

Untersuchung der Quasi - 2 - Tage Welle im Sommer 2005

I. Weithäuser, G. Stober, K. Fröhlich, Ch. Jacobi

Zusammenfassung

Das seit Juli 2004 kontinuierlich arbeitende Meteorradar am Observatorium Collm (53,3°N, 13°E) der Universität Leipzig dient der Messung des horizontalen Windfeldes sowie der Temperatur in der Mesopausenregion. Neben der Betrachtung des jahreszeitlichen Verhaltens von Grund- und Gezeitenwind ist es möglich, die Aktivität planetarer Wellen zu untersuchen. Spezielles Interesse gilt dabei der Quasi-2-Tage Welle im Sommer 2005, da zu dieser Zeit sowohl eine Verschiebung der maximalen Amplituden hin zu kürzeren als auch zu längeren Perioden beobachtbar war. Als mögliche Ursache dafür werden nichtlineare Wechselwirkungen zwischen der Quasi-2-Tage Welle und planetaren Wellen mit größeren Perioden gesehen. Die Untersuchung derartiger Wechselwirkungen erfolgt mit Hilfe der Bispektralanalyse.

Abstract

Since July 2004 the meteor radar operates continuously at the Observatory (53,3°N, 13°E) of the University of Leipzig. It provides data of the horizontal wind field as well as the temperature of the mesopause region. In addition to the consideration of the seasonal behaviour of prevailing and tidal winds it is possible to examine the activity of planetary waves. Because of the shift of maximum amplitudes of the quasi-2-day wave in summer 2005 to shorter as well as longer periods the event has to be considered more in detail. Possible reasons for the displacements are nonlinear couplings between the quasi-2-day wave and planetary waves with longer periods. The examination of those couplings is performed using bispectral analyses.

1. Einleitung

Planetare Wellen, auch als globalskalige Rossbywellen bekannt, werden in der Troposphäre angeregt und breiten sich nach oben bis in die untere Thermosphäre aus [Beard et al., 2001]. Gewöhnlich werden sie entsprechend ihrer theoretisch zu erwartenden Periodizität klassifiziert, da in der Realität häufig Abweichungen von diesen Periodizitäten beobachtet werden. Daher wird meist die Bezeichnung quasi-periodisch verwendet. Zu den typischen Vertretern planetarer Wellen zählen die Quasi-2-, 5-, 10- und 16-Tage Welle. Oszillationen von mehr als 20 Tagen werden üblicherweise nicht mehr den planetaren Wellen zugeordnet, da es keine Übereinstimmung mit Perioden gibt, die gewöhnlich für Rossbymoden erwartet werden [Beard et al., 2001].

Der Schwerpunkt liegt im Folgenden in der Untersuchung der Quasi-2-Tage Welle (QZTW). Im Gegensatz zu den meisten planetaren Wellen kommt sie verstärkt in den Sommermonaten Juli und August vor. Jedoch wird auch eine Aktivität der QZTW im Winter nicht ausgeschlossen [Chshyolkova et al., 2005]. Während der Sommermonate tritt sie meist in einem oder zwei Ausbrüchen kurz nach der Sonnenwende [Fröhlich, 2006] für die Dauer von 6 bis 20 Tagen [Chshyolkova et al., 2005] auf. Hinsichtlich einer möglichen Entstehungsursache verweist [Jacobi et al., 1998] zum Beispiel auf die Aussage von [Plumb, 1983], dass barokline Instabilitäten des sommerlichen Mesosphärenjets für die Entstehung der QZTW verantwortlich sind. Die Periode der Oszillation beschränkt sich häufig nicht nur auf 48 Stunden, sondern es ist eine Aufspaltung in mehrere Wellen feststellbar, die eventuell auf nichtlineare Wechselwirkungen mit anderen planetaren Wellen zurückgeführt werden kann [Chshyolkova et al., 2005] und [Jacobi et al., 2001]. Ein derartiges Verhalten ist gut in den Daten des Sommers 2005 zu erkennen, weshalb eine genauere Analyse erfolgt

2. Datengewinnung und -analyse

Bei dem verwendeten Meteorradar handelt es sich um ein All-Sky-Interferometric Meteorradar (SKiYMET), welches eine Sende- und fünf Empfangsantennen besitzt. Das Messprinzip beruht darauf, dass vom Gerät ausgesendete Radiowellen auf ionisiertes ambipolares Plasma treffen, welches beim Eindringen von Meteoroiden in die Erdatmosphäre entsteht, und an diesem reflektiert werden.

Unter Verwendung der Informationen über die gesendete und reflektierte Welle werden im Falle der Detektion eines Meteors zum Beispiel Angaben über die Position und Radialgeschwindigkeit des Meteors in einer gesonderten Datei abgespeichert. Die Radialgeschwindigkeit spielt vor allem im Zusammenhang mit der Bestimmung des Horizontalwindes eine entscheidende Rolle. Letzterer wird durch eine Projektion der einzelnen gemessenen Radialgeschwindigkeiten auf den mittleren Wind ermittelt, wobei die Differenz zwischen beiden minimal werden soll.

Der anschließend in Form von halbstündigen Werten vorliegende zonale (v_z) und meridionale (v_m) Wind kann mit Hilfe einer multiplen Regression in Grund- und Gezeitenwindkomponenten aufgespaltet werden [Viehweg, 2006]:

$$v_z(t) = v_{0_z} + \sum_i (a_{i_z} \sin(\omega_i t) + b_{i_z} \cos(\omega_i t)), \quad (1)$$

$$v_m(t) = v_{0_m} + \sum_i (a_{i_m} \sin(\omega_i t) + b_{i_m} \cos(\omega_i t)). \quad (2)$$

Dabei ist t die Zeit und ω_i die Kreisfrequenz, welche sich aus $\omega_i = 2\pi f_i$ ergibt. Als Frequenzen f_i wurden in diesem Fall 8, 12, 24 und 48 Stunden angenommen. a_i und b_i sind die gesuchten Koeffizienten, die zur Bestimmung der Amplituden (A_i) und Phasen (φ_i) der Oszillationen notwendig sind:

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad (3)$$

$$\varphi_i = \frac{1}{\omega_i} \arctan \frac{b_i}{a_i}. \quad (4)$$

Erwähnt sei noch, dass durch Einführung von ω_i in Gleichung 4 die Angabe der Phase in Stunden ermöglicht wird.

Eine weitere Möglichkeit die Gezeitenparameter Amplitude und Phase, sowie zusätzlich die Power zu bestimmen, ist durch die Verwendung einer Fouriertransformation gegeben. Ein entscheidender Vorteil gegenüber der multiplen Regression ergibt sich dadurch, dass eine Vorgabe der gesuchten Frequenzen nicht notwendig ist, sondern die Zeitreihe schrittweise nach entsprechenden Spektrallinien, die sich vom Grundwind abheben, abgetastet wird. Dies ermöglicht eine deutlich breitere Analyse. Basis der Fouriertransformation bildet Gleichung (5):

$$f(t) = \sum_{n=0}^{N/2} (a_n \sin(\omega_n t) + b_n \cos(\omega_n t)). \quad (5)$$

Dabei entspricht t den einzelnen Zeitpunkten und N der Länge der Zeitreihe. Die Anzahl der zu untersuchenden Frequenzen ist somit einerseits begrenzt durch die Gesamtlänge N (z.B. in Stunden), was der kleinsten Frequenz entspricht und andererseits durch die zeitliche Auflösung der Messreihe (hier 60 Minuten), was gleich der größten Frequenz ist. Die gesuchten Gezeitenparameter Amplitude (A), Phase (φ) und Power (P) ergeben sich durch die Koeffizienten a_n und b_n :

$$A = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{1}{\omega_i} \arctan \frac{a_n}{b_n}, \quad (7)$$

$$P = a_n^2 + b_n^2. \quad (8)$$

Wird die Fouriertransformation nicht auf die gesamte Zeitreihe, sondern auf ein Zeitfenster, welches beliebig verschoben werden kann, angewendet, so entstehen gleitende Spektren.

Da für die Durchführung einer Fouriertransformation eine kontinuierliche Zeitreihe vorliegen muss, werden vorhandene Datenlücken zuvor geschlossen. Dies ist zum Beispiel durch eine lineare Interpolation möglich, wobei sich diese Methoden nur für Datenlücken im Bereich von bis zu zwei Stunden eignet. Für die hier dargestellte Messung wurde daher im Falle einer Datenlücke, die zeitliche Entwicklung der vor dem Ausfall liegenden Zeitreihe mit Hilfe einer Fouriertransformation analysiert und mit diesem Wissen die Lücke geschlossen.

Für die Untersuchung der erwähnten nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Wellen wird eine Bispektralanalyse durchgeführt. Dieses Verfahren beruht üblicherweise auf einer zweidimensionalen Fouriertransformation und untersucht neben der Frequenz- auch die Phasenbeziehung wechselwirkender Wellen. Aus der Interaktion von Wellen gehen Sekundärwellen hervor, deren Frequenzen sich aus der Summe und Differenz der ursprünglichen Wellen ergeben. Ein ähnliches Verhalten sollte auch für die Phase beobachtbar sein. Ist dies der Fall, dann spricht man von quadratischer Phasenkopplung [Beard et al., 1999]. Sind beide Bedingungen erfüllt, so weist das Bispektrum Werte ungleich Null auf und deutet somit eine stattgefundenene Wechselwirkung an. Zu beachten sei, dass derartige Frequenzbeziehungen auch zufällig sein können, was mit der Bispektralanalyse jedoch nicht unterschieden werden kann [Beard et al., 1999]. Nähere Erläuterungen zum mathematischen Hintergrund des Verfahrens erfolgen zum Beispiel bei [Beard et al., 1999] oder [Clark und Bergin, 1997].

3. Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 1 ist der Verlauf der zonalen (oben) und meridionalen (unten) Amplitude einer 48-stündigen Oszillation, berechnet durch multiple Regression, dargestellt. Die Analyse wurde für ein Zeitfenster von 10 Tagen durchgeführt, mit einer Verschiebung des Fensters um jeweils einen Tag. Die berechneten Werte sind der Mitte eines Zeitfensters zugeordnet.

In dieser Abbildung ist einerseits die meist stärkere Ausprägung der meridionalen Komponente gegenüber der zonalen Komponente erkennbar und andererseits das plötzliche und kurzzeitige Auftreten der QZTW. Interessant ist der deutliche Rückgang der Amplitude zwischen dem 16. und 20. Juli 2005. Eine Erklärung für dieses Verhalten geht aus Abbildung 1 nicht hervor, weshalb eine genauere Untersuchung des Zeitraums unter Verwendung gleitender Spektren erfolgt (Abbildungen 2 und 3).

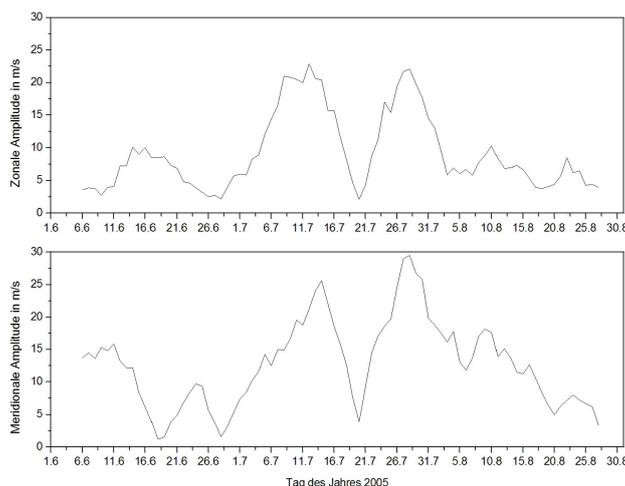


Abb.1: Zeitliche Entwicklung der zonalen (oben) und meridionalen (unten) Amplitude für die Zeit vom 01.06.2005 bis 31.08.2005 in 91 km Höhe (10-Tagesanalysen)..

Bereits auf den ersten Blick fällt bei beiden Horizontalwindkomponenten auf, dass sich die Welle nicht nur auf 48 Stunden beschränkt, sondern sowohl im Bereich größerer als auch niedrigerer Frequenzen ein Anstieg der Amplituden (Grauskala in m/s) stattfindet. In der zonalen Komponente kommt es Mitte Juni zunächst zu einer geringen Zunahme der Amplitude. Der Hauptausbruch der QZTW setzt Anfang Juli ein, wobei ein erstes lokales Maximum um den Tag 42 bei rund 48 Stunden erreicht wird. Zwischen Tag 48 und 52 ist ein starker Rückgang der Amplitude bei 48 Stunden erkennbar, verbunden mit einem Anstieg der Amplitude im Bereich kleinerer Perioden bis zu einem lokalen Maximum bei 40 Stunden am Tag 50. Anschließend verlagern sich die maximalen Amplituden wieder in den Periodenbereich von 48 Stunden, wo um den Tag 57 das dritte Maximum erreicht wird. Schließlich fallen die Amplituden bis Ende Juli stark ab. Im August kommt es nur noch zu sehr schwachen Ausbrüchen, jedoch ebenfalls wieder in den erwähnten Frequenzbereichen.

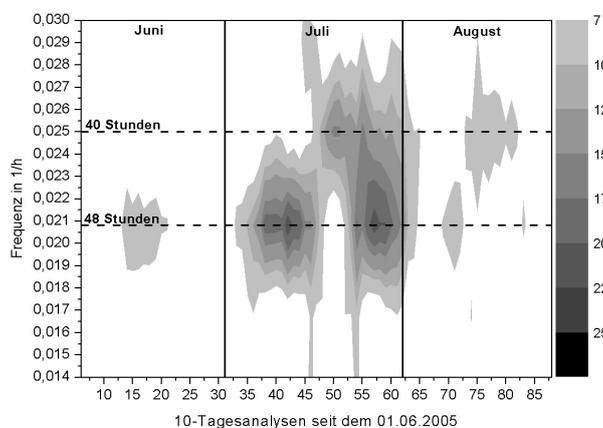


Abb.2: Gleitendes Spektrum des zonalen Horizontalwinds für den Zeitraum vom 01.06.2005 bis 31.08.2005 für ein verwendetes Zeitfenster von 10 Tagen und einer Verschiebung um einen Tag, in 91 km Höhe.

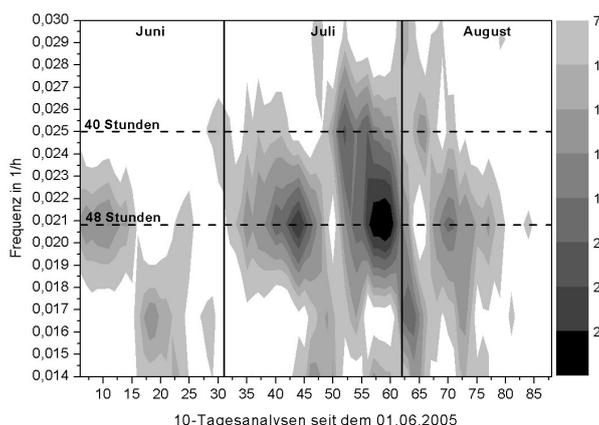


Abb.3.: Analog zu Abbildung 2 jedoch für den meridionalen Horizontalwind.

Schaut man sich ergänzend die meridionale Windkomponente an, so treten auch hier die beiden Hauptmaxima um die Tage 42 und 57 bei rund 48 Stunden, das Nebenmaximum bei 40 Stunden und der starke Rückgang der Amplitude bei 48 Stunden um den Tag 50 auf. Nach dem Erreichen des meridionalen Hauptmaximums Ende Juli kommt es im Bereich der reinen 2-Tage Welle erneut zu einem starken Rückgang der Amplitude, verbunden mit einem wiederholten, jedoch geringeren, Anstieg der Amplitude im Bereich um 40 Stunden. Gegen Tag 70 wird außerdem ein weiteres kleineres Maximum bei circa 48 Stunden erreicht.

Die aus den gleitenden Spektren abgeleiteten Kenntnisse führten zur Untersuchung der 40-Stunden Welle mit multipler Regression in Analogie zur 48-stündigen Oszillation (Abbildung 1). In Abbildung 4 sind beide Zeitreihen zum Vergleich übereinander gelegt.

Aus ihr geht deutlich die Verschiebung der maximalen Amplitude von einer 48-stündigen Welle hin zu kürzeren Perioden hervor. So erreicht die zonale Amplitude im Bereich der reinen 2-Tage Welle am 20. Juli ein lokales Minimum mit einem Wert von 2,1 m/s und die 40-stündige Oszillation zur selben Zeit ein vorübergehendes Maximum mit 15,7 m/s. Auch die geringe Zunahme der Amplitude bei 48 und später bei 40 Stunden im August in der zonalen Komponente zeichnen sich ab. Für das fehlende ausgeprägte Minimum in der meridionalen Komponente bei 48 Stunden, mit Werten unterhalb von 7 m/s, Anfang August gibt es jedoch keine Erklärung.

Chshyolkova [Chshyolkova et al., 2005] beobachtete in ihren Messwerten ebenfalls eine Abweichung der Amplitude von einer reinen 2-Tage Welle. Ihre Daten beruhen auf einer 14-jährigen Messung in Saskatoon (52°N , 107°W) mit einem MF Radar. Aus ihnen geht hervor, dass die QZTW zu Beginn des Sommers Perioden im Bereich von 53 Stunden aufweist, welche mit fortschreitender Zeit auf rund 44 Stunden zurück gehen und zum Ende des Sommers wieder ansteigen. Weitere Ergebnisse sind auch bei [Beard et al., 2001] zu finden, die auf Messungen mit einem Meteorradar bei $53^{\circ}27'\text{N}$ und $1^{\circ}35'\text{W}$ zwischen 1989 und 1994 basieren. Eine erste Zunahme der Amplitude der QZTW wurde in der Zeit von Mitte bis Ende Juni bei rund 48 Stunden registriert, mit einer anschließenden Verschiebung der Maximalwerte zu geringen Perioden im Juli, gefolgt von größeren Perioden im August.

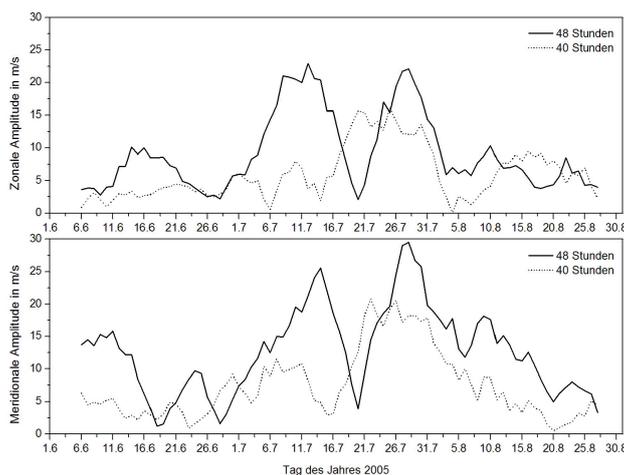


Abb.4: Vergleich der Zeitreihen für eine 40- und 48-stündige Oszillation der zonalen (oben) und meridionalen (unten) Windkomponente für den Zeitraum vom 01.06.2005 bis zum 31.08.2005 in 91 km Höhe.

Bei [Jacobi et al., 1997] wird das Verhalten der QZTW in einer Langzeitstudie untersucht. Auch dort konnte eine Verschiebung der Periode festgestellt werden, sowohl im Sommer als auch für das restliche Jahr. Außerdem wird auf die zwischenjährlichen Variationen dieser Oszillation, in Abhängigkeit vom solaren Zyklus, hingewiesen.

Als mögliche Ursache für die beschriebenen Abweichungen von einer reinen 2-Tage Welle geben sowohl [Chshyolkova et al., 2005] als auch [Jacobi et al., 2001] nichtlineare Wechselwirkungen mit anderen atmosphärischen Wellen, vor allem planetaren Wellen, an. Eine weitere Ursache für derartige Frequenzverschiebungen können auch Variationen der Hintergrundzirkulation sein.

Um die Windzeitreihe im Sommer 2005 auf derartige Wechselwirkungen zu untersuchen, erfolgte die Erstellung eines Bispektrums (Abbildung 5) für die zonale Komponente im Juli 2005, da dort die Wechselwirkungen in den hier verwendeten Messdaten deutlicher hervortreten als im meridionalen Fall. In Abbildung 6 ist ergänzend eine bessere Auflösung des Bispektrums im niederfrequenten Bereich dargestellt. Zusätzlich wurde das zonale Amplitudenspektrum für den Juli 2005 erzeugt, um auch dort zu überprüfen, ob sich nichtlineare Wechselwirkungen durch erhöhte Amplituden bemerkbar machen.

Nichtlineare Wechselwirkungen sind im Bispektrum durch Werte ungleich Null erkennbar, wobei im hier abgebildeten Fall alle Ergebnisse auf den Maximalwert des Spektrums normiert worden. Damit spiegelt die Grauskala in den Abbildungen 5 und 6 eine relative Amplitude wieder. Das Bispektrum wurde unter Vorgabe von 150 Frequenzen erzeugt. Kopplungsprozesse zwischen Wellen werden durch die Angabe eines Frequenztripletts (in 1/h), welches wie bei Pancheva [Pancheva et al., 2000] beschrieben wird, charakterisiert:

1. Zwei der drei Frequenzen sind durch die x - und y -Koordinate des „Peaks“ im Bispektrum gegeben.
2. Die dritte Frequenz ergibt sich aus dem Schnittpunkt einer Diagonalen mit der x- oder y-Achse. Diese verläuft vom oberen linken zum unteren rechten „Peak“.

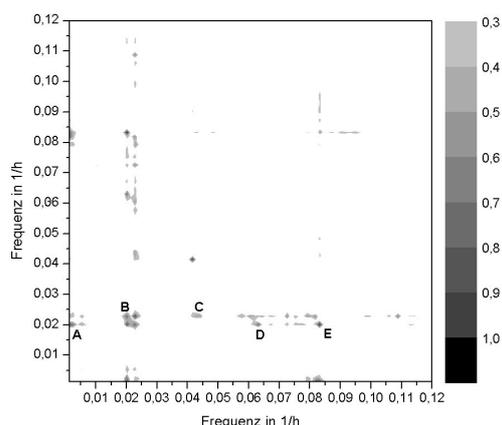


Abb.5: Bispektrum des Zonalwinds für Juli 2005 in 91 km Höhe.

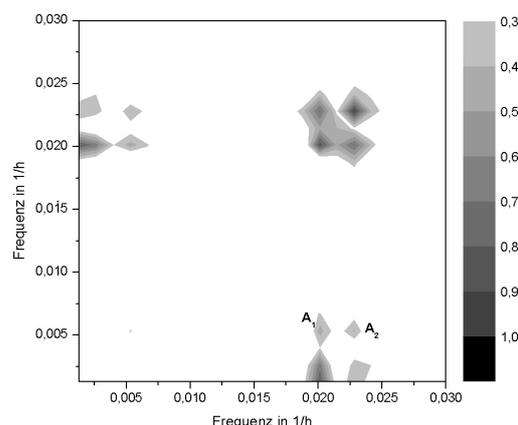


Abb.6: Analog zu Abbildung 5, jedoch im niederfrequenten Bereich.

Weitere Informationen zur Analyse von Bispektren sind auch bei [Clark und Bergin, 1997] zu finden.

Das Bispektrum in Abbildung 5 zeichnet sich durch zahlreiche Wechselwirkungen zwischen der QZTW und anderen atmosphärischen Störungen aus. Die im Punkt A markierten Wechselwirkungen finden zwischen der QZTW und diversen planetaren Wellen statt. Für die Angabe von Frequenztriplets ist jedoch eine höhere Auflösung in diesem Bereich notwendig (Abbildung 6). Das Triplet A_1 ist durch (0,0054; 0,0202; 0,02285) gegeben, wobei der erste Wert der x-Koordinate, der zweite Wert der y-Koordinate und der dritte dem Schnittpunkt mit den Koordinatenachsen entspricht. Das bedeutet, an der Wechselwirkung, die als Resultat eine rund 44-stündige Oszillation hervorbringt, sind eine 7,7-tägige Schwingung und die QZTW beteiligt. Eine Erhöhung der Amplitude bei einer Frequenz von 0,02285 1/h geht auch aus Abbildung 7 (Linie A_1) hervor.

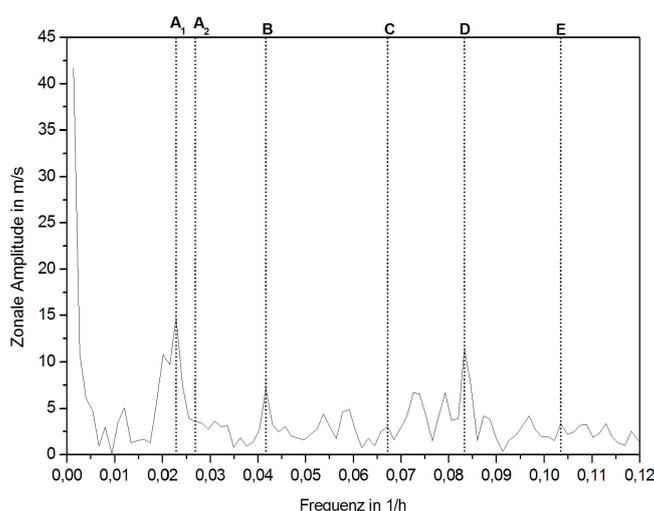


Abb. 7: Amplitudenspektrum des Zonalwinds für Juli 2006 in 91 km Höhe.

Der Punkt A_2 ist gegeben durch (0,0228; 0,0054; 0,0265). Bei der Frequenz 0,0265 1/h ist im Amplitudenspektrum (Abb. 8) jedoch keine markante Erhöhung feststellbar.

Punkt B kennzeichnet einerseits die Wechselwirkung der QZTW mit sich selbst und andererseits das Triplet (0,215; 0,02; 0,04167). Eine geringe Zunahme der Amplitude ist im Amplitudenspektrum bei Linie C zu sehen. Diese ist auf eine Wechselwirkung zwischen einer 49,5- und 24- stündigen Oszillation zurückzuführen. Im Bisppektrum ist diese ebenfalls durch Punkt C markiert. Das zugehörige Triplet lautet (0,0444; 0,0202; 0,0672). Die im Punkt D markierte Modulation der halbtägigen Gezeit geht aus einer Wechselwirkung zwischen der halbtägigen Gezeit und der QZTW (0,0833; 0,0202; 0,10349) hervor, die zur Modulation der Ersteren führt. Auf diese sehr häufig vorkommende Wechselwirkung verweisen zum Beispiel auch [Jacobi et al., 2001] oder [Beard et al., 1999].

Da an den hier genannten Wechselwirkungen keine 40-stündige Oszillation beteiligt ist, kann angenommen werden, dass das Maximum um den Tag 50 in Abbildung 2 bzw. um den Tag 52 in Abbildung 3 bei 40 Stunden andere Ursachen hat. Wie bereits oben angedeutet, könnte diese Verschiebung durch Variationen im Hintergrundwind im Periodenbereich planetarer Wellen hervorgerufen worden sein.

4. Schlussfolgerung

Wie aus den Messungen mit dem Meteorradar im Sommer 2005 hervorgeht ist die Quasi-2-Tage Welle keineswegs ein Ereignis, welches sich auf eine reine 48-stündige Schwingung begrenzt. Im Laufe des Sommers sind deutliche Schwankungen der Amplitude sowohl zu längeren als auch zu kürzeren Perioden erkennbar. Da diese Erkenntnis auch aus Messungen an zum Teil anderen Standorten geschlussfolgert wird (z.B. [Chshyolkova et al., 2005] oder [Jacobi et al., 2001]), scheint es sich bei der Verschiebung der Perioden nicht um eine zufällige Erscheinung zu handeln. Weiterhin weisen die unterschiedlichen Ergebnisse der genannten Autoren auf eine zwischenjährliche Variabilität der Quasi-2-Tage Welle hin.

5. Literatur

Beard, A.G., Mitchell, N.J., Williams, P.J.S., Kunitake, M., 1999: Non-linear interactions between tides and planetary waves resulting in periodic tidal variability. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 61, 363-376.

Beard, A.G., Williams, P.J.S., Mitchell, N.J., Muller, H.G., 2001: A spectral climatology of planetary waves and tidal variability. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 63, 801-811.

Chshyolkova, T., Manson, A.H., Meek, C.E., 2005: Climatology of the quasi two-day wave over Saskatoon (52°N, 107°W): 14 years of MF radar observations. *Advances in Space Research* 35, 2011-2016.

Clark, R.R, Bergin, J.S, 1997: Bispectral analysis of mesospheric winds. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 59, 629-639.

Fröhlich, K., 2006: The Quasi Two-Day Wave - its impact on zonal mean circulation and wave-wave interactions in the middle atmosphere. Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, Band 38.

Jacobi, Ch.; Schminder, R.; Kürschner, D.; 1996. The quasi 2-day wave as seen from D1 LF wind measurements over Central Europe (52°N, 15°E) at Collm. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 59, 1277-1286.

Jacobi, Ch.; Schminder, R.; Kürschner, D.; 1998. Planetary wave activity obtained from long-period (2-18 days) variation of mesopause region winds over central Europe (52°N, 15°E). Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 60, 81-93.

Jacobi, Ch., Portnyagin, Y.I., Merzlyakov, E.G., Kashchev, B.L., Oleynikov, A.N., Kürschner, D., Mitchel, N.J., Middleton H.R., Muller, H.G., Comley, V.E., 2001: Mesosphere/lower thermosphere wind measurements over Europe in summer 1998. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 63, 1017-1031.

Plumb, R.A.; 1983. Baroclinic instability of the summer mesosphere: a mechanism for the quasi-two-day-wave? Journal of the Atmospheric Sciences 40, 262-270.

Viehweg, C., 2006: Statistische Analyse von Meteorradardaten. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie der Universität Leipzig.

Adressen:

Ina Weithäuser, Gunter Stober, Kristina Fröhlich, Christoph Jacobi
Institut für Meteorologie, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig
weithaeu@uni-leipzig.de