fehler.

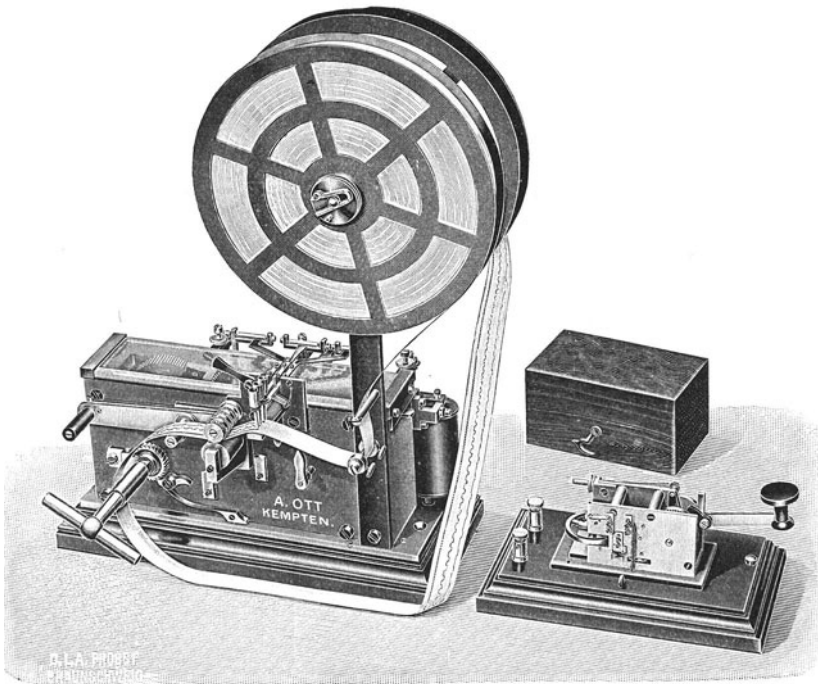


Abb. 15. Bandchronograph mit 3 Schreibfedern und Sekunden-Kontaktwerk ($\frac{1}{6}$ nat. Größe).

Der Chronograph ist bei zweckmäßiger Konstruktion und richtiger Handhabung ein so vorzügliches Registrierwerk, welches dazu noch ohne jede persönliche Gleichung arbeitet, daß seine Fehler, ähnlich wie beim Planimeter, bei Wassermessungen völlig unberücksichtigt bleiben können. Ohne dies ausgezeichnete Hilfsmittel wäre es z. B. ganz ausgeschlossen, Eichkurven so vollkommen zu erhalten, wie wir sie heute gewohnt sind und auch billigerweise erwarten dürfen. Besäße der Chronograph an sich merkliche Fehler, so würde er nicht auf Sternwarten, als Band- oder Zylinderchronograph, seine ausgedehnte Verwendung schon seit Jahrzehnten gefunden haben³¹⁾.

Der Bandchronograph, Abb. 15, mit beispielsweise nur 10 mm Papiergeschwindigkeit gestattet die Zeit direkt auf 0,01 Sekunden abzulesen; denn 0,1 mm (=) 0,01^s. Ich habe gefunden, daß dies bei technischen Messungen, wie sie hier vorliegen, durchaus keine übertriebene Genauigkeit ist, sondern ich pflege in der Rechnung meist auch noch die dritte und vierte Dezimale zu berücksichtigen und erst das Endergebnis entsprechend abzurunden. Das ist beim Bandchronographen ohne weiteres möglich, wenn man die Geschwindigkeit des Papierstreifens als Vergleichsmaßstab für die Weg- und Flügelmarken benutzt.

Leider ist die Verwendung des Chronographen im Freien etwas umständlich, allerdings, wenn gleichzeitig Messungen mit mehreren Flügeln in Frage kommen, bedeutend weniger als das Einexerzieren und Zusammenarbeiten einer größeren Gruppe von Einzelbeobachtern. Der Gebrauch des Chronographen nimmt daher ständig zu. Die Messungen an den großen Wasserkraftanlagen in Deutschland und Schweden der letzten Jahre sind fast alle mit Chronographen ausgeführt worden. Es werden jetzt schon Apparate mit bis zu 18 Schreibfedern gebaut.

5. Art und Durchführung der Geschwindigkeitsmessung.

In der Hauptsache gibt es drei Verfahren mit dem hydrometrischen Flügel zu messen: die Punktmeßmethode, das Integrierverfahren nach Harlacher und die Quersfahrmessung nach Ott. Von diesen drei Methoden ist die Punktmeßmethode die allgemeinste, für offene Gerinne und geschlossene Rohrleitungen gleich brauchbar, und insofern auch die zuverlässigste, weil sie allein, abgesehen von dem seltener angewandten sog. Detaillierverfahren nach Hajos³²), unmittelbar einen Aufschluß über die Geschwindigkeitsverteilung im Meßquerschnitt gibt. Sie wird daher bei Untersuchungen von Wasserkraftanlagen in über 99⁰/₁₀₀ aller Fälle angewendet, so daß sich unsere Ausführungen hierauf allein beschränken können. —

Das Integrierverfahren nach Harlacher³³) bezweckte eine Abkürzung der Meßdauer, ebenso wie die Quersfahrmessung nach Ott³⁴). Das Harlacher-Verfahren ist nur in offenen Gerinnen mit beliebigem Bodenprofil praktisch durchführbar, das Ott-Verfahren³⁵) in solchen nur dann anzuwenden, wenn es eine regelmäßige Begrenzung mit horizontaler Sohle hat.

Die Punktmeßmethode setzt voraus, daß die Wassergeschwindigkeit in einer größeren Anzahl zweckmäßig ausgewählter Punkte des Profils mit einem Flügel der Reihe nach, oder mit Hilfe einer entsprechenden Anzahl von Flügeln auf einmal bestimmt wird. Auf die Lage der Punkte im Meßprofil in offenen Gerinnen ist das Berechnungsverfahren, ob rein numerisch oder vorwiegend graphisch, von Einfluß. Für das graphische Verfahren hat man freiere Hand, für das numerische

eignen sich hauptsächlich rechteckige Profile, wie sie bei Wasserkraftanlagen häufig anzutreffen sind, obwohl auch für große Flußprofile brauchbare, rein numerische Methoden angegeben wurden³⁶).

Für die rein numerische Auswertung bringen die Schweizer Normen²²) sehr beachtenswerte Einteilungen von rechteckigen Querschnitten und kommen zu dem Ergebnis, daß die Wassermenge, rein numerisch ermittelt, im ungünstigsten Fall 0,82%, im Durchschnitt nur 0,37%, größer ausfällt als nach dem graphischen Verfahren.

Für die graphische Berechnung gilt als Richtlinie, in offenen Gerinnen die Geschwindigkeit in einer Anzahl von Vertikalen (oder Horizontalen) zu messen. Wegen der Abnahme der Geschwindigkeit in Wandungsnähe wählt man den Abstand der Vertikalen in der Nähe der Wandung enger. Für die Lage der Meßpunkte auf den Vertikalen gilt als Regel, einen Punkt nahe an die Sohle, einen nahe an die Oberfläche zu legen und je nach der Tiefe mehrere dazwischen zu schalten.

Für Rohrleitungen gelten ähnliche Gesichtspunkte³⁷).

Mit Rücksicht auf etwa eintretende Änderungen im Pegelstand bei offenen Gerinnen ist es erwünscht, die Geschwindigkeitsmessungen, die bei Verwendung nur eines Flügels u. U. recht zeitraubend sein können, möglichst abzukürzen. Das ist unbeschadet des zu fordernden Genauigkeitsgrades bei geeigneter Apparatur und geübtem Personal möglich.

Über die Meßdauer in größeren Profilen bei Verwendung nur eines Flügels gibt nachstehende Zahlentafel 1 einen Überblick, deren Unterlagen ich R. Dubs verdanke. Dubs arbeitet mit hängender Stange und hat sich besondere Einrichtungen geschaffen, die es ihm ermöglichen, die Verstellzeit von einem Meßpunkt zum nächsten auf 2 bis 3 Sekunden herabzudrücken.

In neuerer Zeit sucht man die immerhin beträchtliche Meßdauer bei Verwendung nur eines Flügels dadurch zu vermindern, daß man in offenen Gerinnen jede Vertikale mit einem besonderen Flügel besetzt. Wo es die örtlichen Verhältnisse gestatten, werden alle Flügel an einem horizontalen Rahmen befestigt und dieser Rahmen durch Drahtseile über Rollen oder mit Flaschenzügen verstellt³⁸).

Auch in Rohrleitungen von größerem Durchmesser werden jetzt viele Flügel gleichzeitig verwendet. So wurden beispielsweise von der Mittleren Isar A.-G. in einer 5 m weiten Rohrleitung 27 Flügel eingebaut, also 1 Flügel auf durchschnittlich 0,73 qm Querschnitt, die auf drei Bandchronographen arbeiteten, und von den Innwerken 20 Flügel in einer 4 m weiten Rohrleitung, was 1 Flügel auf 0,63 qm Querschnitt entspricht. Hierdurch gelingt es, die Meßdauer auf ein Mindestmaß zu beschränken.

Zur Erhöhung des Genauigkeitsgrades ist es unbedingt erforderlich, während der Geschwindigkeitsmessung in offenen Gerinnen den Pegel-

Zahlentafel 1.

Ort	Meßprofile				Gesamte Wassermenge m ³ /sek	Mittlere Wassergeschwindigkeit ca. m/sek	Zahl der Meßvertikalen	Zahl der Meßpunkte		Zahl der Flüßelsignale pro Punkt	Totale Meßzeit Min.	Durchschnittliche Meßzeit pro Punkt einschl. Verstellzeit Sek.
	Zahl	Breite m	Tiefe ca. m	Fläche ca. m ²				in einer Vertikalen	insgesamt			
München Süd III	2	6,500	3,38	43,95	30,79	0,700	2·7 = 14	8	112	4	88	47,1
					23,15	0,527	2·7 = 14	8	112	4	106	56,8
					17,02	0,387	2·7 = 14	8	112	4	135	72,4
München Süd II	2	6,500	3,25	42,25	36,82	0,872	2·7 = 14	8	112	4	91	48,8
					31,24	0,739	2·7 = 14	8	112	3	85	45,5
					24,98	0,591	2·7 = 14	8	112	3	97	51,9
Chèvres	1	5,950	3,60	21,40	21,52	1,005	8	8	64	3—4	50	46,8
					21,61	1,009	8	8	64	3	46	43,1
					21,33	0,996	8	8	64	3	43	40,3
					18,91	0,883	8	8	64	3	47	44,1
					18,90	0,883	8	8	64	3	45	42,2
Waldburg	2	1,830 und 5,600	3,30	24,52	19,31	0,788	12	8	96	4	66	41,3
					17,32	0,706	12	8	96	4	68	42,5
					12,70	0,518	12	8	96	4	72	45,0
					8,23	0,336	12	8	96	4	76	47,5
	1	3,780	3,30	12,48	9,65	0,774	6	8	48	4	36	45,0
					8,74	0,701	6	8	48	4	33	41,3
					8,12	0,651	6	8	48	4	38	47,5
					6,30	0,505	6	8	48	4	42	52,5
				4,64	0,372	6	8	48	4	48	60,0	

stand in regelmäßigen Zeiten zu notieren, oder noch besser mit einem Registrierpegel lückenlos aufzuzeichnen. Harlacher und Beyerhaus³⁹⁾ haben gezeigt und mathematisch begründet, wie man den Einfluß der Spiegeländerung auf die Wassermenge berücksichtigen kann.

6. Die Berechnungsverfahren.

a) Für Wassermessungen in offenen Gerinnen.

Über das rein numerische Verfahren und seinen Genauigkeitsgrad bei zweckmäßiger Einteilung des (rechteckigen) Profils nach den Schweizer Normen habe ich mich bereits geäußert. Näher darauf einzugehen erübrigt sich, da die Schweizer Normen a. a. O. alles Wissenswerte darüber bringen. — Nach einem Vorschlag von A. Streiff⁴⁰⁾ wird von amerikanischen Turbinenfabriken, die mit Ott-Flügeln arbeiten, die Verteilung der Meßpunkte für das numerische Verfahren anders vorgenommen als nach dem Vorschlag der Schweizer Normen, nämlich so, das die Tschebyscheffschen Integrationsformeln⁴¹⁾ für größere Werte von n verwendet werden können. Das Verfahren läuft darauf hinaus, die Ordinaten und Abszissen der Beobachtungspunkte so zu

wählen, daß das einfache arithmetische Mittel aller Geschwindigkeitsmessungen ohne weiteres die mittlere Geschwindigkeit angibt. Es ist also bei diesem Verfahren

$$Q = F \cdot \frac{\sum v}{m \cdot n}$$

wenn m die Zahl der Vertikalen und n jene der Horizontalen bedeutet. Ein Vergleich über die Genauigkeit gegenüber anderen numerischen oder gegenüber dem graphischen Rechnungsverfahren ist mir nicht bekannt geworden.

Das numerische Verfahren wird in der Regel nur zur vorläufigen Berechnung angewendet, um im Anschluß an die Messung die Ungeduld der Interessenten rasch durch ein annäherndes Resultat befriedigen zu können. Die endgültige Auswertung erfolgt dann meist doch noch nach dem graphischen Verfahren. Dies ist von universeller Anwendbarkeit, schützt vor groben Fehlern und gibt einen wirklichen Einblick in die Geschwindigkeitsverteilung im Meßquerschnitt.

Das graphische Verfahren — in der Praxis dürfte wohl bei geübten Beobachtern heute nur mehr das eine, hier kurz anzudeutende im Gebrauch sein — beruht bekanntlich darauf, daß man sich den Meßquerschnitt in zweckmäßig verjüngtem Maßstab aufzeichnet, den mittleren Wasserstand einträgt, die Meßpunkte markiert und in diesen senkrecht zur jeweiligen Meßvertikalen die Geschwindigkeiten in beliebigem, praktisch zu wählendem Maßstab mit Hilfe der Eichkurve oder einer Eich-tabelle aufträgt, nachdem man aus dem Meßprotokoll die Drehzahl des Flügels pro Sekunde mit dem Rechenschieber ausgerechnet hat. Die Endpunkte dieser Geschwindigkeitsstrecken aus freier Hand durch einen stetigen Linienzug verbunden ergeben die Vertikalgeschwindigkeitskurven, die zusammen mit der Meßvertikalen, der Spiegellinie und Sohlenbegrenzung die Vertikalgeschwindigkeitsfläche ergibt⁴²). Diese wird planimetriert, ihr Inhalt als Strecke in den zugehörigen Punkten senkrecht zur Wasserspiegellinie (oder einer dazu Parallelen) aufgetragen, wodurch sich eine zweite Fläche, die Wassermengenfläche, ergibt, deren Inhalt unter Berücksichtigung der Maßstäbe die gesuchte Wassermenge pro Sekunde ist. Dieses Verfahren ist nichts anderes als eine zweifache graphische Integration, und ist mathematisch vollkommen einwandfrei zu begründen. Denn bedeutet

h die Wassertiefe der Vertikalen, auf der gemessen wird, dann ist $q = \int_0^h v \, dh$ der Inhalt der Vertikalgeschwindigkeitsfläche.

Bezeichnet ferner b die Breite des Wasserspiegels, so ist

$$\int_0^b q \, db = \int_0^b \int_0^h v \, dh \, db = Q$$

der Inhalt der Wassermengenfläche = gesuchte Wassermenge.

Nun könnte man vermuten, daß durch die verschiedenen zeichnerischen Operationen, durch das immerhin einiger Willkür unterworfenen Zeichnen der Geschwindigkeitskurven und der Wassermengenkurve, sowie endlich durch das Planimetrieren sich solche Fehler einschleichen, daß der Genauigkeitsgrad des Endergebnisses bedeutend herabgedrückt wird. Dem widerspricht jedoch die Erfahrung geübter Beobachter. Mit einigen Annahmen ließe sich das zwar unter Anwendung des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes durch mathematische Entwicklung beweisen, doch ist die Entwicklung, um klar zu bleiben, etwas zu umfangreich, so daß ich davon absehen will, sie hier mitzuteilen. Hingegen soll für das numerische Rechnungsverfahren in seiner einfachsten Art, nach Tschebyscheff, unter der Annahme, daß es im Prinzip fehlerlose Ergebnisse liefern kann, die Fehlergleichung aufgestellt werden.

Ist, wie auf Seite 5, μ_b der mittlere prozentuale Fehler der Breitenmessung, μ_h jener der Tiefenmessung und μ_v jener einer einzelnen Geschwindigkeitsmessung und ist ferner m die Zahl der Meßvertikalen und n jene der Horizontalen, so ist nach der auf Seite 5 angegebenen Gleichung der mittlere Fehler der Wassermenge

$$\mu_Q = \pm \sqrt{\mu_b^2 + \mu_h^2 + \frac{1}{m \cdot n} \mu_v^2}$$

Ist wieder, wie früher, $\mu_b = \pm 0,1^0/0$, $\mu_h = \pm 0,2^0/0$ und $\mu_v = \pm 0,5^0/0$ und ist ferner $m = 7$ und $n = 9$, so ergibt sich

$$\mu_Q = \pm \sqrt{0,1^2 + 0,2^2 + \frac{1}{63} \cdot 0,5^2} = \pm 0,232^0/0.$$

Einen weiteren und wohl besseren Beweis für die Ausgleichung von Beobachtungsfehlern im Laufe des Rechnungsverfahrens geben Zahlenbeispiele aus der Praxis.

Ich habe einmal in einem kleinen Gerinne von beiläufig 1,0/0,3 m Wasserquerschnitt mit denselben Instrumenten hintereinander zwei unabhängige Messungen durchgeführt, sie unabhängig voneinander ausgewertet und zwanglos eine Übereinstimmung von 0,1⁰/0 gefunden⁴³).

Um den Vorwurf systematischer Fehler bei dieser Messung zu entkräften, will ich aus neuester Zeit folgendes Beispiel anführen.

Von der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde und der Mittleren Isar A.-G., München, wurden im Frühjahr 1926 in dem bekannten Werkkanal dieser Gesellschaft gleichzeitig, jedoch vollständig unabhängig voneinander, und in einem gegenseitigen Abstand von 150 m, je eine Wassermessung durchgeführt. Auch die Ausarbeitungen wurden von beiden Meßkolonnen unabhängig voneinander vorgenommen und ergaben beide das genau gleiche Resultat von 86,5 cbm/sek⁴⁴). Die Zahl der Meßpunkte betrug etwa 30 in jedem Profil; die Messungsdauer war rund eine Stunde

und der Pegelstand war während der Messungen völlig konstant. Gemessen wurde von der Landesstelle für Gewässerkunde mit einem Schwimmflügel, von dem Personal der Mittleren Isar A.-G. mit einem Flügel an stehender Stange, beide System Albrecht-Killi.

Es wäre wunderbar, wenn in diesem Falle alle Instrumente genau gleich falsch gezeigt hätten und von allen beteiligten Personen genau dieselben Fehler gemacht worden wären.

b) Für Wassermessungen in Rohrleitungen.

Wassermessungen in Rohrleitungen kann man vorwiegend numerisch oder graphisch auswerten. Für beide Verfahren ist es zweckmäßig, zuerst die Geschwindigkeitskurve über dem Rohrdurchmesser gemäß den Beobachtungen aufzutragen und dann erst an die numerische oder graphische Auswertung zu gehen. Beide Verfahren habe ich anderweitig⁴⁵⁾ für ein der Praxis entnommenes Versuchsbeispiel durchgeführt und zwanglos vollkommene Übereinstimmung gefunden. Die beiden Rechnungsarten sind ferner von Ott, ebenso von Dufour für das graphische Verfahren⁴⁶⁾ angegeben.

Die gute Übereinstimmung in der numerischen und graphischen Berechnung ein und desselben Versuches beweist, daß den Auswertungsverfahren ein hoher Genauigkeitsgrad zugeschrieben werden muß bzw. daß alle unvermeidlichen Fehler beim Aufzeichnen, Planimetrieren, Abmessen sich entweder gegenseitig weitestgehend ausgleichen oder nur unwesentliche Fehler bedingen. Noch schlüssigere Beweise, die geeignet sind, jeden Zweifel zu beheben, liefern Experimentaluntersuchungen über den Genauigkeitsgrad, zu denen ich nun übergehen will.

7. Der Gesamtgenauigkeitsgrad.

Für den hohen Gesamtgenauigkeitsgrad einer Flügelmessung gibt es einen direkten und einen indirekten Beweis.

Der direkte Beweis läßt sich dadurch liefern, daß man im gleichen Gerinne bei denselben Wassermengen Wassermessungen nach verschiedenen Methoden gleichzeitig durchführt.

In der über diese Frage noch sehr spärlichen Literatur fand ich folgende Angaben.

In der Schweiz wurden in den Jahren 1910 und 1912 im Elektrizitätswerk Ackersand an der Saaser Visp bei Stalden sehr eingehende Vergleichsversuche mit Flügel, Überfall, Schirm und dem chemischen Verfahren (Salzlösung) vorgenommen⁴⁷⁾. Das Ergebnis war in dem einen Fall folgendes:

		Versuchsreihe I.			
Verfahren:		Salzlösung	Flügel	Schirm	Überfall
	Wassermenge =	1356,5	1371,5	1303	1339 l/sek
	bzw.	102,9	100,0	98,9	101,6 ‰
		Versuchsreihe II.			
	Wassermenge =	1305,2	1291	1299	1312 l/sek
	bzw.	101,2	100,0	100,6	101,7 ‰

Die Zahlen lassen erkennen, daß der Genauigkeitsgrad der Flügelmessung sich innerhalb derselben Größenordnung bewegt wie derjenige der anderen Verfahren.

In dem anderen Fall wurden die Vergleichsmessungen zwischen Schirm, Flügel und Überfall in dem etwa 3,50 m breiten und 1,50 m tiefen Ablaufkanal desselben Werkes durchgeführt und ergaben bei fünf Versuchsreihen Unterschiede zwischen Flügel- und Schirmmessung (welch letzteren ich mehr Vertrauen schenken möchte als Überfallmessungen), von

$$-0,1 \quad +0,7 \quad -0,9 \quad +0,6 \quad +0,3\text{‰},$$

im Mittel also eine Übereinstimmung von 0,1‰. Die angegebene Quelle faßt ihr Urteil in die Worte: „Die Schirmmessungen stimmen mit den Flügelmessungen vollständig überein.“

Ein ähnlicher Versuch, Vergleichsmessung mittels Salzlösung, Überfall und Flügel, wurde 1923 von Vreedenburgh⁴⁸⁾ an einem Wasserkraftwerk in Niederländisch Indien durchgeführt. Flügel und Salzlösung ergaben genau denselben Wert von 1163 l/sek, während die Überfallmessung auch bei zwei anderen Versuchen, die aber nur zwischen Salzlösung und Überfall stattfanden, stets um 1,8 bis 3,2‰ kleinere Werte lieferte.

F. Kuntschen berichtet über sehr wertvolle, umfangreiche, mit äußerster Präzision durchgeführte Vergleichsversuche zwischen Überfall-, Flügel-, Behälter- und Salzmessung im Elektrizitätswerk Amsteg vom Jahre 1922⁴⁹⁾. Die Breite des Überfallwehres ohne Seitenkontraktion betrug 3,0 m. Im Kanal vor dem Überfall wurde mit vier verschiedenen Flügeln von Ott, Amsler und Stoppani in 48 Punkten des Profils gemessen, bei jeder Messung zweimal mit je zwei Flügeln gleichzeitig, doch unabhängig voneinander. Die Ablaufmenge wurde dann in dem sorgfältig ausgemessenen Ablaufkanal unter Beobachtung aller erdenklichen Vorsichtsmaßregeln nochmals volumetrisch bestimmt. Schließlich wurde die Wassermessung auch noch nach der Salzmischungsmethode durchgeführt. Die Ergebnisse aller Versuche sind a. a. O. S. 53 für $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{4}$ und $\frac{4}{4}$ Beaufschlagung der Turbine zusammengestellt und hier in Zahlentafel 2 auszugsweise, jedoch unter Beifügung der mittleren Wassergeschwindigkeit, wiedergegeben.

Als Vergleichsmaßstab ist die volumetrische Messung benutzt, und die Übereinstimmung der übrigen Messungen mit ihr ist ganz hervor-

Zahlentafel 2.

Öffnung der Turbine	Mittlere Wasser- ge- schwin- digkeit m/sek	Wassermenge gemessen mit								
		Be- hälter 1/sek	Salz- lö- sung 1/sek	Differ. in % 1/sek	Flügel 1/sek	Differ. in % 1/sek	Überfall nach Rehbock 1/sek	Differ. in % 1/sek	Überfall nach S. I. A. 1/sek	Differ. in % 1/sek
1/4	0,354	1182	1188	+ 0,5	1197	+ 1,2	1184	+ 0,2	1188	+ 0,5
2/4	0,562	2128	2138	+ 0,5	2134	+ 0,3	2127	- 0,1	2144	+ 0,8
3/4	0,743	3204	3192	- 0,4	3210	+ 0,2	3211	+ 0,2	3242	+ 1,2
4/4	0,922	4371	4399	+ 0,6	4344	- 0,6	4335	- 0,8	4373	+ 0,1

ragend. — Die Salzmischungsmethode zeigte zwar bei den einzelnen Proben bis zu $\pm 13\%$ Unterschiede, doch wurde durch Häufung der Beobachtungen schließlich das angegebene genaue Resultat erzielt. — Bei der Flügelmessung ist die von Strickler angegebene Korrektur für turbulente Strömungen nach den Ausführungen auf S. 12 angebracht.

Dem Studienmaterial der vom Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein gebildeten Kommission zur Festsetzung von Normen für Wassermessungen sind die Werte der Zahlentafel 3 entnommen, die anlässlich der Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilung im Meßkanal der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich erhalten wurden⁵⁰⁾.

Zahlentafel 3.

Flügel	Herkunft	Propeller- Durchmess. mm	Umdrehungen pro Signal	Anzahl der Beobachtungen	Mittlere Kanaltiefe m	Mittlere Geschwin- digkeit m/sek	Wassermenge nach Flügel		Differenz in % 1/sek	Wasser- menge nach Überfall cbm/sek	Differ. in % 1/sek
							cbm/sek	im Mittel cbm/sek			
<i>A</i>	Ott	128	25	2	1,2233	0,4660	0,4514		+ 0,089	0,4509	+ 0,11
<i>B</i>	Ott	44	50	3	1,2232	0,4672	0,4527		+ 0,377	0,4497	+ 0,66
<i>C</i>	Stoppani	110	50	3	1,2240	0,4772	0,4626	0,4510	+ 2,572	0,4497	+ 2,80
<i>D</i>	Amsler	116	50	2	1,2226	0,4490	0,4347		- 3,600	0,4497	- 3,34
<i>E</i>	Amsler	122	50	2	1,2224	0,4685	0,4535		+ 0,555	0,4491	+ 0,97

Die vorstehende Zahlentafel 3 ist in mehrfacher Hinsicht von Interesse. Der Ott-Flügel *A*, Fabrikations-Nr. 591, entsprach dem Typ IVa mit dreiteiliger Speichenschaufel, Abb. 7, S. 11, der Ott-Flügel *B*, Fabrikations-Nr. 471, dem Typ X, dem kleinsten von Ott gebauten Flügel mit Schutzring, ähnlich der Abb. 9, S. 12. Der Stoppani-Flügel ist dem äußeren Anschein nach eine Nachbildung des Ott-Flügels Typ IX mit Schutzring⁵¹⁾. Flügel *D* ist der ältere Typ II, Flügel *E* der neueste Typ VI von Amsler. — Am besten erwiesen sich die Ott-Flügel, obwohl sie schon älteren Datums sind; ihnen folgte der neueste Amsler-Flügel, und in weitem Abstand erst kommt die Stoppanische Nachbildung des Ott-Flügels, die also in diesem Fall das Original hinsichtlich Zuverlässigkeit nicht erreichte, sowie der ältere Amsler-Flügel.

Jedenfalls beweisen auch diese Versuche, daß gute Flügel einen Genauigkeitsgrad innerhalb 1% besitzen.

Einem Bericht eines früheren Assistenten von Prof. Hilgard an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, des Zivilingenieurs A. Streiff in Jackson (Mich.), an Dr. Epper in Bern über die Prüfung einer großen Wasserkraftanlage durch die Fargo Engineering Company im Jahre 1913 sind folgende Angaben entnommen:

„Bei der Prüfung der Turbinen eines großen Wasserkraftwerkes in den Vereinigten Staaten wurde die Wassermenge unmittelbar hinter dem Rechen mit einem Ott-Flügel Nr. 1973, Typ IV, in 102 Punkten und in einem benachbarten, etwas günstigeren Profil mit 5 Price-Flügeln in 260 Punkten gemessen und gleichzeitig im Unterwassergraben durch einen $117' 7\frac{3}{4}'' = 35,9$ m breiten Überfall ermittelt. Es ist wohl dies der größte jemals verwendete Meßüberfall! Die Formeln von Francis, Frese, Bazin und Braschmann gaben für den Überfall nur 1% Unterschied unter sich und lieferten im Mittel 1232 cbf/sek = 34,93 cbm/sek. Die Messung mit dem Ott-Flügel ergab 1221 cbf/sek = 34,62 cbm/sek, also eine Übereinstimmung von 0,9%, wobei noch zu beachten ist, daß das Meßprofil für den Flügel an sehr ungünstiger Stelle mit Rückströmungen lag. Die Messung mit den 5 Price-Flügeln hingegen gab eine um 12% größere Wassermenge.

Bei einer anderen von mir vorgenommenen Turbinenprüfung im Jahre 1914 stimmte die Flügelmessung (mit demselben Ott-Flügel) mit der Überfallmessung — es wurde ein $60' = 18,3$ m breiter Überfall verwendet — auf 0,5% überein.“

Die Firma I. M. Voith in Heidenheim hat im Schirm-Meßkanal ihrer Versuchsanstalt in Hermaringen im April 1926 eine Reihe von Vergleichsmessungen zwischen Flügel und Überfall durchgeführt, deren Ergebnisse sie mir zur Verfügung gestellt hat. Der benutzte Überfall war mit dem Schirm geeicht. Gemessen wurde bei jedem Versuch mit zwei Ott-Flügeln, Nr. 3294 und Nr. 2210, Typ VI, in sieben Vertikalen

Zahlentafel 4.

Nr. des Versuchs	Mittlere Wassergeschwindigkeit m/sek	Wassermenge gemessen mit			Mehr- (+) bzw. Minder- (—) Angabe der Flügel im Vergleich zum Überfall			
		Überfall cbm/sek	Flügel 3294 cbm/sek	Flügel 2210 cbm/sek	Flügel 3294		Flügel 2210	
					cbm/sek	%	cbm/sek	%
1	0,734	3,678	3,645	3,660	— 0,033	— 0,90	— 0,018	— 0,49
2	0,734	3,679	3,657	3,650	— 0,022	— 0,60	— 0,029	— 0,79
3	0,733	3,670	3,646	3,653	— 0,024	— 0,65	— 0,017	— 0,46
4	0,541	2,703	2,680	2,683	— 0,023	— 0,85	— 0,020	— 0,74
5	0,647	3,228	3,238	3,243	+ 0,010	+ 0,31	+ 0,015	+ 0,46
6	0,773	3,804	3,804	3,804	± 0,000	± 0,00	± 0,000	± 0,00
Mittelwerte						— 0,45		— 0,34

und in jeder Vertikalen in vier Punkten bei rund 3,50 m Kanalbreite und etwas über 1,4 m Wassertiefe. Die hauptsächlichsten Ergebnisse von sechs Versuchsreihen sind in Zahlentafel 4 zusammengestellt.

Die beiden Flügelmessungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung unter sich, wie auch aus den Vertikalgeschwindigkeitskurven hervorgeht, die sich teilweise vollkommen decken. Im Mittel stimmen die beiden Flügelmessungen auf 0,45 bzw. 0,34 ‰ mit der Überfallmessung überein. Da der Unterschied zwischen den beiden Flügelmessungen unter sich nur 0,11 ‰ beträgt, auch im Vergleich zur Überfallmessung in demselben Sinne liegt, so ist es wahrscheinlich, daß die Differenz zwischen Flügelmessung und Überfallmessung in der Hauptsache zu Lasten der letzteren geht⁵⁴). — Jedenfalls beweisen auch diese Versuche den hohen Genauigkeitsgrad der Flügelmessung.

Schließlich erwähne ich noch meine eigenen Vergleichsversuche⁵²), mit dem auf S. 18 angegebenen Meßverfahren, bei welchen der Flügel unter besonders schwierigen Verhältnissen arbeiten mußte, insofern als die mittleren Wassergeschwindigkeiten nur rd. 5, 6 und 4 cm/sek betragen. Die Übereinstimmung betrug zwischen (vorher geeichtem!) Überfall und Flügel bei drei Versuchen

$$+ 1,46 \quad - 1,58 \quad - 3,13 \quad (\text{bzw.} \quad - 1,26) \text{ ‰},$$

im Mittel nur rd. 1 (bzw. 0,5) ‰ Unterschied.

Den indirekten Beweis liefern die zahllosen veröffentlichten und nicht veröffentlichten Turbinenprüfungen in Verbindung mit Wassermessungen mit dem hydrometrischen Flügel. Bei solchen Prüfungen wird in der Regel u. a. auch der Wirkungsgrad bei verschiedenen Belastungen, also bei verschiedenem Wasserverbrauch, festgestellt und beispielsweise in Abhängigkeit von der Bremsleistung der Turbine aufgetragen. Würde den Wassermessungen mit dem hydrometrischen Flügel tatsächlich ein erheblicher Ungenauigkeitsgrad innewohnen, so könnten nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung die Wirkungsgradkurven niemals immer einen so glatten Verlauf zeigen, wie sie es tatsächlich tun; sie müßten eine Streuung ergeben, die sowohl die Lieferanten als auch die Abnehmer schon längst von der Unzulänglichkeit des hydrometrischen Flügels überzeugt hätten⁵⁵).

Daher ist die Schlußfolgerung wohl berechtigt: Der Wassermessung mit dem hydrometrischen Flügel wohnt bei der nötigen Sorgfalt, Umsicht und Sachkenntnis ein erstaunlich hoher Genauigkeitsgrad inne, der nach allen Erfahrungen von keiner anderen in Frage kommenden Wassermessungsmethode erreicht oder übertroffen wird.

Anhang und Literaturnachweis.

1) In der Literatur finden sich nur sehr wenige und sehr zerstreut zahlenmäßige Angaben über den Genauigkeitsgrad von Wassermessungen mit dem hydrometrischen Flügel. Ich habe sie, soviel sie mir bekannt wurden, im Absatz über den Gesamtwirkungsgrad angeführt.

Eine kritische Betrachtung, ähnlich der vorliegenden, bringt Karl Croce in der Zeitschrift des Bayerischen Revisionsvereins, München 1926, Heft 5 und 6. Infolge einiger Irrtümer, Versehen und direkten Fehler kommt der Verfasser zu einem im ganzen recht ungünstigen, aber durchweg unzutreffenden Ergebnis.

2) Gibson, N. R.: The Gibson Method and Apparatus for Measuring the Flow of Water in Closed Conduits. Trans. Am. Soc. Mech. Eng., Dec. 6, 1923.

Dubs, R.: Theoretische Erörterungen zur Wassermessmethode von N. R. Gibson. Schweiz. Bauztg. Bd. 78, Nr. 4, S. 41—43. 1921.

Winkel, R.: Neues Verfahren zur Bestimmung der Wasserdurchflußmenge von Druckrohrleitungen. Zentralbl. Bauverw. 1922, Nr. 37, S. 221.

Pantell, K.: Das Gibsonsche Meßverfahren. Z. d. V. d. I. 1924, S. 366 mit Berichtigungen dazu S. 662 und 840.

3) Allen, C. M. and Taylor, E. A.: The Salt Velocity Method of Water Measurement. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. Bd. 14, 1923. — Auszugsweise in „The Engineer“, Dez. 1923, S. 635; Mech. Eng., Jan. 1924, S. 13; Power, Apr. 1924, S. 683. Deutsch in „Die Wasserkraft“, Aug. 1924, S. 297. Wasserkraft-Jahrbuch 1924, S. 257.

4) Hoyt, C. J. and Grover, N. C.: River Discharge. 4. Aufl. 1921. New York, John Wiley & Sons.

Schmidt, M.: Untersuchungen über die Umlaufbewegung hydrometrischer Flügel. V. d. I.-Forschungsheft Nr. 11, S. 18.

5) Gunn, J. R.: A Study of the fundamental Principles of Current Meters. Thesis for the degree of Master of Science of the University of California. Berkeley 1922.

6) Happach, V.: Ausgleichrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Teubners technische Leitfäden, Bd. 18. Leipzig und Berlin: B. G. Teubner 1923. — Das kleine Buch füllt eine bis dahin sehr fühlbare Lücke in der technischen Literatur aus und ist jedem Ingenieur, der mit Versuchen zu tun hat, angelegentlichst zu empfehlen.

7) de Thierry, G. und Matschoss, C.: Die Wasserbaulaboratorien Europas. V. d. I.-Verlag, Berlin, 1926, S. 400.

8) Normen für Leistungsversuche an Wasserkraftanlagen. Aufgestellt vom Verein deutscher Ingenieure, Berlin, und vom deutschen Wasserwirtschafts- und Wasserkraft-Verband e. V., Berlin.

9) Ott, L. A.: Wassermessungen bei Wasserkraftanlagen. Wasserkraft-Jahrbuch 1924, S. 263 bis 265.

Dufour, H.: Flügel-Wassermessungen in Druckrohrleitungen. Schweiz. Bauztg. 1924, S. 39.

Derselbe: Jaugeages au moulinet dans les conduites forcées. Bull. Techn. Suisse Rom., Année 52 (1926), Nr. 9, S. 102.

¹⁰⁾ Thoresen, H.: Wassermessungen bei großen Wassermengen. Wasserkraft, Jahrg. 19 (1924), S. 286 und 441.

Derselbe: Die Turbinen der Raanaasfoss-Wasserkraftanlage, Norwegen. Z. d. V. d. I. 1924, S. 373.

Perrochet, P.: Résultats des essais effectuées sur les groupes électrogènes de l'usine Chancy-Pougny. Schweiz. Bauztg. Bd. 87 (1926), S. 241.

¹¹⁾ Montigel, R.: Overnauwkeurigheid der Oppervlaksbepalingen met den Pool-Planimeter, De Waterstaats-Ingenieur Nr. 12, 1924.

Hammer, E.: Lehrbuch der elementaren praktischen Geometrie, Leipzig 1911, gibt auf S. 228 als mittleren prozentualen Fehler für Flächen zwischen 50 und 300 qcm den Betrag $2/\sqrt{F}$ an. Dabei sind die Instrumentalfehler inbegriffen.

¹²⁾ Solche Rundlauf-Einrichtungen sind m. W. bis jetzt an vier Stellen gebaut worden:

Service d'études des grandes forces hydrauliques dans la région des Alpes. Ann. du Min. de l'Agriculture. Fascicule 32, Tome I, p. 28. Paris 1905.

Allen, Ch. M.: A circular current-meter rating station at the Worcester Polytechnic Institute. The Journal of the Worcester Polytechnic Institute, May 1909.

Scimemi, E.: L'Istituto di Idraulica della R. Scuola d'Ingegneria, Annali della R. Scuola d'Ingegneria di Padova, 1925, Nr. 3.

Lindquist, E.: „Über den hydrometrischen Flügel von Hoff“, Teknisk Tidsskrift, Bd. 56 (1926), S. 45. Darin die Rundlaufeinrichtung des Departement of Agriculture in Berkeley, Californien.

¹³⁾ Lauda: Einfluß der Wandungen von Versuchskanälen auf die Umlaufwerte hydrometrischer Flügel. Oest. Monatsschr. Baudienst, H. V, 1899.

¹⁴⁾ de Thierry, G. und Matschoss, C.: Die Wasserbaulaboratorien Europas. V. d. I.-Verlag, Berlin, 1926, S. 396.

¹⁵⁾ Staus, A.: Die hydraulischen Einrichtungen des Maschinen-Laboratoriums der Staatl. Württ. Höheren Maschinenbauschule in Eßlingen am Neckar mit einem Anhang: Die Messung kleinster Wassergeschwindigkeiten mit dem hydrometrischen Flügel. Berlin: Julius Springer 1925, S. 36—38.

¹⁶⁾ Ott, L. A.: Theorie und Konstantenbestimmung des hydrometrischen Flügels. Berlin: Julius Springer 1925.

¹⁷⁾ Mitteilungen der Abteilung für Wasserwirtschaft, Nr. 9, 1916: „Die Schweizerische Prüfanstalt für hydrometrische Flügel.“ Hier wird von dem Ott-Flügel Nr. 900, Typ IXa, berichtet, daß er in sechs Jahren elfmal geprüft wurde und trotz vielfachen Gebrauches keine nennenswerte Änderung der Konstanten zeigte.

¹⁸⁾ Im Oktober 1924 habe ich den Ott-Flügel Nr. 3706, Typ V, mit drei verschiedenen Schaufeln im Eßlinger Laboratorium geeicht. Das Instrument war für das Physical Departement, Public Works Ministry, Kairo, zu Messungen im Nil bestimmt und wurde durch Schleppversuche in Albasia (Ägypten) und noch auf eine andere, hier nicht näher zu erörternde Weise nachgeeicht. Sämtliche Eichungen stimmten auf das genaueste überein.

¹⁹⁾ Ott, A.: Moderne Instrumente der Hydrometrie. Kempten, Bayern. Liste 123, S. 41, Fußnote. — Diese Liste ist z. Z. vollständig vergriffen, eine Neubearbeitung im Druck.

²⁰⁾ Vgl. unter ¹⁶⁾, S. 9f. Weitere Beispiele auch unter ¹⁵⁾, S. 36—38.

²¹⁾ Nr. 18 der „Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft“, Bern 1926, S. 157.

Die Veröffentlichung Nr. 18 kam mir kurz vor Fertigstellung meines Manuskriptes in die Hände. Inhaltlich deckt sie sich hinsichtlich der Beurteilung des Genauigkeitsgrades von Flügelmessungen vollkommen mit meinen Ausführungen.

In Teil I: „Essais comparatifs dans les canaux de fuite de l'usine d'Amsteg“ berichtet F. Kuntschen über mustergültige und vorbildliche vergleichende Wassermessungen im Elektrizitätswerk Amsteg im Jahre 1923, deren Endergebnisse ich auf S. 28 kurz mitgeteilt habe.

In Teil II: „Le moulinet hydrométrique et la mesure de courants très rapides“ teilt derselbe Verfasser seine interessanten Versuche mit Flügeln bei abnorm großen Wassergeschwindigkeiten mit.

In Teil III bringt A. Strickler seine beachtenswerten „Untersuchungen über hydrometrische Flügel“ aus dem Jahre 1924. Soweit sie sich auf die Aufstellung einer Flügelgleichung beziehen, fällt es auf, daß die Normenkommission des schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Vereins diese ihr vorgelegte Untersuchung nicht benützt, sondern eine eigene, von ganz anderen Gesichtspunkten ausgehende Flügelgleichung aufgestellt hat. Es dürfte aber sowohl die eine wie die andere Ableitung durch die 1925 erschienene, im übrigen vor Herauskommen der Schweizer Normen beendete Ottische Arbeit: „Theorie und Konstantenbestimmung des hydrometrischen Flügels“ überholt sein.

²²⁾ Normen für Wassermessungen bei Durchführung von Abnahmeversuchen an Wasserkraftmaschinen. Aufgestellt vom Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein 1924, S. 22.

²³⁾ Vgl. unter ²¹⁾, S. 152—153 und 162.

²⁴⁾ Messung der Geschwindigkeitsverteilung mit dem Hitzdraht-Anemometer in der Grenzschicht längs einer ebenen Oberfläche. Zeitschr. f. angew. Math. u. Mech. Bd. 4 (1924), Nr. 6, S. 521.

Ludowici, W.: „Messungen in der Grenzschicht strömender Gase“, Z. d. V. d. I., Bd. 70 (1926), Nr. 34, S. 1122.

²⁵⁾ Rateau, A.: Expériences et théories sur le tube de Pitot et le moulinet de Woltman. Annales des Mines, Mars 1898. — Note complémentaire, Ann. des Mines, Juillet 1902.

²⁶⁾ Harlacher, A. R.: Die Messungen in der Elbe und Donau und die hydrometrischen Apparate und Methoden des Verfassers. Leipzig 1881. — Dieses klassische Werk über den hydrometrischen Flügel und seine Anwendung verdient auch heute noch volle Beachtung.

²⁷⁾ Eine kurze Veröffentlichung über den von der Firma Trüb, Täubner & Co., Zürich, gebauten „DBF“-Flügel findet sich in der Schweiz. Bauztg. Bd. 81, Nr. 12, S. 149. — Der Kollektor des kleinen in den Flügel eingebauten Gleichstromgenerators hat nur 4 Lamellen. Es steht deshalb leider zu befürchten, daß bei ganz kleinen Geschwindigkeiten erhebliche Stromschwankungen auftreten, welche die Zeichnung der Pulsationskurve verzerren.

Schoklitsch, A.: Über die Bewegung des Wassers in offenen Gerinnen. Schweiz. Bauztg. Bd. 80 (1922), Nr. 5, S. 47, sowie derselbe in ?), S. 244.

²⁸⁾ Beyerhaus: Die Abflußmengenmessungen der Rheinstrombauverwaltung zu Coblenz in den Jahren 1901—1907. Jahrb. für die Gewässerkunde Norddeutschlands. Besondere Mitteilungen, Bd. 2, Nr. 3.

²⁹⁾ Vgl. unter ²¹⁾, S. 110—125.

³⁰⁾ Vgl. unter ¹⁵⁾, Anhang.

³¹⁾ Ambrohn, L.: Handbuch der Astronomischen Instrumentenkunde. Bd. 2, S. 1038 ff. Berlin: Julius Springer 1899.

³²⁾ Das „Detaillierverfahren“ nach Hajos ist — in Verbindung mit Schwimmflügeln — besonders durch die Arbeiten des ungarischen hydrometrischen Bureaus und dessen Berichte v. J. 1899 bekannt geworden.

³³⁾ Vgl. unter ²⁶⁾. Das Integrierverfahren nach Harlacher findet seit einigen Jahren in Verbindung mit dem Schwimmflügel bei Messungen in Flüssen und Strömen vielfach Anwendung, so beispielsweise im Paraná (Argentinien) und im

Rhein (Baden). — Die sehr vollkommene Einrichtung des Rhein-Vermessungsschiffs der Badischen Wasser- und Straßenbaudirektion mit einer Instrumententafel mit 6 elektrischen Tourenzählern und einem Chronographen mit 6 Schreibfedern ist auf der Internationalen Ausstellung für Binnenschifffahrt und Wasserkraftnutzung in Basel 1926 im Original ausgestellt worden. Die Vorzüge dieses Verfahrens bestehen in der raschen Durchführbarkeit der Messungen, sowie besonders darin, daß die Beobachtungen ohne großen Zeitaufwand sich schnell an Ort und Stelle auswerten lassen. Der etwas geringere Genauigkeitsgrad spielt bei solchen Messungen keine Rolle und wird durch die genannten Vorzüge reichlich aufgewogen.

Für Wassermessungen bei Wasserkraftanlagen scheidet dieses Verfahren selbstverständlich aus.

³⁴⁾ Vgl. unter ¹⁹⁾, S. 18.

³⁵⁾ Engels, H.: Handbuch des Wasserbaus, II. Aufl., Leipzig 1921, S. 308. — Die von Ott gegebene Anregung zur Querfahrtsmessung dürfte noch selten Anwendung gefunden haben. Wenigstens ist mir bis jetzt noch kein einziger Fall bekannt geworden, daß sie bei einer wichtigen Messung in die Praxis umgesetzt worden wäre.

Für die Querfahrtsmessung ist es sehr wichtig, daß die einzelnen Streifen so langsam durchfahren werden, daß die Komponente aus Fahrgeschwindigkeit und Wassergeschwindigkeit keinen größeren Winkel als 15—20° bildet, weil sonst aus den oben dargelegten Gründen kein Flügel imstande ist, richtig zu messen. Wäre z. B. die Wassergeschwindigkeit 0,20 m/sek, die Fahrgeschwindigkeit 0,25 m/sek, so würde die resultierende Geschwindigkeit einen Winkel von 39° mit der Flügelachse bilden, und der Flügel würde viel zu kleine Wassergeschwindigkeiten ergeben, weil bei dieser Winkelgröße der Flügel dem Kosinusetz bei weitem nicht mehr folgt.

Ähnliches gilt auch für das Integrierverfahren nach Harlacher. Beide Verfahren setzen daher zu ihrer erfolgreichen Durchführung eine verhältnismäßig große Wassergeschwindigkeit oder eine kleine Verschiebungsgeschwindigkeit des Flügels voraus. Eine Nichtbeachtung dieser Bedingung muß zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

³⁶⁾ Vgl. unter ²⁸⁾.

³⁷⁾ Vgl. die diesbezüglichen Angaben unter ⁹⁾.

³⁸⁾ Vgl. unter ¹⁰⁾; gute Abbildung bei Perrochet.

³⁹⁾ Vgl. unter ²⁶⁾ und ²⁸⁾.

⁴⁰⁾ Streiff, A.: Consulting Engineer, 602 Peoples National Bank Bldg. Jackson, Michigan. Use of Tschebyscheffs Formula in Current Meter Measurements. January 1925. Nur als Handschrift vervielfältigt.

⁴¹⁾ Vgl. Hütte, 25. Aufl., Bd. I, S. 161: Ich gebe zur Vervollständigung der Tabelle nach der Streiff'schen Handschrift noch die Werte von x für $n = 6, 7$ und 9 , auf 5 Stellen abgerundet, nachstehend an:

$$\begin{array}{l} n = 6 \quad x_1 = 0,86625 = -x_6, \quad x_2 = 0,42252 = -x_5 \\ \quad \quad x_3 = 0,26664 = -x_4 \\ n = 7 \quad x_1 = 0,88386 = -x_7, \quad x_2 = 0,52966 = -x_6 \\ \quad \quad x_3 = 0,32391 = -x_5, \quad x_4 = 0 \\ n = 9 \quad x_1 = 0,91159 = -x_9, \quad x_2 = 0,60102 = -x_8 \\ \quad \quad x_3 = 0,52876 = -x_7, \quad x_4 = 0,16791 = -x_6, \quad x_5 = 0. \end{array}$$

⁴²⁾ Über die Gestalt der Vertikalgeschwindigkeitskurve, hauptsächlich in natürlichen Gerinnen (Flüsse und Ströme) sind schon recht umfangreiche Abhandlungen geschrieben worden, über die z. B. Jasmund im Handbuch der Ingenieurwissenschaften III. Teil, Bd. 1, S. 444—487 berichtet.

Neuerdings empfiehlt Ott für die Vertikalgeschwindigkeitskurve die Gleichung $v = v_0 \sqrt[n]{1 - t/t_a}$, wobei v die Geschwindigkeit in der Tiefe t , v_0 die Geschwindigkeit an der Oberfläche und t_a die ganze Wassertiefe bedeutet. Der Wurzelexponent n kann zwischen 4 und 12 schwanken. Nach dieser Formel wäre, unabhängig vom Exponenten n , die Geschwindigkeit in 0,60 der Wassertiefe gleich der mittleren Geschwindigkeit (genauer die Geschwindigkeit in 0,58 der Wassertiefe gleich dem 0,99fachen der mittleren Geschwindigkeit), sowie auch das Mittel aus den Geschwindigkeiten in $1/6$ und $5/6$ oder $1/5$ und $4/5$ der Tiefe ebenfalls gleich der mittleren Geschwindigkeit (genauer das Mittel aus den Geschwindigkeiten in 0,18 und 0,82 der Tiefe gleich dem 1,003fachen der mittleren Geschwindigkeit). Diese Beziehungen werden für natürliche Flüsse von der Praxis oft bestätigt. Vgl. hierzu:

Hoyt, C. J. and Grover, N. C.: River Discharge, S. 59—60. 4. Aufl. 1921. John Wiley & Sons, New York.

Grunsky: Hydrometrische Messungsverfahren in den Vereinigten Staaten Amerikas, S. 35. Dresden 1910.

Gravelius, H.: Flußkunde, S. 99. Berlin 1914.

In den offenen, künstlichen Gerinnen der Turbinenläufe ist von einem solchen gesetzmäßigen Verlauf der Vertikalgeschwindigkeitskurven meist wenig zu finden.

⁴³⁾ In meinen im Druck befindlichen „Maschinen-Untersuchungen“ Bd. 1: „Hydraulik in ihren Anwendungen“. Berlin: Julius Springer, ausführlich mitgeteilt.

⁴⁴⁾ Nach persönlichen Mitteilungen.

⁴⁵⁾ In ⁴³⁾.

⁴⁶⁾ Vgl. unter ⁹⁾.

⁴⁷⁾ Mitteilungen der Abteilung für Wasserwirtschaft, Nr. 2, Bern 1913.

⁴⁸⁾ Vreeddenburgh, C. G. J.: Über einige neue Anwendungen der chemischen Wassermeßmethode durch den Dienst für Wasserkraft und Elektrizität. De Waterstaats-Ingenieur Nr. 5, 1923.

⁴⁹⁾ In ²¹⁾, Teil I.

⁵⁰⁾ Nach einer von der Normenkommission des S. I. A. auf der internationalen Ausstellung für Binnenschifffahrt und Wasserkraftnutzung in Basel 1926 ausgehängten Zahlentafel. Vgl. auch Schweiz. Bauztg. Bd. 88 (1926), Nr. 1, S. 13 u. 29.

⁵¹⁾ Vgl. hierzu die Abbildungen I und II auf Tafel 3, nach S. 8 in ²¹⁾.

⁵²⁾ Vgl. unter ¹⁵⁾, S. 53—57.

⁵³⁾ Ähnliche Versuche sind mit dem Ott-Flügel Nr. 3930, Typ V, Abb. 10, mit Schaufelddurchmesser von 8 cm und Befestigung des Flügels an einem Flacheisen 120 × 30 mm, wie es zum verschiebbaren Einbau des Flügels in eine Rohrleitung nach dem Verfahren Dufour-Voith dient, auch im Flußbaulaboratorium der Technischen Hochschule Karlsruhe und in Schleppegerinne der Firma Ott gemacht worden. An letzterer Stelle haben sich für die verschiedenen Geschwindigkeiten von 0,5 bis 2,5 m/sek und für die Lagen *M* 1 in 5,5 cm Abstand von der Kanalsohle bzw. *L* 2 und *R* 2 in 5,0 cm Abstand von der linken bzw. rechten Wand die nachstehend angegebenen prozentualen Verminderungen der Umlaufzahlen ergeben:

Geschwindigkeit	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5 m/sek	
Lage <i>M</i> 1	0,0	0,4	0,5	0,8	1,2	%
Lage <i>L</i> 2 und <i>R</i> 2	0,3	1,1	1,7	2,0	2,1	%

⁵⁴⁾ Hahn, W.: Die Wassermessung bei Wasserkraftanlagen unter Berücksichtigung der Überfallmessung. Wasserkraft-Jahrbuch 1925, S. 262.

⁵⁵⁾ Derselbe, S. 263.