

Mitteilungen
über
Forschungsarbeiten

auf dem Gebiete des Ingenieurwesens

insbesondere aus den Laboratorien
der technischen Hochschulen

herausgegeben vom

Verein deutscher Ingenieure.

Heft 114.

Hochschild: Versuche über die Strömungsvorgänge in erweiterten und verengten Kanälen.

Berlin 1912

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Preis: 1 *M* für Lehrer und Schüler technischer Schulen,
2 *M* für sonstige Bezieher.

Eine Zusammenstellung des Inhaltes der Hefte 1 bis 107 der Mitteilungen über Forschungsarbeiten zugleich mit einem Namen- und Sachverzeichnis wird auf Wunsch kostenfrei von der Redaktion der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Berlin N.W., Charlottenstr. 43, abgegeben.

Heft 110 und 111: Untersuchungen an elektrisch und mit Dampf betriebenen Fördermaschinen.

Heft 112: E. Heyn und O. Bauer: Untersuchung eines gerissenen Flammrohrschusses. R. Baumann: Versuche mit Aluminium, geschweißt und ungeschweißt, bei gewöhnlicher und bei höherer Temperatur.

Heft 113: Walther: Versuche über den Arbeitsbedarf und die Widerstände beim Blechbiegen.

Bezugsbedingungen:

Preis des Heftes 1 Mk;

zu beziehen durch Julius Springer, Berlin W. 9, Linkstr. 23/24;

für Lehrer und Schüler technischer Schulen 50 Pfg,

zu beziehen gegen Voreinsendung des Betrages vom Verein deutscher Ingenieure, Berlin N.W. 7, Charlottenstraße 43.

Literarische Unternehmungen d. Vereines deutscher Ingenieure:

ZEITSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE.

Redakteur: D. Meyer.

Berlin N.W., Charlottenstraße 43

Geschäftstunden 9 bis 4 Uhr.

Expedition und Kommissionsverlag: Julius Springer, Berlin W. 9, Link-Str. 23-24.

Die Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure erscheint wöchentlich Sonnabends. Je einmal im Monat liegt ihr die Zeitschrift „Technik und Wirtschaft“ bei. Preis bei Bezug durch Buchhandel und Post 40 *M* jährlich; einzelne Nummern werden gegen Einsendung von je 1.30 *M* — nach dem Ausland von je 1.60 *M* — portofrei geliefert.

Anzeigen:

Das Millimeter Höhe einer Spalte kostet 25 Pf. Bei 6, 13, 26, 52 maliger Wiederholung im Laufe eines Jahres: 10, 20, 30, 40 vH Nachlaß.

Für Stellengesuche von Vereinsmitgliedern, die unmittelbar bei der Annahmestelle, Linkstraße 23-24, aufgegeben und vorausbezahlt werden, kostet das Millimeter Höhe einer Spalte nur 12 Pf.

Beilagen:

Preis und erforderliche Anzahl sind unter Einsendung eines Musters bei der Expedition zu erfragen. Die Beilagen sind frei Berlin zu liefern.

Den Einsendern von Ziffer-Anzeigen wird für Annahme und freie Zusendung einlaufender Angebote mindestens 1 *M* berechnet.

Bei Bewerbungen um Stellen, die ohne Namen ausgeschrieben sind, empfiehlt es sich nicht, Original-Zeugnisse beizufügen; die Expedition kann sich um die Wiedererlangung der beigefügten Zeugnisse, Zeugnis-Abschriften, Photographien, Zeichnungen usw. nicht bemühen und muß jede Verantwortung in dieser Beziehung ablehnen; ihre Tätigkeit beschränkt sich auf die Annahme und Weiterbeförderung der Angebote.

Schluß der Anzeigen-Annahme: Montag Vorm.; für Stellengesuche: Montag Abend 7 Uhr.

TECHNIK UND WIRTSCHAFT.

MONATSSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE.

REDAKTEUR D. MEYER.

IN KOMMISSION BEI JULIUS SPRINGER BERLIN.

Bezugsbedingungen: Die »Technik und Wirtschaft« liegt der ganzen Auflage der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure (Preis des Jahrgangs 40 *M*) allmonatlich bei. Sie ist außerdem für 8 *M* für den Jahrgang durch alle Buchhandlungen und Postanstalten sowie durch die Verlagsbuchhandlung von Julius Springer zu beziehen.

Anzeigen: Die ganze Seite 100 *M*, $\frac{1}{2}$ Seite 50 *M*, $\frac{1}{4}$ Seite 25 *M*, $\frac{1}{8}$ Seite 12,50 *M*. Ein kleinerer Raum als $\frac{1}{8}$ Seite wird nicht abgegeben. Bei 3 6 12 maliger Wiederholung im Jahre. 5 10 20 vH Nachlaß.

Beilagen: Preis und erforderliche Anzahl sind unter Einsendung eines Musters bei der Verlagsbuchhandlung von Julius Springer zu erfragen. Auflage des Blattes 27000.

Mitteilungen
über
Forschungsarbeiten

auf dem Gebiete des Ingenieurwesens

insbesondere aus den Laboratorien
der technischen Hochschulen

herausgegeben vom

Verein deutscher Ingenieure

Heft 114.



Berlin 1912

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01687-9

ISBN 978-3-662-01982-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-01982-5

Inhalt.

	Seite
Versuche über die Strömungsvorgänge in erweiterten und verengten Kanälen. Von Dr.-Ing. Heinrich Hochschild	1

Versuche über die Strömungsvorgänge in erweiterten und verengten Kanälen.

Von Dipl.-Ing. **Heinrich Hochschild.**

Einleitung.

Die im Folgenden dargestellten Untersuchungen sollten zur Klärung der Strömungsvorgänge in erweiterten Kanälen beitragen, Vorgänge, wie sie bei Turbinenpumpen und Turbogebläsen in Frage kommen und für die Technik von großer Bedeutung sind. Andererseits sind derartige Untersuchungen nicht ohne theoretischen Wert, zumal im Vergleich mit den Vorgängen in verengten Kanälen, die demgemäß mit in den Bereich der Untersuchungen gezogen wurden. Als Versuchsplan wurden die Gedanken zugrunde gelegt, die Hr. Prof. L. Prandtl in seinen Studien über die strömende Bewegung von Gasen und Dämpfen über den Zusammenhang der Strömungserscheinungen mit der inneren Flüssigkeitsreibung entwickelt hat. Diese Gedanken sollen nach dem Manuskript, das mir Hr. Prof. Prandtl zur Verfügung gestellt hat, mit seinem Einverständnis hier wiedergegeben werden.

Gleiten zwei benachbarte Flüssigkeitsteilchen so übereinander weg, daß in der Entfernung dy ein Geschwindigkeitsunterschied dw herrscht, so entsteht dadurch in den Gleitflächen eine Schubspannung $\tau = k \frac{dw}{dy}$. Die Größe k heißt Koeffizient der inneren Reibung oder auch Zähigkeit kurzweg.

Bei den technisch wichtigen Flüssigkeiten, wie Wasser und Luft, ist die Zähigkeit zwar sehr gering; trotzdem zeigen die Versuche, daß die Reibung nicht vernachlässigt werden darf, da nur in seltenen Fällen die Erfahrung die Theorie der reibungslosen Flüssigkeit bestätigt. Ist der Einfluß der inneren Reibung in der freien Flüssigkeit verschwindend, so kommt er doch an den festen Wänden in Betracht, wo ein schroffer Uebergang der Geschwindigkeit auf null stattfindet, um so schroffer, je geringer die Zähigkeit ist.

Die Reibungsvorgänge in den »Grenzschichten« haben sich als die Quelle der meisten hydraulischen Verluste erwiesen. Die bekannte Beobachtung, daß sich der Flüssigkeitsstrom in stark erweiterten Kanälen oder auf der Rückseite eines der Strömung entgegenstehenden Körpers ablöst, findet im Folgenden seine Erklärung: Ueberall, wo die freie Strömung neben den Grenzschichten verzögert wird, greifen auch die verzögernden Kräfte an den Teilchen der Grenzschicht an, die durch die Reibung schon einen Teil ihrer lebendigen Kraft eingebüßt haben. Die verzögernden Kräfte (Anstieg des Flüssigkeitsdruckes z. B.) bringen die Teilchen zum Stillstand und Umkehren, während die freie Flüssigkeit weiter strebt. Es lösen sich Teilchen der Grenzschicht ab,

bilden Wirbel, die die ganze Strömung wesentlich beeinflussen. Bei starker Verzögerung tritt ein Ablösen der ganzen Strömung von der Wandung auf.

Bei gleichförmiger Geschwindigkeit scheint sich die Grenzschicht im labilen Zustand zu befinden, da auch hier Wirbelbildung beobachtet wird.

Bei genügend stark beschleunigter Bewegung ist nichts dergleichen zu erwarten, da die Teilchen, die eine Geschwindigkeitseinbuße erlitten haben, durch die beschleunigenden Kräfte doch immer wieder in der Strömungsrichtung in Bewegung gesetzt werden. Es werden also die an den Kanalwänden entstehenden Verluste bei beschleunigter Bewegung kleiner ausfallen als bei gleichförmiger Bewegung, und diese wieder kleiner als bei verzögerter.

Die Versuche wurden im Institut für angewandte Mechanik der Universität Göttingen mit Unterstützung des Vereines deutscher Ingenieure durchgeführt.

Ich möchte an dieser Stelle dem Vereine deutscher Ingenieure für die Gewährung der erforderlichen Mittel meinen Dank aussprechen.

Zu aufrichtigem Danke bin ich Hrn. Prof. Prandtl verpflichtet, der mir die Bearbeitung der Aufgabe übertrug, mit größtem Interesse das Fortschreiten der Arbeit verfolgte und mir jederzeit wohlwollende Unterstützung zuteil werden ließ.

1) Die Versuchseinrichtung.

a) Das Versuchsgesetz.

Das Versuchsgesetz sollte es ermöglichen, an jedem Punkte der oberen Fläche eines Kanals den Flüssigkeitsdruck und an jedem Punkte des Querschnittes die nutzbare Energie zu messen. Dies wurde durch folgende Anordnung erreicht. Der zu untersuchende Kanal wird aus zwei auswechselbaren Seitenteilen (Wangen) *W*, Fig. 1 bis 11, der Zunge *Z* und der Deckplatte *D* gebildet. Mit Hilfe eines Schraubenantriebes *S*¹⁾ kann der Kanal gegen die obere Deckplatte verschoben werden.

Für die Messungen wird die Zunge mit den aufgesetzten Seitenteilen in die Vorrichtung von vorn eingeschoben. Um einen Spalt zwischen der oberen Fläche der Wangen und der Deckplatte zu verhindern, werden Papierblätter unter die Wangen gelegt. Der Kanal wird dann mit Hilfe einer Lampe durchleuchtet und mit kleinen Blechsonden *C* abgetastet (Blechstärke 0,06 mm), Fig. 10 und 11.

Ein kleines mit dem Antrieb gekuppeltes Zeigerwerk *a*, Fig. 12, macht die Stellung des Kanals nach außen hin kenntlich. In der Deckplatte *D* sind die Meßvorrichtungen angeordnet. Sie bestehen aus einer drehbaren Scheibe *b* mit einer feinen Oeffnung *O* nahe dem Rande, wodurch sämtliche Punkte der Deckfläche erreicht werden können. Eine Reihe früherer, von anderer Seite ausgeführter Messungen²⁾ hat ergeben, daß die Größe der Oeffnung ohne Einfluß auf das Meßergebnis ist; wesentlich ist eine gute Abrundung der Oeffnung. Ein Kupferrohr *c* führt durch eine Manometerumschaltvorrichtung *d* zum Manometer.

Eine zweite Meßvorrichtung ist ein rechtwinklig gebogenes Röhrchen *R*, Fig. 13 und 14, das der Strömung entgegensteht. Es kann durch das Gewinde *g* gehoben und gesenkt und in dem Kegel *K*, Fig. 2, geschwenkt werden, erreicht also jeden Punkt des Querschnittes. Es ist aus drei miteinander hart verlöte-

¹⁾ Als Baustoff gelangte für die Zunge, die Wangen und die Spindel des Schraubenantriebes Deltametall zur Verwendung. Die übrigen Teile wurden aus Gelbguß angefertigt.

²⁾ Karl Büchner, Zur Frage der Lavalschen Turbinendüsen. Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 18 S. 89 ff.

ten Stahlröhren *a, b, c* hergestellt. Auf das äußerste Röhren wurde das Gewinde *g* hart angelötet, und unterhalb des Gewindes wurde es zwecks Führung vierkantig ausgeschmiedet. In das Röhren *c* wurde das eigentliche Meßröhren, das auswechselbar sein mußte, weich eingelötet. Zur Versteifung dienten zwei hart angelötete Winkel *e, f*, die außerdem den Vorteil hatten,

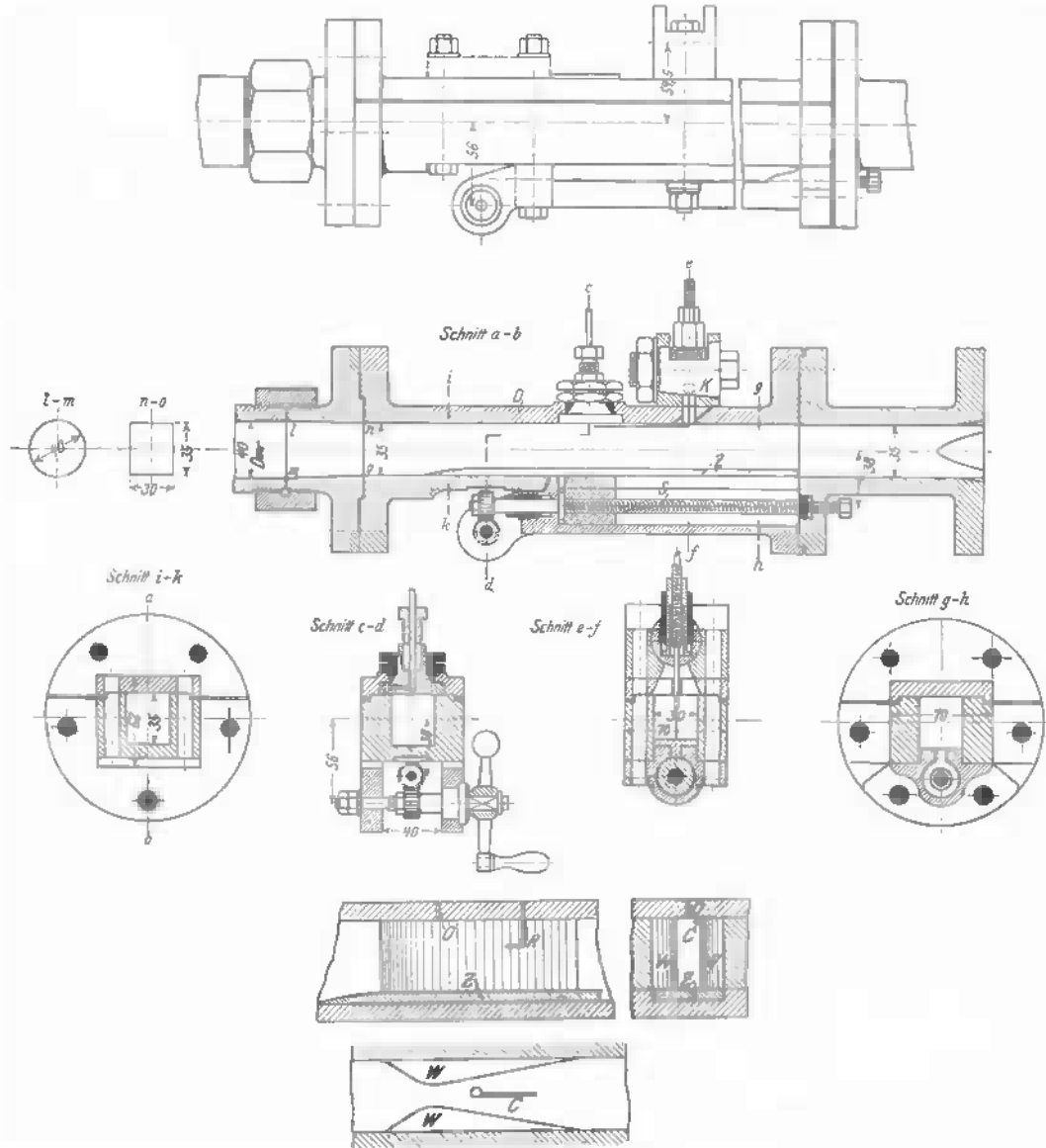


Fig. 1 bis 11.

einen guten Strömungsverlauf zu sichern. Um für die Untersuchung der Punkte an der Wandung ein gutes Anliegen zu ermöglichen, wurde das ganze an den Seiten zugeshärft. Bei der Wahl der Länge des wagerechten Teiles kommen zwei Gesichtspunkte in Frage. Es ist von Vorteil, die Länge groß zu wählen, um den Einfluß der Störungen auf die Mündung gering zu halten, die notwendigerweise an der Ausführungsstelle des Röhrens entstehen. Andererseits wird aber die

Beanspruchung auf Festigkeit mit zunehmender Länge wesentlich ungünstiger. Auch ist das Röhrchen bei geringerer Länge den schwingungserregenden Angriffen besser gewachsen. Aus diesen Gesichtspunkten wurde eine Länge von 20 mm gewählt.

Um die Stellung des Röhrchens jederzeit zu erkennen, war oberhalb des Gewindes ein dreispitziger Zeiger *e*, Fig. 12, angeklemt, dessen mittelste Spitze dazu diente, die Koordinaten des Röhrchens anzuzeigen, während die beiden andern eine gute Prüfung der Richtung des Röhrchens gestatteten. Die Meßöffnung wie auch das Meßröhrchen haben sich während der ganzen Zeit durchaus bewährt und zu Beanstandungen keinerlei Anlaß gegeben.

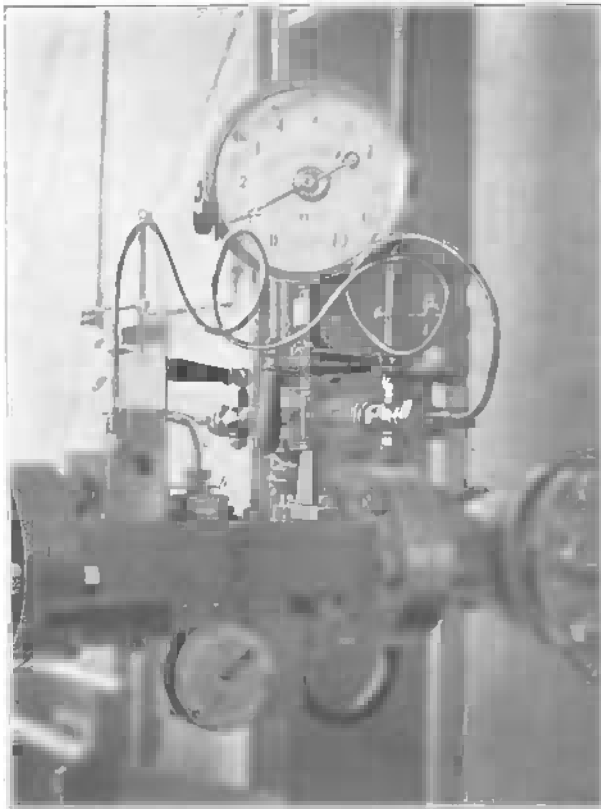


Fig. 12.

Zur Dichtung der Vorrichtung genügte ein dünnes Blatt Guttapercha, das auf die mittels der Lötlampe auf rd. 60° erwärmten Dichtungsflächen gebracht wurde.

Das Gerät trägt auf der Deckplatte noch ein Manometer, das den Druck vom Vakuum bis 10 kg/qcm absolut anzeigte. Es wurde durch Vergleich mit dem Quecksilbermanometer und dem Vakuummeter des Instituts geeicht und gestattete eine Ablesung auf 0,01 kg/qcm unter Schätzung der Hundertstel.

b) Die übrigen Versuchseinrichtungen.

Aus einem unter dem Fußboden des Maschinensaales befindlichen Behälter *B*, Fig. 17, wird das Wasser von einer Differentialpumpe angesaugt, Fig. 15. Die Differentialpumpe ist von gleicher Anordnung wie die des Maschinenlaborato-

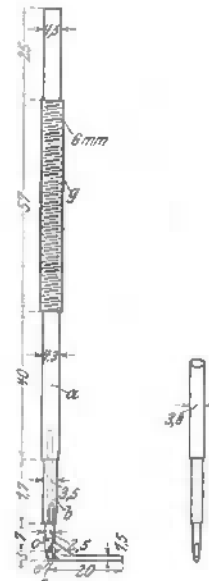


Fig. 13 und 14

rums der Königl. Technischen Hochschule Hannover, die von Prof. Frese beschrieben worden ist¹⁾. Sie hat austauschbare Kolben von verschiedenem Durchmesser, außerdem kann die Größe des Hubes verändert werden. Die Umlaufzahl der Pumpe ist in weiten Grenzen durch Änderung der Umlaufzahl des elektrischen Antriebmotors regelbar. Während der Versuche konnten mit Hilfe eines feinen Erregerwiderstandes W die Wirkungen kleinerer Spannungsschwankungen des elektrischen Leitungsnetzes ausgeglichen werden. Um eine gleichförmige Wasserdieferung zu erhalten, wurden die Versuche bei einer Umlaufzahl der Pumpe $n = 100$ bis 130 durchgeführt. Die Höchstdieferung der Pumpe betrug 7,5 ltr ltr/sk.

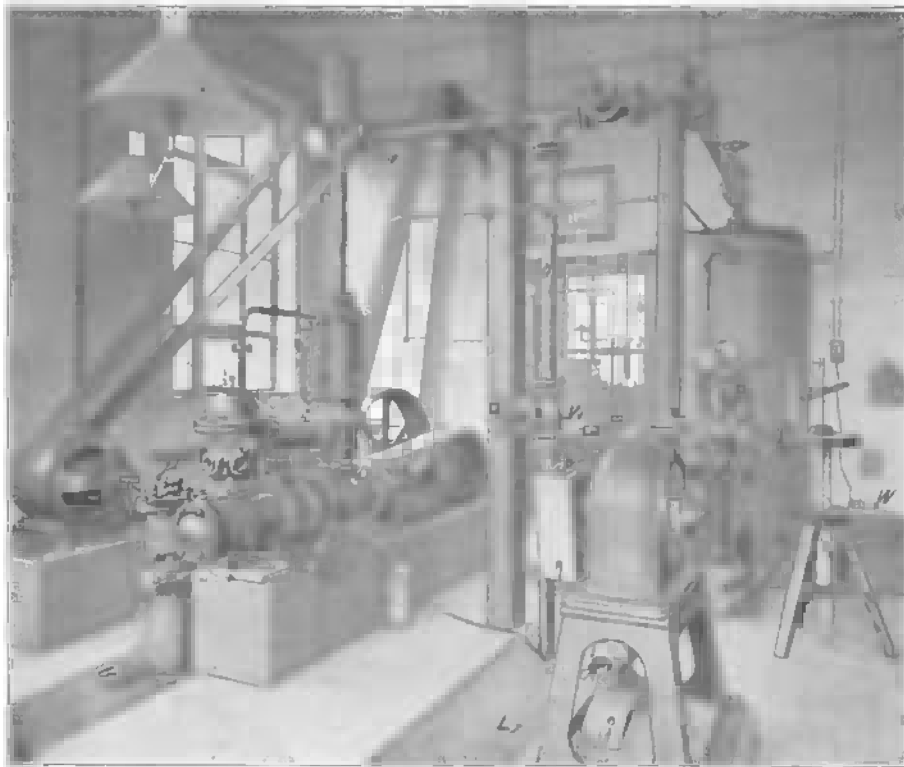


Fig. 15.

Von der Pumpe aus fließt das Wasser durch die Druckleitung L_1 einem Windkessel von 2 cbm Inhalt, 1 m Dmr. und 2,5 m Höhe zu. Zwei Wasserstandsrohre lassen die Höhe des Wasserstandes erkennen, die diesen entsprechenden Wassermengen sind durch Entleeren des Kessels und Wägung des ausfließenden Wassers bestimmt worden.

Von der Druckleitung ist eine Rohrleitung U abgezweigt, die unmittelbar nach dem Behälter zurückführt. Mit Hilfe eines Ventiles V_1 in dieser Umlaufleitung kann die durch den Versuchskanal fließende Wassermenge eingestellt werden. Ein kleines Abflußrohr mit Ventil V_2 , das unten am Kessel angebracht wurde, dient zur Feinregelung der Liefermenge.

¹⁾ F. Frese, Das Ingenieurlaboratorium der Königl. Technischen Hochschule zu Hannover, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1900 S. 201 u. f.

Um zu vermeiden, daß das Wasser in stark wirbelnder Bewegung in den Kessel eintritt, wurde das Zuleitungsrohr mit einem Rohrbündel und einer Brause versehen.

Durch einen an anderer Stelle¹⁾ beschriebenen Hahn *H*, Fig. 16, von 40 mm Bohrung strömt das Wasser vom Kessel aus durch ein Uebergangstück *K*₁, das

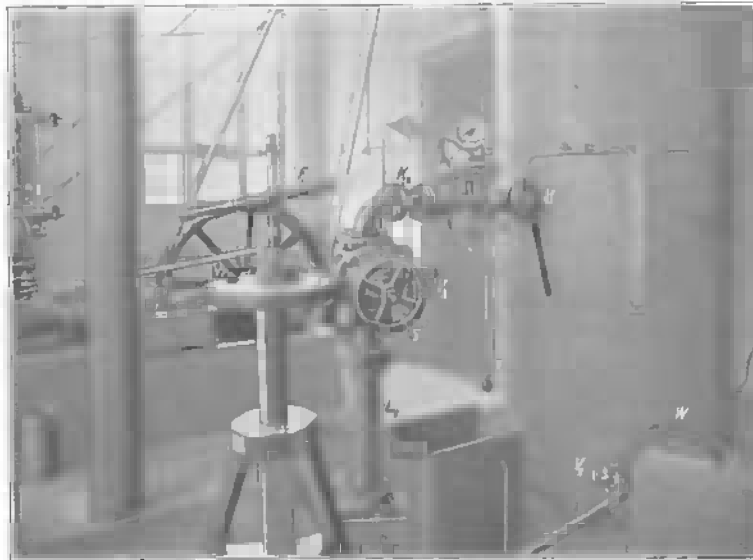


Fig. 16.



Fig. 17.

den runden Querschnitt des Hahnes in den rechteckigen des Apparates vermittelt. An dem Uebergangstück ist der Versuchskanal befestigt. Es ist darauf Wert gelegt, daß an keiner Stelle der Querschnitt erweitert wird, oder daß Störungen des Strömungsverlaufes durch plötzliche Querschnittänderungen und

¹⁾ Ernst Magin, Optische Untersuchung über den Ausfluß von Luft durch eine Lavaldüse. Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 62 S. 4.

schroffe Uebergänge auftreten können. Auf diese Weise, wie auch durch sorgfältige Bearbeitung des Hahnes wird eine störungsfreie Wasserzuströmung gewährleistet. Hinter dem Kanal durchfließt das Wasser ein zweites Uebergangsstück K_2 , das zur Aufnahme der vorgeschobenen Zunge dient, einen Absperrschieber S mit einem kleinen Umlaufventil V_3 zur Feineinstellung der Drosselung. Durch eine Rohrleitung L_2 wird das Wasser einem mit geeichten Bodenmündungen versehenen Meßbottich M , Fig. 17, zugeführt und fließt von hier aus in den Behälter B zurück. Das Ende der Rohrleitung wurde ebenfalls mit Sieben versehen, wie auch die Ausflußöffnungen des Meßbottiches von einem großen Siebe umgeben sind, das die leicht eintretende Trichterbildung zurückdrängt.

c) Der Meßbottich und seine Eichung.

Der Meßbottich, Fig. 17, hat zwei kreisförmige Bodenöffnungen von $f = 16,86$ und $26,54$ qcm Fläche. Die ausfließende Wassermenge ist der Wurzel aus der Spiegelhöhe proportional. Solange die Zufußmenge von der Abflußmenge verschieden ist, ändert sich die Spiegelhöhe, ihr entsprechend die Ausflußmenge, bis schließlich der Spiegel sich auf gleichbleibende Höhe einstellt und die Abflußmenge gleich der Zufußmenge ist. Mit Hilfe eines Fernrohres F , Fig. 16, konnte vom Meßkanal aus die Spiegelhöhe h an einem Maßstab Z , Fig. 17, durch Beobachten einer Schwimmermarke abgelesen werden. Es mußte noch die Spiegelhöhe durch Eichung mit der Ausflußmenge in Beziehung gesetzt werden. Dies geschah in der Weise, daß zunächst am Bottich ein Ausflußversuch vorgenommen wurde, d. h. die Spiegelsenkung und die zugehörige Ausflußzeit gemessen wurden.

Fließt in der Zeit dt die Menge $V = \mu v f dt$ aus (wobei v die Geschwindigkeit, μ der Kontraktionskoeffizient ist), so entspricht dies der Absenkung einer Wassermenge $F dh$.

Es ist also

$$\mu v f dt = - F dh \dots \dots \dots (1),$$

nun ist

$$v = \sqrt{2g(h-a)} \dots \dots \dots (2),$$

wobei h die Höhe auf dem Maßstabe abgelesen, und a die wirkliche Höhe der Bodenmündung über dem Nullpunkt des Maßstabes ist, also

$$\frac{\mu f \sqrt{2g} dt}{F} = - \frac{dh}{\sqrt{h-a}},$$

hieraus folgt für die Zeit t des Absinkens von h_0 auf h

$$t = \frac{2F}{\mu f \sqrt{2g}} (\sqrt{h_0 - a} - \sqrt{h - a}).$$

Bezeichnet man zur Vereinfachung $\frac{2F}{\mu f \sqrt{2g}}$ mit A , so erhält man

$$(t - A \sqrt{h_0 - a})^2 = A^2 (h - a)$$

oder in abgekürzter Schreibweise die Gleichung der Ausflußparabel

$$(t + \alpha)^2 = \beta (h - a).$$

Diese Parabel wurde durch Versuch in der oben angegebenen Weise bestimmt, und es ergaben sich für mehrere Beobachtungen (je 3 für jede Öffnung und beide zusammen) keine Abweichungen. (Genauigkeit bis 0,1 vH.)

Aus diesen Parabeln wurde durch Auftragen der zweiten Differenzen $\frac{\Delta^2 h}{\Delta t^2} = \text{rd.} \frac{a^2 h}{a t^2} = \frac{2}{\beta}$, die Größe von $\frac{2}{\beta}$ bestimmt.

Konstruiert man hieraus die Parabel: $t^2 = \beta h$, die durch geeignete Koordinatenverschiebung aus der obigen Parabel hervorgeht, so kann man die Höhe a der Bodenmündung in der Weise einfach ermitteln, daß man diese berechnete Parabel mit der gemessenen zur Deckung bringt.

Setzt man $h - a = h_w$ und stellt den Maßstab entsprechend ein, daß er die wirklichen Höhen über der Bodenmündung anzeigt, so ist

$$t = A (\sqrt{h_{0w}} - \sqrt{h_w}).$$

Setzt man $h_w = 0$, so ist

$$t = A \sqrt{h_{0w}} = \sqrt{\beta h_{0w}},$$

hieraus folgt

$$A = \beta^2 = \frac{2 F}{\mu f \sqrt{2 g}},$$

so folgt für μ

$$\mu = \frac{F}{f^2 \sqrt{2 g}} \left(\frac{2}{\beta}\right)^2.$$

$\frac{2}{\beta}$ ist durch die Messung bestimmt worden, die Größe von f ergab sich durch Ausmessen, die von F durch Auffüllen abgewogener Wassermengen. Für die sekundliche Wassermenge folgt:

$$Q = \frac{\Delta v}{\Delta t} = - F \frac{a h}{a t} = f \mu \sqrt{2 g h_w} = \left(\frac{2}{\beta}\right)^2 \frac{F}{f^2 \sqrt{2 g}} f \sqrt{2 g h_w} = \left(\frac{2}{\beta}\right)^2 \frac{F}{2} \sqrt{h_w}.$$

d) Das Differenzmanometer.

Mit Hilfe des Meßbottichs konnte wohl eine genaue Bestimmung der Durchflußmenge durchgeführt werden, jedoch war es nicht möglich, geringere

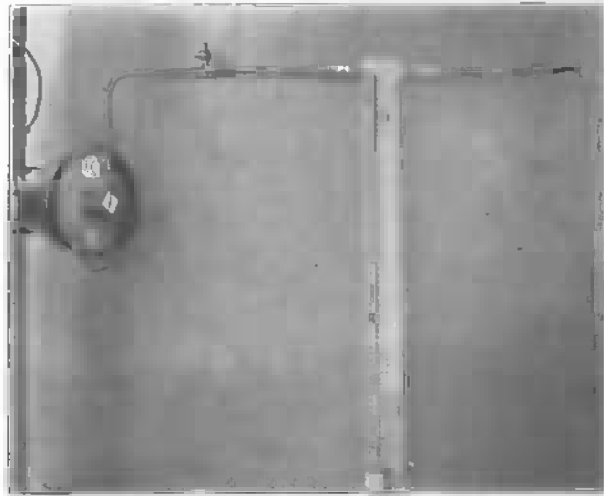


Fig. 18.

vorübergehende Schwankungen wahrzunehmen. Es handelte sich also darum, ein Meßgerät zu finden, das jede Schwankung sofort zu erkennen gab. Ein solches bot sich in der Verwendung eines Quecksilbermanometers, Fig. 18. Der eine Schenkel führte zu einer Bohrung im Hahnkörper, während der andre mit

einer Bohrung in der Kesselwandung in Verbindung stand. Der Höhenunterschied der Quecksilberspiegel gab also den Druckabfall vom Kessel nach dem Einströmkanal an und war somit dem Quadrat der Durchflußmenge proportional. Dieses Gerät hat sich vorzüglich bewährt und ermöglichte erst eine genaue Durchführung der Versuche.

II) Die Durchführung der Versuche.

a) Allgemeines.

Die Versuche wurden folgendermaßen durchgeführt. Bei geschlossenem Kesselhahn H , Fig 19, wurde der mit besonderm Manometer versehene Versuchskessel bis zum gewünschten Druck aufgepumpt. Gleichzeitig wurde durch das Schntüffelventil der Pumpe der Windkessel der Pumpe mit Luft aufgefüllt. War der gewünschte Druck erreicht, so wurde der Hahn geöffnet und aus

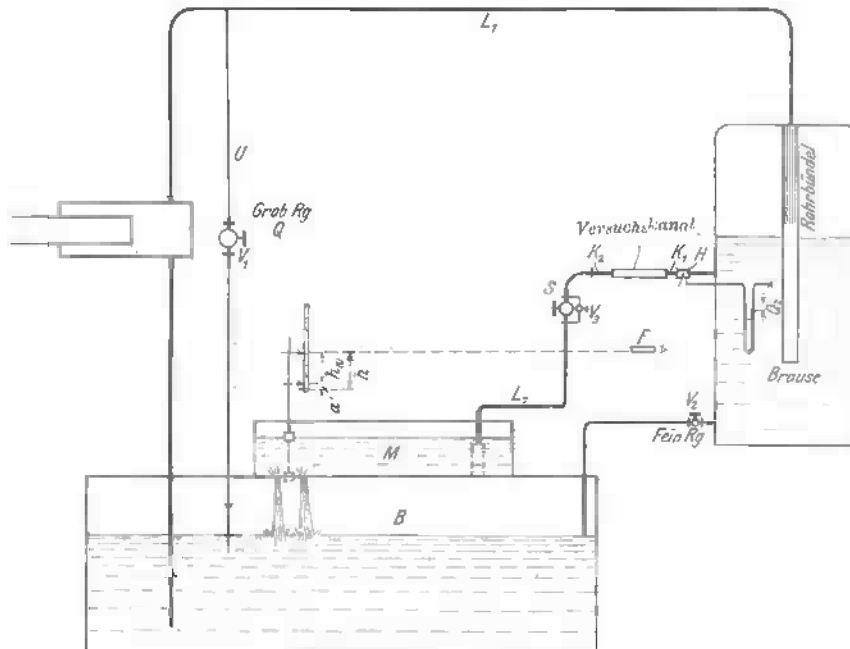


Fig. 19. Schema der Versuchsanordnung.

der sich einstellenden Quecksilberhöhe im Differenzmanometer die durchfließende Wassermenge bestimmt. Um diese nun einzustellen, wurde das große Umlaufventil U in der Druckleitung entsprechend geöffnet und gleichzeitig der Absperrschieber S hinter dem Kanal so eingestellt, daß bei der gewünschten Durchflußmenge auch der Kesseldruck sich unverändert auf der beabsichtigten Höhe hielt. Die Feineinstellung erfolgte durch geeignete Betätigung des kleinen Umlaufventiles am Absperrschieber V_3 , des am Kessel unten angebrachten Ventiles V_2 und durch Aenderung der Umlaufzahl des Elektromotors mit Hilfe des feinen Erregerwiderstandes. Sodann wurde der Wasserspiegel im Meßbottich durch Verschließen der Ausflußöffnungen auf die ungefähr zu erwartende Höhe gebracht.

Bis zur Erreichung des vollkommenen Beharrungszustandes verstrichen etwa weitere 10 bis 15 Minuten.

Die Messung wurde in der Weise durchgeführt, daß der zu untersuchende Kanal mittels des Schraubentriebes von cm zu cm verschoben wurde. Beim Verschieben machten sich Änderungen in der Drosselung hinter dem Kanal in der Einstellung des Differenzmanometers und des Kesselmanometers bemerkbar, die leicht durch Verstellen des kleinen Umlaufventiles beseitigt werden konnten. Für jede Stellung wurde beim Beobachten des Flüssigkeitsdruckes die Kreisscheibe an die zu untersuchenden Punkte über die Breite des Kanales gedreht oder bei der Untersuchung mittels des Röhrchens dieses in dem Kegel über die Breite des Kanales geschwenkt, seine Höhe jedoch während des Versuches unverändert gehalten. Für die genaue Untersuchung des Flüssigkeitsdruckes wurde, um etwaige Störungen an der Ausführungsstelle zu vermeiden, das Röhrchen herausgenommen und die Stelle mit einer vorgelöteten kleinen Platte verschlossen.

b) Die Abmessungen, Orientierung und Bezeichnungen.

Zur Bestimmung der Abmessungen des Kanales wurde nach beendigtem Versuch die Zunge mit beiden Wangen herausgenommen und die Höhen durch Ausmessung festgestellt. Dies geschah mit Hilfe einer kombinierten Schublehre und Mikrometerschraube, die vor Gebrauch auf Kalibern eingestellt wurde. Die Genauigkeit der Bestimmung betrug etwa $\pm 0,01$ mm. Die Ermittlung der Breiten wurde mit der gleichen Lehre an Gipsabgüssen, Fig. 20, vorgenommen.

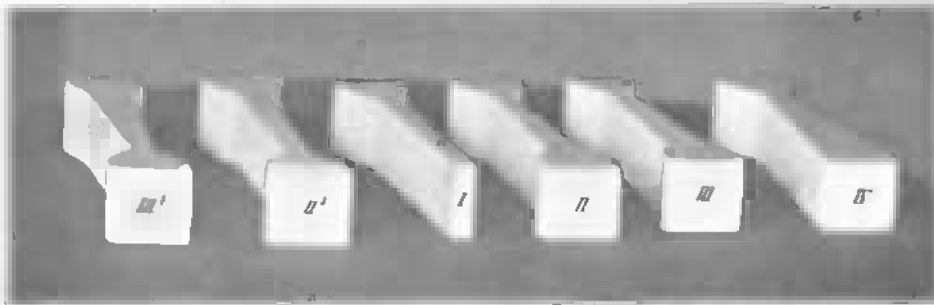


Fig. 20.

Es wurde hierzu feiner Modellergips verwendet, der Kanal vorher mit feinstem Knochenöl ausgewischt, das sich in kapillarer Schicht über die Oberfläche verbreitete. Nach dem Erhärten des Gipses wurden die Befestigungsschrauben der Wangen gelöst, und der Abguß konnte abgenommen und ausgemessen werden. Die Unterseite der Abgüsse zeigte den Abdruck der drei Befestigungsschrauben der Zunge, und dieser wurde dazu benutzt, die Abgüsse auf ein gemeinsames Koordinatensystem zu beziehen. Der Anfangspunkt dieses Systems wurde auf der Oberfläche der Zunge in der Symmetrieachse angenommen, und zwar an der Stelle, an der die verengte Einströmung des Kanales beginnt. Von hier aus wurde die Länge l in der Strömungsrichtung positiv gerechnet, die Breite b von der Symmetrieachse aus nach rechts negativ, links positiv, die Höhe h senkrecht nach oben.

Die Bezeichnung der Kanäle erfolgte mit römischen Ziffern (I bis IV), und zwar ist der parallele Kanal mit I, der am stärksten (in der Strömungsrichtung) erweiterte mit IV bezeichnet, Fig. 21. Sind die Kanäle in umgekehrter Richtung (verengt) verwendet, so führen sie als Bezeichnung außer der Zahl den Index »'«.

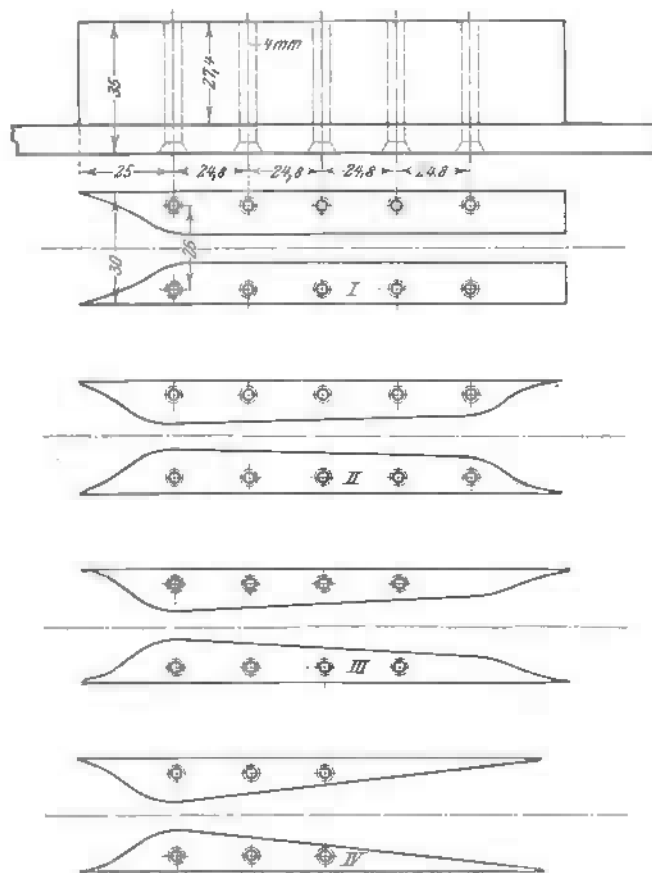


Fig. 31. Abmessungen der Kanäle.

c) Die Versuche.

Die Verteilung des Flüssigkeitsdruckes über die obere Fläche der Kanäle wurde für eine bestimmte Wassermenge mit Hilfe der Kreisscheibe für die erweiterten Kanäle gemessen.

In einer weiteren Reihe von Messungen wurde für verschiedene Wassermengen der Verlauf des Flüssigkeitsdruckes längs der Mittellinie der Deckfläche in den verengten und erweiterten Kanälen ermittelt. Hierbei wurden die Abhängigkeit des Vorganges vom Anfangsdruck und der Einfluß der im Wasser gelösten Luft untersucht.

Die letzte Gruppe von Messungen bezieht sich auf Untersuchung des Strömungsverlaufes mit Hilfe des der Strömung entgegenstehenden Röhrchens. Der Druck auf die Mündung eines solchen Röhrchens, dessen Achse in der Stromrichtung und dessen Mündungsebene senkrecht dazu liegt, ist der Summe der Druckhöhe und der Geschwindigkeitshöhe an der betreffenden Stelle gleich.

III) Die Bearbeitung des Zahlenmaterials.

Die Druckablesungen sind für die einzelnen Versuche in den Zahlentafeln in Hundertstel kg/qcm zusammengestellt. Der Barometerstand wurde für die Auswertung der Versuche nicht weiter berücksichtigt, da er während der Dauer

eines Versuches unverändert blieb und es für die Auswertung der Versuche nur auf den Unterschied des Druckes zwischen zwei Stellen des Kanales ankam und nicht auf die wirkliche Höhe des Druckes selbst. Es wurde also der Druck der Atmosphäre gleich 1 kg/qcm angenommen und die Angaben der Zahlentafeln auf den so gewonnenen Nullpunkt des absoluten Druckes bezogen.

A) Druckverteilung über die obere Fläche der Kanäle.

Die Ergebnisse sind in den Zahlentafeln 1 bis 4 zusammengestellt; in den Fig. 22 bis 25 sind sie in der Weise verwertet, daß die Punkte gleichen Druckes durch Linienzüge (Isobaren) verbunden sind.

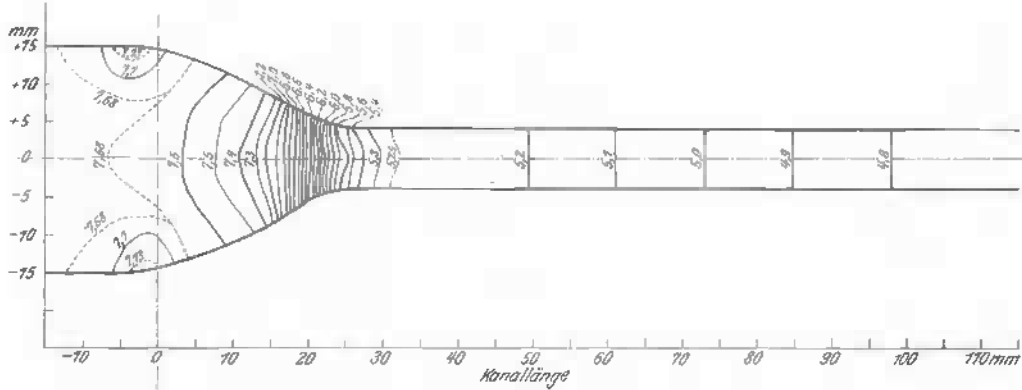


Fig. 22. Kanal I. Verteilung des statischen Druckes über die obere Fläche des Kanals (Isobaren).

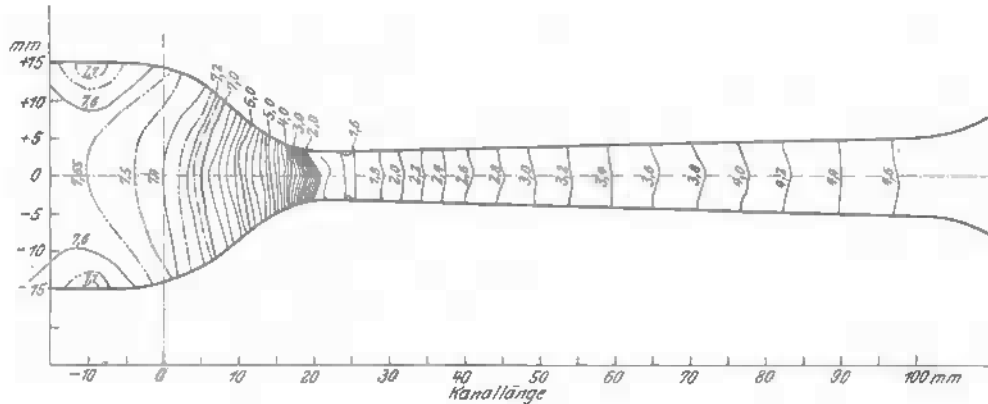


Fig. 23. Kanal II. Verteilung des statischen Druckes über die obere Fläche des Kanals (Isobaren).

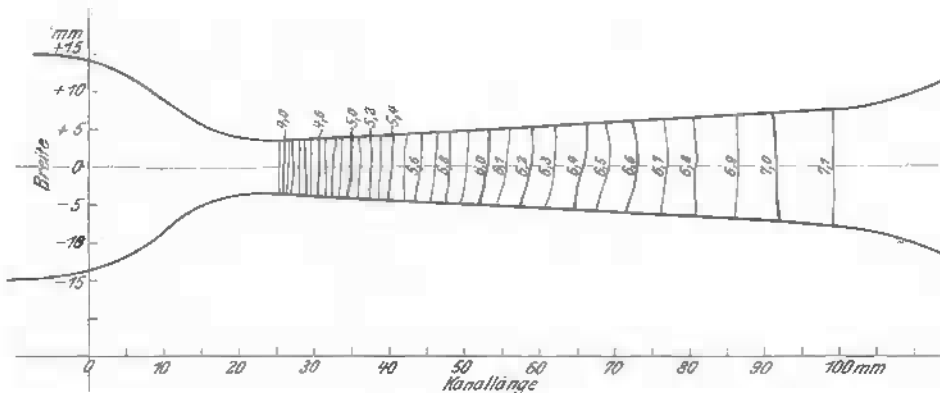


Fig. 24. Kanal III. Verteilung des statischen Druckes über die obere Fläche des Kanals (Isobaren).

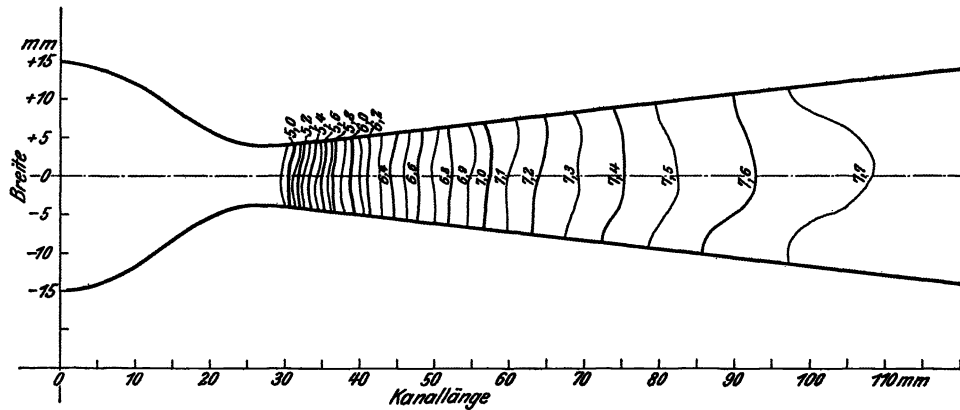


Fig. 25. Kanal IV. Verteilung des statischen Druckes über die obere Fläche des Kanals (Isobaren).

Ba) Verlauf des Flüssigkeitsdruckes längs der Symmetrielinie der Deckfläche des Kanales. Um zu untersuchen, inwieweit die Vorgänge bei einem bestimmten Druckgefälle im Versuchskanal von der absoluten Höhe des Anfangs- und Enddruckes abhängen, sind für verschiedene Höhen des Kesseldruckes, für mehrere Durchflußmengen die Flüssigkeitsdrücke in der Mittelachse der oberen Fläche bestimmt und die Ergebnisse in Zahlentafel 5 und in Fig. 26 veranschaulicht worden.

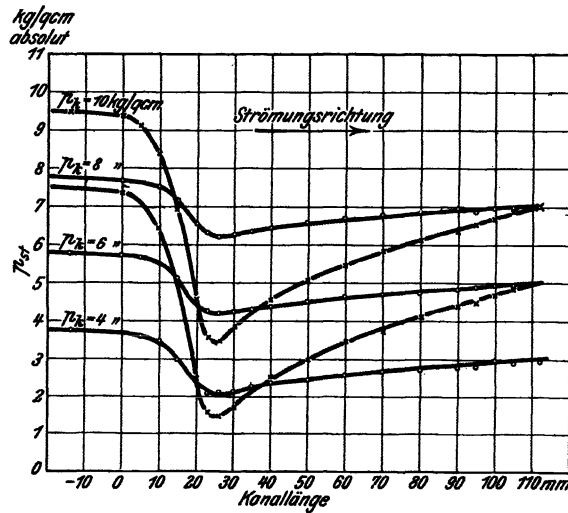


Fig. 26. Kanal II. Messung des statischen Druckes (p_{st}) bei verschiedenen Kesselldrücken (p_k).
(Zum Nachweis der Unabhängigkeit des Strömungsvorganges vom Anfangsdruck.)

o o o Durchflußmenge = 3,35 ltr/sk. x x x Durchflußmenge = 6,35 ltr/sk.

Bb) Zahlentafel 6 und 7 und Fig. 27 und 28 stellen den Vorgang dar, falls der Druck an der engsten Stelle so weit erniedrigt wird, daß die im Wasser gelöste Luft entweicht.

Bc) Die Messung der Druckverteilung über die Symmetrieachse der oberen Fläche des Kanales wurde zur Bestimmung der Verluste in folgender Weise benutzt, Zahlentafel 8 bis 13, Fig. 29 bis 34:

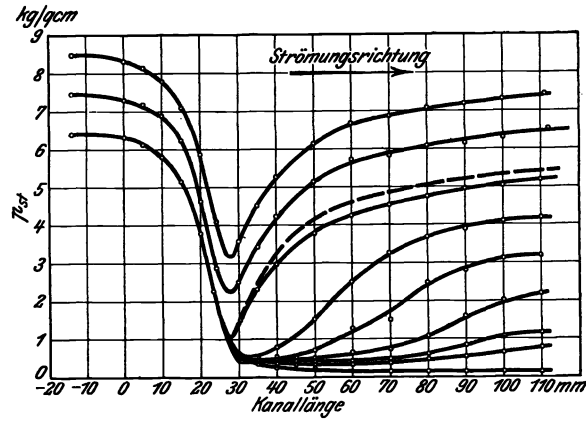


Fig. 27. Kanal IV. Messung des statischen Druckes bei gleich gehaltener Durchflußmenge und verschiedener Drosselung durch den Schieber hinter dem Kanal. Wassermenge = 7,87 ltr/sk.

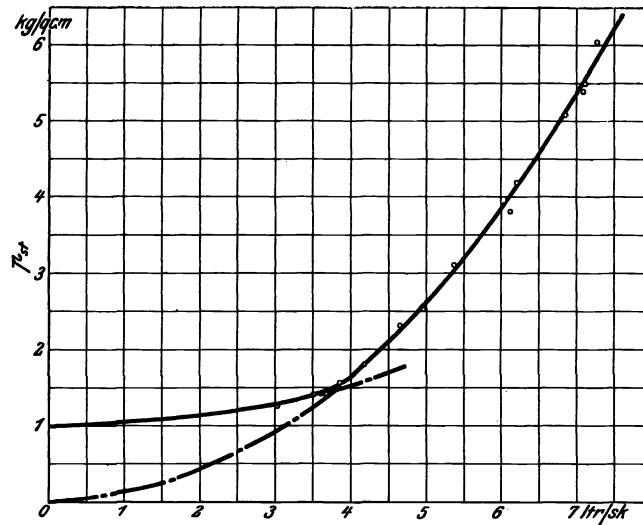


Fig. 28. Kanal IV. Größte Durchflußmengen bei verschiedenen statischen Drücken in der Einströmung (Stelle $l = -14$ mm) bei offenem Schieber hinter dem Kanal.

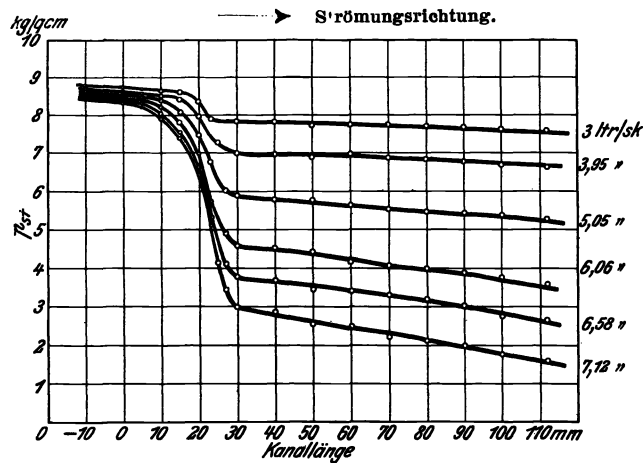


Fig. 29. Kanal I. Messung des statischen Druckes bei verschiedenen Durchflußmengen. Kesseldruck 9 kg/qcm.

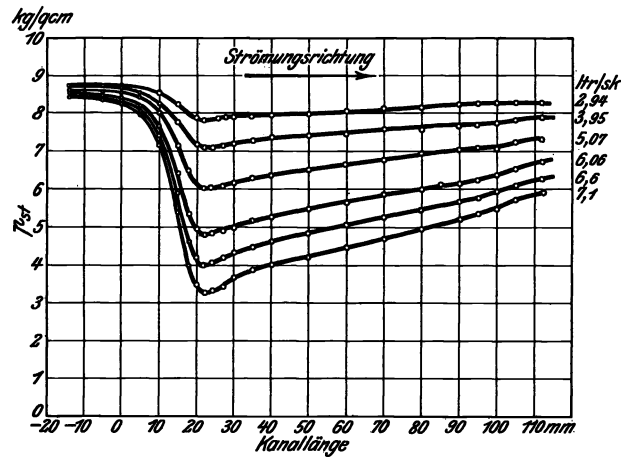


Fig. 30. Kanal II (erweitert). Messungen des statischen Druckes bei verschiedenen Durchflußmengen. Kesseldruck 9 kg/qcm.

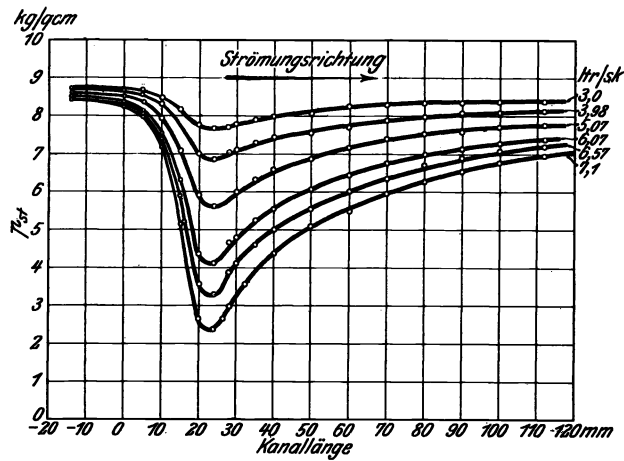


Fig. 31. Kanal III (erweitert). Messung des statischen Druckes bei verschiedenen Durchflußmengen. Kesseldruck 9 kg/qcm.

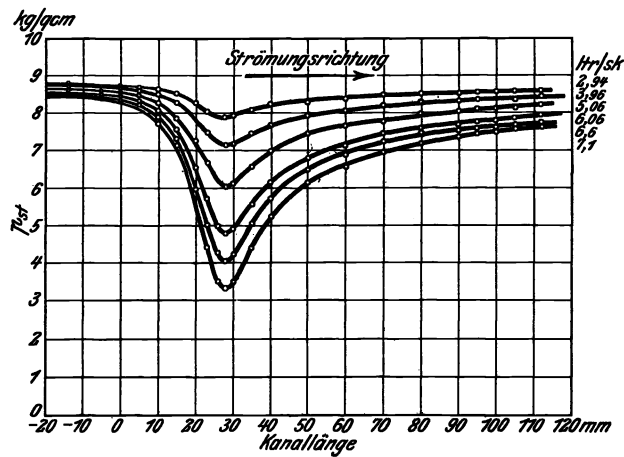


Fig. 32. Kanal IV (erweitert). Messung des statischen Druckes bei verschiedenen Durchflußmengen. Kesseldruck 9 kg/qcm.

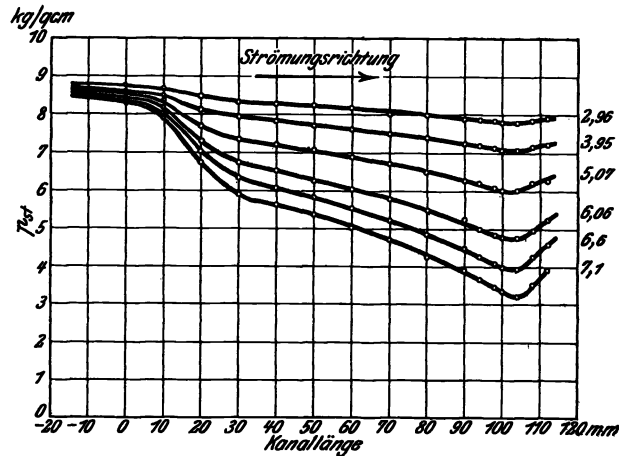


Fig. 33. Kanal II (verengt). Messung des statischen Druckes bei verschiedenen Durchflußmengen. Kesseldruck 9 kg/qcm.

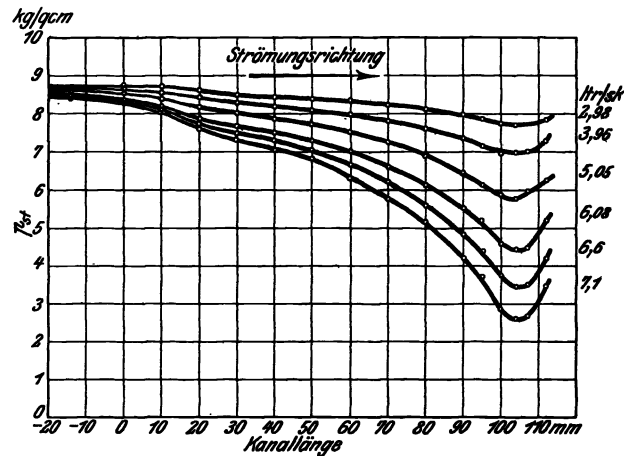


Fig. 34. Kanal III (verengt). Messung des statischen Druckes bei verschiedenen Durchflußmengen. Kesseldruck 9 kg/qcm.

Die Energiegleichung für die Strömung lautet:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p_{st} + gH + \Sigma \text{Verluste} = \text{konst.},$$

wobei v die Geschwindigkeit, ρ die Dichte des Wassers, p_{st} (statischer Druck) der Flüssigkeitsdruck ist. gH das Potential der Schwere ist hier, da es sich um wagerechte Kanäle handelt, unveränderlich, kann also mit der Konstanten auf der rechten Seite der Gleichung zusammengefaßt werden.

$\frac{\rho v^2}{2}$, die Geschwindigkeitshöhe (dynamischer Druck), ist für die Folge mit p_D bezeichnet und die Verluste Σ mit p_V .

Es ergibt sich die Beziehung

$$p_D + p_{st} + p_{Verl} = \text{konst.}$$

Die Größe p_{st} wird als Funktion der Länge durch den Versuch ermittelt. Der Geschwindigkeitsdruck p_D kann aus den Abmessungen der Kanäle berechnet werden.

Nimmt man an, was sowohl durch die Theorie¹⁾ gerechtfertigt erscheint, als auch durch die Versuche²⁾ bestätigt wird, daß in dem geraden erweiterten Teile der Versuchskanäle der Druck derartig verteilt ist, daß die Isobaren Kreisbögen um den Schnitt der Verlängerungen der geraden Begrenzungsflächen sind, so ergibt sich der für die Strömung an einer beliebigen Stelle in Betracht kommende Querschnitt als Produkt des zugehörigen Kreisbogens mit der Kanalhöhe. Aus den in Zahlentafel 14 zusammengestellten Breiten s der Kanäle, von Zentimeter zu Zentimeter gemessen, ergibt sich der mittlere Winkel, unter dem die Kanalwände gegeneinander geneigt sind:

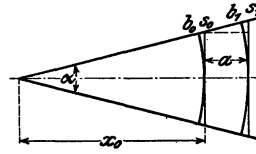


Fig. 35.

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{s_1 - s_0}{2a} \quad (a = 1 \text{ cm}), \quad \alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{s_1 - s_0}{2a},$$

aus α ergibt sich der Winkel im Bogenmaß zu $c = \frac{\pi \alpha}{180}$. Die Länge des Kreisbogens b_0 ergibt sich zu

$$b_0 = cx_0 = c \frac{a s_0}{s_1 - s_0}, \quad \text{da } (x_0 + a) : x_0 = s_1 : s_0, \quad \text{Fig. 35,}$$

und die Durchflußfläche zu $F = bh$ (Zahlentafel 15).

Die Höhe war nicht vollkommen gleich, sie ändert sich von 27,84 bis 27,27 mm auf eine Länge von 125 mm. Für die verschiedenen Kanäle ergaben sich im übrigen übereinstimmende Werte.

Es ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit v in m/sk zu

$$v = \frac{10 Q^{\text{ltr/sk}}}{F \text{ cm}^2} \quad (\text{Fig. 36}).$$

Die Geschwindigkeitshöhe p_D in kg/qcm zu

$$p_D = \frac{0,1 v^2 \text{ m}^2/\text{sk}^2 \cdot \gamma \text{ kg}/\text{dm}^3}{2 g \text{ m}/\text{sk}^2},$$

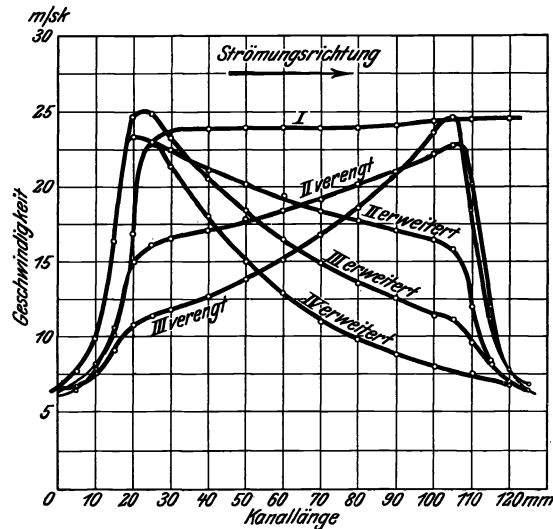


Fig. 36. Durchflußgeschwindigkeiten bei den verschiedenen Kanälen. Durchflußmenge 5 ltr/sk.

¹⁾ Vergl. Abschnitt V: Theoretisches zur Potentialströmung.

²⁾ Vergl. S. 29.

wobei γ das Gewicht eines ltr Wasser = 1 kg/cdm und g die Gravitationskonstante = 9,81 m/sk².

Die Rechnung ist teils logarithmisch, teils mit der Rechenmaschine auf 5 Dezimalen durchgeführt. In der Zahlentafel 15 sind die Werte für v auf 2 Dezimalen abgerundet. Die Werte beziehen sich auf eine Durchflußmenge $Q = 5$ ltr/sk.

Die Geschwindigkeitshöhe ist dem Quadrate der Durchflußmenge proportional. Falls die Verluste ebenfalls der Geschwindigkeitshöhe proportional sind, so erhält man, wenn man den gemessenen Flüssigkeitsdruck p_{st} abhängig von dem Quadrate der Durchflußmenge für eine Stelle $x = l$ aufträgt, eine Gerade. Diese Art der Abhängigkeit der Verluste von der Geschwindigkeitshöhe ergibt sich in der Tat aus den Versuchen; als Beispiel diene Fig. 37. Aus der Lage der

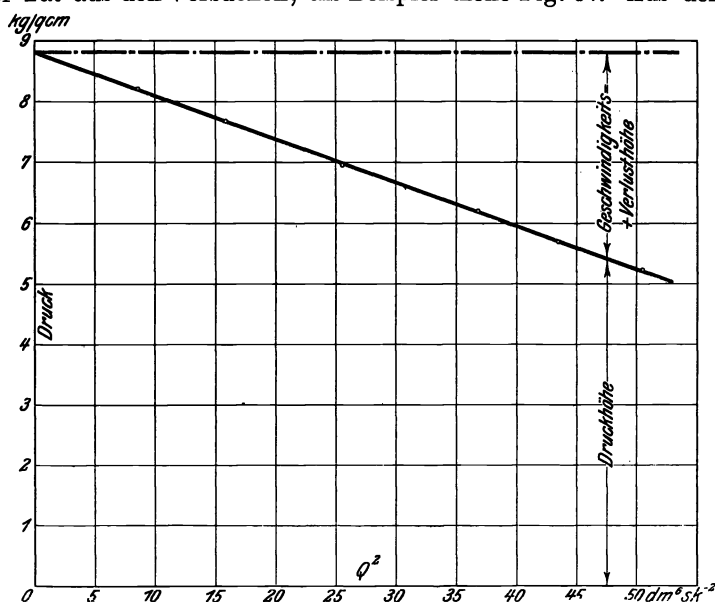


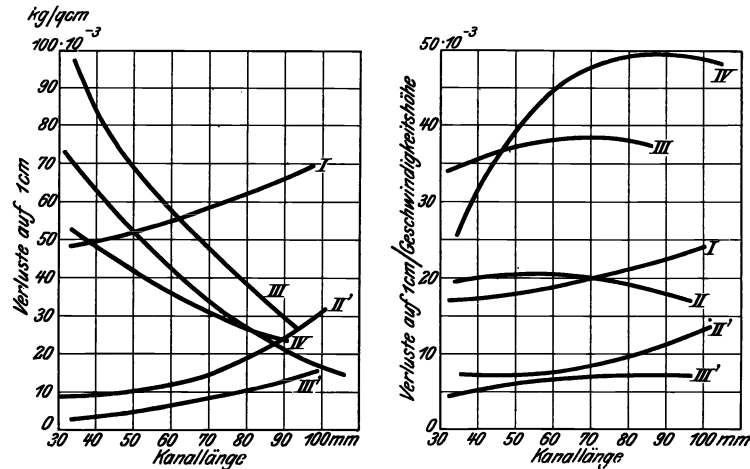
Fig. 37. Kanal IV. Druckhöhen an der Stelle 40 in Abhängigkeit vom Quadrat der Durchflußmenge.

Geraden für die Stelle $x = l$ wird der Flüssigkeitsdruck p_{st} für die Durchflußmenge 5 ltr/sk bestimmt; durch Subtraktion vom Anfangsdruck (Flüssigkeitsdruck für die Durchflußmenge 0) ergibt sich für die betreffende Stelle die Summe der gemessenen Geschwindigkeitshöhe und Verlusthöhe. Zur genauen Festlegung der Geraden sind Versuche für 2, 3, 4, 5, 6, 6,5, 7 ltr/sk durchgeführt worden.

Wird von der so erhaltenen Größe ($p_D + p_V$ gemessen) das berechnete p_D abgezogen, so erhält man die Verluste p_V . Die Verluste sind für den geraden Teil der Kanäle bestimmt und in Abhängigkeit von der Länge aufgetragen worden. Die Punkte wurden durch eine Kurve derart ausgeglichen, daß die Differenzenkurve einen glatten Verlauf aufwies.

Die Unterschiede für 1 cm Länge ergeben die Verluste auf 1 cm Kanallänge, Fig. 38. Hierbei ist noch zu berücksichtigen, daß bei der Messung die Lage des Kanales mittels des Schraubetriebes verändert wird, und zwar wurde bei sämtlichen Versuchen der Kanal der Strömungsrichtung entgegen verschoben, der Zuströmungskanal (von einem Querschnitt 30×35 mm¹) daher entsprechend verkürzt,

¹) $z = \beta l \frac{u}{F} \frac{v^2}{2g} \gamma$; $4 \beta = 0,012 + \frac{0,0018}{\sqrt{v d}}$.



Verluste auf 1 cm Kanallänge (aufgetragen über den 0,5 cm). Die mit dem Index ' versehenen Kurven beziehen sich auf verengte Kanäle.

Verluste auf 1 cm Kanallänge/Geschwindigkeitshöhe.

Fig. 38 und 39.

Hierdurch werden die Verluste zu klein beobachtet, und es sind zu den Verlusten auf 1 cm Kanallänge noch die Verluste dieses Zuströmungsteiles zu addieren. Diese sind rechnerisch zu $0,00052 \text{ kg/qcm}$ ermittelt worden.

Die Stelle 30 (Beginn des geradlinigen Teiles der Kanäle) wurde als Anfangspunkt für die zu untersuchende Strömung gesetzt, die Verluste von hier aus durch Addition der Verluste für 1 cm berechnet. Diese so ausgeglichenen Verluste wurden zur Bestimmung des Wirkungsgrades herangezogen. Durch diese Festsetzung ist bei den erweiterten Kanälen die verfügbare Energie durch die Geschwindigkeitshöhe an der Stelle 30 gegeben. Dieser Wert ist gleich 100 vH gesetzt, und in Fig. 40 und 41 sind, in Abhängigkeit von der Länge l des Kanales, Geschwindigkeitshöhe, Druckhöhe und Verluste in vH so aufgetragen, daß ihre Summe 100 ergibt:

$$p_D + p_u + p_V = \text{konst} = p_{D30} = 100 \text{ vH}; \quad p_{u30} = 0.$$

Für den parallelen Kanal ist, da keinerlei Umwandlung von statischer Energie in kinetische oder umgekehrt stattfindet, an jeder Stelle $p_u = 0$, $p_D + p_V = 100$ gesetzt, während bei den verengten Kanälen die Gesamtenergie durch die Geschwindigkeitshöhe am Ende des Kanales (Stelle 100) und der Summe der Verluste von der Stelle 30 bis zur Stelle 100 gegeben ist:

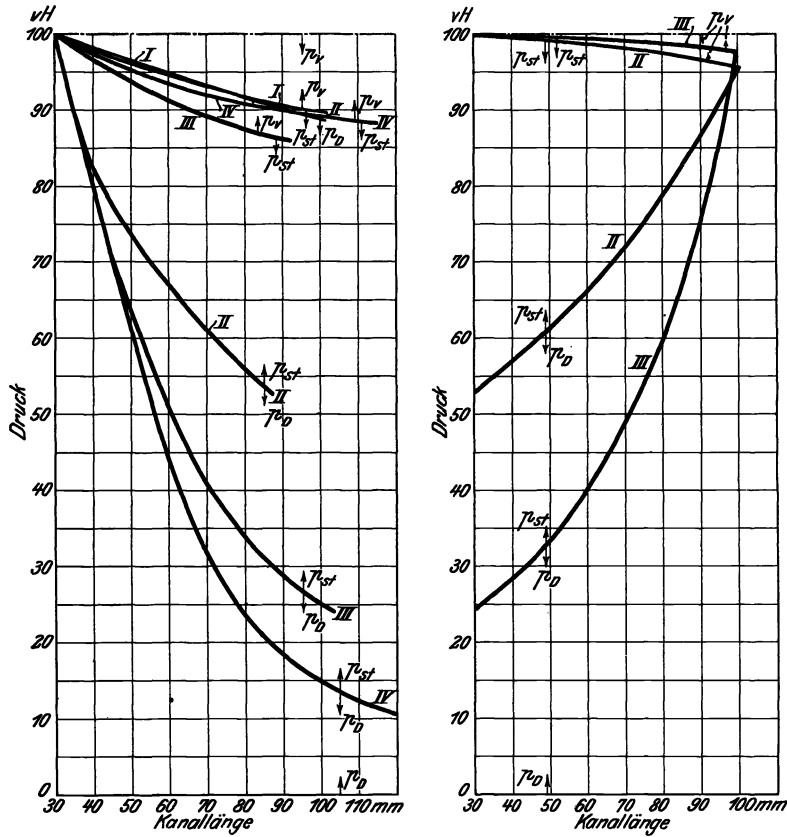
$$p_{u100} = 0; \quad p_{D100} + p_{V100} = \text{konst} = 100.$$

Für alle drei Fälle ist der Wirkungsgrad das Verhältnis der verfügbaren Energie zur Gesamtenergie und wird durch die Kurven $\text{konst} - p_V$ dargestellt.

In dieser prozentualen Auftragung lassen sich die verschiedenen Kanäle unmittelbar miteinander vergleichen, da ihre Abmessungen so gewählt sind, daß der engste Querschnitt für alle ungefähr gleich ist.

In Fig. 39 ist das Verhältnis: Verluste auf 1 cm Kanallänge zur Geschwindigkeitshöhe aufgetragen.

Um die Ergebnisse mit den Verhältnissen beim geraden Kanal vergleichen zu können, schließt sich die weitere Verarbeitung der Versuchsergebnisse an den üblichen Ansatz für die Verluste im geraden Kanal an, wobei diese pro-



Drücke in vH beim parallelen und den erweiterten Kanälen. Drücke in vH bei den verengten Kanälen.
 p_{st} = Druckhöhe. p_D = Geschwindigkeitshöhe. p_r = Verlusthöhe.

Fig. 40 und 41.

portional der Länge, der Geschwindigkeitshöhe und dem Verhältnis: benetzter Umfang zum Querschnitt gesetzt werden.

Für den rechteckigen Querschnitt lautet die Formel in Differentialform:

$$dz = \frac{\gamma}{2g} \beta \frac{u}{F} v^2 dx \quad \dots \quad (1),$$

nun ist $v = \frac{Q}{F}$, also

$$dz = \frac{\gamma}{2g} \beta \frac{u}{F^3} Q^2 dx \quad \dots \quad (1a).$$

Für einen rechteckigen Kanal beliebiger Form erhält man für die Verluste durch Integration

$$\Delta z = z_2 - z_1 = \frac{\gamma}{2g} \beta Q^2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{u}{F^3} dx \quad \dots \quad (2).$$

Der Koeffizient β kann nur unter der Voraussetzung als konstant vor das Integralzeichen gesetzt werden, daß der Integrationsweg $x_1 - x_2$ klein genug gewählt ist. Es ist hier die Integration von Zentimeter zu Zentimeter durchgeführt und β als Funktion der Kanallänge dargestellt, Fig. 42.

Der Umfang für die Stelle x ist durch die Beziehung

$$u_x = 2h + 2xc$$

und der Querschnitt F durch $F_x = hxc$ gegeben.

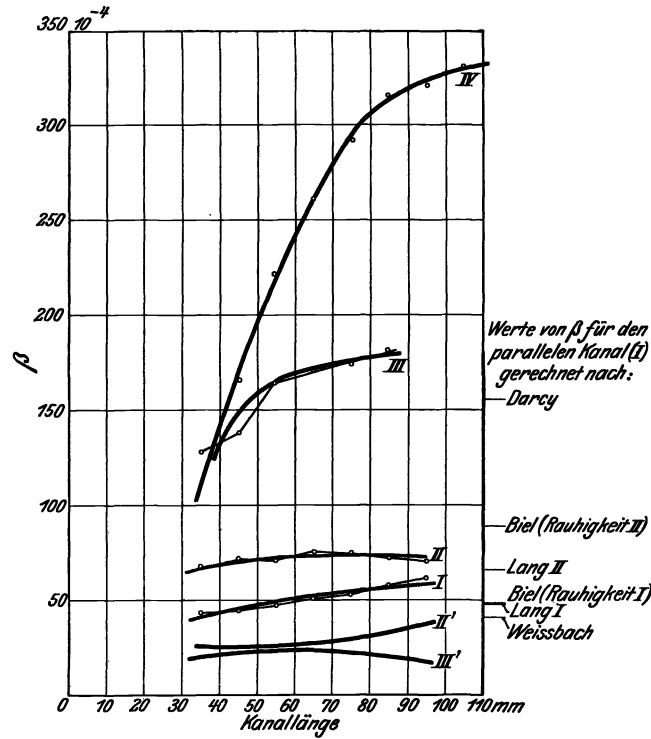


Fig. 42. Darstellung des Koeffizienten β aus der Beziehung $dpv = \frac{\gamma}{2g} \beta \frac{Q^2}{F^3} u dx$. Der Wert von β ist für je 1 cm Kanallänge bestimmt und über den 0,5 cm aufgetragen. Die mit Index ' versehenen Kurven beziehen sich auf verengte Kanäle.

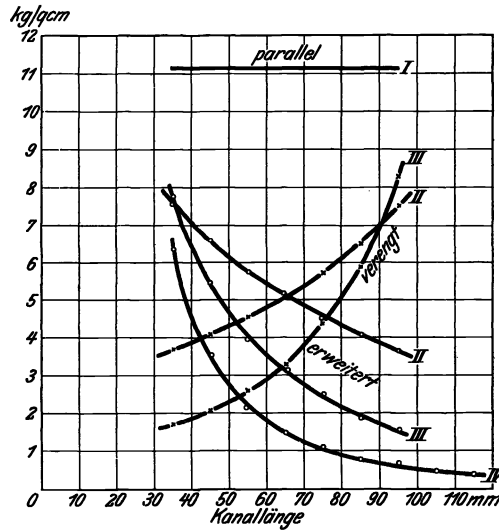


Fig. 43. Werte von $\frac{\gamma}{2g} \int_x^{x+1} \frac{Q^2}{F^3} u dx$ für die verschiedenen Kanäle.

Die Integration ist cm zu cm durchgeführt, und die Werte für 1 cm über den 0,5 cm aufgetragen.

Q Wassermenge = $5,10^{-3}$ cm³/sk. γ = Gewicht eines ccm = $1,0 \cdot 10^{-3}$ kgcm⁻³.
 g Gravitationskonstante = 981 cm²/sk². u benetzter Umfang in cm. F Querschnitt in qcm.

Für diese Berechnung ist die Veränderlichkeit der Höhe von 27,34 auf 27,27 (0,27 vH) auf 125 mm Länge unberücksichtigt geblieben und die Höhe unveränderlich = 27,30 mm angesetzt worden.

Aus Gl. (2) erhält man also

$$\Delta z = \beta \frac{\gamma}{2g} Q^2 \int_{x_1}^{x_2} \frac{h + xc}{h^3 x^3 c^3} dx \dots \dots \dots (3).$$

Setzt man

$$\frac{\gamma}{g} \frac{Q^2}{h^3} = A,$$

so erhält man

$$\Delta z = \beta \frac{A}{c^2} \left[\frac{h}{2c} \left(\frac{1}{x_1^2} - \frac{1}{x_2^2} \right) + \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) \right],$$

$$\Delta z = \beta \frac{A}{c^2} \left[\frac{h}{2c} \frac{x_1 + x_2}{x_1 x_2} + 1 \right] \cdot \left[\frac{x_2 - x_1}{x_1 x_2} \right] = \beta D \dots \dots (4).$$

Die Größe *D* ist in Spalte 11 der Zahlentafeln 16 bis 21 und in Fig. 43 zusammengestellt.

C) Die Messungen mittels des Röhrchens sind in den Zahlentafeln 22 bis 27 aufgeführt. Es wurden in den Kanälen verschiedene Querschnitte untersucht, die erhaltenen Drücke sind in Fig. 44 bis 64 für verschiedene Höhen über die Breite der Kanäle an verschiedenen Stellen dargestellt. Da der Flüssigkeitsdruck auf eine Breitenlinie nahezu unveränderlich ist, wurde darauf verzichtet, den im Röhrchen gemessenen Druck in Druckhöhe und Geschwindigkeitshöhe zu trennen, zumal die Summe beider die noch verfügbare Energie ergibt. Die von der Kurve der verfügbaren Energie, der wagerechten, strichpunktieren Linie des absoluten Drucknullpunktes und den beiden Ordinaten an den Rändern des Durchflußquerschnittes eingeschlossene schraffierte Fläche gibt eine Vorstellung (die nicht ohne weiteres quantitativ verwertbar ist) von der Verteilung der nutzbaren Energie über den Querschnitt; ferner die Rechteckfläche, die nach oben hin durch die wagerechte Linie des Kesseldruckes abgeschlossen wird, von der Gesamtenergie des Querschnittes; schließlich der ungeschraffierte Teil der Rechteckfläche von den auftretenden Verlusten.

Die den Kanal I bildenden Wangen sind am Ende des Kanales senkrecht abgeschnitten, so daß der Querschnitt des Kanales I plötzlich auf den des äußeren Kanales übergeführt wird. Es war hierdurch ermöglicht, eine Messung für plötzliche Querschnittänderung (Zahlentafel 22 und Fig. 44) durchzuführen. Für Kanal IV sind die Messungen über den Einfluß des Druckabfalles bis zum Entweichen der gelösten Luft in Zahlentafel 26 und Fig. 57 bis 64 zusammengefaßt.

Bei einem Teil der Messungen sprang in kurzen Abständen das Manometer zwischen zwei oder drei voneinander vollkommen getrennten Gleichgewichtslagen hin und her. Diese Punkte sind vermerkt und bei der Auftragung so verbunden, daß die von den Kurven eingeschlossenen Flächenstücke ungefähr gleich groß wurden. Dies gelang vollkommen zwanglos, und es ergaben sich zwei bzw. drei stetige Kurvenzüge. Es rührt dies offenbar davon her, daß der von der Wandung abgelöste Strahl während des Versuches nicht unveränderlich an seinem Orte blieb, sondern bald nach rechts, bald nach links pendelte oder sich in der Mitte hielt¹⁾.

¹⁾ Eine Erscheinung, die sich auch bei Versuchen mit Luftströmung zeigte und dort photographisch festgehalten wurde, vergl. Diss. Steichen, Göttingen.

Höhe = 12,4 12,4 24,4 24,4 24,4 24,4 24,4 24,4 mm
 Q = 5,1 5,1 5,1 5,1 5,8 5,8 6,3 6,3 ltr/sk
 Für h = 17,1; 24,4 keine wesentliche Abweichung.

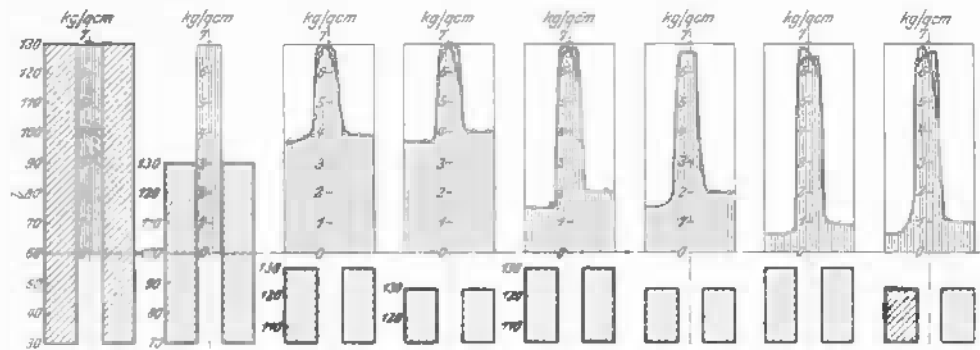


Fig. 44. Kanal I. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (gemessen mittels des Röhrechs) an verschiedenen Stellen innerhalb und außerhalb des Kanals.

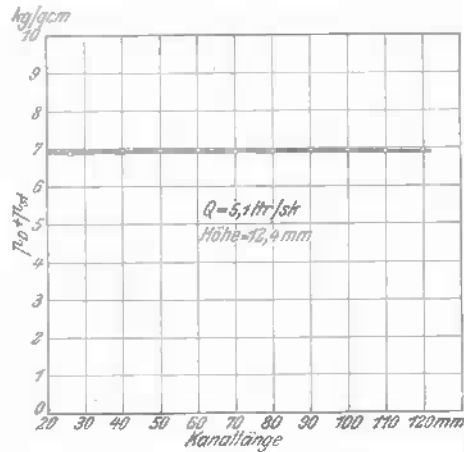


Fig. 45. Kanal I Verlauf der nutzbaren Energie des mittelsten Stromfadens über die Länge des Kanals. Strahl symmetrisch zur Achse. Messung mit Röhrechs.

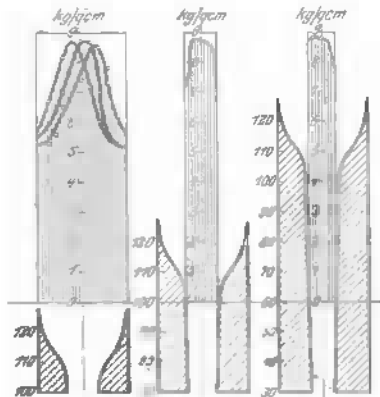


Fig. 46. Kanal II. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhrechs). Höhe 13,4 mm. Wassermenge. 7,16 ltr/sk Kesseldruck: 9 kg/qcm.

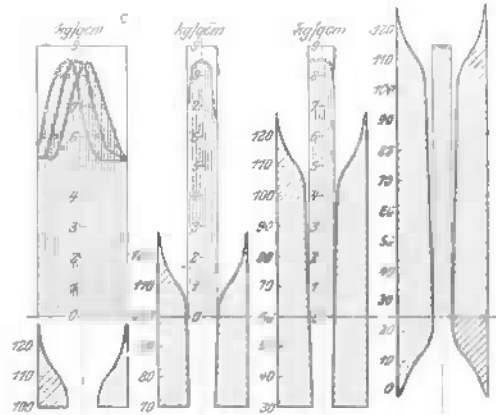


Fig. 47. Kanal II. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Rührchen). Höhe: 20,4 mm. Wassermenge: 7,15 ltr/sk. Kesseldruck 9 kg/qcm.

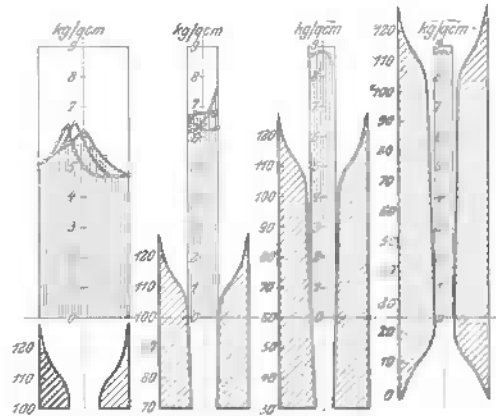


Fig. 48. Kanal II. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals Höhe: 24,4 mm. Wassermenge: 7,15 ltr/sk. Kesseldruck: 9 kg/qcm.

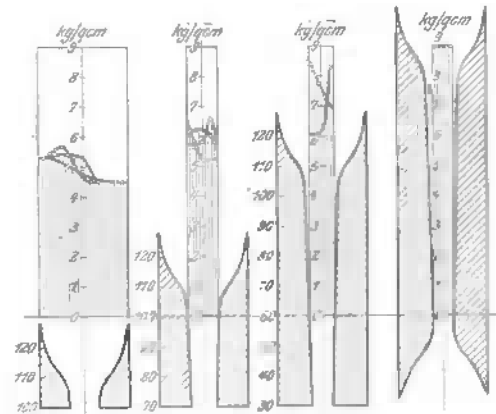


Fig. 49. Kanal II. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Rührchen). Höhe: 26,4 mm. Wassermenge; 7,15 ltr/sk. Kesseldruck: 9 kg/qcm.

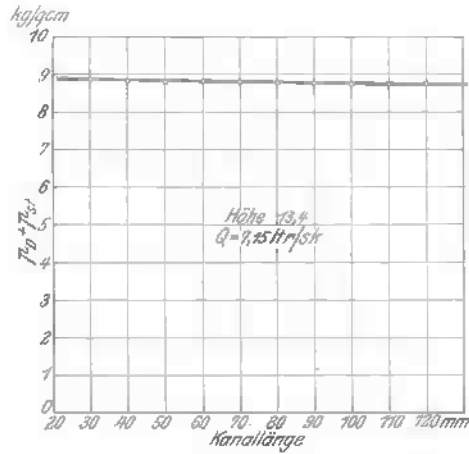


Fig. 50 Kanal II, Verlauf der nutzbaren Energie des mittelsten Stromfadens über die Länge des Kanals. Strahl symmetrisch zur Achse. Messung mit Röhrenchen.

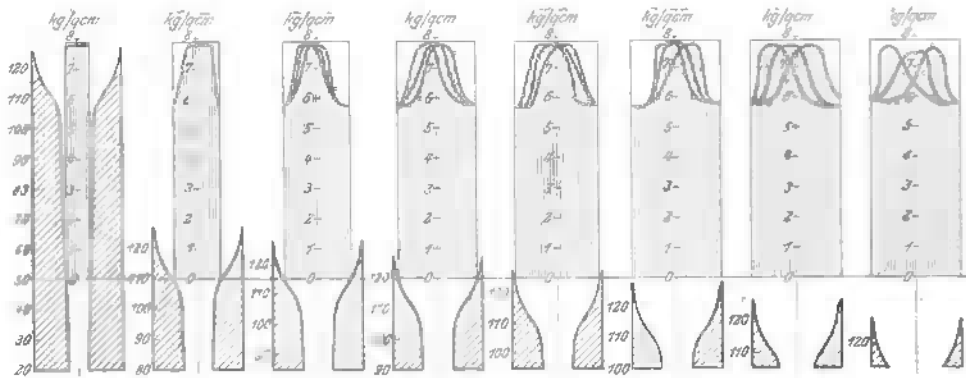


Fig. 51. Kanal II. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals, gemessen mit Röhrenchen. Höhe: 13,4 mm. Wassermenge: 5,6 ltr/sk. Kesseldruck: 8 kg/qcm.

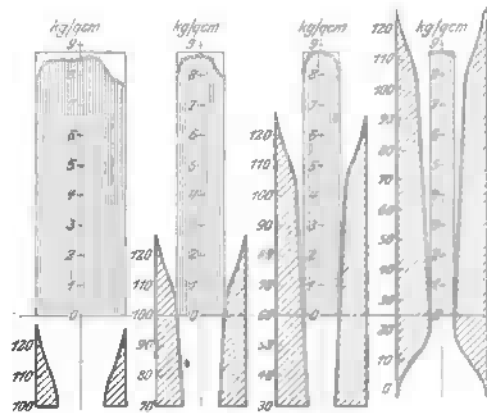


Fig. 52. Kanal III. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhrenchen). Höhe: 12,4 mm. Wassermenge: 5,38 ltr/sk. Kesseldruck: 9 kg/qcm.

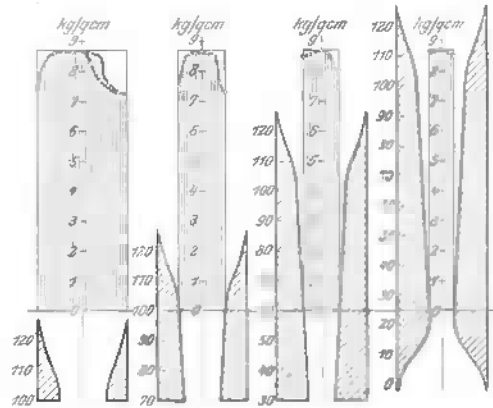


Fig. 53. Kanal III. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhren). Höhe: 12,4 mm. Wassermenge: 6,8 ltr/sk. Kesseldruck: 9 kg/qcm.

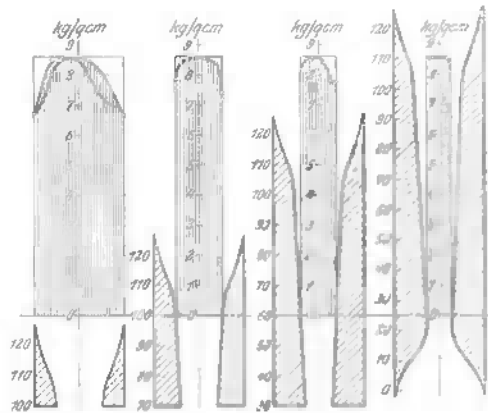


Fig. 54. Kanal III. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhren). Höhe: 12,4 mm. Wassermenge: 7,25 ltr/sk. Kesseldruck: 9 kg/qcm.

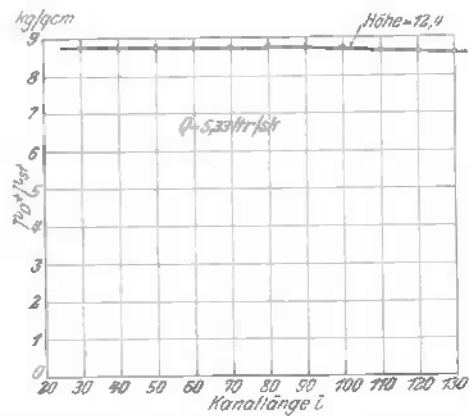
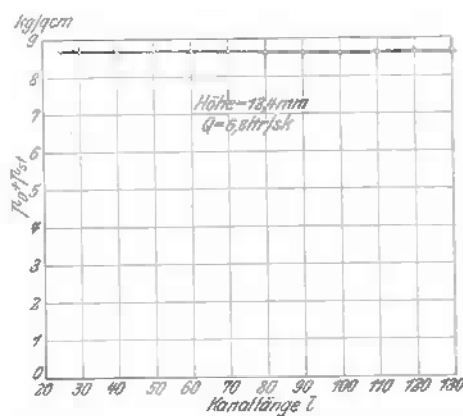


Fig. 55 und 56. Verlauf der nutzbaren Energie des mittelsten Stromfadens über die Länge des Kanals. Strahl symmetrisch zur Achse. Messung mit Röhren

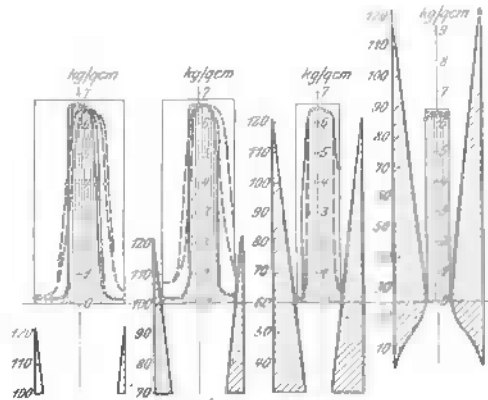


Fig. 57. Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhrechen) (Verschiedene Drosselung des Schiebers, gleich gehaltene Durchflußmenge.) Höhe: 13,6 mm. — — Höhe: 22,8 mm. Wassermenge: 7,87 ltr/sk. Kesseldruck: 6,8 kg/qcm. p_s an der Stelle 112: 0,85 kg/qcm

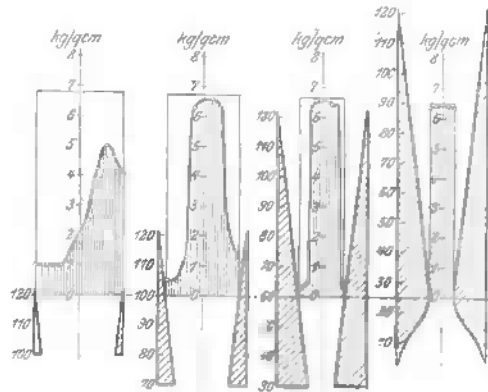


Fig. 58. Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhrechen) Verschiedene Drosselung des Schiebers, gleich gehaltene Durchflußmenge. Höhe: 13,6 mm. Wassermenge: 7,87 ltr/sk. Kesseldruck: 6,8 kg/qcm. p_s an der Stelle 112: 1,0 kg/qcm.

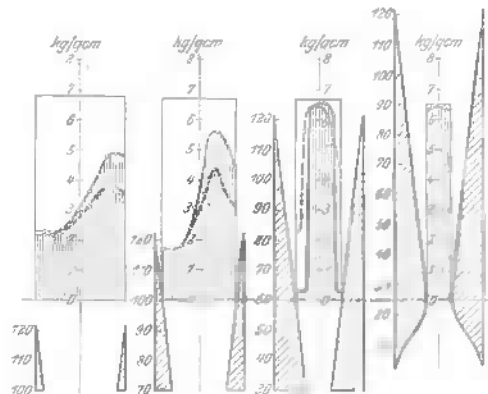


Fig. 59. Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhrechen). Verschiedene Drosselung des Schiebers; gleich gehaltene Durchflußmenge. Höhe: 13,6 mm. — — Höhe 24,8 mm (nahe dem Rande). Wassermenge: 7,87 ltr/sk. Kesseldruck: 6,8 kg/qcm. p_s an der Stelle 112: 2,0 kg/qcm.

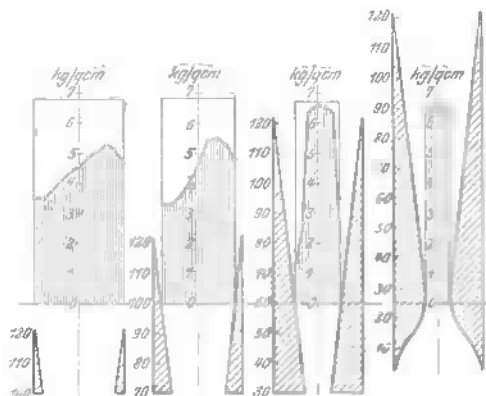


Fig. 60. Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhrechen). Verschiedene Drosselung des Schiebers; gleich gehaltene Wassermenge. Höhe: 13,6 mm. Wassermenge: 7,87 ltr./sk. Kesseldruck: 6,8 kg/qcm. p_{st} an der Stelle 112: 3,0 kg/qcm.

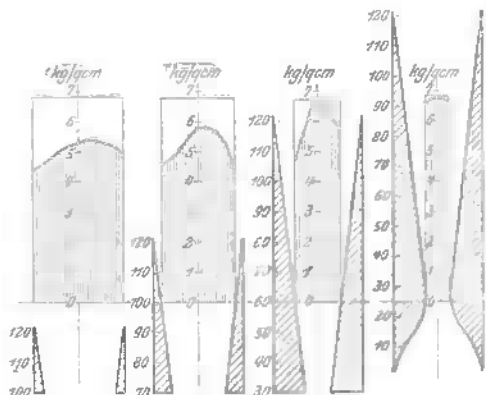


Fig. 61. Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhrechen). Verschiedene Drosselung des Schiebers; gleich gehaltene Durchflußmenge. Höhe: 13,6 mm. Wassermenge: 7,87 ltr./sk. Kesseldruck: 6,8 kg/qcm. p_{st} an der Stelle 112: 4,0 kg/qcm.

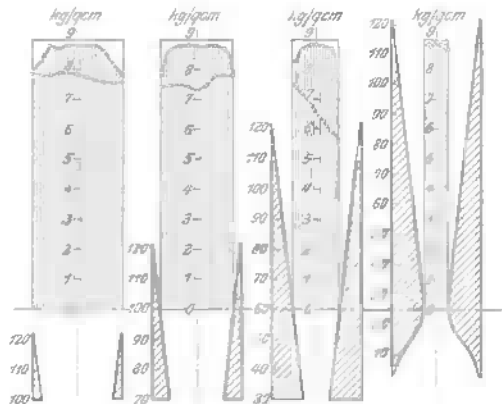


Fig. 62. Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanals (Messung mit Röhrechen). Verschiedene Drosselung des Schiebers; gleich gehaltene Wassermenge. Höhe: 13,6 mm. — — — Höhe: 24,6 mm (nahe dem oberen Rande). Wassermenge: 7,37 ltr./sk. Kesseldruck: 9 kg/qcm. p_{st} an der Stelle 112: 5 kg/qcm.

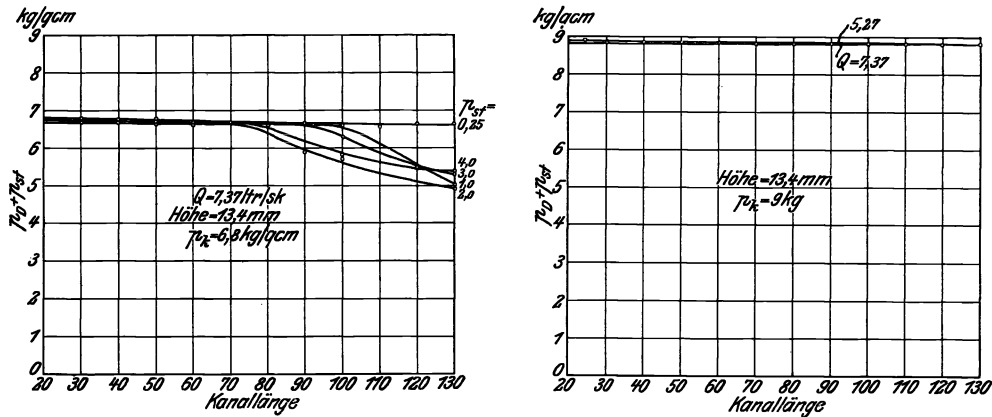


Fig. 63 und 64. Kanal IV. Verlauf der nutzbaren Energie des mittelsten Stromfadens über die Länge des Kanals. Strahl symmetrisch zur Achse. Verschiedene Drosselung des Schiebers. Drücke auf gleichbleibenden Kesseldruck bezogen.

IV) Die Ergebnisse der Messungen.

A) Die Druckverteilung über die Oberfläche zeigt für den geraden Teil der Kanäle, daß die Isobaren ohne großen Fehler als Kreisbögen um den Schnittpunkt der geraden seitlichen Begrenzungslinien des Kanales betrachtet werden können, stärkere Abweichungen zeigen sich gegen Ende des Kanals IV, Fig. 22 bis 25. (Weiteres im Abschnitt V: Theoretische Betrachtung zur Potentialströmung).

Ba) Bei der Strömung gleicher Durchflussumengen bei verschiedenem Anfangsdruck (Kesseldruck) ergibt sich innerhalb gewisser Grenzen, daß die Druckkurven sich nur durch eine additive Konstante unterscheiden, d. h. der Strömungsvorgang ist innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit unabhängig vom Anfangsdruck, Fig. 26.

Bb) Erreicht jedoch der Druckabfall an der engsten Stelle den Atmosphärendruck oder unterschreitet ihn, so entweicht die im Wasser gelöste Luft, ferner beginnt sich Wasserdampf zu entwickeln, sobald die Dampfspannung des Wassers erreicht wird. Abgesehen davon, daß die Dampf- und Luftblasen eine Querschnittsverminderung, also ein Anwachsen des Ausdruckes $\frac{\rho v^2}{2}$, somit eine Vermehrung der Verluste bedeuten, so bedingen auch im erweiterten Teile die stärkere Wirbelung und die Relativbewegung zwischen Wasser und Luft einen vermehrten Energieaufwand. Auf diese Weise ergeben sich in Fig. 27 die unterhalb der gestrichelten Kurve liegenden Kurven, und zwar entsprechen die tieferliegenden, größeren entweichenden Dampf- oder Luftmengen. Die Kurven sind dadurch erhalten, daß mit dem hinter dem Kanal liegenden Drosselschieber S eine verschiedene Drosselung des Enddruckes eingestellt wurde. Je nach der Größe der Drosselung, bei höherem Gegendruck, verringert sich die entweichende Luftmenge, bis eine Grenze (gestrichelte Kurve) erreicht wird, bei der keine Luft mehr entweicht. Außerlich konnte dies dadurch beobachtet werden, daß das durch die heftige Durcheinanderbewegung erzeugte Geräusch (Rasseln) plötzlich nachließ. Für die verschiedenen Drosselungen, Gegendrucke, unterhalb dieser Grenze bleibt bei demselben Anfangsdruck die Wassermenge unverändert. Es wurde bei diesen Messungen darauf verzichtet, die Änderungen der Drosselung, die durch das Verschieben des Kanales entstehen, durch Regeln auszugleichen.

Wird nach Erreichung der Grenzkurve eine weitere Drosselung vorgenommen, der Gegendruck also weiter erhöht, und sorgt man dafür, daß sich die Durchflußmenge nicht ändert, so erhält man die Kurven, die sich von der Grenzkurve nur durch eine additive Konstante unterscheiden. Es ergibt sich die für die Praxis wichtige Regel, daß man es bei Geschwindigkeitsteigerung vermeiden muß, sich im Druckabfall dem Vakuum zu nähern, da jegliches Entweichen von Luft oder Dampf bei einer folgenden Geschwindigkeitsverminderung starke Verluste durch Ablösung des Strahles zur Folge hat¹⁾.

Durch das Entweichen der Luft ist für jeden Anfangsdruck — bei offenem Drosselschieber — der durchfließenden Wassermenge eine obere Grenze gesetzt. Diese ist für den Kanal IV in Abhängigkeit von dem Druck vor der Einströmung im parallelen Teil des Zuflusses (Stelle 14) (ohne Anwendung von Drosselung) beobachtet und in Fig. 28 zusammengestellt worden. Der Ausflußvorgang richtet sich nach zwei Gesetzen, je nachdem der Druck bis zum Entweichen der Luft erniedrigt wird oder nicht. In dem einen Falle, bei hohen Kesseldrücken (ungefähr ≥ 2 kg/qcm), steht ein Druckabfall bis ins Vakuum zur Verfügung; und diese Druckhöhe kann in Geschwindigkeitshöhe umgesetzt werden; es ergibt sich für den für die verschiedenen Durchflußmengen erforderlichen Druck eine Parabel durch den absoluten Nullpunkt des Druckes, d. h. das Quadrat der Wassermenge ist dem absoluten Drucke proportional. Bei geringeren Wassermengen tritt an der engsten Stelle als Gegendruck der Atmosphärendruck auf. Entsprechend diesem um den Atmosphärendruck verminderten Druckgefälle ist die Geschwindigkeitshöhe, somit auch die Wassermenge geringer. Diese Abhängigkeit der Wassermenge vom Anfangsdruck wird durch eine zweite Parabel durch den Nullpunkt des Atmosphärendruckes dargestellt. Eine beiden Parabeln sich anschmiegende Kurve gibt den Uebergang vom einen Zustande zum andern.

Bc) Wie bereits oben erwähnt, ergibt sich in gleicher Weise wie in dem Beispiel Fig. 37 für alle Versuche, daß die Kurven p_{st} in Abhängigkeit vom Quadrat der Durchflußmenge Gerade, daß also die Verluste an jeder Stelle der Geschwindigkeitshöhe proportional sind.

Für die bei der Strömung auftretenden Verluste ergibt sich weiter Folgendes: Die Kurven des Wirkungsgrades zeigen, daß die Gesamtverluste für Kanal I, II, IV nahezu gleich, für Kanal III etwas höher sind. Für die verengten Kanäle ergeben sich wesentlich kleinere Verluste.

Auch die Kurven: Verluste auf 1 cm in Abhängigkeit von der Länge zeigen, daß die Verluste für die verengten Kanäle wesentlich kleiner sind, Fig. 38.

Schaltet man nun den Einfluß der Geschwindigkeitshöhe in den verschiedenen Kanälen aus, indem man das Verhältnis: Verluste auf 1 cm Kanallänge zur Geschwindigkeitshöhe aufträgt, so weist die Reihenfolge der Kurven den ungünstigeren Einfluß der Erweiterung nach: IV, III, II, I, II¹, III¹, Fig. 39.

In diesen Auftragungen ist noch in den Werten der Verluste der Einfluß der geometrischen Anordnung enthalten. Dividiert man die Verluste durch den Wert

$$D = \frac{\gamma}{2g} \int_x^{x+1\text{cm}} \frac{u}{F^3} Q^2 dx$$

(vergl. S. 22), der in Fig. 43 für die verschiedenen Kanäle aufgetragen ist, so läßt die Darstellung des Koeffizienten β in Fig. 42 den ungünstigen Einfluß

¹⁾ Ähnliche Vorgänge bei Wasserdampf sind von K. Büchner (Zur Frage der Lavalschen Turbinendüsen, Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 18 S. 79) und A. Stodola (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1903 S. 6) bei Lavaldüsen beobachtet worden.

der Erweiterung auf die Größe der Verluste am deutlichsten zutage treten. Für das Ende des Kanals IV hat der Koeffizient β bereits den fünffachen Betrag desjenigen des parallelen Kanales erreicht.

Das anfangs schnelle, dann allmählichere Ansteigen der Kurven IV bis I läßt erkennen, wie der wirbelnde »turbulente« Zustand mit der Länge des Kanales anwächst, bis schließlich die ganze Flüssigkeit von kleinen Wirbeln durchsetzt ist und der Koeffizient sich einem unveränderlichen Höchstwert nähert. Aus dem Charakter der Kurven II¹ und III¹ für die verengten Kanäle lassen sich keine Schlüsse ziehen, da die Absolutwerte der Verluste so klein sind, daß sie durch die mehrmalige Differenzenbildung nur ungenau bestimmt werden können. Sie sollen also nur die Größenordnung des Koeffizienten β angeben, der für die verengten Kanäle kleiner ist als für den parallelen.

Zum Vergleich sind für den parallelen Kanal die Koeffizienten β nach verschiedenen Formeln berechnet und gleichfalls in Fig. 42 eingetragen worden.

$$\text{Weisbach } ^1) \quad . \quad . \quad . \quad 4 \beta = \lambda = 0,01439 + \frac{0,00094711}{\sqrt{v}},$$

$$\beta = 0,004084,$$

$$\text{Darcy } ^1) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4 \beta = \lambda = 0,01989 + \frac{0,0005078}{d}; \quad d = \frac{4 F}{u}$$

$$\beta = 0,0156,$$

$$\text{II. Lang } ^1) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4 \beta = \lambda = a + \frac{0,0018}{\sqrt{v d}}$$

$$\text{I } a = 0,012 \quad \beta = 0,0048$$

$$\text{II } a = 0,02 \quad \beta = 0,0066,$$

$$\text{Biel } ^2) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \beta = \frac{k 2 g}{1000},$$

$$\text{wobei } k = a + \frac{f}{\sqrt{\frac{F}{u}}} + \frac{b}{v} \frac{[\eta]}{\sqrt{\frac{F}{u}} g},$$

a, f, b , Konstante,

$\frac{[\eta]}{g}$ der Zähigkeitsmodul,

	I	II
für eine Rauigkeit		
ist a der Grundfaktor	0,12	0,12
f der Rauigkeitsfaktor	0,0064	0,018
$\frac{F}{u} = \frac{0,00765 \cdot 0,0273}{2 \cdot (0,0273 + 0,765)}$	0,003	m
$\frac{f}{\sqrt{\frac{F}{u}}} =$	0,117	m 0,328 m
$v = 23,9$		
$\frac{b [\eta]}{g} =$	0,009	0,00672
$k =$	0,246	0,4547
$\beta =$	0,00483	0,0089

¹⁾ Hütte, 20. Aufl. 1908 S. 271.

²⁾ R. Biel, Ueber den Druckhöhenverlust bei der Fortleitung tropfbarer und gasförmiger Flüssigkeiten. Mitteilungen über Forschungsarbeiten Heft 44 S. 37.

Während die Formel von Darcy unvergleichbar hohe Werte liefert (was zu erwarten, da sie für Geschwindigkeiten $< 0,5$ m/sk gilt) und die Formel von Weisbach einen zu niedrigen Wert ergibt, liegt der hier ermittelte Koeffizient zwischen den beiden Werten von Lang und Biel.

C) Aus den bisherigen Messungen ergibt sich der quantitative Einfluß der Erweiterung auf die Verluste der Strömung. In bezug auf die Quelle der Verluste, die Stelle, wo sie entstehen, geben die Versuche mit dem Röhrchen eine wesentliche Ergänzung.

Kanal I, Fig. 44, zeigt in den beiden ersten Figuren links für zwei Querschnitte in der mittleren Höhe unter Abzug der unveränderlichen Druckhöhe eine durchaus gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung. Für eine Höhe nahe dem oberen Rande ergaben sich keine abweichenden Werte. Die weiteren Figuren zeigen den Einfluß einer plötzlichen Erweiterung. Der Strahl strömt geschlossen aus, und zwar um so vollständiger, je größer die ursprüngliche Geschwindigkeit ist, und um so langsamer erfolgt eine Auffüllung der seitlichen Räume mit wirbelndem Wasser. Jedoch die gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung zeigt der Strahl nicht mehr, er wird nach beiden Seiten hin stark abgerundet, und zwar um so stärker, je größer die Verluste an den Seiten sind (bei größerer Anfangsgeschwindigkeit). Bei der getroffenen Anordnung konnten weitere Querschnitte nicht mehr untersucht werden. Es hätte sich dann ergeben, daß der mittlere Teil der schraffierten Fläche sich allmählich verflacht, während gleichzeitig die Seitenteile sich auffüllen, bis schließlich eine gleichmäßige, aber turbulente Strömung über dem ganzen Querschnitt vorhanden ist. Hierbei nimmt entsprechend dem zunehmenden Verluste die gesamte schraffierte Fläche noch etwas ab. Im wesentlichen ist der Sitz der Verluste die Unstetigkeitsstelle des Querschnittes. Mit vermehrter Geschwindigkeit ergibt sich eine Zunahme dieser Verluste.

Die nutzbare Energie des mittelsten Stromfadens, in Abhängigkeit von der Kanallänge dargestellt, Fig. 45, gibt eine Gerade, die nur wenig in der Strömungsrichtung geneigt ist, entsprechend den geringen Verlusten beim geraden Kanal.

Für den Kanal II ist in Fig. 46 bis 49 veranschaulicht, wie die Verluste nach dem oberen Rande hin zunehmen. Die Messung erfolgte für diesen Kanal wie auch für III und IV an vier Querschnitten: $l = 25$ (engste Stelle); 60 (im geraden Teil des Kanales); 100 (Ende des geraden Teiles); 130 (hinter der stärkeren Erweiterung, im großen Kanal). Für Kanal II ist die Messung für verschiedene Höhen durchgeführt: 13,4 (ungefähr Mitte); 20,4; 24,4; 26,4 (1 mm vom oberen Rande)¹⁾, für Kanal III für verschiedene Wassermengen, d. h. Geschwindigkeiten, Fig. 52 bis 56.

Während die Verluste an der engsten Stelle unmerklich sind, zeigt sich deutlich, wie sie allmählich an den Wandungen entstehen und mit zunehmender Länge und nach dem oberen Rande hin das Geschwindigkeitsprofil immer stärker angreifen. Der Einfluß der stärkeren Erweiterung ist ohne weiteres aus den Kurven ersichtlich, ebenso das Anwachsen der Verluste mit zunehmender Geschwindigkeit.

Der bei Kanal II vorhandene abgerundete Uebergang nach dem weiten Kanale hin ist benutzt, um im Vergleich zu der plötzlichen Querschnittsänderung bei Kanal I zu zeigen, wie durch eine auch nur kurze aber stetige Erweiterung die Verluste wesentlich herabgemindert werden.

¹⁾ Für die erstere Höhe konnte wegen der starken Drosselung des Röhrchens die Messung für den engsten Querschnitt nicht durchgeführt werden.

Für Kanal IV ist die Messung unter dem gleichen Gesichtspunkte wie bei der Bestimmung des Flüssigkeitsdruckes durchgeführt, es sollte der Einfluß der Druckerniedrigung bis zum Entweichen der Luft festgestellt werden. Der Kurvenschar in Fig. 27 entsprechen die in Fig. 57 bis 64 dargestellten Ergebnisse:

Der Flüssigkeitsdruck bleibt für die ganze Länge im Vakuum: völlige Ablösung des Strahles, große Verluste. Sie werden kleiner in dem Maße, als das Entweichen von Luft, Wasserdampf usw. durch Drosselung mit Hilfe des Schiebers verhindert wird, bis schließlich in Fig. 62, wo durch genügend hohen Anfangsdruck ein Abfall des Druckes im verengten Teile auf die Nähe des Atmosphärendruckes vermieden ist, die Verluste den kleinsten Wert annehmen.

Das Verhalten des mittelsten Stromfadens zeigen Fig. 63 und 64. Er scheint um so später von dem allgemeinen Zerfall angegriffen zu werden, je mehr Luft entweicht; allerdings fällt die Kurve, entsprechend einem Flüssigkeitsdruck von 2 kg/cm aus der Reihe der übrigen heraus¹⁾.

V) Theoretische Betrachtung zur Potentialströmung.

Für die Strömung einer volumbeständigen Flüssigkeit gilt die Beziehung:

$$\frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{\partial v_3}{\partial z} = 0 \quad \dots \dots \dots (1).$$

Ist die Strömung wirbelfrei, und kann der Einfluß der Reibung vernachlässigt werden, so läßt sich die Geschwindigkeit v von einem Potentiale ableiten:

$$v_1 = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; v_2 = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; v_3 = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad \dots \dots \dots (2).$$

Setzt man diese Werte in die obige Gl. (1) ein, so erhält man die bekannte Laplacesche Differentialgleichung:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad \dots \dots \dots (3).$$

Da in den hier betrachteten Kanälen die Höhe stets gleich ist, kann das Problem 2 dimensional weiter behandelt werden ($v_3 = 0$)

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad \dots \dots \dots (3a).$$

Als Lösung dieser Differentialgleichung dient sowohl der reelle als auch der imaginäre Bestandteil jeder beliebigen Funktion einer komplexen Variablen $z = x + yi$.

Es sei

$$w = \Phi + i\Psi = F(z) \quad \dots \dots \dots (4)$$

eine solche Funktion, dann ist

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + i \frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{dF(z)}{dz} \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{dF(z)}{dz} = F'(z),$$

ferner

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} + i \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \frac{dF(z)}{dz} \frac{\partial z}{\partial y} = i \frac{dF(z)}{dz} = iF'(z),$$

¹⁾ Eine wesentliche Rolle spielen diese Vorgänge in dem von Clemens Herschel erfundenen und ausgebildeten »Venturi-Wassermesser«. Die verschiedenen auf diese Erfindung Bezug nehmenden Veröffentlichungen dieses Ingenieurs sind mir erst nach Abschluß der Arbeit bekannt geworden. Vergl. Clemens Herschel, The Venturi Water Meter, American Society of Civ. Engineers Transactions Vol XVII November 1887. — —, Measuring Water, Reprinted by Builders Iron Foundry, Providence R. I. 1909. — —, The Fall-Increaser, The Harvard Engineering Journal, June 1908.

hieraus folgt

$$F' z = -i \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{\partial \Psi}{\partial y},$$

also

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} - i \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + i \frac{\partial \Psi}{\partial x},$$

dies ist nur möglich, wenn sowohl die reellen als auch die imaginären Teile gleich sind, d. h.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y}; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (5).$$

Differentiiert man die erste Gleichung nach x , die zweite nach y und addiert, so erhält man

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0$$

die Gl. (3a) und umgekehrt

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = 0$$

eine entsprechende Gleichung für Ψ .

Die Funktion Ψ bezeichnet man als Stromfunktion,

die Kurven $\Psi = \text{konst}$ als Stromlinien,

die Kurven $\Phi = \text{konst}$ als Aequipotentiallinien¹⁾.

Zeichnet man in der xy -Ebene ein Netz von Kurven $\Phi = \text{konst}$ und $\Psi = \text{konst}$, so folgt aus $\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y}$ und $\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$, daß die Kurven sich rechtwinklig schneiden, Fig. 65. Es läßt sich weiter zeigen, daß die Maschen des Netzes, wenn sie hinreichend klein gewählt werden, Quadrate bilden (Orthogonalsystem). Bildet man dieses Kurvennetz auf der $\Phi\Psi$ -Ebene ab, so erhält man Quadrate, Fig. 66. Die Beziehung beider Netze zueinander bezeichnet man als

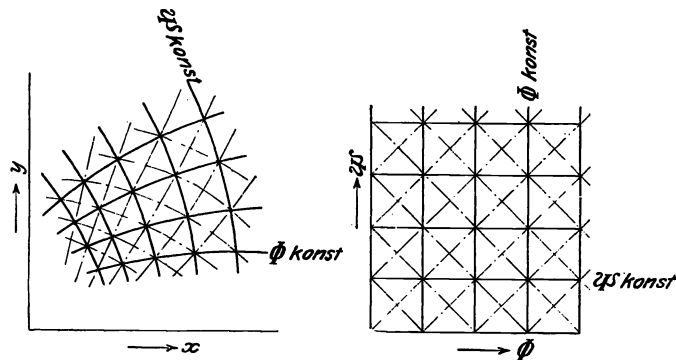


Fig. 65 und 66.

winkeltreue oder konforme Abbildung (weil bei ihr die Winkel erhalten bleiben, während die Längen sich proportional ändern können), eine Beziehung, die in der Mathematik von großer Bedeutung ist. Zieht man in der $\Phi\Psi$ -Ebene die Diagonalen, so stehen diese aufeinander senkrecht und bilden ein gleichartiges Quadratnetz wie die Kurven $\Phi = \text{konst}$ und $\Psi = \text{konst}$. Aus der Theorie der konformen Abbildung folgt, daß die Kurvenscharen des Diagonalnetzes in der xy -Ebene dann ebenfalls ein Orthogonalsystem bilden müssen. Hieraus ergibt

¹⁾ Föppl, Vorlesungen über technische Mechanik Bd. 4, Wirbelbewegung und wirbelfreie Bewegung S. 403 ff. II. Aufl. — H. Lamb, Lehrbuch der Hydrodynamik.

sich, daß die Diagonalen aufeinander senkrecht stehen und in erster Annäherung einander gleich sind.

Betrachtet man die Strömung zwischen zwei aufeinander folgenden, sich um einen stets gleichen Wert von Ψ unterscheidenden Stromlinien, so ist die durchfließende Wassermenge $\partial Q = h v_1 \partial y$, wobei h die unveränderliche Höhe des Kanals, daher

$$\frac{\partial Q}{\partial y} = h v_1,$$

ferner ist

$$\partial Q = - h v_2 \partial x,$$

daher

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = h v_2,$$

nun war

$$v_1 = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial y}; \quad v_2 = - \frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{\partial \Phi}{\partial y},$$

also ergibt sich $Q = \Psi h + \text{konst}$, d. h. die Durchflußmenge durch eine von je zwei um einen festen Wert voneinander verschiedene Stromlinien gebildete Stromröhre ist unveränderlich. Für die Strömung durch einen beliebigen Kanal läßt sich das Netz $\Phi = \text{konst}$, $\Psi = \text{konst}$ einzeichnen, da die Kanalwandungen selbst Stromlinien sind und die mathematische Aufgabe, zwischen zwei vorgegebenen Stromlinien ein Netz von Quadraten einzuschalten, zu einer eindeutigen Lösung führt.

Die Konstruktion des $\Phi \Psi$ -Netzes wird in der Weise vorgenommen, daß man ein ungefähres Kurvennetz wie das verlangte nach Augenmaß in den Kanal einzeichnet. Von einer Kurve ausgehend, berichtigt man dann die Werte nach dem unten angegebenen Verfahren und erhält auf diese Weise ein verbessertes Netz, bei dem das Verfahren wiederholt wird, bis schließlich bei der Verbesserung keine Abweichungen gegen das vorherige Netz mehr entstehen.

Das Verfahren ist von Prof. Runge in seinen Vorlesungen über »graphische Methoden« angegeben und soll ohne Beweis hier angedeutet werden.

»Es sei eine Kurve $\Psi = \text{konst}$ bekannt und auf ihr drei Schnittpunkte A, B, C der Kurven $\Phi = \text{konst}$, Fig. 67, dann lassen sich zwei weitere Schnittpunkte F, G finden, indem man den Halbierungspunkt D der Sehne AC mit B verbindet, DB um sich selbst bis E verlängert, von E eine Senkrechte auf AC fällt und auf dieser von E aus nach beiden Seiten hin $EF = FG = \frac{AC}{2}$ aufträgt. Die Punkte F, G sind dann in erster Annäherung die gesuchten Punkte.«

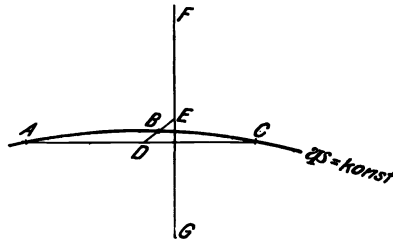


Fig. 67.

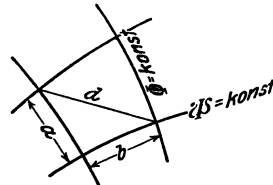


Fig. 68.

Das Ziehen der Linien AC und FG kann gespart werden, wenn man Millimeterpauspapier zu Hülfe nimmt. Die Punkte D, E, F, G können dann auf den Geraden des Millimeterpauspapiers mit dem Zirkel eingestochen werden.

Man erhält auf diese Weise Stromlinien, die, von den nach Augenmaß gezeichneten abweichen, und zwar jede folgende stärker. Für die Symmetrielinie

ergibt sich eine berichtigte Stromlinie, die nur dann mit ihr zusammenfallen kann, wenn die Einteilung der Ausgangskurve die richtige war. Dies ist im allgemeinen nicht der Fall. Man muß also an den Teilpunkten der Ausgangskurve (Randkurven) eine sachgemäße Berichtigung vornehmen und das ganze Verfahren auf diese Weise mehrmals wiederholen, bis schließlich die letzte Kurve mit der Symmetrielinie zusammenfällt und das Netz nach den parallelen Teilen des Kanales hin genau quadratisch wird.

Lag ein einmalig berichtigtes Netz vor, so konnte das Verfahren weiter vereinfacht werden, indem man mittels Millimeterpauspapier die Diagonalen untersuchte, ob sie gleich waren und aufeinander senkrecht standen, bzw. die Punkte entsprechend berichtigte. Da der Rand und die Symmetrieachse des Kanales Stromlinien sind, und da das Netz im parallelen Teil des Kanales genau quadratisch ist, so hat man eine ständige Prüfung, wie schnell man sich bei der Berichtigung den wahren Werten nähert.

Hat man für einen Kanal das Netz konstruiert, so fließt durch jede, von je zwei aufeinander folgenden Stromlinien gebildeten Stromröhre die gleiche Wassermenge. Nun ist $Q = v a$; da aber $a = \text{rd. } b$, Fig. 68, so folgt: $Q = v b$, nun ist

$$\frac{Q v^2}{2} = p_D$$

oder

$$p_D = \frac{Q}{2} \left(\frac{Q}{a} \right)^2;$$

nun ist

$$d^2 = a^2 + b^2 = 2 a^2;$$

ferner $Q^2 = \text{konst}$, also die Geschwindigkeitshöhe

$$p_D = \frac{c_1}{d^2}.$$

Die Energiegleichung lautete $p_D + p_a = \text{konst} = c_2$, also

$$p_a = c_2 - \frac{c_1}{d^2}.$$

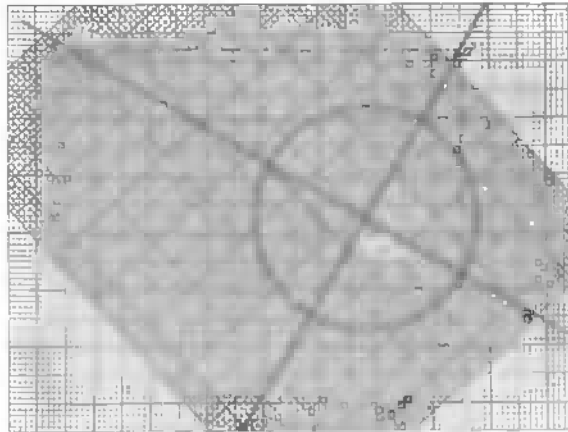


Fig. 69

Die Bestimmung von p_a aus der Größe der Diagonalen d kann zeichnerisch schnell auf folgendem Wege durchgeführt werden. Man zeichnet einen Kreis mit dem Halbmesser 1 und ein Achsenkreuz X, Y , Fig. 69. Ueber diese Zeichnung legt man ein Stück Millimeterpauspapier. Auf der einen Achse (Y) sticht man

mittels einer Nadel die Entfernung d vom Mittelpunkt aus ab und dreht das Millimeterpauspapier um diesen Punkt, bis eine Gerade desselben den Punkt d mit dem einen Schnittpunkt des Kreises mit der X -Achse $x = +1, y = 0$ verbindet, dann schneidet die dazu senkrechte Gerade des Koordinatenpapiers die x -Achse in einem Punkte, dessen Entfernung vom Nullpunkte $x = -d^2$ ist. In diesen Punkt sticht man die Nadel ein und verbindet durch nochmalige Drehung des Millimeterpapiers diesen Punkt d mit dem Schnittpunkt $x = 0, y = -1$ der Y -Achse mit dem Kreise. Die parallele Gerade des Millimeterpapiers durch den Punkt $x = -1, y = 0$ der X -Achse schneidet die Y -Achse im Abstände $\frac{1}{d^2}$ vom Mittelpunkte.

Die Konstante c_1 ist gleich 1 gesetzt in geeignetem Maßstab, c_2 beliebig.

Man verbindet schließlich die Punkte gleichen Flüssigkeitsdruckes und erhält so das Strömungsbild in Fig. 70.

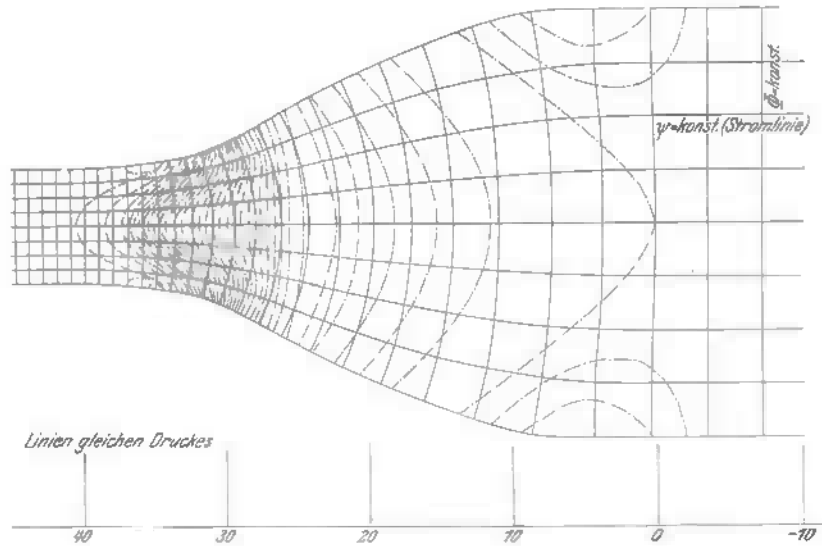


Fig. 70. Potentialströmung im Zulauf des Kanals.

Man vergleiche hiermit Fig. 22 und 23: es zeigt sich, daß in der Tat in den verengten Teilen der Kanäle das Strömungsbild durch das der Potentialströmung wiedergegeben werden kann. Da diese Strömung nun Reibungs- und Wirbelfreiheit voraussetzt, so ergibt sich auch auf diesem Wege, daß die bei der Strömung durch verengte Kanäle auftretenden Verluste nur gering sein können, da das durch die Potentialströmung gegebene Bild des Strömungsverlaufes nur unwesentlich verändert erscheint.

Zusammenfassung und Schluß.

Die Untersuchungen geben eine volle Bestätigung der in der Einleitung dargestellten Theorie von Hrn. Prof. Prandtl. Die Messung des Flüssigkeitsdruckes zeigte, daß in den verengten Kanälen die Strömung nahezu verlustfrei ist (Potentialströmung), während mit zunehmender Erweiterung die Strömung ungünstiger verläuft. Durch die Untersuchung des Strömungsverlaufes mit Hilfe des Röhrchens konnte dann weiter nachgewiesen werden, daß die Verluste (in

Form von Wirbelbildung durch Reibung) im wesentlichen an den Wandungen der Kanäle entstehen und allmählich die ganze Strömung durchsetzen (Turbulenz), und zwar in um so stärkerem Maße, je stärker die Kanäle erweitert sind, je schneller die Geschwindigkeitsabnahme und die Druckzunahme erfolgt. Der schädliche Einfluß des Druckabfalles in der engsten Stelle bis zum Entweichen der gelösten Luft, plötzlicher Querschnittsänderungen konnte durch die zur Verwendung gelangten Untersuchungsverfahren nachgewiesen werden.

Das somit gewonnene anschauliche Bild der Strömungsvorgänge kann für die Verwendung in der Technik wertvoll sein, wenn auch im Hinblick auf die geringen einstweilen vorliegenden Unterlagen darauf verzichtet wurde, die Ergebnisse so in mathematischer Ausdrucksweise darzustellen, daß sie der rechnerischen Verwertung unmittelbar zugänglich wären.

Zahlentafeln.

Zahlentafel 1.

Kanal I. Verteilung des Flüssigkeits-(statischen) Druckes über die obere Fläche.
 Datum 16. 2. 09. Kesseldruck 8 kg/qcm. Wassermenge 4,95 ltr/sk.
 Drücke in 0,01 kg/qcm. Versuch Nr. 1.

Länge . . .	112	100	90	80	70	60	50	40	30	25
Winkel 190	471	479	486	494	501	512	519	521	531	555
» 185	471	479	486	494	501	512	519	521	531	563
» 180	471	479	486	494	501	512	519	521	531	563
» 175	471	479	486	494	501	512	519	521	531	556
» 170	471	479	486	494	501	512	519	521	531	540
Länge . . .	20	15	10	5	0	-5	-14			
Winkel 230	—	—	761	773	770	768	772			
» 220	—	—	764	770	770	768	772			
» 210	—	748	758	766	769	766	772			
» 200	664	732	750	760	768	766	772			
» 190	657	720	748	758	766	766	772			
» 180	652	718	744	758	764	766	772			
» 170	654	722	747	758	765	766	772			
» 160	666	736	750	760	766	766	772			
» 150	—	750	758	765	768	766	772			
» 140	—	—	764	770	770	768	772			
» 130	—	—	750	773	771	768	772			

Zahlentafel 2.

Kanal II. Verteilung des Flüssigkeits-(statischen) Druckes über die obere Fläche.
 Datum 2. 12. 08. Kesseldruck 8 kg/qcm. Wassermenge 6,4 ltr/sk.
 Drücke in 0,01 kg/qcm. Versuch Nr. 2.

Länge . . .	100	90	80	70	60	50	40	30	25	20
Winkel 195	470	442	—	—	—	—	—	—	—	—
» 190	468	440	414	378	348	305	262	190	164	212
» 185	468	438	410	373	346	302	260	185	162	240
» 180	470	438	410	370	340	300	255	182	160	230
» 175	466	438	410	372	342	302	260	190	168	200
» 170	468	439	412	375	348	302	265	195	170	170
» 165	470	440	—	—	—	—	—	—	—	—
Länge . . .	15	10	5	0	-5	-10				
Winkel 230	—	—	—	761	762	758				
» 220	—	—	745	755	762	758				
» 210	—	690	732	750	756	758				
» 200	480	648	720	745	755	758				
» 190	480	612	705	742	752	756				
» 180	480	600	698	739	750	755				
» 170	480	612	712	742	752	756				
» 160	490	662	730	745	755	757				
» 150	—	700	748	748	760	758				
» 140	—	—	752	752	764	758				
» 130	—	—	—	755	765	758				

Zahlentafel 3.

**Kanal III. Verteilung des Flüssigkeits- (statischen) Druckes über die obere Fläche.
Datum 14. 12. 08. Kesseldruck 8 kg/qcm. Wassermenge 6,4 ltr/sk.
Drücke in 0,01 kg/qcm. Versuch Nr. 3.**

Länge	100	90	80	70	60	50	40	30	25
Winkel 205	712	695	675	—	—	—	—	—	—
» 200	712	692	676	653	—	—	—	—	—
» 195	712	695	677	658	626	590	538	—	—
» 190	712	698	678	653	623	590	541	452	385
» 185	712	698	678	651	620	589	538	450	382
» 180	712	698	678	651	620	588	536	448	380
» 175	712	698	678	651	621	586	538	450	380
» 170	712	697	676	651	623	585	538	452	382
» 165	712	695	676	651	620	588	539	—	—
» 160	712	693	675	656	—	—	—	—	—
» 155	712	695	677	—	—	—	—	—	—

Zahlentafel 4.

**Kanal IV. Verteilung des Flüssigkeits- (statischen) Druckes über die obere Fläche.
Datum 17. 12. 08. Kesseldruck 9 kg/qcm. Wassermenge 6,35 ltr/sk.
Drücke in 0,01 kg/qcm. Versuch Nr. 4.**

Länge . . .	112	100	90	80	70	60	50	40	35	30
Winkel 220	778	768	760	758	—	—	—	—	—	—
» 210	772	768	760	752	732	—	—	—	—	—
» 200	778	773	760	752	730	712	663	—	—	—
» 195	—	—	—	—	—	—	668	605	546	—
» 190	778	771	760	749	729	716	668	612	566	480
» 185	—	—	—	—	—	—	670	612	568	480
» 180	768	766	756	749	728	716	672	608	562	482
» 175	—	—	—	—	—	—	672	612	558	488
» 170	772	772	757	748	728	716	672	612	558	488
» 165	—	—	—	—	—	—	662	614	578	—
» 160	772	772	758	746	723	716	662	—	—	—
» 150	772	762	760	746	728	—	—	—	—	—
» 140	782	765	762	754	—	—	—	—	—	—

Zahlentafel 5.

**Kanal II. Flüssigkeits- (statischer) Druck in der Symmetrieachse der Deckfläche
bei verschiedenem Kesseldruck. Datum 1. 12. 08.**

Kesseldruck kg/qcm	10	8	8	6	4
Versuch Nr.	5	6	7	8	9
Wassermenge ltr/sk	6,35	6,35	3,35	3,35	3,35
Stellung der Meßöffnung	112	698	500	700	300
	105	688	485	696	298
	100	670	470	695	295
	95	652	448	690	288
	90	632	435	688	284
	80	612	410	680	276
	70	582	376	674	270
	60	546	350	668	260
	50	510	300	658	250
	40	458	253	644	240
	35	430	220	632	226
	30	390	170	624	213
	26	350	148	620	210
	23	360	160	625	211
	20	460	250	652	239
	15	698	500	718	300
	10	840	649	752	349
5	918	712	762	361	
0	940	739	770	370	
-14	953	760	772	376	

Zahlentafel 6.

Kanal IV. Flüssigkeitsdruck in der Symmetrieachse der Deckfläche bei gleichbleibender Durchflußmenge und verschiedener Drosselung (Einfluß gelöster Luft).

Datum 16. 12. 08. Kesseldruck 7 kg/qcm. Wassermenge 7,37 ltr/sk.

Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Stellung der Meßöffnung	110	15	80	120	220	320	420	510	112: 652	112: 745
	100	15	65	110	200	310	410	505	628	730
	90	15	55	85	160	285	390	495	618	718
	80	15	48	60	110	250	370	475	608	708
	70	15	40	48	75	153	328	455	588	688
	60	16	35	42	65	130	252	425	572	666
	50	26	35	40	52	170	155	380	514	614
	40	26	35	45	51	50	80	300	422	526
	35	51	35	45	—	—	—	—	345	450
	30	56	40	45	40	48	56	152	252	358
	26	132							28: 228	28: 318
	23	228							24: 286	24: 408
	20	380							462	575
	15	514							622	708
	10	580							688	775
	5	615							716	812
	0	632							731	826
-14	638							746	844	

Zahlentafel 7.

Kanal IV. Größte Durchflußmenge bei verschiedenem statischem Druck an der Stelle $l = -14$ mm bei offenem Schieber hinter dem Kanal.

Datum 17. 12. 08. Versuch Nr. 19.

Drücke in 0,01 kg/qcm.

Kessel- druck	Druck an der Stelle -14	Wasser- menge ltr/sk	Kessel- druck	Druck an der Stelle -14	Wasser- menge ltr/sk	Kessel- druck	Druck an der Stelle -14	Wasser- menge ltr/sk
660	605	7,37	460	418	6,22	—	180	4,17
600	550	7,12	400	365	5,85	—	157	3,86
590	540	7,1	350	310	5,39	—	141	3,5
560	510	6,85	290	255	4,95	—	126	3,02
500	460	6,52	260	230	4,68	—	105	2,7

Zahlentafel 8.

Kanal I. Flüssigkeits- (statischer) Druck in der Symmetrieachse der Deckfläche.
Datum 1. 4. 09. Kesseldruck 9 kg/qcm. Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	20	21	22	23	24	25
Wassermenge ltr/sk	3	3,95	5,05	6,06	6,58	7,12
112	753	663	521	354	260	155
100	759	670	534	371	280	178
90	763	677	541	388	300	199
80	768	681	546	398	316	211
70	771	687	551	408	330	226
60	773	691	561	420	340	245
50	775	693	571	437	350	258
40	781	696	578	450	368	282
30	781	698	588	458	375	298
27	784	—	602	490	412	344
25	—	728	—	—	—	—
23	790	—	678	572	531	513
20	838	798	747	697	660	642
15	860	841	808	780	755	740
10	865	851	841	822	802	790
5	870	861	849	840	831	820
0	872	868	858	848	840	836
-14	880	870	864	853	850	848

Zahlentafel 9.

Kanal II erweitert. Flüssigkeits- (statischer) Druck in der Symmetrieachse
der Deckfläche.

Datum 23. 3. 09. Kesseldruck 9 kg/qcm. Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	26	27	28	29	30	31
Wassermenge ltr/sk	2,94	3,95	5,07	6,06	6,6	7,1
112	829	788	730	672	628	590
105	828	781	722	652	610	572
100	827	774	708	638	595	548
95	826	770	706	622	578	533
90	821	767	701	616	568	520
80	816	759	695	600	547	497
70	811	756	678	586	528	470
60	803	748	664	566	508	446
50	799	741	650	548	484	420
40	796	736	639	528	462	398
35	792	728	630	518	448	387
30	791	720	618	500	432	368
28	790	—	—	—	419	341
27	788	716	609	490	402	331
24	783	710	602	486	398	328
22	781	712	601	480	420	348
20	787	719	—	496	462	399
18	—	—	641	532	—	—
15	822	776	713	642	590	540
10	856	828	800	768	744	718
5	869	856	841	820	807	797
0	874	868	856	841	832	828
- 5	876	872	858	850	839	839
-14	877	876	862	855	848	844

Zahlentafel 10.

Kanal III erweitert. Flüssigkeits- (statischer) Druck in der Symmetrieachse der Deckfläche.

Datum 29. 3. 09. Kesseldruck 9 kg/qcm. Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	32	33	34	35	36	37	
Wassermenge ltr/sk	3,0	3,98	5,07	6,07	6,57	7,1	
Stellung der Meßöffnung	112	839	812	778	740	720	694
	100	838	810	770	728	707	677
	90	836	808	759	710	689	650
	80	835	798	752	698	668	629
	70	830	788	736	674	633	592
	60	824	771	716	642	600	550
	50	810	758	686	606	553	509
	40	798	741	658	554	500	438
	35	789	729	632	522	458	382
	30	778	710	598	478	409	330
	28	770	702	580	463	388	298
	24	767	684	559	412	327	239
	20	778	762	591	438	358	267
	15	818	779	707	630	590	517
	10	848	830	794	752	740	718
	5	865	856	838	811	806	801
	0	869	866	852	838	835	824
-14	877	871	862	851	846	846	

Zahlentafel 11.

Kanal IV erweitert. Flüssigkeits- (statischer) Druck in der Symmetrieachse der Deckfläche.

Datum 29. 3. 09. Kesseldruck 9 kg/qcm. Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	38	39	40	41	42	43	
Wassermenge ltr/sk	2,94	3,96	5,06	6,06	6,6	7,1	
Stellung der Meßöffnung	112	859	842	821	792	772	762
	105	858	834	814	786	767	758
	100	856	836	811	780	761	750
	95	854	835	809	774	759	743
	90	852	834	804	768	754	738
	80	850	827	796	758	747	718
	70	848	819	778	745	724	698
	60	838	807	763	712	688	658
	50	830	792	743	681	650	614
	40	822	767	698	618	570	522
	35	809	747	659	556	503	439
	30	796	718	612	488	420	344
	28	789	714	603	478	401	330
	26	794	728	622	498	423	348
	23	804	748	668	572	500	440
	20	829	781	728	653	598	560
	15	854	829	788	758	731	712
10	863	850	830	809	790	773	
5	869	865	849	832	824	821	
0	872	869	856	848	840	833	
- 5	874	870	860	851	844	837	
-14	879	872	861	852	849	839	

Zahlentafel 12.

Kanal II verengt. Flüssigkeitsdruck in der Symmetrieachse der Deckfläche.
Datum 31. 3. 09. Kesseldruck 9 kg/qcm. Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	44	45	46	47	48	49	
Wassermenge ltr/sk	2,96	3,95	5,07	6,06	6,6	7,1	
Stellung der Meßöffnung	112	792	721	628	524	458	390
	108	786	716	621	496	424	354
	104	779	704	598	476	392	318
	100	780	708	600	478	400	335
	98	784	711	606	482	408	345
	94	787	718	619	499	425	365
	90	790	725	628	522	448	389
	80	799	740	650	548	484	424
	70	803	750	670	578	520	471
	60	818	761	689	602	551	500
	50	824	771	706	626	581	536
	40	830	782	721	652	603	561
	30	834	792	734	673	632	589
	20	849	813	769	729	700	674
	10	870	850	839	819	804	790
0	877	861	858	848	839	832	
-14	879	870	866	856	850	846	

Zahlentafel 13.

Kanal III verengt. Flüssigkeitsdruck in der Symmetrieachse der Deckfläche.
Datum 24. 3. 09. Kesseldruck 9 kg/qcm. Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	50	51	52	53	54	55	
Wassermenge ltr/sk	2,98	3,96	5,05	6,08	6,6	7,1	
Stellung der Meßöffnung	112	782	730	625	518	420	346
	107	—	700	508	448	350	265
	104	772	698	578	442	347	260
	100	775	699	588	460	374	287
	95	788	717	614	520	440	370
	90	798	736	646	551	482	428
	80	812	761	690	614	559	516
	70	825	781	727	660	621	578
	60	834	798	750	700	666	630
	50	840	810	775	730	704	681
	40	844	821	787	750	730	704
	30	850	830	800	768	749	730
	20	862	845	819	788	777	760
	10	874	856	840	820	812	807
	0	875	869	856	840	838	831
-14	876	871	860	854	848	842	

Zahlentafel 14. Ergebnisse der Ausmessung der Kanäle.

Länge	Höhe	Kanal I		Kanal II		Kanal III		Kanal IV		Kanal II'		Kanal III'	
		Sehne	Bogen	Sehne	Bogen	Sehne	Bogen	Sehne	Bogen	Sehne	Bogen	Sehne	Bogen
125	27,343			28,68		29,02				27,25		27,46	
120	27,340	7,40		26,31		26,28		27,31		22,63		23,34	
115	27,337			21,90		22,82				15,23		16,32	
110	27,334	7,48		15,32		19,15		25,17	25,078	9,05		9,95	
105	27,331			11,61		16,43				8,04		7,44	
100	27,328	7,52	7,52	11,16	11,16	15,74	15,722	22,99	22,903	8,25	8,25	7,73	7,726
90	27,322	7,60	7,60	10,75	10,75	14,56	14,543	20,86	20,780	8,66	8,66	8,79	8,786
80	27,317	7,65	7,65	10,33	10,33	13,40	13,384	18,68	18,609	9,10	9,10	9,86	9,855
70	27,310	7,65	7,65	9,94	9,94	12,25	12,236	16,49	16,427	9,54	9,54	10,92	10,915
60	27,305	7,66	7,66	9,48	9,48	11,12	11,107	14,36	14,305	9,95	9,95	12,09	12,084
50	27,299	7,66	7,66	9,09	9,09	10,02	10,008	12,24	12,194	10,30	10,30	13,24	13,234
40	27,293	7,68	7,68	8,65	8,65	8,93	8,920	10,12	10,082	10,70	10,70	14,42	14,413
30	27,287	7,74	7,74	8,17	8,17	7,87	7,861	8,04	8,0096	11,10	11,10	15,51	15,503
25	27,284	7,97		7,97		7,36		7,98		11,32		16,11	
20	27,282	11,24		7,86		7,43		10,87		12,19		16,95	
15	27,279	17,22		10,87		11,20		17,18		17,98		20,18	
10	27,276	22,40		18,14		18,54		23,64		23,66		24,07	
5	27,273	26,13		24,63		24,73		28,17		27,37		27,35	
0	27,270	28,88		28,61		27,83		30,00		29,09		29,50	

Zahlentafel 15. Durchflußgeschwindigkeiten.

Länge	Kanal I		Kanal II		Kanal III		Kanal IV		Kanal II'		Kanal III'	
	Fläche	Geschw.	Fläche	Geschw.	Fläche	Geschw.	Fläche	Geschw.	Fläche	Geschw.	Fläche	Geschw.
	qmm	m/sk	qmm	m/sk	qmm	m/sk	qmm	m/sk	qmm	m/sk	qmm	m/sk
125			784,20	6,38	793,50	6,30			745,10	6,71	790,92	6,32
120	202,32	24,65	719,32	6,95	718,50	6,93	743,82	6,72	618,70	8,07	638,16	7,84
115			601,41	8,32	623,83	8,14			416,34	12,01	446,16	11,2
110	204,46	24,4	418,75	11,94	523,44	9,55	685,98	7,30	247,37	20,2	271,95	13,4
105			317,31	15,76	449,06	11,10			219,74	22,75	203,34	24,6
100	205,51	24,35	304,98	16,39	430,14	11,34	625,74	7,98	225,46	22,20	211,14	23,65
90	207,65	24,1	293,71	17,05	397,80	12,56	567,76	8,80	236,61	21,1	240,14	20,8
80	208,98	23,9	282,18	17,70	366,04	13,62	508,34	9,83	248,58	20,1	269,40	18,57
70	208,92	23,9	271,47	18,41	334,56	14,92	443,65	11,1	260,54	19,18	298,09	16,76
60	209,16	23,9	257,85	19,40	303,63	16,46	390,61	12,78	271,68	18,4	329,93	15,15
50	209,11	23,90	248,14	20,1	273,53	18,28	332,87	14,98	281,18	17,75	361,26	13,83
40	209,61	23,85	236,08	21,18	243,72	20,5	275,16	18,13	292,04	17,1	393,33	12,7
30	211,20	23,68	222,93	22,40	214,75	23,24	218,55	22,80	302,89	16,5	422,98	11,8
25	217,45	23,0	217,45	23,00	200,81	24,90	217,7	22,95	308,85	16,1	439,50	11,36
20	306,65	16,3	214,43	23,30	202,70	24,65	296,5	16,83	332,57	15,0	462,38	10,8
15	469,74	10,68	296,52	16,88	305,52	16,35	468,6	10,63	490,48	10,2	550,40	9,08
10	610,98	8,17	494,79	10,10	505,70	9,88	644,8	7,75	645,35	7,73	656,44	7,61
5	712,64	7,0	671,73	7,45	674,47	7,73	763,3	6,51	746,46	6,69	745,86	6,7
0	737,56	6,34	769,28	6,50	758,93	6,59	818,1	6,11	793,28	6,30	804,46	6,21

Berechnung der Verluste.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Länge mm	Geschwindigkeitshöhe kgcm ⁻²		aus- gegliche Verluste kg/qcm	Verluste für 1 cm einschl. Verschiebung	Verluste korrig kg/qcm	Wirkungs- grad vH	Verluste für 1 cm vH	Geschw.- Höhe vH	Verluste für 1 cm: Geschw.-Höhe	D	β
	be- rechnet	ge- messen									

Zahlentafel 16. Kanal I.

100	3,0171	3,4850	0,4680		0,4016	88,8					
90	2,9551	3,3500	0,4000	0,0685	0,3331	89,9	2,08		0,0232		0,00614
80	2,9175	3,2500	0,3325	0,0645	0,2686	91,6	2,02		0,0221		0,00578
70	2,9192	3,2000	0,2810	0,0595	0,2091	93,3	1,9		0,0204		0,00533
60	2,9127	3,1300	0,2170	0,0565	0,1526	95,03	1,842		0,0189		0,00506
50	2,9141	3,0800	0,1660	0,0535	0,0990	96,7	1,775		0,0183		0,00480
40	2,8972	3,0150	0,1180	0,0505	0,0485	98,3	1,71		0,0174		0,00453
30	2,8565	2,9250	0,0685	0,0485	0,0	100	1,70		0,0170		0,00435

vergl. Spalte 7

11,158

Lage des Schnitt-
punktes $l = -\infty$
 $\alpha = 0^\circ$ $c = 0$

Zahlentafel 17. Kanal II.

100	1,3700	1,6900	0,3200		0,2656	89,7		53,4			
90	1,4770	1,7950	0,3180	0,0255	0,2401	90,6	0,99	57,5	0,01725	3,62	0,00703
80	1,6002	1,8900	0,2880	0,0295	0,2106	91,8	1,15	62,4	0,01841	4,06	0,00726
70	1,7290	1,9850	0,2560	0,0335	0,1771	93,1	1,3	67,4	0,01938	4,52	0,00742
60	1,9017	2,1050	0,2030	0,0385	0,1386	94,6	1,5	74,1	0,02020	5,12	0,00754
50	2,0693	2,2550	0,1860	0,0415	0,0970	96,2	1,61	80,7	0,02000	5,77	0,00719
40	2,2861	2,4500	0,1290	0,0465	0,0505	98,0	1,81	89	0,02040	6,57	0,00708
30	2,5649	2,6500	0,0810	0,0505	0,0	100	1,97	100	0,01965	7,56	0,00668

Lage des Schnitt-
punktes
 $l = -161,875$ mm
 $\alpha = 20' 26'' 50''$
 $c = 0,042713$

Zahlentafel 18. Kanal III.

90	0,8034	1,1450	0,3416		0,3681	86,1		29,2			
80	0,9488	1,2500	0,3010	0,0345	0,3336	87,9	1,25	34,4	0,0364	1,905	0,0181
70	1,1189	1,3900	0,2710	0,0435	0,2901	89,4	1,58	40,6	0,0389	2,480	0,0175
60	1,3790	1,6000	0,2210	0,0535	0,2366	91,4	1,94	50,9	0,0382	3,14	0,0170
50	1,6989	1,8500	0,1510	0,0655	0,1710	93,8	2,38	61,7	0,0386	3,975	0,0165
40	2,1402	2,2100	0,0750	0,0755	0,0955	96,55	2,74	77,6	0,0353	5,460	0,0138
30	2,7566	2,7350	-0,0215	0,0955	0,0	100	3,45	100,0	0,0345	7,74	0,0128

Lage des Schnitt-
punktes
 $l = -39,8$ mm
 $\alpha = 6^\circ 26' 34''$
 $c = 0,11244$

Zahlentafel 19. Kanal IV.

110	0,2776	0,6100	0,3324		0,3052	88,6		10,4			
100	0,3254	0,6550	0,3296	0,0155	0,2896	89,2	0,58	12,2	0,0476	0,468	0,0331
90	0,3953	0,7050	0,3003	0,0195	0,2701	89,9	0,73	14,8	0,0493	0,606	0,0322
80	0,4931	0,7800	0,2869	0,0245	0,2456	90,8	0,92	18,5	0,0497	0,775	0,0316
70	0,6330	0,9000	0,2670	0,0305	0,2151	92,0	1,14	23,7	0,0480	1,042	0,0293
60	0,8351	1,0500	0,2149	0,0385	0,1766	93,4	1,44	31,3	0,0460	1,466	0,0262
50	1,1500	1,3000	0,1500	0,0485	0,1280	95,2	1,82	43,1	0,0423	2,186	0,0222
40	1,6830	1,7960	0,1070	0,0585	0,0695	97,4	2,19	63,0	0,0348	3,522	0,0166
30	2,6676	2,7000	0,0324	0,0695	0,0	100	2,61	100	0,0261	6,350	0,0109

Lage des Schnitt-
punktes $l = -7,3$ mm
 $\alpha = 120' 13' 16''$
 $c = 0,2133$

Zahlentafel 20. Kanal II' (verengt).

100	2,5067	2,7150	0,2080		0,1116	95,74		95,74			
90	2,2760	2,4500	0,1740	0,0275	0,0841	96,8	1,050	87,1	0,0121	7,51	0,00366
80	2,0620	2,2150	0,1530	0,0225	0,0616	97,64	0,860	78,7	0,0109	6,5	0,00346
70	1,8815	2,1050	0,1324	0,0165	0,0451	98,28	0,630	71,8	0,0088	5,71	0,00289
60	1,7263	1,8600	0,1340	0,0135	0,0316	98,79	0,516	66,0	0,0078	5,1	0,002655
50	1,6116	1,7300	0,1184	0,0115	0,0200	99,23	0,440	51,6	0,0072	4,54	0,00254
40	1,4940	1,5900	0,0960	0,0105	0,0095	99,64	0,400	57,0	0,0070	4,07	0,00259
30	1,3798	1,4700	0,0900	0,0095	0,0	100	0,362	52,6	0,0069	3,68	0,00257

Lage des Schnitt-
punktes
 $l = +308,4$ mm
 $\alpha = 20' 19' 57''$
 $c = 0,04071$

Zahlentafel 21. Kanal III (verengt).

100	2,8571	2,9200	0,0630		0,0591	97,97		97,97			
90	2,2026	2,2650	0,0620	0,0150	0,0441	98,48	0,515	75,6	0,00681	8,3	0,00183
80	1,7606	1,8050	0,0440	0,0120	0,0321	98,9	0,412	60,4	0,00681	5,88	0,00204
70	1,4286	1,4650	0,0360	0,0100	0,0221	99,24	0,343	49,0	0,00700	4,35	0,00230
60	1,1682	1,1950	0,0270	0,0080	0,0146	99,5	0,274	40,0	0,00685	3,284	0,00244
50	0,9766	0,9950	0,0180	0,0060	0,0080	99,72	0,223	33,5	0,00666	2,60	0,00250
40	0,8258	0,8450	0,0190	0,0045	0,0035	99,88	0,154	28,4	0,00545	2,07	0,00218
30	0,7102	0,7250	0,0150	0,0035	0,0	100	0,120	24,4	0,00493	1,695	0,00208

Lage des Schnitt-
punktes
 $l = +170,5$ mm
 $\alpha = 6^\circ 16' 50''$
 $c = 0,10961$

Zahlentafel 23. Kanal II. Verteilung der nutzbaren

Versuch Nr.	63 a	63 b	63 c		64 a	64 b	64 c	64 d
Datum	3. 12. 09	3. 12. 09	3. 12. 09		7. 12. 08	7. 12. 08	7. 12. 08	7. 12. 08
Kesseldruck kg/qcm	9	9	9		9	9	9	9
Wassermenge ltr/sk	7,15	7,15	7,15		7,15	7,15	7,15	7,15
Höhe	13,4	13,4	13,4		20,4	20,4	20,4	20,4
Länge	130	100	60		130	100	60	20
Breite	+15	570	580		+15	560	530	530
	12	670	530		13	600	530	530
	9	750	560		11	550	530	
	6	820	700	650	9	800	600	530
	5				7	800	800	560
	4		720		5	850	800	700
	3	870	872	875	4		780	850
	2			881	3	850	850	880
	0	870	740	878	2			851
	2			878	0	650	850	850
	3	720	870	870	2			855
	4			810	3	520	700	840
	5		860		4		730	780
	6	600	700	850	5	520	600	800
	9	540	730		7	520	780	
	12	520	520	620	9	520	570	650
-15	520	520	560	11	520	620		
				13	520	570		
				-15	520	540		

Zahlentafel 26b.

**Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanales.
Drücke in 0,01 kg/qcm.**

Versuch Nr.	72 a	72 b	72 c	72 d	73 a	73 b	73 c	73 d	74 a	74 b	74 c	74 d
Datum	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08
Kesseldruck kg/qcm	6,8	6,7	6,7	6,5	6,8	6,8	6,7	6,55	6,8	6,85	6,75	6,65
Wassermenge ltr/sk	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37
Höhe	13,6	13,6	13,6	13,6	24,6	24,6	24,6	24,6	13,6	13,6	13,6	13,6
Länge	130	100	60	25	130	100	60	25	130	100	60	25
<i>p</i> _{st} an d. Stelle 112	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
Breite	+15	220			230				350			
	12	220	170		230	165			350	330		
	9	220	170		230	165			380	330		
	7			30			220				140	
	6	240	180		230	180			410	360		
	5			30	4: 630		580	4: 620			270	: 638
	3	270	240	640	635	250	260	650	630	440	420	630
	2			650	640			650	632			650
	0	310	340	655	642	230	320	650	638	460	470	660
	2			660	638			630	638			658
	3	360	540	650	635	310	400	600	630	475	540	654
	5			620	4: 630			550	4: 628			640
	6	420	560			360	440			490	550	
	7			30				400				280
	9	480	520			380	350			530	530	
	12	490	430			380	300			510	480	
-15	480				350				470			

Energie über die Breite des Kanales. Drücke in 0,01 kg/qcm.

65 a 7. 12. 08	65 b 7. 12. 08	65 c	65 d	66 a 7. 12. 08	66 b 7. 12. 08	66 c 7. 12. 08	66 d 7. 12. 08	Nutzbare Energie im mittelsten Stromfaden.
9 7,15 24,4 130	9 7,15 24,4 100	9 7,15 24,4 60	9 7,15 24,4 25	9 7,15 26,4 130	9 7,15 26,4 100	9 7,15 26,4 60	9 7,15 26,4 25	
520 520 520				530 530 530				Versuch Nr. 67 Datum . . . 7.12.08 Kesseldruck 9 Wassermenge 7,15 Höhe . . . 13,4
520 520 520				530 530 530				
540 540				540 530 530				Länge
580				560 540				
620 570 570				570 520				130 870 120 872 110 876 100 876 90 878 80 880 70 881 60 881 50 884 40 886 30 887
640 580	640 670 620			540 540 490	660 610 570			
	670 650 620	870			620 620 570	840	892	
550 650	680 630 630	872	892	500 540 490	580 580	840	894	
		878	894		570 620	820	896	
500 620	680 620 640	880	896	480 540 480	520 620 580	800 610	894	
		872	894		620 660	700 770	893	
470 560 560	670 720	840	893	450 450 450	600 660	700 830		
	680 760	840			570 590	830		
470 510	630			450 450 450	550 570			
470 530				450 450 450				
470 470				450 450 450				
470 470				450 450 450				
470 470				450 450 450				
470 470 470				450 450 450				

Zahlentafel 26c.

**Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanales.
Drücke in 0,01 kg/qcm.**

Versuch Nr. . . .	75 a	75 b	75 c	75 d	76 a	76 b	76 c	76 d	77 a	77 b	77 c	77 d	
Datum	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	12. 18. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	
Kesseldruck kg/qcm	6,85	6,8	6,7	6,8	9	9	9	9	9	9	9	9	
Wassermenge ltr/sk	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	
Höhe	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	24,6	24,6	24,6	24,6	
Länge	130	100	60	25	130	100	60	25	130	100	60	25	
2 _{st} an d. Stelle 112	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	
Breite	+15	440			790				770				
	12	460	460		830	790			780	740			
	9	480	475		880	870			780	745			
	7			480			830				740		
	6	500	510		870	880			785	750			
	5			550			870				720		
	4				660			875				882	
	3	520	550	610	668	880	882	880	878	780	740	700	884
	2			650	672			885	880			680	888
	0	530	580	655	678	880	880	885	882	780	730	660	892
	2			655	675			880	878			630	888
	3	540	580	655	672	880	875	878	875	770	735	610	884
	4				670				870				880
	5			610				872				590	
	6	540	570			880	880			765	780		
7			590				780				570		
9	530	530			860	870			760	780			
12	520	450			820	780			760	740			
-15	490				780				760				

Zahlentafel 24.
Kanal II. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanales. Dricke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	68a	68b	68c	68d	68e	68f	68g	68h
Datum	8. 12. 08							
Kesseldruck kg/qcm	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Wassermenge ltr/sk	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Höhe	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4
Länge	50	110	115	120	125	180	185	142
+15				570 570 570	570 570 570	570 570 570	580 580 580	600 580 580
13								
12								
11				11: 600 580 570	610 570 570	570 570 570	740 580 580	750 600 580
9				8: 700 640 600	700 570	580 580 580	770 700 580	770 580
7		600						
6				780 740 720	780 780 680	770 680 600	770 580	750 570
5		700						
4	770							
3	780			780 780 780	780 780 720	780 780 680	740 680	680 740 600
0	780			780 780 780	770 780 780	750 780 720	770 740	650 750 700
8	780			660 700 760	770 780 780	680 770 770	600 780 770	600 680 750
4	778							
5								
6				600 630 660	600 720 770	600 780	570 750	600 770
7		600						
9				9: 580 600	580 650 630	590 690 780	570 570 750	580 580 740
11				10: 580	580 600 600	570 570 600	570 570	580 580 600
12								
18				11: 580 580	580 580 580	570 570 570	570 570 650	580 580 600
-15								
				580 580	580 580 580	570 570 570	570 570 600	580 580 580

Breite

Zahlentafel 25.
Kanal III. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanales. Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	64a	64b	64c	64d	65a	65b	65c	65d	66a	66b	66c	66d
Datum	15.12.08				15.12.08	15.12.08	15.12.08		15.12.08	15.12.08	15.12.08	15.12.08
Kesseldruck kg/qcm	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Wassermenge ltr/sk	5,33	5,33	5,33	5,33	6,8	6,8	6,8	6,8	7,25	7,25	7,25	7,25
Höhe	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Länge	130	100	60	25	130	100	60	25	130	100	60	25
+15	778	800	810	870	740	750	848	860	670	770	820	850
12	840	850	860	872	840	840	855	864	780	840	850	852
9	848	858	866	874	862	860	860	868	850	850	850	855
8	850	862	866	874	865	862	862	870	855	854	855	860
6	850	862	866	870	868	860	862	868	850	856	858	860
4	850	860	860	868	868	860	862	868	850	854	840	855
3	854	860	850	860	880	860	820	850	820	849	780	840
2	860	810	810	860	770	760	800	850	750	840	780	840
4	852	790			760	730			700	720		
6	810				780				700			
8	780				730				700			
9	770				730				700			
-15									670			

Nutzbare Energie
im mittelsten Strom-
faden.

Versuch Nr.	67	68
Datum	15.12.08	15.12.08
Kesseldruck	9	9
kg/qcm		
Wassermenge	6,8	5,33
ltr/sk		
Höhe	12,4	12,4
130	868	860
120	862	865
110	863	868
100	862	874
90	863	874
80	863	876
70	864	876
60	868	876
50	868	876
40	868	878
30	874	878

Zahlentafel 26a.
Kanal IV. Verteilung der nutzbaren Energie über die Breite des Kanales. Drücke in 0,01 kg/qcm.

Versuch Nr.	69a	69b	69c	69d	70a	70b	70c	70d	71a	71b	71c	71d
Datum	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.08	18.12.02
Kesseldruck kg/qcm	6,8	6,8	6,65	6,4	6,75	6,75	6,6	6,45	6,80	6,75	6,55	6,45
Wassermenge ltr/sk	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37
Höhe	13,6	13,6	13,6	13,6	22,6	22,6	22,6	22,6	13,6	13,6	13,6	13,6
Länge	130	100	60	25	130	100	60	25	130	100	60	25
Zeit an der Stelle 112	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,23	0,25	1	1	1	1
	20	20			30	30			100	100		
	20	20			30	30			100	100		
	20	20			30	30			100	100		
	20	20			200	160			100	130		
	20	20			400	400		4: 600	150	680		4: 638
	660	550	620	615	600	400	630	615	650	650	650	640
	665	600	648	620	650	658	640	618	200	658	655	642
	300	660	650	628	650	660	646	622	200	658	655	645
	400	660	642	618	658	660	638	618	250	658	655	648
	400	650	630	615	640	650	630	4: 610	420	640	640	4: 637
	30	30	450		400	500	50		500	200	30	
	20	25			100	100			460	120		
	20	20			30	30			400			

Breite

Zahlentafel 27.

Kanal IV. Nutzbare Energie des mittelsten Stromfadens.
 Drücke in 0,01 kg/qcm bezogen auf unveränderlichen Kesseldruck.

Versuch Nr.	78	79	80	81	82	83	84	
Datum	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 08	18. 12. 0	
Kesseldruck kg/qcm	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	9,0	9,0	
Wassermenge ltr/sk	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	5,27	
Höhe	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	
Länge	130	665	500	490	530	535	880	880
	120	660					880	880
	110	660					880	882
	100	660	668	570	550	580	882	880
	90	662					882	886
	80	662	665	590			882	886
	70	668	665	650	630			888
	60	665	665	670	665	665	885	880
	50	668	667	670	665	662	885	884
	40	668	667	670	665	665	886	886
30	668	670	678	665	665	887	886	
p_{112} an der Stelle 112	0,25	1	2	3	4	5	5	

