

## **PLIF/PIV- SOWIE STEREO-PIV-UNTERSUCHUNG DER MISCHUNG IN EINER GESCHICHTETEN SALZWASSERSTRÖMUNG IM NACHLAUF EINES KREISZYLINDERS**

### **PLIF/PIV- AND STEREO-PIV-STUDIES OF THE MIXING IN A STRATIFIED SALTWATER-FLOW IN THE WAKE OF A CIRCULAR CYLINDER**

**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 vorerst ein naturähnliches Geschwindigkeitsprofil sowie die in der Natur beobachtete densimetrische Froude-Zahlen eingestellt und untersucht. Die turbulenten Mischungsvorgänge wurden dabei mittels laserinduzierter Fluoreszenz (PLIF) und PIV sowie Stereo-PIV untersucht. Aus den so gemessenen Größen zur Beschreibung und Quantifizierung der Mischung zwischen beiden Wasserschichten sowie deren Antriebs werden die für deren Beschreibung entscheidenden Größen ausgewählt betrachtet. Eine Quantifizierung der Mischung unter den verschiedenen Randbedingungen wird durchgeführt.

#### **Einleitung**

Das Vorhandensein sauerstoffreichen Salzwassers in den tieferen Becken der Ostsee ist hauptsächlich auf den Einstrom von Wasser aus der Nordsee in die Ostsee zurückzuführen [Matthäus 1992]. Dieser Einstrom erfolgt je nach Wetterlage in unregelmäßigen Zeitabständen mehrmals im Jahr [Burchard et al 2005]. Dabei strömt vor allem im Winter sehr sauerstoffreiches Salzwasser der Nordsee unter anderem über die Drogden-Schwelle in das Arkona-Becken (Abb. 1:). Aufgrund seiner höheren Dichte fließt das salzhaltige Wasser am Meeresboden unterhalb des Brackwassers der Ostsee. Dieser sehr stabil geschichtete Einstrom setzt sich bis in die tieferen Becken der Ostsee fort. Dort hat das sehr salzhaltige Wasser infolge seines hohen Sauerstoffgehaltes entscheidenden Einfluss auf das bestehende Ökosystem.

Im Rahmen des Verbundprojekts QuantAS-Off (Quantification of Water Mass Transformations in the Arkona Sea: Impact of Offshore Wind Farms) soll der Einfluss der Fundamente von Offshore Windenergieanlagen auf die Stabilität des Salzwassereinstroms in die Ostsee quantifiziert werden. Hierzu wurde am Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock ein Versuchskanal zur Erzeugung geschichteter Salzwasserströmungen (siehe Abb. 2) in-

stalliert. Details zum Versuchskanal sind in [Menzel et al 2006] sowie [Menzel et al 2007b] nachzulesen.

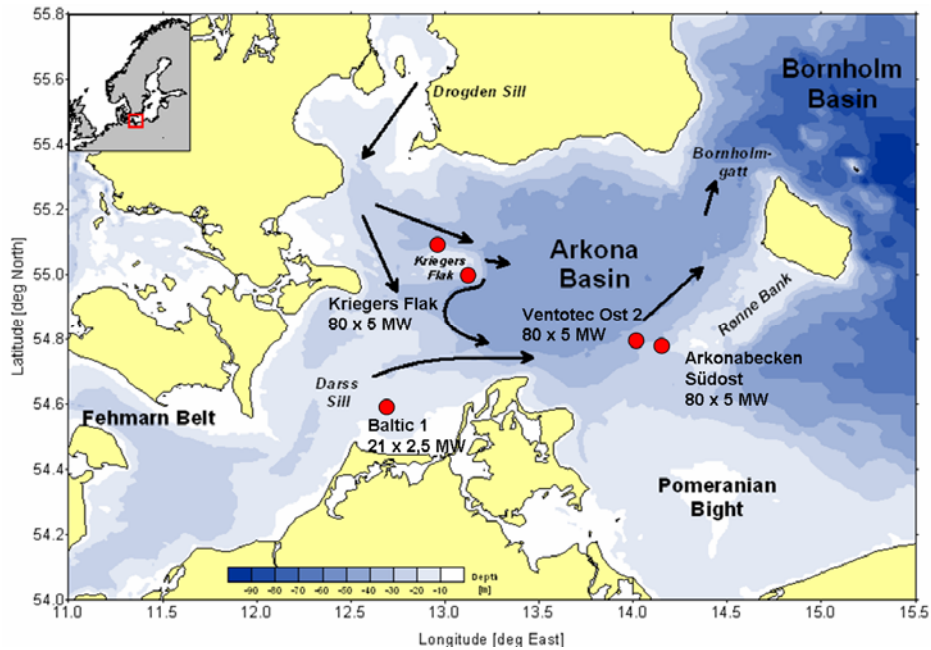


Abb. 1: Einstromvorgänge von der Nordsee in die Ostsee und genehmigte Offshore-Windparkprojekte.

Als charakteristische Kennzahl wurde bei der Skalierung von der Natur in das Laborexperiment die densimetrische Froudezahl

$$Fr_d = \frac{U_\infty}{\sqrt{gD \frac{\rho_b - \rho_a}{\rho_b}}} = 0,5$$

eingehalten. Hierbei beschreiben  $\rho_a$  die Dichte des ruhenden Frischwassers und  $\rho_b$  die Dichte des einströmenden Salzwassers. Die vertikale Ausdehnung der Salzwasserschicht wird mit  $D$  bezeichnet. Die Reynoldszahl ergibt sich als

$$Re = \frac{U_\infty d}{\nu} = 3400$$

mit dem Zylinderdurchmesser  $d$ . Weitere Randbedingungen während der Messungen sind in [Menzel et al 2007a] nachzusehen.

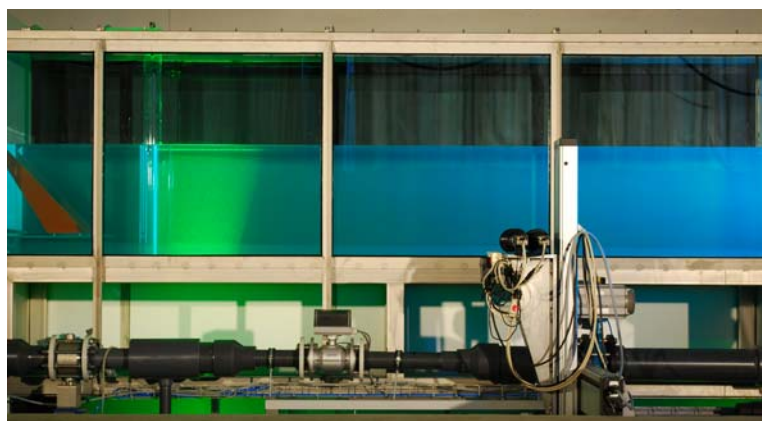


Abb. 2: Messstrecke des Kanals für geschichtete Strömungen mit Laserlichtschnitt und Zylinder. Im Vordergrund die PIV- sowie LIF-Kamera auf der Traverse.

## Messtechnik und Versuchsanordnung

Zur Untersuchung der turbulenten Mischungsvorgänge im Nachlauf eines Zylinders in einer geschichteten Salzwasserströmung wurde ein PLIF/PIV-Messsystem eingesetzt. Dieses System ermöglicht gleichzeitige Messungen von 2 Geschwindigkeitskomponenten sowie der Konzentration bei einer zeitlichen Auflösung von 15Hz. Im Rahmen der PLIF/PIV-Messungen wurden jeweils 1000 PIV- und LIF-Bilder aufgenommen. Neben diesen Messungen wurden in einer zweiten Messkampagne Stereo-PIV-Messungen bei einer zeitlichen Auflösung von 10 Hz durchgeführt.

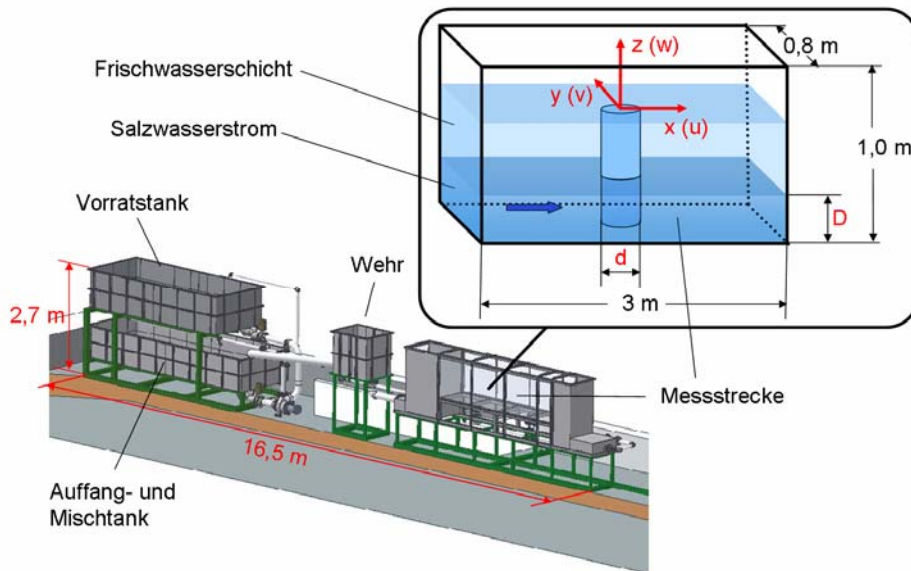


Abb. 3: Kanal für geschichtete Strömungen und verwendetes Koordinatensystem

Als Referenz für die ungestörte Strömung fanden auch Messungen ohne den Zylinder als Modell für ein Offshore-Windenergieanlagen-Fundament statt. Eine Zeichnung des Versuchskanals sowie das verwendete Koordinatensystem sind Abb. 3 zu entnehmen. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die Positionen der Messebenen.

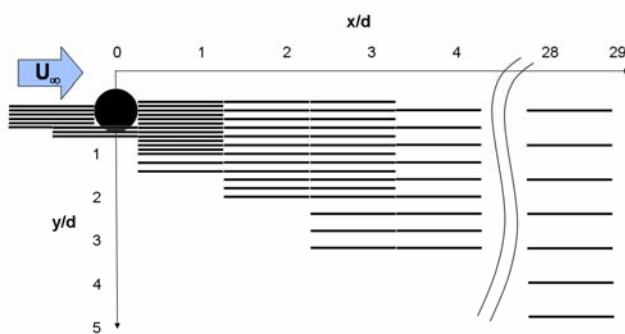


Abb. 4: Messebenen der PLIF/PIV-Messungen

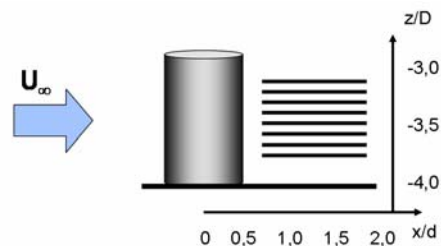


Abb. 5: Messebenen der Stereo-PIV-Messungen

## Quantifizierung der Mischung

Zur ersten Abschätzung des Zylindereinflusses auf den Salzwasserstrom wurde die vertikale Position der Mischungsschicht an den Stellen  $y/d=0$  und  $0 < x/d < 28$  bestimmt. Hierzu wurde

der Ort detektiert, an dem die Salinität 50% ihres Maximalwertes (10 psu) annimmt. Abb. 6 verdeutlicht durch den waagerechten Verlauf der ungestörten Mischungsschicht (rot), dass die Versuchsanlage sehr gut für diese Messungen geeignet ist und keine versuchsbedingte Ausdehnung der Salzwasserschicht auftritt. Des Weiteren ist der Einfluss des Zylinders im Bereich  $0,8 < x/d = 3,0$  in Form eines Absinkens der Mischungsschicht erkennbar. Im Fernfeld hinter dem Zylinder ( $x/d > 20$ ) ist jedoch kein Einfluss dieser Störung mehr nachweisbar.

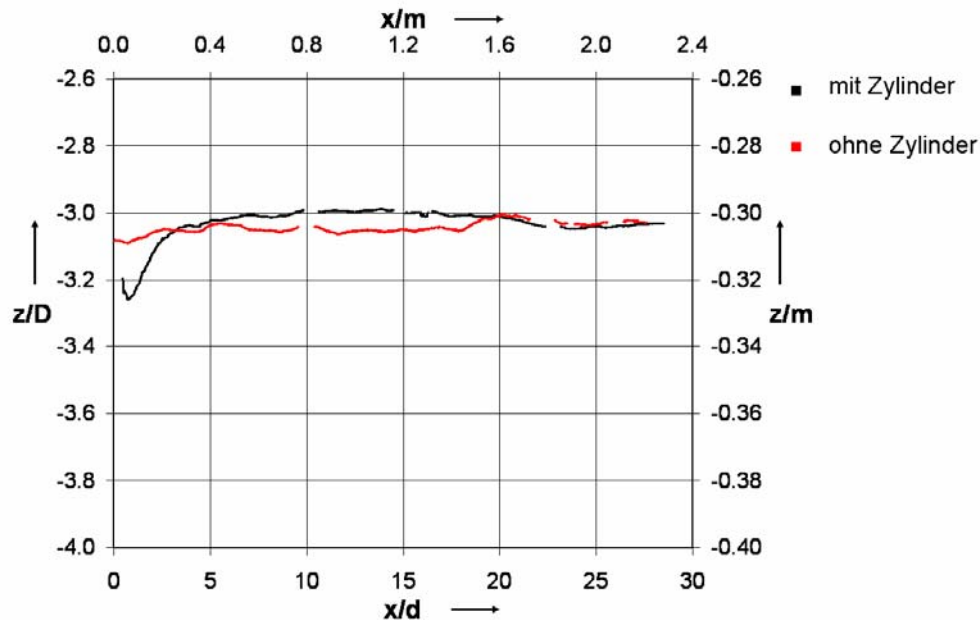


Abb. 6: Vertikale Position der Mischungsschicht mit und ohne Zylinder

Zur Quantifizierung der durch den Zylinder zusätzlich hervorgerufenen Mischung kann die Entrainmentgeschwindigkeit

$$w_E = \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial UD}{\partial x} + \frac{\partial VD}{\partial y}$$

herangezogen werden. Hierbei beschreibt D die vertikale Ausdehnung der Salzwasserschicht vom Boden bis zu der Position, an der die Salinität auf 50% ihres Maximalwertes zurückgegangen ist. U und V beschreiben die mittleren Geschwindigkeiten innerhalb der Salzwasserschicht. Da es sich im Versuch im Mittel um eine zur y-z-Ebene bei  $y/d=0$  symmetrische Umströmung des Zylinders handelt, verschwindet der mittels der PLIF/PIV-Anordnung nicht messbare letzte Term der Gleichung. Die Entrainmentgeschwindigkeit ergibt sich somit als

$$w_E = \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial UD}{\partial x}$$

Die Entrainmentgeschwindigkeit im nahen Zylindernachlauf ist Abb. 7 zu entnehmen. Deutlich sind starke Minima und Maxima im Bereich  $x/d=1,5$  und im Bereich vor und hinter der Ablöselinie zu erkennen. Bei  $x/d=6$  geht die Entrainmentgeschwindigkeit gegen null.

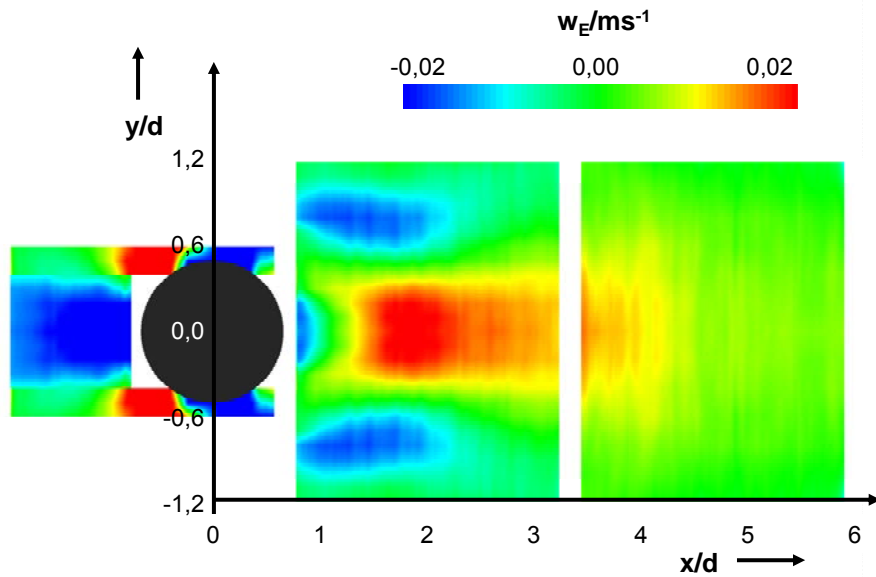


Abb. 7: Mittels PLIF/PIV gemessene Entrainmentgeschwindigkeit

Das Integral über den dargestellten Bereich ergibt eine im Folgenden als Entrainmentstrom bezeichnete Größe mit den Eigenschaften eines Volumenstroms. Der Entrainmentstrom ergibt sich mit  $\dot{V}_{w_E} = 1,25 \text{ l/min}$ . Bezogen auf den Anström-Volumenstrom im Bereich  $-1,2 < y/d < 1,2$  ergibt sich eine Entrainmentstromrate  $\dot{V}_E = 2,2 \%$ .

Alternativ zur Entrainmentstromrate wurde die Mischung in großer Entfernung vom Zylinder ( $x/d=20$ ) über den Ansatz

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_{20} &= \mathbf{M}_{x/d=20} \\
 \mathbf{M}_{20} &= \frac{\left[ \dot{V}_{mZ, x/d=20} \right]_{\substack{S/S_{\max}=0,7 \\ S/S_{\max}=0,3}} - \left[ \dot{V}_{oZ, x/d=20} \right]_{\substack{S/S_{\max}=0,7 \\ S/S_{\max}=0,3}}}{\dot{V}_0} \\
 \mathbf{M}_{20} &= \frac{\int_{y/d=-0,5}^{y/d=0,5} \int_{z(S/S_{\max}=0,3)}^{z(S/S_{\max}=0,7)} dydz \{ \mathbf{u}_{mZ, x/d=20} \} - \int_{y/d=-0,5}^{y/d=0,5} \int_{z(S/S_{\max}=0,3)}^{z(S/S_{\max}=0,7)} dydz \{ \mathbf{u}_{oZ, x/d=20} \}}{\int_{y/d=-0,5}^{y/d=0,5} \int_{z/D=-4}^{z(S/S_{\max}=0,5)} dydz \{ \mathbf{u}_0 \}} \quad [1]
 \end{aligned}$$

bestimmt. Hierbei bezeichnet S die mittels PLIF in x-z-Ebenen gemessene Salinität,  $\mathbf{u}_0$  die Anströmgeschwindigkeit und die Indize „mZ“ sowie „oZ“ die Messungen mit bzw. ohne Zylinder. Bei diesem Ansatz wird die durch den Zylinder hervorgerufene Änderung des Volumenstroms innerhalb der Mischungsschicht bestimmt und auf den Anström-Volumenstrom des Zylinders bezogen. Zur Verdeutlichung dieser Größe im Folgenden ein Beispiel. Unter den Annahmen, dass der Abstand zwischen der 30%- und 70%-Linie im Fernfeld hinter dem Zylinder gegenüber dem Fall ohne Zylinder um 1 mm zunimmt und die Geschwindigkeiten  $\mathbf{u}_{mz}$  und  $\mathbf{u}_{oz}$  über z konstant seien und 50% der Anströmgeschwindigkeit  $\mathbf{u}_0$  betragen, beläuft sich die so berechnete Mischung auf 0,5%. Um 1% Mischung zu erreichen muss sich der

vertikale Abstand beider Linien um etwa 2 mm vergrößern, was bereits im Rahmen der Messgenauigkeit nachweisbar wäre.

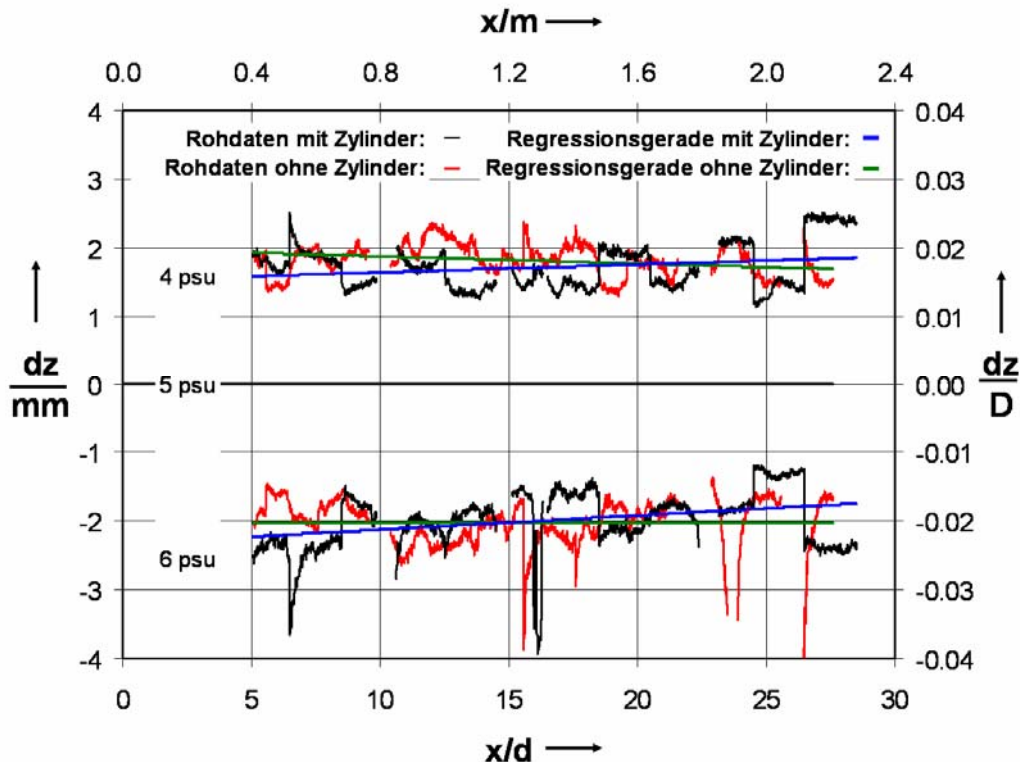


Abb. 8: Verlauf der Mischungsschicht mit und ohne Zylinder

Der Verlauf der Mischungsschicht mit der Lauflänge im Kanal ist in Abb. 8 dargestellt. Wie man deutlich erkennt unterscheiden sich die Verläufe mit Zylinder (schwarz und blau) im Rahmen der ebenfalls sichtbaren Schwankungen nicht signifikant von denen ohne Zylinder (rot, grün). Zu beachten ist hier die vertikale Ausdehnung im Bereich von etwa 4 mm. Nach Gleichung 1 ergibt sich somit eine Mischung von  $M_{20}=(1,3\pm 1,8)\%$ .

### Stereo-PIV-Messungen

Zur Charakterisierung der dreidimensionalen Strömungsstruktur im Zylindernachlauf wurden Stereo-PIV-Messungen in verschiedenen x-y-Ebenen durchgeführt (siehe Abb. 5). Unter anderem konnten großskalige Wirbelstrukturen im nahen Zylindernachlauf nachgewiesen werden. Abb. 9 gibt Aufschluss über diese großskaligen Wirbelstrukturen. Die Isoflächen der x-Komponente der Wirbelstärke sind als rote (linksdrehend) und blaue (rechtsdrehend) Flächen dargestellt und implizieren, eine aufwärts gerichtete (positive) Geschwindigkeitskomponente bei  $y/d=0$  und abwärts gerichtete Geschwindigkeitskomponenten bei  $y/d=\pm 0,5$ . Hier findet eine wirbelbehaftete Strömungsbewegung lediglich innerhalb der Salzwasserschicht statt. Zur Verdeutlichung ist die Isofläche der Salinität bei 5 psu (50% des Maximums) aufgetragen. In Zusammenhang mit den Isoflächen der Wirbelstärkekomponente  $\omega_x$  wird sichtbar, dass sich infolge dieser dominanten Wirbelstrukturen lediglich drehungsbehaftete Strömungsvorgänge in Bodennähe, also innerhalb der Salzwasserschicht, ergeben. Unter den gewählten Versuchsbedingungen, bei der densimetrischen Froudezahl  $Fr_d=0,5$ , sind demnach keine zusätzlichen Austauschprozesse zwischen Frischwasser und Salzwasser infolge großskaliger Wirbelstrukturen messbar.

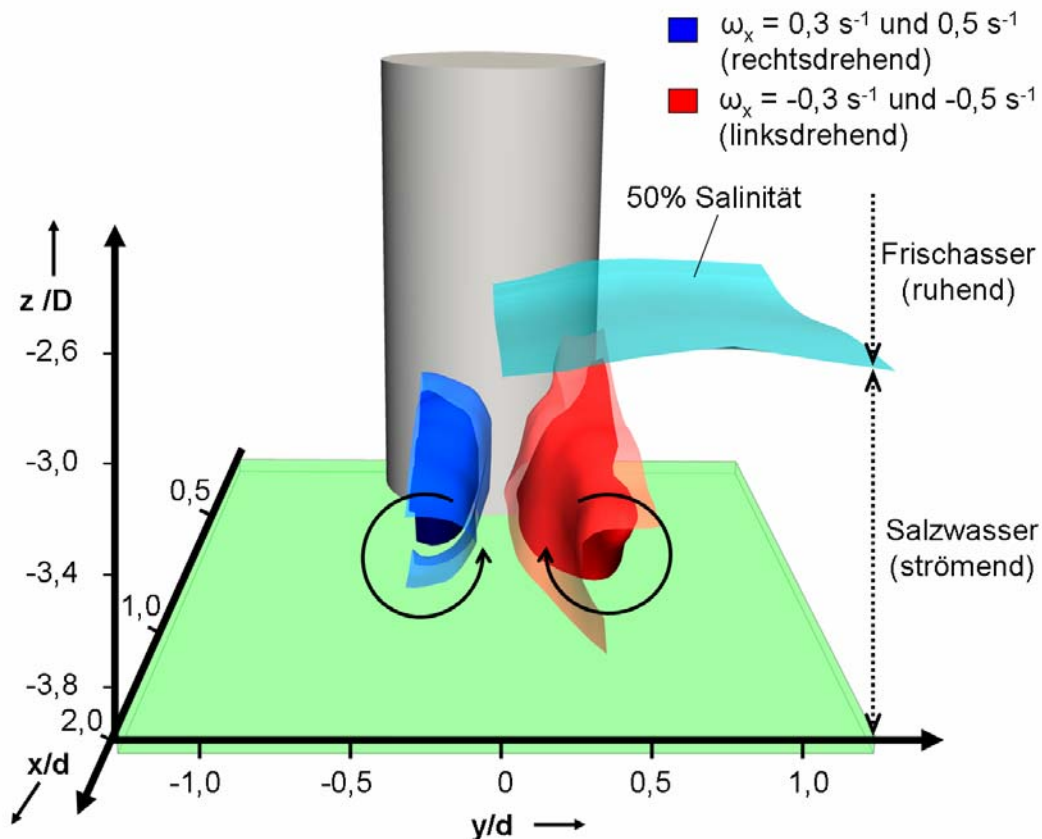


Abb. 9: Isoflächen der Salinität bei 5 psu und der x-Komponente der Wirbelstärke (rot und blau).

## Zusammenfassung

Unter Einhaltung der densimetrischen Froudezahl wurden PLIF/PIV-Messungen in einer geschichteten Salzwasserströmung als Modell für den Einstrom sauerstoffreichen Salzwassers aus der Nordsee in die Ostsee durchgeführt. Die Messungen zeigen, dass ein Einfluss des Zylinders auf die Lage der Mischungsschicht im nahen Zylindernachlauf auftritt. In großer Entfernung ist dieser Einfluss unter den gewählten Bedingungen jedoch nicht mehr nachweisbar. Der Einfluss eines Zylinders auf die Mischungsschicht wurde auf zwei Arten nachgewiesen. Die Mischung liegt im Bereich um ein bis zwei Prozent, wobei zu beachten ist, dass sich diese Werte im Bereich der erreichbaren Messgenauigkeit befinden. Die Stereo-PIV-Messungen zeigen unter den gewählten Bedingungen keine für die Mischung verantwortlichen großskaligen Wirbelstrukturen. Es bleibt zu erwarten, dass zusätzlich auftretende kleinskalige Wirbelstrukturen sowie eine Intensivierung von Scherschichtinstabilitäten für die sehr hierfür verantwortlich sind.

## 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. Bedanken möchten wir uns außerdem bei Herrn Dr. M. Brede für die fachliche Unterstützung und Herrn M. Jensch für die Verarbeitung der Stereo-PIV-Messungen.

## Literatur

Burchard, H.; Lass, H. U.; Mohrholz, V.; Umlauf, L.; Sellschopp, J.; Fiekas, V.; Bolding, K.; Arneborg, L. [2005]: **Dynamics of medium-intensity dense water plumes in the Arkona Basin, Western Baltic Sea**; submitted to Ocean Dynamics, January 2005

Matthäus, W.; and H. Frank, **Characteristics of major Baltic inflows – a statistical analysis**, Cont. Shelf Res., 12, 1375-1400, 1992

Menzel, P.; Richter F.; Leder, A. **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, 2006

Menzel, P.; Hüttmann F.; Leder, A. **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, 2007a

Menzel, Peter; Hüttmann, Frank; Brede, Martin; and Leder, Alfred **Experimental Investigations of Mixing-Processes in The Wake of A Circular Cylinder in Stratified Flows** AIP Conf. Proc. 914, 122 (2007b)