

UNTERSUCHUNGEN ZUR MISCHUNG IM NACHLAUF EINES ZYLINDERS IN DICHTEGESCHICHTETEN SCHERSTRÖMUNGEN

INVESTIGATION OF MIXING IN THE WAKE OF A CIRCULAR CYLINDER IN STRATIFIED SHEAR FLOWS

P. Menzel, F. Hüttmann, A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik
Albert-Einstein-Str. 2, 18051 Rostock

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

Zusammenfassung

Zur Quantifizierung des Einflusses der Fundamente von Offshore-Windkraftanlagen auf den geschichteten Einstrom sauerstoffreichen Salzwassers der Nordsee in die Ostsee ist es notwendig, die durch diese Bauwerke verursachte zusätzliche Vermischung der beiden Wasserschichten zu untersuchen. Hierzu wurden die Strömungsverhältnisse der Ostsee in einem Kanal für geschichtete Strömungen im Labor nachgebildet. Im Rahmen mehrerer Messreihen wurden verschiedene Geschwindigkeitsprofile sowie densimetrische Froudezahlen eingestellt und untersucht. Aus den so bestimmten Größen zur Beschreibung und Quantifizierung der Mischung zwischen beiden Wasserschichten sowie deren Antrieb werden die für deren Beschreibung entscheidenden Größen ausgewählt betrachtet. Mittels numerischer Simulationen und experimenteller Untersuchungen kann die zusätzlich infolge der Zylinderumströmung auftretende Mischung in der Größenordnung von 1% quantifiziert werden.

Einleitung

Zur Validierung des Einflusses der Fundamente von Offshore-Windenergieanlagen auf den geschichteten Einstrom von Salzwasser aus der Nordsee in die Ostsee, wurden am Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock Laborversuche im Größenmaßstab 1:100 durchgeführt. Dabei wurde die geschichtete Umströmung eines Fundamentmodells hinsichtlich der Mischung zwischen Frisch- und Salzwasser mittels PLIF/PIV sowie Stereo-PIV untersucht. Der Aufbau sowie die verwendete Messtechnik sind in Menzel et al [2006], [2007a], [2007b], [2008] beschrieben.

Im Folgenden sei eine Salzwasserströmung der vertikalen Ausdehnung D mit einem vertikalen Geschwindigkeitsprofil (blaue Pfeile und Linie in Abb. 1) unterhalb einer ruhenden Frischwasserschicht gegeben. Zwischen beiden Schichten stellt sich ein Geschwindigkeitsprofil ein, das gemäß der Haftbedingung, am Boden sowie in der Frischwasserschicht die Geschwindigkeit null annimmt. Neben dem Geschwindigkeitsgradienten ergibt sich ein vertikaler Gradient der Salinität (rote Linie), der nicht zwangsläufig an den Geschwindigkeitsgradienten gekoppelt ist (siehe Strang & Fernando [2001]). Infolge der Scherung zwischen beiden Schichten kommt es zu einem Impulsaustausch sowie zur Ausbildung von Scherschichtinstabilitäten (siehe Leder [1992]), die einen vertikalen Stoffaustausch verursachen können (siehe Turner [1986]). Nach Strang & Fernando [2001] sind für Gradient-Richardsonzahlen

$Ri_G < 0,39$ die asymmetrischen Kevin-Helmholtz-Instabilitäten und für $Ri_G > 1,3$ die symmetrischen Holmboe-Wellen als dominante Scherschichtinstabilitäten anzusehen. Im vorliegenden Fall wurde ein Wert von $Ri_G = 0,2$ bestimmt, womit das Auftreten von Holmboe-Wellen ausgeschlossen werden kann. Im Bereich dazwischen können beide Phänomene auftreten. Ausführliche Erläuterungen hierzu finden sich beispielsweise in Holmboe [1962], Ortiz [2002] und Hogg & Ivey [2003]. Diese Instabilitäten stellen letztendlich den Übergang von einer laminaren Scherschicht zu einer turbulenten Mischungsschicht der vertikalen Ausdehnung d_M dar und sorgen für den Eintrag von Frischwasser in den Bereich der Mischungsschicht (siehe Fernando [1991]). Im Allgemeinen wird dieser, in Abb. 1 durch grüne Pfeile dargestellte Prozess als Entrainment bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen Entrainment und Richardsonzahl wird in Fernando [1991] untersucht, wonach das Entrainment mit steigender Richardsonzahl exponentiell abnimmt. Der Zusammenhang zwischen Entrainment und densimetrischer Froudezahl wird in Schimmels [2007] eingehend beleuchtet, wonach das Entrainment mit steigender Froudezahl exponentiell zunimmt. In derselben Arbeit wird der Einfluss der Reynoldszahl auf das Entrainment und die Auftriebsproduktion numerisch untersucht. Demnach ist der Einfluss der Reynoldszahl als gering einzuschätzen, solange sich das Strömungsregime nicht grundlegend ändert. Es ist also empfehlenswert, im skalierten Laborversuch die densimetrische Froudezahl einzuhalten und ein überkritisches Ablöseverhalten am Zylinder, wie es am Original auftritt, zu erzwingen. Dies wird durch einen hohen Turbulenzgrad in der Anströmung erreicht. Der Zylinderdurchmesser wird im Folgenden mit d bezeichnet.

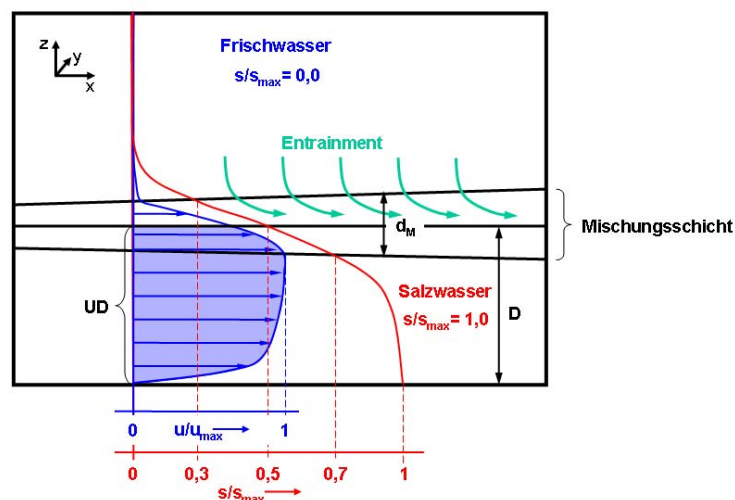


Abb. 1: Prinzipskizze einer vertikal geschichteten Salzwasserströmung. Geschwindigkeitsprofil (blau) der Salzwasserströmung unterhalb einer ruhenden Frischwasserschicht sowie Definition der charakteristischen Größen und Prozesse.

Strömungstopologie

Die in Menzel et al [2008] vorgestellten Ergebnisse der Stereo-PIV-Messungen lassen auf ein im zeitlichen Mittel dominantes, gegenläufiges Längswirbelpaar im nahen Zylindernachlauf mit einer aufwärts gerichteten Geschwindigkeitskomponente ($w > 0$) auf der Symmetrieachse ($y/d = 0$) schließen. Dieses Längswirbelpaar befindet sich innerhalb der Salzwasserschicht und bewirkt keinen direkten Stoffaustausch zwischen den beiden Wasserschichten. Da die vertikale Ausdehnung der Salzwasserströmung in der gleichen Größenordnung wie der Zylinderdurchmesser liegt, kann von einem Zylinder mit einem geringen Verhältnis von Länge zu Durchmesser, das etwa 1:1 beträgt, mit einer festen Endscheibe am Boden sowie einer durchlässigen Endscheibe im Bereich der oberen Begrenzung der Salzwasserschicht

ausgegangen werden. Demzufolge werden sich nach Sumner et al [1997] an beiden Begrenzungen hufeisenförmige Wirbelstrukturen mit gegenläufiger Drehrichtung ausbilden.

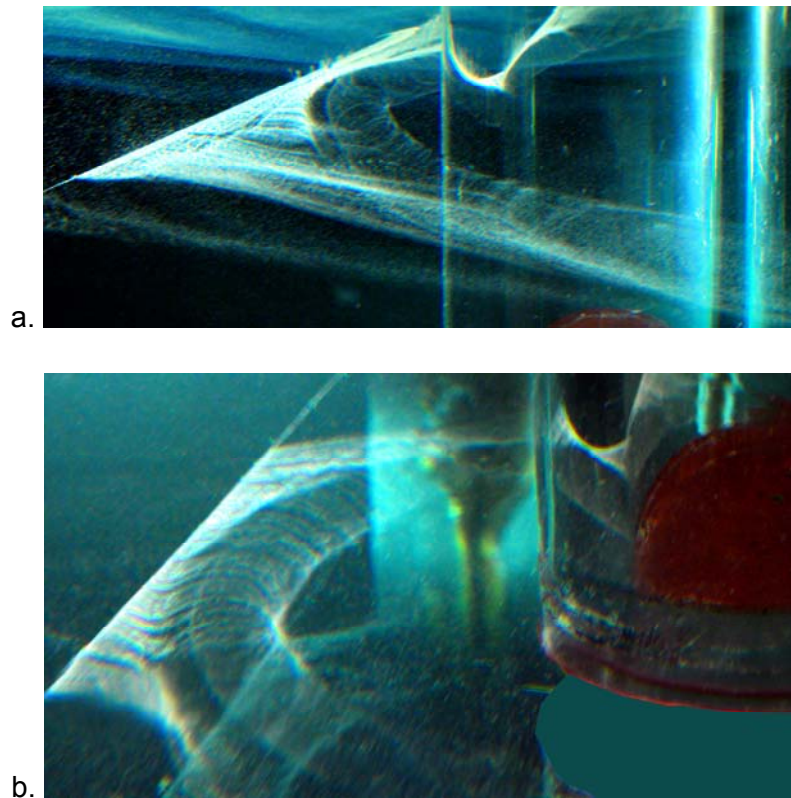


Abb. 2: Strömungssichtbarmachung mit der Wasserstoffbläschenmethode. Hufeisenwirbel im Bereich der Mischungsschicht (a) und am Boden (b)

Die Existenz der beiden Hufeisenwirbel kann durch Visualisierungsexperimente belegt werden, siehe Abb. 3. Demnach findet ein Aufrollen der Bodengrenzschicht (Abb. 3.b) sowie im Bereich der Mischungsschicht (Abb. 3.a) vor dem Zylinder statt. Weitere Erläuterungen hierzu finden sich in Hoyer [2008].

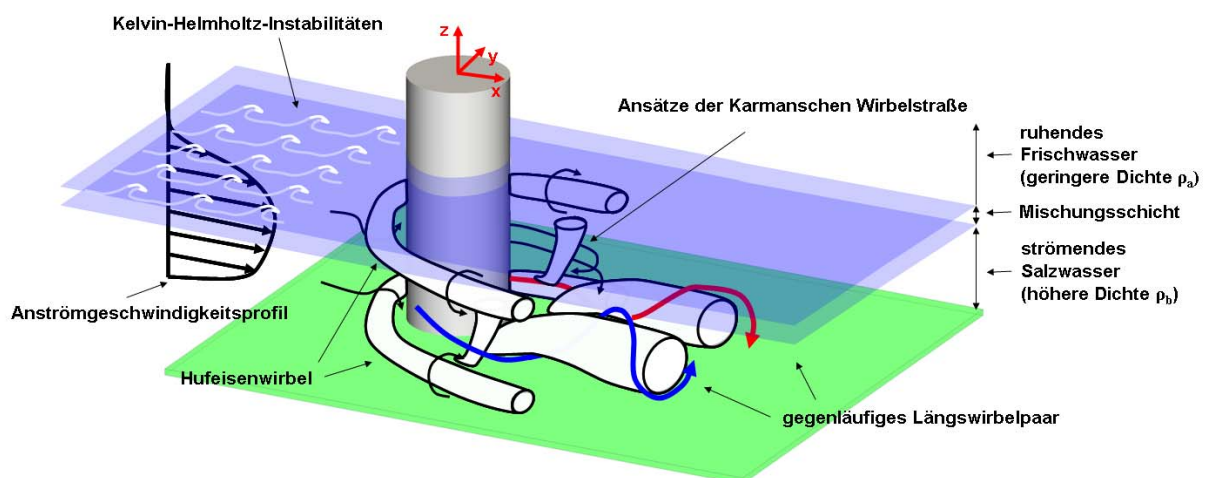


Abb. 3: Prinzipskizze der vorhandenen Strömungstopologie

Infolge des geringen Verhältnisses von Länge D zu Durchmesser d sowie der Anströmung durch ein geschertes Geschwindigkeitsprofil, ist davon auszugehen, dass die bei der Um-

strömung von Kreiszyklindern mit großer Streckung auftretende dominante, periodische Karmansche Wirbelstraße stark unterdrückt wird (siehe hierzu z.B. Sakamoto & Arie [1983] und Kappler [2002]). Zur Bewertung dessen wurden Spektralanalysen an insgesamt 9963 Messpunkten in den verschiedenen Ebenen der Stereo-PIV-Messungen durchgeführt. Dabei zeigen sich im Strouhalzahlspektrum zwar lokale Maxima im Bereich um die Strouhalzahl $Sr = 0,28$, die jedoch nicht als dominant hervortreten. Der Wert $Sr = 0,28$ ist charakteristisch für eine Zylinderumströmung mit turbulenter Grenzschichtablösung.

Ebenfalls mit Hilfe der Wasserstoffbläschenmethode sowie unter Verwendung schwarzer Tinte konnten die Ablöselinien am Zylinder bestimmt werden. Diese liegen auf der Rückseite des Zylinders bei einem Winkel von etwa 110° . Dies deutet auf eine turbulente Wandgrenzschicht hin. Angesichts der Reynoldszahl von $Re = 3400$ ist der Grund hierfür in der turbulenten Anströmung zu suchen. Dieser Umstand fördert die Vergleichbarkeit zum Originalfall ($Re = 3,4 \cdot 10^6$), bei dem von einer turbulenten Grenzschichtströmung mit einer Ablösung bei ca. 120° auszugehen ist.

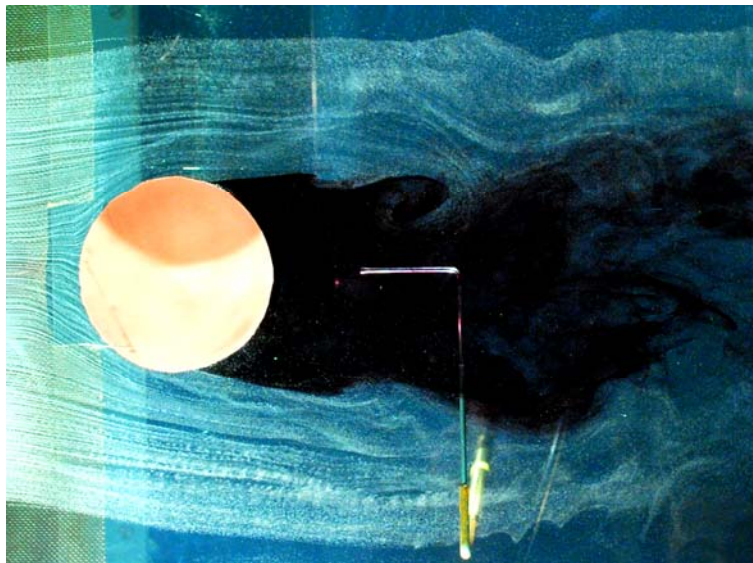


Abb. 4: Strömungssichtbarmachung mit der Wasserstoffbläschenmethode und mit schwarzer Tinte

Im Bereich der Mischungsschicht zwischen Salzwasser und Frischwasser ist nach Fernando [1991] mit Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten sowie internen Wellen und deren Brechen zu rechnen. Das Auftreten von Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten konnte mittels LIF nachgewiesen werden. Eine Prinzipskizze der charakteristischen Strömungsstrukturen für den untersuchten Fall findet sich in Abb. 3.

Versuchsaufbau zur Bestimmung des turbulenten vertikalen Transports

In Ergänzung zu den in Menzel [2008] beschriebenen Messungen auf der Mittelebene hinter dem Zylinder ($y/d = 0$) wurden Messungen in verschiedenen Ebenen von $-0,2 < y/d < 2,0$ durchgeführt. Im Gegensatz zu den bisherigen Messungen wurde hier eine Kameraanordnung „schräg von oben“ realisiert, die es ermöglicht, die Bildverschiebung infolge der Brechungsindexvariation innerhalb der Mischungsschicht zu minimieren. Diese in Abb. 5 schematisch gezeigte Anordnung erzwingt jedoch für jede Messebene eine aufwendige Bildverzerrung, ähnlich derer, wie sie auch für Stereo-PIV-Messungen notwendig ist. Diese Messungen mit einer räumlichen Auflösung von $0,8 \times 0,8 \text{ mm}^2$ eignen sich besser zur Beschreibung der turbulenten Prozesse innerhalb der Mischungsschicht als Messungen mit einem Beobachtungswinkel orthogonal zur Messebene.

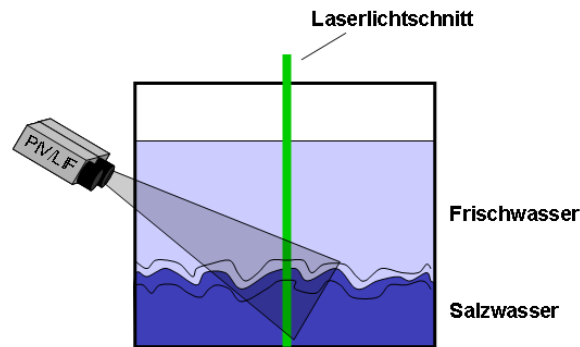


Abb. 5: Anordnung der Kameras „schräg von oben“ Dieser Aufbau erlaubt einen minimalen Einfluss der Brechungsindexvariation infolge des Dichtegradienten.

Quantifizierung der Mischung

Die Messungen mit der Kameraanordnung „schräg von oben“ erlauben eine quantitative Bewertung der Reynoldsflüsse im Bereich der Mischungsschicht. Hier soll im Besonderen der vertikale Reynoldsfluss $\overline{w's'}$ mit der Salinität s als turbulenter Austauschterm für Salz zwischen der Frisch- und der Salzwasserschicht betrachtet werden. Ein quantitativer Verlauf des vertikalen Reynoldsflusses auf der Mittelachse hinter dem Zylinder ($y/d = 0,0$) ist in Abb. 6 visualisiert. Deutlich ist ein Maximum im Bereich der Mischungsschicht unterhalb der 50 %-Isolinie zu erkennen. Die Minima oberhalb dieser Isolinie deuten ebenfalls auf einen turbulenten vertikalen Stofftransport, der jedoch wesentlich geringer ausfällt. Positive Reynoldsflüsse können instantan als eine Verringerung der Salinität bei gleichzeitiger Geschwindigkeitskomponente nach unten (negativ) gedeutet werden. Dies würde einem Eintrag von Frischwasser in die Salzwasserschicht entsprechen. Ein negativer Reynoldsfluss kann hier als eine instantan negative Geschwindigkeitskomponente bei steigender Salinität gedeutet werden.

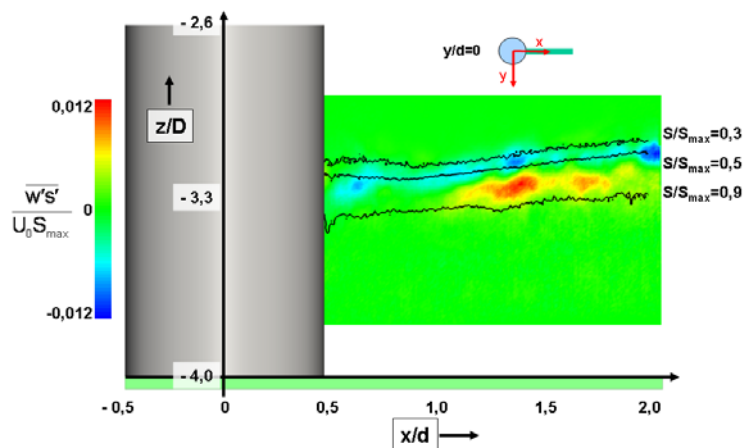


Abb. 6: Verlauf des vertikalen Reynoldsflusses als Farbkontur sowie Isolinien der Salinität bei 30 %, 50 % und 90 % des Maximalwertes bei $y/d=0$.

Die Normierung des vertikalen Reynoldsflusses auf das Produkt aus Anströmgeschwindigkeit und Salinitätsdifferenz ermöglicht somit eine Quantifizierung des turbulenten vertikalen Stofftransports mit $|\overline{w's'}/U_0s_{\max}| \approx 0,012$. Da diese Größe im Fall ohne Zylinder Werte annimmt, die um mindestens eine Größenordnung kleiner sind, kann der durch den Zylinder zusätzlich induzierte vertikale turbulente Transportgrad mit etwa 1,2 % angegeben werden. Neben dem vertikalen Reynoldsfluss wurden die lokale Mischungseffizienz

$$\gamma = \frac{\overline{w'b'}}{\varepsilon}$$

sowie die global Mischungseffizienz

$$\Gamma = \frac{\int_D \overline{w'b'} dz}{\int_D \overline{\varepsilon} dz}$$

bestimmt. Hier beschreiben ε die Dissipation turbulenter kinetischer Energie, w die Vertikal-
komponente der Strömungsgeschwindigkeit und

$$b = -g \frac{\rho(z) - \rho_0}{\rho_0}$$

den Auftrieb der Strömung mit der Gravitationsbeschleunigung g und der Dichte ρ .

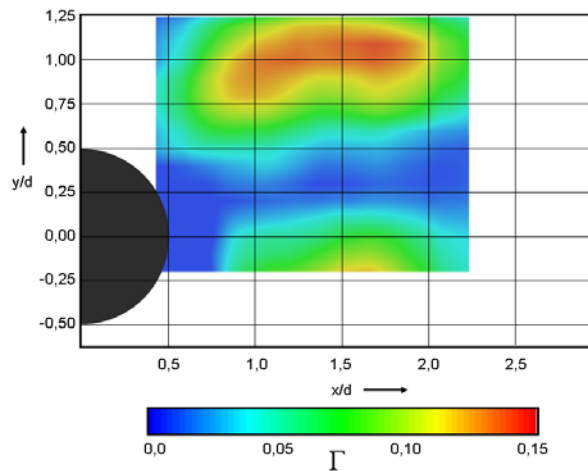


Abb. 7: Verlauf der globalen Mischungseffizienz.

Abb. 7 zeigt den Verlauf der globalen Mischungseffizienz im nahen Zylindernachlauf. Es treten dominante Maxima bei $y/d = \pm 1,0$ sowie ein kleines Maximum bei $y/d = 0,0$ auf. Gemäß Definition der globalen Mischungseffizienz ist demnach zu erwarten, dass etwa 15 % der dissipierten turbulenten kinetischen Energie zur vertikalen Vermischung beitragen. Die lokale Mischungseffizienz (siehe Abb. 8) konzentriert das Maximum mit $\gamma = 0,6$ in einem Bereich geringer räumlicher Ausdehnung in der Mitte hinter dem Zylinder in der Region der Mischungsschicht. Zwei weitere, schwächer ausgeprägte Maxima sind in größeren Bereichen der Mischungsschicht um $y/d = 1,0$ zu beobachten. Im Bereich der ungestörten Mischungsschicht liegen die Maximalwerte der lokalen Mischungseffizienz um $\gamma = 0,2$ und die Maximalwerte der globalen Mischungseffizienz bei $\Gamma = 0,05$. Im Fall ohne Zylinder werden Werte gemessen, die um jeweils mindestens eine Größenordnung kleiner sind. Die globale Mischungseffizienz ist mit der vertikal über die Salzwasserschicht integrierten Fluss-Richardsonzahl

$$Ri_{F_b} = \frac{\int_D \overline{w'b'} dz}{\int_D \overline{P} dz}$$

vergleichbar, wenn man davon ausgeht, dass Dissipation und Produktion P etwa in der gleichen Größenordnung liegen. In Schimmels [2007] werden hierfür Maximalwerte aus RANS-Rechnungen von $Ri_{F_b} = 0,18$ für den Originalfall (Ostseemaßstab) bei gleicher densimetrischer Froudezahl angegeben. Für die Auftriebsproduktion finden sich in derselben Arbeit Maximalwerte von etwa $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$.

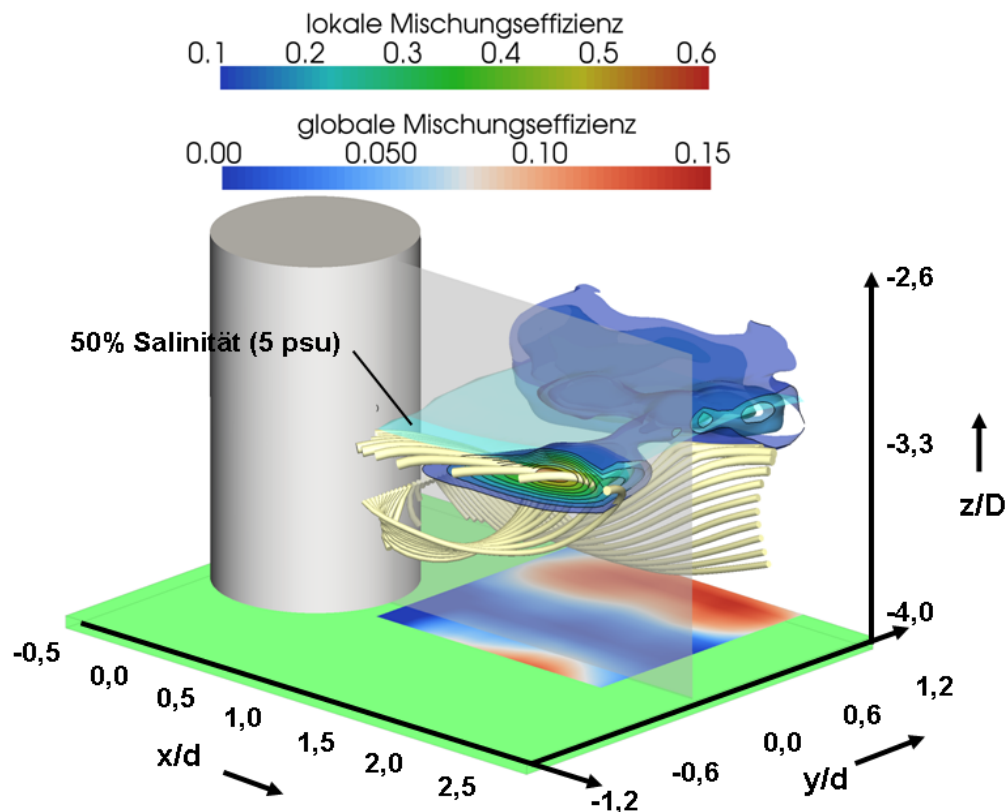


Abb. 8: Verlauf der globalen Mischungseffizienz auf dem Boden dargestellt. Verlauf der lokalen Mischungseffizienz als Isoflächen. Türkise Isofläche der Salinität sowie beige Stromlinien. Symmetrieebene bei $y/d = 0$ als transparente, graue Fläche.

Zusammenfassung

Unter Einhaltung der densimetrischen Froudezahl wurden PLIF/PIV-, sowie Stereo-Messungen in einer geschichteten Salwasserströmung als Modell für den Einstrom sauerstoffreichen Salzwassers aus der Nordsee in die Ostsee durchgeführt. Mit Hilfe von Stereo-PIV-Messung und Strömungssichtbarmachungen mittels Wasserstoffbläschen konnte ein Modell der Strömungstopologie geschaffen werden. Die Lage der Ablöswinkel deutet auf ein dem Originalfall ähnliches Nachlaufgebiet hin. Die in Menzel [2008] vorgestellten Ergebnisse zur Mischung konnten durch eine neue Versuchsanordnung (Kameras schräg von oben) und die daraus gewonnenen zusätzlichen Ergebnisse bestärkt werden. Demnach kann die Mischung mit 0,012 quantifiziert werden. Dies bedeutet, dass der Salzwasserstrom um

1,2 % Frischwasser, bezogen auf den Anström-Volumenstrom $\left(\dot{V}_0 = \int_{\text{Boden}}^{z=D} d \cdot D \cdot u(z) dz \right)$ angereichert wird.

Dankesworte

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

- Fernando, H. J. S., 1991. Turbulent mixing in stratified fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics* 23, 455–493.
- 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
- Holmboe, J. 1962 On the behaviour of symmetric waves in stratified shear layers. *Geophys. Publ.* 24 (2), 67–113.
- Hoyer, H. (2008); Froudezahlabhängigkeit der Mischung im Nachlauf eines Zylinders in geschichteter Meerwasserströmung, Projektarbeit, Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Rostock, November 2008
- Kappler, M. (2002); Experimentelle Untersuchung der Umströmung von Kreiszyklindern mit ausgeprägt dreidimensionalen Effekten, Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe
- Leder, A. (1992), Abgelöste Strömungen: Physikalische Grundlagen, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, ISBN 3-528-06436-6
- Menzel, P.; Richter F.; Leder, A. (2006), Schichtkanal zur Untersuchung von Mischungsvorgängen in geschichteten Strömungen hinter einem Kreiszyklinder 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
- Menzel, P.; Hüttmann F.; Leder, A. (2007a), PLIF/PIV-Untersuchung der turbulenten Mischung in geschichteter Strömung hinter einem Kreiszyklinder 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
- Menzel, P.; Hüttmann, F.; Brede, M.; and Leder, A. (2007b), Experimental Investigations of Mixing-Processes in The Wake of A Circular Cylinder in Stratified Flows, *AIP Conf. Proc.* 914, 122
- 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
- Ortiz, S., Chomaz, J.-M., Loiseleux, T. (2002), Spatial Holmboe instability, *Phys. of. Fluids*, Volume 14, Number 8, p. 2585-2597, American Institute of Physics, DOI: 10.1063/1.1485078
- Sakamoto H, Arie M (1983) Vortex shedding from a rectangular prism and circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer. *J Fluid Mech* 126:147–165
- Schimmels, S. (2007); Numerical Simulation of the Influence of Circular Cylinders on Mixing and Entrainment in Natural Density Currents; Dissertation; Universität Hannover, Hannover
- Strang, E.J., Fernando, H.J.S. (2001); Entrainment and mixing in stratified shear flows; *J. Fluid Mech.*, vol. 428, pp. 349-386.
- Sumner, B.M., Christiansen, M., Fredsoe, J (1997); The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves, *Journal of Fluid Mechanics* 332, 41–70.
- 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