

## 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



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

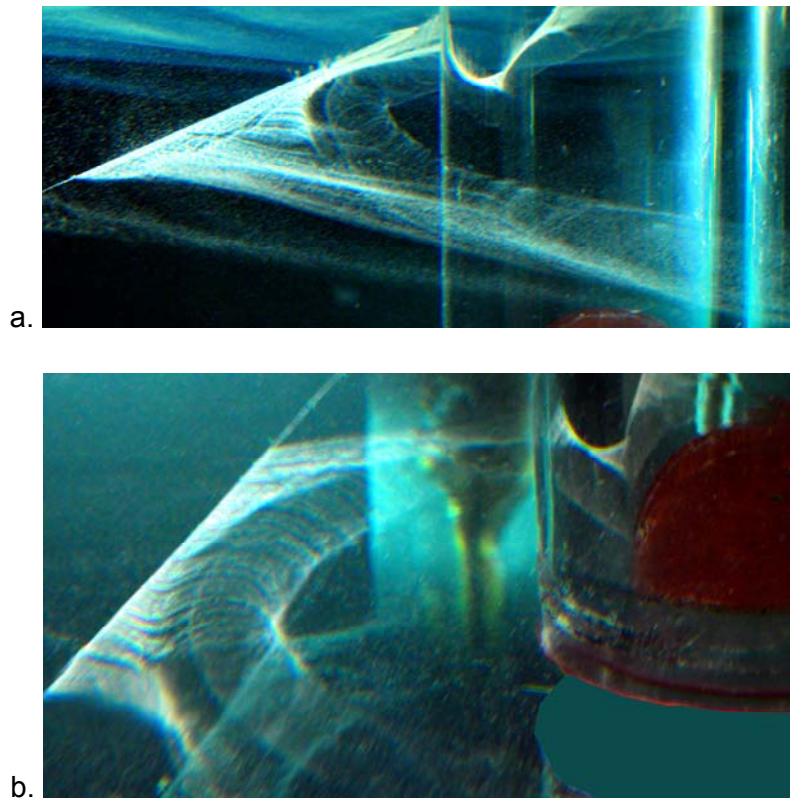


Abb. 2: Strömungssichtbarmachung mit der Wasserstoffbläschenmethode. Hufeisenwirbel im Bereich der Mischungsschicht (a) und am Boden (b)

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].

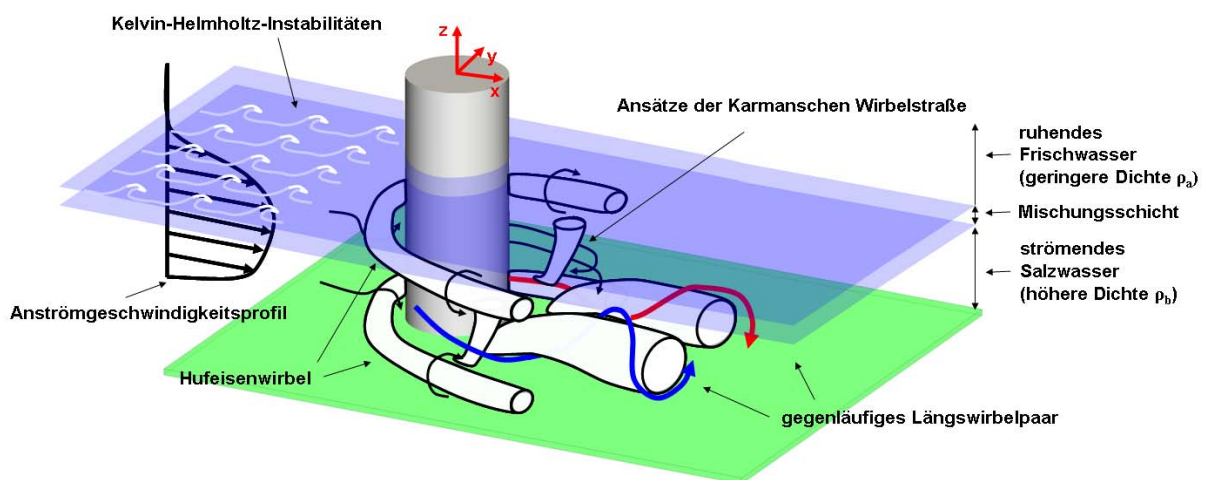


Abb. 3: Prinzipskizze der vorhandenen Strömungstopologie

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-



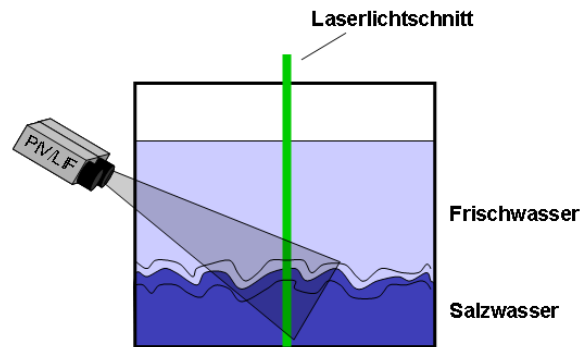


Abb. 5: Anordnung der Kameras „schräg von oben“ Dieser Aufbau erlaubt einen minimalen Einfluss der Brechungsindexvariation infolge des Dichtegradienten.

### 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.

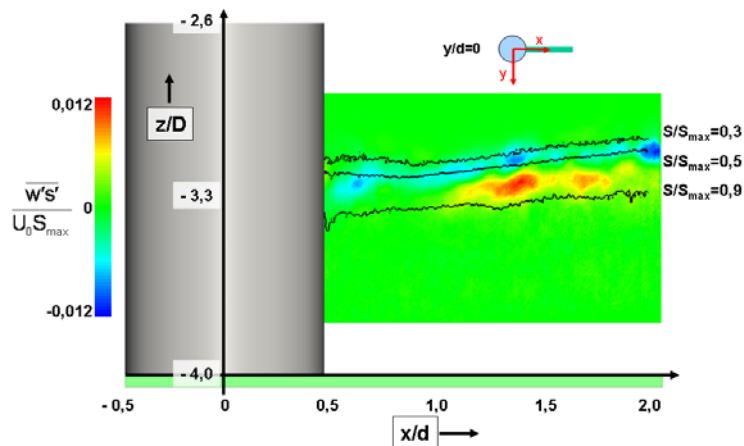


Abb. 6: Verlauf des vertikalen Reynoldsflusses als Farbkontur sowie Isolinien der Salinität bei 30 %, 50 % und 90 % des Maximalwertes bei  $y/d=0$ .

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



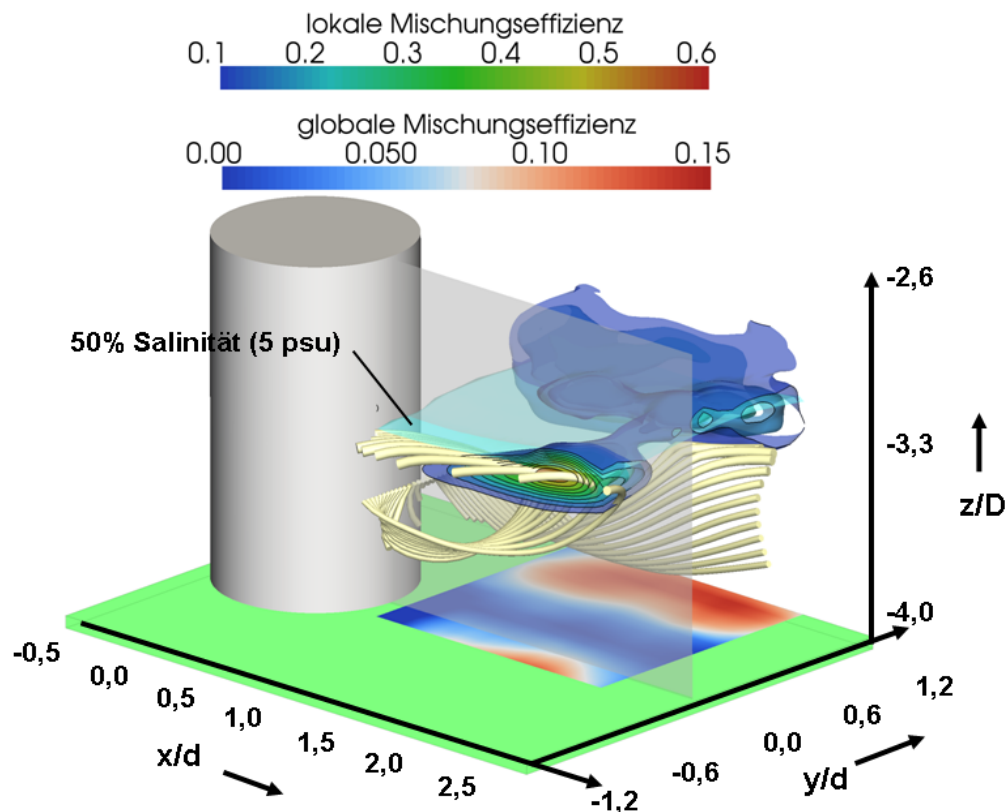


Abb. 8: Verlauf der globalen Mischungseffizienz auf dem Boden dargestellt. Verlauf der lokalen Mischungseffizienz als Isoflächen. Türkise Isofläche der Salinität sowie beige Stromlinien. Symmetrieebene bei  $y/d = 0$  als transparente, graue Fläche.

## 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.

