

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Aus dem Institut für Meereskunde an der Universität Kiel

Physikalische Prinzipien zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten
in flachen Meeresgebieten

von

GUNTHER KRAUSE und BERND STRUCK

Zusammenfassung: Es wird ein Überblick über die zur Zeit bekannten physikalischen Prinzipien zur Messung von Strömungsverteilungen im Meer unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Küstennähe gegeben. In dieser Zusammenstellung sind neben den Euler'schen Meßverfahren auch die wichtigsten Bahnlinienmethoden zur Untersuchung kleinräumiger Stromverteilung enthalten, obwohl sie bisher kaum Anwendung im Meer gefunden haben. Über die physikalischen und technischen Grenzen der aufgeführten Methoden wird an anderer Stelle berichtet.

Principles of measuring near-shore currents with a high time resolution (Summary): A review of physical principles of measuring currents is presented with respect to the application to measurements of near-shore orbital velocities. Because of the great number of principles this paper gives a survey whereas a discussion of the physical and technical restrictions of these techniques will be published later. The following classification of Eulerian methods is used:

- I.1. Sensors for kinetic energy of a current
 - I.1.1. Rotation
 - I.1.2. Hydrodynamic pressure
 - I.1.3. Drag force
- I.2. Sensors using transport of heat
 - I.2.1. Constant-current method
 - I.2.2. Constant-temperature method
- I.3. Sensors using electromagnetic induction
 - I.3.1. Magnetic field of the earth
 - I.3.2. Magnetic field of coils
- I.4. Sensors using the Mitführungseffekt
 - I.4.1. Acoustic Mitführungseffekt
 - I.4.1.1. Transmission time techniques
 - I.4.1.2. Phase measuring techniques
 - I.4.2. Optical Mitführungseffekt
- I.5. Sensors using the Doppler-effect
 - I.5.1. Acoustic Doppler Effect
 - I.5.2. Optical Doppler Effect
- I.6. Electrolysis

A drawing of this classification is given in fig. 1. Besides the Eulerian principles also the most important Lagrangian methods for the indication of small-scale current patterns are briefly mentioned, though these techniques were used in oceanography only in a few cases up to now. The methods are classified as follows:

- II.1. Observation of a random dispersion of tracers and optical effects in fluid flow. (Qualitative methods)
 - II.1.1. Near surface methods
 - II.1.2. Visualization of turbulent and laminar zones
 - II.1.2.1. Tracer methods
 - II.1.2.2. Optical methods

II.2. Observation of controlled introduced tracers.
(Quantitative methods)

II.2.1. Tracer techniques using electrolytical processes

Einleitung

In vielen Zweigen der Meeresforschung ergab sich in den letzten Jahren die Notwendigkeit, Strömungsgeschwindigkeiten im Meer mit besonders hohem zeitlichen Auflösungsvermögen zu messen. Das betrifft insbesondere Untersuchungen zu Turbulenzvorgängen und Orbitalbewegungen von Oberflächenwellen. Beide Vorgänge liefern u.a. entscheidende Faktoren für die Verlagerung von Sedimenten in Küstengebieten, so daß derartige Strommessungen auch die Grundlage für alle Untersuchungen bilden, die sich mit der Physik der Sedimentbewegungen befassen. Die Autoren haben sich die Aufgabe gestellt, ein geeignetes Meßverfahren für Strommessungen im Küstenbereich zu entwickeln. Daraus ergab sich zunächst die Notwendigkeit, die bereits bekannten Meßprinzipien zusammenzustellen und sie einer kritischen Prüfung zu unterziehen. Da vor allem in den letzten Jahren sehr viele neue Methoden bekannt geworden sind, erschien es notwendig, zunächst einen Überblick im Rahmen einer zusammenfassenden Arbeit zu geben. Untersuchungen zu den physikalischen und technischen Grenzen dieser Methoden sowie zur Auswahl des brauchbarsten Verfahrens für ein gegebenes Problem werden an anderer Stelle erfolgen.

THORADE (1933) war wohl der erste, der alle bis zu diesem Zeitpunkt bekannten Meßmethoden und Geräte in einer zusammenfassenden Arbeit darstellte. G. BÖHNECKE ergänzte diese Arbeit 1955, da in den vergangenen 20 Jahren eine ganze Reihe neuer Meßapparaturen entstanden war. J. W. JOHNSON und R. L. WIEGEL überarbeiteten und vervollständigten diese Veröffentlichung im Jahre 1959, in der vor allen Dingen auch nicht-mechanische Meßmethoden aufgenommen wurden. 1960 hat dann H. WEIDEMANN eine Kartei zusammengestellt, die es ermöglicht, in übersichtlicher Weise Auskunft über sämtliche Eigenschaften aller bekannten Strömungsmesser zu erhalten. 1967 gab schließlich J. R. OLSON eine Übersicht über einige Geräte, die für flache Meeresgebiete geeignet erscheinen.

Klassifikation der Meßmethoden

Im Gegensatz zu den bisher erschienenen Zusammenfassungen sollen in dieser Arbeit ausschließlich die physikalischen Grundlagen der Meßinstrumente als Einteilungsprinzip dienen. Die Meßfühler werden hier als Vorrichtungen aufgefaßt, die die Stromgeschwindigkeit im Meere in andere physikalische Größen umwandeln. Registrierverfahren werden daher nur am Rande behandelt. Die Meßprinzipien werden durch besonders charakteristische Geräte näher erläutert, es wird jedoch keine Aufzählung aller bekannten Gerätetypen gegeben. Auch das Literaturverzeichnis umfaßt nicht alle Beiträge, die bis heute auf diesem Gebiet vorliegen. Wir haben uns jedoch bemüht, alle zusammenfas-

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 1):

- Abb. 1 Überblick über die physikalischen Effekte zur Strömungsmessung nach dem Euler'schen Prinzip.
Im linken Teil der Abbildung sind die direkten, im rechten die indirekten Wirkungen von strömendem Seewasser aufgeführt.

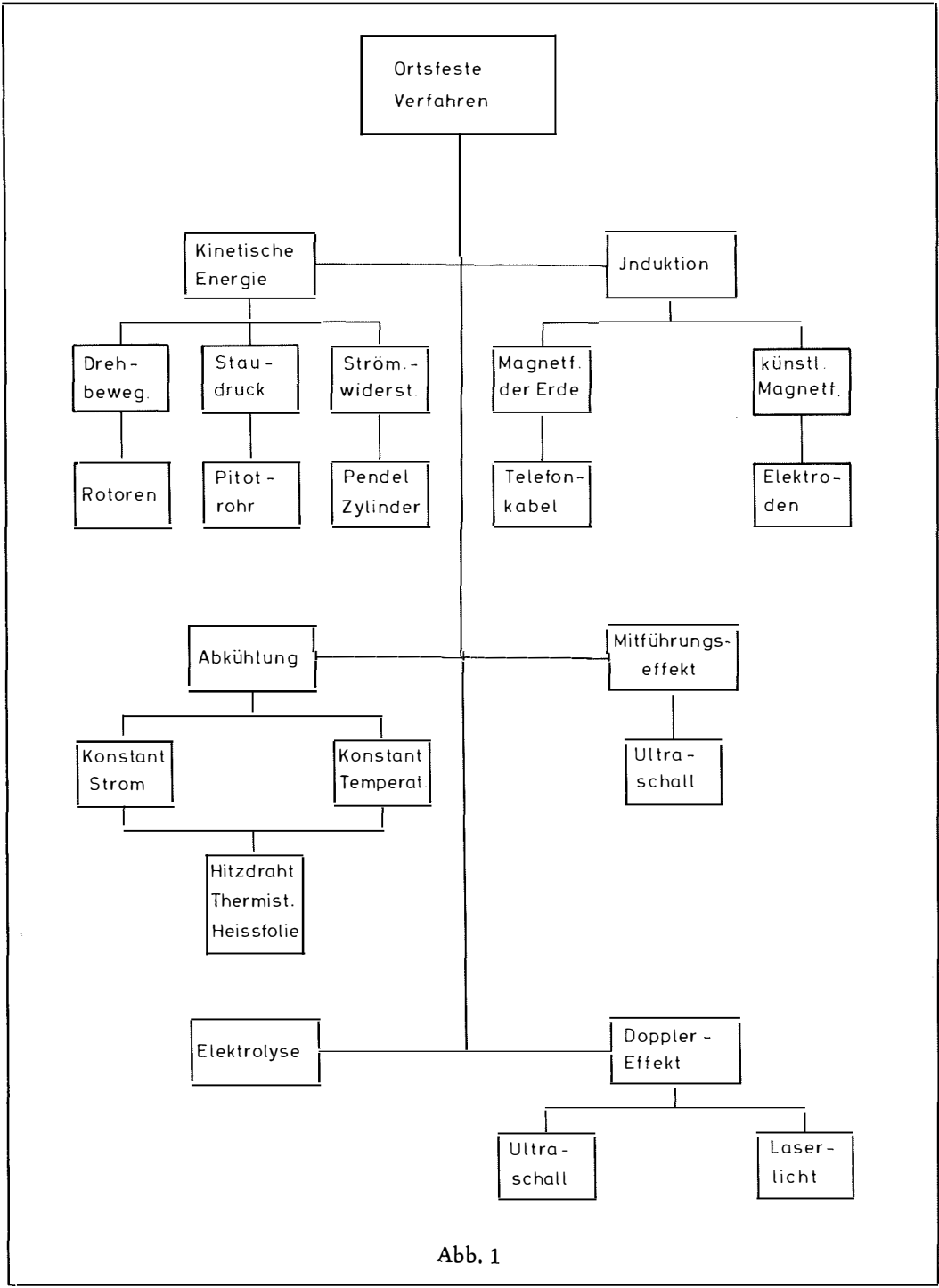


Abb. 1

Tafel 1 (zu Krause/Struck)

senden Arbeiten und solche Beiträge in das Literaturverzeichnis aufzunehmen, die die behandelten Meßmethoden besonders gut charakterisieren.

Eine erste Einteilung der Meßverfahren ergibt sich aus den Lagrange'schen und Euler'schen Grundgleichungen der Hydrodynamik. Abb. 1 zeigt eine Übersicht über die Euler'schen Methoden. Bei diesen Verfahren untersucht man an einem festen Ort physikalische Wirkungen einer strömenden Flüssigkeit, die dann als Maß für ihre Geschwindigkeit herangezogen werden. Wie man aus Abb. 1 erkennt, sind heute bereits Effekte aus fast allen Gebieten der Physik in Betracht gezogen worden. Bei der Lagrange'schen Methode muß der Ort kleiner Wasservolumina als Funktion der Zeit ermittelt werden. Da eine bestimmte kleine Wassermenge in einer homogenen Flüssigkeit nicht unmittelbar identifizierbar ist, ist es hier Voraussetzung, daß kleine Wasservolumina durch geeignete Maßnahmen markiert werden können. Diese Markierungen werden dann an Stelle des Wassers verfolgt.

Die bis heute bekannten Bahnlinienverfahren zur Messung kleinräumiger Stromverteilungen sind fast ausschließlich bei Laboratoriumsversuchen entwickelt worden und haben bisher noch keine Anwendung im Meer gefunden. Sie werden dennoch stichwortartig beschrieben, da die Verwendung einiger Verfahren bei Fragen des Sedimenttransportes im Küstenbereich durchaus möglich erscheint.

I. Euler'sche Methoden

I. 1. Meßfühler für die kinetische Energie einer Strömung

I. 1.1. Drehbewegung

Die ältesten und bekanntesten Strommeßgeräte nutzen die kinetische Energie einer Strömung aus, um Impeller, Rotoren, Schalenkreuze oder andere Vorrichtungen in Umdrehungen zu versetzen. Die Anzahl der Umdrehungen pro Zeiteinheit ist ein Maß für die Geschwindigkeit. Da diese Methoden weitgehend bekannt sind und in vielen Darstellungen abgehandelt wurden, soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

Bekannt Nachteile dieser Strömungsmessfühler sind die relativ große Anlaufgeschwindigkeit und die mechanisch und hydrodynamisch bedingte Trägheit der Drehelemente. Diese Effekte können bei alternierenden Strömen Gleichrichterwirkungen mit unkontrollierbaren Mittelwertbildung verursachen. Mit geeigneten Propellern in kurzen Zylindern, die von der Strömung durchsetzt werden (Ducted current meter), konnten jedoch brauchbare Messungen bis Perioden von 1 Sekunde erzielt werden. (D.H. SHONTING, 1967). Im Literaturverzeichnis sind außer dieser neuen Arbeit nur zusammenfassende Veröffentlichungen genannt.

L i t e r a t u r

BÖHNECKE, G. (1955): The principles of measuring currents, Association D'oceanographie Physique Union Geodesique et Geophysique Internationale, Publ. scientifique No. 14. — JOHNSON, J. W. und R.L. WIEGEL (1958): Investigation of current measurement in estuarine and coastal waters. Publ. 19, Calif.State Water Pollution Control Board, State Printing Division. — OLSON, J.R. (1967): Flowmeters in shallow-water oceanography Sac. Calif., Naval undersea warfare center TP 5. — SHONTING, D.H. (1967): Observation of particle motions in ocean waves. Naval Underwater Weapons Research and Engineering Station Newport, Rhode Island. Techn. Memorandum No. 377, Vol. 1, Vol. 2. — THORADE, H. (1933): Methoden zum Studium der Meeresströmungen, Abderhalden, Handbuch d. biologischen Arbeitsmethoden, Abt. II, Teil 3, Heft 3, Berlin/Wien — WEIDEMANN, H. (1960): A manual of Current Measuring Instruments and Methods. Association Internationale d'Oceanographie Physique, International Association of Physical Oceanography; Publ. Scientifique No. 21. —

I. 1.2. Staudruck

Der Staudruck in einer strömenden Flüssigkeit ergibt sich aus der Differenz von Gesamtdruck und statischem Druck:

$$P_s = 1/2\beta \rho v^2$$

P_s = Staudruck

β = Beiwert für die Geometrie der Geber

ρ = Dichte des Wassers

v = Geschwindigkeit

Dieser Druck kann mit Differenzdruckgebern gemessen werden, wobei verschiedene geometrische Anordnungen der Drucköffnungen möglich sind. Am gebräuchlichsten ist das Staurohr nach PRANDTL, außerdem sind Zylinder- und Kugelsonden bekannt (siehe z.B. KOHLRAUSCH (1960)). Bei sehr kleinen Reynolds-schen Zahlen besteht beim Staurohr eine Abhängigkeit des Beiwerts β von der Re-Zahl. Bei stark turbulenten Strömungen ist besonders zu beachten, daß alle Geräte bei ungenügender Auflösung des Differenzdruckgebers den Mittelwert über den Druck, d.h. über das Quadrat der Geschwindigkeit, bilden. Während Kugel- und Zylindersonden für Richtungsmessungen gut geeignet sind, besteht beim einfachen Staurohr bei Winkeln kleiner als 17° keine Richtungsabhängigkeit.

Das Staudruckprinzip wurde bisher nur wenig zur Messung von Meeresströmungen benutzt. Lediglich ein Gerät ist von MALKUS (1953) beschrieben worden.

L i t e r a t u r

KOHLRAUSCH, F. (1960) Prakt. Physik, 21. Aufl. S. 193 ff – MALKUS, W.V.R. (1953) A recording bathypitometer Journ. of Mar. Res., Vol. 12, No. 1

I. 1.3. Strömungswiderstand fester Körper

In stationären Strömungen kann die Kraft auf einen der Strömung ausgesetzten Körper in der Form

$$K = 1/2 C_s \cdot F \cdot \rho \cdot v \cdot v \quad (1)$$

geschrieben werden.

K = Kraftvektor

C_s = Widerstandskoeffizient

F = Fläche des Körpers senkrecht
zur Stromrichtung

ρ = Dichte der Flüssigkeit

v = Vektor der Strömungsgeschwindigkeit

Der experimentell zu bestimmende Widerstandskoeffizient ist eine Funktion der Reynoldszahl und damit geschwindigkeitsabhängig.

In alternierenden Strömungen bewirkt die Beschleunigung einen scheinbaren Massenzuwachs des anströmenden Wassers und Veränderungen im „Kielwasser“ des Widerstands-

körpers. Diese zusätzlichen Effekte können durch einen dynamischen Widerstandskoeffizienten C_M in einem die Beschleunigung enthaltenden Zusatzterm Berücksichtigung finden. Man erhält in diesem Fall z.B. für einen glatten Zylinder mit dem Durchmesser d als Kraft pro Längeneinheit.

$$k = C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} C_s \cdot d \cdot \rho \cdot v^2$$

Es sind sowohl v wie $\frac{dv}{dt}$ unbekannt. Alle Bemühungen, Strommeßgeber auf der Basis von Kraftmessungen zu verwirklichen, müssen also das Ziel haben, den Beschleunigungsterm durch geeignete Ausbildung der geometrischen Abmessungen der Meßkörper oder ihrer Oberflächenbeschaffenheit vernachlässigbar klein zu halten. Im Falle des Zylinders könnte dies z.B. durch Verkleinern des Durchmessers geschehen (Gl. 2). Allerdings führt das auch zu einer Verminderung der Kraftwirkung. Die bisherigen Untersuchungen in der Ozeanographie beschäftigen sich vor allem mit Zylindern mit glatter Oberfläche. Die damit gewonnenen Meßergebnisse sind nicht voll befriedigend. Es zeigt sich, daß die Mittelwerte des statischen und dynamischen Widerstandskoeffizienten über eine Wellenperiode T , in der die Maximalgeschwindigkeit v_m vorkommt, eine Funktion der Größe $\frac{v_m T}{d}$ ist, wobei d den Zylinderdurchmesser bedeutet. Für ein durch die Strömungsverhältnisse gegebenes Produkt $\frac{v_m T}{d}$ ergeben sich dabei für sehr kleine Durchmesser die besten Resultate. Zahlenwerte für die Widerstandskoeffizienten als Funktion von $\frac{v_m T}{d}$ findet

man z.B. bei OLSON (1967), der auch weiterführende Literaturhinweise angibt. Die Autoren untersuchen zur Zeit Meßkörper mit netzförmigen Oberflächen. Die Bildung großer Wirbel hinter diesen Körpern wird durch diese Maßnahme weitgehend vermieden, so daß die Hoffnung besteht, damit die Beschleunigungskräfte vernachlässigbar klein zu halten. Widerstandskörper eignen sich sehr gut zur Komponentenmessung der Strömungsgeschwindigkeit, da es sehr einfach ist, das Kraftmeßsystem richtungsabhängig zu machen.

Literatur

OLSON, J. R. (1967): Flowmeters in shallow-water oceanography Naval Undersea Warfare Center, TP 5

I. 2. Meßfühler nach dem Abkühlungsprinzip

Die Grundlage für diese Meßfühler beruht auf dem Wärmetransportvermögen von Strömungen. Ein kleiner Körper (Draht oder Folie) wird elektrisch auf eine höhere Temperatur als das Wasser gebracht und der abkühlenden Wirkung der Strömung ausgesetzt. Gemessen wird entweder die Temperaturabnahme bei konstanter Zuführung

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 2):

Abb. 2 Elektrische Anordnung der Konstant-Strom-Methode.

Abb. 3 Kennlinie eines Abkühlungsmeßgebers.

Abb. 4 Elektrische Anordnung der Konstant-Temperatur-Methode.

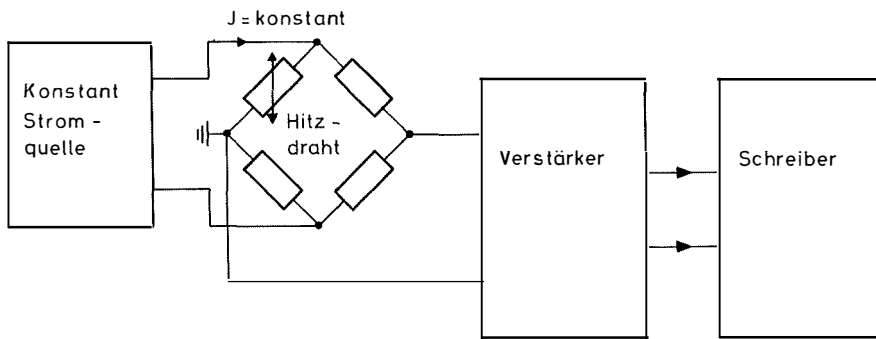


Abb. 2

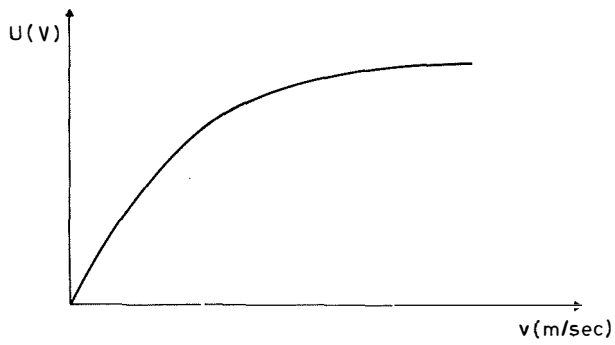


Abb. 3

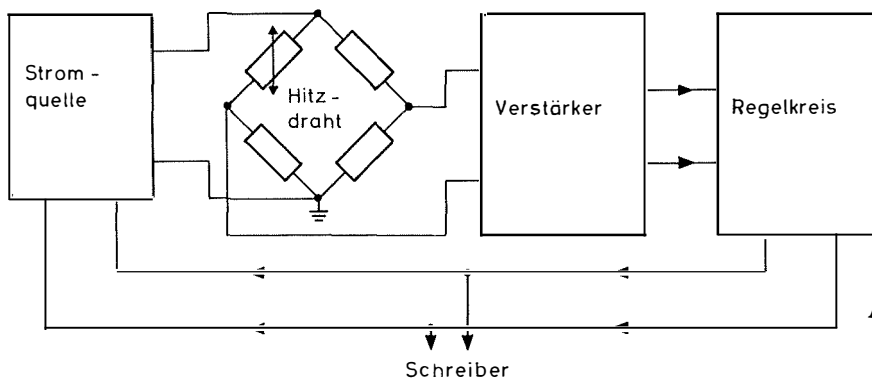


Abb. 4

elektrischer Energie (Konstant–Strom–Methode), oder die elektrische Energie, die notwendig ist, um den Körper auf gleicher Temperatur zu halten (Konstant–Temperatur–Methode). Diese Methode wurde bisher hauptsächlich für Gasströmungsmessungen benutzt. Bei geeigneter Isolation der Geber können auch Messungen in Flüssigkeiten durchgeführt werden.

1. 2.1. Konstant–Strom–Methode

Als Meßelemente benutzt man Hitzdrähte, Heißfolien und Thermistoren. Die Elemente bilden einen Teil einer Wheatstone–Brücke, die mit konstantem elektrischem Strom gespeist wird (Abb. 2). Die Brückenquerspannung wird gemessen; sie ist ein Maß für die Temperatur des Gebers und damit unter bestimmten Voraussetzungen auch für die Strömungsgeschwindigkeit. Insbesondere ist bei Anwendung des Abkühlungsprinzips zu bedenken, daß der Wärmetransport konstanten Bedingungen gehorchen muß, wenn man einen eindeutigen Rückschluß auf die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers ziehen will. Diese Bedingungen sind jedoch in turbulenten Strömungen durchaus nicht immer gegeben, wie z.B. KARWOSKI (1967) gezeigt hat. Die Kennlinie, die den Zusammenhang zwischen Spannung und Meeresströmung darstellt, weist 2 charakteristische Merkmale auf (Abb. 3):

1. Es besteht eine untere Grenze für die eindeutige Anzeige. Sie ist gegeben durch das Einsetzen einer Konvektionsströmung infolge der Wärmeübertragung des Gebers auf die Flüssigkeit.
2. Die Anzeige läuft bei großen Geschwindigkeiten in einen Sättigungsbereich, der durch die zugeführte elektrische Energie gegeben ist.

Der Sättigungsbereich kann nicht beliebig erhöht werden, da die Flüssigkeit bei hoher Temperatur in der Höhe des Gebers zu verdampfen beginnt. Durch diese Effekte ist der Meßbereich der Geber bei Anwendung der Konstant–Strom–Methode begrenzt. Einem Geber für hohe Geschwindigkeiten muß viel elektrische Heizenergie zugeführt werden, damit wird gleichzeitig die untere Grenze durch baldiges Einsetzen der Konvektionsströmungen heraufgesetzt.

Die Richtungsabhängigkeit richtet sich nach der Geometrie der Abkühlungsgeber. Thermistoren sind infolge ihrer Bauart überhaupt nicht richtungsabhängig. Für Hitzdrähte ergibt sich für Winkel größer als 20° das Gesetz

$$u_\varphi = u_0 \sin \varphi$$

und bei kleineren Winkeln

$$u_\varphi^2 = u_0^2 (\sin^2 \varphi + A^2 \cos^2 \varphi)$$

wobei $0,1 \leq A \leq 0,3$ von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt.

Bei Anwendung des Abkühlungsprinzips in Elektrolyten muß für eine gute elektrische Isolation der Geber Sorge getragen werden. Außerdem müssen aus Festigkeitsgründen die Drähte wesentlich dicker als beim Einsatz in Gasen werden. Um jedoch ein günstiges

Längen- zu Dicken-Verhältnis beizubehalten, muß der Draht länger dimensioniert werden. Dadurch ist wiederum eine gleichmäßige Erwärmung, die unbedingt gefordert wird, nicht mit Sicherheit gewährleistet. Diese beiden Notwendigkeiten verschlechtern die Zeitkonstante und die Empfindlichkeit der Geber gegenüber der Anwendung in Gasen wesentlich. In Gasen erreicht man mit Hitzdrähten eine Grenzfrequenz von 50 . . . 100 kHz, je nach Dicke der Isolation ergibt sich für Wasser 100 Hz . . . 10 kHz. Isolationslacke lassen sich auf Folien erheblich besser auftragen als auf Drähte. Folien sind daher mechanisch robuster, besitzen jedoch eine größere Zeitkonstante. Handelsübliche Thermistoren sind in Glas eingeschmolzen und damit den erstgenannten Gebern in mechanischer Hinsicht überlegen. Ein wesentlicher Nachteil der Hitzdrähte ist darin zu sehen, daß sie sehr empfindlich gegen Verschmutzung sind und ständig nachgeeicht werden müssen.

I. 2.2 Konstant-Temperatur-Methode

Als Meßelemente werden hier die gleichen Geber benutzt, die bei der Konstant-Strom-Methode beschrieben wurden. Für die Richtungsabhängigkeit und die mechanischen Eigenschaften gilt ebenfalls das im vorigen Kapitel Gesagte. Die Konstant-Temperatur-Methode hat jedoch entscheidende Vorteile, die dadurch begründet sind, daß nachteilige thermodynamische Eigenschaften durch leichter zu bewältigende elektronische Maßnahmen ausgeglichen werden können. Diese Maßnahmen betreffen:

1. den Meßbereich.

Da hier die elektrische Energie geregelt wird (Abb. 4), ist die Ansprechempfindlichkeit der Geber unabhängig vom Meßbereich. Die obere Grenze des Meßbereichs wird durch die wählbare maximale elektrische Heizenergie bestimmt. Die Endtemperatur ist nur durch den Verdampfungsbeginn eingeschränkt.

2. die Zeitkonstante.

Sie ist nicht allein durch die Geometrie der Geber bestimmt, sondern vor allem durch die wählbare Zeitkonstante des elektronischen Regelkreises.

Einzigster Nachteil gegenüber der Konstant-Strom-Methode ist die Verschlechterung der Empfindlichkeit bei sehr kleinen Geschwindigkeiten. In diesem Falle bringt die Konstant-Strom-Methode, insbesondere bei Anwendung von Thermistoren, bessere Resultate. Einzelheiten über Dimensionierungen der Geber und der zugehörigen elektronischen Apparaturen entnehme man der aufgeführten Literatur, besonders hingewiesen sei auf die zusammenfassende Arbeit von C.G. RASMUSSEN und B.B. MADSEN (1968).

L i t e r a t u r

DEACON, E.L. und D.R. SAMUEL (1957): A linear temperaturecompensated hotwire anemometer, J. Sci.Instr., Vol. 34 — EUJEN, E. (1950): Messung kleiner Flüssigkeitsgeschwindigkeiten nach dem Abkühlungsprinzip, Arch.techn.Messen, Vol. 144, 1 — Disa Elektronik: Datenblatt 55 A 23 — Disa Elektronik: Hot-wire Anemometers — HINZE, J.O. (1959): Turbulence, Mc Graw Hill, New York — HOLLENBERG, J.W. (1962): On the feasibility of using thermistors to measure ocean current velocities, Davidson Laboratory Note 642 — KARWOSKI, J. (1967): On N.F. KUDRIANCEW and E.G. NIKIFOROW'S Artide „About the choise of effective constructions of the measurement instruments and their parameters for the measurement of sea-currents in the undulating water layer, International Hydrographic Bureau, Monaco, VolXLIV, No. 2 — RASMUSSEN, C.G. und BB. MADSEN (1968): Hitzdraht- und Heißfilm-Anemometrie. ATM 385 (Februar 1968), Seiten R 17 — R 28 —

I. 3. Strömungsmesssonden nach dem Induktionsprinzip

Bei elektromagnetischen Strommessern nutzt man das elektrische Feld, das bei der Bewegung des Elektrolyten Seewassers in einem Magnetfeld entsteht. Nach dem Induktionsgesetz ergibt sich für den Potentialunterschied

$$\Phi = [\vec{v} \times \vec{H}] - \rho \vec{i}$$

wobei

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \text{Strömungsvektor} \\ \vec{H} &= \text{Magnetische Feldstärke} \\ \rho &= \text{spez. Widerstand} \\ i &= \text{Stromdichte} \end{aligned}$$

Zur Messung des Stromvektors läßt sich das Magnetfeld der Erde oder das von Permanent- oder Elektromagneten ausnutzen.

I. 3.1. Meßsonden im Magnetfeld der Erde

In der Ozeanographie begann die Entwicklung von elektromagnetischen Meßanordnungen 1946. W. von ARX beschrieb 1950 eine Methode, die von einem fahrenden Schiff aus eingesetzt werden kann. Um meßbare Spannungen zu erreichen, sind im relativ schwachen Erdmagnetfeld große Meßstrecken notwendig, der Effekt liegt in der Größenordnung 2,5 mV/100 m/Knoten.

Eine andere Methode, das Erdmagnetfeld zu Strömungsmessungen auszunutzen, geben K.F. BOWDEN u.a. (1956) an. Sie nutzen ein Telefonkabel zwischen 2 Küsten zur Messung aus. Das Telefonkabel ist mit einer Abschirmung frei mit dem Seewasser verbunden. An einem Ufer wird der Innenleiter mit der Abschirmung kurzgeschlossen. Somit wirkt das Kabel als Spule, mit der die durch das strömende Wasser im Erdfeld erzeugende EMK am anderen Ufer ausgekoppelt werden kann. Sie ist ein Maß für den Wassertransport durch den durch den Kabelverlauf festgelegten Querschnitt durch die Meeresstraße.

Messungen im Magnetfeld der Erde bereiten durch Schwankungen der magnetischen Feldstärke und die Vielzahl der durch den Term – spez. Widerstand mal Stromdichte – auftretenden Parameter oftmals beträchtliche Schwierigkeiten. Wegen der notwendigen großen Meßstrecken eignet sich das Prinzip nur zur Messung der großräumigen Zirkulation im Meer.

L i t e r a t u r

BOWDEN, F.F. (1955/56): On the flow through the Strait of Dover. Phil.Transactions of the Roy.Soc. of London, Vol. 248, Serie A. – LONGUET–HIGGINS, M.S., STERN, M.E., STOMMEL, H. (1954): The electrical field induced by ocean currents and waves, with applications to the method of towed electrodes, Phys.Oceanogr. and Meteorology, Vol. 13, No. 1. – MALKUS, W.V.R., STERN, M.E. (1952): Determination of ocean transports and velocities by electromagnetic effects. J.Mar.Res. Vol. 12, 1, New Haven. – SOLOVIEV, V.J., STERN, J.M. (1961): Die Bestimmung des Koeffizienten K bei Arbeiten in der Ostsee mit einem elektromagnetischen Strömungsmesser. Trudy Gesuderstremogo Okeanograficeskogo Instituta, Leningrad Vyp 65, S. 159–162. – STOMMEL, H. (1950): Exploratory Measurements of Electrical Potential Differences between widely Spaced Points in the North Atlantic Ocean, Arch.f.Meteorology, Ser.A, Bd. 7. – STOMMEL, H. (1948): The theory of the electric field induced in deep ocean currents. J.Mar.Res.7 (3) New Haven. – v.ARX, W. (1950): An electromagnetic method for measuring the velocity of ocean currents from a ship under way. Pap.Phys.Ocean. and Me.Woods Hole, Vol.XI, No.3. – WOODS, A.J. (1961): A Mean Sea Level Investigation Docks and Harbour Authority, Vol.41, S.164–166.

I. 3.2. Meßsonden mit künstlichem Magnetfeld

Bei Übergang zu kleineren Meßstrecken muß wegen der geringen Spannungen das Magnetfeld erhöht werden. 1944 benutzte A. KOLIN als erster ein künstliches Magnetfeld zur Strömungsmessung. Zuerst arbeitete er mit Permanentmagneten, ging jedoch bald zu einem Wechselfeld über, weil ihn Polarisierungseffekte störten. Als neues Problem tauchte dann die Notwendigkeit auf, daß die überlagerte Wechsel-EMK kompensiert werden muß. Dieses Problem konnte gelöst werden, und es wurde möglich, mit diesem ersten elektromagnetischen Strömungsmesser bereits Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0 und 300 cm/sec zu messen.

Seitdem ist das Prinzip häufig angewendet worden. Besonders LONGUET-HIGGINS u. Mitarb., BOWDEN u. Mitarb. und NAGATA haben Methoden und Geräte entwickelt mit denen es möglich ist, in situ die drei Geschwindigkeitskomponenten von Meeresströmungen und die Orbitalgeschwindigkeit von Seewellen zu messen. Neben der Geräteentwicklung wurden von allen drei Autoren umfangreiche theoretische Untersuchungen über die elektromagnetischen Effekte in strömenden Seewasser und damit über die Verwendung von elektromagnetischen Strömungsmeßsonden angestellt.

Die technischen Schwierigkeiten, die bei der Methode auftauchen, liegen in der außerordentlich hohen Präzision, die beim Aufbau des Spulenkörpers und beim Anbringen der Elektroden verlangt wird, um Streufeldbeeinflüsse zu vermeiden. Dennoch wurden mit der elektromagnetischen Methode bisher die besten Ergebnisse erzielt.

Literatur

ARNOLD, J.C. (1951): Electromagnetic flowmeter for transient flow studies, *Rev.Sci.Instr.* 22, 1 — BALKO, B., BERGER, R.L. (1967): Improved electromagnetic flowmeter, *Rev.Sci.Instr.* Vol. 38, No. 1, S. 129–130 — BOWDEN, K.F. (1966): Measurements of the orbital velocities of the sea waves and their use in determining the directional spectrum, *Geophys. J.R.Astr.Soc.* 12, S. 33–54 — BOWDEN, K.F., FAIRBAIRN (1956): Measurement of turbulent fluctuations and Reynoldstresses in a tidal current, *Proc. Roy Soc. Am.* 237, S. 422–438 — BOWDEN, K.F., HUGHES, P. (1961): The flow of water through the Irish Sea and its relation to wind, *Geophys. J.R. Astr. Soc.* Vol. 5, No. 4 — CUSHING, V. (1956): Induction Flowmeter, *Rev.Sci.Instr.* 29 (8), S. 692–697 — GUELKE, R.W., SHOUTE-VANNECK, C.A. (1947): Electromagnetic Current Meter, *J. of the Inst. of Electr. Eng.* Vol. 94, II, No. 37 — KOLIN, A. (1944): Electromagnetic velometry I, A method for the determination of fluid velocity distribution in space and in time, *J.App.Phys.* 15 (2) — (1945): An alternating field induction flowmeter of high sensitivity, *J.Sci.Instr.* 16, S. 100 — KOLIN, A., REICHE, J. (1954): Electromagnetic velometry II, Elimination of the effects of currents in exploration of the velocity distribution in axially symmetrical flow, *J. Appl.Phys.* 25, No. 4, S. 408 — LONGUET-HIGGINS, M.S. (1949): The electrical and magnetic effects of the tidal streams, *Monthly Notices R.A.S. Geophys.Suppl.*, Vol. 5, No. 8 — (1962): The directional spectrum of ocean waves, *Proc.Roy.Soc.Am.* 265, S. 286–315 — LONGUET-HIGGINS, M.S., CARTWRIGHT, D.E., SMITH, N.D. (1963): Ocean wave spectra, S. 111–132 — NAGATA, Y (1961): Balance of Sediment due to wave action in shoaling water Surf Zone and on Foreshore, *Rec.Oceanogr. WKS Jap.* 6, S. 53–62 — STATHAM Instruments, Oceanographic Flowmeter No. 57187

I. 4. Meßfühler für den Mitführungseffekt

Als akustischen Mitführungseffekt bezeichnet man die Erscheinung, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines Schallsignals in einem bewegten Medium von dessen Geschwindigkeit abhängig ist. In einer Meßstrecke ergeben sich infolge der Bewegung Laufzeitverschiebungen bei der Übertragung von Schallimpulsen und Phasenverschiebungen bei sinusförmigen Ultraschallwellen. Die Erscheinung hat ein Analogon in der Optik (FIZEAU'scher Versuch zur Bestimmung des FRESNEL'schen Mitführungskoeffizienten).

I. 4.1. Der akustische Mitführungseffekt

I. 4.1.1. Laufzeitmeßverfahren

In der praktischen Anwendung stellt man zwei Ultraschallmeßstrecken parallel zur Strömung ein und überträgt die Schallimpulse in entgegengesetzter Richtung. Auf Grund des Mitführungseffektes stellen sich dann zwei unterschiedliche Laufzeiten ein. Um den Laufzeitunterschied zu messen, bedient man sich zweckmäßigerweise des sog. „Sing-around“-Verfahrens für jedes Meßstreckenpaar. Bei diesem Verfahren, bei dem jeder empfangene Schallimpuls über ein elektronisches Gerät einen neuen Sendeimpuls auslöst, bestimmt die Laufzeit des Schalls in der Meßstrecke die Folge der Schallimpulse. Bei zwei entgegengesetzten Meßstrecken in Strömungsrichtung ergeben sich für diese Folgefrequenzen:

$$f_1 = \frac{c+v}{L} \quad \text{in Richtung der Strömung}$$
$$f_2 = \frac{c-v}{L} \quad \text{entgegengesetzt zur Strömung}$$

wobei c = Schallgeschwindigkeit im Medium
 v = Strömungsgeschwindigkeit
 L = Entfernung Sender-Empfänger

Bildet man die Summe und die Differenz beider Frequenzen

$$f_v = f_1 - f_2 = \frac{2v}{L} \quad \text{und} \quad f_c = f_1 + f_2 = \frac{2c}{L}$$

so sieht man, daß die Differenzfrequenz f_v der Strömungsgeschwindigkeit und die Summenfrequenz f_c der Schallgeschwindigkeit der Flüssigkeit proportional sind. Diese beiden Frequenzen können mit elektronischen Hilfsmitteln sehr leicht aus den Ausgangsfrequenzen erzeugt werden. (Abb. 5).

Der Vorteil dieser Sonde liegt darin, daß die Schallgeschwindigkeit, die sich im Küstenbereich in Bodennähe stark ändern kann, nicht in die Messung eingeht und die Anzeige der Strömungsgeschwindigkeit unabhängig von der Sing-around-Frequenz ist. Es muß jedoch gefordert werden, daß sich die beiden Meßstrecken in völlig identischen Medien befinden, da Schallgeschwindigkeitsgradienten in der Meßstrecke eine scheinbar vorhandene Strömungsgeschwindigkeit vortäuschen. Eine weitere Forderung betrifft die Resonanzfrequenz des Senders, die als Kompromißlösung aus folgenden Gegebenheiten gefunden werden muß: Aus der Reflexionsbedingung folgt, daß Teilchen größer als $\lambda/3$ (λ = Wellenlänge) in der Lage sind, Ultraschallwellen zu reflektieren. Sicher ist, daß in der Brandungszone und in Bodennähe derartige störende Teilchen in Form von Luftbläschen und Sandkörnern vorhanden sein werden. Um diese Störeinflüsse auszuschalten, sollte λ möglichst groß gewählt werden. (Bei einer Frequenz von 500 kHz liegt die kleinste Teilchengröße, die noch zu Reflexionen führt, bei einem Millimeter). Leider bewirkt aber

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 3):

Abb. 5 Prinzipschaltbild zur Messung des Mitführungseffektes nach der Laufzeitmethode.

Abb. 6 Prinzipschaltbild zur Messung des Mitführungseffektes nach dem Phasenmeßverfahren.

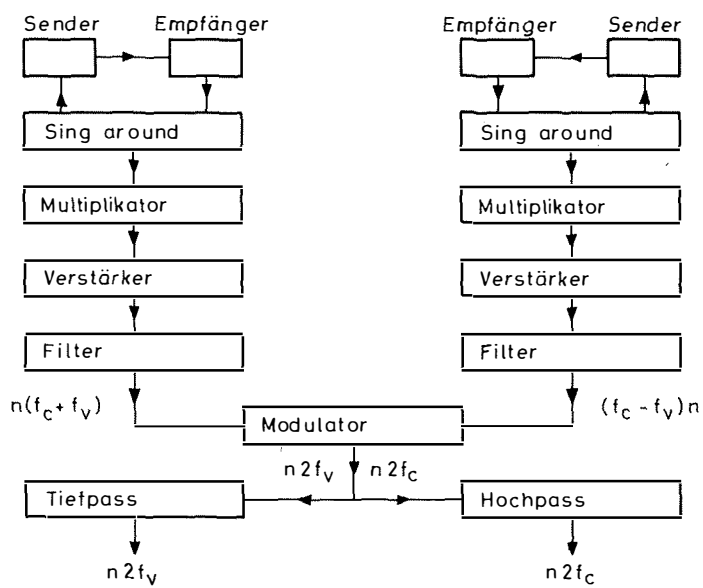


Abb. 5

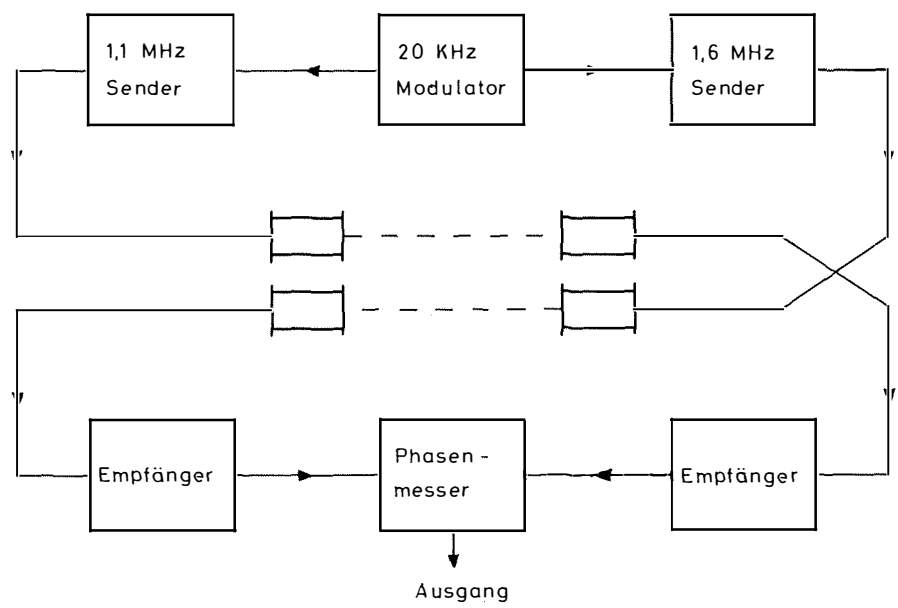


Abb. 6

eine Frequenzerniedrigung eine Verbreiterung der Strahlungscharakteristik der Sender und Empfänger, was zu Übersprechen und damit zu nicht strömungsbedingten Änderungen der Sing-Around-Frequenz führt. In der Praxis arbeitet man daher bei Frequenzen um 1 MHz.

Ein wesentlicher Nachteil der Sonde zeigt sich, wenn die Achse der Meßstrecken mit der Strömungsrichtung nicht übereinstimmt. Die von den Sendern und Empfängern hervorgerufenen Wirbelstraßen, die die Meßstrecken durchsetzen, führen zu einer geschwindigkeitsabhängigen Richtungsanzeige.

L i t e r a t u r

KALMUS, H.P. (1954): Electronic Flowmeter System. Rec.Sci.Instr., Vol. 25, No. 3, S. 201–206 – SUELLENTROP, F.J., BROWN, H.E., RULE, E. (1962): An Acoustic Ocean-Current-Meter. Marine Sciences Instrumentatio Vol. 1, S. 190–193 – Westinghouse LE Flowmeter, Westinghouse Defense and Space Center—Underseas Division, Baltimore, Maryland, U.S.A.

I. 4.1.2. Phasenmeßverfahren

Eine weitere Methode zur Messung des Mitführungseffektes gibt R.A. LESTER (1961) an. Wie im ersten Verfahren werden zwei Meßstrecken benutzt, die Signale in entgegengesetzter Richtung werden jedoch sinusförmig übertragen. Entsprechend der Laufzeitänderung eines Impulses ergibt sich hier eine Phasendifferenz zwischen den beiden Schallsignalen, die ein direktes Maß für die Strömungsgeschwindigkeit darstellt:

$$v = \frac{c^2}{4\pi Lf} \Delta\varphi \quad \text{für } v \ll c$$

wobei v = Strömungsgeschwindigkeit
 L = Abstand Sender–Empfänger
 c = Schallgeschwindigkeit im Medium
 $\Delta\varphi$ = Phasendifferenz

Für die Richtungsabhängigkeit gilt das Gleiche wie für das Laufzeitmeßverfahren.

Es werden drei verschiedene Strömungsmesser mit unterschiedlicher Genauigkeit angegeben. Das Prinzipschaltbild eines Gerätes ist in Abb. 6 dargestellt. Um Kreuzmodulation zu vermeiden, werden zwei Oszillatoren verschiedener Frequenz mit einem Signal von 20 KHz amplitudenmoduliert. Die empfangenen Signale werden verstärkt, gleichgerichtet und einem Phasenmesser zugeführt. Die relative Phase der 20 KHz-Signale ist dann proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Weitere Einzelheiten sind dem unten aufgeführten Literaturhinweis von R.A. LESTER zu entnehmen.

Der Nachteil aller drei angegebenen Meßsonden liegt darin, wie der Autor R.A. LESTER betont, daß die Meßstrecken auf vollkommen homogenes Wasser angewiesen sind. Sämtliche Inhomogenitäten innerhalb der Meßstrecke rufen ebenfalls Phasenänderungen hervor, die zu falschen Meßwerten führen.

L i t e r a t u r

LESTER, R.A. (1961): High accuracy, self-calibrating Acoustic Flow meter, Mar.Sci.Instr., Vol. 2, S. 200–204 – MIDDLETON, F.H., LI, W.H. (1954): Design and development of an estuarine current meter, Inst. f. Coop.Res., John Hopkins Univ., Balt.

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 4):

Abb. 7 Prinzip der Volumenzurückstrahlung

Abb. 8 Prinzipschaltbild zur Messung des akustischen Doppler-Effektes.

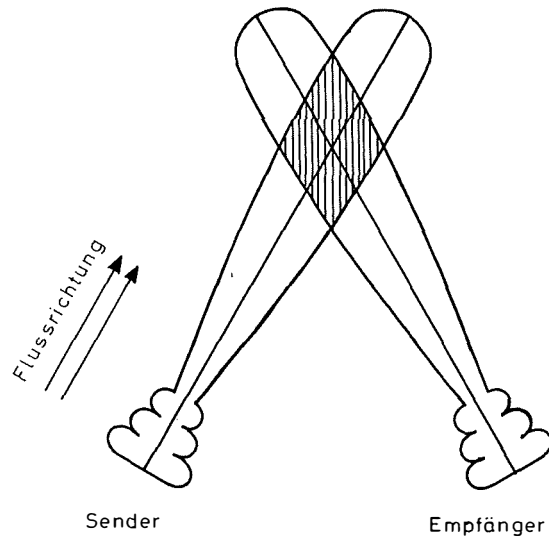


Abb. 7

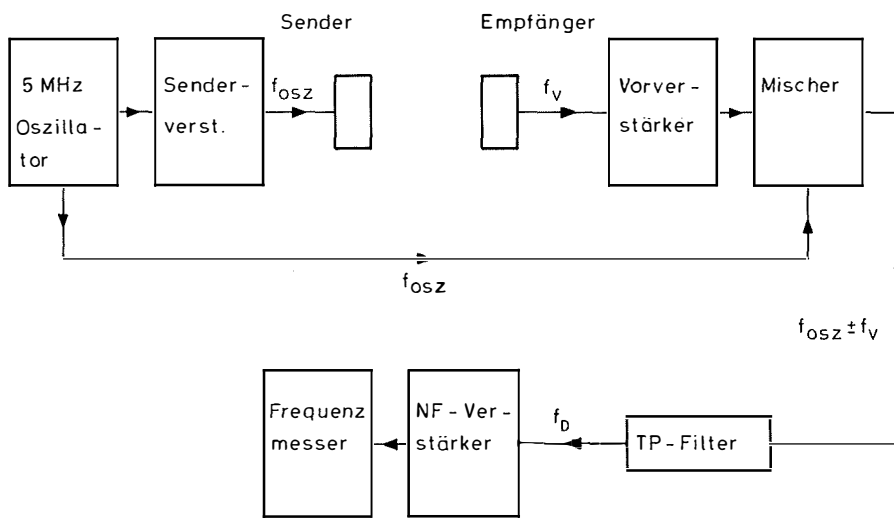


Abb. 8

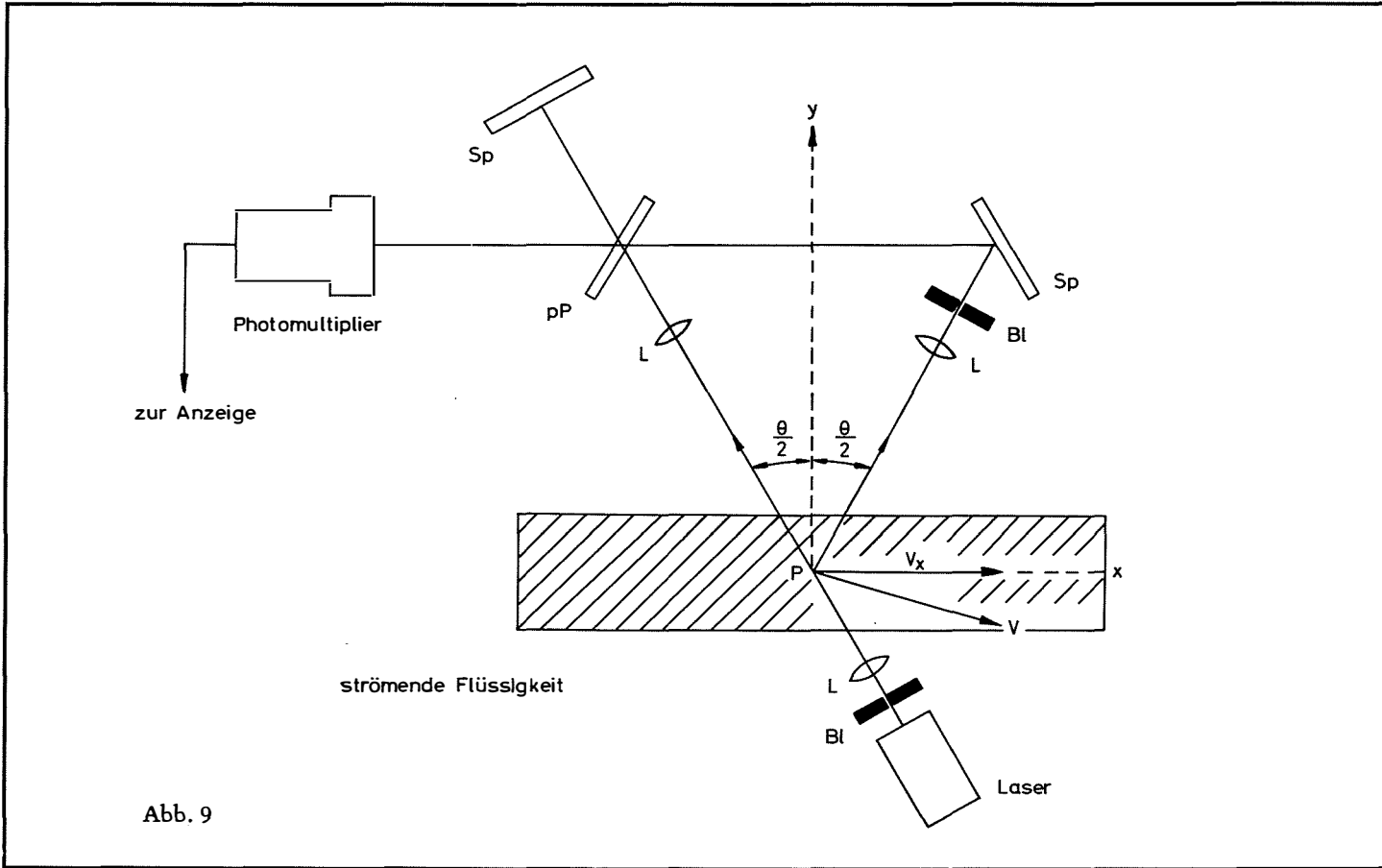


Abb. 9

I. 4.2. Der optische Mitführungseffekt

Dieser Effekt ist bisher noch nicht zur Strömungsmessung herangezogen worden.

I. 5. Meßfühler für den Dopplereffekt

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe des Dopplereffektes kann man sowohl akustische als auch optische Quellen und Empfänger verwenden.

I. 5.1. Der akustische Dopplereffekt

Die evtl. in einer Flüssigkeit vorhandenen Teilchen, die bei den bisher geschilderten akustischen Verfahren als mögliche Fehlerquellen auftreten können, werden bei einer Meßmethode, die den Dopplereffekt ausnutzt, als aktive Elemente benutzt. Strahlt ein Ultraschallsender ein Signal in einer strömenden Flüssigkeit aus, so wird ein Teil der ausgesandten Energie an Grenzschichten unterschiedlichen Schallkennwiderstandes reflektiert (Volumenzurückstrahlung). Bei geeigneten Frequenzen (einige MHz) trifft das auch für kleine im Wasser befindliche Partikel zu. Die empfangene Frequenz wird durch den Dopplereffekt verändert (Abb. 7), da der Empfänger die Reflektoren als bewegte Schallquelle sieht.

Für die Empfängerfrequenz erhält man:

$$f_E = f_{\text{osz}} \cdot \frac{c+v}{c-v} \cdot k(\varphi, \Theta)$$

wobei $k(\varphi, \Theta)$ die Richtungsabhängigkeit angibt.

Für $k = 1$ ergibt sich die Dopplerfrequenz zu

$$f_D = f_E - f_{\text{osz}} = \frac{2v}{c} f_{\text{osz}} \quad \text{für } v \ll c$$

Daraus folgt

$$v = \frac{f_D}{f_{\text{osz}}} \cdot \frac{c}{2}$$

Diese Gleichung läßt sich mit elektronischen Hilfsmitteln (Abb. 8) durch Anwendung eines Überlagerungsempfängers leicht auswerten. Der Aufwand wächst jedoch gegenüber der Zeitmessung, da die Oszillatorfrequenz nach obiger Gleichung in die Messung mit eingeht. Bei einer Frequenz von 5 MHz ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 0,1 cm/sec eine Dopplerfrequenz von 6 Hz. Strebt man diese untere Grenze der Anzeige an, so dürfen die Schwankungen der Oszillatorfrequenz $1 \cdot 10^{-6}$ nicht überschreiten. Bei einer Bandbreite von 0 bis 10 kHz können dann Geschwindigkeiten von 2 mm/sec bis 1,5 m/sec gemessen werden.

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 5):

Abb. 9 Anordnung zur Messung des optischen Doppler-Effektes mit einem Laser-Interferometer.

Im Gegensatz zum Mitführungseffekt geht hier ferner die Schallgeschwindigkeit der Flüssigkeit in die Messung mit ein. Bei Messungen im Meer ist daher stets eine Parallelmessung oder eine direkte Kompensation der Schallgeschwindigkeit erforderlich.

Ein wesentliches Merkmal der Dopplereffektsonde in hydrodynamischer Hinsicht besteht darin, daß der eigentliche Meßort einige Zentimeter von der Meßsonde entfernt liegt, so daß die Strömung praktisch nicht beeinflußt wird. Nachteilig ist andererseits, daß sie nicht die Geschwindigkeit des Wassers sondern die von zufällig vorhandenen Reflektoren mißt. Die Größe der Reflektoren muß mindestens ein Drittel der Wellenlänge des Ultraschallsignals betragen. Bei einer Frequenz von 5 MHz werden noch Partikel in der Größenordnung 0,1 mm erfaßt. Nach Kriterien, die bei den Bahnlinienmethoden besprochen werden, ist diese Partikelgröße bereits zu groß, um die Stromlinien im Wasser richtig wiederzugeben. Alle größeren Teilchen, die zudem noch bessere Signale liefern, haben größere Fehler bei Rückschluß auf die Wassergeschwindigkeit zur Folge.

Literatur

CHALUPNIK, J.D., GREEN, P.S. (1962): An Dopplershift ocean-current Meter, Mar.Sci.Instr., Vol. 1, S. 194–198 – HYTECH Division of Bissett-Berman, Model 9006 – JOHNSON, J.W., WIEGEL, R.L. (1958): Investigation of Current Measurements in Estuarine and Coastal Water, Calif. State Water Pollution Control Board Publication – KOCZY, F.F., KRONENGOLD, M., LOEWENSTEIN, J.M. (1962): A Doppler Current-Meter, Mar.Sci.Instr., Vol. 2, S. 127–134 – KRONENGOLD, M., VLASAK, W. (1965): A Doppler Current Meter, Mar.Sci.Instr., Vol. 3, S. 237–250 – MARINE Adviser Corp., Model U 9 A

I. 5.2. Der optische Dopplereffekt

Nimmt man anstelle des akustischen Signals einen Lichtstrahl, so ergeben sich prinzipiell die gleichen Verhältnisse wie in der Akustik. Als Lichtstrahl wählt man einen Laser-Strahl, als Überlagerungsempfänger ein Interferometer mit einem Photomultiplier als elektrischem Geber (Abb. 9). Mit der Anwendung des Lasers entfallen die Probleme der Bündelung des Strahls, die in der Akustik auftreten.

Durch Fokussierung des Laserstrahls auf eine Stelle der strömenden Flüssigkeit ist es möglich, die Geschwindigkeit eines außerordentlich kleinen Volumens zu messen. So gelang z.B. die exakte Messung eines parabolischen Geschwindigkeitsprofils in einem Rohr von nur 2 cm Durchmesser.

Für die Anordnung in Abb. 9 ergibt sich als Dopplerfrequenz

$$f_D = \frac{2nv_x}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}$$

Dabei ist n Brechungsindex der Flüssigkeit
 v Geschwindigkeit
 λ Wellenlänge des Laser-Lichts

Für einen typischen Anwendungsfall, $\lambda = 6328 \overset{\circ}{\text{Å}}$, $n = 1.33$, $\theta = 10^\circ$, erhält man in praktischen Einheiten:

$$f_D \text{ [kHz] } \approx 3.66 v_x \text{ [cm/sec]}$$

Die Wahl von θ ergibt sich als Kompromißlösung aus der Ansprechempfindlichkeit und der Intensität des gestreuten Lichtstrahls. In der Praxis wählt man $5^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$. Der Geschwindigkeitsbereich ist ferner durch den Frequenzbereich des Photomultipliers gegeben, der zwischen 1 kHz und 200 MHz liegt. Damit ergibt sich im Falle obigen Beispiels ein Geschwindigkeitsbereich zwischen 0.25 cm/sec und 50 m/sec. Durch Abänderung der Geometrie sind andere Bereiche möglich.

J.W. FOREMAN, E.W. GEORGE und R.D. LEWIS (1965) benutzten die geschilderte Methode zur Geschwindigkeitsmessung von Rauchteilchen in Gasen. Später wandten sie J.W. FOREMAN u.a. (1966) auch auf Flüssigkeitsströmungen im Labor an. Der Einsatz im Meer ist bisher noch nicht versucht worden. Schwierigkeiten dürfte hier vor allem die erschütterungsfreie Aufstellung des Interferometers bereiten.

In hydrodynamischer Hinsicht ist der Laser-Strommesser der entsprechenden akustischen Doppler-Effekt-Sonde überlegen, da infolge der sehr kleinen Lichtwellenlänge keine speziellen Streuteilchen benötigt werden. Die Messungen gelangen auch in klarem Wasser.

L i t e r a t u r

FOREMAN jr., J.W., GEORGE, E.W. and LEWIS, R.D. (1965): Measurement of localized flow velocities in gases with a laser Doppler flowmeter. *App.Phys.Letters*, 7, 77–78. — FOREMAN jr., J.W., GEORGE, E.W., JETTON, J.L., LEWIS, R.D., J.R. THORNTON, and WATSON, H.J. (1966): 8–C2-Fluid Flow Measurements with a Laser Doppler Velocimeter. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE–2, 260–266.

I. 6. Elektrolyse

Die Strömungsmessung mit Hilfe der Elektrolyse von Meerwasser beruht auf der Widerstandsänderung einer Elektrodenanordnung, die durch den Wegtransport der an den Elektroden entstehenden Gasblasen hervorgerufen wird. Die Strömungsgeschwindigkeit ist dem Widerstand umgekehrt proportional.

Empfindlichkeit und Meßbereich eines solchen Elektrodenstrommessers weisen hervorragende Werte auf. Der Meßbereich eines von HOLMES (1965) angegebenen Gerätes reicht von 0,004 bis 10 Knoten. Die Anordnung ist ferner richtungsabhängig. Stellt man die Elektroden einmal parallel und einmal senkrecht zur Strömungsrichtung ein, so ergibt sich eine Widerstandsänderung von 30 %.

Leider stehen den guten Eigenschaften dieses Meßprinzips einige entscheidende Nachteile gegenüber. Die Anordnung besitzt nach Angaben von HOLMES eine nicht unerhebliche Trägheit bei plötzlicher Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit, da es etwa 5 bis 10 Sekunden dauert, bis sich eine stabile Bläschenverteilung an den Elektroden eingestellt hat. Einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit folgt die Anordnung dagegen drei- bis fünfmal schneller. Der Widerstand der Meßstrecke, der durch die Leitfähigkeit des Meerwassers gegeben ist, hängt natürlich auch von Temperatur und Salzgehalt ab.

Die nachteiligen Eigenschaften dieses Meßprinzips in der beschriebenen Form sprechen gegen eine Anwendung bei Strömungsmessungen im Küstenbereich. Bei den Untersuchun-

gen von Holmes handelt es sich jedoch um erste Versuche. Eine Verbesserung der Meßtechnik scheint nicht ausgeschlossen zu sein.

L i t e r a t u r

HOLMES, J.F. (1965): Wide Range Flow Meter for Oceanographic Measurements, Mar.Sci.Instr., Vol. 3, S. 251–255

II. Bahnlinienmethoden

Bahnlinienmethoden befassen sich in erster Linie mit den Möglichkeiten der Markierung kleiner Wasservolumina. Das entscheidende Problem, das dabei auftritt, ist die Frage, ob Indikatormaterialien die Stromlinien der zu untersuchenden Flüssigkeit richtig wiedergeben. Diese Frage wurde von J. FAURE (1963) theoretisch untersucht. Die Probleme werden in dieser Arbeit, die einen Überblick über prinzipielle Meßmethoden geben soll, nicht näher diskutiert. Zum Verständnis der Meßverfahren muß jedoch erwähnt werden, daß fast immer zwei gegensätzliche Forderungen bestehen: Um Stromverteilungen zu photographieren, sind gute optische Eigenschaften und damit zumeist ausreichende Teilchendurchmesser Voraussetzung. Andererseits dürfen bestimmte Dimensionen der Indikatorpartikel aus strömungstechnischen Gründen nicht überschritten werden. Bei Flüssigkeitströpfchen als Indikatoren tritt z.B. die Schwierigkeit auf, daß ihr optisches Verhalten meist sehr schlecht ist, daß sie in turbulenten Strömungen ihre Form nicht beibehalten und große Abweichungen von den wirklichen Stromlinien auftreten, wenn die Tröpfchendichte stärker von der Flüssigkeitsdichte abweicht. Die Dimensionen fester Indikatorpartikel dürfen (nach FAURE) in laminaren Strömungen 0.02 mm und in turbulenten 0.01 mm nicht überschreiten (in Gasen gilt als Grenze $1\ \mu\text{m}$). Die große Anzahl der Bahnlinienmethoden erklärt sich aus dem Bemühen, Kompromißlösungen für die genannten gegensätzlichen Forderungen zu finden. Wegen der Vielzahl der Methoden wird hier nur auf die wichtigsten Prinzipien eingegangen. Für ein intensiveres Studium sei auf die unten aufgeführte Zusammenfassung von B.R. CLAYTON und B.S. MASSEY (1967) hingewiesen, in der auch genügend weiterführende Literatur angegeben ist. Es werden ausschließlich Methoden behandelt, die für Untersuchungen sehr kleinräumiger Stromverteilungen geeignet sind. Eine Anwendung dieser Verfahren im Meer ist bisher nicht bekannt.

II. 1. Beobachtung zufälliger Verteilungen von Indikatorpartikeln und optische Effekte in strömenden Flüssigkeiten

Die hier beschriebenen Verfahren sind vorwiegend qualitativer Natur. Sie dienen hauptsächlich der Sichtbarmachung von Geschwindigkeits- und Richtungsverteilungen sowie zur Demonstration turbulenter und laminarer Gebiete. Beim Versuch quantitativer Filmauswertungen besteht die grundsätzliche Schwierigkeit, dieselben Teilchen von Bild zu Bild zu verfolgen.

II. 1.1. Darstellung der Stromrichtungsverteilung in Oberflächennähe

Die älteste Methode besteht darin, daß man auf die Flüssigkeitsoberfläche einen leichten Puder mit guten Reflektionseigenschaften streut. Dazu eignet sich vor allem Aluminium und Lycopodium. Bei guter Beleuchtung und spannungsfreier Flüssigkeit

lassen sich brauchbare Strömungsbilder erzielen. Versuche an Tragflächen und Zylindern, die z.B. von L. PRANDTL und O.G. TIETJENS (1934) im Windkanal durchgeführt wurden, konnten später auch erfolgreich in derart markierten Flüssigkeiten angestellt werden. Sind vertikale Stromkomponenten zu vernachlässigen, so können diese Indikatoren auch dicht unter der Oberfläche eingebracht und ohne allzugroße Verzerrungen von oben beobachtet werden. Sehr gute Darstellungen der Flußrichtung lassen sich ferner mit Ölfarbe herstellen.

II. 1.2. Unterscheidung turbulenter und laminarer Gebiete

II. 1.2.1. Indikatormethoden

Informationen über die räumliche Verteilung von turbulenten und laminaren Gebieten an Modelloberflächen kann man ebenfalls mit Farbe gewinnen. Es ist dabei zweckmäßig, die von der der Strömung zugekehrten Seite des Modells einzubringen und sie dann über dessen Oberfläche flußabwärts fließen zu lassen. In laminaren Zonen haften viele Farbteilchen an der Oberfläche, während in turbulenten Gebieten nur eine unvollständige Adhäsion stattfinden kann. Die Trennung dieser Gebiete ist jedoch unvollkommen.

Analog zur Turbulenzabhängigkeit der Adhäsion verhalten sich Erscheinungen, die mit Sublimation und Löslichkeit verbunden sind.

Bei der Anzeige sehr dünner Grenzschichten führen fast alle Markierungsmethoden zu Ungenauigkeiten, da schon bei sehr geringen Inhomogenitäten vorzeitige Übergänge der Indikatoren in diese Schichten möglich werden. Ein möglicher Ausweg stellt z.B. ein Verfahren der mikroskopischen Beobachtung derart kleiner Teilchen dar, die sich ohnehin immer im Wasser befinden.

II. 1.2.2. Optische Effekte

Einige optische Erscheinungen in strömenden Flüssigkeiten machen Indikatoren überflüssig, sofern man sich nur für die räumliche Ausdehnung der Grenzschichten und der turbulenten und laminaren Zonen interessiert.

Viele reine Flüssigkeiten und vor allem kolloidale Suspensionen werden doppelbrechend, wenn den Molekülen bzw. den suspendierten Teilchen durch eine äußere Kraft eine bevorzugte Orientierung aufgezwungen wird. In strömenden Flüssigkeiten kann dies z.B. durch Scherungskräfte erfolgen. Man spricht dann von strömender Doppelbrechung. Mit den bekannten Methoden der Spannungsoptik lassen sich mit polarisiertem Licht Interferenzbilder erzeugen. Laminare Strömungen führen zu stationären Interferenzfiguren, während turbulente Gebiete durch veränderliche Bilder gekennzeichnet sind. Die Trennlinien sind bei diesen optischen Verfahren außerordentlich gut definiert. In reinen Flüssigkeiten werden zum Auslösen des Effektes leider sehr große Scherungskräfte benötigt, so daß in den meisten Fällen kolloidale Suspensionen benutzt werden müssen.

Ein hochempfindlicher optischer Effekt wird beim Schlierenverfahren ausgenutzt. Um Schlieren in Flüssigkeiten zu erzeugen, kann man z.B. die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Dichte ausnutzen. Lokale Dichteunterschiede sind wiederum durch ungleichmäßige Erwärmung der Flüssigkeit zu erzielen. Mit einer Schlierenoptik können dann die Bewegungen der Schlieren in der Strömung direkt beobachtet werden. Wegen der hohen Empfindlichkeit des Verfahrens werden leider auch die bei der Erwärmung entstehenden Konvektionsströmungen angezeigt, so daß auch dieses Verfahren nur zu qualitativen Ergebnissen führt.

II. 2. Beobachtung kontrolliert eingebrachter Indikatoren

Die quantitative Erfassung von Strömungsverteilungen setzt voraus, daß Indikatoren zu bestimmten Zeitpunkten gezielt an vorgegebenen Stellen in die Flüssigkeit eingebracht werden. Die Zerlegung in Komponenten ist durch geeignete Anordnung der photographischen Einrichtungen möglich. Durch Anwendung von Farbfilmen kann man sogar zu dreidimensionalen Aufzeichnungen von Stromverteilungen kommen. In diesem Fall muß die Arbeitszone von möglichst vielen parallelen Strahlen verschiedener Farbe durchsetzt werden. Wird im rechten Winkel zu den farbigen Strahlen photographiert, so wird die Bewegung der Indikatoren in der dritten Dimension durch Wechseln der erscheinenden Farben angezeigt.

Von den vielen Methoden der gezielten Markierung kleiner Wasservolumina durch feste, flüssige und gasförmige Indikatoren sollen hier nur elektrolytische Verfahren näher behandelt werden.

II. 2.1. Elektrolytische Markierungsverfahren

Das Problem des Einbringens von Indikatoren in das strömende Medium, die Wahl der geeigneten Teilchengröße und des Zeitpunktes des Beginns und der Beendigung der Markierung werden mit elektrolytisch erzeugten Indikatoren elegant gelöst. Die Größe der Elektroden kann sehr klein gehalten werden, die Teilchengröße läßt sich mit Hilfe der elektrischen Stromstärke steuern. Man kann sowohl Filamente als auch Pulse von Markierungsteilchen erzeugen und schließlich besteht die Möglichkeit, Stromprofile oder Stromlinien sichtbar zu machen.

F.X. WORTMANN benutzte 1953 Tellurdraht als Kathode, wobei Sauerstoff und elementares Tellur abgeschieden werden. Das Tellur ist tiefschwarz und kolloidartig und zeigt deswegen auch sehr gute optische Eigenschaften. Die Methode ermöglicht, Stromprofile bei impulsförmiger Stromversorgung zu beobachten. Schwierigkeiten bereitet die Brüchigkeit des Tellurs, wodurch die reproduzierbare Abscheidung schnell verschlechtert wird. Sie konnte jedoch beseitigt werden, indem das Tellur auf einen Stahldraht aufgedampft wurde. Die Emission der Teilchen kann durch den Eingangsstrom kontrolliert werden. Die Wärmewirkungen bei der Elektrolyse sind zu vernachlässigen. Ein Nachteil besteht darin, daß während der Elektrolyse auch giftiges Telluroxyd erzeugt wird.

Bei der Erzeugung von Bläschen durch Elektrolyse von Wasser können diese ebenfalls in der unterschiedlichsten Art von den Elektroden abgeschieden werden, als Wolke, als Filamente oder als Fläche. Außerdem kann die Größe der Blasen durch die elektrische Versorgungsspannung reguliert werden. Wegen der größeren Bläschenausbeute an Wasserstoff bevorzugt man die Kathode. Eine sehr nützliche Form dieser Elektrode erhält man, wenn die Drahtkathode zwischen zwei Zahnrädern gepreßt wird. Wird eine derartige geformte Kathode mit ihrer einen Fläche in Richtung des Stromes aufgebaut, so gehen sehr gut definierte Filamente in Strömungsrichtung von den Spitzen aus. Die Blasen werden dabei zwar auf dem gesamten Draht erzeugt, sie sammeln sich jedoch an den Spitzen bevor sie ins Wasser abgeschieden werden. Experimente ergaben, daß der spitze Winkel nicht größer als 40° sein darf. Die Wasserstoffblasentechnik gehört heute zu den ausgefeiltesten Bahnliniemethoden. Mit ihr können sowohl laminare als auch turbulente

Strömungen und Grenzschichten beliebiger Dicke untersucht werden. Mit geeigneten Registrierverfahren kann man Informationen über die Strömungsgeschwindigkeit in drei Dimensionen erhalten.

L i t e r a t u r

CLAYTON, B.R., MASSEY, B.S. (1967): Flow visualisation in water: a review of techniques. *J.Sci.Instr.* Vol. 44, No. 1, S. 2–12. — FAURE, J. (1963): Quelques limitations théoriques des procédés de visualisation, *Houille Blanche*, 18, S. 298–306. — PRANDTL, L., TIETJENS, O.G. (1934): *Applied Hydro- and Aerodynamics* (New York: Mc Graw Hill) — WORTMANN, F.X. (1953): Eine Methode zur Beobachtung und Messung von Wasserströmung mit Tellur. *Z.f.Angew. Phys.* 5, S. 201–206.