

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG ZUR AUSBREITUNG UND TRANSITION INTERNER WELLEN

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PROPAGATION AND TRANSITION OF INTERNAL WAVES

R. Büttner, M. Brede, F.-J. Lübken*, A. Leder

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

* Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik Kühlungsborn

Interne Wellen, Turbulenz, Mischung
Internal Waves, Turbulence, Mixing

Abstract

Am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Rostock werden Laborexperimente an internen Wellen im Versuchskanal für geschichtete Strömungen durchgeführt. Mittels eines zylinderförmigen Oszillators können an einem dichtegesichtetem Mehrschichtsystem monochromatische Wellen angeregt und mit einem kombinierten PIV-/LIF-System Serien instantaner Geschwindigkeits- und Konzentrationsfelder synchron gemessen werden. Die in diesem Beitrag beschriebenen Messungen untersuchen den turbulenten Übergang interner Wellen. Dazu werden monochromatische Wellenzüge angeregt, die sich entlang einer Dichteschichtung ausbreiten und auf einer geneigten Ebene auflaufen. Aufgrund der Deformation der einlaufenden Welle bilden sich Instabilitäten aus, die zum Brechen der Wellen führen und einen zusätzlichen Beitrag zur Mischung von Frisch- und Salzwasser liefern. Die dynamischen Vorgänge des Wellenbrechens werden durch Phasenmittlung charakterisiert und Turbulenz und turbulente Mischungsvorgänge können quantitativ erfasst werden.

Einleitung

Interne Wellen (IW) sind aktuell Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, da sie sowohl in der Atmosphärenphysik als auch in der Ozeanographie eine wichtige Rolle, insbesondere bei Energie- und Stofftransportprozessen (Rauthe et al. 2008, Gerding et al. 2009, Burchard et al. 2008, Ivey et al. 2008), einnehmen. Am Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock werden deshalb in einem gemeinsamen Projekt zusammen mit dem Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik Kühlungsborn und dem Leibniz-Institut für Ostseeforschung in Warnemünde Laboruntersuchungen zu IW durchgeführt, die sich der Fragestellung widmen, welchen Beitrag brechende IW zur Turbulenzentstehung leisten.

Interne Wellen stellen räumlich und zeitlich ausbreitende Oszillationen einer Dichteschichtung dar, wobei zwei Regime voneinander unterschieden werden können: Das Medium, in dem sich interne Wellen ausbreiten, kann entweder eine kontinuierliche Dichteschichtung aufweisen (die Erdatmosphäre, Ozeane) oder aus diskreten Layern unterschiedlicher Dichte bestehen (Ozeane). Da die Rückstellkraft der internen Wellen die Gravitation bzw. eine Auftriebskraft ist, können sie sich nicht in einem Medium mit konstanter Dichte ausbreiten. Daraus folgt, dass sich interne Wellen bei einer diskreten Schichtung nur an der Schichtungs-

grenze (im Allgemeinen horizontal) ausbreiten können, während bei einer kontinuierlichen Dichteänderung IW auch vertikale Geschwindigkeitskomponenten besitzen. Im folgenden Beitrag werden IW aus dem erstgenannten Regime mit horizontaler Wellenausbreitung betrachtet, da das Laborexperiment an einer Salzwasser-Süßwasser-Schichtungsgrenze durchgeführt wurde.

Laborexperiment

Der für die experimentellen Untersuchungen eingesetzte Kanal für geschichtete Strömungen besteht aus einer drei Meter langen, optisch zugänglichen Messstrecke, die aus verschiedenen Reservoirs durch einen bodennahen Einlass nacheinander befüllt werden kann und somit in der Lage ist, eine Schichtung verschiedener Fluide herzustellen (Menzel et al. 2008). Die Versuchsanlage ist mit einem traversierbaren, kombiniertem Particle-Image-Velocimetry-(PIV) und Laser-Induced-Fluorescence-(LIF)-Messsystem ausgerüstet. Es verfügt über zwei CCD-Kameras, so dass gleichzeitig PIV-Messungen und LIF-Messungen in einer Ebene oder aber Stereo-PIV-Messungen zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes in drei Komponenten durchgeführt werden können. Für alle in diesem Beitrag beschriebenen Experimente wurden die Kameras so angeordnet, dass gleichzeitig ein ebenes Geschwindigkeitsfeld mittels PIV gemessen und ein ebenes Konzentrationsfeld mittels LIF für dieselbe Beobachtungsebene bestimmt werden können.

Um interne Wellen an der Schichtungsgrenze anzuregen, wurde ein Oszillator konstruiert, der aus einer PC-gesteuerten vertikalen Traverse und einem mit seiner Längsachse horizontal orientiertem Zylinder besteht.

Eigenschaften der Dichteschichtung

Im durchgeführten Laborversuch wurde eine Dichteschichtung als 2-Phasen-Schichtung aus Salz- und Süßwasser eingestellt. Dazu wurde zunächst die Messstrecke mit Süßwasser befüllt und anschließend das Salzwasser mit einer Salinität $S = 9$ PSU untergeschichtet. Der maximale Dichteunterschied $\Delta\rho$, bezogen auf die beiden Phasen, der für die Frequenz der Oszillationen der Phasengrenze entscheidend ist, betrug 9 kg/m^3 . Nachdem das Salzwasser in die Messstrecke eingebracht wurde, bildet sich, bedingt durch den Einlassvorgang eine

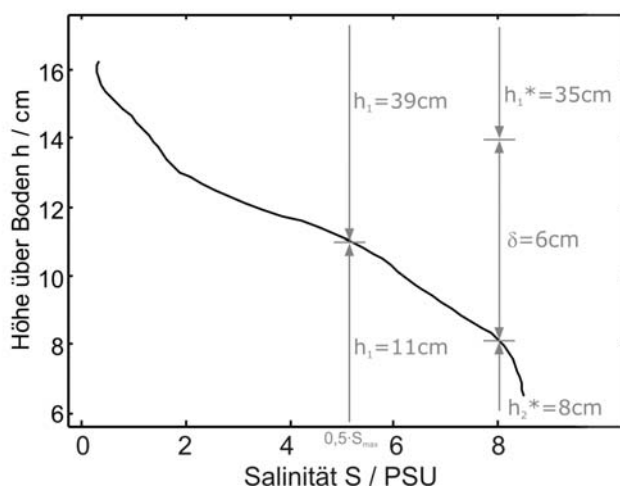


Abb. 1: vertikales Profil der Salinität an der Schichtungsgrenze von Salz- und Süßwasser

Mischungsschicht aus (siehe Abb. 1). Die Ausdehnung der Mischungsschicht wird als die Höhe definiert, in der die Salinität von $0,9 \cdot S_{\max}$ auf $0,1 \cdot S_{\max}$ abnimmt. Es ergibt sich so eine vertikale Ausdehnung δ von etwa 6 cm. Das Salzwasser besitzt unter dieser Annahme eine Schichthöhe h_2^* von etwa 8 cm, so dass bei einer Füllhöhe des Kanals von 50 cm eine Süßwasserschicht der Höhe $h_1^* = 35$ cm resultiert. Wird als Grenze der beiden Schichten die Isopykne mit $S = 0,5 \cdot S_{\max}$ angenommen, so besitzt die Salzwasserschicht eine Höhe h_2 von 11 cm und die Süßwasserschicht eine Höhe h_1 von 39 cm.

Brechende Interne Wellen an einer geneigten Ebene

Um den Übergang IW zu Turbulenz im Laborexperiment untersuchen zu können, wurde der Schichtenströmungskanal um eine geneigte Ebene erweitert, damit ein Wellenbrechen analog zu Oberflächenwellen herbeigeführt werden kann. Dazu wurde eine im Anstellwinkel von 5° bis 30° verstellbare, optisch durchlässige und seewasserresistente Plexiglasplatte auf der dem Wellenerzeuger gegenüberliegenden Kanalseite installiert (siehe Abbildung 2). Nachdem der Kanal befüllt wurde und sich die Salzwasser-Süßwasserschichtung nach dem Einlassvorgang beruhigt hat, wurden mit Hilfe des Wellenerzeugers niederfrequente IW erzeugt. Die Anregungsfrequenz betrug dabei $\omega = 0,3$ Hz, da so nur eine geringe viskose Dämpfung während der Propagation der IW entlang der Grenzschicht der Dichteschichtung

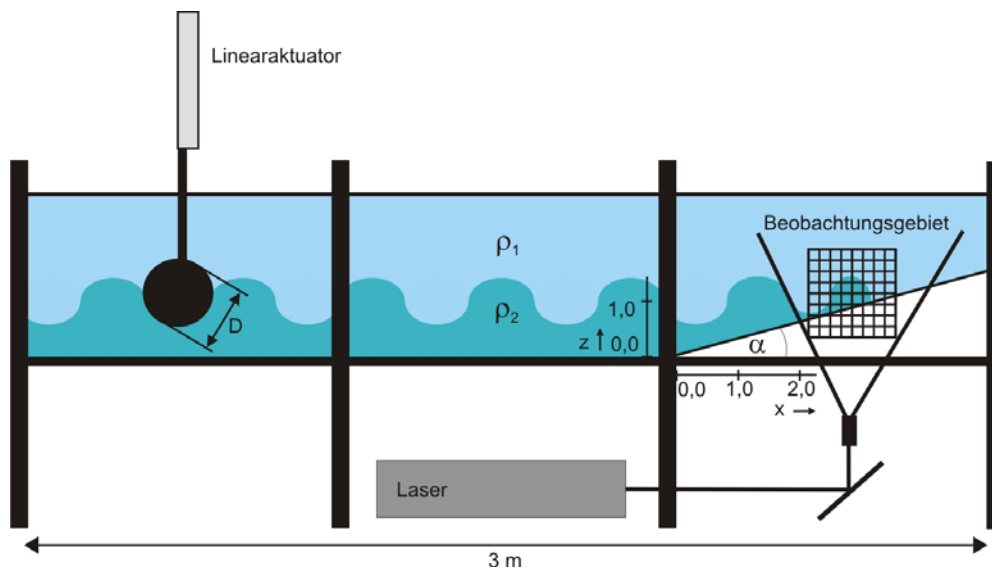


Abb. 2: schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit winkelveinstellbarer geneigter Ebene

auftritt. Die Anregungsamplitude betrug $7,5$ cm. Das in Abb. 2. ebenfalls eingezeichnete Beobachtungsgebiet befindet sich an der Position, an der die unausgelenkte Grenzschicht der Dichteschicht und die geneigte Ebene aufeinander treffen.

Nach der erfolgten Anregung von Wellenzügen, die sechs bis acht Perioden umfassten, wurde das Auflaufen der Wellen auf der Ebene mit dem kombinierten PIV- und LIF-System unter Verwendung der maximalen Bildaufnahmefrequenz von 15 Hz über einen Zeitraum von jeweils 200 Sekunden beobachtet, so dass für jede Versuchsdurchführung 3000 aufeinander folgende Geschwindigkeits- und synchrone Dichtefelder bestimmt werden konnten. Die zeitliche Beschränkung der Messreihen gründet dabei auf den durch jedes einzelne Wellenbrechen hervorgerufenen Mischungsvorgängen, die die Dichteschichtung mit jeder einlaufenden Welle verändern. Um die Mischungsschicht für einen erneuten Versuchsdurchgang wiederherzustellen, muss der gesamte Schichtenströmungskanal entleert und anschließend neu befüllt werden.

Zur Beschreibung der allgemeinen Vorgänge des Wellenbrechens wird eine Phasenmittlung benutzt, bei der eine Wellenperiode in jeweils sechs Phasen aufgeteilt wird. Die gewählte Phasenanzahl gründet dabei auf dem Kompromiss, eine hinreichend detaillierte zeitliche Auflösung des Wellenbrechens zu erzielen, dabei jedoch noch eine genügend große Anzahl an Einzelmesswerten der jeweiligen Feldgrößen pro Phasenintervall benutzen zu können. Für die im Folgenden dargestellten Ergebnisse stellt jede Phase daher eine Mittlung über

einen Zeitraum von 3,33 Sekunden dar und umfasst jeweils 350 einzelne Geschwindigkeitsfeld- und Dichtefeldmessungen. Es wurden Ebenenwinkel zwischen 11° und 30° untersucht. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich, sofern nicht anders aufgeführt, auf einen Ebenenwinkel von 23° , der hier stellvertretend ausgewählt wurde.

Abbildung 3 zeigt den Vorgang des Wellenbrechens anhand der gemessenen Dichteverteilung: In den ersten beiden Phasen ist das Einlaufen der Wellen zu beobachten, das durch den bodennahen Einströmvorgang gekennzeichnet ist. In der dritten Phase verringert sich aufgrund des stetigen Transfers von kinetischer in potentielle Energie einerseits die Geschwindigkeit mit der das Salzwasser die Ebene hinaufströmt, zusätzlich deformiert sich die Welle aufgrund der durch die Ebene hervorgerufene Aufstauung des einströmenden Salzwassers. Dies führt in Phase 4 zu statischen Instabilitäten, die meist in Form von Überschlängen (Overturns) auftreten. Ein besonders deutliches Beispiel dafür zeigt Abbildung 4.

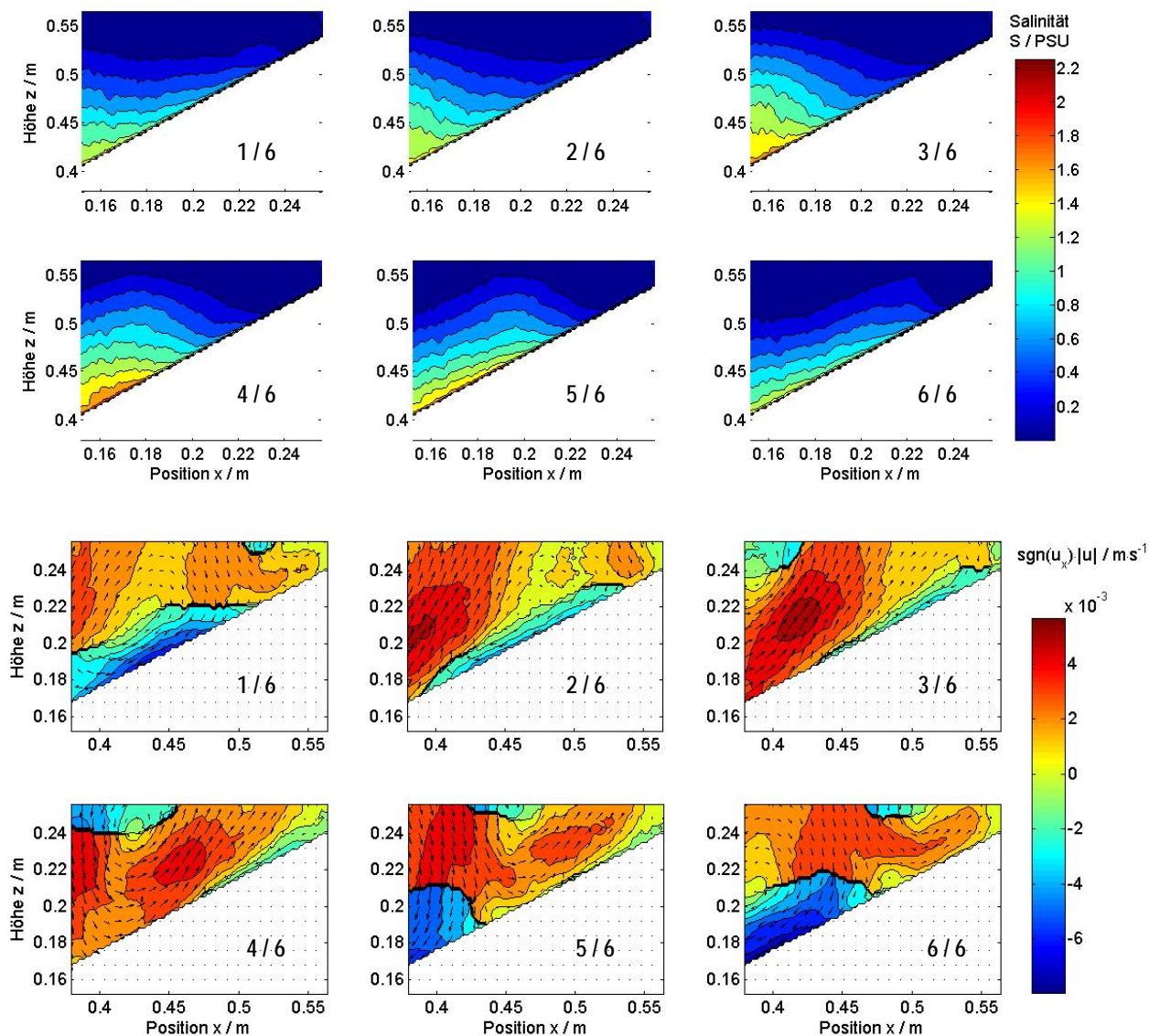


Abb. 3: oben: phasengemittelter Vorgang des Auflaufens einer internen Welle anhand der gemessenen Salinitätsverteilung; unten: phasengemittelte, gemessene Geschwindigkeitsfelder, farbig: Betrag der Geschwindigkeit, positive Vorzeichen entsprechen einer Strömung die Ebene hinauf

Neben den primären statischen Instabilitäten, also dem Auftreten einer im Gravitationsfeld instabilen Schichtung, können sich auch sekundär dynamische Instabilitäten wie scherungsinduzierte Kelvin-Helmholtz-Wirbel ausbilden. Weiterhin zeigte sich im Experiment, dass das Brechen jeder einzelnen Welle ein Prozess ist, der durch die vorhergehenden Ereignisse beeinflusst wird und einen statistischen Charakter besitzt. Daher sind nach einer Mittelwertbildung mehrerer aufeinander folgende Wellenbrechvorgänge keine instabilen Schichtungen oder Overtorns zu erkennen.

Der sich überschlagende Kamm der einlaufenden Wellen bzw. der stark deformierte Wellenberg bewegt sich trägheitsbedingt die Ebene hinauf, während aufgrund der Gravitation bodennah eine Rückströmung die Ebene hinab ausgebildet wird. Phase fünf und sechs sind durch das Hinabströmen das Salzwasser gekennzeichnet. Das durch die dynamischen Instabilitäten vermischte Salz- und Frischwasser, bewegt sich unter dem Einfluss der Schwerkraft ebenfalls die Ebene hinab, wird jedoch mit dem erneut einsetzenden Einströmvorgang in Wechselwirkung treten.

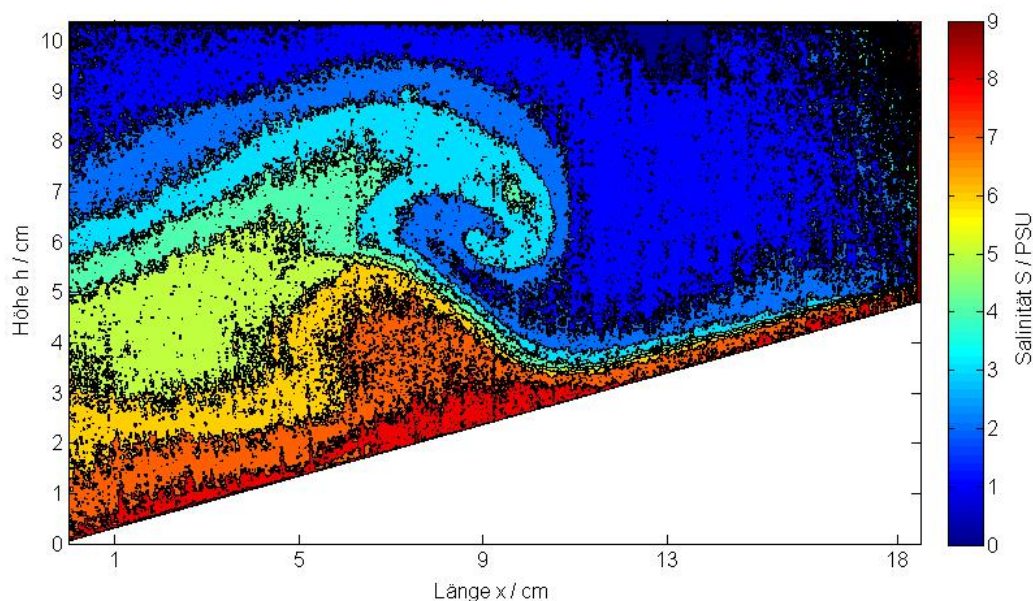


Abb. 4: brechende interne Welle während des Auflaufens auf der um 15° geneigten Ebene

Abbildung 5 zeigt die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie für denselben Vorgang. Auch hier ist in den ersten beiden Phasen der Einströmvorgang zu erkennen, der sich durch ein bodennahes Maximum der turbulenten kinetischen Energie kennzeichnet. Das Auftreten von dynamischen Instabilitäten in Phase drei zeigt sich hier besonders deutlich, da das lokale Maximum der turbulenten kinetischen Energie nun einige Zentimeter über dem Boden auftritt. In den folgenden Phasen bleibt die in den turbulenten Bewegungen enthaltene kinetische Energie erhöht, sinkt jedoch mit jeder Phase weiter ab, bis schließlich die kinetische Energie der Turbulenz in der letzten Phase ihr Minimum anstrebt.

Wird die gesamte für den Bildausschnitt bestimmte turbulente kinetische Energie integriert, so zeigt sich, dass diese ihr Maximum in Phase vier hat. Dies ist konsistent mit der beobachteten Dichteverteilung in Abbildung 3, die ebenfalls in der vierten Phase den Übergang der Wellenbewegung zur Turbulenz durch das Brechen der Welle aufzeigt. Weiterhin kann beobachtet werden, dass die minimale und maximale turbulente kinetische Energie die gleiche Größenordnung aufweisen, sich aber um einen Faktor 1,5 voneinander unterscheiden. Daher kann geschlussfolgert werden, dass das Wellenbrechen einen dominanten Anteil an der Erzeugung der turbulenten kinetischen Energie besitzt. Es muss jedoch beachtet werden,

dass in dem vorgestellten Experiment auch die periodische Bodenströmung einen wichtigen Beitrag im Energietransfer liefert.

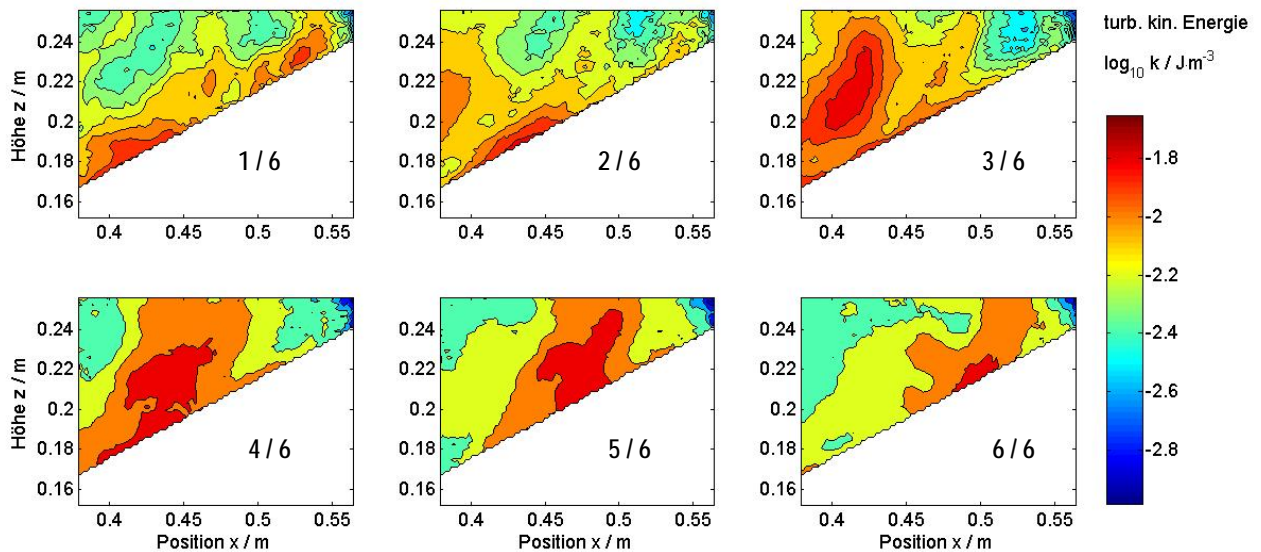


Abb. 5: phasengemittelter Vorgang des Auflaufens einer internen Welle, dargestellt ist die Verteilung der turbulenten kinetischen Energie

Mischung und Mischungseffizienz

Neben der Wärmeerzeugung mittels Dissipation ist die turbulente kinetische Energie ursächlich für einen zur molekularen Diffusion zusätzlichen Massentransport. Da im betrachteten System die Gravitation die für die internen Wellen maßgebliche Kraft ist, wird im Folgenden das isopyknische Mischen betrachtet, das als vertikaler, irreversibler Massenfluss B verstanden wird. Da das gelöste Salz sich nur von einem Gebiet höherer Dichte zu einem Gebiet niedrigerer Dichte durch Transportprozesse bewegt, bedeutet die Irreversibilität des Massentransportes und damit die Mischung im durchgeführten Experiment, dass im Mittel nur ein aufwärts gerichteter Massentransport auftreten kann. Die Relaxation einer durch beispielsweise Overturns verursachten instabilen Schichtung entspricht einem abwärts gerichteten Massenstrom und kann als reversibler Massenfluss aufgefasst werden.

Der irreversible Massen- bzw. Auftriebsfluss ist gemäß Osborn (1980) beschrieben durch

$$B = \frac{g}{\rho} \cdot \overline{u_z' \rho'} \quad (1)$$

In dem hier untersuchten Zusammenhang brechender interner Wellen ist es jedoch sinnvoll, statt des absoluten Auftriebsflusses ein Verhältnis von turbulenter kinetischer Energie und dem Massenfluss zu betrachten, welches einer Mischungseffizienz Γ entspricht.

Gemäß der verwendeten Steady-State-Hypothese (Osborn 1980) kann die im betrachteten System erzeugte turbulente kinetische Energie nur dissipiert oder durch eine Veränderung der Massenverteilung in potentielle Energie umgewandelt werden:

$$0 = P - \varepsilon - B \quad (2)$$

P bezeichnet die Produktionsrate der turbulenten kinetischen Energie und ε entspricht der Dissipation. Eine physikalische Mischungseffizienz Γ , welche die effektive Umwandlung turbulenter kinetischer Energie in potentielle Energie beschreibt, ist im Folgenden definiert als

$$\Gamma = \frac{B}{B + \varepsilon} . \quad (3)$$

Da jedoch für den Vorgang des Mischens nur der irreversible Massenfluss berücksichtigt werden darf, müssen auf Basis der experimentellen Daten der irreversible und der reversible Massenfluss voneinander getrennt werden. Der reversible Massenfluss im beschriebenen Experiment setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: die einlaufende Welle ist ein Vorgang, durch den periodisch Wasser höhere Dichte die geneigte Ebene zunächst hinauf und anschließend wieder herunter strömt. Zusätzlich entsprechen die auftretenden Overturns einer statisch instabilen Schichtung und werden unter dem Einfluss der Gravitation in einen Zustand stabiler Schichtung überführt. Durch beide Vorgänge wird jeweils die potentielle Energie reduziert, so dass diese Effekte bei der Berechnung einer Mischungseffizienz nicht berücksichtigt werden dürfen. Um die Bestimmung der Mischungseffizienz gemäß Gl.3 durchzuführen, wurden zur Auswertung der experimentellen Daten zwei Verfahren angewendet. Dabei handelt es sich um die Proper Orthogonal Decomposition, mittels der die periodische Wellenbewegung separiert werden kann, und ein Sortierverfahren, welches die instabile in eine stabile Schichtung überführt. Nachfolgend werden beide Verfahren beschrieben.

Proper Orthogonal Decomposition

Um die Wellenbewegung und damit den periodischen Massenfluss zu bestimmen, werden die gemessenen Zeitreihen der Geschwindigkeits- und Salinitätsverteilungen einer Proper Orthogonal Decomposition (POD, auch als EOF bezeichnet) basierend auf dem Ansatz von Karhunen (1946) und Loève (1955) unterzogen. Die Zeitreihen der Feldverteilungen $u_i(x,t)$ werden in räumliche Moden $u_i^n(x)$ und dazugehörige Zeitkoeffizienten $a_i^n(t)$ zerlegt und es gilt für die Rekombination der einzelnen Moden

$$u_i(x,t) = \sum_n u_i^n(x) \cdot a_i^n(t). \quad (4)$$

Der mathematische Zusammenhang ist in Brede et al. (2005) näher dargestellt. Abbildung 6 zeigt beispielsweise die ersten drei Moden einer Modenzerlegung der Zeitreihen der Geschwindigkeits- und Salinitätsverteilung für den Vorgang einer auf einer Ebene auflaufenden Welle.

Einzelne Moden bzw. die Rekombination einzelner Moden bilden dabei einzelne Prozesse oder individuelle Strukturen einer komplexen Strömung ab (Jensch et al. 2009). So entspricht eine aus den Moden 1 und 2 rekombinierte Strömung der Wellenbewegung ohne Instabilitäten oder anderen sekundären Effekten. Eine Beschreibung dazu findet sich in Brede et al. (2011). Wird nun die Differenz der gemessenen Zeitreihen der Geschwindigkeits- und Salinitätsverteilungen und der aus ihnen berechneten Moden 1 und 2 gebildet, folgt damit ein künstliches, um die periodische Wellenbewegung verringertes Strömungsfeld infolgedessen der periodischer Massenfluss minimiert ist.

Sortierung des Dichte- und Geschwindigkeitsfeldes

Zusätzlich zur Wellenbewegung treten nicht zum Prozess des Mischens beitragende Massenströme durch statische und dynamische Instabilitäten während des Wellenbrechens auf. Diese Massenströme werden insbesondere dadurch verursacht, dass die Dichteschichtung

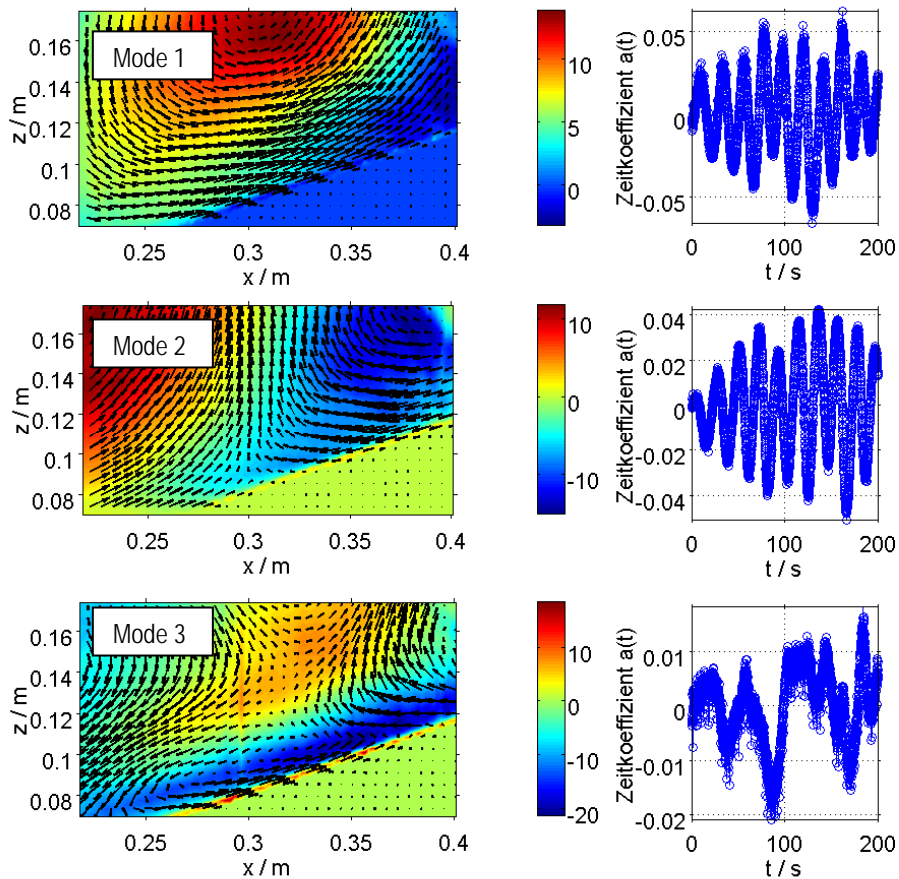


Abb. 6: Moden 1 bis 3 und dazugehörige Zeitkoeffizienten, farbig: Salinität

ihrem Zustand niedrigster potentieller Energie entgegenstrebt und durch Overturning hervorgerufene instabile in stabile Schichtungen reversibel überführt. Die potentielle Energie dieses stabilen Gleichgewichtszustands wird als Background Potential Energy bezeichnet. Solange sich die Dichteschichtung nicht im stabilen Zustand befindet, weist sie eine erhöhte potentielle Energie auf. Die Differenz wird als freie potentielle Energie bezeichnet. Gemäß dem Konzept von Winters et al. (1995) kann diese aus den Messdaten nun durch eine adiabatische Umsortierung entfernt werden. Dabei werden in jedem Zeitschritt der gemessenen Salinitätsverteilung in jeder vertikalen Spalte die einzelnen Messvolumina nach ihre Dichte sortiert und so in ihren Zustand geringster potentieller Energie überführt. Da für die Berechnung des Auftriebsflusses B insbesondere die Korrelation der Dichteschwankungen und der vertikalen Geschwindigkeitsfluktuation wichtig ist, müssen die Zeitreihen der synchron gemessenen Geschwindigkeitsfelder ebenfalls umsortiert werden. Wird zusätzlich zu dem Vorgang des Umsortierens noch die Strecke bestimmt, die jedes Volumen bezüglich seiner Ausgangsposition in eine gemäß seiner Dichte stabilen Lage verschoben werden musste, lässt sich nach Thorpe (1977) ein Maß δ_T (auch als Thorpe-Länge bezeichnet) für die Größe der Wirbel oder Overturns ableiten. Dazu wird für jede vertikale Fluidsäule nach erfolgter Umsortierung der Mittelwert der Verschiebungslänge aller Volumenelemente innerhalb der jeweiligen Säule berechnet. Da jedoch die Volumenelemente nur innerhalb einer Fluidsäule verschoben werden können, muss für jedes Volumen, das durch Sortiervorgang abwärts bewegt wurde, ein anderes Volumenelement aufwärts bewegt werden. Da sich diese Verschiebungen in der Summe kompensieren, muss zur Bestimmung des Mittelwertes der Verschiebungslänge folglich ein rms-Wert benutzt werden. Abbildung 7 zeigt die Verschiebungslänge δ_T für mehrere einlaufende Wellen. Die horizontalen Zeilen der Abbildung entsprechen dem zeitlichen Ver-

lauf der Thorpe-Länge für eine vertikale Fluidsäule im betrachteten Messvolumen. Die vertikalen Spalten bestimmen die Thorpe-Länge für alle Fluidsäulen des Messvolumens zu einem bestimmten Zeitschritt. Deutlich erkennbar ist das Auftreten der Overturns mit der Anregungsperiode $1/20s$ der Wellen. Es zeigt sich, wie bereits im Abschnitt „Brechende interne Wellen“ erwähnt wurde, dass sich die Vorgänge des Wellenbrechens für jede Welle voneinander unterscheiden. Beispielsweise treten während der individuellen Wellen Unterschiede in der Größe als auch dem Ort der beobachteten Overturns auf. Allen Ereignissen gemein ist jedoch ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit von $5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, mit der sich die Overturns die Ebene hinauf bewegen. Diese Geschwindigkeit wird durch den Winkel der Maxima der dargestellten Verteilung zur Abszissenachse gekennzeichnet. Weiterhin ist zu beobachten, dass sich die Position, an der die Überschläge auftreten, sich mit jeder brechenden Welle verschiebt. Dieses ist auf eine lokale Veränderung der Dichteschichtung durch den jeweils vorhergehenden Brechungsvorgang zurückzuführen.

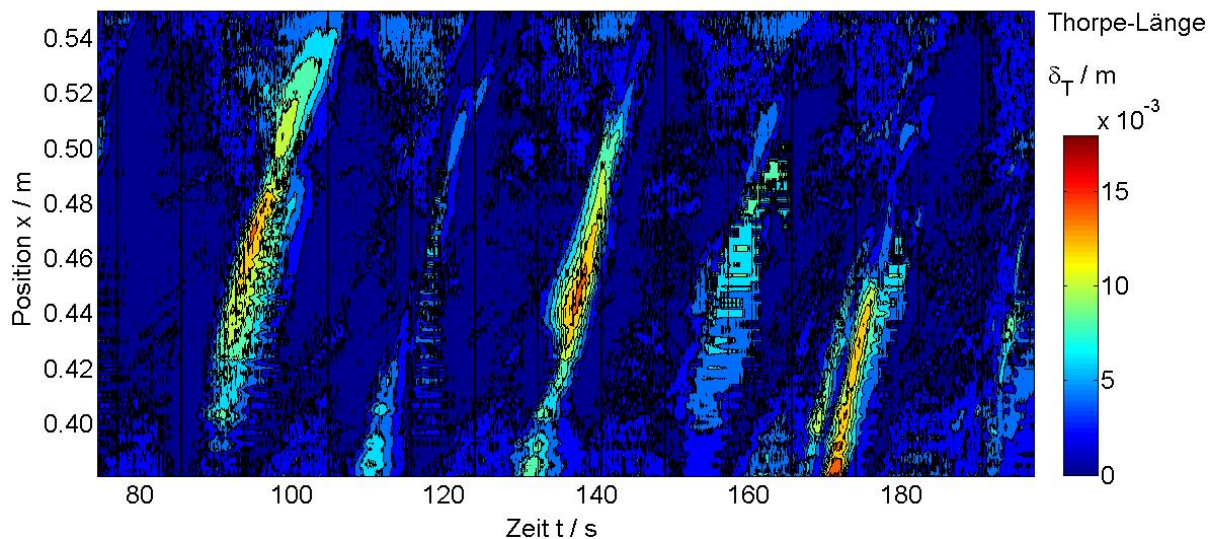


Abb. 7: zeit- und ortsabhängige Verschiebungslänge δ_T während des Sortiervorgangs

Berechnung der Mischungseffizienz

Die in Winters et al. (1995) beschriebene Methode der adiabatischen Verschiebung kann zunächst nur die minimale potentielle Energie der Schichtung bei vertikaler als auch eine horizontaler Verschiebung bestimmen. Da im durchgeführten Experiment nur ein Teil der Dichteschichtung an der Ebene beobachtet wird, ist eine horizontale Verschiebung jedoch nicht sinnvoll, da sich bei einer vollständigen Umsortierung die Fluidvolumina höchster Dichte am linken unteren Rand des Beobachtungsgebietes aufstauen würden, da keine Möglichkeit der Umverteilung über das Beobachtungsgebiet hinaus gegeben ist. Damit jedoch die Berechnung der Mischungseffizienz für das Auflaufen interner Wellen auf einer Ebene aus den zeitaufgelösten Messdaten möglich wird, werden die Messdaten zunächst um die, wie vorher beschriebene, mittels POD bestimmte Wellenbewegung bereinigt. Die daraus folgenden Zeitreihen werden der ebenfalls beschriebenen Umsortierung unterzogen. Anschließend erfolgt für jede der definierten Phase der Phasenmittlung eine Berechnung der Schwankungsgrößen. Eine Integration des Auftriebsflusses und der Dissipationsrate innerhalb des Beobachtungsgebietes über alle Phasen ergeben dann eine nach Gl. 3 definierte Mischungseffizienz in Abhängigkeit der verwendeten Ebenenwinkel von 11° bis 30° zu $\Gamma = 0,06 - 0,6$. Die experimentellen Ergebnisse belegen, dass die Mischungseffizienz an einer schrägen Ebene brechender interne Wellen sich um eine Größenordnung unterscheiden können.

Die hier ermittelten Werte können im Vergleich zu anderen Arbeiten als plausibel angenommen werden: Umlauf und Burchard (2011) sowie Ivey et al. (2008) schlussfolgern aus ihren Untersuchungen, dass die in der Fachliteratur bisher als konstant angenommene Mischungseffizienz von $\Gamma \approx 0,2$ eine unzureichende Annahme darstellt. Umlauf und Burchard (2011) gelangen vielmehr zu dem Ergebnis, dass die Mischungseffizienz wesentlich geringer ist. Ausnahmen davon bilden jedoch steile Ebenenwinkel, die dann zu einem stärkeren Mischungsvorgang führen, so dass die Mischungseffizienz insgesamt einen Bereich von bis zu zwei Größenordnungen überstreichen kann. Linden und Redondo (1991) ermittelten $\Gamma \leq 0,5$ und Hult et al. (2011) bestimmten in einem Experiment zu brechenden internen Wellen mit anderer topographischer Interaktion $\Gamma \approx 0,05$.

Zusammenfassung

Am Kanal für geschichtete Strömungen des Lehrstuhls Strömungsmechanik wurden Untersuchungen zu internen Wellen mittels laseroptischer Messverfahren durchgeführt. An einem Mehrschichtsystem aus Salz- und Süßwasser konnten interne Wellen angeregt und ihr Ausbreitungsverhalten charakterisiert werden. Da die Versuchsanlage ein Dichteinterface, bestehend aus 2 Schichten und einer ausgedehnten Mischungsschicht erzeugt, konnte im Vergleich der experimentell bestimmten Dispersionsrelation mit der aus einer 2-Schicht-Theorie abgeleiteten gezeigt werden, dass der Einfluss einer Mischungsschicht nur unzureichend wiedergegeben wird. Es wurde die Verwendung eines 3-Schicht-Modells mit einer Korrektur des effektiv wirkenden Dichteunterschieds vorgeschlagen. Die Transition interner Wellen wurde anhand von auf einer geneigten Ebene auflaufenden internen Wellen untersucht. Mittels zeitaufgelöster Messungen konnten die Phasen des Wellenbrechens charakterisiert und das Energiebudget quantitativ bestimmt werden. Durch die Anwendung der Proper Orthogonal Decomposition und Sortierverfahren konnte eine plausible Mischungseffizienz für den untersuchten Vorgang bestimmt werden. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Mischungseffizienz für den im Experiment untersuchten Prozess nicht als konstant angenommen werden kann und dass sich diese in einem Intervall von $\Gamma = 0,06 - 0,6$ befindet.

Danksagung

Die Autoren danken der Leibniz Gemeinschaft für die Projektförderung im Rahmen der International Leibniz Graduate School for Gravity Waves and Turbulence in the Atmosphere and Ocean (ILWAO).

Literatur

- Brede, M., Büttner, R., Lübken, F.-J., Leder, A., 2011: "Experimentelle Bestimmung von Turbulenz und Mischung in brechenden internen Wellen", in: A. Thess, C. Resagk, B. Ruck, A. Leder, D. Dopheide (Hrsg.) „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ - 19. Fachtagung der GALA e.V. 2011, Technische Universität Ilmenau, S. 16.1 - 16.11, ISBN 978-3-9805613-7-2
- Brede, M., Frenkel, A. und Leder, A., 2005: „Zerlegung experimentell mit PIV und LDA ermittelter Geschwindigkeitsfelder in Karhunen-Loève Moden“, in: C. Egbers, L. Jehring, Th. von Larcher, B. Ruck, A. Leder, D. Dopheide (Hrsg.), „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ - 13. Fachtagung der GALA e.V. 2005 in Cottbus, Karlsruhe: Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie, S. 8.1 - 8.8
- Burchard, H., Craig, P.D., Gemrich, J.R., van Haren, H., Mathieu, P.-P., Meier, H.E.M., Nimmo Smith, W.A.M., Prandke, H., Rippeth, T.P., Skillingstad, E.D., Smyth, W.D., Welsh, D.J.S., Wijesekera, H.W., 2008: "Observational and numerical modeling methods for quantifying coastal ocean turbulence and mixing", *Progr. Oceanogr.*, 76, pp. 399-442
- Gerding, M., Theuerkauf, A., Suminska, O., Lübken, F.-J., 2009: "Balloon-borne hot wire anemometer for stratospheric turbulence soundings", ESA Special Publication No. 671
- Hult, E.L., Troy, C.D., Koseff, J.R., 2011: "The mixing efficiency of interfacial waves breaking at a ridge: 1. Overall mixing efficiency", *J. Geophys. Res.*, 116, C02003, doi:10.1029/2010JC006485
- Ivey, G.N., Winters, K.B., Koseff, J.R., 2008: "Density Stratification, Turbulence, but How Much Mixing?", *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2008. 40:169-84
- Jensch, M., Hüttmann, F., Brede, M., Leder, A., 2009: "Optical Measurements in the Wake of a Circular Cylinder of Finite Length at a High Reynoldsnumber", in: Imaging Measurement Methods for Flow Analysis, Results of the DFG Priority Programme 1147 "Imaging Measurement Methods for Flow Analysis" 2003-2009, Series: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 106, Nitsche, Wolfgang; Dobriloff, Christoph (Eds.), Springer, Berlin, S. 185-195, ISBN: 978-3-642-01105-4
- Karhunen, K., 1946: "Zur Spektraltheorie stochastischer Prozesse", *Annales Academiae Scientiarum Fennicae*, Vol. 34
- Kundu, P.K., Cohen, I.M., 2008: "Fluid Mechanics", 4th Ed., Elsevier Academic Press
- Lass, A., 2011: "Simulationen interner Wellen an einem Interface mit räumlich ausgedehntem Dichtegradienten und Hintergrundscherströmung", Projektarbeit am Lehrstuhl Strömungsmechanik, Universität Rostock
- Linden, P.F., Redondo, J.M., 1991: "Molecular Mixing in Rayleigh-Taylor instability. Part I: Global Mixing", *Phys. Fluids*, 3(5), 1269-1277
- Loève, M., 1955: "Probability Theory", Van Nostrand, Princeton, N.J.
- Menzel, P., Hüttmann, F., Leder, A., 2008: „PLIF/PIV- sowie Stereo-PIV-Untersuchung der Mischung in einer geschichteten Salzwasserströmung im Nachlauf eines Kreiszyinders“, *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 16. Fachtagung der GALA e.V. 2008*, Universität Karlsruhe, pp. 16.1 – 16.8
- Osborn, T. R., 1980: "Estimates of the Local Rate of Vertical Diffusion from Dissipation Measurements", *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 83–89
- Pedlosky, J., 2003: „Waves in the Ocean and Atmosphere“, Springer-Verlag
- Rauthe, M., Gerding, M., Lübken, F.-J., 2008: "Seasonal changes in gravity wave activity measured by Lidars at mid-latitudes", *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 6775-6787
- Thorpe, S.A., 1977: "Turbulence and Mixing in a Scottish Loch", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 286, No. 1334, pp. 125-181
- Troy, C.D., Koseff, J.R., 2005: "The generation and quantitative visualization of breaking internal waves", *Exp. i. Fl.*, 38, pp. 549–562
- Umlauf, L., Burchard, H., 2011: "Diapycnal Transport and Mixing Efficiency in Stratified Boundary Layers near Sloping Topography", *J. Phys. Ocean.*, vol. 41, pp. 329-345
- Winters, K.B., Lombard, P.N., Riley, J.J., D'Asaro, E.A., 1995: "Available potential energy and mixing in density-stratified fluids", *J. Fluid Mech.*, vol. 289, pp. 115-128