

## 4. Kapitel

### Zusammenfassung und Ausblick

#### 4.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Eigenschaften von Schwerewellen und ihre Einordnung in die bekannten Bewegungsvorgänge der Atmosphäre beschrieben.

Außerdem wurde die Anwendung eines Spektralmodells [Fritts und van Zandt 1993] zur Untersuchung der spektralen Eigenschaften von Schwerewellen dargestellt.

Die Motivation und der wissenschaftliche Kontext dieser Arbeit sind eng mit der „SPARC Gravity Wave“ Initiative verbunden. Diese Gruppe untersucht die räumliche und zeitliche Variabilität von Wellenaktivität in der unteren Atmosphäre und stellt eine möglichst globale Klimatologie von Schwerewellenparametern, wie Energiedichte und horizontaler und vertikaler Ausbreitungsrichtung, auf. Ziel der SPARC-Initiative ist es, eine Antwort auf die Frage zu finden, wie man in Modellen der atmosphärischen Zirkulation (GCM) den Einfluss von Schwerewellen auf den Grundstrom innerhalb der Troposphäre und Stratosphäre parametrisieren kann.

Für den Anteil von stationären Wellen (z.B. über Gebirgen) sind Ort und Art der Entstehung bereits gut erfasst. Es herrscht jedoch bislang Unklarheit darüber, wo nicht-stationäre Schwerewellen entstehen und wie groß ihr Anteil ist. Das Ansteigen von Schwerewellenaktivität in der Nähe von Frontalzonen und „Jetstreams“ über dem Ozean [Fritts und Nastrom 1992] ist ein erster Hinweis darauf, dass auch andere Quellen als Gebirge einen nicht unerheblichen Anteil an der Schwerewellenaktivität besitzen. Durch systematische Auswertung eines vierjährigen Datensatzes von Radiosondendaten einer Station in den mittleren Breiten (Lindenberg) konnte hier ein weiterer Beitrag zur Erstellung einer globalen Klimatologie von Schwerewellenaktivität geleistet werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Schwerewellenaktivität an einer Station in den mittleren Breiten ist, wie schon von anderen Autoren festgestellt, deutlich geringer (Faktor  $\frac{1}{2}$ ) als in tropischen Gebieten

[Allen und Vincent 1995]. Es gibt einen typischen Jahresgang von maximaler Schwerewellenaktivität im Winter und minimaler Aktivität im Sommer. Beim Vergleich der Energiedichte von Lindenberg mit einer Station in der Nähe der Alpen ergeben sich dort durchgehend etwas höhere Werte, was auf die dort häufig vorhandenen Leewellen zurückzuführen ist. [Dörnbrack und Birner, persönliche Mitteilungen 2000 und 2001].

- Der typische Jahresgang ist abhängig vom Hintergrundwind, bzw. von der synoptischen Situation. Dies wird deutlich anhand des Datensatzes von 1996. Hier war während des ganzen Jahres in der Troposphäre ein geringerer Hintergrundwind als in den anderen Jahren zu verzeichnen. So wurde der Unterschied von Wintermaximum zu Sommerminimum geringer und saisonale Unterschiede waren fast nicht mehr zu erkennen.
- Die beobachteten Schwerewellen breiten sich im Mittel entgegen der meist herrschenden Westströmung aus. In der Troposphäre breitet sich die Hälfte der Schwerewellen aufwärts aus, die andere Hälfte nach unten, während sich in der Stratosphäre etwa 80 Prozent der Wellen aufwärts bewegen und 20% abwärts. Dies deutet auf eine Quelle der Schwerewellen in der oberen Troposphäre hin. Da die Phasengeschwindigkeit der Schwerewellen bei etwa 10 m/s liegt, handelt es sich also nicht um Leewellen, welches stationäre Wellen sind. Dies war auch nicht zu erwarten, da Lindenberg mindestens 600 km entfernt von ausgedehnten Gebirgszügen liegt.
- Die Monatsmittel der Energiedichte getrennt berechnet zu den vier über den Tag verteilten Startterminen der Radiosonde in Lindenberg ergaben keinen Tagesgang in der Schwerewellenaktivität. Konvektion, die einem Tagesgang unterliegt, ist demnach als dominierende Quelle für Schwerewellen über Lindenberg auszuschließen.
- Als Quellen für Schwerewellen über Lindenberg kommen aufgrund der Ergebnisse aus der Spektralanalyse für die Eigenschaften der beobachteten Schwerewellen Fronten und der „*jetstream*“ während der Anpassung ageostrophischer Winde an das geostrophische Gleichgewicht („*geostrophic adjustment*“) in Frage. Die beobachteten Wellen haben Frequenzen in der Nähe der lokalen Inertial-Frequenz, es sind also Inertial-Schwerewellen. Diese langsamen Schwerewellen werden, wie bisherige Beobachtungen und Modellstudien vermuten lassen, bei der Anpassung an das geostrophische Gleichgewicht in und um die „*jetstream*“-Region in der oberen Troposphäre ausgesendet. Auch die horizontalen Wellenlängen sind eher großskalig und bewegen sich im Bereich von mehreren hundert Kilometern.
- Ein Vergleich der Energiedichte aus einzelnen Profilen mit dem Durchgang von Kaltfronten über den gesamten Zeitraum hinweg zeigte, dass häufig vor, während oder nach einer Kaltfront die Energiedichte und damit die Schwerewellenaktivität ansteigt. Jedoch ist zu bemerken, dass während des sommerlichen Minimums der zu beobachtenden

den Schwerewellenaktivität nicht weniger Kaltfronten auftreten als im Winter. Dieses bedeutet jedoch nicht, dass Fronten als Quellen grundsätzlich ausgeschlossen werden müssen. Vielmehr sollte es so interpretiert werden, dass im Sommer die Bedingungen des Hintergrundwindes ein Ausbreiten der im Zusammenhang mit Fronten entstehenden Schwerewellen verhindern. Die geringeren Windgeschwindigkeiten bewirken, dass die Wellen in geringeren Höhen als im Winter gedämpft werden und sich so nicht weiter nach oben ausbreiten.

- Mehrere Fallstudien zeigten, dass das Auftreten von erhöhten Energiedichten über Lindenberg fast immer mit erhöhten Windgeschwindigkeiten in der Tropopausen-Region zusammenfällt. Es konnten mehrere Fälle identifiziert werden, bei denen eine ähnliche synoptische Situation vorlag, wie in der simulierten Entstehung von Inertial-Schwerewellen während der Entwicklung einer baroklinen Instabilität von O'Sullivan und Dunkerton [1995].
- Damit erscheint die Anregung von Schwerewellen über Lindenberg durch die Anpassung eines geostrophischen Ungleichgewichtes als dominierender Anregungsmechanismus vorzuherrschen.

## 4.2 Ausblick

Für eine aussagekräftigere Klimatologie ist die Erweiterung auf einen längeren Zeitraum und auf weitere Stationen erstrebenswert. Ein Zeitraum von vier Jahren genügt, um die Methode der Klimatologie und eine leichte Tendenz der Eigenschaften von Schwerewellen in eine bestimmte Richtung zu erkennen. Zehn Jahre sind das Minimum, um eine aussagekräftige Klimatologie zu erstellen.

Um den Einfluss des Gebirges auf die Schwerewellenaktivität abzuschätzen, könnte man einen ausführlichen Vergleich der täglichen Werte der Schwerewellen mit einer Station in der Nähe der Alpen (z.B. Oberschleißheim) vornehmen.

Es gibt nach wie vor keine Antwort auf die Frage, wie genau Schwerewellen in Gebieten entstehen, wo Balancierung des geostrophischen Gleichgewichtes stattfindet. Es ist durch einige Fallstudien und Modellstudien nur das gleichzeitige Auftreten in einer Region der Atmosphäre von Schwerewellen und ageostrophischen Bewegungen beobachtet worden. Eine Vorstellung, um weitere Aufklärung zu liefern, wäre sozusagen das „Verfolgen“ der Schwerewellen, die Dokumentation ihrer Eigenschaften von ihrem wahrscheinlichen Entstehungsort z.B. an der „exit region“ eines „jets“ entlang des Wellenmusters in Karten der horizontalen Divergenz über mehrere Radiosondenstationen hinweg. Im Falle der einen vorgestellten Fallstudie wäre das z.B. in München am 4. April, 18:00 UTC und in Thessaloniki am 6. April 1998.

Weiterhin ist eine solche Klimatologie von Schwerewellen sehr gut geeignet, um die Möglichkeit zu testen, ob man in Satellitenmessungen, wie sie vom Satelliten CHAMP vorliegen, wirklich Schwerewellen beobachten kann. Dazu wäre es ebenfalls sinnvoll, eine Schwerewellen-Klimatologie aus hochaufgelösten Radiosondendaten zu erstellen, die bis in den Messzeitraum von CHAMP (ab Juni 1999 bis heute, Ende 2001) reicht.