

Klimasignale im Erdmagnetfeld

Hermann Lühr, Kathrin Häusler, Jaeheung Park
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The role of the middle and upper atmosphere for climate has long been underestimated. Recent studies, however, indicate the influence of stratospheric dynamics on large scale weather phenomena. Within the frame of the DFG Priority Program “Climate And Weather of the Sun-Earth System (CAWSES)”, scientists from the GFZ German Research Centre for Geosciences, contributed to this topic. The studies focussed on the coupling of processes from the troposphere up into the high atmosphere. Our investigations were mainly based on data from the German CHAMP satellite. One of the surprising results is that tropospheric thunderstorms are able to excite global scale atmospheric tidal waves that were still detectable in air density and wind measurements by CHAMP at 400 km altitude. Another sensitive indicator of these tides in the ionosphere is the equatorial electrojet (EEJ). We have shown that the longitudinal variation of the EEJ intensity is controlled closely by the tropical thunderstorm distribution. Another, unexpected finding is that so-called sudden stratospheric warming (SSW) events in polar regions have a significant influence on the dynamics of the ionosphere at low latitudes. Also here the EEJ is a suitable indicator of the modifications. It has been shown that the lunar tidal signal of the EEJ is markedly amplified during SSW events. This characteristic feature may be suitable for identifying SSW occurrences for times from which no direct observations of sudden stratospheric warming exists. These examples show that long series of geomagnetic field records can be regarded as a suitable archive of climate variations and may help to improve the climate modelling.

Hochreichende tropische Konvektionswolken



Mit der Einrichtung des DFG-Schwerpunktprogramms „Climate And Weather of the Sun-Earth System (CAWSES)“ (Lübken, 2012) bekamen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ die Möglichkeit, sich an der Erforschung der atmosphärischen Kopplungsprozesse zwischen den Schichten von der Troposphäre bis zur Thermosphäre und Ionosphäre zu beteiligen. Diese Studien basierten ganz wesentlich auf Beobachtungen des deutschen Satelliten CHAMP, der unter Federführung des GFZ konzipiert, gefertigt und betrieben wurde. Die Instrumente auf CHAMP lieferten Beiträge zur Erforschung des Schwere- und Magnetfelds und zur Atmosphärensondierung. Hier beziehen wir uns im Wesentlichen auf die hochgenauen Messungen des Erdmagnetfelds.

Signale der Gewitter im Erdmagnetfeld

In tropischen Breiten findet der vertikale Wärme- und Wasserdampftransport vorwiegend durch starke Gewitter statt. Gewitter treten bevorzugt in den Nachmittags- und Abendstunden auf; ihre Aktivitätszentren folgen der geographischen Breite des jährlichen Gangs der Sonne, und sie konzentrieren sich über kontinentalen Gebieten.

Aus der Summe dieser Bedingungen ergeben sich jahreszeitabhängige, charakteristische Muster der Aktivität. Während des Frühjahrs und Herbstes findet man vier Gewittergebiete, die etwa um 90° in der Länge voneinander getrennt sind (Südamerika, Afrika, Indonesien und Ozeanien, siehe Abb. 1 unten). Zu Sommer- und Winterzeiten ergeben sich dagegen drei kontinentale Aktivitätszentren. Mit diesen Gewittern wird im tagesperiodischen Rhythmus viel Energie in der oberen Troposphäre durch Kondensation des Wasserdampfs zu Wolkenröpfchen freigesetzt. Dieser Energieumsatz reicht aus, um die gesamte Atmosphäre in Schwingungen zu versetzen. Regelmäßige Schwingungen der Atmosphäre mit 24-, 12-, 8-, 6-Stunden-Periode werden als solare Gezeiten bezeichnet. Erst 2006 konnte belegt werden, dass sich die von Gewittern angeregten Gezeitensignale, entgegen der bis dahin herrschenden Lehrmeinung, bis in die Hochatmosphäre ausbreiten. Mit neuesten Daten der GFZ-CHAMP-Mission konnten wir erstmalig bestätigen, dass die von Gewittern ausgehenden Gezeitensignale auch im Wind in 400 km Höhe zu beobachten sind (Häusler et al., 2007; Häusler und Lühr, 2009). Darüber hinaus lassen sich diese Gezeiten ebenfalls in den ionosphärischen Strömen nachweisen (Lühr et al., 2008).

Ein sensibler Indikator für die Dynamik der Hochatmosphäre ist der äquatoriale Elektrojet (EEJ). Dabei handelt es sich um einen intensiven ionosphärischen Strom, der entlang des magnetischen Äquators fließt und dessen aktuelle Strom-

stärke sich gut über Magnetfeldmessungen bestimmen lässt. Die hochempfindlichen CHAMP-Magnetometer ermöglichten die Erstellung eines globalen Abbilds der Elektrojetstärke für jeden Tag. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass die durch Gewitter erzeugten Gezeitenwellen stark die EEJ-Stärke modulieren. Damit stellt die satellitengestützte Beobachtung

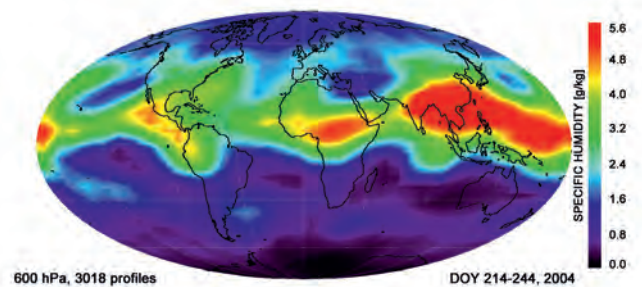
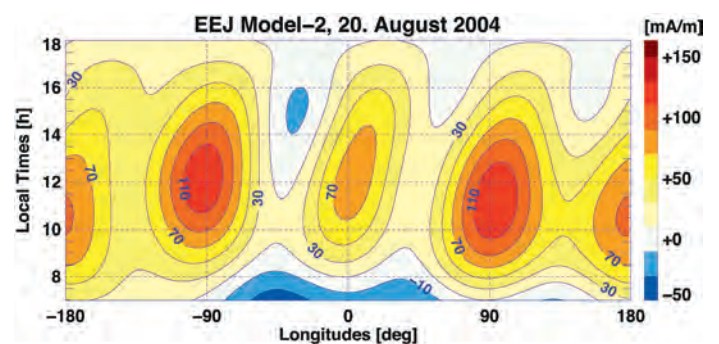
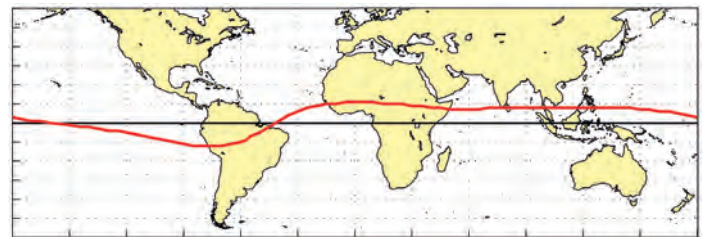


Abb. 1: Einfluss von Gewittern auf den äquatorialen Elektrojet (EEJ). Oben ist der Verlauf des Elektrojets entlang des magnetischen Äquators dargestellt. In der Mitte findet man die Änderung der Stromstärke mit der geographischen Länge und der Uhrzeit für den Monat September. Zum Vergleich ist unten der Wassergehalt der Luft in 4 km Höhe gezeigt (S. Heise, GFZ). Gebiete hoher Luftfeuchtigkeit, ein Hinweis auf Gewitteraktivität, korrelieren gut mit Bereichen verstärkten Elektrojets.

Fig. 1: Coupling between thunderstorms and the equatorial electrojet (EEJ). The top frame shows the location of the electrojet flowing along the magnetic equator. Below the variation of the electrojet current strength with latitude and local time is presented in comparison with the global distribution of water vapour at 4 km altitude (Courtesy S. Heise, GFZ). It is obvious to see that regions of intense thunderstorm clouds correlate well in longitude with maxima in electrojet strength.



Kontakt: H. Lühr
(hluehr@gfz-potsdam.de)

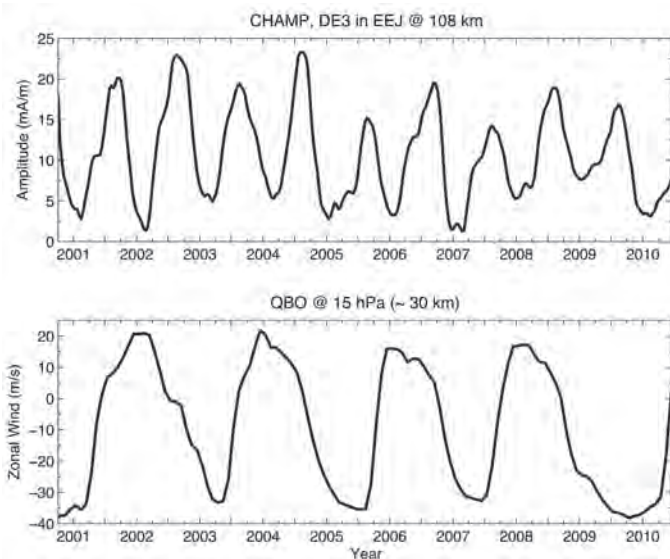


Abb. 2: Modulation des äquatorialen Elektrojets (EEJ) durch solare Gezeiten. Oben: Zeitlicher Verlauf der Amplitude einer vierfachen Längenstruktur in Elektrojetstärke (vgl. Abb. 1). Jährlich wiederkehrend ist sie während August-September am besten ausgebildet. Unten: Verlauf der stratosphärischen zonalen Winde in niedrigen Breiten. Westwinde sind durch positive Geschwindigkeiten gekennzeichnet, Ostwinde durch negative. Während Zeiten mit stratosphärischen Westwinden ist die Modulation des EEJ durch Gewitter stärker.

Fig. 2: Modulation of the equatorial electrojet by solar tides. Top: Annual variation of the wave-4 longitudinal structure of the electrojet (see Fig. 1). Peak amplitudes appear every year around August-September. Bottom: Temporal variation of the stratospheric zonal wind at low latitudes. Westerly winds are represented by positive velocities, easterly winds by negative. During westerly stratospheric winds the modulation of the EEJ driven by thunderstorms is larger.

des EEJ eine interessante Fernerkundungsmethode für die Atmosphären- und Klimaforschung dar. Gewittergebiete bilden sich in den aus CHAMP-Messungen abgeleiteten Vertikalprofilen der spezifischen Luftfeuchte und Temperatur deutlich ab (Abb. 1, unten).

Interessant ist nun, dass der ionosphärische Elektrojet speziell über den Gebieten starker Gewitteraktivität hohe Stromstärken aufweist. Man findet die vierfache Längenstruktur der Gewitter, die während der Herbstmonate besonders ausgeprägt ist, auch im Elektrojet wieder. Im Sommer und Winter überwiegen dagegen, wie auch im EEJ, die Dreifachstrukturen. Aus der 10-jährigen Messreihe der CHAMP-Daten lässt sich der jahreszeitliche Verlauf der Vierfachwelle ableiten. Diese Welle moduliert im Herbst den EEJ am stärksten und verschwindet nahezu um die Jahreswende (Abb. 2).

Weiterhin ist ein zweijähriger Rhythmus in der Abfolge von größeren und kleineren Amplituden zu erkennen. Interessanterweise korreliert der Wechsel in der Amplitudengröße gut mit

der Phase der „Quasi-Biannual Oscillation“ (QBO) des Winds in der Stratosphäre niedriger Breiten. Dabei ist das Gezeitensignal im EEJ stärker in den Jahren mit Stratosphärenwinden aus Westen als in Jahren mit östlichen Winden. Zu untersuchen ist, ob die QBO die Stärke der tropischen Gewitter beeinflusst, oder ob die QBO die Bedingungen der Signalausbreitung von der Troposphäre in die Hochatmosphäre moduliert. Bisherige Beobachtungen zeigen, dass während QBO West-Phasen mehr Energie aus den unteren Schichten in die Hochatmosphäre transportiert wird.

Klimasignale in den Mondgezeiten

Wie die Ozeane reagiert auch die Atmosphäre auf die Anziehungskraft des Mondes und der Sonne. Allerdings ist der Effekt an der Erdoberfläche so gering, dass er in Luftdruckschwankungen nur als Mittel über viele Jahre nachgewiesen werden kann. In der Hochatmosphäre sind die Gezeiten dagegen viel deutlicher. Auch hier bietet sich wieder der äquatoriale Elektrojet als Indikator der Dynamik an.

Neuere Forschungen haben ergeben, dass sich zu Zeiten plötzlicher stratosphärischer Erwärmungen in polaren Breiten während der Wintermonate die lunare Gezeitenamplitude in der Hochatmosphäre merklich verstärkt. Bekanntlich bildet sich während der dunklen Jahreszeit an den Polen ein Tiefdruckwirbel aus, in dem Kaltluft gefangen ist. In der nördlichen Hemisphäre bricht dieser Wirbel im Winter gelegentlich auf, und es kann warme Luft in die Polregion einfließen. Eine plötzliche Stratosphärenerwärmung (SSW, Sudden Stratospheric Warming) bewirkt dann eine großräumige Umgestaltung der Prozesse in der mittleren Atmosphäre, und sie verändert damit deutlich die Bedingungen für Wechselwirkungen zwischen den Schichten.

Ein Indikator für ein SSW-Ereignis ist der Temperaturunterschied in der Stratosphäre zwischen polaren Breiten und 60° Breite. Wir haben den gesamten CHAMP-Datensatz der Jahre 2000 bis 2010 auf die Modulation der Elektrojetstärke durch lunare Gezeiten untersucht. Dabei ist auffällig, dass das Gezeitensignal des Stroms im Winter in Jahren mit SSW-Ereignissen stark erhöhte Amplituden aufweist. Dabei ergibt sich eine exzellente Übereinstimmung zwischen plötzlicher Erwärmung der polaren Stratosphäre und den großen Gezeitenamplituden des Elektrojets (Abb. 3; vgl. Park et al., 2012).

Welcher Mechanismus diese Gezeitenverstärkung bewirkt, ist Gegenstand aktueller Forschung. Auf jeden Fall ist bemerkenswert, dass der EEJ als äquatoriales Phänomen so deutlich auf das Auftreten plötzlicher polarer Erwärmung reagiert.

International ist man sich einig, dass SSW-Ereignisse als major large-scale meteorological phenomena einen bedeutenden Einfluss auf das Wettergeschehen und das Klima haben. Leider lassen sich die SSWs nur bis in die 1950-er Jahre aus

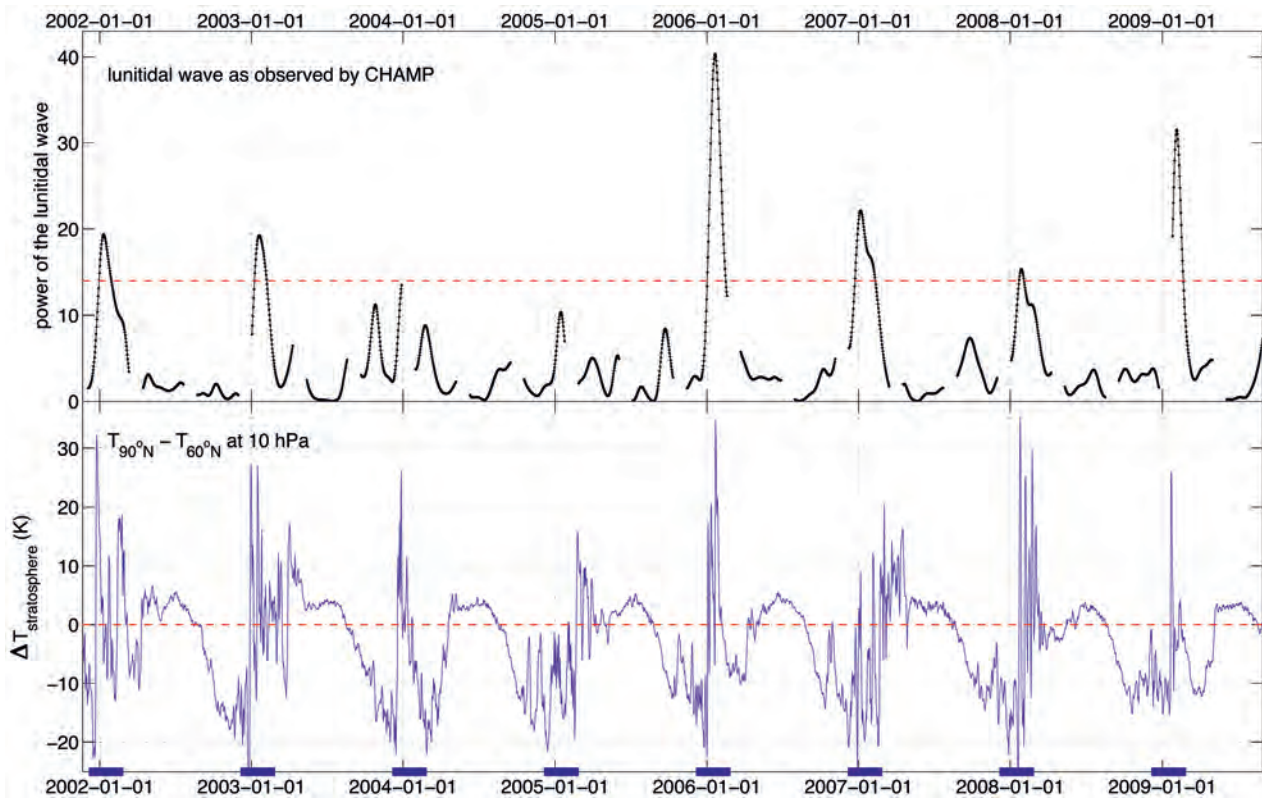


Abb. 3: Verstärkung des lunaren Gezeitensignals im äquatorialen Elektrojet (EE) durch plötzliche stratosphärische Erwärmung (SSW). Oben: Zeitlicher Verlauf der Modulationsamplitude der EEJ Stromstärke durch Mondzeiten. Während einiger Winter treten starke Überhöhungen der Gezeitenamplitude auf. In allen Fällen lassen sie sich mit plötzlichen Temperaturanstiegen in der Stratosphäre polarer Breiten (Kurve unten) in Verbindung bringen.

Fig. 3: Amplification of the lunar tidal signal in the equatorial electrojet (EE) by sudden stratospheric warming (SSW) events. Top: Temporal variation of the EEJ modulation amplitude caused by lunar tides. During certain winters large peaks of tidal amplitudes appear. In all cases the peaks are related to sudden temperature increases in the polar stratosphere (bottom curve).

Messungen zurückverfolgen. Aufgrund der klaren Korrelation zwischen SSW-Ereignissen und der verstärkten Gezeitenmodulation des äquatorialen Elektrojets eröffnet sich die Möglichkeit, aus den historischen Magnetfeldregistrierungen das Auftreten von plötzlichen stratosphärischen Erwärmungen bis in die frühen Jahre des 20. Jahrhunderts zurückzuverfolgen und damit die Datensätze der Klimamodellierung zu erweitern.

Das GFZ ist eine der führenden Institutionen bei der ESA-Mission „SWARM“, deren Start im Jahr 2012 vorgesehen ist. Diese Formation aus drei CHAMP-ähnlichen Satelliten eröffnet die Möglichkeit, die begonnene Forschung zum Thema Klimasignale im geomagnetischen Feld mit verbesserter Auflösung fortzusetzen und möglicherweise auf weitere Größen, wie die Meeresströmungen, zu erweitern. Damit werden wichtige Beiträge zur Klimaforschung bzw. zu den Ursache-Wirk-Mechanismen von Klimaveränderungen geleistet.

Literatur

- Häusler, K., Lühr, H., Rentz, S., Köhler, W. (2007): A statistical analysis of longitudinal dependences of upper thermospheric zonal winds at dip equator latitudes derived from CHAMP. - *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 12, 1419-1430, 10.1016/j.jastp.2007.04.004.
- Häusler, K., Lühr, H. (2009): Nonmigrating tidal signals in the upper thermospheric zonal wind at equatorial latitudes as observed by CHAMP. - *Annales Geophysicae*, 27, 7, 2643-2652, 10.5194/angeo-27-2643-2009.
- Lübken, F.-J. (Eds.) (2012 in press): *Climate and weather of the sun-earth system (CAWSES): highlights from a priority program (Springer Atmospheric Sciences)*, Dordrecht, X, 480 p.
- Lühr, H., Rother, M., Häusler, K., Alken, P., Maus, S. (2008): The influence of non-migrating tides on the longitudinal variation of the equatorial electrojet. - *Journal of Geophysical Research*, 113, A08313, 10.1029/2008JA013064.
- Park, J., Lühr, H., Kunze, M., Fejer, B. G., Min, K. W. (2012): Effect of sudden stratospheric warming on lunar tidal modulation of the equatorial electrojet. - *Journal of Geophysical Research*, 117, A03306, 10.1029/2011JA017351.