

Detektion interner Schwerewellen in der stabilen Grenzschicht mittels akustischer Fernerkundung

A. Kniffka, A. Ziemann, I. Chunchuzov, S. Kulichkov, V. Perepelkin

Zusammenfassung

Der Einfluss interner Schwerewellen (IGW) auf die untere Atmosphäre bei stabiler Schichtung wurde mittels einer Kombination zweier akustischer Fernerkundungsmethoden untersucht. Im Juli 2005 wurde in Zvenigorod, Russland ein gemeinsames Experiment durchgeführt, an welchem sowohl eine Arbeitsgruppe des Oboukhov Institute of Atmospheric Physics (OIAP) als auch des Leipziger Instituts für Meteorologie (LIM) teilnahmen. Bei der Feldkampagne wurde die sogenannte acoustic pulse sounding method des OIAPs und die akustische Laufzeit-tomographie des LIM eingesetzt, SODAR und RASS Messungen kontrollierten dabei ständig den Zustand der Atmosphäre bezüglich der Wind- und Temperaturprofile. Die internen Schwerewellen wurden anschließend mittels Kreuzkorrelationsanalyse der Zeitserien der gemessenen akustischen Parameter (hier: Laufzeiten) detektiert. Die Empfängersysteme waren an verschiedenen Stellen im Messgebiet verteilt. Deswegen konnten zwei verschiedene Detektionsmethoden angewendet werden. Erstens die Detektion entlang gebrochener Schallstrahlen in der Nähe deren Umkehrpunkte zwischen 50 m und 100 m und zweitens die Detektion von nahezu horizontal verlaufenden Schallstrahlen welche Sender/Empfänger-Paare verbinden. Somit konnten sowohl vertikale als auch horizontale Informationen über den Zustand der Atmosphäre während des Experiments erfasst werden.

Summary

The effects of internal gravity waves (IGWs) on the lower atmosphere under stable conditions were studied by using a combination of different acoustic remote sensing methods. In July 2005 a joint experiment was performed at Zvenigorod (Russia) which was conducted by the two groups, Oboukhov Institute of Atmospheric Physics (OIAP) and Leipzig Institute for Meteorology (LIM) During this campaign the OIAP group's acoustic pulse sounding method and the acoustic travel time tomography of the LIM group were employed simultaneously with SODAR and RASS measurements used for monitoring the state of the lower atmosphere which were wind and temperature profiles. The internal gravity waves were detected by means of a cross-coherence analysis of the time series for the measured acoustical parameters (travel times). The acoustical receivers were placed at several locations distributed within the measurement field. Therefore two methods could be employed for detecting the gravity waves: first the detection along refracting ray paths with turning points in the atmosphere between 50 m to 100 m and second the

detection of almost horizontal ray paths that connect pairs of source and receivers. In this way both horizontal and vertical information of the atmosphere's state could be gathered throughout the experiment.

1 Einleitung

Interne Schwerewellen sind ein wichtiger Energie- und Stoffaustauschmechanismus für die stabil geschichtete Grenzschicht (siehe z.B. Finnigan et al., 1984, Chimonas, 2002). Diese räumlich und zeitlich organisierten Strukturen können Wind- und Temperaturfluktuationen auf einer Zeitskala von einigen Minuten bis Stunden bzw. auf horizontalen Skalen von hundert Metern bis einigen Kilometern induzieren. Diese Fluktuationen erzeugen eine Variabilität in den Parametern akustischer Signalen, wie zum Beispiel der Laufzeit eines Signals, dessen Amplitude oder der Ankunftszeitwinkel. Dieser Umstand wird in der akustischen Laufzeit-tomographie sowie der sogenannten "acoustic pulse sounding method" zur Detektion und Charakterisierung der internen Schwerewellen ausgenutzt. Das Ziel dieser Studie ist die Untersuchung der statistischen Kenngrößen dieser akustischen Parameter, um den Einfluss der internen Schwerewellen auf turbulente Regimes in einer stabilen Grenzschicht besser charakterisieren zu können.

2 Messsysteme

Speziell um mesoskalige Windgeschwindigkeits- und Temperaturfluktuationen in der Atmosphäre zu messen, wurde die "Acoustic pulse sounding method" entwickelt (Chunchuzov, 2002; Chunchuzov et al., 2005). Hierbei werden stabile akustische Signale durch Detonation einer Luft-Propan-Mischung generiert. Räumlich angeordnete Empfänger messen die akustischen Impulse im Abstand von einigen Kilometern vom Generator. Diese akustische Tomographiemethode der stabilen Grenzschicht

Der dabei anwendbare Akustische Tomografiealgorithmus innerhalb einer stabilen Grenzschicht basiert auf der Annahme der Existenz von einem akustischen Wellenleiter nahe der Erdoberfläche infolge Temperaturinversion und vertikaler Windscherung. In einer stabil geschichteten Atmosphäre findet die Schallausbreitung entsprechend dem Brechungsgesetz auf gekrümmten Schallpfaden in einem Schallwellenleiter innerhalb der Inversionsschicht statt. Da sich die Umkehrpunkte der Schallwege in ca. 50 bis 300 m Höhe befinden (bei Entfernungen von 1 bis 4 km zwischen Schallquelle und Empfänger), können die Schallgeschwindigkeitsfluktuationen aus größeren Höhen von Mikrofonen in Bodennähe sondiert werden und so Informationen in vertikaler Richtung über den Zustand der Atmosphäre gewonnen werden. Eine zweite Messmethode ist die akustische Laufzeit-tomographie. Diese Technik nutzt die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Temperatur und Windvektor aus, um die horizontale Verteilung dieser Größen im Messgebiet zu bestimmen (Arnold et al., 2004; Ziemann et al., 2002). Hierbei werden relativ kurze Schallausbreitungsstrecken (hier ca. 300 m Länge) benutzt (Arnold et al., 2005), weshalb

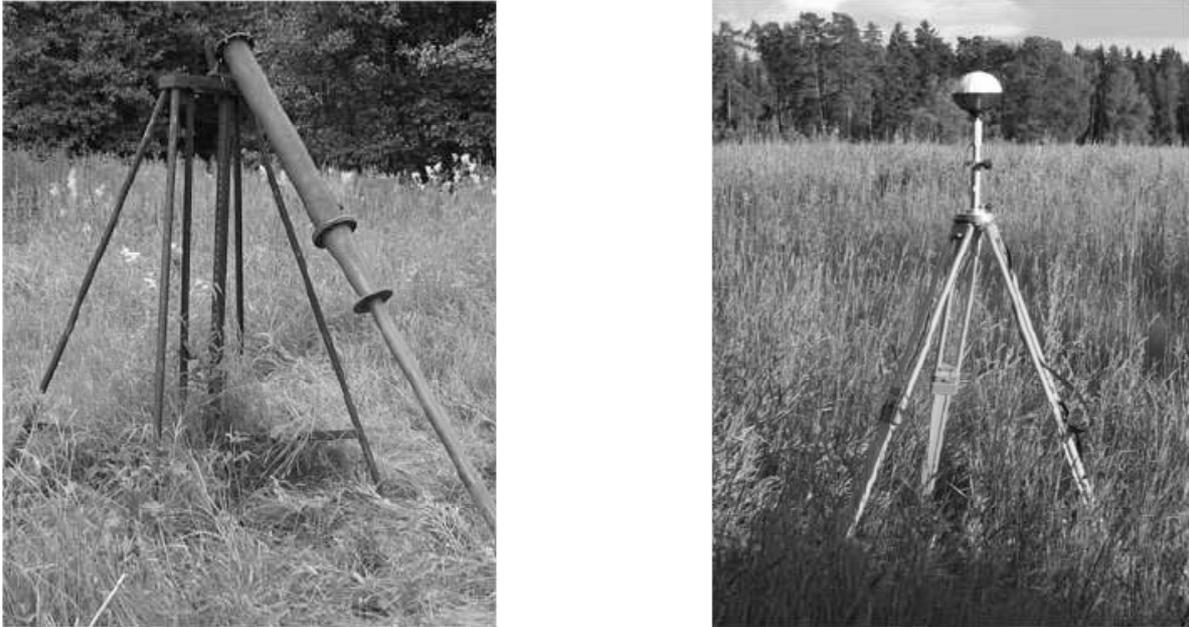


Abbildung 1: Links: Schallquelle, ein Signal wurde alle 60 s ausgesandt. Rechts: Messmikrophon des LIM-Messsystems.

eine annähernd geradlinige Schallausbreitung angenommen werden kann. Das Messsystem besteht aus mehreren Lautsprechern und Empfängern, welche im Feld innerhalb oder um das zu vermessende Gebiet verteilt sind. Messungen der akustischen Laufzeit der Schallsignale können somit für die Berechnung einer horizontalen Verteilung der Temperatur- und Windfluktuationen in der Messhöhe von ca. 2 m genutzt werden. Der bodennahe Einfluss von Wellenstrukturen ist damit in der stabilen Grenzschicht nachweisbar und verschiedene Wellenparameter, z.B. Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausbreitungsrichtung, können bestimmt werden (Arnold et al., 2005, Kniffka et al., 2006).

3 Messkampagne in Zvenigorod im Juli 2005

2005 fand ein gemeinsames Experiment in Zvenigorod statt, an dem die Messverfahren vom Leipziger Institut für Meteorologie (LIM) und vom Obukhov Institute for Atmospheric Physics (OISAP) die Atmosphäre in horizontaler und vertikaler Richtung vermaßen. Während des Experiments 2005 wurde für beide Systeme dieselbe Schallquelle (Detonation eines Luft-Propan-Gemischs alle 60 s) genutzt und die Laufzeitdifferenzen des ausgesendeten Signals infolge von unterschiedlichen Ausbreitungswegen und Reflektionshöhen an verschiedenen Beobachtungspunkten aufgenommen. Die LIM Messungen fanden mit drei Messmikrofonen in ca. 2,2 km Entfernung von der Schallquelle auf einem Wiesenstandort

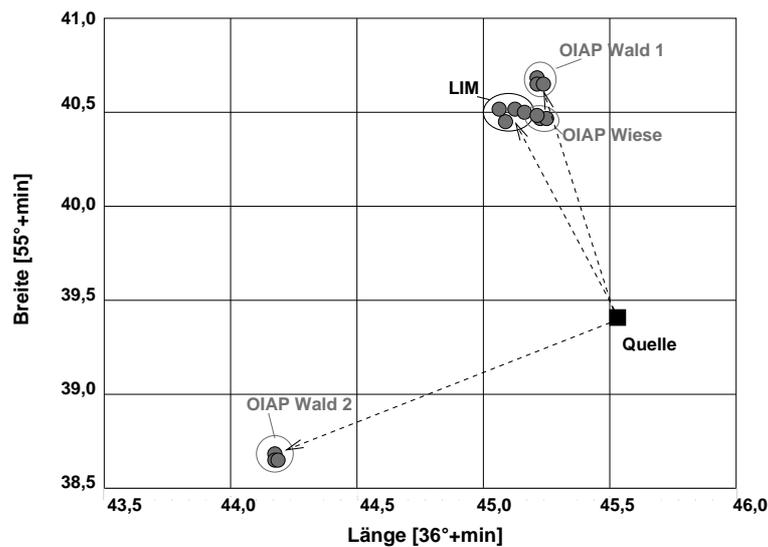


Abbildung 2: Messaufbau des Experiments von Juli 2005 in Zvenigorod, 3 OIAP und 1 LIM-Empfängernetzwerke mit jeweils 3 Empfängern, sowie die Schallquelle waren aufgebaut.

statt (siehe Abb. 2). In der Nähe befand sich ein Mikrofonnetzwerk der OIAP-Gruppe mit weiteren 3 Mikrofonen. 2 Netzwerke lagen außerdem in nahe gelegenen Wäldern in unterschiedlichen Richtungen von der Schallquelle, um Mit- und Gegenwindsituationen zu erfassen. Die akustischen Laufzeitsondierungen wurden mit mehreren Empfängerkonstellationen mit unterschiedlichen Abständen zwischen ca. zehn und einigen hundert Metern ausgewertet, um interne Schwerewellen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen zu studieren. Die akustischen Messungen wurden in den Nachtstunden bei stabil geschichteter Atmosphäre durchgeführt, um Schallausbreitung in einem Wellenleiter zu gewährleisten. Das Auftreten von Wellenleitern in der Nähe der Erdoberfläche zur Messzeit wurde kontrolliert anhand des Wind- und des Temperaturprofils (Brunt-Vaisala Frequency) in der atmosphärischen Grenzschicht, welche kontinuierlich beobachtet wurden mittels eines SODAR/RASS und eines meteorologischen Masts.

4 Ergebnisse

Ein Beispiel des Signals, welches vom Impulsgenerator erzeugt wird und in einiger Entfernung empfangen wird, ist in Abb. 3 dargestellt. Abhängig vom Abstand zwischen Quelle und Empfänger, dem Azimut der Schallwelle und der atmosphärischen Schichtung empfangen die Mikrophone unterschiedliche Ausprägungen des übertragenen Signals. Das Signal (OIAP Wiese in Abb. 2) im mittleren Graphen teilt sich in einen Satz von Bestandteilen A, B, C und D infolge von Wellenleitung in der gegebenen azimuthalen Richtung auf. Dasselbe Signal empfangen am Punkt OIAP Wald mit einem anderen Azimut zeigt keine

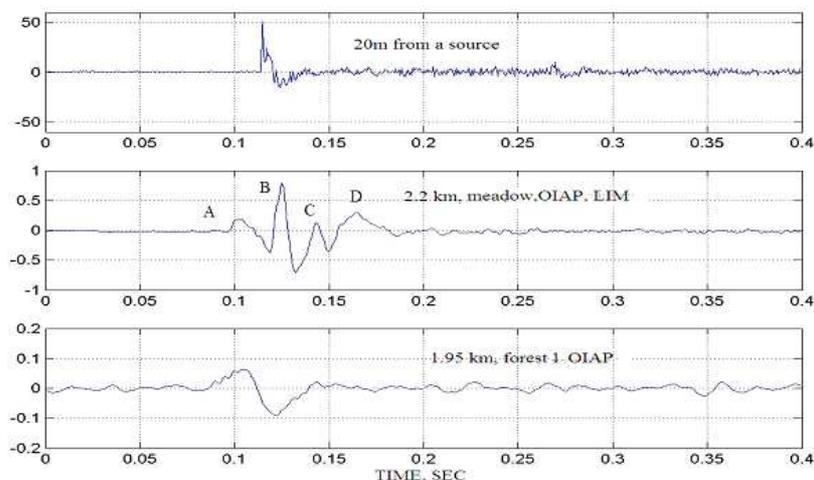


Abbildung 3: Eines der akustischen Signale empfangen am 12.07.2005 um 00:11:55 Uhr Ortszeit in verschiedenen Abständen bzw. Richtungen von der Schallquelle: nahe der Quelle im oberen Graphen, und in ca. 2 km Entfernung, einmal in Mitwindrichtung (mittlerer Graph) und gegen den Wind (unten). Auf der vertikalen Achse ist der akustische Druck in Pa dargestellt.

Aufspaltung. Dies wird von der nicht wellenleitenden Ausbreitung des Signals gegen den Wind bedingt (Chunchuzov et al., 2005). Diese Aufteilung des gemessenen Signals entsteht durch die Ausbreitung des Schalls auf verschiedenen Pfaden durch die Atmosphäre, was sich in Analogie zur geometrischen Optik mittels Schallstrahlen darstellen lässt. Jeder Schallstrahl breitet sich je nach Abstrahlwinkel und je nach Luftzusammensetzung auf einem bestimmten Pfad aus, bei stabiler Schichtung der Atmosphäre und Schallausbreitung in Windrichtung werden die Schallstrahlen gebogen und erreichen in gewisser Entfernung wieder den Erdboden (s. Abbildung 4). Die Laufzeiten sind je nach Weglänge und Ereignissen (z. B. Durchlaufen einer Internen Schwerewelle) entlang dieses Weges unterschiedlich, wodurch die unterschiedlichen Ankunftszeiten entstehen. Diese Abhängigkeit der Laufzeiten vom Zustand der Atmosphäre entlang des Wegs wird ausgenutzt, um vertikal aufgelöste Informationen über organisierte Wellenstrukturen zu erhalten. Aus den einzelnen Messungen ließen sich einstündige Zeitreihen für jeweils einen Tag erstellen. Für diese Zeitreihen wurden die Kreuzleistungsspektren (K_{ij}) und Multikohärenzfunktionen (K_0) mit

$$K_0 = (K_{12}^2 + K_{23}^2 + K_{31}^2 - 2K_{12}^2 K_{23}^2 K_{31}^2 \cos \sum \varphi)^{1/2} \quad (1)$$

sowie die die zugehörigen Phasenspektren (φ)

$$\sum \varphi = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_1) \quad (2)$$

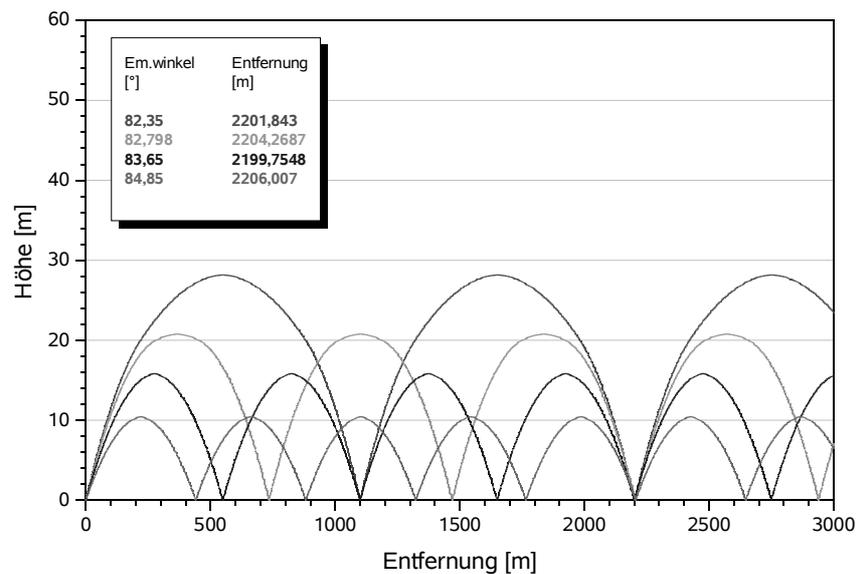


Abbildung 4: Modellierter Weg der Schallstrahlen durch die Atmosphäre am 13.07.2005, der Strahl mit dem höchsten Umkehrpunkt hat den kürzesten Weg und liegt aufgrund dessen im Signal an erster Stelle.

berechnet (siehe auch Bendat and Piersol, 1986, Chunchuzov et al., 2005). Ein Indikator für das Auftreten von organisierten Wellenstrukturen innerhalb des betrachteten Zeitintervalls ist gleichzeitiges Auftreten von 1 in der Multikohärenzfunktion und 0 in der Summe der Phasendifferenzen. Die Kohärenzen und Phasenspektren für die Laufzeitdifferenzen wurden als Beispiel für drei Empfänger, welche ein kleines Dreieck (R1, R2, R3) mit einer Seitenlänge von ca. 30 m bildeten, berechnet, ebenso für ein größeres Dreieck (L1, R2, P5) mit Seitenlängen von 135 m bis 400 m, welche sich im Abstand von ca. 2,5 km von der Schallquelle in derselben Richtung bezüglich des mittleren Windes wie das kleine Dreieck befanden. In Abb. 2 sind Beispiele der Kohärenzen und entsprechenden Phasenspektren für einen einstündigen Zeitabschnitt der ausgesuchten Dreiecke zu sehen. Anhand der Phasenspektren ist zu erkennen, dass für das größere Dreieck nur niederfrequente Fluktuationen im Bereich von $1 - 2 \cdot 10^3 \text{ Hz}$ (dies entspricht Periodendauern von 16 bis 8 Minuten) auftreten bei einer Summe der Phasen von 0 und einer Multiokohärenzfunktion in der Nähe von 1. Die berechneten horizontalen Wellenlängen von solchen Fluktuationen sind 2,5 bis 2,9 km, was vergleichbar mit der maximalen Abmessung des großen Dreiecks ist. Ihre horizontale Phasengeschwindigkeit liegt zwischen 3,5 und 4 m/s. Für das kleine Dreieck mit 30 m Seitenlängen wurden auch geringere Periodendauern gefunden, sie liegen zwischen 5,5 - 3,5 min und 2,5 - 2 min. Bedingt durch die kleineren Seitenlängen des Dreiecks können nur Fluktuationen mit kürzeren Wellenlängen von etwa 150 bis 200 m und geringe Phasengeschwindigkeiten von weniger als 1,5 m/s bestimmt

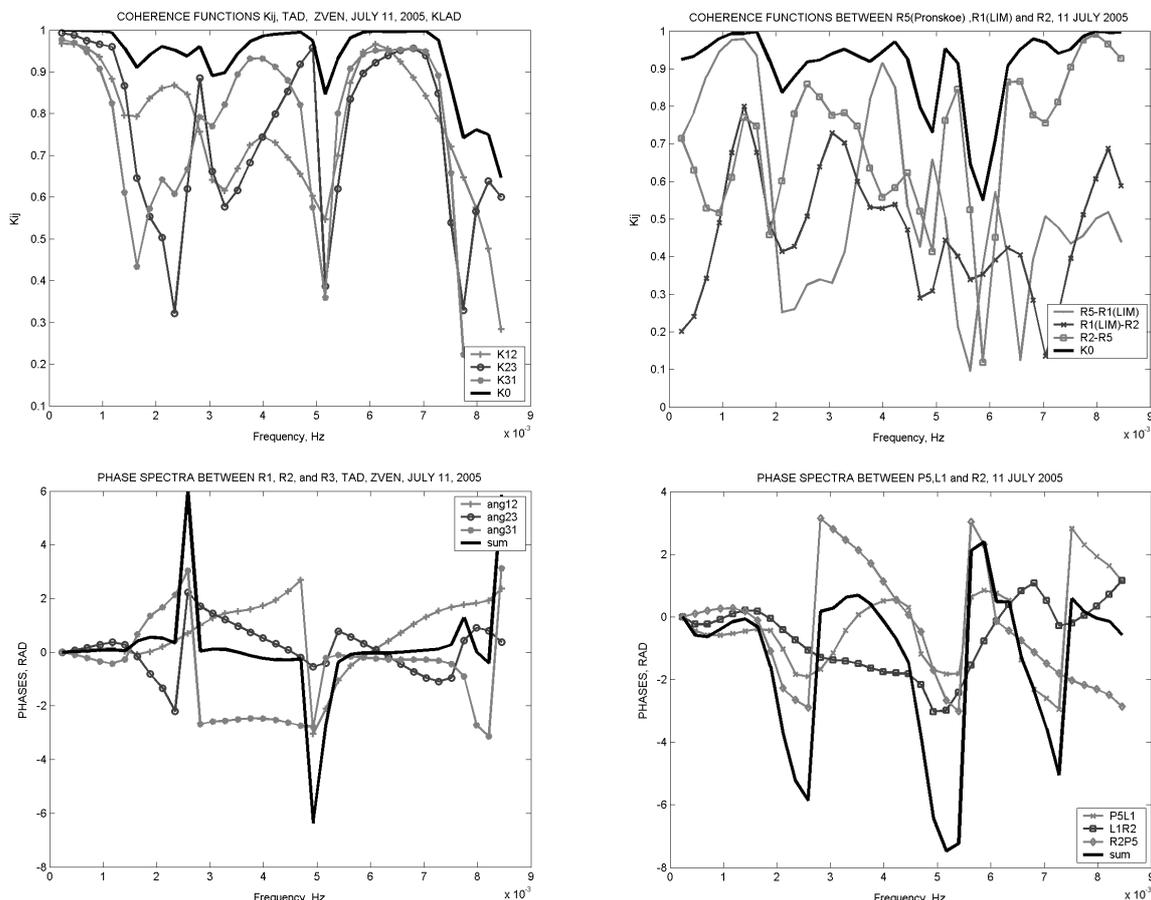


Abbildung 5: Kohärenz (oben) und Spektren der Phasendifferenzen (unten) für Laufzeiten vom 12.07.2005 für einen einstündige Zeitabschnitt. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für das kleine Dreieck mit 30 m Seitenlänge dargestellt (R1, R2, R3), auf der rechten die entsprechenden Graphen für das große Dreieck mit Seitenlängen zwischen 135 m und 400 m (L1, R2, P5). Maximale Kohärenz zusammen mit der Summe der Phasendifferenzen gleich Null ist ein Anzeichen für das Auftreten von IGW's.

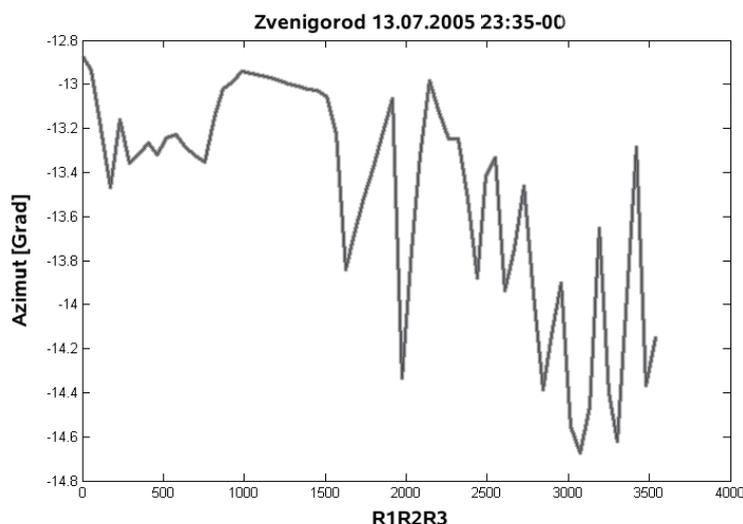


Abbildung 6: Azimutwinkel am Mikrofonnetzwerk LIM Wiese, am 13.07.2005 zwischen 23:35 und 00:35 Uhr Ortszeit.

werden. Ein Vergleich beider Dreiecke zeigt eine Abnahme der Phasengeschwindigkeit mit zunehmender Frequenz. Dies ergibt sich aus der Dispersionsrelation für die Wellenbewegung in einem Wellenleiter (siehe Chunchuzov et al., 2007). Desweiteren weisen die beobachteten wellenförmigen Strukturen bestimmte, frequenzabhängige horizontale Phasengeschwindigkeiten auf, welche jedoch nicht notwendigerweise mit der Windgeschwindigkeit übereinstimmen, gleiches gilt auch für die Ausbreitungsrichtung der Wellen. Somit ist die Gültigkeit der Taylor-Hypothese an dieser Stelle nicht gegeben und die typischen horizontalen Skalen für die Wellen können nicht aus den Zeitskalen der Fluktuationen bestimmt werden.

Ein weiterer Effekt der Temperatur- und Windfluktuationen, welche von den IGW's ausgelöst werden, ist die Beeinflussung des Azimutwinkels, unter welchem das gesendete Signal einen Empfänger erreicht (s. Abb. 6). Die Standardabweichung des Azimutwinkels von seinem mittleren Wert innerhalb des betrachteten einstündigen Zeitintervalls liegt bei ca. 1 Grad. Damit lässt sich der zu erwartende Fehler bei der Lokalisierung von Schallquellen in einer stabil geschichteten Atmosphäre abschätzen.

5 Diskussion und Ausblick

Charakteristische Größen von kleinskaligen internen Schwerewellen in der stabilen nächtlichen Grenzschicht konnten mit Hilfe von akustischer Laufzeittomographie und der sogenannten "acoustic pulse sounding method" bestimmt werden. Erste Berechnungen der horizontalen Größenordnung der Laufzeitfluktuationen zeigten diskrete Spektren was mit

der Existenz eines diskreten Spektrums von internen Wellenmoden in den Wellenleitern, welche sich in der unteren Atmosphäre bilden, in Zusammenhang gebracht werden kann. Die Laufzeitmessungen mit einem Feld von räumlich verteilten Empfängern ermöglichte es, die Beziehung zwischen horizontalen und zeitlichen Skalen der Fluktuationen durch Berechnung ihrer Kreuzleistungsspektren und zugehörigen Phasenspektren zu bestimmen. In weiteren Analysen wird eine Generalisierung der erhaltenen Ergebnisse angestrebt, um den Einfluss der IGW's auf die untere Atmosphäre zu charakterisieren. Damit können Parametrisierungen für die Wechselwirkung zwischen internen Schwerewellen und Turbulenz für Modelle der Grenzschicht oder auch Schallausbreitungsmodelle abgeleitet werden.

Literatur

- Arnold, K., Balogh, K., Ziemann, A., Barth, Manuela, Raabe, A., Daniel, D., 2005: Determination of meteorological quantities and sound attenuation via acoustic tomography. Forum Acusticum Budapest 2005, CD-ROM.
- Arnold, K., Ziemann, A., Raabe, A., Spindler, G., 2004: Acoustic tomography and conventional meteorological measurements over heterogeneous surfaces. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **85**, 175-186.
- Bendat, J.S., Piersol, A.G., 1986: *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. J.Wiley & Sons Inc., New York, 566 S..
- Chimonas, G., 2002: On internal gravity waves associated with the stable boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, **102**, 139-155.
- Chunchuzov, I.P., 2002: On the high-wavenumber form of the Eulerian internal wave spectrum in the atmosphere. *J. Atm. Sci.*, **59**, 1753-1772.
- Chunchuzov I., Kulichkov, S., Perepelkin, V., Ziemann, A., Arnold, K., Kniffka, A., 2007: Acoustic tomographic study of the mesoscale coherent structures in the lower atmosphere. Part II: The mesoscale variations of turbulence parameters induced by internal gravity waves in the troposphere. *Meteorol. Atmos. Phys.*, in review.
- Chunchuzov, I.P., S. Kulichkov, A. Otrezov, V. Perepelkin, 2005: Acoustic pulse propagation through a fluctuating stably stratified atmospheric boundary layer. *J. Acoust. Soc. Am.*, **117**, 1868-1879.
- Finnigan, J.J. F. Einaudi, Fua, D., 1984: The interaction between an internal gravity wave and turbulence in the stably-stratified nocturnal boundary layer. *J. of Atmos. Sci.*, **41**, 2409-2436.
- Kniffka, A., Arnold, K., Barth, M., Ziemann, A., Chunchuzov, I., Kulichkov, S., Perepelkin, V., 2006: Internal gravity waves in the lower atmosphere: spatial and temporal

charac- teristics. Wiss. Berichte Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 7222, International Sym- posium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing ISARS, Garmisch-Partenkirchen, 109-111.

Ziemann, A., K. Arnold, A. Raabe, 2002: Acoustic tomography as a Remote Sensing Method to Investigate the Near-Surface Atmospheric Boundary Layer in Comparison with In Situ Measurements. *J. Atmos. Ocean. Techn.*, **19**, 1208-1215.

Adressen der Autoren

A. Kniffka + A. Ziemann, Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig, kniffka@uni-leipzig.de

I. Chunchuzov, S. Kulichkov + V. Perepelkin, Oboukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia