

Forschungsthema des Monats Februar 2014

REKLIM Forschungsthema 5: Chemie-Klima Wechselwirkungen von globaler zu regionaler Skala

Gibt es einen Einfluss der Sonnenvariabilität auf das Klima in Europa?

Neben dem bekannten etwa elfjährigen Sonnenfleckenzyklus weist die Sonneneinstrahlung auch langfristige Änderungen auf, die anhand verschiedener Proxydaten in historische Zeiträume zurückverfolgt werden können. Während der globale Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte wesentlich durch die zunehmenden Treibhausgasemissionen verursacht ist, diskutieren verschiedene Studien Beobachtungen, die einen möglichen solaren Einfluss auf die Klimavariabilität während der letzten Jahrtausende nahelegen (siehe Gray et al., 2010, und IPCC-Bericht, 2013). Es gibt zudem auch signifikante Beiträge zu regionalen Klimasignalen, welche durch die variable Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden können. Zum Beispiel wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen kalten, strengen Wintern in Europa und Phasen außergewöhnlich geringer Sonnenaktivität gefunden (z.B. Lockwood et al., 2010). Mit der Sonnenvariabilität korrelierte Klimasignale im Nordatlantik wurden in einer Reihe weiterer Untersuchungen gezeigt (siehe Ref. in Scaife et al., 2013). Ähnliche regionale Klimasignale mit Amplituden von einigen Kelvin in den Bodentemperaturen im nordhemisphärischen Winter wurden auch für Jahre mit hoher geomagnetischer Aktivität beobachtet (Seppälä et al., 2009). Arbeiten, die im Rahmen von REKLIM durchgeführt wurden, korrelieren Klimaereignisse, wie sie in mitteleuropäischen Seesedimenten gefunden werden, ebenfalls mit der langfristigen Sonnenvariabilität (siehe REKLIM-Newsletter Nr.2, 2012, p.19).

Wie kann überhaupt die geringe Variabilität der Sonneneinstrahlung von weniger als einem Promille zu einem nachweisbaren Effekt im Klimasystem führen? An dieser Problematik arbeiten Wissenschaftler im Rahmen des Topics 5 von REKLIM, der sich mit dem Thema Chemie-Klima-Kopplungen beschäftigt. Denn einer der wenigen vorgeschlagenen Mechanismen, die eine nachvollziehbare und von den beteiligten Prozessen her klare Wirkungskette bilden, ist ein durch chemisch-dynamische Kopplung von der Stratosphäre in die Troposphäre übertragenes solares Signal, der sogenannte „top-down“ Effekt (Gray et al., 2010). Für ein starkes solares Signal in der Stratosphäre gibt es zwei mögliche Quellen: a) die verglichen mit der gesamten einfallenden Strahlung hohe Variabilität in der UV-Strahlung und b) die Variabilität der Teilcheneinträge aus Aurora und Strahlungsgürteln, die durch die geomagnetische Aktivität ausgedrückt wird.

Im solaren Maximum erhöht sich die UV-Strahlung und bewirkt eine Erwärmung der oberen Schichten um ca. 1K sowie eine erhöhte Ozonproduktion von 2-3%. In die Atmosphäre einfallende Teilchen aus Aurora und Strahlungsgürteln führen zur Ionisierung der Atmosphäre und damit zu sehr komplexen und schnellen Ionenchemiereaktionen. Der atmosphärenchemisch wichtige Schritt ist dabei die Bildung von NO_x in der unteren Thermosphäre und oberen Mesosphäre. Im Laufe des polaren Winters kann das NO_x bis in die Stratosphäre transportiert werden, wo es dann schließlich zum katalytischen Ozonabbau beiträgt. Beide Prozesse greifen somit in den Haushalt des Ozons ein und ändern dessen Konzentration. Weil Ozon das für die Sonneneinstrahlung wesentliche strahlungsaktive Molekül in der mittleren Atmosphäre ist (es ist der Grund für das Ansteigen der Temperatur

mit der Höhe zwischen 10 und 50 km), ändert sich damit auch die lokale Energiebilanz in der mittleren Atmosphäre. Diese direkten Änderungen führen zu Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation, d.h. zu einem indirekten „dynamischen“ Signal in der mittleren Atmosphäre, welches die Änderungen dort bis in die Troposphäre kommuniziert (Abb. 1).

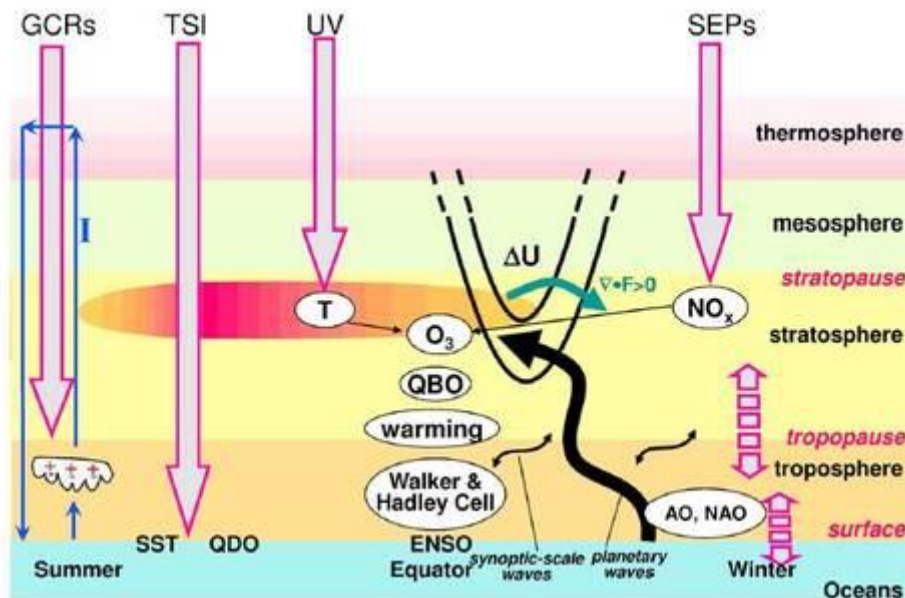


Abbildung 1: Schematische Übersicht über den Einfluss der variablen Sonnenaktivität auf das Klima. Gezeigt sind die direkten und indirekten Effekte durch solare Einstrahlungsänderungen (TSI: Total Solar Irradiance (“bottom-up”) und UV: Ultraviolet (“top-down”) während maximaler Sonnenaktivität und Teilcheneffekte, sowohl energetische Teilchen (SEPs: solar energetic particles) als auch galaktische Kosmische Strahlung (GCR: galactic cosmic radiation). Die zwei gestrichelten Pfeile deuten die Kopplung zwischen der Stratosphäre und der Troposphäre sowie die Kopplung zwischen der Atmosphäre und dem Ozean an (aus Gray et al., 2010).

Dass dieser Ansatz erfolgversprechend ist, zeigt beispielhaft die Übereinstimmung von Modellsimulationen mit in Seesedimenten im Meerfelder Maar vor ca. 2800 Jahren aufgezeichneten Klimaereignissen. Das gekoppelte Klima-Chemie-Modell reproduziert genau für Perioden geringer Sonnenaktivität die für die Sedimentbildung notwendigen Bodenluftströmungen im sogenannten Homerischen Sonnenminimum (Martin-Puertas et al. (2012), s. Abb. 2).

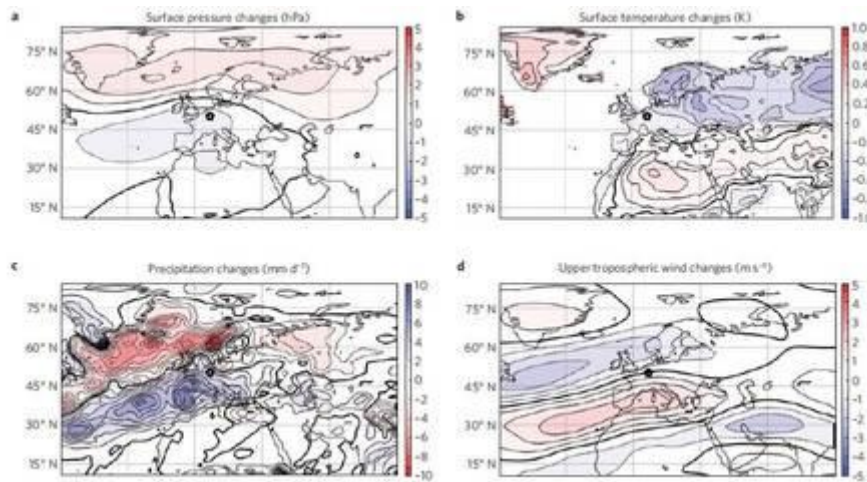


Abbildung 2: Differenz des modellierten Bodensignals zwischen Sonnenfleckenminimum und dem Langzeitmittel von Februar bis April für a) Bodendruck in hPa, b) Oberflächentemperatur in K, c) Niederschlag in mm pro Tag und d) Wind in der oberen Troposphäre (500hPa) in m/s von einer 140-jährigen Klimachemiemodell-Simulation. Der Stern zeigt die Lage des Meerfelder Maares, in welchem eine abrupte Änderung der atmosphärischen Zirkulation als Antwort auf die reduzierte Sonnenaktivität gefunden wurde, die konsistent ist mit den Modellsimulationen und Reanalysedaten für rezente solare Minima (Martin-Puertas et al., 2012).

Die Übertragung des stratosphärischen solaren Signals in die Troposphäre hinein berührt somit die allgemeine Fragestellung, inwieweit auf der dekadischen Zeitskala die mittlere Atmosphäre Zirkulationsmuster in der Troposphäre beeinflusst. Die Tatsache, dass auf der saisonalen Zeitskala die dynamische Kopplung von Stratosphäre und Troposphäre die Vorhersagbarkeit deutlich verbessert, verdeutlicht die Rolle dieser Kopplung. Klimamodellsimulationen sind bisher jedoch nicht in der Lage, beobachtete Verzögerungen in den Korrelationen wiederzugeben und zu erklären. Forschungsbedarf gibt es hier zum sogenannten „bottom-up“ Effekt (z.B. Meehl et al., 2009), der Atmosphären-Ozean Wechselwirkungen beinhaltet und erst seit kurzem in sehr rechenzeitintensiven Modellsimulationen mit Klima-Chemie-Modellen vollständig berücksichtigt werden kann. Unsicherheiten gibt es auch bei der spektralen Variation der Sonnenstrahlung (Ermolli et al., 2013) und der Extrapolation der Sonnenvariabilität auf historische und vorhistorische Zeitskalen anhand verschiedener Proxydaten.

Der Effekt von energetischen Teilchen auf den Ozonhaushalt war schon lange vermutet worden, aber erst die Beobachtungen durch Satellitensysteme wie MIPAS haben Klarheit über den Umfang und die Häufigkeit der damit verbundenen Störungen gebracht. Die Beobachtungen der letzten Jahre zeigen, dass von den verschiedenen solaren und geomagnetischen Ereignissen das in der Thermosphäre gebildete und im Winter eingetragene NO_x den wichtigsten Anteil für das in die Stratosphäre eingetragene NO_x darstellt, der sogar die sehr großen solaren Ereignisse übertreffen kann (Sinnhuber et al., 2014, siehe auch Abb. 3). Simulationen mit atmosphärischen Chemietransportmodellen unter Benutzung der beobachteten NO_x-Konzentrationen zeigen zudem, dass die mit diesem zusätzlichen NO_x verbundenen Ozonverluste in bestimmten Schichten über 30% betragen können (Reddmann et al., 2010), sich aber auch ähnlich dem solaren UV-Signal hemisphärisch im Prozentbereich

auswirken können (Abb. 4). Zentral für die korrekte Simulation dieses Prozesses in Chemie-Klima-Modellen ist eine realistische Darstellung der Bildung und des Abwärtstransports von NO_x in der unteren Thermosphäre, einer Schicht, die die meisten Chemie-Klima-Modelle nicht enthalten. Die notwendige Erweiterung des eingesetzten Chemie-Klima-Modells in die Thermosphäre ist momentan in Arbeit, um die möglichen Langzeiteffekte durch die indirekten Wirkungen der energetischen Teilchenstrahlung im Bereich der dekadischen Klimavariabilität besser quantifizieren zu können.

Die REKLIM Aktivitäten zum Einfluss der solaren Variabilität auf das Klima sind eingebunden in internationale Studien zu diesem Thema im WCRP-SPARC/SOLARIS-HEPPA Projekt (World Climate Research Program-Stratospheric Processes and their Role in Climate/Solar Influence for SPARC-High Energy Particle Precipitation; solarisheppa.geomar.de/solarisheppa/). Das nächste Projekttreffen wird Anfang Mai in Deutschland (Baden-Baden) stattfinden.

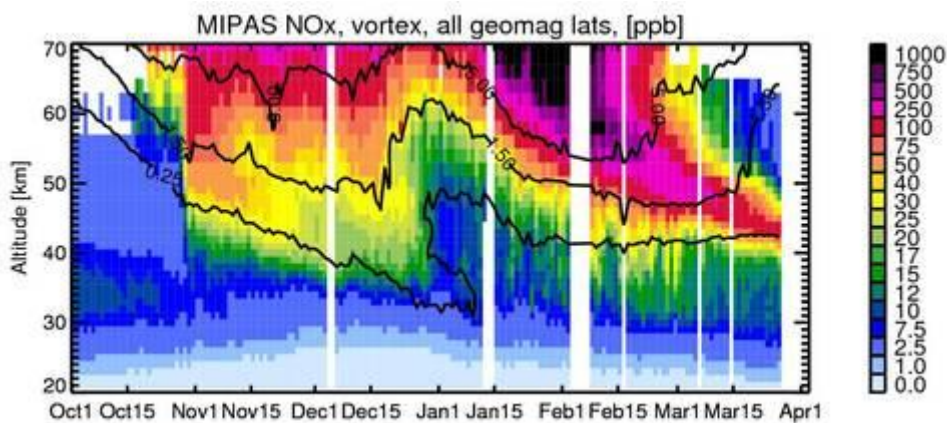


Abbildung 3: Messungen von NO_x (NO+NO₂) des MIPAS Instrumentes auf Envisat im polaren Winter 2003/2004 zeigen den Einfluss von solaren und geomagnetischen Teilchenereignissen auf das stratosphärische NO_x: im Oktober 2003 ereignete sich einer der größten bis jetzt bekannten solaren Protonenereignisse, welches einen Anstieg des NO_x-Mischungsverhältnisses oberhalb von 40 km um 1-2 Größenordnungen zur Folge hatte. Nach einer plötzlichen Stratosphärenenerwärmung im Dezember wird im Januar und Februar Transport von Luft aus der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre in die Stratosphäre beobachtet. Die während dieses starken Absinkens beobachteten Mischungsverhältnisse von NO_x sind noch einmal eine Größenordnung grösser als während des solaren Ereignisses im Oktober. In diesem ungewöhnlichen Winter wird mehr NO_x aus dem Aurora-Bereich in die Stratosphäre transportiert, als während des solaren Ereignisses lokal produziert wird (Sinnhuber et al., 2014).

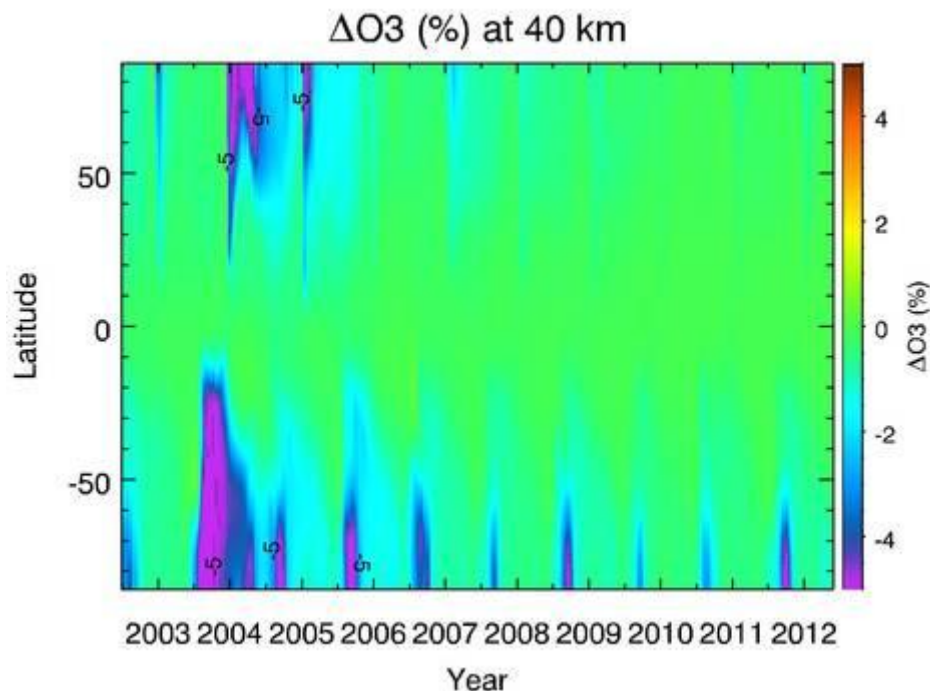


Abbildung 4: Chemischer Effekt des aus der unteren Thermosphäre transportierten NO_x auf Ozon in 40 km Höhe aus einer Chemietransportstudie. Im Laufe des Frühlings und Sommers (auf der Südhalbkugel um 6 Monate im Jahr verschoben) breitet sich das Ozonsignal in niedere Breiten aus. Die Stärke des zusätzlichen Ozonverlustes als Folge der Teilchenwechselwirkung ist vergleichbar der Ozonänderung durch die variable solare UV-Strahlung, folgt aber der geomagnetischen Aktivität und ist gegenüber dem Sonnenfleckenzyklus um etwa 2 -3 Jahre verzögert.

Ansprechpartner:

Prof. K. Matthes (GEOMAR), T. Reddmann, M. Sinnhuber, G. Stiller (KIT)

Referenzen:

Ermolli, I., K. Matthes, T. Dudok de Wit, N. A. Krivova, K. Tourpali, M. Weber, Y. C. Unruh, L. Gray, U. Langematz, P. Pilewskie, E. Rozanov, W. Schmutz, A. Shapiro, S. K. Solanki, G. Thuillier, and T. N. Woods, T. N., 2013, Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modeling Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 3945-3977, doi:10.5194/acp-13-3945-2013.

Gray, L.J., J. Beer, M. Geller, J.D. Haigh, M. Lockwood, K. Matthes, U. Cubasch, D. Fleitmann, G. Harrison, L. Hood, J. Luterbacher, G. A. Meehl, D. Shindell, B. van Geel, and W. White, 2010, Solar Influences on Climate, Rev. Geophys., 48, RG4001, doi:10.1029/2009RG000282.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp

Lockwood, M., R. G. Harrison, T. Woollings, and S. Solanki, 2010, Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environ. Res. Lett.* 5, 024001.

Martin-Puertas, C., K. Matthes, A. Brauer, R. Muscheler, F. Hansen, C. Petrick, A. Aldahan, G. Possnert, and B. van Geel, 2012, Regional Atmospheric Circulation shifts induced by a Grand Solar Minimum, *Nature Geoscience* 5, 397-401 doi:10.1038/ngeo1460.

Meehl, G.A., J.M. Arblaster, K. Matthes, F. Sassi, and H. van Loon, 2009, Amplifying the Pacific Climate System Response to a Small 11-Year Solar Cycle Forcing, *Science*, 325, 1114, DOI:10.1126/science.1172872.

Reddmann, T., R. Ruhnke, S. Versick, and W. Kouker, 2010, Modeling disturbed stratospheric chemistry during solar-induced NO_x enhancements observed with MIPAS/ENVISAT, *J. Geophys. Res.*, 115, D00I11, doi:10.1029/2009JD01256.

Scaife, A. A., S. Ineson, J. R. Knight, L. Gray, K. Kodera, and D. M. Smith, 2013, A mechanism for lagged North Atlantic climate response to solar variability, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 434 – 439, doi:10.1002/grl.50099.

Seppälä, A., C. E. Randall, M. A. Clilverd, E. Rozanov, and C. J. Rodger, 2009, Geomagnetic activity and polar surface air temperature variability, *J. Geophys. Res.*, 114, A10312, doi:10.1029/2008JA014029.

Sinnhuber, M., B. Funke, T. von Clarmann, M. Lopez-Puertas, and G. Stiller, 2014, Variability of NO_x in the polar middle atmosphere from October 2003 to March 2004: vertical transport versus local production by energetic particles, *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, 14, 1-29, doi:10.5194/acpd-14-1-2014.