

Ozon – Klimakopplung: Ein wenig verstandener Beitrag zu Klimaänderungen in den Polargebieten

M. Rex, P. von der Gathen
E-Mail: Markus.Rex@awi.de

Anthropogener Ozonabbau

Ozonsondenstationsnetz (NH)

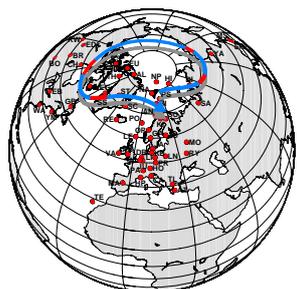


Abb. 1

Der Abbau der stratosphärischen Ozonschicht in den Polarregionen gehört zu den stärksten vom Menschen verursachten Veränderungen im Erdsystem. In der Stratosphäre, der Luftschicht von etwa 15-45km Höhe, wird der Strahlungshaushalt und damit auch die Temperaturverteilung von der Absorption solarer Strahlung in der Ozonschicht dominiert - durch die dabei entstehende Wärme nimmt die Temperatur dort um viele zehn Grad Celsius nach oben hin zu. In der Antarktis kommt es jedoch in jedem Frühjahr zu einem praktischen vollständigen Verlust der Ozonschicht und auch in der Arktis wird im Bereich des Ozonschichtmaximums in einigen Jahren mehr als die Hälfte des Ozons zerstört (z.B. Rex et al., 1997; 2006). Die daraus resultierende Umstellung des Strahlungshaushalts der Atmosphäre und das Fehlen der strahlungsbedingten Heizquelle kann besonders in den Polargebieten einen großen Einfluss auf das Klima haben. Die Wechselwirkungen zwischen Ozonschicht und Klimasystem sind jedoch derzeit noch unvollständig verstanden. In derzeitigen Klimamodellen sind die chemischen Prozesse, die die Ozonschicht

zerstören, nicht enthalten und die Wechselwirkungen zwischen Ozonzerstörung und Klimaänderungen können daher nicht wiedergegeben werden.

Wir haben in den vergangenen Jahren Verfahren entwickelt, den anthropogenen Ozonverlust präzise zu bestimmen und von natürlicher Variabilität zu trennen (z.B. von der Gathen et al., 1995; Rex et al., 1998; 2002). Das Verfahren beruht darauf, tausende von einzelnen Luftmassen in ihrer Bewegung in der Stratosphäre zu verfolgen. Von einem ausgedehnten Netzwerk von Beobachtungsstationen in den Polargebieten werden dann pro Winter zwischen 500 und 1200 ballongetragene Ozonsonden so gestartet, dass möglichst viele dieser Luftmassen in ihrer Bewegung mehrfach beprobt werden. Das Netzwerk der Beobachtungsstationen in der Arktis und ein Beispiel für eine doppelt beprobte Luftmasse ist in Abbildung 1 gezeigt. Abbildung 2 zeigt das Stationsnetzwerk in der Antarktis. Mit diesem Verfahren ist es gelungen auch die schwer zu bestimmenden arktischen Ozonverluste genau zu vermessen.

Ozonsondenstationsnetz (SH)

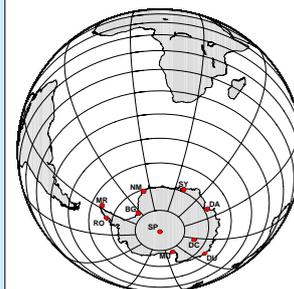


Abb. 2

Klimasensitivität des Ozonabbaus

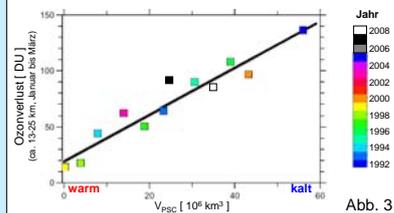


Abb. 3

Stratosphärischer Temperaturtrend

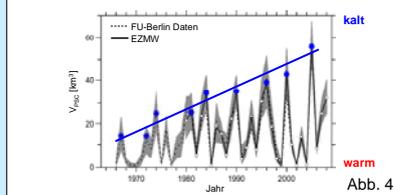


Abb. 4

Einfluss von Klimaänderungen auf den polaren Ozonverlust

Abbildung 3 zeigt die gemessenen Ozonverluste aufgetragen gegen V_{PSC} . V_{PSC} stellt dabei das über den Winter gemittelte Volumen dar, in dem die Temperaturen ausreichend tief für die Bildung sogenannter polarer stratosphärischer Wolken (Polar Stratospheric Clouds, PSC) war. Diese seltenen und nur in den Polargebieten auftretenden Wolken in der Stratosphäre spielen eine entscheidende Rolle im Ozonverlustprozess. Abbildung 3 zeigt, dass V_{PSC} der Schlüsselparameter für die Variabilität des arktischen Ozonabbaus ist. V_{PSC} lässt sich direkt aus Temperaturdaten ableiten. Der gezeigte Zusammenhang gibt demnach die Klimasensitivität des arktischen Ozonverlusts für die derzeitige FCKW-Belastung der Atmosphäre an: Es werden etwa 15 DU zusätzlicher Ozonverlust pro Grad Celsius Abkühlung der arktischen Stratosphäre auftreten (Rex et al., 2004; 2006).

Abbildung 4 zeigt die langfristige Entwicklung von V_{PSC} über die letzten 40 Jahre. Die Extremwerte haben über die gesamte Periode hinweg erheblich zugenommen: Die kalten stratosphärischen Winter sind in der Arktis erheblich kälter geworden. Während eine Abkühlung der Stratosphäre als Folge des Treibhauseffekts erwartet wird, ist das Ausmaß dieser Abkühlung unverstanden. Diese Änderung der klimatischen Bedingungen in der arktischen Stratosphäre hat zu den erheblichen Ozonverlusten in der Arktis seit Mitte der 1990er Jahre beigetragen. Davor waren die arktischen Winter in der Stratosphäre nicht kalt genug um starken Ozonverlust zuzulassen, selbst wenn damals die FCKW-Belastung der Atmosphäre schon so groß gewesen wäre wie heute (Rex et al., 2004; 2006).

Referenzen

Marshall, G.J., et al., (2006). The Impact of a Changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula Summer Temperatures. *Journal of Climate* 19: 5389-5404.
 Rex, M., et al., (1997). Prolonged stratospheric ozone loss in the 1995/96 Arctic winter. *Nature*, 389, 835-838.
 Rex, M., et al., (1998). In-situ measurements of stratospheric ozone depletion rates in the Arctic winter 1991/1992: A Lagrangian approach. *Journal of Geophysical Research*, 103/D5, 5843-5853.
 Rex, M., et al., (2002). Chemical depletion of Arctic ozone in winter 1999/2000. *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 8276, doi:10.1029/2001JD000533
 Rex, M., et al., (2004). Arctic ozone loss and climate change. *Geophysical research letters*, 31, L04116, doi:10.1029/2003GL018844.
 Rex, M., et al., (2006). Arctic winter 2005: Implications for stratospheric ozone loss and climate change. *Geophysical Research Letters*, 33, L23808, doi:10.1029/2006GL026731.
 Shindell, D.T.; Schmidt, G.A. (2004). Southern Hemisphere climate response to ozone changes and greenhouse gas increases. *Geophysical Research Letters* 31: L18209, doi:10.1029/2004GL020274.
 Thompson, D.W.J.; Solomon, S. (2002). Interpretation of recent southern hemisphere climate change. *Science* 296: 895-899.
 Turner, J., et al., (2009). Non-annular atmospheric circulation change induced by stratospheric ozone depletion and its role in the recent increase of Antarctic sea ice extent. *Geophysical Research Letters* 36: L08502, doi:10.1029/2009GL037524.
 von der Gathen, P., et al., (1995). Observational evidence for chemical ozone depletion over the Arctic in winter 1991-92. *Nature*, 375, 131-134.

Einfluss des Ozonlochs auf das antarktische Klima

Über die letzten 30 Jahre hat sich das Klima an der Erdoberfläche global fast ausnahmslos überall erwärmt. Die große Ausnahme stellt der zentrale antarktische Kontinent dar. Abbildung 5 zeigt die Temperaturentwicklung in der Antarktis mit geringen Änderungen oder Abkühlung im Bereich der zentralen Antarktis und sehr starken Erwärmungsraten im Bereich der antarktischen Halbinsel. Dieses Pattern der Temperaturveränderungen ist das Ergebnis einer verstärkten zonalen Luftmassenströmung um die Antarktis herum (siehe Pfeile in Abbildung 5, Thompson und Solomon, 2002). Die verstärkte zonale Strömung unterdrückt den Luftmassenaustausch zwischen der Antarktis und mittleren Breiten und daher auch die damit einhergehenden meridionalen Wärmetransporte, welche eine wesentliche Wärmequelle für die Antarktis darstellen. Dies hat die treibhausgasbedingte Erwärmung mehr als kompensiert, so dass es netto zu der beobachteten Abkühlung kommt. Gleichzeitig führt die Verstärkung der zonalen Strömung zu verstärkten Wärmetransporten zur Antarktischen Halbinsel, welche "quer" in der Strömung liegt. Die Stärke der zonalen Strömung ist Teil eines zwischen Stratosphäre und Troposphäre gekoppelten Variabilitätsmoders der Atmosphäre, welcher als Southern Annular Mode (SAM) bezeichnet wird. Durch gut verstandene gekoppelte Prozesse zwischen Strahlung und Dynamik hat das Ozonloch (Abbildung 6)

im Bereich der Stratosphäre zumindest im Spätwinter bis Frühsommerhalbjahr zu einer starken Verstärkung des Southern Annular Modes geführt. Zunehmend überzeugende Hinweise aus Modellstudien weisen darauf hin, dass diese vom Ozonloch verursachte Verstärkung des stratosphärischen SAM durch die ausgeprägte Stratosphären/Troposphären-Kopplung bis in die Troposphäre propagiert und zumindest teilweise die beobachtete Verstärkung des troposphärischen SAM steuert (Shindell et al., 2004; Marshall et al., 2006; Turner et al., 2009). Sollte sich diese Hypothese als richtig herausstellen, wäre durch die erwartete Erholung des Ozonlochs bis etwa 2070 mit einer Umkehr des Abkühlungstrends in der Antarktis zu rechnen. Da in diesem Zeitraum dann die dynamisch bedingte Erwärmung durch den Rückgang des Ozonlochs mit der weiter zunehmenden Erwärmung durch steigende Treibhausgaskonzentrationen einhergeht, ist auch ein besonders ausgeprägter Erwärmungstrend in der Antarktis bis Ende des Jahrhunderts im Bereich des Möglichen. Mögliche Konsequenzen für die Eismassenbilanz der antarktischen Eisschilde können einen wesentlichen Beitrag für globale Meeresspiegeländerungen darstellen. Die derzeitigen IPCC Klimamodelle beinhalten diesen Rückkopplungseffekt zwischen Ozonloch und Oberflächensystem nicht.

Temperaturtrend (farbig)
Windtrend (Pfeile)

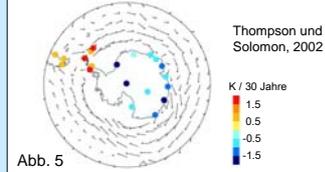


Abb. 5

Antarktisches Ozonloch

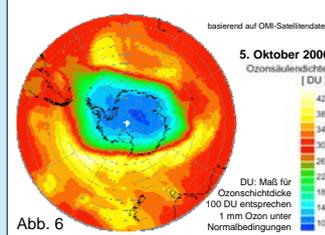


Abb. 6