

# ZONALE VARIATIONEN DES WINDFELDES IN DER MITTLEREN ATMOSPHÄRE INDUZIERT DURCH DEN WINTERLICHEN STRATOSPHERISCHEN POLARWIRBEL - MODELLERGEBNISSE UND BEOBACHTUNGEN -

*M. Lange, Ch. Jacobi*

*Institut für Meteorologie, Universität Leipzig*

*Stephanstr. 3, 04103 Leipzig*

*mlange@uni-leipzig.de*

*jacobi@uni-leipzig.de*

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Langzeitmessungen des Windfeldes in der Mesopausenregion  $\sim 92$  km an verschiedenen Stationen in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre zeigen systematische zonale Variationen beim (zeitlich) gemittelten Zonal- und Meridionalwind und bei den Amplituden und Phasen des halbtägigen Gezeitenwindes. Als prominentester Vertreter der stationären Wellenstörungen in der winterlichen Stratosphäre, die sich in der mittleren Atmosphäre ausbreiten, wird der Einfluss der Geopotentialstörungen des winterlichen stratosphärischen Polarwirbels zu den zonalen Wellenzahlen 1 und 2 auf das Windfeld in der oberen Mesosphäre / unteren Thermosphäre numerisch mit der Leipziger Version des COMMA Modells (COMMA-LIM) der mittleren Atmosphäre untersucht. Die longitudinalen Variationen des mittleren Zonalwindes, die im Breitenbereich  $52^\circ N$  bis  $56^\circ N$  beobachtet werden und in der Größenordnung von  $10-20$  m/s liegen werden in den

Modellergebnissen reproduziert. Auch die halbtägigen Gezeitenamplituden und -phasen zeigen qualitative und quantitative Übereinstimmungen zwischen Beobachtungen und Modellergebnissen.

## **ABSTRACT**

Long-term time series of wind field observations in the upper mesosphere /lower thermosphere region at different locations in the midlatitude region indicate longitudinal variability in the (time-) mean zonal and meridional wind and in the amplitudes and phases of the semidiurnal tide, too. Being the most prominent pattern of zonal inhomogeneity in the lower middle atmosphere, the influence of the zonal wavenumber 1 and wavenumber 2 disturbances of the winter Northern Hemisphere stratospheric polar vortex on the mesosphere- / lower thermosphere wind field is numerically investigated with the Leipzig version of the COMMA model (COMMA-LIM). The model

results show that the zonal variations through the stationary waves coincide with typical observed mean zonal wind differences between different radar stations along the midlatitude belt between  $52^\circ N$  and  $56^\circ N$  with values of about  $10\text{-}20\text{ m/s}$ . Also, the amplitude and phase variations of the semidiurnal tide shows qualitative and quantitative correspondence between model results and observations.

## EINLEITUNG

In numerischen Untersuchungen werden Trends und Wellenausbreitung in der mittleren Atmosphäre häufig durch die zonal gemittelten Felder beschrieben. Langzeitbeobachtungen des Windfeldes in der Mesopausenregion an verschiedenen Stationen in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre zeigen neben zeitlich periodischen Schwankungen durch Gezeiten und planetare Wellen auch systematische längenabhängige Variationen des mittleren Zonalwindes und der Amplitudenverteilung der halbtägigen Gezeiten (Jacobi et al., 1999).

Als Ursache dafür kommen unter anderem orografisch bedingte Einflüsse in Frage, die einerseits zu einer ausgeprägten Abweichung des winterlichen Polarwirbels von der Radialsymmetrie um den Pol führen, zum anderen zu einer Längenabhängigkeit der Schwerwellenaktivität. Auch Unterschiede in der solaren Erwärmung durch die Land-See Verteilung erzeugen stationäre Wellen.

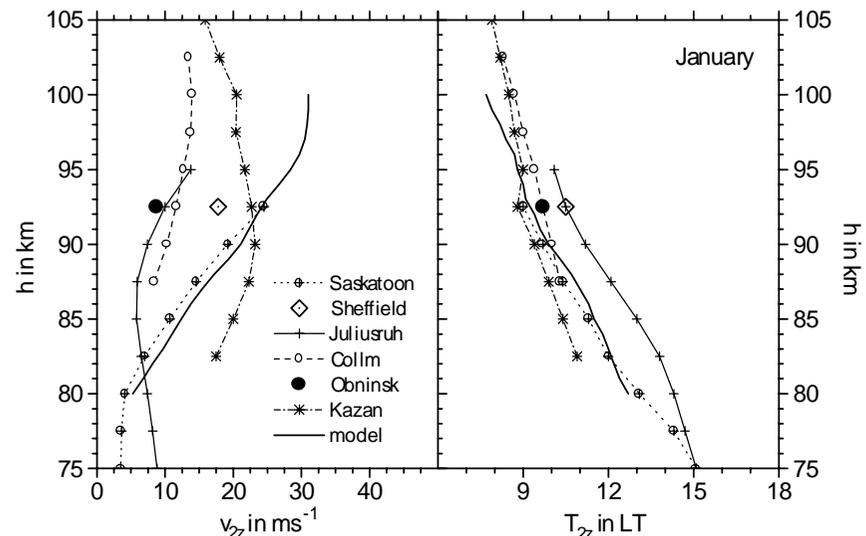


Abbildung 1: Profile der Langzeitmittel der halbtägigen Gezeitenamplitude (links) und Phase (rechts) für Januar an verschiedenen Messstationen zwischen  $52^\circ N$  und  $56^\circ N$  (nach Jacobi et al., 1999). Die Koordinaten sind in Tab. 1 aufgeführt.

Messstation	Koordinaten
Saskatoon	$52^\circ N, 107^\circ W$
Sheffield	$53^\circ N, 4^\circ W$
Juliusruh	$55^\circ N, 13^\circ E$
Collm	$52^\circ N, 15^\circ E$
Obninsk	$55^\circ N, 37^\circ E$
Kazan	$56^\circ N, 49^\circ E$

Tabelle 1: Koordinaten der Messstationen aus Abb. 1 im Breitenbereich  $52\text{-}56^\circ N$ .

Bei dem Vergleich von Langzeitmessungen des halbtägigen solaren Gezeitenwindes in  $92\text{ km}$  Höhe an 6 verschiedenen Stationen von Jacobi et al. (1999) (Abb. 1, Tab. 1) wird im Winter eine besonders

starke Variation der Amplitude zwischen ca. 8 m/s und 25 m/s und der Phase um ca. 2 Stunden beobachtet. Die Differenz der Amplitude wird mit zunehmendem Abstand zwischen den Stationen größer, was auf den Einfluss einer großskaligen nichtwandernden Wellenstörung deutet. Lediglich die am weitesten östliche Station (Kazan) weicht von dieser Regel ab. Sie hat eine zu Saskatoon, der am weitesten westlich liegenden Station, vergleichbare Amplitudenstärke. Auch zeigen Vergleiche zwischen Collm und Saskatoon eine Korrelation der Differenzen der halbtägigen Gezeitenamplitude des Zonalwindes an beiden Stationen mit der Tiefe des winterlichen Polarwirbels (Jacobi, 2000). Daraus folgt die Annahme, dass die beobachteten längenabhängigen Variationen im wesentlichen auf den Einfluss der stationären Wellen, verbunden mit dem winterlichen Polarwirbel in der Stratosphäre, zurückzuführen sind.

### DAS COMMA-LIM MODELL

Das COMMA-LIM Modell ist eine 24 Schichten Version des Kölner Zirkulationsmodells COMMA (COlogne Model of the Middle Atmosphere) mit einer aus Realdaten abgeleiteten monatlichen Ozonklimatologie und modifizierten NO – Profilen in der unteren Thermosphäre, sowie einer modifizierten CO<sub>2</sub> - Parametrisierung nach Fomichev et al. (1998). COMMA ist ein voll nichtlineares globales 3-dimensionales mechanistisches Zirkulationsmodell mit logarithmischer Vertikalkoordinate  $z = -H \ln(p/p_0)$  für den Höhenbereich von 0-140 km. Es enthält die solaren Erwärmungsraten von H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und O<sub>2</sub> und die Infrarot - Abkühlungsraten für O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> und NO. Verschiedene

Antriebs- und Dissipationsprozesse werden berücksichtigt, insbesondere kleinskalige Schwerewellen werden mit einer nach Holton u. Zhu (1984) modifizierten Parametrisierung vom Lindzen-Typ berücksichtigt.

### MODELLPARAMETER DES COMMA-MODELLS

#### Modellauflösung:

24 Schichten,  $\Delta z = 5.7$  km

64 Gitterpunkte Länge ( 5.625° )

36 Gitterpunkte Breite ( 5° )

#### Strahlung

Solare Erwärmung

Höhenbereich	Atmosphärischer Konstituent	Referenz
Troposphäre	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>	Liou und Sasamori, 1975
Stratosphäre und Mesosphäre	O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	Strobel, 1978
untere Thermosphäre	O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	

Infrarote Abkühlung

Höhenbereich	Atmosphärischer Konstituent	Referenz
Troposphäre	H <sub>2</sub> O	Goody, 1964
Stratosphäre und Mesosphäre	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub> : Fomichev et al., 1998; H <sub>2</sub> O: Fomichev und Shved, 1985
Untere Thermosphäre	CO <sub>2</sub> , NO	

- CO<sub>2</sub>-Parametrisierungsschema mit exakter Berechnung der Abkühlungsraten im LTE-Bereich (Curtis-Matrizen)

- Ozonklimatologie aus Berliner Langzeitanalysen der Monatsmittelwerte für den Höhenbereich  $0 - 89 \text{ km}$  (Fortuin and Langematz, 1994, erweitert), darüber exponentieller Abfall der  $\text{O}_3$ -Konzentration mit der Skalenhöhe  $H=7 \text{ km}$ .

Antriebs- und Dissipationsprozesse

- Turbulente Diffusion (Ebel, 1984)
- Dynamische Viskosität, molekulare Wärmeleitung (Banks und Kockarts, 1973)
- Ionenreibung (Dickinson et al., 1975)
- Rayleighreibung oder Schwerewellenparametrisierung (Lindzen, 1981 ; Holton und Zhu, 1984)

## STATIONÄRE WELLENANREGUNG

Zur Untersuchung des Einflusses des winterlichen Polarwirbels auf das Windfeld in der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre werden Modellsimulationen mit einer stationären Wellenanregung durchgeführt. Die Störung am Unterrand des Modells wird so gewählt, dass die Januarmittelwerte der Geopotentialstörungen in  $30 \text{ hPa}$  für den Zeitraum 1979-1999 zu den zonalen Wellenzahlen 1 und 2 in dieser Höhe möglichst gut approximiert werden. Die Langzeitanalysen wurden die vom Meteorologischen Instituts der Freien Universität Berlin bereitgestellt.

Realisiert wird dies im Modell durch Vorgabe einer Geopotentialstörung am untersten Gitterniveau in  $2.87 \text{ km}$  ( $\Delta z/2$ ), die

zur Vermeidung von numerischen Instabilitäten nach dem Erreichen eines quasistationären Zustands des Modells nach 40 Tagen mit einer Zeitkonstante  $\tau$  von einem Tag allmählich hinzugeschaltet wird. Das Modell wird im folgenden für weitere 40 Tage betrieben. Bei einer vertikalen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenstörungen von mehreren  $\text{km/Tag}$  ist die Störung nach dieser Simulationszeit voll entwickelt.

Die Geopotentialstörung der zonalen Wellenzahl 1 und 2 wird durch folgende Gleichung wiedergegeben:

$$\Phi = [1 - \exp(-t/\tau)] \sum_{i=1,2} \Phi'_i \cos(\lambda - \delta\lambda_i) \exp[-2((\phi - \delta\phi_i)/\alpha_i)^2],$$

$\Phi'_i$  gibt die Amplituden,  $\lambda$  und  $\delta\lambda_i$  die zonalen Phasen bzw. deren Verschiebungen an. Im Breitenbereich  $0 \leq \phi \leq 77.5^\circ \text{ N}$  wird eine gaussförmige Verteilung angesetzt, für  $0 \leq \phi \leq 90^\circ \text{ N}$  wird ein linearer Abfall auf  $\Phi=0$  angenommen. Die hier verwendeten Werte sind in Tabelle 2 angegeben.

Variable	$\tau$	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\delta\lambda_1$	$\delta\lambda_2$	$\delta\phi_1$	$\delta\phi_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Wert	1 Tag	30 gpm	26 gpm	+22° E	+125°E	55°N	60°N	28.8	25.5

Tabelle 2: Charakteristische Parameter der stationären Wellenanregung im Modell.

Abbildung 2 zeigt die Amplitude und Phase der stationären Geopotentialstörungen zur zonalen Wellenzahlen 1 und 2 der Berliner  $30 \text{ hPa}$  Analysen für Januar in den Jahren 1979 - 1999, sowie die Geopotentialstörung im nächstgelegenen Höhenniveau im Modell in  $25.8 \text{ km}$ , das ca.  $25 \text{ hPa}$  entspricht. Die Meridionalstruktur der Welle 1

und Welle 2 im Modell stimmt relativ gut mit den Messwerten überein. Die schwachen Amplituden in niederen Breiten und Maxima in mittleren bis hohen Breiten werden im Modell wiedergegeben. Das Maximum der zonalen Welle 1 liegt jedoch ca. 10° weiter nördlich, was durch das zu weit nördlich liegende Maximum der stratosphärischen Westwinde verursacht wird. Diese Verschiebung ist durch die Implementierung der Wellenstörung bedingt. Die Phase stimmt exakt in mittleren Breiten überein. Zu niederen Breiten wird eine Westwärtsverschiebung im Modell beobachtet, die auch aus einzelnen früheren Beobachtungen bekannt ist, hier in den Berliner Analysen aber im Langzeitmittel verschwindet. Da die Amplitude in dem Bereich jedoch abnimmt, ist der Einfluss der Abweichung im Modell nur gering.

Geopotentielle Höhe der stationären Wellen in 30 hPa, Januar

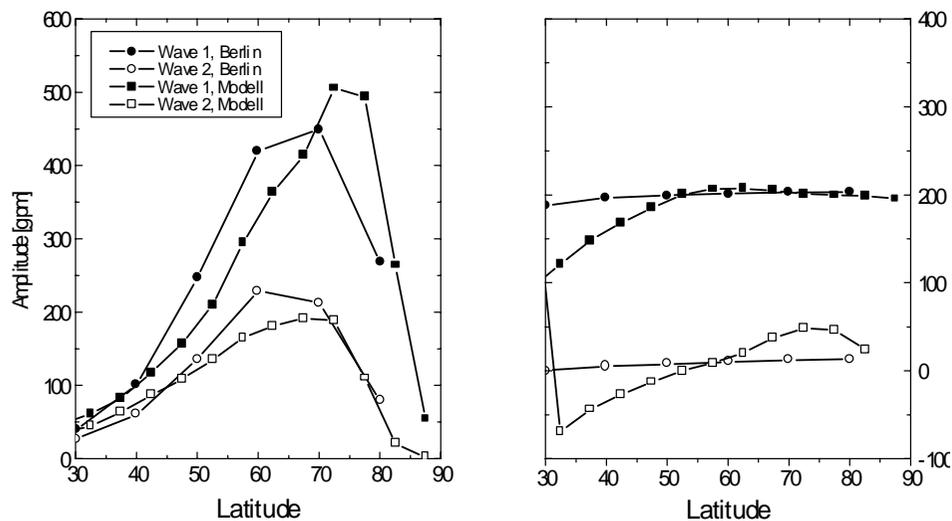


Abbildung 2: Amplitude und Phase der stationären Welle 1 und Welle 2 aus 30 hPa Druckflächenhöhen von Berliner Analysen für das Januar Mittel im

Zeitraum 1979-1999 und stationäre Wellenanteile im COMMA-LIM Modell. Die Phase zeigt die Position des Maximums.

## MODELLERGEBNISSE

Abbildung 3 zeigt die Modellergebnisse für die stationäre Geopotentialstörung der zonalen Wellenzahl 1 und 2 vor dem Hintergrund des Zonalwindes. Das zonale Windfeld bei Winterbedingungen in der Nordhemisphäre ist charakterisiert durch den stratosphärischen/mesosphärischen Westwindjet in der Winterhemisphäre und dem Ostwindjet in der südlichen Sommerhemisphäre mit den darüberliegenden entgegengerichteten Jets in der unteren Thermosphäre. Es wird eine Zunahme der Geopotentialstörungen im Bereich des Mesosphärenjets beobachtet. Der Welle 1-Anteil erreicht dabei, trotz vergleichbarer Amplitudenstärke in der Anregung, deutlich höhere Werte als der Welle 2-Anteil. Oberhalb des Maximums des Mesosphärenjets wird die stationäre Welle stark gedämpft. Im Bereich der Windumkehr in ca. 90 km Höhe hat die Welle ein Minimum.

Oberhalb der Mesopause nimmt die Amplitude der Welle wieder zu. Sie breitet sich auch in den Bereich des Westwindjets in die Südhemisphäre aus und verstärkt sich dort. Die Nullwindlinie stellt also keine strenge kritische Linie für stationäre Wellen im klassischen Sinne dar, die die Wellenausbreitung vollständig blockieren würde.

Die Ausbreitung der Welle von der mesosphärischen Westwindzone in der Nordhemisphäre in die Westwindbereiche der Südhemisphäre in der unteren Thermosphäre ist bislang unklar. Die Ausbreitung entlang der Nullwindlinie, die für Rossby - Wellen als

„Wellenleiter“ fungiert, über den Äquator hinweg in die südliche Hemisphäre ist wegen der trennenden Ostwinde nicht möglich. Mögliche Ursachen können in den Abweichungen von den klassischen Bedingungen liegen, wie thermosphärische Dämpfungsprozesse, die im Modell enthalten sind. Auch nichtlineare Wechselwirkungen der Wellenstörung mit solaren Gezeiten, oder die Modulation von Schwerewellen, sind hier noch weiter zu untersuchen. Die Ausbreitung der Welle in die mesosphärischen Ostwinde der Südhemisphäre ist dagegen vollständig blockiert.

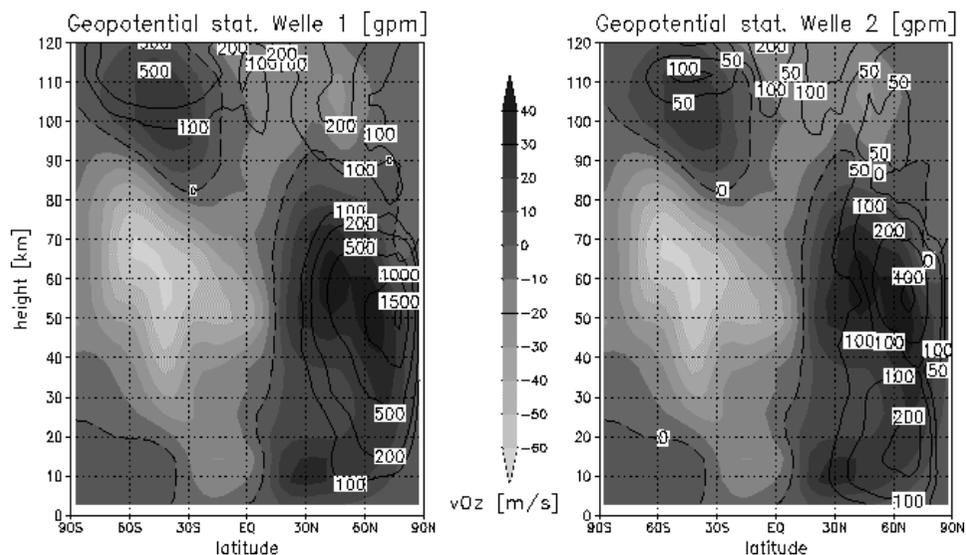


Abbildung 3: Geopotential der stationären Welle 1 und Welle 2 als Konturplot in gpdm vor dem mittleren Zonalwind bei Januarbedingungen. Die Windgeschwindigkeiten sind schattiert dargestellt mit der gestrichelten Nullwindlinie. Das Konturintervall für den Zonalwind ist im Mittelbalken in m/s angegeben, mit positiven Werten für Westwind.

Den Einfluss der stationären Welle auf die Längenabhängigkeit des Zonal- und Meridionalwindes und der halbtägigen Gezeiten des Zonalwindes in  $52.5^\circ N$  zeigt Abb. 4 und 5. Der Zonalwind (Abb. 4, links) zeigt durch die Wellenstörung im Gegensatz zu dem Kontrolllauf eine sehr ausgeprägte Längenabhängigkeit mit Variationen von über  $20 \text{ m/s}$  in  $25 \text{ km}$  Höhe, knapp  $80 \text{ m/s}$  im Bereich des Mesosphärenjets in  $60 \text{ km}$  Höhe und  $10\text{-}20 \text{ m/s}$  im Mesopausenbereich. Auch der Mittelwert ändert sich in allen Höhen, mit einer starken Abnahme in der Mesosphäre und einer Verstärkung oberhalb der Windumkehr in der Mesosphäre und einer Verstärkung oberhalb der Windumkehr in der Mesosphäre. Der Meridionalwind zeigt eine ähnliche Charakteristik: Die stärksten Variationen liegen in  $60 \text{ km}$  Höhe mit Beträgen von  $50 \text{ m/s}$ . Im Mesopausenbereich variieren die Werte um ca.  $10 \text{ m/s}$ .

Die halbtägige Gezeitenamplitude (Abb. 5, links) zeigt im Modellauf mit Wellenstörung gegenüber dem Kontrolllauf, der wie bei der Zonalgeschwindigkeit eine rein zonalsymmetrische Verteilung aufweist, in allen Höhen oberhalb der Stratosphäre längenabhängige Variationen zwischen  $10$  und  $20 \text{ m/s}$ . Darüber hinaus wird in nahezu allen Höhen eine deutliche Verstärkung des Zonalmittels der Amplitude durch die Wellenstörung beobachtet.

Auch die Phase (Abb. 5, rechts) zeigt starke längenabhängige Variationen. Diese liegen in der Mesosphäre bei 1-1.5 Stunden mit einer Verschiebung des Mittelwertes um ca. 1 Stunde zu früheren Zeiten. In der Mesopause liegen die Phasenvariationen bei 1.5-2 Stunden, wobei der zonale Mittelwert hier gegenüber dem Kontrolllauf um eine Stunde nachzieht.

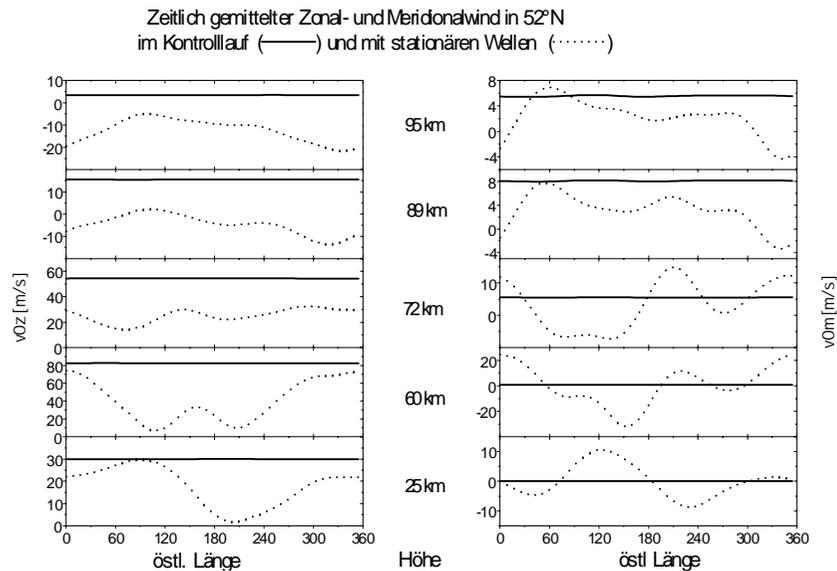


Abbildung 4: Zonale Variation von Zonal- und Meridionalwind in 52°N in verschiedenen Höhen.

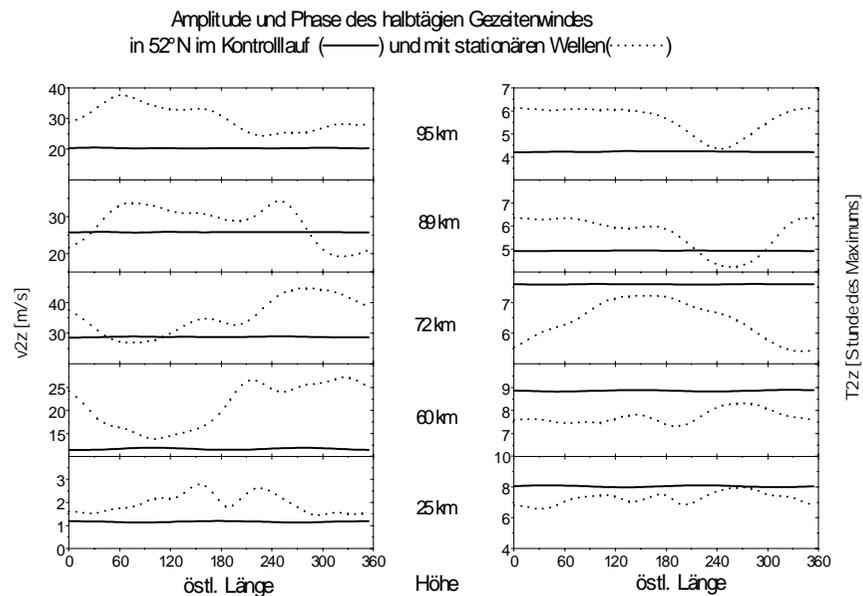


Abbildung 5: Zonale Variation der Amplitude und Phase des halbtägigen Gezeitenwindes in 52°N in verschiedenen Höhen.

## VERGLEICH MIT MESSUNGEN

Abb. 6 zeigt einen Vergleich der Modellergebnisse für den halbtägigen zonalen Gezeitenwind im Höhenbereich 89-95 km mit Langzeitbeobachtungen im Mesopausenbereich zwischen 52 und 56° N in 92.5 km Höhe (Vgl. auch Abb. 1).

Die Absolutbeträge der Phase unterscheiden sich zwischen Modell und Messungen zwar deutlich, die Änderung durch die stationäre Welle in 92.5 km Höhe zeigt jedoch in beiden Fällen eine positive Phasenverschiebung um ca. 1.5 Stunden von Saskatoon zum Nullmeridian. Der Abfall der Phase, der weiter östlich liegenden Stationen wird in den Modellergebnissen allerdings nicht wiedergegeben. Die Variation der halbtägigen Gezeitenamplitude von 10-20 m/s in 89 km liegt in der Größenordnung der Messungen. Auch wird die zonale Verteilung mit der ca. 10 m/s stärkeren Amplitude in Saskatoon (Kanada) gegenüber der Station Sheffield richtig wiedergegeben. Die weitere Abnahme zu den östlich liegenden Stationen wird jedoch nicht erfasst, wohingegen der Anstieg zur östlichsten Station Kazan bei 49° E auch in der Simulation beobachtet wird.

Es zeigt sich, dass der langwellige Anteil der Variation in der Simulation relativ gut wiedergegeben wird, wohingegen die Variationen zwischen nahe beieinander liegenden Stationen nicht erfasst werden. Dies ist bei den großskaligen Störungen der Welle 1 und Welle 2 auch zu erwarten. Die Unterschiede zwischen Stationen mit einem geringen Abstand sind möglicherweise auf kleinskaligere Störungen wie z.B. auf die längenabhängige Schwerewellenaktivität zurückzuführen.

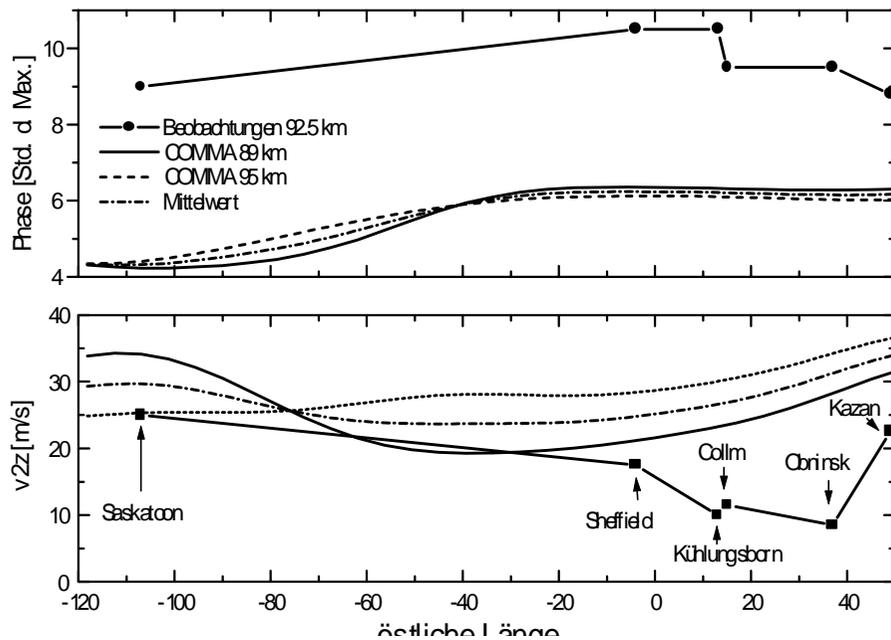


Abbildung 6: Phase und Amplitude der halbtägigen Gezeiten des Zonalwindes in 92.5 km an den verschiedenen Messstationen sowie die Modellergebnisse für  $z=89$  km und 95 km und dem Mittelwert in  $52.5^\circ N$  bei stationärer Wellenanregung. Die Abkürzungen geben die verschiedenen Messstationen an. S: Saskatoon ( $52^\circ N$ ,  $107^\circ W$ ), Sh: Sheffield ( $53^\circ N$ ,  $4^\circ W$ ), J: Juliusruh ( $55^\circ N$ ,  $13^\circ E$ ), C: Collm ( $52^\circ N$ ,  $15^\circ E$ ), O: Obninsk ( $55^\circ N$ ,  $37^\circ E$ ), K: Kazan ( $56^\circ N$ ,  $49^\circ E$ ).

Berücksichtigt man die Messgenauigkeit der verschiedenen Stationen zwischen  $0$  und  $40^\circ E$ , die mit  $5-7$  m/s angegeben werden (Shepherd, 1996), so liegt die Modellvariation jedoch weitgehend im Bereich der Messgenauigkeit. Auch bei Vergleichen der solaren Gezeiten zwischen Radarwindmessungen und dem Global Scale Wave Model (GSWM), das derzeit als ausgereiftestes lineares Modell

zur Simulation der Gezeiten in der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre gilt, gelten Abweichungen in dieser Größenordnung noch als „good“ (Manson et al., 1999; Hagan et al., 1997, 1999). Abweichungen zwischen dem halbtägigen Gezeitenwind im Mesopausenbereich im COMMA-LIM Modell in  $52.5^\circ N$  bei Sommerbedingungen und den Langzeitwindmessungen von Collm wurden bereits in früheren Untersuchungen beobachtet (Lange et al. 1999).

## DISKUSSION UND AUSBLICK

Die Untersuchung des Einflusses von stratosphärischen stationären Wellen auf das Windfeld im Bereich der Mesopause in 92 km Höhe hat gezeigt, dass die Variationen, die in Langzeitmessungen entlang des Breitengürtels zwischen  $52^\circ N$  und  $56^\circ N$  im Winter beobachtet werden, durch die Simulationen in der Größenordnung richtig reproduziert werden. Darüber hinaus sind bei der halbtägigen Gezeitenamplitude auch quantitative Übereinstimmungen in der Phasenlage der Maxima und Minima entlang des Breitenkreises vorhanden. Da hier Langzeitmittelwerte der verschiedenen Messungen betrachtet werden, wird die Variabilität des Windfeldes im Mesopausenbereich durch die interannuale Variabilität des stratosphärischen Polarwirbels in der vorliegenden Modellstudie nicht erfasst. Hierzu ist eine Reihe weiterer Modelluntersuchungen zu ausgewählten Perioden erforderlich.

Es ist weiterhin unklar worauf die relativ großen Unterschiede der halbtägigen Gezeitenamplitude zwischen den dicht beieinander

liegenden Stationen in Europa zurückzuführen sind. In erster Linie kommen hierfür kleinskalige Störungen in Betracht, die nicht durch die zonalen Wellenzahlen 1 und 2 des polaren Wirbels wiedergegeben werden: Beispielsweise können zonale Variationen der Schwerewellenaktivität starken Einfluss auf die lokalen Gezeitenamplituden nehmen. Durch neue Beobachtungstechniken wie den Okkultationsmessungen durch GPS – Satelliten (Tsuda et al., 2000) wird es in Zukunft möglich sein, Klimatologien der Schwerewellenaktivität in der Stratosphäre abzuleiten und damit zonale Variationen der damit verbundenen dissipierten Energie und des Impulses in der oberen Mesosphäre / unteren Thermosphäre abzuschätzen.

In Anbetracht der bislang noch relativ geringen Dichte von Messungen im Mesopausenbereich sind weitere koordinierte Meßkampagnen erforderlich um eine verlässliche Datenbasis zu erhalten. Da sich atmosphärische Wellenstörungen in erster Linie von den unteren Schichten in die oberen ausbreiten sind Messungen in dem Höhenbereich als Detektor zum „proof of concept“ hervorragend geeignet.

#### **DANK**

Diese Untersuchung wurde von der Deutschen Forschungsgesellschaft (Aktenzeichen JA 836/3-2) unterstützt. Die Langzeitmittel der stationären Wellenstörung wurde freundlicherweise von der Stratosphärenarbeitsgruppe des meteorologischen Instituts der Freien Universität Berlin bereitgestellt. Die

Hochatmosphärenwindmessungen wurden innerhalb eines von INTAS unterstützten Projektes zusammengestellt.

#### **LITERATUR**

- Banks, P.M., and G. Kockarts, 1973: *Aeronomy*, Academic Press, New York.
- Bremer, J., R. Schminder, K.M. Greisiger, P. Hoffmann, D. Kürschner, and W. Singer, 1997: Solar cycle dependence and long-term trends in the wind field of the mesosphere and thermosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **59**, 497-509.
- Dickinson, R.E., E.C. Ridley, and R.G. Roble, 1975: Meridional circulation in the thermosphere I. Equinox conditions. *J. Atmos. Sci.* **32**, 1737-1754.
- Ebel, A., M. Dameris, and H.J. Jakobs 1988: Modelling of the dynamical response of the middle atmosphere to weak external forcing: Influence of stationary and transient waves. *Ann. Geophysicae*, **6**, 501-512.
- Fomichev, V.I., and G.M. Shved, 1985: Parameterization of the radiative flux divergence in the 9.6  $\mu\text{m}$  O<sub>3</sub> band. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **47**, 1037-1049.
- Fomichev, V.I., J.-P. Blanchet, and D.S. Turner, 1998: Matrix parameterization of the 15  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> band cooling in the middle and upper atmosphere for variable CO<sub>2</sub> concentration. *J. Geophys. Res.* **103**, 11,505-11,528.

- Fortuin, J.P.F., and U. Langematz, 1994: An update on the global ozone climatology and on concurrent ozone and temperature trends. SPIE, *Atmospheric Sensing and Modeling*, **2311**, 207-216.
- Goody, R.M., 1964: Atmospheric radiation, Part 1, Oxford University Press.
- Hagan, M. E., J. L., Chang, and S. K. Avery, 1997: GSWM estimates of non-migrating tidal effects. *J. Geophys. Res.* **102**, 16,439-16,452.
- Hagan, M. E., M. D. Burrage, J. M. Forbes, J. Hackney, W. J. Randel, and X. Zhang, 1999: GSWM-98: Results for migrating solar tides. *J. Geophys. Res.* **104**, 6813-6828.
- Holton, J.R., and X. Zhu, 1984: Further study of gravity wave induced drag and diffusion in the mesosphere. *J. Atmos. Sci.* **41**, 2653-2662.
- Jacobi, Ch., Yu.I. Portnyagin, T.V. Solovjova, P. Hoffmann, W. Singer, A.N. Fahrutdinova, R.A. Ishmuratov, A.G. Beard, N.J. Mitchell, H.G. Muller, R. Schminder, D. Kürschner, A.H. Manson, and C.E. Meek, 1999: Climatology of the semidiurnal tide at 52-56° N from ground-based radar wind measurements 1985-1995. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **61**, 975-991.
- Jacobi, Ch., 2000: Midlatitude Mesopause Region Dynamics and its Coupling with Lower and Middle Atmospheric Processes, *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e.V. Leipzig*, Bd. **20**, 132 S.
- Lange, M., R. Schminder, Ch. Jacobi, F., Baier, and G. Günther, 1999: Simulation of middle atmosphere winds and comparison with mesopause region wind measurements. *Adv. Space Res.* **24**, 1527-1530.
- Lindzen, R. S., 1981: Turbulence and stress owing do gravity wave and tidal breakdown. *J. Geophys. Res.* **86**, 9707-9714.
- Liou, K.N., and T. Sasamori, 1975: On the Transfer of Solar Radiation in Aerosol Atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 2166-1277.
- Manson, A., Ch. Meek, M. Hagan, Ch. Hall, W. Hocking, J. MacDougall, S. Franke, D. Riggan, D. Fritts, R. Vincent, and M. Burrage, 1999: Seasonal variations of the semi-diurnal and diurnal tides in the MLT: multi-year MF radar observations from 2 to 70° N, and the GSWM tidal model. *J. Atmos. Terr. Phys.* **61**, 809-828.
- Shepherd, G. 1996: Planetary scale mesopause observing system. Project Description, 1996, 13 S.
- Strobel, D.F., 1978: Parametrization of the atmospheric heating rate from 15 - 120 km due to O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> absorption of solar radiation. *J. Geophys. Res.* **83**, 6225-6230.
- Tsuda, T., and M. Nishida, 2000: A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET). *J. Geophys. Res.* **105**, 7252-7273.

**Anschrift der Verfasser:**

Martin Lange, Christoph Jacobi, Institut für Meteorologie, Stephanstr. 3,  
04103 Leipzig,