

International Leibniz Graduate School for
Gravity Waves and Turbulence
in the Atmosphere and Ocean (ILWAO)

Antrag im Rahmen des „Paktes für Forschung“
an den Senatsausschuss Wettbewerb (SAW) der WGL
von einem Netzwerk folgender Einrichtungen:

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (IAP)
Kühlungsborn
Prof. Dr. Franz-Josef Lübken (Antragssteller)
(luebken@iap-kborn.de)



Leibniz-Institut für Ostseeforschung (IOW)
Warnemünde
verantwortlich: Prof. Dr. Hans Burchard



Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSM)
Universität Rostock
verantwortlich: Prof. Dr. Alfred Leder



Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)
Greifswald
verantwortlich: Prof. Dr. Olaf Grulke



Kühlungsborn, den 25 September 2006

1 Einleitung

Schwerewellen und Turbulenz spielen für die Atmosphärenphysik und Ozeanographie eine entscheidende Rolle, da sie ganz wesentlich die relevanten Erhaltungsgrößen, wie z. B. Energie, Impuls und Spurengaskonzentrationen, beeinflussen. Da sich Schwerewellen über große Entfernungen ausbreiten können, stellen sie außerdem einen der wichtigsten Kopplungsmechanismen in der Atmosphäre und im Ozean dar. In Mecklenburg-Vorpommern befassen sich zwei Leibniz-Institute, nämlich das IAP und das IOW, mit der Erforschung der Atmosphäre bzw. des Ozeans, und somit auch mit Schwerewellen und Turbulenz. Dabei werden eine Reihe von weltweit einzigartigen experimentellen und theoretischen Techniken eingesetzt. Turbulenzuntersuchungen werden außerdem am Lehrstuhl für Strömungsmechanik an der Universität Rostock und am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald durchgeführt. Aufgrund des gemeinsamen Interesses am Themenbereich Schwerewellen/Turbulenz haben diese vier Institute daher ein Netzwerk gegründet und in mehreren Workshops die gemeinsamen wissenschaftlichen Fragestellungen herausgearbeitet.

Aus der Ähnlichkeit und Vielfalt der relevanten Probleme hat sich die Absicht entwickelt, die wissenschaftliche Zusammenarbeit zu intensivieren und die gemeinsame Ausbildung von Studenten zu koordinieren. Das IAP und das IOW führen an der Universität Rostock den bundesweit einzigen Masterstudiengang „Atmosphärenphysik/Ozeanographie“ im Fach Physik durch. Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses soll im Rahmen dieses Antrages durch eine „**International Leibniz Graduate School for Gravity Waves and Turbulence in the Atmosphere and Ocean (ILWAO)**“ unter Beteiligung der vier Institute koordiniert werden.

2 Wissenschaftliches Umfeld

2.1 Atmosphäre

Die Bedeutung von Schwerewellen und Turbulenz für das Verständnis der Atmosphäre zeigt sich zum Beispiel am Jahresgang der thermischen Struktur in der polaren Mesopausenregion (ca. 90-100 km). Hier ist es im Sommer um bis zu 70 Grad (!) kälter als im Winter, obwohl die Sonne im Sommer bis zu 24 Stunden scheint, während es im Winter permanent dunkel ist. Diese drastische Abweichung vom Strahlungsgleichgewicht ist praktisch ausschließlich auf den Einfluss von Wellen und Turbulenz zurückzuführen. Schwerewellen werden in den unteren Schichten erzeugt, breiten sich nach oben aus und brechen in der oberen Atmosphäre, wobei sie Turbulenz erzeugen. Leider ist unser Verständnis nahezu aller beteiligter Prozesse mangelhaft, da die experimentellen Bedingungen in der oberen Atmosphäre schwierig sind und die theoretische Beschreibung mit zahlreichen Problemen konfrontiert ist. In den letzten Jahren sind deutliche Fortschritte bei der Messung von Schwerewellen und Turbulenz sowie bei deren Modellierung zu verzeichnen. So ist es am IAP gelungen, die weltweit ersten Schwerewellen-Messungen mit Lasern von der Troposphäre bis ca. 120 km durchzuführen. In den nächsten Jahren soll mit dieser Technik zum ersten Mal überhaupt auch Turbulenz in der Mesosphäre gemessen werden.

Schwerewellen und Turbulenz spielen auch für Klimafragen eine wichtige Rolle. Seit einigen Jahren vermehren sich die Hinweise darauf, dass sich die thermische Struktur der oberen Atmosphäre langfristig stark verändert hat, und zwar deutlich mehr als in der Troposphäre und auch mehr, als man aufgrund von zunehmender Strahlungskühlung erwarten würde. Als mögliche Ursachen für diesen starken Trend werden anthropogene Einflüsse, aber auch Schwerewellen und Turbulenz diskutiert. Ein Ziel des vorliegenden Antrages besteht darin, Schwerewellen in der Atmosphäre experimentell und theoretisch zu untersuchen, und zwar ihre Anregung, ihre Ausbreitung, und ihre Vernichtung durch Instabilitäten und Turbulenz.

2.2 Ozean

Im Weltozean kann die großskalige meridionale Zirkulation nur durch mittlere vertikale Vermischungskoeffizienten von etwa $10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ erklärt werden, obwohl lokal in der Regel weit geringere Werte gemessen werden. Die Diskrepanz (das *missing mixing*) wird durch sogenannte *hot spots* erklärt, in denen die vertikale Vermischung lokal einige Größenordnungen über den

Durchschnittswerten liegen. Als ein wichtiger Prozess für das *missing mixing* wurde in den letzten Jahren die Anregung interner Schwerewellen und deren sukzessives Brechen (Zerfallen in Turbulenz) durch Interaktion der Gezeitenströmungen mit rauher Bodentopographie identifiziert. Eine ähnliche Diskrepanz wie im Weltozean liegt interessanterweise auch in der Ostsee vor. Auch hier wird vermutet, dass brechende interne Schwerewellen (hier durch windgetriebene Trägheitsschwingungen angeregt) bodennah zu stark erhöhten Vermischungsraten führen. In den letzten Jahren hat die Methodik zur Messung mariner Turbulenz erheblich an Zuverlässigkeit und räumlich-zeitlicher Auflösung gewonnen. Kürzlich ist es am IOW gelungen, erstmals räumlich hochaufgelöste Turbulenz-, Strömungs- und Dichtemessungen durch eine dichtegetriebene Bodenströmung durchzuführen. In enger Verbindung mit der numerischen Modellierung am IOW und IAP besteht so auch die Expertise, die Prozesse brechender interner Schwerewellen in der Ostsee im Detail zu studieren.

3 Geplante Arbeiten

3.1 Schwerewellen und Turbulenz in der Atmosphäre

3.1.1 Messungen in der Atmosphäre

Am IAP werden seit kurzem Temperaturmessungen mit Lidars¹⁾ von der Troposphäre bis in die untere Thermosphäre (ca. 120 km) durchgeführt. Diese weltweit einzigartige Möglichkeit erfordert den Einsatz von mehreren, teilweise hochkomplexen Lidars, die in den nächsten Jahren weiterentwickelt werden, so dass auch Messungen unter Tageslichtbedingungen und sogar Windmessungen möglich sind. Aus den Lidardaten werden Schwerewellenparameter abgeleitet. Aufgrund der rasanten laseroptischen Entwicklung wird die räumliche und zeitliche Auflösung in den nächsten Jahren soweit verbessert werden können, dass sogar turbulente Strukturen vermessen werden können. Gleichzeitig werden am IAP insgesamt 6 Radars eingesetzt, mit deren Hilfe Winde und Turbulenz im Höhenbereich von etwa 0-20 km und 60-110 km gemessen werden. Durch Kombination von Temperatur- und Windmessungen werden Höenschichten mit geringer Stabilität identifiziert und mit dem Auftreten von Turbulenz verglichen. Zur Verbesserung der Qualität der Turbulenzmessungen mit Radars hat das IAP vor drei Jahren ein neuartiges MF-Radar mit einer Ausdehnung von ca. 1 x 1 km gebaut, welches zu den weltweit größten Anlagen seiner Art gehört. Lidar- und Radarmessungen werden vom IAP nicht nur in Kühlungsborn, sondern auch auf einer Station nördlich des Polarkreises (ALOMAR², 69°N) durchgeführt.

Die vorhandenen Fernerkundungsmethoden werden ergänzt durch Turbulenzmessungen mit Höhenforschungsraketen in der Mesosphäre (gefördert außerhalb dieses Antrages) und mit ballongetragenen Instrumenten bis ca. 30 km. Es soll damit der Zusammenhang zwischen Schwerewellen und Turbulenz auf synoptischen Zeitskalen (Lidars, Radars) und auf mikrophysikalischen Skalen (Ballons, Raketen) untersucht werden. Dazu wird in Zusammenarbeit mit dem LSM ein neuartiger Turbulenzsensor entwickelt und auf mehreren Ballonflügen eingesetzt. Raketengetragene Messungen in der unteren Thermosphäre zeigen gelegentlich Turbulenz-ähnliche Strukturen im Plasma, die mit Hilfe der Expertisen des IPP analysiert werden sollen.

3.1.2 Modellierungen in der Atmosphäre

Das am IAP entwickelte globale strömungsmechanische Modell der Atmosphäre, KMCM³, erlaubt es, Schwerewellen von ihrer Anregung in der Troposphäre bis zur Dissipation in der oberen Atmosphäre selbstkonsistent zu erfassen. In den unteren Schichten findet man ein Zusammenfallen von Schwerewellen und turbulenter Aktivität, da ein Teil der angeregten Schwerewellen lokal dissipiert wird. Die Modellierung von Schwerewellen hängt somit sensitiv von der Turbulenzparametrisierung in der Troposphäre ab. Im Rahmen dieses Antrages werden die geplanten Ballonmessungen, aber auch die Radar- und Lidarsondierungen des IAP im Höhenbereich bis 20 km, sowie die vom ECMWF⁴ gelieferten Analysen verwendet, um Simulationen mit KM-

¹Lidar = laser induced detecting and ranging

²ALOMAR = Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research

³Kühlungsborn Mechanistic general Circulation Model

⁴European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

CM hinsichtlich des Zusammenhangs von Schwerewellenanregung und turbulenter Aktivität zu validieren. Dabei werden die bisherigen Turbulenzparametrisierungen optimiert.

In der oberen Atmosphäre erreichen die Schwerewellen sehr große Amplituden und gehen durch Instabilitäten in Turbulenz über. Dieser Brechungsprozess kann mit konventionellen Turbulenzparameterisierungen nur eingeschränkt beschrieben werden. Am IAP wurde die Brechung von Schwerewellen systematisch untersucht, und zwar mit der Methode der optimalen Störungen in 2,5-dimensionalen direkten numerischen Simulationen (2,5d-DNS). Im Rahmen dieses Antrages soll der volle 3-dimensionale Übergang zur Turbulenz mithilfe von Large-Eddy-Simulationen (LES) erfasst werden. Die Simulationen werden gezielt durch Laborexperimente des LSM begleitet. Ein statistischer Vergleich mit Messungen des IOW in der Ostsee ist ebenfalls vorgesehen. Diese Untersuchungen sollen letztlich zur Entwicklung einer neuartigen Turbulenzparameterisierung, die die Instabilität von Schwerewellen beschreibt, führen. Deren Implementierung wird unsere Zirkulationsmodelle (Atmosphäre und Ozean) entscheidend verbessern. Auch erwarten wir neue Erkenntnisse hinsichtlich der Klimarelevanz der oberen Atmosphäre.

3.2 Wellen und Turbulenz in der Ostsee

Die Erzeugung und Ausbreitung von Trägheitswellen sollen im zentralen Bornholmbecken untersucht werden. Auf der Grundlage von Zeitreihenmessungen der Dichte und der Strömung mit Messgeräten, die in verschiedenen Tiefen verankert sind, werden in Kombination mit meteorologischen Messungen die Anregung und die vertikale Propagation der Wellen erfasst. Die horizontale Ausbreiten der internen Wellen wird mit Hilfe von Messketten bestimmt, die entlang orthogonal angeordneter Linien geschleppt werden. Die Dichte des Wassers wird dabei mit einer Abtastzeit von ca. 1 Sekunde und einer vertikalen Auflösung von einem Meter registriert. Zur Untersuchung der Kopplung zwischen Trägheitsschwingungen und -wellen wird die Anregung von Wellen durch Fluktuationen des Windes an der Meeresoberfläche mit einem am IOW entwickelten hochaufgelösten numerischen Modell (GETM⁵) simuliert.

Da das Brechen von internen Wellen bevorzugt an den Rändern der Becken stattfindet, soll die Wechselwirkung zwischen internen Wellen und Turbulenz am Rand des Bornholmbeckens untersucht werden. Neben der Erfassung der räumlich-zeitlichen Struktur der hochfrequenten internen Wellen werden mit einer Scherungs-Mikrostruktursonde Dissipationsraten gemessen. Das Wellenzahlspektrum der hochfrequenten Wellen wird mit einem verankerten Array von Temperatursonden erfasst. Zusätzlich werden durch akustische Strömungssensoren, die in der Bodengrenzschicht ausgebracht werden, wichtige turbulente Parameter gemessen.

Um die Erzeugung von Turbulenz durch brechende interne Wellen zu reproduzieren, sollen LES-Untersuchungen durchgeführt werden. Dazu müssen in diesem Modell interne Wellen angeregt werden, die dann am geneigten Boden brechen. Die Ergebnisse der LES-Simulationen sollen mit den Labor- und Feldmessungen verglichen werden. Ziel ist es, eine geeignete Parametrisierung von Wellen und Turbulenz für großskalige Modelle (z.B. GETM) zu finden. In diesem Zusammenhang ist eine enge Koordinierung mit den entsprechenden LES-Simulationen am IAP und den Laborexperimenten am LSM geplant.

3.3 Labormessungen

Mit Hilfe der am LSM verfügbaren laseroptischen Strömungsmesstechnik sollen Labormessungen zum physikalischen Verständnis des Übergangs von Schwerewellen zu Turbulenz durchgeführt werden. Ziel dieser Laborexperimente ist es, durch unterschiedlich angeregte brechende Schwerewellen Turbulenz in geschichteten Fluiden zu erzeugen. Die im Labor gewonnenen Daten werden auch als Validierungsgrundlage für die am IAP und IOW vorhandenen numerischen Simulationen verwendet. Am LSM soll ein vorhandener Versuchstank mit geschichteten Fluiden für Versuche zur Ausbreitung von Schwerewellen erweitert werden. Derzeit finden bereits Untersuchungen Strömungen und Durchmischung in geschichtetem Salzwasser (ohne Wellen) statt. An der Grenzfläche der Schichten mit unterschiedlicher Salzkonzentration sollen Schwerewellen mit definierten Wellenparametern erzeugt werden. Die Stabilität und die Ausbreitung dieser Wellen sowie deren Wechselwirkung mit Hindernissen lassen sich damit quantitativ untersuchen. Mit

⁵General Estuarine Transport Model

Hilfe zeitaufgelöster Messungen soll das Stabilitätsverhalten und die Turbulenzerzeugung durch Schwerewellen erforscht werden. In Zusammenarbeit mit dem IAP sollen im Labor Nutzlasten für Turbulenzmessungen auf Ballons entwickelt und in einer Reihe von Flügen eingesetzt werden. Dabei werden im Labor erprobte aber auch neuartige Instrumente verwendet. Die Starts der Ballons erfolgen am IAP in Kühlungsborn, in enger Koordinierung mit den bodengebundenen Temperatur- und Windmessungen.

3.4 Übergeordnete Gesichtspunkte der geplanten Arbeiten

Die Parametrisierung turbulenter Flüsse ist ein fundamentales Problem jedes großskaligen Strömungsmodells. Der wesentlicher Schwerpunkt unseres Vorhaben liegt auf der Entstehung von Turbulenz durch Schwerewellen. Dieser Prozess wird in herkömmlichen Ansätzen zur Modellierung der Atmosphäre und des Ozeans nur unzulänglich beschrieben. Übergeordnetes Ziel ist es daher, eine neue Turbulenzparametrisierung zu entwickeln, die der Brechung von Wellen allgemein Rechnung trägt. Damit sollen letzten Endes die am IAP und IOW verwendeten Modelle verbessert werden, um z. B. klimarelevante Fragestellungen besser beantworten zu können. Die aus den Modellrechnungen und Experimenten abgeleitete Parametrisierung soll auch dazu verwendet werden, den Transport und die Vermischung von Spurenstoffen besser zu verstehen. Dieser Transport ist wichtig für die Ökologie der Ozeane, aber auch für die Verteilung von photochemisch aktiven Spurenstoffen in der Atmosphäre.

4 Strukturkonzept für die Graduiertenschule

4.1 Kooperationen

Im Rahmen von ILWAO sollen bereits bestehende Kooperationen mit nationalen und internationalen Einrichtungen gefestigt und ausgebaut werden. Da die Kooperation auch den Austausch von Studenten beinhaltet, werden alle Veranstaltungen in englischer Sprache angeboten. Konkret sollen folgenden Einrichtungen an dem Programm beteiligt werden: University of Colorado und Colorado Research Associates (Boulder), University of Toronto, Universität Oslo, Centre Nationale Recherche Scientifique (Paris), University of Western Australia (Perth), Universität Göteborg, University of Victoria, Netherlands Institute for Sea Research (Texel), Chalmers University (Göteborg). Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Arbeiten sollen im Rahmen eines internationalen Workshops am IAP vorgestellt werden. Die klimatischen Aspekte der Arbeiten werden im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms CAWSES⁶ diskutiert (Sprecher des SPP: Prof. F.-J. Lübken). Die marinen Arbeiten zum Thema Wellen und Turbulenz sollen der SCOR⁷ Working Group *Ocean Mixing* vorgestellt werden, bei der Prof. H. Burchard Mitglied ist.

4.2 Curriculum

Folgende wissenschaftliche Themen sollen im Rahmen von Doktorarbeiten bearbeitet werden:

	verantw. Hochschullehrer
Schwerewellen- und Turbulenzmessungen mit Lidars	Prof. F.-J. Lübken, IAP
In-situ-Messungen von Turbulenz in der Tropo- und Stratosphäre	Prof. F.-J. Lübken, IAP
Klimatologie von Turbulenz aus Radarmessungen	Prof. N.N. ⁸ , IAP
Schwerewellenanregung und Turbulenz in Modellen und Daten	Prof. E. Becker, IAP
LES zur Schwerewellenbrechung	Prof. E. Becker, IAP
LES zur Brechung interner Wellen am geeigneten Boden	Prof. H. Burchard, IOW
Feldstudien zur Brechung interner Wellen im Bornholmbecken	Prof. H. Burchard, IOW
Laboruntersuchungen zu Schwerewellen und Turbulenz	Prof. A. Leder, LSM
Plasmaturbulenz im Labor und in der Atmosphäre	Prof. O. Grulke, IPP

Voraussetzung zur Promotion im Rahmen von ILWAO ist der erfolgreiche Abschluss des Masterstudiengangs „Atmosphärenphysik/Ozeanographie“ im Fach Physik an der Universität

⁶CAWSES=Climate and Weather of the Sun-Earth System

⁷Scientific Committee on Oceanic Research

⁸Neubesetzung Ende 2007

Rostock, oder eines ähnlichen Studiengangs im In- oder Ausland. Im Rahmen ihres Promotions-Studienganges sollen die Studenten weitere **Vorlesungen** aus diesem Studiengang, sowie mindestens eine Vorlesung aus einem der anderen Studiengänge hören (z. B. Laserspektroskopie).

Etwa 1-2 mal pro Jahr wird ein **Blockseminar** durchgeführt, wobei die Studenten die Fortschritte und Ergebnisse ihrer Arbeiten vorstellen. Außerdem soll die Fähigkeit zur selbstständigen Erarbeitung eines Themas dadurch gefördert werden, daß die Graduierten im Rahmen eines **Doktorandenseminars** einen Vortrag über ein Thema halten, welches nicht unmittelbar zu ihrer Doktorarbeit gehört. Im Rahmen dieser Seminare finden auch Fachvorträge der beteiligten Hochschullehrer und externer Spezialisten (z. B. von den oben genannten Einrichtungen) statt. Gegen Ende ihrer Doktorarbeit stellen die Promovierenden ihre Forschungsergebnisse in den bereits etablierten **Institutskolloquien** vor. Besonders hervorragende Arbeiten werden für das Physikalische Kolloquium der Universität Rostock vorgeschlagen.

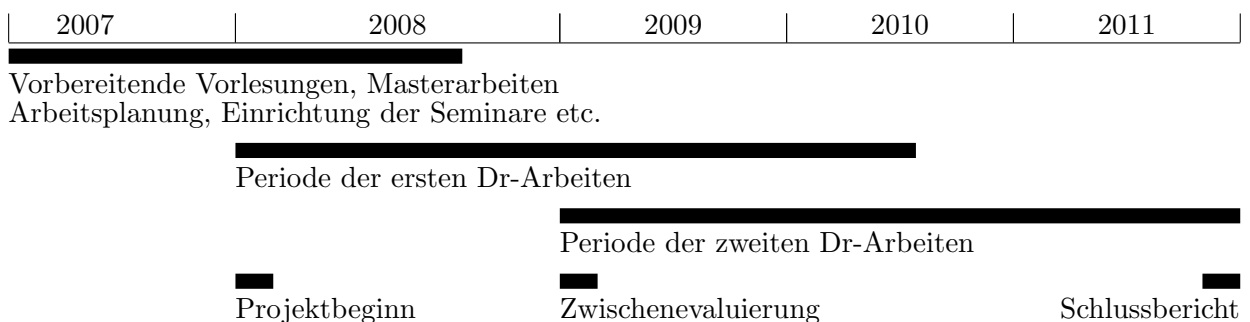
Ein wesentlicher Teil der Ausbildung erfolgt in den Arbeitsgruppen der jeweiligen Institute. Hierbei erlernen die Studenten die erforderlichen experimentellen und/oder theoretischen Werkzeuge und nehmen u. U. an Feldmesskampagnen in polaren Breiten oder in der Ostsee teil. Die Studenten sollen mindestens einmal während ihrer Ausbildung eine der oben genannten ausländischen Forschungseinrichtungen besuchen. Außerdem sollen sie an internationalen Fachtagungen teilnehmen.

Für jede Doktorarbeit werden die wissenschaftlichen Ziele, der betreuende Hochschullehrer, die wissenschaftlichen Ansprechpartner in den Instituten, sowie der Arbeitsplan festgelegt. Die Promotion soll nicht länger als 3 Jahre dauern. Vorbereitende Arbeiten, z. B. im Rahmen einer Masterarbeit, sind erwünscht. Der Fortschritt der Arbeiten wird in einer Zwischenevaluierung durch die beteiligten Hochschullehrer überprüft und den wissenschaftlichen Beiräten des IAP und IOW vorgestellt.

5 Sonstiges

Die beteiligten Institute kooperieren seit langem mit zahlreichen Forschungsinstituten und Universitäten im In- und Ausland. Im Rahmen dieses Antrages sind konkrete gemeinsame Aktivitäten bzgl. der Ausbildung von Studenten und dem wissenschaftlichen Austausch geplant (s. o.). Die beteiligten Institute unterstützen das Vorhaben mit erheblichen Eigenmitteln. So stellen sowohl das IAP als auch das IOW aufwendige und kostspielige Instrumente und Rechner im Wert von mehreren Millionen Euro zur Verfügung. Die wissenschaftliche, technische und verwaltungsmäßige Betreuung des Vorhabens wird durch das Stammpersonal des IAP bzw. des IOW sichergestellt. Ähnliche Eigenbeteiligungen sind am LSM und am IPP vorhanden. Wir beantragen insgesamt 4,5 Personalstellen, die für Doktorandenstellen verwendet werden sollen. Je nach Verfügbarkeit sollen u. U. auch Postdocs angestellt werden (evtl. Deckung der Finanzierungslücke durch die Institute). Die Verwendung und Aufteilung der Stellen ergibt sich aus dem Strukturkonzept (s. o.) und dem beigefügten Finanzplan. Die Laufzeit des Projektes beträgt 4 Jahre. Daraus ergeben sich Personalkosten in Höhe von 648 kEuro und Sachkosten in Höhe von 120 kEuro. (**Gesamtbedarf: 768 kEuro**. Der vorliegende Antrag erfüllt die Paktkriterien „Nachwuchsförderung“ und „Vernetzung“.

Meilensteinplanung



International Leibniz Graduate School for
Gravity Waves and Turbulence in the Atmosphere and Ocean (ILWAO)

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

Trotz ihrer immensen Bedeutung gehören die Erzeugung, Ausbreitung und Brechung (Turbulenz!) von Schwerewellen zu den am wenigsten verstandenen Prozessen in der gesamten Atmosphärenphysik. Messtechnisch liegt die Herausforderung darin, dass die entsprechenden zeitlichen und räumlichen Skalen sehr klein sind, so dass sie von Satelliten nicht aufgelöst werden können. Außerdem sind die Messgrößen in der unteren Atmosphäre winzig (damit sehr schwer nachweisbar), während sie in der oberen Atmosphäre riesig sein können. Dort sind allerdings die Messbedingungen aus anderen Gründen generell schwierig (geringe Luftdichte, nicht-thermodynamisches Gleichgewicht etc.). Es gibt nur einige wenige Fallstudien zur Morphologie von Schwerewellen und Turbulenz, die meisten davon anhand von insitu-Messungen oder indirekten Beobachtungsgrößen in einem beschränkten Höhenbereich. Erst seit kurzem ist es möglich, Schwerewellenparameter mit Hilfe von Lidars in einem großen Höhenbereich zu erfassen. Auf der Modellierungsseite besteht die Herausforderung darin, die Dynamik der globalen Zirkulation sowohl über einen großen Skalenbereich als auch über den gesamten Höhenbereich von der Grenzschicht bis zur Thermosphäre zu erfassen und dabei die nichtaufgelösten Schwerewellen sowie die kleinräumige Turbulenz konsistent zu parametrisieren.

Die Antragsteller des IAP haben die erste Klimatologie von turbulenten Parametern aus insitu-Messungen in der oberen Atmosphäre veröffentlicht/1/und Schwerewellenmessungen mit mehreren Lidars entwickelt und eingesetzt/2/. Außerdem wurden zahlreiche Untersuchungen zur thermischen, dynamischen, und kompositorischen Struktur der oberen Atmosphäre in mittleren und polaren Breiten durchgeführt /3//4/. Anhand von Messungen und Modellierungen wurde eine Klimavariabilität der Troposphäre in der oberen Atmosphäre nachgewiesen und der Mechanismus identifiziert /5/. Ein seit Jahren unerklärtes Radarphänomen wurde durch experimentelle und theoretische Untersuchungen mit Hilfe von Turbulenz und geladenen Aerosolen erklärt /6/. Die am Antrag beteiligten Wissenschaftler haben wesentliche Beiträge hinsichtlich der Parametrisierung von Turbulenz und Schwerewellen, der expliziten globalen Simulation von Schwerewellen bis 100 km Höhe, und zum theoretischen Verständnis des Brechungsvorgangs geleistet /7//8/.

Das *missing mixing* im Weltozean lässt sich zum großen Teil durch Erzeugung interner Schwerewellen aus Gezeitenströmungen erklären, die an anderer Stelle brechen und in turbulente kinetische Energie dissipieren. Im Rahmen internationaler Programme (z.B. SCOR Working Group *Ocean Mixing*) werden diese Prozesse zur Zeit intensiv diskutiert. In der Ostsee stellt sich das *missing mixing* in ähnlicher Form dar, wie sich aus Feldstudien des IOW ergibt/9/. Das am IOW entwickelte, weltweit verwendete Modellsystem GOTM (www.gotm.net) spiegelt zwar den Stand der Forschung wieder/10/, jedoch existieren Ansätze zur Parametrisierung der Wellenbrechung bisher nur für Oberflächenwellen/11/.

Ausgewählte Literaturangaben zu eigenen Vorarbeiten:

- /1/Lübken, F.-J., *J. Geophys. Res.*, **102**, 13441–13456, 1997.
- /2/Rauthe M., F.-J. Lübken, et al., *J. Geophys. Res.*, (in press), 2006.
- /3/Lübken, F.-J., et al., *J. Geophys. Res.*, **109**, doi=10.1029/2004JD005133, 2004.
- /4/Lübken, F.-J., et al., *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 13–24, 2006.
- /5/Becker, E., Lübken F.-J., et al., *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi=10.1029/2004GL019615, 2004.
- /6/Rapp, M., and Lübken, F.-J., *Atmos. Chem. Phys.*, **4**, 2601–2633, 2004.
- /7/Becker, E., *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **66**, 683–696, 2004.
- /8/Becker, E. and D. C. Fritts, *Ann. Geophys.*, **24**, 1175–1188, 2006.
- /9/Lass, H.U. et al., *J. Geophys. Res. (Oceans)*, **108**, doi: 10.1029/2002JC001401, 2003.
- /10/Umlauf, L. and Burchard, H., *Cont. Shelf Res.*, **25**, 795–827, 2005.
- /11/Burchard, H., *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 3133–3145, 2001.