Messung von Stromprofilen in Flachwasserwellen

Von G. Krause

Summary

A drag force current meter for measuring two components of orbital velocities of shallow water waves is described. Its main part is a sensor of net form, causing the drag coefficient to be independent of the Reynolds number over a large range and inertial effects to be neglected. First results of measurements of current velocity profiles of waves of small amplitude on a sloping beach are reported, showing the influence of the mass transport velocity.

Strömungsprofile können als empfindlichster Indikator für die in einer Flüssigkeit wirkenden Kräfte angeschen werden. Ihrer Messung kommt deshalb große Bedeutung zu, und sie wird sowohl bei Laborexperimenten als auch bei Untersuchungen im Feld stets angestrebt. Dennoch sind die wesentlichen Merkmale von Oberflächenwellen fast ausschließlich durch Messung der Wellenhöhe experimentell studiert worden. Diese Tatsache



Abb. 1. Dispersionskurven für Schwerewellen und Auflösungsgrenzen der wichtigsten Meßmethoden für Strömungen

läßt sich nur durch die erheblichen technischen Schwierigkeiten erklären, die bei Feldmessungen von oszillierenden Strömungen auftreten. Geschwindigkeitsprofile in Flachwasserwellen sind aus diesem Grund bisher hauptsächlich in Wellenkanälen im Labor gemessen worden.

In den letzten Jahren sind nun, z. B. in Zusammenhang mit Problemen der Sandwanderung im Küstenbereich, zahlreiche Versuche unternommen worden, um Beziehungen zwischen der Orbitalgeschwindigkeit und der von ihr am Boden ausgeübten tangentialen 40

Schubspannung zu finden. Dieser Problemkreis kann jedoch erst dann als gelöst gelten, wenn theoretische Voraussagen und Befunde von Laborexperimenten auch durch Messungen in der Natur bestätigt worden sind. Die Durchführung derartiger Feldmessungen hatten wir uns vor einigen Jahren zur Aufgabe gemacht. Hier soll über die Entwicklung eines Strömungsmeßgerätes und über erste erfolgreiche Messungen von Stromprofilen in Flachwasserwellen berichtet werden.

Die Messung von Stromprofilen erfordert den Einsatz einer größeren Zahl von Meßgeräten. Die einzelnen Sensoren müssen also nicht nur den rauhen Bedingungen im Küstenvorfeld standhalten, sondern auch in größerer Stückzahl im Rahmen vorgegebener



Abb. 2. Widerstandsbeiwerte als Funktion der Reynoldszahl für verschiedene Meßkörper

Geldmittel herstellbar sein. Der Frage, welches Meßprinzip benutzt werden soll, kommt deshalb grundlegende Bedeutung zu, und sie rechtfertigt auch den Aufwand für eine Studie der physikalischen und technischen Grenzen der überhaupt möglichen Prinzipien der Strömungsmessung. Eine derartige Studie wurde durchgeführt. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die Ergebnisse bezüglich des Betrages des Strömungsvektors in einem Frequenz-Wellenlängen-Diagramm. In der Abbildung sind zwei Dispersionskurven dargestellt, eine für Oberflächenwellen auf tiefem Wasser und eine für einen speziellen Fall von Flachwasserwellen. Zu den kürzesten Perioden gehören danach Wellenlängen in der Größenordnung von 10 cm. Nach diesen Gegebenheiten sind das räumliche und zeitliche Auflösungsvermögen eines zu entwickelnden Strömungsmeßgerätes zu richten. Außerdem erfordert die Aufgabenstellung Strömungsmessungen in unmittelbarer Bodennähe, so daß auch aus diesem Grunde ein möglichst kleines Meßgerät gefunden werden muß.

In Abbildung 1 sind ferner die teils physikalisch, teils technisch bedingten räumlichen und zeitlichen Auflösungsgrenzen der wichtigsten Meßmethoden für den Betrag eines Strömungsvektors eingezeichnet. Danach ist die Methode der Messung des Strömungswiderstandes auf einen festen Körper dem vorliegenden Problem optimal angepaßt, da beide Auflösungsgrenzen die Dispersionskurven gerade umschließen. Man kann aus diesem Diagramm ferner leicht ablesen, daß z. B. auch elektromagnetische Strömungsmesser für dieses Problem brauchbar wären. Die zeitliche Auflösung dieses Effektes ist jedoch, gemessen an der räumlichen Grenze, in bezug auf die Orbitalstrommessung etwa eine Zehnerpotenz zu groß, so daß es bei Profilmessungen nicht sinnvoll ist, diese teuren Geräte einzusetzen.

Weitere Auswahlkriterien für ein Meßprinzip aus der Vielzahl der möglichen Methoden ergeben sich beim Problem der Richtungsmessung in Orbitalströmungen. Es läßt sich leicht zeigen, daß nur die Komponentenmessung des Strömungsvektors zu brauchbaren Ergebnissen führen kann. Auch hier bietet sich wieder die Ausnutzung des Strömungswiderstandes an, da dem Sensor die Form eines Rotationskörpers gegeben werden kann und eine Kraft leicht in Komponentenform zu messen ist. Aus diesen Gründen ist der Strömungswiderstand schon wiederholt bei Orbitalstrommessungen benutzt worden.

Die entscheidende Schwierigkeit bei Ausnutzung dieses Prinzips besteht darin, einen geeigneten Meßkörper zu finden. In einer zeitlich veränderlichen Strömung beträgt die Kraft K auf einem Körper

$$K = \frac{1}{2} c_{s} (Re) \varsigma F|V|V + c_{Dy} (Re, S) \varsigma Q \frac{dV}{dt}$$

Dabei ist

c _s (Re)	statischer Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynoldszahl
5	Dichte der Flüssigkeit
F	Fläche des Körpers senkrecht zur Strömungsrichtung
v	Strömungsgeschwindigkeit
cDy	dynamischer Widerstandsbeiwert als Funktion von Reynolds- und Strouhalzahl
sQ	vom Körper verdrängte Wassermasse
t	Zeit

Aus dieser Beziehung sieht man, daß für Meßzwecke nur Körper in Frage kommen, bei denen $c_s(Re)$ konstant ist und die außerdem die Eigenschaft besitzen, daß der zweite Term in der Gleichung stets sehr klein gegen den ersten bleibt. Beide Forderungen lassen sich mit netzförmigen Meßkörpern (siehe Abb. 2) erfüllen. Als günstigste Form erwies sich die des Körpers F5 mit einem Durchmesser von 3 cm und einer Höhe von 2 cm. Sein Widerstandsbeiwert ist relativ groß und in einem weiten Bereich unabhängig von der Geschwindigkeit. Da dieser netzförmige Körper außerdem sehr wenig Wasser verdrängt, ist die Größe ςQ sehr klein. Messungen haben ergeben, daß der zweite Term der Gleichung auch unter ungünstigsten Bedingungen höchstens 5 % zur Gesamtkraft beiträgt.

Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt durch den entwickelten Strömungsmesser. Ein Federstab wird durch eine am Meßkörper angreifende Kraft in Richtung der Kraft verbogen. Die damit verbundene Lageänderung eines Eisenkerns ändert, je nach Größe und Richtung der Kraft, die Induktivitäten der senkrecht zueinander angeordneten Spulenpaare. Die Induktivitätsänderungen werden mit 2 Trägerfrequenzmeßbrücken gemessen. Am Ausgang dieser Verstärker stehen dann die Kräfte als analoge Gleichspannungen zur Registrierung zur Verfügung.

Abbildung 4 zeigt schließlich, daß der Strömungsmesser ein Kosinusgesetz recht gut erfüllt. In diesem Fall wirkte am oberen Ende des Strommessers eine konstante Kraft, während das Gerät um 360° gedreht wurde. Bei der Abbildung handelt es sich um die direkte Registrierung der Kraftkomponenten auf einem XY-Schreiber.



Abb. 3. Querschnitt durch den Strömungsmesser



Abb. 5. Versuchsaufbau in Eckernförde

Messungen am fertigen Gerät ergaben einen Meßbereich von 2 cm/sec bis 80 cm/sec bei einer relativen Genauigkeit von 6 %. Die Grenzfrequenz beträgt 15 Hz.

Die ersten Feldmessungen mit 5 der beschriebenen Strömungsmeßgeräten dienten dem Vergleich der theoretisch vorausgesagten Stromprofile mit denen, die in Flachwasserwellen in Strandnähe zu beobachten sind. In Abbildung 5 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Die 5 Strömungsmeßgeräte sind vertikal übereinander angeordnet. Als Hilfsgrößen wurden Wellenhöhe, Wasserstand, Druck und Differenzdruck erfaßt. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte analog auf Magnetband.



Abb. 6. Verlauf der Wellenhöhe und der Strömungen in 5 verschiedenen Tiefen



Abb. 7. Amplitudenspektrum der Wellenhöhe

Um den angestrebten Vergleich möglichst zu vereinfachen, wurden in einer ersten Versuchsserie Oberflächenwellen mit Hilfe eines Schiffes künstlich erzeugt. Registriert wurden dabei nur die relativ langen Wellen, die hinter dem Schiff herliefen. Den Zeitablauf der Wellenhöhe und der Strömungen zeigt Abbildung 6, das Amplitudenspektrum der Wellenhöhe ist in Abbildung 7 dargestellt.

Man sieht, daß auf diese Weise nahezu monochromatische Wellen kleiner Amplitude erzeugt werden konnten. Es ergab sich auf einer Wassertiefe von 2,70 m: 44



Zwei Beispiele für Stromprofile zur Zeit des maximalen



Zwei Beispiele für Stromprofile zur Zeit der Strom-

Stromprofil der Massentransportströmung bei einem begrenzten Kanal konstanter

Wellenhöhe:	10	cm	Wellenlänge:	21	m
Wellenperiode:	4,5	sec	Phasengeschwindigkeit:	4,7	m/sec
Tiefe/Wellenlänge:	0,1	2			

Nach dem von J. I. COLLINS (1963) angegebenen Kriterium für den Übergang einer laminaren in eine turbulente Bodengrenzschicht sind mit den angegebenen Daten die Verhältnisse des laminaren Falls zu erwarten. Die Stromprofile zur Zeit des maximalen Stroms (Abb. 8) zeigen, daß der unterste Strommesser (20 cm über dem Boden) sich nicht in einer Grenzschicht befunden hat. Aussagen über die Bodenreibung lassen sich aus diesen Messungen also nicht gewinnen.

In der Nähe der Nulldurchgänge zeigen die Stromprofile dagegen ein überraschendes Verhalten. Abbildung 9 zeigt eine Folge von Profilen im zeitlichen Abstand von 0,16 sec in der Umgebung zweier Nulldurchgänge für den Fall, daß die Strömung von Richtung See nach Richtung Land umkehrt.

Man erkennt, daß sich der Richtungswechsel zuerst in Bodennähe und auch beim obersten Strommesser bemerkbar macht. Beim Richtungswechsel Land—→See (Abb. 10) ist es jedoch umgekehrt, die Strömung in Bodennähe und beim obersten Strommesser reagiert verspätet auf die Stromumkehr.

Dieses Verhalten der Stromprofile kann durch den Einfluß einer Massentransportströmung erklärt werden. Die Kontinuitätsgleichung fordert, daß durch jeden Querschnitt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Wellen im zeitlichen Mittel die gleiche Wassermasse hindurchfließen muß. Bei geneigtem Boden bedeutet das eine Vergrößerung der Wellenamplitude zum Strand hin und damit ein Ansteigen des mittleren Wasserspiegels, was eine konstante Ausgleichsströmung zur Folge haben muß.

In Abbildung 11 ist das normierte Stromprofil der Massentransportströmung dargestellt, wie es sich aus der Theorie von M. S. LONGUET-HIGGINS (1953) für einen einseitig begrenzten Kanal konstanter Tiefe berechnen läßt. Dieser Fall liegt hier zwar nicht vor, nach Tankexperimenten von R. C. RUSSEL und J. D. C. OSORIO (1958) ist aber bekannt, daß diese Form des Stromprofils auch auf geneigten Hängen beobachtet wird. In unserem Fall war die Stromgeschwindigkeit der Ausgleichsströmung 10mal größer als der theoretische Wert für den begrenzten Kanal konstanter Tiefe.

Überlagert man dem Stromprofil in Abbildung 11 das Profil einer sinusförmigen Flachwasserwelle, so zeigt die resultierende Stromverteilung genau den beobachteten Verlauf. Mit der geschilderten Meßanordnung sind außerdem zahlreiche Messungen in natürlichem Seegang durchgeführt worden, deren Auswertung noch nicht abgeschlossen ist.

Schriftenverzeichnis

COLLINS, J. I.: Inception of Turbulence at the Bed under Periodic Gravity Waves. J. Geophys. Res. 68, No. 21, 1963.

LONGUET-HIGGINS, M. S.: Mass Transport in Water Waves. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Vol. 245, pp. 535-581, 1953.

RUSSEL, R. C. H., and OSORIO, J. D. C.: An experimental investigation of drift profiles in a closed channel. Sixth Conf. on Coastal Eng., pp. 171-193, 1958.