

Einleitung

In der Atmosphäre gibt es unterschiedliche Bewegungsformen. Viele dieser Formen lassen sich als Wellenbewegungen verstehen, die sich wiederum nach ihren zeitlichen und räumlichen Größenordnungen vielfältig aufspalten. Diese Arbeit untersucht die Eigenschaften von Schwerewellen, das sind Wellen aus dem kleinräumigen Anteil des Spektrums atmosphärischer Bewegungen. Schwerewellen sind Oszillationen in meteorologischen Parametern wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Druck und Dichte, die sich als Effekt der Schichtung der Luft im Zusammenhang mit der Schwerkraft verstehen lassen; letztlich sind sie damit auf die Auftriebskraft zurückzuführen. Im Englischen werden sie daher als „gravity waves“ oder auch „buoyancy waves“ bezeichnet. Schwerewellen können sich bis in große Höhen der Atmosphäre ausbreiten [Hines 1960], und sie treten in der Atmosphäre mit einer Vielzahl möglicher Frequenzen und Wellenlängen auf. Ihre horizontalen Wellenlängen variieren in der Größenordnung von wenigen hundert Kilometern bis hin zu etwa tausend Kilometern; gegenüber einem erdfesten Beobachter treten Perioden von Minuten bis zu einigen Stunden auf. Hines [1974] formulierte für die Entstehung von Schwerewellen: *"Schwerewellen können an thermisch konvektiver Instabilität, Gewittern, sich bewegenden Böenlinien („squall lines“¹), Fronten im Allgemeinen, Instabilitäten im atmosphärischen Grundstrom durch planetarische Wellen, tropische Zyklonen, generell an Instabilitäten, Scherungsinstabilitäten (besonders an denen von „jetstreams“), Instabilitäten durch photochemische Veränderungen und Änderungen im Wasserhaushalt, Explosionen, Vulkane u.s.w. entstehen. Generell kann man sagen, dass alles, was in der Atmosphäre Änderungen auf der Zeitskala von Minuten bis Stunden verursacht, mit der Aussendung von Schwerewellen verbunden sein kann."*

Obwohl Schwerewellen zu den kleinräumigen Erscheinungen in der Atmosphäre gerechnet werden, haben sie dennoch Einfluss auf großskalige Bewegungen. Schwerewellen breiten sich vertikal aus und ihre Amplitude nimmt aufgrund der mit der Höhe abnehmenden Dichte zu. Erreicht die Amplitude eine gewisse Größe, wird die Schichtung zwischen

¹ Unter einer „squall line“ versteht man eine linienhafte Anordnung von kräftigen Gewitterzellen, die sich auf der Vorderseite einer mesoskaligen Abwindregion ausbilden können. Vor allem über dem mittleren Westen der USA sowie im tropischen Bereich Westafrikas treten solche „squall lines“ häufig mit einer bemerkenswerten Intensität auf.

Amplituden Minimum und Maximum instabil, d.h. der Gradient der potentiellen Temperatur kehrt sich dort lokal um, die Wellen beginnen zu brechen und geben Impuls und Energie an den Grundstrom ab. Schwerewellen transportieren also Impuls und Energie von ihrem Entstehungsort (z.B. Orographie in der Troposphäre) in andere Höhenregionen z.B. in die Stratosphäre und Mesosphäre und beeinflussen dort die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre.

Ihre Untersuchung ist deshalb nicht nur aus wissenschaftlichem Grundlageninteresse heraus interessant, sondern besitzt auch eine große Bedeutung für die Klimaforschung und numerische Wettervorhersage. Die in diesem Zusammenhang verwendeten numerischen Modelle zur Simulation der großräumigen Zirkulation in der Atmosphäre stoßen immer wieder auf das Problem, die Effekte von Bewegungen darzustellen, deren räumliche Skalen nicht mehr in einem globalen Modell (typische auflösbare Skalen in heutigen GCMs (*General Circulation Model*) sind T42, das entspricht einem Gitterpunktabstand von $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ oder etwa 310 km zwischen den Gitterpunkten am Äquator) aufgelöst werden können. Ein klassisches Beispiel für die Parametrisierung nichtaufgelöster Prozesse in Klima-Modellen ist die Konvektion, welche für realistische Modelle der Atmosphäre - und insbesondere der Troposphäre - unbedingt notwendig ist. Ohne konvektive Prozesse ist die Temperatur der oberen Troposphäre in einem Atmosphärenmodell infolge fehlender latenter Wärme viel zu gering [Manabe und Wetherald 1967, Brasseur 1984].

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen frühen Klimamodellen und Beobachtungen sind die gegenüber Beobachtungen zu kalten Polargebiete in der Winter-Stratosphäre und der zu starke „*polar night jet*“ in beiden Hemisphären und allgemein zu starke Westwinde. Ein erster Versuch, diese Abweichungen mit Hilfe der Parametrisierung der Effekte von orographisch angeregten Schwerewellen zu vermindern [Palmer et al. 1986, McFarlane 1987], ergab leichte Verbesserungen: es gelang z.B. den unrealistisch starken zonalen Westwind abzuschwächen und den troposphärischen „*jetstream*²“ zu schließen [McLandress 1998]. Nach Hamilton [1996] werden diese Abweichungen der Modelle zu den Beobachtungen auch geringer, wenn man die Auflösung in den GCMs erhöht und damit die Schwerewellen selbst im Modell entstehen lässt. Eine Erhöhung der Auflösung erfordert jedoch kostspielige Rechenzeit und ist daher (im Moment) nicht praktikabel. Deshalb versucht man, die Effekte von kleinräumigen Schwerewellen in den GCMs mit verschiedenen Parametrisierungen zu modellieren (z.B. Warner and McIntyre [1991], Fritts und Lu [1993], Medvedev und Klaasen [1995] oder Hines [1997]). Für eine solche Para-

² „*Jetstream*“, wird ein Starkwindband genannt, dessen Geschwindigkeit 30 m/s übersteigt. Die Ausdehnung beträgt in der Höhe 1-4 km, in der Breite (quer zur Strömungsrichtung) jedoch 100-500 km.

metrisierung ist es notwendig, die Entstehungsorte und –gründe für Schwerewellen zu kennen.

Seit den neunziger Jahren wurden die Effekte aller kleinräumigen Schwerewellen (orographisch und nicht-orographisch angeregte) auf die globale Zirkulation als ebenso bedeutsam und ihre Parametrisierung als ebenso notwendig wie die der Konvektion für eine realistische Wiedergabe der natürlichen Variabilität und des mittleren Zustands in der mittleren Atmosphäre erkannt [Hamilton 1996, McLandress 1998]. Eine Bestätigung der Wichtigkeit von Schwerewellen ist die erstmalig gelungene Simulation einer realistischen QBO, eine quasi-zweijährige Oszillation (*Quasi-Biennial Oscillation*) des vorherrschenden zonalen Windes in der tropischen Stratosphäre in einem GCM. Es gelang mit einer Parametrisierung der Effekte von orographisch angeregten Schwerewellen und einer einfachen Parametrisierung der Impulsflüsse durch nicht-orographisch angeregte Schwerewellen [Scaife et al. 2000] die QBO mit einer realistischen der Realität entsprechenden Periode zu simulieren. Vorher gab es bereits viele Versuche, eine QBO in einem GCM zu simulieren [Takahashi et al. 1997], bei denen die Periode der QBO allerdings nie mit den Beobachtungen übereinstimmte.

Aus der Erkenntnis heraus, wie wichtig eine realistische Schwerewellen-Parametrisierung in den Klimamodellen ist, hat sich die SPARC³-Gravity-Wave-Initiative zusammengefunden. Ihr Bestreben ist es, die räumliche und zeitliche Variabilität der Schwerewellenaktivität zu untersuchen, mit dem Ziel eine globale Klimatologie von wichtigen Schwerewellen-Parametern, wie Energiedichte (als Maß für die Schwerewellenaktivität), horizontale und vertikale Wellenlängen sowie Ausbreitungsrichtung aufzustellen. Die SPARC-Initiative möchte dadurch eine Antwort auf die Frage finden, wie man in GCMs den Einfluss von Schwerewellen innerhalb der Atmosphäre sinnvoll parametrisieren kann. Teile der vorliegenden Arbeit lieferten einen Beitrag aus den mittleren Breiten für diese Klimatologie [Vincent 2001].

Die bekannteste und bereits ausführlich untersuchte Form der Schwerewellen, die Leezellen, entstehen, wenn Luft über ein Gebirge (Orographie) strömt und dabei in Schwingungen versetzt wird [Kuettner 1939a/b, Queney 1948, Bretherton 1969b, Lilly und Kennedy 1973, Smith 1979, Nastrom et al. 1987, Nastrom und Fritts 1992]. Schwerewellen werden aber beispielsweise auch dort angeregt, wo das geostrophische Gleichgewicht - etwa in der Nähe eines stark gekrümmten „*jetstream*“ - gestört ist. Hochreichende Konvektion in den Tropen, eine starke Frontogenese in mittleren Breiten oder Instabilitäten und die Scherzonen an „*jetstreams*“ können ebenfalls Schwerewellen hervorrufen [Potter und Holton 1995, Griffith und Reeder 1996].

³ Stratospheric Processes And their Role in Climate. SPARC ist ein WCRP (World Climate Research Project) Projekt.

Je nach Anregungsmechanismus weisen die erzeugten Schwerewellen unterschiedliche Charakteristiken auf: Leewellen beispielsweise sind stationär (ihre horizontale Phasengeschwindigkeit ist gleich Null); die anderen genannten Mechanismen (Instabilitäten, Konvektion, Scherzonen, Fronten u.s.w.) liefern ganze Spektren von Schwerewellen, deren horizontale Phasengeschwindigkeiten von Null verschieden sind. Die Parametrisierung von Schwerewellen in numerischen Modellen wird durch die Vielzahl der möglichen Anregungsmechanismen und der damit zusammenhängenden Eigenschaften der Schwerewellen stark erschwert. Insbesondere muss zu einer verbesserten Simulation des Klimas der von den in den numerischen Modellen nicht aufgelösten Schwerewellen verursachte Austausch von Energie und Impuls richtig parametrisiert werden. Dazu ist es notwendig, ausführliche Kenntnis über das zeitliche und räumliche Auftreten von Schwerewellen, deren Quellen (eben nicht nur die Orographie) und der Ausbreitung von Schwerewellen in der gesamten Atmosphäre zu erlangen.

Weitgehend unbekannt sind die Charakteristiken von Schwerewellen, die in mittleren Breiten auftreten, aber nicht durch Berge angeregt werden. Unklar ist, welches die Quellen für Schwerewellen in diesen Gebieten sind, wie die saisonale Variabilität der Schwerewellenaktivität ist, und wodurch sie begründet ist. Konvektion ist hier deutlich geringer als in tropischen Gebieten, wo Konvektion eine bedeutende Quelle für Schwerewellen ist [Vincent und Alexander 2000]. Allerdings gibt es die Polarfront, an der fortlaufend Zyklone genese stattfindet. An den entstehenden Frontalzonen und an „*jetstreams*“ können in den mittleren Breiten auch ohne Gebirge Schwerewellen entstehen [Uccellini und Koch 1987].

Die vorliegende Arbeit soll diese Wissenslücke um die Eigenschaften von Schwerewellen schließen, indem eine umfassende Charakterisierung von Schwerewellen anhand eines mehrjährigen Datensatzes (1995-1998) einer ausgewählten Radiosondenstation, Lindenberg (52.1°N, 14.1°E) in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre unternommen wird. Es wird untersucht, ob Konvektion, Frontalzonen, „*jetstreams*“ oder bestimmte Wetterlagen als Quellen von Schwerewellen in den mittleren Breiten in Frage kommen können. Die ausgewählte Station Lindenberg hat den Vorteil, dass sie in einem überwiegend flachen Gebiet und weit entfernt von Gebirgsketten liegt (die europäischen Alpen sind etwa 600 km entfernt). Daher kann man davon ausgehen, dass Leewellen infolge vom Überströmen eines Gebirges nicht auftreten werden. Als Quellen kommen demnach eher die bereits genannten synoptischen Erscheinungen, die das eigentliche Wetter bestimmen, in Frage.

Gliederung

In dieser Arbeit wird zuerst ein kurzer Überblick über Wellenbewegungen in der Atmosphäre gegeben, wobei besonders auf die Schwerewellen eingegangen wird (Kapitel 1). Darauf folgt in Kapitel 2 eine Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen von

Schwerewellen, der Vorstellung der Dispersionsgleichung von Schwerewellen und der Darstellung der Eigenschaften von Schwerewellen. Weiterhin wird im Kapitel 2 das von Fritts und van Zandt [1993] entwickelte Spektralmodell für Schwerewellen vorgestellt. Auf Grundlage dieses Modells sind die Untersuchungen der Eigenschaften und spektralen Parameter der Schwerewellen in dieser Arbeit vorgenommen worden. Am Ende des Kapitels 2 werden die verwendeten Radiosondendaten beschrieben und die verwendeten Analyseprozeduren erklärt. Im Kapitel 3 werden die Ergebnisse für die Klimatologie der Schwerewellenaktivität und die spektralen Eigenschaften der auftretenden Schwerewellen über Lindenberg vorgestellt. Dabei wird anhand von Korrelationen und Fallstudien diskutiert, welche möglichen Quellen in Frage kommen. Den Abschluss bildet das Kapitel 4 mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick.