

# Messung von Impulsflüssen in der Mesosphäre / unteren Thermosphäre mit dem SKiYMET Meteorradar in Collm – Methode und erste Ergebnisse

**M. Placke, Ch. Jacobi, G. Stober**

## Zusammenfassung

Schwerewellen transportieren Energie und Impuls aus den unteren in die oberen Atmosphärenschichten. Impulsflüsse und ihre Divergenz beschreiben dabei die Kopplung der Wellen mit der mittleren Zirkulation. Mit einer Methode von Hocking (2005) können Varianzen und Schwerewellenimpulsflüsse in der Mesosphäre / unteren Thermosphäre mit einem All-Sky Interferometric (SKiYMET) Meteorradar bestimmt werden. Diese Methode wurde auf die Datensätze des Meteorradars in Collm (51.3°N, 13.0°E) angewandt. Erste Ergebnisse für die Varianzen und Impulsflüsse sowie speziell für die Höhenprofile des vertikalen Flusses zonalen Impulses im Jahresgang und die Untersuchung dessen auf periodische Schwankungen werden hier vorgestellt.

## Summary

Gravity waves transport energy and momentum from the lower to the upper atmosphere. Momentum fluxes and their divergence describe the coupling of the waves with the background circulation. By using a method presented by Hocking (2005), wind variances and gravity wave momentum fluxes in the mesosphere/lower thermosphere can be determined with an all-sky interferometric (SKiYMET) meteor radar. This method has been applied to the data sets of the meteor radar at Collm (51.3°N, 13.0°E). First results for the variances and momentum fluxes as well as for the height profiles of the vertical flux of zonal momentum, its seasonal cycle and periodic variations are presented.

## Einleitung

Die Analyse von Schwerewellen (SW) in der Atmosphäre ist von großem wissenschaftlichem Interesse, da sie einen signifikanten Einfluss auf die atmosphärischen Zirkulationsmuster, das Temperaturfeld und die Zusammensetzung der mittleren und oberen Atmosphäre haben (z.B. Oleynikov et al., 2005). Dieser Einfluss kommt zustande, da SW bei ihrer Brechung Turbulenzen verursachen und einen wesentlichen Beitrag zum Transport von Impuls und Energie sowie deren Ablagerung fernab der Quellregionen leisten. SW werden typischerweise in der Troposphäre angeregt und breiten sich aufwärts in unterschiedliche Höhenregionen aus. Dabei wachsen ihre Amplituden aufgrund der mit zunehmender Höhe abnehmenden Luftdichte bis auf ein

kritisches Niveau bzw. einen Zustand der Sättigung an, wobei sie wiederum durch ihr Brechen Impuls und Energie auf die mittlere Zirkulation übertragen. Hieraus resultieren unter anderem die Windumkehr in der Mesopausenregion (mesosphere/lower thermosphere, MLT) sowie ein Temperaturminimum in der polaren Sommermesopause. SW spielen somit eine Hauptrolle in der Dynamik der mittleren Atmosphäre. Die Bestimmung von SW-Impulsflüssen ist insofern eine wichtige Voraussetzung für das Verständnis der Dynamik und Energetik in der mittleren Atmosphäre (Hocking, 2005).

## Theorie

Eine neue Methode zur Bestimmung von SW-Impulsflüssen in der MLT auf Zeitskalen von 2-3 h mit einem All-Sky Interferometric (SKiYMET) Meteorradar wurde von Hocking (2005) vorgestellt. Mit dieser können die gesuchten Impulsflüsse durch ein Regressionsverfahren aus den Radialwindmessungen einzelner Meteore berechnet werden. Das Prinzip des SKiYMET Meteorradars (am Collm 36.2 MHz, VHF-Band) beruht auf der praktisch isotropen Aussendung von Radiowellen, die an den Ionisationspuren (ambipolares Plasma) von in die Atmosphäre eintretenden Meteoren reflektiert werden. Die Verdriftung der Plasmaspur aufgrund vom Wind führt zu einer Dopplerverschiebung des an den Antennen empfangenen Signals. Für jede mit dem Neutralgaswind bewegte Ionisationsspur, die orthogonal zum Radarstrahl liegt, kann eine Vielzahl individueller Informationen bestimmt werden. Hierzu gehören unter anderem die Echoamplitude, die Entfernung zwischen Radar und Meteor, die Radialdriftgeschwindigkeit des Meteorschweifs, Zenit- und Azimutwinkel. Die beiden letztgenannten Größen können für einzelne Meteore am Himmel mit einer Genauigkeit von  $\pm 2^\circ$  lokalisiert werden.

SKiYMET Meteorradare ermöglichen eine kontinuierliche automatische Überwachung der hochatmosphärischen Dynamik. Sie liefern die geographische, saisonale und jährliche Variabilität von Impulsflussparametern und bieten global eingesetzt dank ähnlicher Bauweisen gute Vergleichsmöglichkeiten untereinander. Die in Hocking (2005) beschriebene Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit auf das Radar in Collm (51.3°N, 13.0°E) angewandt.

Das Verfahren nach Hocking (2005) ermöglicht die gleichzeitige Bestimmung der Varianzen und Impulsflusskomponenten  $\overline{u'^2}$ ,  $\overline{v'^2}$ ,  $\overline{w'^2}$ ,  $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{u'w'}$  und  $\overline{v'w'}$ , wobei  $u'$ ,  $v'$  und  $w'$  die fluktuierenden Anteile des West-, Süd- bzw. aufwärts gerichteten Windes sind. Zur Bestimmung mittlerer Winde mit der Meteormethode wird ein All-Sky-Fit aller Radialwindgeschwindigkeiten durchgeführt, wobei die Größe  $\sum (v_{rad} - v_{radm})^2$  minimiert wird. Die Summenbildung erfolgt über alle detektierte Meteorpositionen innerhalb eines bestimmten Höhen- und Zeitintervalls, was an dieser Stelle sowie bei allen folgenden Summationen nicht explizit angegeben wird. Hierbei stellt  $v_{rad}$  die vom Meteorradar gemessene Radialwindgeschwindigkeit dar und  $v_{radm}$  die mittlere

Radialwindgeschwindigkeit unter der Annahme eines konstanten Hintergrundwindes in der Horizontalebene:

$$v_{radm} = u \sin \Theta \cos \Phi + v \sin \Theta \sin \Phi + w \cos \Theta . \quad (1)$$

Die Windgeschwindigkeit wird zonal ( $u$ ), meridional ( $v$ ) und vertikal ( $w$ ) in kartesischen Koordinaten angegeben. Die Winkel  $\Theta$  und  $\Phi$  stellen den Zenit- und Azimutwinkel der Meteorposition in Kugelkoordinaten dar. Die Messung von  $\Theta$  erfolgt vom Zenit aus gen Horizont;  $\Phi$  läuft, beginnend im Osten, gegen den Uhrzeigersinn. Allerdings sind reale Winde nicht konstant und gemessene und mittlere Radialwindgeschwindigkeit unterscheiden sich gewöhnlich voneinander.

Unter der Annahme, dass es sich bei den Abweichungen zwischen  $v_{rad}$  und  $v_{radm}$  um wahre, hauptsächlich durch SW verursachte Windschwankungen handelt, wird von Hocking (2005) die Minimierung der Größe:

$$\Lambda = \sum [(v'_{rad})^2 - (v'_{radm})^2]^2 , \quad (2)$$

zur Analyse der SW-Flüsse vorgeschlagen. Dies erfolgt unter den genannten Annahmen eines konstanten Hintergrundwindes und der Projektion des mittleren Windes auf die Radialwindgeschwindigkeit für jede Meteorposition. Die Radialwindabweichung  $v'_{rad}$  ergibt sich aus der Differenz zwischen gemessener und der aus dem mittleren Wind analog Gleichung (1) bestimmten Radialwindgeschwindigkeit:

$$v'_{rad} = v_{rad} - v_{radm} . \quad (3)$$

Die Größe  $v'_{radm}$  wird als „modellierter“ Radialwindgeschwindigkeit an der Position  $(\Theta, \Phi)$  bestimmt nach der Gleichung:

$$v'_{radm} = u' \sin \Theta \cos \Phi + v' \sin \Theta \sin \Phi + w' \cos \Theta . \quad (4)$$

Die darin enthaltenen Fluktuationsterme der Windgeschwindigkeit  $u'$ ,  $v'$  und  $w'$  sind aufgrund von Wellen- und turbulenten Bewegungen verursachte Störungen. Somit ist die Anwendung von Gleichung (2) als Optimierung der Ähnlichkeit zwischen gemessener und modellierter Varianz als Funktion der Zeit und Position zu verstehen.

Das Einsetzen von Gleichung (4) in (2) ergibt eine Summe über alle detektierte Meteorpositionen  $(\Theta, \Phi)$  innerhalb eines vom Nutzer bestimmten Höhen- und Zeitintervalls der Form:

$$\Lambda = \sum [(v'_{rad})^2 - (u'^2 \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi + v'^2 \sin^2 \Theta \sin^2 \Phi + w'^2 \cos^2 \Theta + 2u'v' \sin^2 \Theta \sin \Phi \cos \Phi + 2u'w' \sin \Theta \cos \Theta \cos \Phi + 2v'w' \sin \Theta \cos \Theta \sin \Phi)]^2 . \quad (5)$$

Die Minimierung von  $\Lambda$  erfolgt durch die partielle Ableitung dieser Gleichung jeweils nach  $u^2$ ,  $v^2$ ,  $w^2$ ,  $u'v'$ ,  $u'w'$  sowie  $v'w'$  und anschließender Nullsetzung der abgeleiteten Terme. Damit ergibt sich die Matrixgleichung in Abbildung 1 unter der Annahme, dass alle Parameter  $u^2$ ,  $v^2$  etc. über das Beobachtungsfeld konstant sind (s. Hocking, 2005).

Das Prinzip der Methode nach Hocking (2005) besteht letztendlich in der Invertierung der in Abbildung 1 gegebenen Matrix, um eine Abschätzung der sechs gesuchten Parameter  $\overline{u^2}$ ,  $\overline{v^2}$ ,  $\overline{w^2}$ ,  $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{u'w'}$  und  $\overline{v'w'}$  zu erhalten. Wie aus der Gleichung ersichtlich wird müssen für deren Berechnungen Zenit- und Azimutwinkel sowie die Radialwindabweichung  $v'_{rad}$  aus den Messungen mit dem Meteorradar bekannt sein. Für Letztgenannte werden wie im Vorfeld beschrieben (vgl. Gleichungen (3) und (1)) die gemessene Radialwindgeschwindigkeit und der horizontal als konstant angenommene Hintergrundwind benötigt. Da Vertikalwinde in der Mesopause gegenüber den horizontalen Windkomponenten klein sind, reduziert sich die Berechnung der mittleren Radialwindgeschwindigkeit nach Gleichung (1) auf die ersten beiden Summanden. Die darin enthaltene Zonal- und Meridionalwindkomponente wird analog Hocking et al. (2001) bestimmt, wonach prinzipiell die anfangs eingeführte Größe  $\sum (v_{rad} - v_{radm})^2$  minimiert wird durch partielle Ableitungen nach  $u$  (Gleichung 6) und  $v$  (Gleichung 7) sowie anschließender Nullsetzung dieser Terme:

$$\sum v_{rad} \sin \Theta \cos \Phi - u \sum \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi - v \sum \sin^2 \Theta \sin \Phi \cos \Phi = 0, \quad (6)$$

$$\sum v_{rad} \sin \Theta \sin \Phi - u \sum \sin^2 \Theta \sin \Phi \cos \Phi - v \sum \sin^2 \Theta \sin^2 \Phi = 0. \quad (7)$$

Durch Umstellen von Gleichung (6) ergibt sich ein Ausdruck für die Zonalwindgeschwindigkeit  $u$  in Abhängigkeit von der Meridionalwindgeschwindigkeit  $v$ :

$$u = \frac{\sum v_{rad} \sin \Theta \cos \Phi - v \sum \sin^2 \Theta \sin \Phi \cos \Phi}{\sum \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi}. \quad (8)$$

Das Einsetzen von (8) in die nach der meridionalen Windkomponente  $v$  umgestellte Gleichung (7) liefert:

$$v = \frac{\sum v_{rad} \sin \Theta \sin \Phi - \frac{\sum v_{rad} \sin \Theta \cos \Phi \cdot \sum \sin^2 \Theta \sin \Phi \cos \Phi}{\sum \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi}}{\sum \sin^2 \Theta \sin^2 \Phi - \frac{(\sum \sin^2 \Theta \sin \Phi \cos \Phi)^2}{\sum \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi}}. \quad (9)$$

Die Gleichungen (8) und (9) ermöglichen die Bestimmung der horizontalen Windkomponenten aus der Radialwindgeschwindigkeit, dem Zenit- und dem Azimutwinkel, die vom Meteorradar gemessen werden.

$$\begin{pmatrix} \sum \sin^4 \Theta \\ \sum \sin^4 \Theta \cos^2 \Phi \\ \sum \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi \\ \sum 2\sin^4 \Theta \cos^3 \Phi \\ \sum 2\sin^3 \Theta \cos \Theta \\ \sum 2\sin^3 \Theta \cos^2 \Theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sum \sin^4 \Theta \cos^2 \Phi \\ \sum \sin^4 \Theta \\ \sum \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta \\ \sum 2\sin^4 \Theta \sin^3 \Phi \\ \sum 2\sin^3 \Theta \cos \Theta \\ \sum 2\cos^3 \Theta \sin \Theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sum 2\sin^4 \Theta \cos^3 \Phi \\ \sum 2\sin^4 \Theta \sin^3 \Phi \\ \sum 2\sin^2 \Theta \cos^2 \Theta \\ \sum 4\sin^4 \Theta \cos^2 \Phi \\ \sum 4\sin^3 \Theta \cos \Theta \\ \sum 4\sin^2 \Theta \cos^2 \Theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sum 2\sin^3 \Theta \cos \Theta \\ \sum 2\sin^3 \Theta \cos^2 \Theta \\ \sum 2\cos^3 \Theta \sin \Theta \\ \sum 4\sin^3 \Theta \cos \Theta \\ \sum 4\sin^2 \Theta \cos^2 \Theta \\ \sum 4\sin^2 \Theta \cos^2 \Theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum v'^2_{rad} \sin^2 \Theta \\ \sum v'^2_{rad} \sin^2 \Theta \\ \sum v'^2_{rad} \cos^2 \Theta \\ \sum 2v'^2_{rad} \sin^2 \Theta \\ \sum 2v'^2_{rad} \sin \Theta \\ \sum 2v'^2_{rad} \sin \Theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u'^2 \\ v'^2 \\ w'^2 \\ u'v' \\ u'w' \\ v'w' \end{pmatrix}$$

Abbildung 1: Matrixgleichung

## Datenfilterung

In den vom Meteorradar aufgezeichneten Datensätzen sind alle möglichen Meteorereignisse enthalten, die nach den voreingestellten Setupbedingungen im Programm „SKiYCORR“ aus den Rohdaten gefiltert wurden (vgl. Hocking et al., 2001). Eine Änderung des Triggerlevels kann zu einer deutlichen Erhöhung des Datenumfangs führen, was jedoch die Anzahl der uneindeutig in ihrer Position bestimmbaren Meteore stark ansteigen lässt. In den Daten können außerdem Signale von Störsendern und Windkraftanlagen enthalten sein, die ähnliche Signaleigenschaften wie echte Meteore aufweisen, aber meist ohne die typischen Fresneloszillationen. Bei der Bestimmung der Varianzen und Impulsflussparameter ist insofern eine weitere Datenselektion erforderlich, für welche diverse Filter in die Auswerterroutinen eingebunden werden.

Generell gehen in die Betrachtungen nur eindeutig in ihrer Position lokalisierbare Meteore ein, während die aufgrund des mit fünf Empfängerantennen überbestimmten Systems mehrdeutig georteten Meteore vernachlässigt werden. Die bei den Auswertungen abgedeckten Winkelbereiche umfassen den gesamten Azimutbereich und den zenitalen Bereich von  $0^\circ \leq \Theta \leq 60^\circ$ . Von Betrachtungen in Richtung Horizont ( $\Theta > 60^\circ$ ) wird abgesehen, da die Anzahl der detektierbaren Meteore dort allgemein stark abnimmt. Außerdem behindern in diesem Bereich am Boden befindliche Hindernisse die Messungen bzw. ist die Entfernung der Meteore zum Radar dort für eine exakte Detektion zu groß bzw. übertrifft die Reichweite des Radars. Generell werden nur solche Meteore ausgewertet, die sich maximal 400 km vom Radar entfernt befinden und deren Betrag der Radialdriftgeschwindigkeit nicht größer als 200 m/s ist.

Alle nach diesen Selektionskriterien verbleibenden Meteorereignisse werden anschließend in Bezug auf den mittleren Wind sowie in Bezug auf die Impulsflüsse analysiert. Als optimales Mittelungsintervall zur Bestimmung der Impulsflüsse mit dem SKiY-MET Meteorradar am Collm stellte sich ein Zeitraum von 2 h heraus. Bei der Anwendung kürzerer Intervalle treten aufgrund des dann geringeren Datenumfangs bei den Ergebnissen für die Horizontalwindvarianzen vermehrt negative Werte auf, was aus den Berechnungen heraus möglich, jedoch physikalisch nicht sinnvoll ist. Längere Mittelungsintervalle liefern fast ausschließlich positive Varianzen, bewirken jedoch eine zu starke Glättung der Daten. Die Datenauswertung erfolgt hier für sechs einzelne, jeweils 3 km vertikal mächtige Höhenintervalle im Bereich von 80.5 bis 98.5 km Höhe, in denen jeweils die Gesamtheit aller auftretenden Meteore für die einzelnen Berechnungen herangezogen wird. Die anschließenden Auswertalgorithmen werden nur unter den Bedingungen ausgeführt, dass die nach Gleichungen (8) und (9) berechneten horizontalen Windkomponenten vom Betrag her jeweils kleiner als 150 m/s sind und dass pro Höhen- und Zeitintervall mehr als 30 Meteore vorliegen, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Ist dies erfüllt, so wird ein Selektionsverfahren in Anlehnung an Hocking et al. (2001) zur Zurückweisung von Ausreißerwerten (*outlier rejection*) des Horizontalwindes angewandt. Hierbei wird für jeden Meteor die gemessene Radialwindgeschwindigkeit  $v_{rad}$  auf die Horizontalebene zurückprojiziert und mit dem auf diesen Horizontalwind projizierten, aus den realen mittleren Horizontalwindkomponenten je Zeitintervall bestimmten Absolutwind  $v_{abs} = \sqrt{u^2 + v^2}$  verglichen. Überschreitet die Differenz:

$$\Delta v_{hor} = \left| v_{abs} \cos(\Delta\Phi) - \frac{v_{rad}}{\sin\Theta} \right|, \quad (10)$$

einen Wert von 40 m/s oder beträgt die azimutale Winkelabweichung  $\Delta\Phi$  zwischen dem Absolutwind und dem auf die Horizontalebene rückprojizierten Radialwind einen Wert von  $(90\pm 5)^\circ$  bzw.  $(270\pm 5)^\circ$ , so wird das Meteorereignis verworfen. Eine weitere Werteselektion wird bei der Berechnung der Vektorkomponenten auf der rechten Seite der Matrixgleichung vorgenommen. Danach gehen in die Summenbildung nur Terme ein, bei denen die Werte der Radialwindabweichung  $v'_{rad}$  innerhalb der dreifachen Standardabweichung liegen.

## Ergebnisse

Die aus der Matrixgleichung erhaltenen Varianzen und Impulsflusskomponenten weisen in den Zeitreihen für die Höhenintervalle 3 (86.5-89.5 km) und 4 (89.5-92.5 km) optimale Ergebnisse mit möglichst wenigen, aus den Selektionskriterien heraus resultierenden Datenlücken auf. Daher werden im Folgenden zunächst nur die Ergebnisse im Höhenintervall 3 näher betrachtet.

Als Beispiel sind in den Abbildungen 2 und 3 die Zeitreihen für die Varianzen und Impulsflusskomponenten zusammen mit der Anzahl der Meteore pro 2-h-Mittelungsintervall für den Monat Juni des Jahres 2006 am Collm dargestellt. Die tageszeitliche Variation der Meteorereignisse mit maximalen Zählraten in den Nacht- bzw. frühen Morgenstunden und einem Minimum der Meteoranzahl in den Nachmittagsstunden ist deutlich zu erkennen. In Fällen mit besonders niedrigen Meteoranzahlraten ( $\leq 30$ ) pro Höhen- und 2-h-Mittelungsintervall liegen in den Varianz- und Impulsflusszeitreihen aufgrund des angewandten Selektionsverfahrens Datenlücken vor. Für die zonale und meridionale Varianzkomponente  $\overline{u'^2}$  und  $\overline{v'^2}$  treten bei einer 2-h-Mittelung nur in wenigen Einzelfällen physikalisch nicht sinnvolle negative Werte auf. Diese, sowie einzelne positive Extrema fallen in der Regel mit einer niedrigen Anzahl von Meteoren zusammen.

Die Werte der zonalen Varianzkomponente sind in ihrem zeitlichen Verlauf deutlich stabiler als jene der Meridionalkomponente. Der überwiegende Datenanteil beider Zeitreihen liegt etwa im Größenbereich zwischen 100 und 500  $\text{m}^2/\text{s}^2$ . Die Werte der vertikalen Varianz  $\overline{w'^2}$  schwanken hauptsächlich im Bereich von -100 und 100  $\text{m}^2/\text{s}^2$  und zeigen damit einen vergleichsweise großen relativen Fehler. Der in Abbildung 3 dargestellte meridionale Fluss zonalen Impulses  $\overline{u'v'}$ , der vertikale Fluss zonalen Impulses  $\overline{u'w'}$  sowie der vertikale Fluss meridionalen Impulses  $\overline{v'w'}$  schwanken ebenfalls um den Betrag Null herum. Für  $\overline{u'v'}$  liegen vorrangig Werte zwischen -150 und 150  $\text{m}^2/\text{s}^2$  vor, während die Beträge der vertikalen Flüsse überwiegend kleiner als 100  $\text{m}^2/\text{s}^2$  sind. Damit liegen für das Radar Collm Varianz- und Impulsflusszeitreihen vor, die vergleichbare Größenordnungen aufweisen wie in verschiedenen Publikationen für andere Standorte bisher zu finden sind (Gavrilov et al., 2000; Hocking, 2005; Fritts et al., 2006).

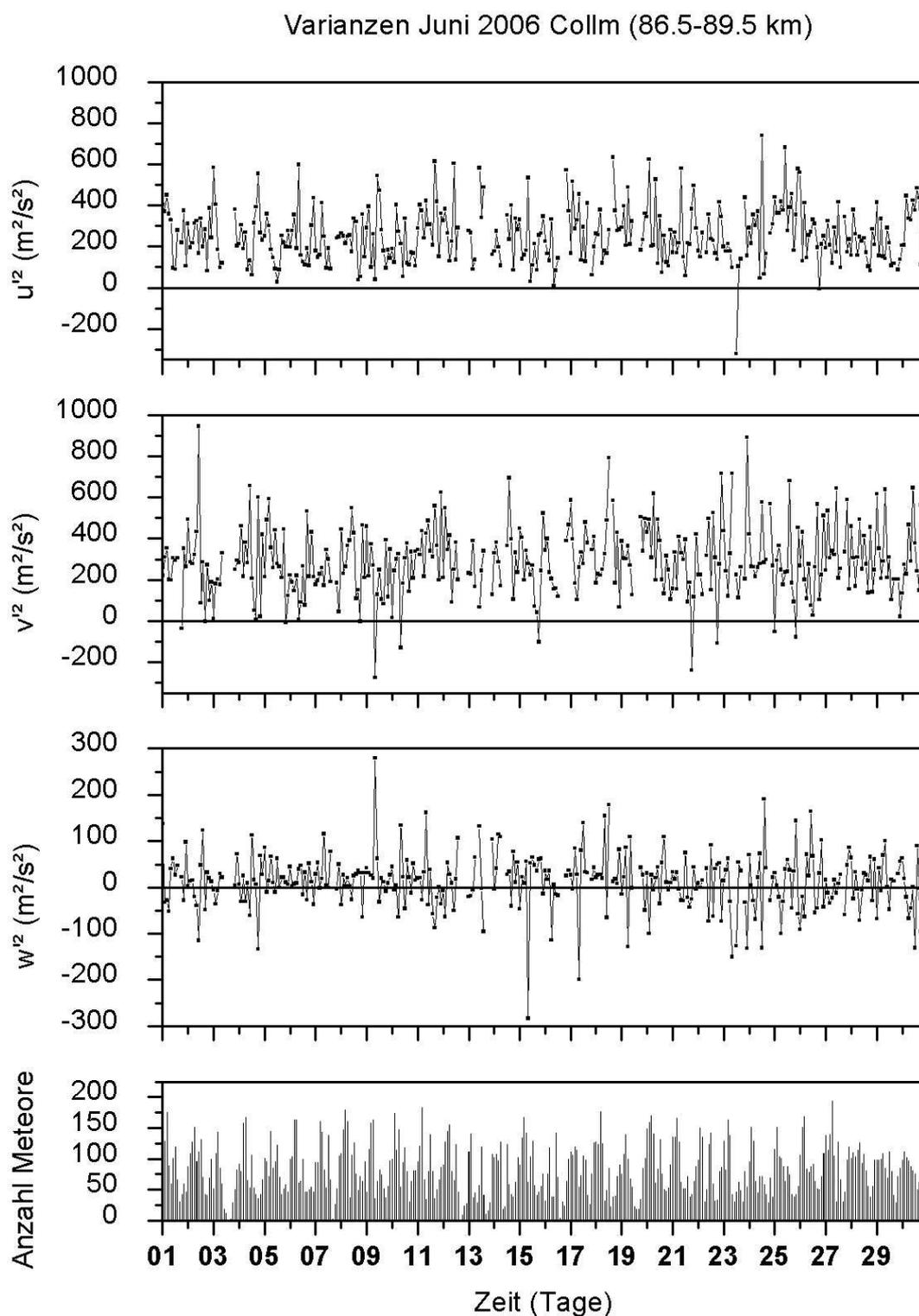


Abbildung 2: Zeitreihen für die Varianzen  $\overline{u^2}$ ,  $\overline{v^2}$  und  $\overline{w^2}$  sowie die Anzahl der Meteore pro 2-h-Mittelungsintervall im Juni 2006 am Collm für das Höhenintervall 86.5-89.5 km.

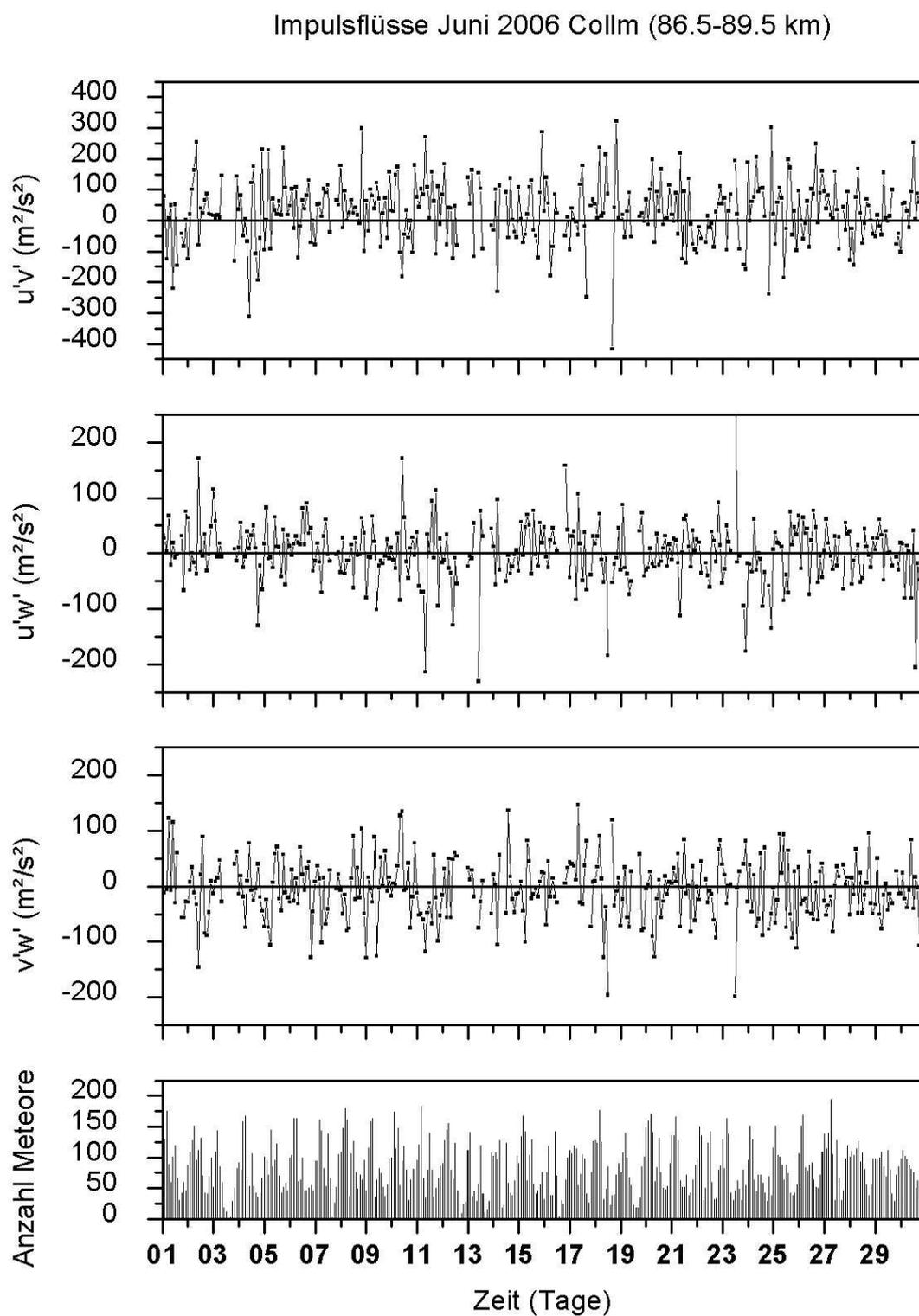


Abbildung 3: Zeitreihen für die Impulsflüsse  $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{u'w'}$  und  $\overline{v'w'}$  sowie die Anzahl der Meteore pro 2-h-Mittelungsintervall im Juni 2006 am Collm für das Höhenintervall 86.5-89.5 km.

Weiterhin wurden die Höhenprofile aus monatlich gemittelten Werten für den vertikalen Fluss zonalen Impulses  $\overline{u'w'}$  und für die mittlere Zonalwindgeschwindigkeit  $\overline{u}$  im Jahresgang betrachtet, um deren Variabilität und Abhängigkeit voneinander zu untersuchen. Abbildung 4 zeigt die Profile für das Jahr 2006 am Collm. In diesen ist zu beachten, dass vereinzelte Extremwerte des Impulsflusses im untersten oder obersten Höhenbereich aufgrund zu großer Datenlücken infolge geringer Meteorzählraten auftreten. In Übereinstimmung mit Literaturergebnissen (u.a. Manson und Meek, 1986; Kashcheyev und Oleynikov, 1994) herrschen während der Herbst- und Wintermonate fast über den gesamten Höhenbereich positive Werte für die Zonalwindgeschwindigkeit, d.h. Westwind, vor. Im Frühling und Sommer sind vor allem in den untersten Höhenbereichen negative Werte, also Ostwind, vorzufinden, während darüber ein recht stark ausgeprägter Westwind vorherrscht. Die Beträge der Westwinde weisen generell gegenüber jenen der Ostwinde eine viel größere Spannbreite auf. In den Bereichen mit vorherrschendem Westwind treten überwiegend negative Werte des SW-Impulsflusses  $\overline{u'w'}$  auf. Im Sommer wird deutlich, dass, abgesehen vom untersten Messniveau, bei dem die Genauigkeit fraglich ist, der positive Impulsfluss mit wachsender Höhe abnimmt. Dies zeigt die Kopplung von  $\overline{u'w'}$  mit dem mittleren Grundstrom. Einerseits filtert die in den Sommermonaten vorherrschende Windscherung Energie aus den Wellen, d.h. es geht Impuls vom SW-Fluss auf den mittleren Grundstrom über. Andererseits ist die Abnahme zonalen Impulses mit einer Zunahme des mittleren Windes verbunden, da unter Vernachlässigung nichtkonservativer Terme die erste transformierte Euler'sche gemittelte Bewegungsgleichung geschrieben werden kann als:

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} - f v^* = -\frac{\partial}{\partial z} \overline{u'w'} + \frac{\overline{u'w'}}{H}, \quad (11)$$

mit dem Coriolisparameter  $f$ , der Meridional Komponente der Residualzirkulation  $v^*$  und der Skalenhöhe  $H = RT g^{-1}$ . Dabei ist  $R$  die spezifische Gaskonstante für trockene Luft,  $T$  die absolute Temperatur und  $g$  die höhenabhängige Schwerebeschleunigung. Aus Gleichung (11) wird ersichtlich, dass positive, nach oben abnehmende Vertikalflüsse zonalen Impulses mit einer positiven, also nach Osten gerichteten Beschleunigung einhergehen, was in Abbildung 4 sichtbar wird. Der aufgrund aus der Matrixinversion resultierende relative Fehler für den vertikalen Fluss zonalen Impulses beträgt etwa 5%.

Zur Untersuchung der auftretenden Periodizitäten im Verlauf eines Jahres wurden die Zeitreihen für den vertikalen Fluss zonalen Impulses jeweils für ein 60-Tage-Zeitfenster mit einer Verschiebung von je einem Tag Fouriertransformiert und das gleitende Leistungsspektrum betrachtet. Abbildung 5 zeigt dieses für  $\overline{u'w'}$  im Jahr 2006. Vor allem in den oberen und unteren Frequenzbereichen liegt ein sehr hoher Rauschanteil vor, der durch die Skalierung der Frequenzachse sowie der Leistungswerte in der Abbildung weitestgehend entfernt wurde. Dieses Rauschen ist auf Aliasingeffekte zurückzuführen. Kurzperiodische Schwankungen im Bereich von Stunden - wie dies für SW typisch ist - sind aufgrund des 2-h-Mittelungsintervalls der Datensätze nur schlecht auflösbar. Im Bereich sehr großer Periodendauern von mehreren

### Profile des vertikalen Flusses zonalen Impulses $u'w'$ ( $m^2/s^2$ ) und des mittleren Zonalwindes $u$ (m/s)

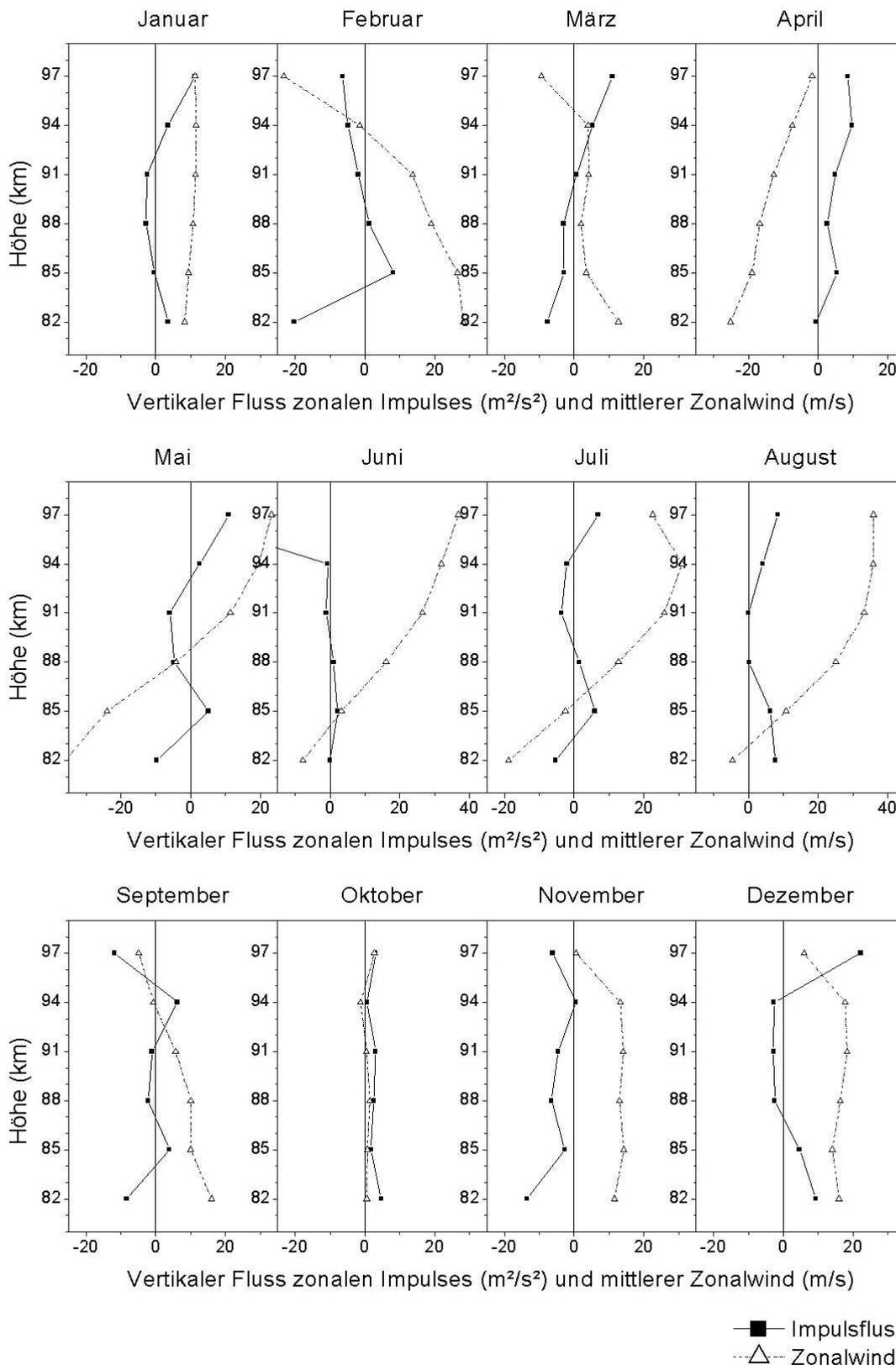


Abbildung 4: Höhenprofile des vertikalen Flusses zonalen Impulses  $\overline{u'w'}$  und des mittleren Zonalwindes  $u$  für das Jahr 2006 am Collm.

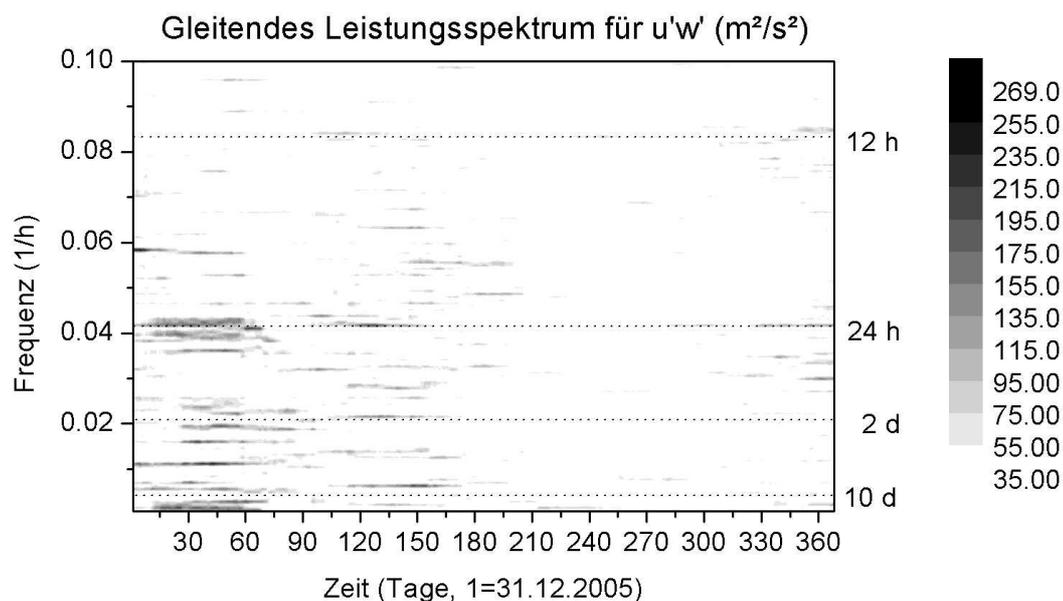


Abbildung 5: Gleitendes Leistungsspektrum für den vertikalen Fluss zonalen Impulses  $\overline{u'w'}$  für das Jahr 2006 am Collm für das Höhenintervall 86.5-89.5 km. Bei der Fourieranalyse wurde ein Zeitfenster von 60 Tagen gewählt, das im Analysezeitraum vom 01.12.2005 bis 31.01.2007 mit einem Zeitversatz von einem Tag verschoben wurde. Punktierte Linien markieren ausgewählte Periodenbereiche.

Tagen und darüber hinaus erscheinen einige Extrema in erster Linie aufgrund zufällig auftretender Einzelereignisse im Jahr, die nicht auf Wellenaktivität zurückzuführen sind. Abbildung 5 zeigt, dass die stärksten periodischen Schwankungen in den Winter- und Frühlingsmonaten vorzufinden sind. Die 24-stündige Gezeit ist dabei am intensivsten ausgeprägt. Dies ist aber wahrscheinlich vordergründig auf eine Korrelation zwischen den Impulsflusswerten und der täglichen Variation der Meteoranzahl zurückzuführen, da in Zeitabschnitten mit hohen Meteoranzahlraten die Berechnung der Impulsflüsse am besten erfolgen kann, während niedrigere Datendichten ungenauere Ergebnisse erbringen. Bei der Korrelationsanalyse ergibt sich ein Kreuzkorrelationskoeffizient von 0.3, der auf einen schwachen Zusammenhang zwischen Impulsflusswerten und Meteoranzahl hindeutet. Die halbtägige Gezeit ist dagegen fast gar nicht messbar. Auch planetare Wellen wie beispielsweise die Quasi-2- und Quasi-10-Tage-Welle sind nur schwach und vorrangig im Winter vorzufinden, obwohl die Quasi-2-Tage-Welle typischerweise im Sommer auftritt (Jacobi et al., 1997).

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass mit dem Meteorradar in Collm Varianzen und SW-Impulsflüsse in der MLT gemessen werden können, die repräsentative Größenordnungen besitzen. Die zugehörigen Vertikalprofile weisen deutlich die Kopplung des vertikalen Flusses zonalen Impulses mit dem mittleren Grundstrom auf. Periodizitäten bzw. Effekte planetarer Wellen sind nicht unmittelbar erkennbar und bedürfen weiterer Untersuchungen, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, die in diversen Publikationen (Jacobi et al., 2006; Manson et al., 2002) vorzufinden sind. Die geringe Anzahl an Meteoren, die aus der Dipolabstrahlungscharakteristik des Meteorradars in Collm resultieren, erschweren die Auflösung kleiner Mittelungsintervalle und damit kurzperiodischer Schwankungen im Bereich weniger Stunden. Daher ist es erforderlich für weitere Untersuchungen die Datenbasis durch Messreihen zusätzlicher Anlagen mit höheren Datendichten wie beispielsweise den Meteorradaren in Juliusruh (54.6°N, 13.4°E) und Andenes (69.3°N, 16.0°E) zu erweitern. Diese verfügen über Quadrupolantennen und ermöglichen aufgrund der größeren erfassbaren Meteoranzahl eine höhere zeitliche Auflösung. Ferner können die Ergebnisse für die unterschiedlichen geographischen Breiten verglichen werden. Es ist ebenfalls von Interesse die zeitliche Auflösung für Untersuchungen hochfrequenter Wellen – zumindest für begrenzte Zeitintervalle – in Anlehnung an Kumar et al. (2007) zu erhöhen, indem nur Tagesabschnitte mit hohen Meteorzählraten in den Analysealgorithmen berücksichtigt werden.

## Danksagung

Besonderer Dank geht an Dr. W. Singer für seine Ratschläge und hilfreichen Diskussionen während des Aufenthalts am ALOMAR Observatorium, Norwegen.

Die Arbeit wurde unter dem Projekt „ALOMAR eARI“ (RITA-CT-2003-506208) unterstützt. Dieses Projekt erhält Forschungsmittel vom European Community's 6th Framework Programme.

Weiterhin danken wir F. Kaiser für die technische Unterstützung und Wartung des Meteorradars in Collm.

## Literatur

- Fritts, D.C., Janches, D., Riggin, D.M., Stockwell, R.G., Sulzer, M.P., Gonzalez, S., 2006: Gravity waves and momentum fluxes in the mesosphere and lower thermosphere using 430 MHz dual-beam measurements at Arecibo: 2. Frequency spectra, momentum fluxes, and variability. *J. Geophys. Res.*, 111, doi: 10.1029/2005JD006883.
- Gavrilov, N.M., Fukao, S., Nakamura, T., 2000: Gravity wave intensity and momentum fluxes in the mesosphere over Shigaraki, Japan (35°N, 136°E) during 1986-1997. *Ann. Geophysicae*, 18, 834-843.

- Hocking, W.K., Fuller, B., Vandepier, B., 2001: Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 63, 155-169.
- Hocking, W.K., 2005: A new approach to momentum flux determinations using SKiY-MET meteor radars. *Ann. Geophysicae*, 23, 1-7.
- Jacobi, Ch., Schminder, R., Kürschner, D., 1997: The quasi two-day wave as seen from D1 LF wind measurements over Central Europe (52°N, 15°E) at Collm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 59, 1277-1286.
- Jacobi, Ch., Fröhlich, K., Pogoreltsev, A., 2006: Quasi two-day-wave modulation of gravity wave flux and consequences for the planetary wave propagation in a simple circulation model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 68, 283-292.
- Kashcheyev, B.L., Oleynikov, A.N., 1994: Dynamic regime of the mesopause-lower thermosphere at midlatitudes of the northern hemisphere by radio meteor observations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56, 1197-1207.
- Kumar, K.K., Antonita, T.M., Shelbi, S.T., 2007: Initial results from SKiYMET meteor radar at Thumba (8.5°N, 77°E): 2. Gravity wave observations in the MLT region. *Radio Science*, 42, doi: 10.1029/2006RS003553.
- Manson, A.H., Meek, C.E., 1986: The dynamics of the mesosphere and lower thermosphere at Saskatoon (52°N). *J. Atmos. Sci.*, 43, 276-284.
- Manson, A.H., Meek, C.E., Koshyk, J., Franke, S., Fritts, D.C., Riggin, D., Hall, C.M., Hocking W.K., MacDougall, J., Igarashi, K., Vincent, R.A., 2002: Gravity wave activity and dynamical effects in the middle atmosphere (60-90km): observations from an MF/MLT radar network, and results from the Canadian Middle Atmosphere Model (CMAM). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 64, 65-90.
- Oleynikov, A.N., Jacobi, Ch., Sosnovchik, D.M., 2005: Parameters of internal gravity waves in the mesosphere-lower thermosphere region derived from meteor radar wind measurements. *Ann. Geophysicae*, 23, 3431-3437.

### **Adressen der Autoren**

Manja Placke (placke@uni-leipzig.de), Christoph Jacobi (jacobi@uni-leipzig.de), Gunter Stober (stober@uni-leipzig.de), Institut für Meteorologie, Universität Leipzig, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig