

KREISZYLINDER IN DICHTEGESCHICHTETER STRÖMUNG – VERGLEICH ZWISCHEN LABOREXPERIMENT UND NUMERISCHER SIMULATION

CIRCULAR CYLINDER IN STRATIFIED SHEAR FLOWS – COMPARISON BETWEEN LABORATORY EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION

F. Hüttmann, J.-E. Melskotte, P. Menzel¹, A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik,
Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

¹ Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde,
Seestraße 15, 18119 Rostock

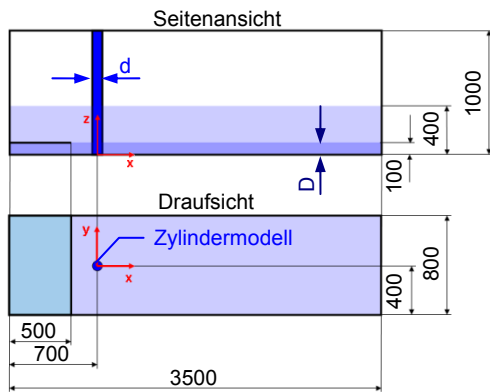
Turbulente Mischung, Zylindernachlauf, Schichtenströmung, Salzwasser, Ostsee
turbulent mixing, wake of a cylinder, stratified flow, saltwater, baltic sea

Abstrakt

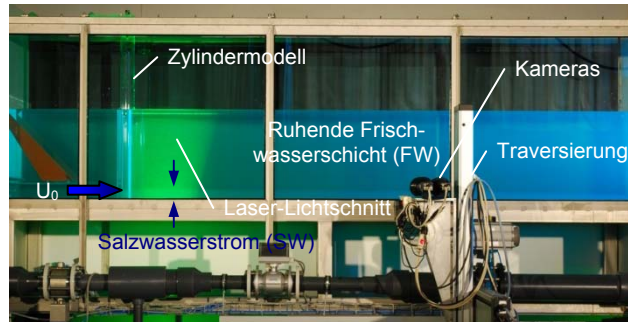
Im Rahmen des vom Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projektes QuantAS-Off (Quantification of Water Mass Transformations in the Arkona Sea: Impact of Offshore Wind Farms) soll der Einfluss von zylindrischen Offshore-Bauwerken auf die Vermischung in dichtegeschichteten Strömungen untersucht werden. Um diesen Prozess zu verstehen, wurden am Lehrstuhl Strömungsmechanik Labor-experimente und numerische Simulationen durchgeführt. Die Laborexperimente umfassen gleichzeitige Messungen von zweidimensionalen, zweikomponentigen Geschwindigkeitsfeldern mittels Particle Image Velocimetry (PIV) und Messungen von zweidimensionalen Konzentrationsverteilungen mittels laserinduzierter Fluoreszenz (LIF). Für die numerische Simulation der geschichteten Umströmung mittels Large Eddy Simulation (LES) werden die Geschwindigkeits-, Konzentrations- und Turbulenzprofile aus den Labormessungen als Randbedingung verwendet. Auf den Vergleich der Ergebnisse von Experiment und numerischer Simulation geht der vorliegende Beitrag näher ein.

Einleitung

Die Zufuhr von lebensnotwendigem Sauerstoff in die Ostsee wird hauptsächlich durch den sporadisch auftretenden Einstrom von salz- und sauerstoffreichem Wasser der Nordsee über die Drogden Schwelle und die Darsser Schwelle gewährleistet. Die Fundamente von geplanten und bereits genehmigten Offshore-Windkraftanlagen im Bereich Kriegers Flak und im Arkona Becken beeinflussen diese Ereignisse und die Vermischung des Brackwassers mit dem darunter fließenden Salzwasser. Zur Abschätzung der ökologischen und wirtschaftlichen Folgen dieser Vorgänge werden im Verbundprojekt QuantAS-Off umfangreiche experimentelle sowie numerische Untersuchungen im Original- und Labormaßstab durchgeführt. Die Fundamente der Offshore-Windkraftanlagen werden durch Kreiszyylinder geometrisch idealisiert [1]. Ein Teilaspekt ist die Untersuchung der Mischungsvorgänge an einem Kreiszyylinder in einer dichtegeschichteten Strömung im Maßstab 1:100, der zum



a) Schema der Messstrecke (Angaben in mm)



b) Messstrecke mit Versuchstechnik

Abb. 1: Aufbau des Laborexperiments ($d = 80 \text{ mm}$, $D = 100 \text{ mm}$)

physikalischen Verständnis dieser Vorgänge beiträgt und zur Validierung sowie Weiterentwicklung eines numerischen Ostseemodells dient.

Experimenteller Aufbau und Rechengebiet

Die Laboruntersuchungen im Maßstab 1:100 finden im Kanal für dichtegeschichtete Strömungen des Lehrstuhls Strömungsmechanik statt (Abb. 1). Der Kreiszyylinder hat den Durchmesser $d = 80 \text{ mm}$, der Salzwasserstrom die Mächtigkeit $D = 100 \text{ mm}$. Die Strömungsverhältnisse im Laborversuch werden unter Berücksichtigung der densimetrischen Froude-Ähnlichkeit skaliert:

Densimetrische Froudezahl:

$$Fr_D = \frac{U_\infty}{\sqrt{g D \frac{Q_{SW} - Q_{FW}}{Q_{SW}}}} = 0,5 \quad (1)$$

Reynoldszahl:

$$Re_d = \frac{U_\infty d}{\nu} = 3400 \quad (2)$$

Damit ergibt sich für den Laborversuch eine auf den Zylinderdurchmesser bezogene Reynoldszahl $Re_d = 3400$. Mittels eines kombinierten PIV/LIF-Systems werden zwei Komponenten des Geschwindigkeitsfeldes und die Verteilung des Salzgehaltes gleichzeitig in zweidimensionalen Messebenen erfasst und für die Auswertung aufbereitet [6], [11]. Am Einlass wird das Profil des Salzwaterstromes entsprechend einem in der Ostsee experimentell ermittelten Profil angenähert [7].

Der Laborversuch wird zudem mittels LES numerisch untersucht. Dazu wird ein maßstabsgetreues dreidimensionales Rechenmodell des Kanals für dichtegeschichtete Strömungen erstellt (Abb. 2). Die Vernetzung des Rechengebietes erfolgt über ein blockstrukturiertes,

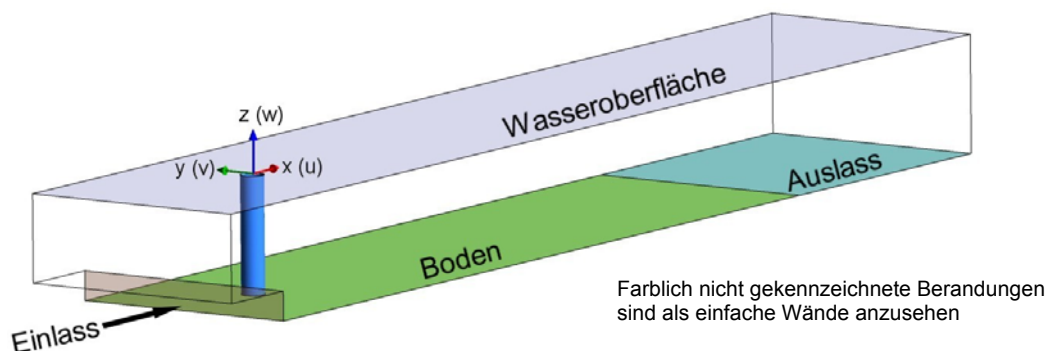


Abb. 2: Schema des Rechengebietes der numerischen Simulation ($d = 80 \text{ mm}$, $D = 100 \text{ mm}$)

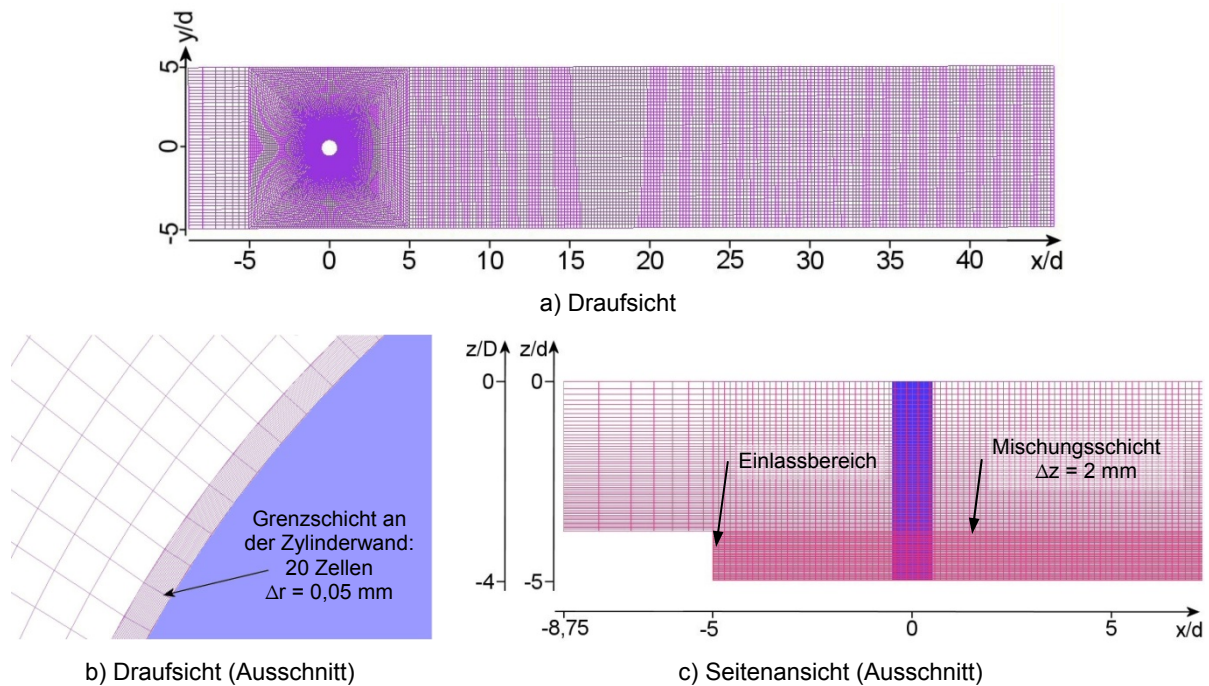


Abb. 3: Diskretisierung des Rechengebietes ($d = 80 \text{ mm}$, $D = 100 \text{ mm}$)

hexaedrisches Gitter und umfasst ca. vier Millionen Gitterzellen. Das Rechengitter wird an die Geometrie und die zu erwartenden Strömungsphänomene angepasst. Zur Darstellung der gekrümmten Zylinderoberfläche wird ein O-Gitter verwendet. In der Umgebung des Kreiszylinders werden die Gitterzellen bis in den Grenzschichtbereich hinein verfeinert. Auch im Bereich der Mischungsschicht erfolgt eine Verfeinerung des Rechengitters (Abb. 3). Als Randbedingungen dienen die Geschwindigkeits-, Konzentrations- sowie Turbulenzprofile aus den Labormessungen. Die Anfangsbedingungen werden mit Hilfe einer vorher durchgeführten RANS-Rechnung generiert [5].

Vergleich von Experiment und numerischer Simulation

Der Vergleich des Laborexperiments mit der numerischen Simulation findet auf Basis der experimentell bestimmten Geschwindigkeitskomponenten u , w und der Salinität S statt – gleichwohl liegen aus der numerischen Simulation neben der Salinität S alle drei Geschwindigkeitskomponenten u , v , w sowie das Druckfeld p vor.

Die zeitlich gemittelten Höhenprofile der Geschwindigkeitskomponenten \bar{u} , \bar{w} und der Salinität \bar{S} an verschiedenen Stellen hinter dem Zylinder zeigen im Verlauf qualitativ eine gute Übereinstimmung (Abb. 4). Allerdings zeigt besonders an der Stelle 1 die numerische Simulation im Bereich der oberen Mischungsschicht eine starke Rückströmung (Hauptströmungskomponente \bar{u}), die in den Messungen nicht festgestellt werden konnte. Das Profil der vertikalen Querkomponente \bar{w} wird dagegen besser wiedergegeben. Auffällig bei beiden Geschwindigkeitskomponenten an dieser Stelle ist, dass die numerische Simulation betragsmäßig höhere Werte liefert als das Laborexperiment. Weiter stromab werden in der numerischen Simulation für die Hauptströmungskomponente \bar{u} weiterhin größere Werte berechnet als im Laborexperiment – dagegen sind die berechneten Werte der Querkomponente \bar{w} kleiner und werden fast Null.

Das Höhenprofil der Salinität \bar{S} an der Stelle 1 ist in der numerischen Simulation weiter in Richtung Boden verschoben als in der Messung. Der gleiche Effekt tritt auch weiter stromab an den Stellen 2 und 3 auf. Gründe hierfür sind unter Anderem in der höher berechneten Hauptströmungskomponente \bar{u} innerhalb der Schicht zu finden.

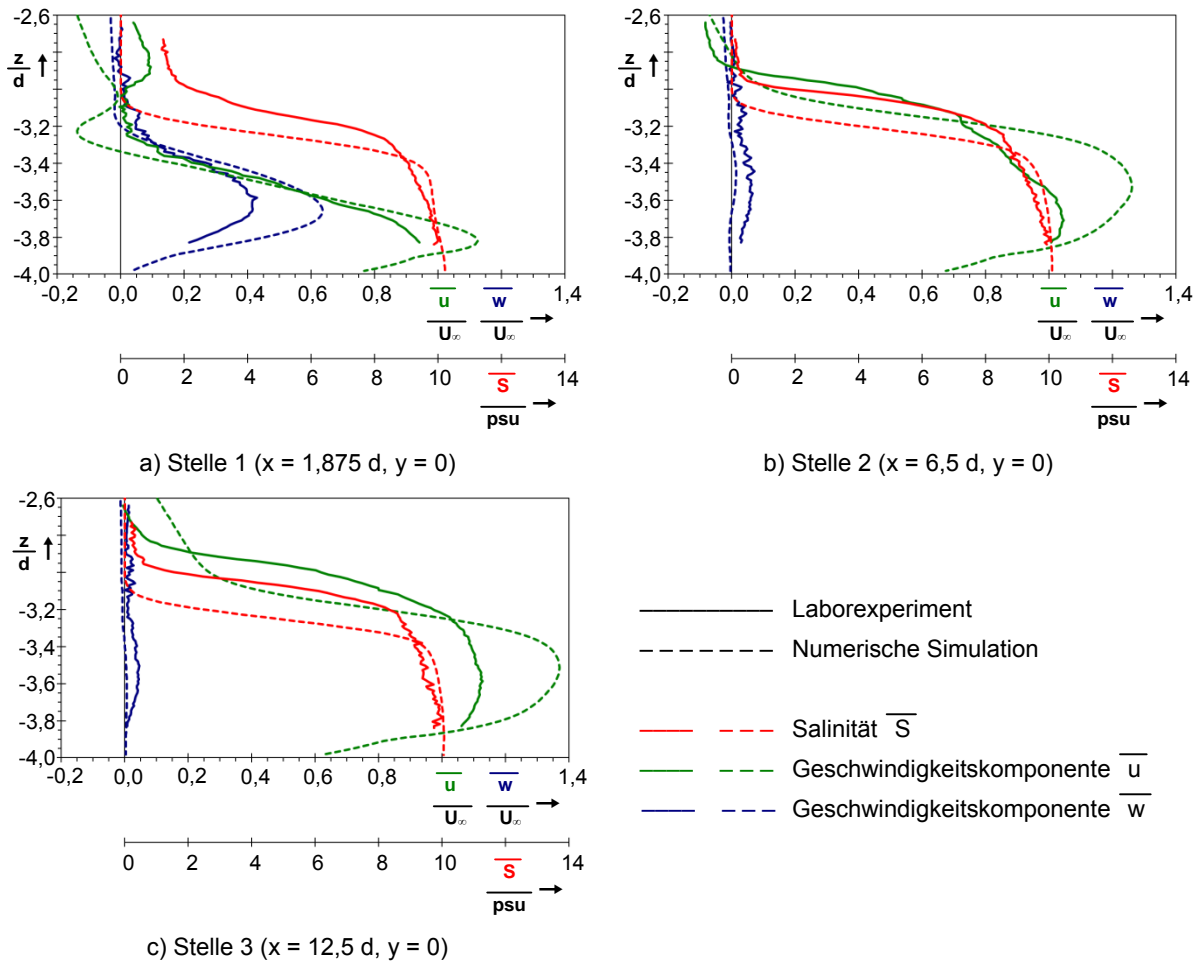


Abb. 4: Zeitlich gemittelte Höhenprofile der Geschwindigkeitskomponenten und der Salinität an verschiedenen Stellen

Die Darstellung der zeitlich gemittelte Salinität \overline{S} in der Mittelebene $y = 0$ zeigt die gute Vergleichbarkeit von Laborexperiment und numerischer Simulation (Abb. 5). Gleichzeitig zeigt sie auch die Unterschiede beider Verfahren. Technisch bedingt sind die Ergebnisse des Laborexperiments aus einzelnen Messebenen verschiedener Messungen zusammengesetzt, während in der numerischen Simulation ein blockstrukturiertes Rechengebiet mit gut gestalteten Blockübergängen verwendet wird. In beiden Fällen wird vor dem Zylinder ein Aufstauen und hinter dem Zylinder eine Absenkung der strömenden Salzwasserschicht beobachtet. Die Absenkung der Schichthöhe beträgt ca. $2/3$ der Maximalhöhe im Aufstau-bereich vor dem Zylinder. Weiter stromab steigt die Schichtdicke allmählich an und erreicht annähernd die Ausgangshöhe D .

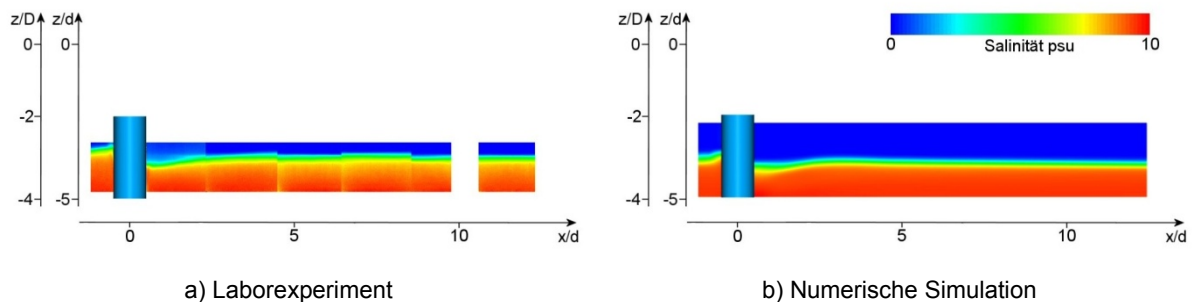


Abb. 5: Zeitlich gemittelte Salinität \overline{S} in der Mittelebene $y = 0$

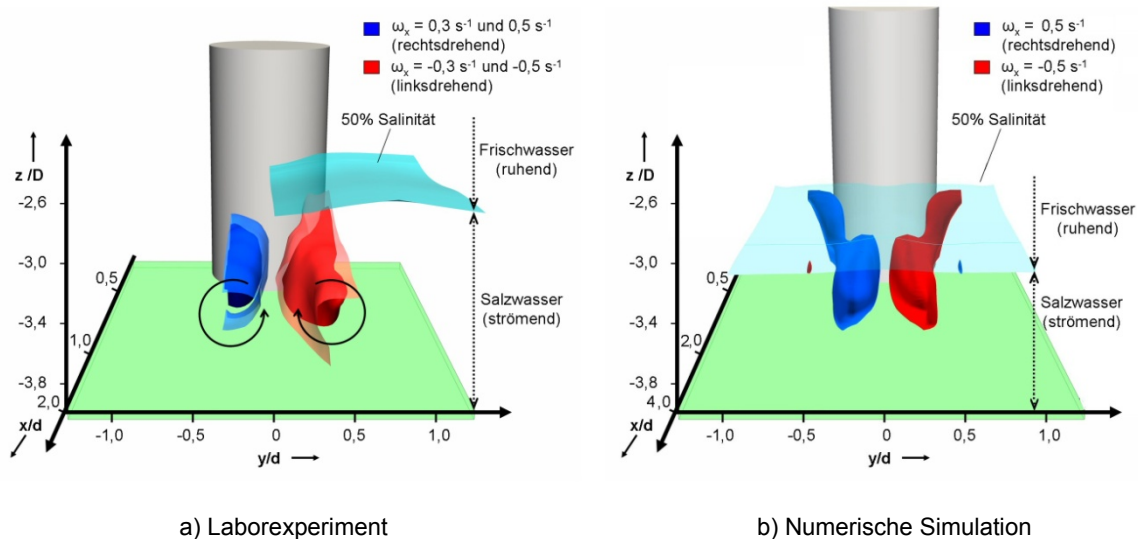


Abb. 6: Hauptwirbelstruktur im Nachlauf des Zylinders

Zur Beschreibung der Schichtdicke wird die Lage der Mischungsschicht herangezogen, die anhand des Höhenprofils der zeitlich gemittelten Salinität \overline{S} beschrieben wird. Aufgrund der großen Gradienten der gemessenen Größen im Bereich der Mischungsschicht wird die Lage der Mischungsschicht über die Isofläche mit dem 50%-Wert der maximalen Salinität \overline{S}_{\max} definiert (Abb. 4, 5, 6).

Weitere Übereinstimmungen von Laborexperiment und numerischer Simulation sind in den Strömungsstrukturen zu finden. Die dominante Wirbelstruktur, ein gegenläufiges Längswirbelpaar, befindet sich in der strömenden Salzwasserschicht. Dieses Längswirbelpaar liegt deutlich unterhalb der Mischungsschicht und induziert hierdurch nahezu keine Strömungsbewegung im ruhenden Frischwasserbereich oberhalb der strömenden Salzwasserschicht. Somit leistet diese dominante Wirbelstruktur keinen bedeutenden Beitrag zur Mischung von Salz- und Frischwasser (Abb. 6).

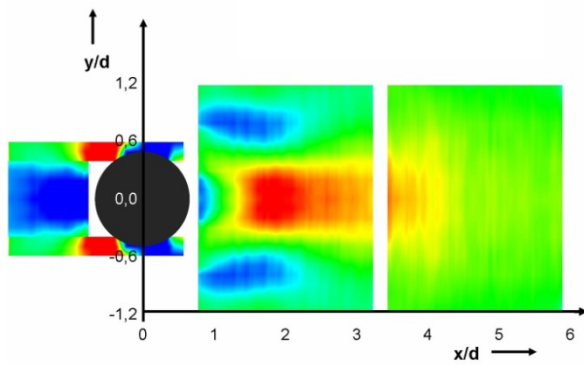
Die Entrainmentgeschwindigkeit w_E dient zur Charakterisierung der Transportprozesse in der Salzwasserschicht (4a). Für das Laborexperiment und damit auch die numerische Simulation ist es erforderlich, die Entrainmentgeschwindigkeit w_E auf den zweidimensionalen Fall (4b) zu reduzieren, da zeitlich zusammenhängende Messungen nur x-z-Ebenen umfassen sowie die horizontale Querkomponente v nicht als Messergebnis vorliegt:

$$\text{Entrainmentgeschwindigkeit:} \quad w_E = \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial u D}{\partial x} + \frac{\partial v D}{\partial y} \quad (4a)$$

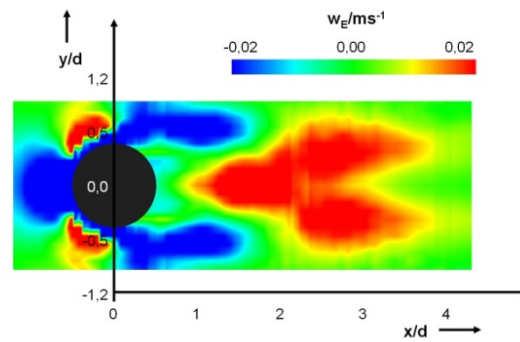
$$w_E^* = \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial u D}{\partial x} \quad (4b)$$

In der Darstellung der Entrainmentgeschwindigkeit w_E^* zeigen sowohl Laborexperiment als auch numerische Simulation in Form, Ausdehnung und Wertebereich eine gewisse Ähnlichkeit (Abb. 7). Charakteristisch sind die Maxima und Minima im Bereich $x/d = 1,5$ sowie entlang des Ablösebereiches. Weiter stromab, ab $x/d = 5$, geht die Entrainmentgeschwindigkeit w_E^* gegen Null. Negative Werte der Entrainmentgeschwindigkeit w_E^* sind mit einer Verringerung der Hauptströmungskomponente u in Bereichen vor und neben dem Zylinder zu deuten. Im Laborexperiment werden im Bereich $x/d \geq 3$ die Anzahl der Messebenen aus versuchstechnischen Gründen reduziert, so dass die Auswertung dieser Größe nur eingeschränkt möglich ist.

An Hand der Auswertung der numerischen Daten kann festgestellt werden, dass die in Gleichung (4b) getroffene Vereinfachung (ebenen Betrachtung) zulässig ist und sich kaum



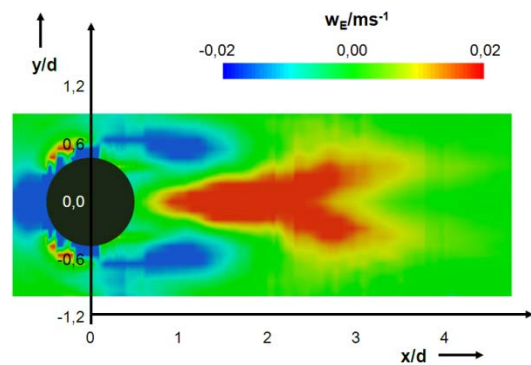
a) Laborexperiment



b) Numerische Simulation

Abb. 7: Entrainmentgeschwindigkeit w_E nach Gleichung (4b)

auf die Entrainmentgeschwindigkeit w_E auswirkt. Sowohl in der ebenen (Gl. 4b, Abb. 7b) als auch in der vollständigen (Gl. 4a, Abb. 8) Betrachtung stimmt die Entrainmentgeschwindigkeit w_E in Form, Ausdehnung und Wertebereich weitgehend überein. Der Beitrag der horizontalen Querkomponente auf die Entrainmentgeschwindigkeit ist vernachlässigbar und hat somit keinen nennenswerten Einfluss auf den Entrainmentstrom, da die Umströmung des Zylinders im zeitlichen Mittel symmetrisch ist.



Numerische Simulation

Abb. 8: Entrainmentgeschwindigkeit w_E nach Gleichung (4a)

Zusammenfassung

Weitere Untersuchungen wurden bei gleichen Parametern dieser dichtegeschichteten Strömung – allerdings ohne Zylinder – durchgeführt, um die natürliche Mischung zu bestimmen. Durch einen Vergleich mit den Ergebnissen aus den Untersuchungen mit Zylinder war es möglich, den Einfluss des zylindrischen Bauwerkes auf die Mischung der beiden Schichten zu ermitteln. Durch die Umströmung eines zylindrischen Fundamentes ist die Mischung zwischen der strömenden Salzwasserschicht und der ruhenden Frischwasserschicht nur leicht (ca. 1%) gegenüber der natürlichen Mischung beider Schichten erhöht [1], [6], [8], [9].

Aus den Ergebnissen der experimentellen und numerischen Untersuchungen lässt sich für ein zylindrisches Bauwerk in einer dichtegeschichteten Strömung eine Strömungstopologie ableiten (Abb. 9) [6], [9]:

- Die dominante Strömungsstruktur ist ein gegenläufiges Längswirbelpaar, das keinen bedeutenden Einfluss auf die Mischung der strömenden Salzwasserschicht mit der ruhenden Frischwasserschicht hat.
- Die Grenzschicht am Gewässerboden rollt sich vor dem Zylinder auf und bildet einen Hufeisenwirbel, der keinen Beitrag zur Mischung leistet.
- Gleiches geschieht an der Unterseite der Mischungsschicht. Hier rollt sich die freie Scherschicht zwischen Salz- und Frischwasserschicht auf und bildet einen Hufeisenwirbel, dessen Drehrichtung entgegen der des bodennahen Hufeisenwirbels ist. Auf die

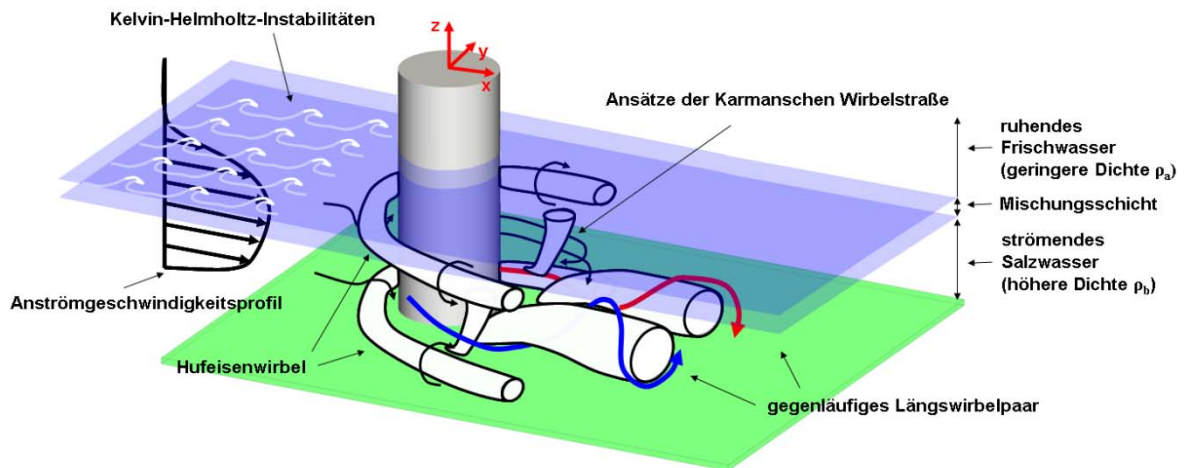


Abb. 9: Strömungstopologie (schematisch)

Mischung wirkt sich dieser Hufeisenwirbel an der Unterseite der Mischungsschicht kaum aus.

- d) Hinter dem Zylinder sind Fragmente der Kármánschen Wirbelstraße zu finden, die sich ebenfalls kaum auf die Mischung auswirken.
- e) Die Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten in der freien Scherschicht zwischen strömender Salzwasserschicht und ruhende Frischwasserschicht (Mischungsschicht) liefern den überwiegenden Beitrag zur Mischung dieser beiden Schichten.

Die Untersuchung einer dichtegeschichteten Strömung um einen Kreiszyylinder ist für das Laborexperiment und für die numerische Simulation eine Herausforderung. Im Laborexperiment sind die technischen Grenzen des Messsystems sowie Probleme, die durch den räumlich und zeitlich veränderlichen Brechungsindex in der Mischungsschicht entstehen, zu meistern. In der numerischen Simulation sind die vorhandenen Rechenkapazitäten in Form von geeigneten Rechengittern und sinnvoll eingesetzten Turbulenzmodellen zu nutzen. Besonders in der experimentellen und numerischen Bestimmung der Schwankungsgrößen zeigt sich diese Herausforderung. Die Ergebnisse von Laborexperiment und numerischer Simulation zeigen in vielen bestimmten Größen und Bereichen eine gute Übereinstimmung und ergänzen sich gegenseitig.

Hinweis auf Zuwendungsgeber:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Quantifizierung von Wassermassentransformationsprozessen in der Arkonasee – Einfluss von Offshore-Windkraftanlagen, Teilprojekt: Fließexperimente“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 0329957A gefördert. Die Autoren bedanken sich beim BMU für die Förderung des Projektes.

Literatur

- [1] Burchard, H.; Leder, A.; Markofsky, M.; Hofmeister, R.; Hüttmann, F.; Lass, H.U.; Melskotte, J.-E.; Menzel, P.; Mohrholz, V.; Rennau, H.; Schimmels, S.; Szewczyk, A.; Umlauf, L. (2010), Quantification of Water Mass Transformations in the Arkona Sea – Impact of Offshore Wind Farms: QuantAS-Off – Final Report, submitted to the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Warnemünde, Rostock & Hannover
- [2] Fernando, H. J. S., 1991. Turbulent mixing in stratified fluids. Annual Review of Fluid Mechanics 23, 455–493.

- [3] Hogg, A.McC., Ivey, G.N. (2003), The Kelvin-Helmholtz to Holmboe instability transition in stratified exchange flows, *J. Fluid Mech.* (2003), vol. 477, pp. 339–362, DOI: 10.1017/S0022112002003397
- [4] Holmboe, J. 1962 On the behaviour of symmetric waves in stratified shear layers. *Geophys. Publ.* 24 (2), 67–113.
- [5] Melskotte, J.-E. (2007); Numerische Simulation einer geschichteten Zweiphasenstömung, Projektarbeit, Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Rostock, November 2007
- [6] Menzel, P. (2009), Turbulente Mischungsvorgänge im Nachlauf einer dichtegeschichteten Zylinderumströmung, Dissertation, Universität Rostock, Menzel-Verlag Kühlungsborn, ISBN 978-3-9813444-0-0
- [7] Menzel, P.; Hüttmann F.; Leder, A. (2007), PLIF/PIV-Untersuchung der turbulenten Mischung in geschichteter Strömung hinter einem Kreiszyylinder in Leder, A.; Brede, M.; Hüttmann, F.; Ruck, B.; Dopheide, D. (Hrsg.), *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 15. Fachtagung der GALA e.V. 2007*, GALA e.V., Universität Rostock, S 28.1-28.8
- [8] Menzel, P.; Hüttmann F.; Leder, A. (2008), PLIF/PIV- sowie Stereo-PIV-Untersuchung der Mischung in einer geschichteten Salzwasserströmung im Nachlauf eines Zylinders, in Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D. (Hrsg.), *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 16. Fachtagung der GALA e.V. 2008*, GALA e.V., Universität Karlsruhe, S 16.1-16.8
- [9] Menzel, P.; Hüttmann F.; Leder, A. (2009), Untersuchungen zur Mischung im Nachlauf eines Zylinders in dichtegeschichteten Scherströmungen, in Delgado, A.; Rauh, C.; Lienhart, H.; Ruck, B.; Leder, A.; Dopheide, D. (Hrsg.), *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 17. Fachtagung der GALA e.V. 2009*, GALA e.V., Universität Erlangen-Nürnberg, S 17.1-17.8
- [10] Menzel, P.; Hüttmann, F.; Brede, M.; and Leder, A. (2007), Experimental Investigations of Mixing-Processes in The Wake of A Circular Cylinder in Stratified Flows, *AIP Conf. Proc.* 914, 122
- [11] Menzel, P.; Richter F.; Leder, A. (2006), Schichtkanal zur Untersuchung von Mischungsvorgängen in geschichteten Strömungen hinter einem Kreiszyylinder mittels PIV/PLIF in Dopheide, D.; Müller, H.; Strunck, V.; Ruck, B.; Leder, A. (Hrsg.), *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 14. Fachtagung der GALA e.V. 2006*, GALA e.V., PTB Braunschweig, S 55.1-55.8
- [12] Schimmels, S. (2007); Numerical Simulation of the Influence of Circular Cylinders on Mixing and Entrainment in Natural Density Currents; Dissertation; Universität Hannover, Hannover
- [13] Strang, E.J., Fernando, H.J.S. (2001); Entrainment and mixing in stratified shear flows; *J. Fluid Mech.*, vol. 428, pp. 349-386.
- [14] Turner, J. S. (1986), Turbulent entrainment: The development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows, *Journal of Fluid Mechanics* 173, 431–471