

Die Salzgeschwindigkeits-Methode von Allen zur Wassermessung in Rohrleitungen

Autor(en): **Müller, Karl E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **87/88 (1926)**

Heft 4

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-40828>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Die Salzgeschwindigkeits-Methode von Allen zur Wassermessung in Rohrleitungen. — Die Bekämpfung der Sohlen-Auskolkung bei Wehren durch Zahnschwellen. — Nochmals von Axialität und Raumgefühl. — Wettbewerb für ein Progymnasium in Thun. — Korrespondenz. — Teilrevision der schweizer. Bindemittelnormen vom Jahre 1925. — Miscellanea: Die neue eiserne Bogenbrücke der Michigan Central

R. R. unterhalb der Niagarafälle. Eidgen. Techn. Hochschule. Elektrifikation der norwegischen Bahnen. Limmatwerk Wettingen der Stadt Zürich. Die Stromversorgung der elektrifizierten Strecke Stockholm-Gothenburg. Unterwassertunnel Liverpool-Birkenhead. Telephonie in fahrenden Zügen. — Konkurrenzen: Limmatwerk Wettingen der Stadt Zürich. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Sektion Bern. Zürcher Ing.- u. Arch.-Verein.

Band 87.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 4

Die Salzgeschwindigkeits-Methode von Allen zur Wassermessung in Rohrleitungen.

Von Ing. Dr. KARL E. MÜLLER, Zürich.

In den Jahren 1921/23 hat Prof. C. M. Allen in Worcester (Mass.) eine neue Methode der Wassermessung ausgebildet und in die Praxis eingeführt, die keiner empirischen Koeffizienten bedarf und wegen ihrer vielseitigen Anwendungsfähigkeit bemerkenswert ist. Der Verfasser hatte Gelegenheit, diese neue Methode sowohl im Laboratorium kennen zu lernen als auch sie bei Messungen des Wirkungsgrades von Wasserturbinen praktisch anzuwenden. Bei dieser Gelegenheit entstand der vorliegende Versuch einer kurzen Theorie mit Diskussion einiger Fehlerquellen, der von allgemeinem Interesse sein dürfte, da sich von dieser Methode — nebst der praktischen Anwendung zur Wassermessung — noch mancherlei Aufschluss über das Problem der Strömung von Flüssigkeiten in offenen und geschlossenen Kanälen erwarten lässt.

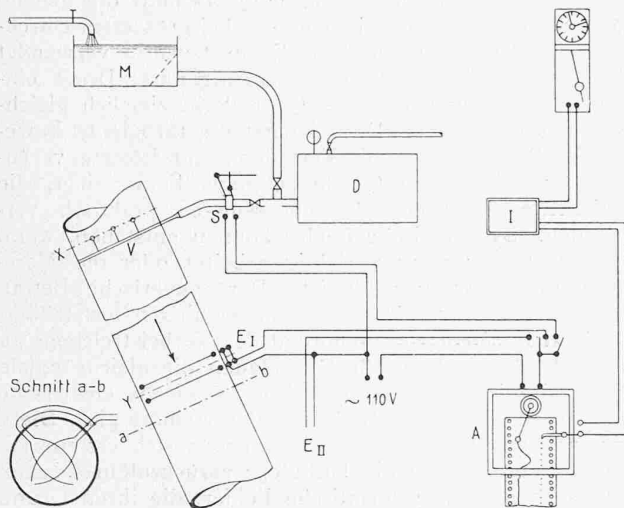


Abb. 1. Messanordnung.

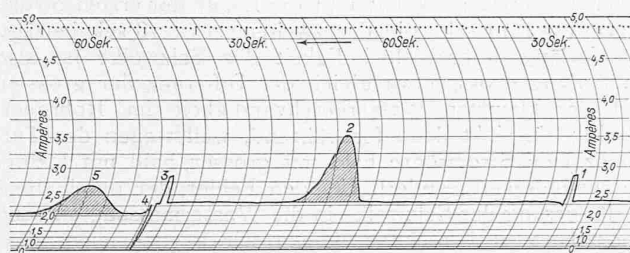


Abb. 2. Registrierstreifen.

Das Prinzip der Methode.

Das Messprinzip wurde von C. M. Allen wie folgt charakterisiert¹⁾: Die Salzgeschwindigkeits-Methode der Wassermessung beruht auf der Tatsache, dass Salz in Lösung die elektrische Leitfähigkeit des Wassers vermehrt. Eine Salzlösung wird nahe dem oberen Ende der Leitung eingeführt und das Vorbeistreichen der Lösung an einem oder mehreren Paaren von Elektroden an anderen Punkten der Leitung graphisch vermittelt elektrischer Registrier-

Instrumente aufgezeichnet. Der Zeitunterschied zwischen dem Vorbeistreichen an zwei Punkten und das Volumen der Leitung zwischen den gleichen Punkten werden genau gemessen. Die Wassermenge in m^3/sek ist dann gleich dem Volumen in m^3 dividiert durch die Zeit in sek.

Es wird also ein bekanntes Volumen ausgegossen und die dazu notwendige Zeit bestimmt. Eine Schwierigkeit besteht nur darin, dass das Volumen auf zwei Seiten nicht von festen Wänden, sondern durch die Salzlösung begrenzt ist; andererseits fallen alle empirischen Koeffizienten weg. Die Salzgeschwindigkeits-Methode darf nicht mit der chemischen Methode der Salzkonzentration verwechselt werden, bei der eine Salzlösung von bekannter Konzentration kontinuierlich eingeführt und die Wassermenge aus der Verdünnung berechnet wird. Die Konzentration der Salzlösung braucht bei der neuen Methode nicht bekannt zu sein; sie wird unter Druck kurzzeitig eingeführt, weswegen man jede solche Einspritzung einen „Schuss“ nennt.

Man erkennt sofort, dass sich das Messprinzip auch umkehren lässt: Bei stark verunreinigtem Wasser könnte man eine nichtleitende Lösung einspritzen. Erfolgreiche Versuche mit dieser umgekehrten Methode liegen jedoch nicht vor.

Eine Vergleichsmessung im Laboratorium an einer Rohrleitung von etwa 1 m Durchmesser und 135 m Länge, wobei die Salzgeschwindigkeits-Methode mit einem geeichten Ueberfall verglichen wurde, ergab zufällige Differenzen von $1/10\%$ und eine systematische Differenz von $1/4\%$. Jeder Messpunkt war dabei das Mittel aus zehn Einzelmessungen oder Schüssen.

Praktische Ausführung der Messung.

In schematischer Form zeigt Abbildung 1 die Messanordnung für den Fall, dass Druckluft leicht zu beschaffen ist. Oben ist ein Mischgefäß M mit Wasserzufuhr angedeutet, in dem die Salzlösung zubereitet und dann in den Druckkessel D abgelassen wird. Nach beendeter Füllung wird der Hahn der Druckluftleitung geöffnet und der Schuss kann nun durch kurzzeitiges Öffnen des Absperrschiebers S abgegeben werden; am Ende der Einspritzleitung befinden sich eines oder mehrere über den Querschnitt der Rohrleitung verteilte, mit Federn versehene Rückschlagventile, deren Sitze die Querschnittsebene X bestimmen. Der Schieber S ist mit einem elektrischen Kontakt versehen, der während des Öffnens des Schiebers einen Stromstoß durch das Registrierinstrument A sendet und dadurch auf dem Papierstreifen eine Marke bewirkt. Weiter unten in der Rohrleitung ist in Abbildung 1 ein Elektrodenpaar E_I angedeutet, der aus zwei, um 90° versetzten Elektrodenpaaren besteht, deren Mitte die Querschnittsebene Y definiert. Die Elektroden sind elektrisch mit dem Registrierinstrument A verbunden und das Vorbeistreichen der Salzlösung bewirkt auf dem Papierstreifen eine entsprechende Kurve. Um einen Zeitmassstab zu erhalten, ist angenommen, dass vermittelt eines, durch ein Sekundenpendel gesteuerten Funkeninduktors I jede Sekunde ein kleines Loch in den Papierstreifen eingebrannt wird.

Abbildung 2 zeigt ein Stück eines Registrierstreifens, der bei Versuchen an einer 20000 PS Francis-Turbine gewonnen wurde. Bei 1 erkennt man das Einführungssignal des 129. Schusses, bei 2 die Kurve des ersten Elektrodenpaars, bei 5 die niedrigere und längere Kurve des zweiten Elektrodenpaars. Da die Schüsse überlappt gegeben wurden erscheint bei 3 bereits das Einführungssignal von

¹⁾ „The Salt Velocity Method of Water Measurement“ by Charles M. Allen and Edwin A. Taylor, paper presented at the annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers, New York, December 1923.

Schuss 130. Die Unstetigkeit bei 4 entstand durch das Umschalten des Instrumentes vom ersten auf den zweiten Elektrodensatz. Bei Berücksichtigung des Einführungssignals kann man mit einem einzigen Elektrodensatz auskommen; verwendet man zwei, so hat man zwei Messstrecken die sich gegenseitig kontrollieren. Die der Messung zugrunde liegenden Volumina sind durch die Wand der Rohrleitung und durch die Querschnittsebenen X, Y bestimmt. Wie der Zeitunterschied aus dem Registrierstreifen gewonnen wird, soll im folgenden gezeigt werden.

Theorie der Methode.

Um für die Diskussion der Fehlerquellen einen Ausgangspunkt zu gewinnen, erwies es sich als wünschenswert, eine Theorie der Methode aufzustellen, da jede zu deren Durchführung notwendige vereinfachende Annahme Anlass zu einem systematischen Fehler geben wird. Abbildung 3 soll ein Stück einer Rohrleitung darstellen, in dem die Salzlösung an zwei Stellen durch eine Wolke schwarzer Punkte angedeutet ist. Macht man die Annahme, dass jeder Stromfaden vom Querschnitt df durch ein und nur ein kleines Volumen Salzlösung von der Abszisse x dargestellt wird, so kann man zwei Volumina V_1 und V_2 definieren:

$$V_1 = \int_{x_1} x_1 df \quad \text{und} \quad V_2 = \int_{x_2} x_2 df$$

Sei F der konstante Querschnitt der Rohrleitung; dann sind die Abszissen X_1 und X_2 der Schwerpunkte jeder Salzwolke gegeben durch:

$$F X_1 = V_1 \quad \text{und} \quad F X_2 = V_2$$

das durch die Salzwolken abgegrenzte Wasservolumen ist daher

$$F D = F (X_2 - X_1)$$

Setzt man die Abszissen X_1 und X_2 zum voraus fest und bestimmt man die Zeitpunkte t_1 und t_2 , zu denen der Schwerpunkt einer vom Wasser mitgeführten Salzwolke diese Querschnitte passiert, so ist die Wassermenge Q bestimmt durch:

$$Q = \frac{F D}{t_2 - t_1}$$

Wie bestimmt man aber diese Zeitpunkte? Denken wir uns zu beiden Seiten des Querschnittes X_1 in kleinem Abstände zwei feinmaschige Siebe, von einander und von der Rohrleitung isoliert, an die wir eine Wechselspannung vom konstanten Betrag E anlegen. Führt nun jede Elementarröhre der fließenden Wassermasse über ein kleines Stück ihrer Länge eine Salzlösung von bestimmter Konzentration mit sich, dann wird während des Vorbeiströmens an den Elektroden ein elektrischer Strom fließen. Bei gegebener Elektrodenanordnung bildet eine Salzlösung einen von der Stärke des Wechselstromes unabhängigen, aber von der Konzentration und der Temperatur abhängigen Widerstand. Wir müssen nun die Annahme machen, dass die von den Stromfäden mitgeführten kleinen Salzvolumina während der Zeit des Vorbeistreichens an den Elektroden die konstante axiale Geschwindigkeitskomponente v besitzen. Man kann dann einfacher die Salzwolke als ruhend, die Elektrode als gleichförmig bewegt betrachten. Die Gleichung der Elektrode ist dann:

$$x_1 - X_1 = v (t - t_1)$$

Da X_1 die Abszisse des Schwerpunktes der Salzwolke ist, besteht die Beziehung:

$$\int_F (x_1 - X_1) df = 0$$

In einem Zeitpunkt t werden mehrere df sich in dem durch die Elektroden definierten Querschnitt befinden und zusammen den elektrischen Strom i erzeugen; bezeichnen wir die partielle Summe dieser df mit dF , dann ist:

$$dF \text{ konst} = i dt$$

woraus durch einsetzen:

$$\int_F (x_1 - X_1) df = \int_F (x_1 - X_1) dF = \int_F (t - t_1) \text{ konst } i dt = 0$$

wobei das letzte Integral über die ganze Zeit zu nehmen ist, während der die Salzwolke an den Elektroden vorbeistreicht. Die letzte Gleichung sagt aus, dass der Zeitpunkt

t_1 dem Schwerpunkt der elektrischen Stromkurve i entspricht.

Die Auswertung des Registrierstreifens Abb. 2 hat also derart zu geschehen, dass die Abszissen der Schwerpunkte der in Abbildung 2 der Deutlichkeit wegen schraffierten Flächenstücke gefunden werden; am Zeitmasstab ergeben sich dann die gesuchten Zeitdifferenzen. Als „Einführungszeit“ nimmt man den Mittelpunkt der Oeffnungsdauer des Einlassschiebers S.

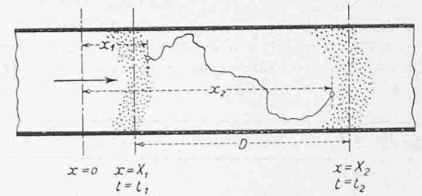


Abb. 3.

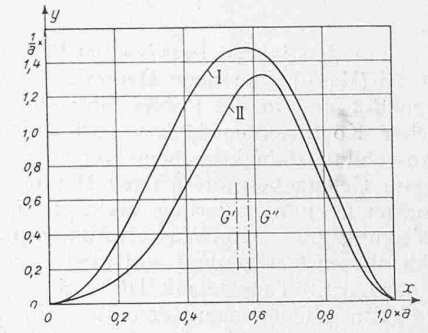


Abb. 4.

Fehlerquellen.

Erste Fehlerquelle. Wir hatten die Annahme gemacht, dass jede Stromröhre von gleichem Querschnitt die gleiche gelöste Salzmenge führte. Indem man bei grösserem Durchmesser der Rohrleitung mehrere Einspritzventile verwendet und ausserdem die Salzlösung kurzzeitig unter Druck einspritzt, erreicht man, dass der Querschnitt ziemlich gleichmässig beschickt wird. Dazu kommt die turbulente Bewegung des Wassers, die die Verteilung der Lösung verändert, sodass hier eine Quelle zufälliger Fehler liegt, die im Mittelwert mehrerer Einzelmessungen praktisch verschwinden. Systematische Fehler können entstehen, wenn die Einspritzanordnung unrichtig arbeitet oder die Messstrecke nicht gut gewählt ist. Der numerische Betrag solcher Einflüsse ist jedoch wohl nur empirisch feststellbar.

Zweite Fehlerquelle. Während des Vorbeistreichens an den Elektroden sollten alle Stromfäden die gleiche axiale Geschwindigkeitskomponente besitzen, damit die elektrische Stromkurve ein getreues Bild der Salzverteilung gibt. Diese Annahme ist nicht erfüllt, und es ergeben sich erstens zufällige Fehler, die auf die Turbulenz zurückzuführen sind, zweitens aber auch systematische Fehler, die ihren Grund in der fortwährenden Verlängerung der Salzwolke haben. Aus Abbildung 2 sieht man, dass Schuss 129 eine Einspritzdauer von etwa 1 sek hat und die Länge der ersten Stromkurve etwa 14 sek, die der zweiten etwa 18 sek beträgt. Die Verlängerungsgeschwindigkeit der Salzwolke ist also am Anfang gross, etwa gleich der Differenz der grössten und der kleinsten Wassergeschwindigkeit im Rohrquerschnitt; sie sinkt dann fortwährend, weil wegen der Turbulenz jede Stromröhre bald mit grosser, bald mit kleiner Geschwindigkeit wandert. Um den Fehler, der durch diese Verlängerung der Salzwolke in die Wassermessung eingeht, angenähert zu berechnen, haben wir angenommen, dass die Verlängerungsgeschwindigkeit während des Vorbeistreichens an den Elektroden konstant bleibt und dass die proportionale Verlängerung der Abszissen der Stromkurve einer proportionalen Erniedrigung der Ordinaten parallel läuft. In Abbildung 4 zeigt I die der Rechnung zu Grunde gelegte Kurve und II vergleichsweise eine Kurve aus einem Registrierstreifen. G' und G'' geben die Abszissen der Schwerpunkte der beiden Kurven. Die Gleichung der Kurve I im Bereich von $x = 0$ bis a ist:

$$a^7 y = 10 (x^6 - 2 a^2 x^4 + a^4 x^2).$$

Die Kurve ändert ihre Form indem man den Parameter a zeitlich veränderlich macht:

$$a = kt$$

und die elektrische Stromkurve wird erhalten, indem man die Elektrode durch eine wandernde Abszisse

$$x = c - vt$$

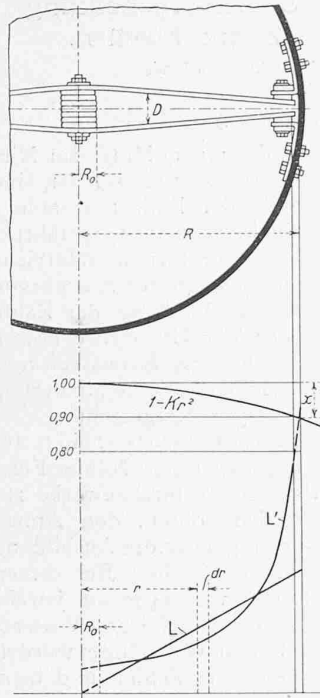


Abb. 7. Elektrodenpaar.

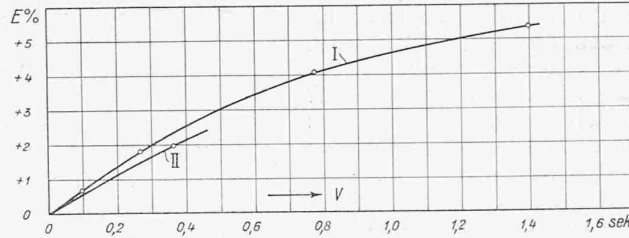


Abb. 5. Relativer Fehler der Zeit (zweite Fehlerquelle).
I Fehler abgeleitet aus Kurve I in Abb. 4, II aus Kurve II in Abb. 4.

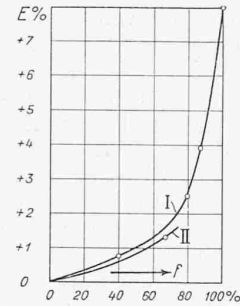


Abb. 6. Relativer Fehler der Zeit (dritte Fehlerquelle)
abgeleitet aus Kurve II, Abb. 4.

darstellt und alle drei Gleichungen vereinigt. Die weitere Rechnung beschränkt sich darauf, die Abszisse des Schwerpunkts zu finden und dem Resultat eine praktische Form zu geben. Es zeigt sich, dass der „relative“ Fehler, d. h. der Fehler ausgedrückt in % der Länge der Stromkurve, mit wachsender Verlängerungsgeschwindigkeit der Salzwolke zunächst rasch ansteigt, ein Maximum von etwa 6 % erreicht, dann wieder abnimmt. Der Anfang der Fehlerkurve ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Abszisse V ist die Verlängerungsgeschwindigkeit in sek/sek; z. B. nimmt in Abbildung 2 die Salzwolke von der Einspritzung bis zum ersten Elektrodenpaar eine Länge von τ auf 14 sek zu, und zwar in der Zeit von etwa 47 sek. Im Mittel wäre also $V = 13/47 = 0,28$. Zur Zeit, da die Salzwolke an dem ersten Elektrodenpaar vorbeistreicht, ist V bereits kleiner, schätzungsweise 0,13, und der „relative“ Fehler (Kurve I, Abbildung 5) ist demnach 0,9 %. Der Fehler im Endresultat ist nur $0,9 \cdot 14/47 = 0,3\%$ und die Wassermenge wird um diesen Betrag zu klein gemessen. Eine analoge Rechnung für die zweite Messstrecke zwischen den beiden Elektrodenpaaren zeigt, dass dort die Wassermenge etwa 0,2 % zu gross gemessen wird; im Mittelwert fällt aber dieser Fehler hier beinahe heraus.

In Abbildung 5 ist ferner eine Kurve II angedeutet; ihr einziger Punkt wurde durch ein Näherungsverfahren aus Kurve II, Abbildung 4, abgeleitet.

Dritte Fehlerquelle. Wir hatten die Annahme gemacht, dass die elektrische Wechselspannung E an den Elektroden konstant gehalten werde. Dies ist nicht der Fall wenn die Leitungen erheblichen Widerstand haben, oder wenn Widerstände absichtlich eingeschaltet werden um die Stromstärke zu regulieren. Dies bewirkt einen Fehler, weil die Stromkurve nicht symmetrisch ist. Bezeichnet i den Strom, wie er bei widerstandslosem Kreise sein würde, i' den wirklichen Strom, r den Widerstand im Kreise, R den variablen Widerstand der Salzlösung, so ist:

$$i' = \frac{E}{r} \frac{i}{E/r + i}$$

Mit dieser Formel, unter Benutzung der Kurve II in Abbildung 4, wurde der Fehler durch ein Näherungsverfahren ausgerechnet. In Abbildung 6 ist das Ergebnis dargestellt. Die Abszisse f ist der prozentuale Spannungsabfall bei Maximalstrom an den Elektroden; die Ordinate gibt wieder den „relativen“ Fehler, bezogen auf die Länge

der Stromkurve. Der Fehler hängt ausserdem vom Reststrom ab, auf den die Stromkurve überlagert ist (siehe Abbildung 2); Kurve I gilt bei Abwesenheit jedes Reststromes und Kurve II für einen Reststrom von $1/4$ des Maximalstromes. Enthält der elektrische Kreis ausser Widerstand auch noch Induktivität, dann ist der Fehler, bezogen auf gleichen

prozentualen Spannungsabfall, etwas grösser, und bezogen auf gleiche Impedanz, etwas kleiner als nach Abbildung 6. Trotzdem die Fehler nicht sehr gross erscheinen, empfiehlt es sich nicht, Widerstände oder Induktivitäten zur Stromregulierung zu verwenden.

Vierte Fehlerquelle. Da Metallsiebe ausserhalb des Laboratoriums nicht wohl als Elektroden in Frage kommen können, musste eine andere Form gefunden werden; die für kreisrunde Rohrleitungen jetzt gebräuchliche ist in Abbildung 7 dargestellt. Ein Elektrodenpaar besteht aus zwei Flacheisen, die in der Mitte durch einen Porzellanisolator von einander isoliert, und an der Rohrwand durch Winkelstücke unter Verwendung von isolierenden Büchsen und Unterlagscheiben befestigt sind. Zwei solcher Paare in einigem Abstände hintereinander und um 90° versetzt, bilden einen Elektrodenpaar. Eine solche Anordnung verlangt eine zur Rohrxaxe symmetrische Verteilung der Salzlösung. Auch hier wirkt die Turbulenz günstig, indem sie verhindert, dass eine ausgeprägte systematische Abweichung von dieser Annahme stattfindet. Kann eine symmetrische Salzverteilung vorausgesetzt werden, dann soll jedes Flächenelement $2\pi r dr$ eine seiner Fläche proportionale Leitfähigkeit der Elektrode vorfinden. Diese Leitfähigkeit ist angenähert:

$$L = \text{Konst.} \cdot w dr/D$$

wo w die Breite und D der Abstand der beiden Flacheisen ist. Es müsste also sein: $D = \text{konst.} \cdot 1/r$, und in der Rohrxaxe wäre der Abstand unendlich. Man vermeidet dies durch Anbringen des Isolators und lässt ausserdem die Flacheisen gerade, wodurch der Abstand D proportional mit dem Radius abnimmt. Die Leitfähigkeit wird dadurch angenähert:

$$L' = \frac{\text{Konst.} \cdot dr}{c - r}$$

wo c eine Konstante bedeutet. Im folgenden soll nun der systematische Fehler berechnet werden, der dadurch entsteht, dass L' an Stelle von L tritt. Der so gefundene Fehler ist seinem Absolutwerte nach nicht korrekt, da die Stromverteilung eine viel kompliziertere ist als durch obige Formeln zum Ausdruck gebracht wird. Immerhin wird sich der Einfluss veränderter Dimensionierung der Elektroden genügend genau zum Ausdruck bringen.

Zur Berechnung des Fehlers nehmen wir eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung an:

$$v = 1 - kr^2$$

Der Fehler in der mittleren Geschwindigkeit entsteht dadurch, dass infolge der veränderten Leitfähigkeit die einzelnen Flächenelemente nicht mit dem richtigen Gewichte in die Mittelwertbildung eingehen. Der richtige Mittelwert ist:

$$v_m \text{ (richtig)} = \frac{\int_{R_0}^R (1 - kr^2) \cdot 2\pi r dr}{\int_{R_0}^R 2\pi r dr}$$

Da so wird:

$$L'/L = 1/r(c - r),$$

$$v_m \text{ (unrichtig)} = \frac{\int_{R_0}^R (1 - kr^2) 2\pi r dr \cdot 1/r(c - r)}{\int_{R_0}^R 2\pi r dr \cdot 1/r(c - r)}$$

wobei die Integrale von R_0 bis R (siehe Abb. 7) gehen (obgleich die Elektroden wegen der Isolierung nicht bis an die Rohrwand geführt werden können), weil nämlich in der Nähe der Rohrwand die Streulinien eine solche Stärke erreichen, dass es richtiger ist, die Integrale bis R zu erstrecken. Wir führen nun folgende Koeffizienten ein:

- $x = kR^2$; z. B. $x = 0,10$ bedeutet, dass die Geschwindigkeit nahe der Rohrwand 10% kleiner ist als in der Rohrxaxe.
- $F = c : (c - R)$; z. B. $F = 8$ bedeutet, dass der Abstand der Flacheisen in der Rohrxaxe 8 mal grösser ist als an der Wand.

Das Resultat der Rechnung ist nun graphisch in Abbildung 8 für kleine Werte von x dargestellt, und da x gewöhnlich etwa 0,1 ist, erkennt man, dass kleine Abweichungen in der Konstruktion der Elektroden nicht von Bedeutung sind. Gewöhnlich wird F etwa zu 8 gewählt, während nach Abb. 8 F etwa 5 sein sollte.

Bei dieser Ableitung haben wir von Geschwindigkeiten gesprochen, ohne genauer zu sagen, was damit gemeint ist; es kommt nicht die Geschwindigkeitsverteilung in Frage, die etwa mit einer Pitot-Röhre gemessen werden könnte. Der genaue Wert von x müsste vielmehr aus Versuchen mit der Salzgeschwindigkeits-Methode abgeleitet werden, unter Verwendung einer beweglichen Prüf-Elektrode. In sehr guter Annäherung kann jedoch $x = V$, der Verlängerungsgeschwindigkeit der Salzwolke, gesetzt werden (vergl. die zweite Fehlerquelle).

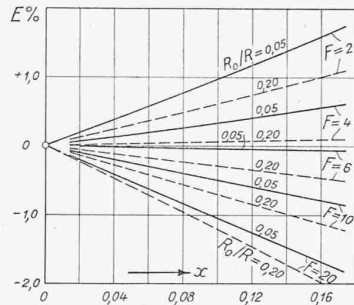


Abb. 8. Fehler der mittlern Geschwindigkeit (vierte Fehlerquelle) für verschied. Elektroden.

Schlussbemerkungen.

Die obigen Ausführungen beziehen sich hauptsächlich auf die Wassermessung in Rohrleitungen; jedoch sind auch in offenen Kanälen, in Druckstollen von konstantem oder veränderlichem Querschnitt erfolgreiche Messungen ausgeführt worden. Wie die Diskussion der Fehlerquellen zeigt, ist die Methode bei Anwendung der nötigen Sorgfalt mindestens ebenso genau wie die Messung mit dem Ueberfall oder mit Flügel. Da sie keiner empirischer Koeffizienten bedarf, eignet sie sich ausserdem für Kontrollmessungen und ist manchmal empfehlenswert, wo andere Methoden aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht anwendbar sind. Will man den Wasserverbrauch einer Anlage dauernd überwachen, so ist die Salzgeschwindigkeits-Methode dazu nicht geeignet, aber man kann sie unter Umständen benutzen, um ein konisches Rohrstück, das gewöhnlich ohnedies vorhanden ist, als Venturi-Röhre zu eichen; dann genügt es, einen geeigneten Registrierapparat zu kaufen, und man spart sich das teure Venturi-Rohr.

Es ist zu beachten, dass das Messvolumen genau genommen durch die äussersten Stromfäden der bewegten Wassermasse definiert ist, sodass tote Volumina, z. B. seitliche Rohrstützen nicht mitzurechnen sind. Zur genauen Auswertung des Registrierstreifens ist es nötig, die Stromkurven auf ein starkes, proportional geteiltes Papier umzuzeichnen, worauf man den Schwerpunkt durch Ausschneiden und Ausbalancieren finden kann. Wählt man jedoch die Messstrecke nicht zu kurz, dann kann man mit Annäherungsverfahren bedeutend rascher zum Ziel gelangen. Im Einklang mit der obigen Diskussion der Fehlerquellen zeigen Einzelmessungen gewöhnlich eine erhebliche Streuung bis zu etwa 1%; jeder Messpunkt soll daher aus zehn oder mehr Schüssen bestehen. Es soll zum Schluss noch einmal betont werden, dass die Fehlerkurven Abb. 5 und 6 relative, auf die Länge der Stromkurve bezogene Fehler darstellen, damit die Resultate für beliebige Messanordnungen verwendbar sind; im Endresultat treten diese Fehler je nach der Anordnung 3 bis 8 mal verkleinert auf.

Die Bekämpfung der Sohlen-Auskolkung bei Wehren durch Zahnschwellen.

Von Prof. Dr. Ing. Th. Rehbock, Karlsruhe.

(Schluss von Seite 30.)

Bei der grossen Bedeutung, die einem Mittel zur Minderung der Kolkbildungen bei Wehren zuzumessen ist, sind nach Abschluss der für die Friedländer Entlastungsanlage und für den Entwässerungskanal im Piuragebiet ausgeführten Versuche im Karlsruher Flussbaulaboratorium zahlreiche weitere Modellversuche mit Zahnschwellen zur Ausführung gekommen, die sämtlich die günstige Wirkung der Zahnschwelle unter den verschiedensten Verhältnissen erwiesen haben. So wurde bei Versuchen für die Entwässerungsschleuse im Abschlussdamm der Zuidersee eine Minderung der auftretenden Kolk-tiefen bis zu 3 m festgestellt.

In den letzten Monaten gaben Entwurfsarbeiten für einen 8 km langen Entwässerungskanal am Nilufer-Fluss bei Brussa in Kleinasien, in dem 16 Absturzbauwerke zur Gefällsvernichtung eingebaut werden sollten, den Anlass zu einer systematischen Untersuchung über die Ausbildung der Sturzbette ohne und mit Zahnschwelle. Bei diesen Versuchen wurde die Sturzbettbreite von 24 m um jeweils 3 m bis auf 3 m gekürzt. Für den stets gleichen Wasserdurchfluss von 3,125 m³/sek auf 1 m Wehrlänge wurden hierbei die auftretenden Kolk-tiefen beim Fehlen und beim Vorhandensein einer Zahnschwelle festgestellt.

In allen Fällen wurde eine starke Minderung der Kolk-tiefen und eine wesentlich bessere Lage der Kolke infolge der Wirkung der Zahnschwellen ermittelt. Die grössten Kolk-tiefen wurden bei allen untersuchten Sturzbettbreiten durch die Zahnschwellen um 40 bis 75 % verringert. Während bei fehlender Zahnschwelle auch Auskolkungen unmittelbar unterhalb der befestigten Sturzbettplatte auftraten, wurden beim Vorhandensein einer Zahnschwelle in keinem Fall Auskolkungen unmittelbar an der Sturzbettplatte festgestellt. Die Sohle schloss sich vielmehr stets mit schwachem Gefälle an die Oberfläche der Zahnschwellen an.

Diese Versuche lieferten noch ein weiteres wertvolles Ergebnis, denn sie zeigten, dass selbst bei einer aus leichtbeweglichen feinen Bestandteilen bestehenden Flussole beim Vorhandensein einer Zahnschwelle eine sehr starke Einschränkung der Sturzbettbreite möglich und sogar vorteilhaft ist. Während die Breite der Sturzbetten bei den 3 m hohen festen Wehren für eine Stauhöhe von 1,2 m ursprünglich zu 9 m projektiert war, ergaben die Modellversuche die Möglichkeit der Verringerung der Sturzbettbreite bis auf 3 m, was für die 16 Stau-stufen eine Betonersparnis von zusammen über 4000 m³ bedeutet. Das Ergebnis der Versuche für ein nur 3 m breites Sturzbett, das nicht einmal bis zum Ende der die Energie des Absturzes vernichtenden Deckwalze reicht, sondern schon unter der Deckwalze endet, ist aus den Längenschnitten auf Tafel III ersichtlich.

Bei fehlender Zahnschwelle erfolgte eine ganz wilde, stossweise Auskolkung der Sohle, die praktisch nicht geduldet werden könnte. Schon nach Verlauf einer einzigen Minute zeigte die Flussole des Modelles das aus Abb. 1 (Tafel III) ersichtliche Bild mit einem kurzen, tiefen, dicht am befestigten Sturzbett liegenden Kolk, dessen Tiefe die Stauhöhe der Weherschwelle übersteigt, und einer anschliessenden hohen Auflandung. Durch diese Auflandung wurde dann infolge eintretender Hebung des Wasserstromes das Abflussbild gänzlich geändert. Es bildete sich unter dem Wasserstrom eine Grundwalze, die einige Minuten lang den Kolk wieder teilweise zuwarf, bis dann plötzlich nach dem Fortreissen dieser Grundwalze wieder eine neue Auskolkung entstand. Dabei wurde der Kolk bei nur geringer Aenderung seiner Tiefe allmählich immer mehr in wagrechttem Sinne verbreitert. Nach vierstündigem Durchfluss des Modelles war der in Abb. 2 der Tafel III dargestellte Längenschnitt entstanden, ohne dass die stossweise Aenderung des Abflussbildes und der Sohlengestalt aufhörte.