

Abbau der Ozonschicht im 21. Jahrhundert

Martin Dameris*

Atmosphärenchemie · FCKW · Klimawandel · Ozon · Stickstoffoxide

In der derzeitigen öffentlichen Diskussion spielen die Themen „Ozonschicht“ und „Ozonloch“ nur noch eine untergeordnete Rolle. Seit Mitte der 1980er Jahre ist klar, dass im Wesentlichen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) sowie andere „Halocarbons“ (Verbindungen, in denen Kohlenstoffatome mit Halogenen wie Fluor, Chlor, Brom oder Iod, aber auch mit Wasserstoff verknüpft sind) für die Zerstörung der Ozonschicht in der Stratosphäre (Atmosphärenschicht von etwa von 12 bis 50 km Höhe) maßgeblich verantwortlich sind. Deshalb wurden die Produktion und der Gebrauch dieser Substanzen im Protokoll von Montreal (1987) sowie in Nachfolgevereinbarungen nahezu vollständig verboten. Als Folge dieser internationalen Vereinbarungen konnte der starke Anstieg der FCKW-Mischungsverhältnisse in der Troposphäre (Atmosphärenschicht bis in etwa 12 km Höhe) gestoppt werden (Abbildung 1); seit Mitte der 1990er Jahre ist der troposphärische FCKW-Gehalt rückläufig. Demzufolge beobachtet man nun seit einigen Jahren auch einen leichten Rückgang der Chlorkonzentration in der Stratosphäre. Aus diesem Grund wird erwartet, dass die Dicke der Ozonschicht wieder zunehmen und sich das Ozonloch über der Antarktis schließen wird.^[1] Aufgrund der langen Lebenszeiten der FCKW in der Atmosphäre wird es aber noch bis Mitte dieses Jahrhunderts dauern, bis der Chlorgehalt der Stratosphäre wieder auf Werte wie in den 1960er Jahren zurückgehen wird.

Daraus könnte man schließen, dass sich die Ozonschicht bis Mitte dieses Jahrhunderts vollständig erholen wird. Die Rückbildung der Ozonschicht hängt jedoch noch von einer Reihe anderer Prozesse in der Atmosphäre ab, sodass derzeit eine verlässliche Abschätzung der zukünftigen Entwicklung ausgesprochen schwierig ist. Aufgrund von erhöhten Konzentrationen der so genannten gut durchmischten Treibhausgase in der Atmosphäre (unter anderem CO_2 , CH_4 und N_2O) erwärmt sich die Troposphäre (Treibhauseffekt), und die Stratosphäre kühlt sich ab (verstärkte Emission langwelliger Wärmestrahlung). Eine Vielzahl der chemischen Reaktionen in der Atmosphäre ist abhängig von der vorherrschenden Temperatur: So nimmt z. B. der Ozongehalt in der mittleren und oberen Stratosphäre bei sinkenden Tempera-

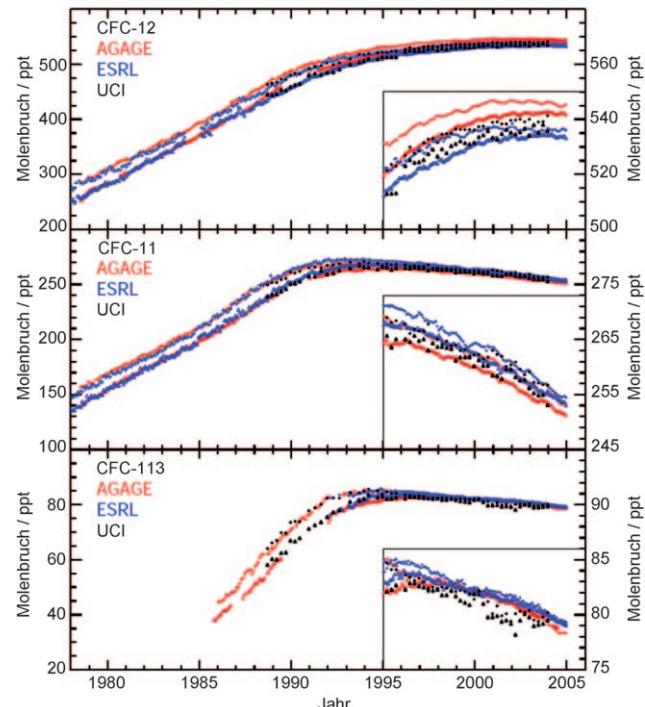


Abbildung 1. Hemisphärische Monatsmittelwerte der troposphärischen Mischungsverhältnisse (in ppt = parts per trillion = 10^{-12}) der wichtigsten FCKW (CFC-12 = CF_2Cl_2 , CFC-11 = CFC_3 und CFC-113 = $\text{Cl}_2\text{FC}-\text{CCl}_2$). Kreuze symbolisieren Messwerte für die Nordhemisphäre, Dreiecke für die Südhemisphäre. Jüngste Messwerte sind in den Einschüben jeweils vergrößert dargestellt. AGAGE = Advanced Global Atmospheric Gases Experiment, ESRL = Earth System Research Laboratory, UCI = University of California, Irvine. (Wiedergabe von Abbildung 1-1 in Lit. [1].)

turen zu, da sich die wichtigen Ozon abbauenden Reaktionen (homogene Gasphasenchemie) verlangsamen.^[2] Hingegen führen niedrigere Temperaturen in der polaren unteren Stratosphäre zu einem stärkeren Ozonabbau durch heterogene chemische Reaktionen auf sehr kalten Wolkenpartikeln.^[1]

Wegen der Änderungen der thermischen Struktur der Atmosphäre werden aber auch die dynamischen Prozesse in der Atmosphäre und damit die Umverteilungen der länger lebenden Spurengase maßgeblich beeinflusst.^[3-6] Studien mit numerischen Atmosphärenmodellen, so genannten Klima-Chemie-Modellen, kommen derzeit noch zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Geschwindigkeit der Er-

[*] Prof. Dr. M. Dameris

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,
Institut für Physik der Atmosphäre
Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling (Deutschland)
E-Mail: martin.dameris@dlr.de
Homepage: <http://www.dlr.de/ipa>

holung der stratosphärischen Ozonschicht.^[1] Einigkeit besteht jedoch darin, dass sich die Ozonschicht regional unterschiedlich schnell regenerieren wird. Die Modellrechnungen zeigen, dass die mit dem Klimawandel in Verbindung stehenden Vorgänge insgesamt zu einer beschleunigten Erholung der Ozonschicht führen werden. Bereits für die Zeit vor Mitte dieses Jahrhunderts werden wieder Ozonwerte vorhergesagt, wie sie in den 1960er Jahren gemessen wurden (Abbildung 2).

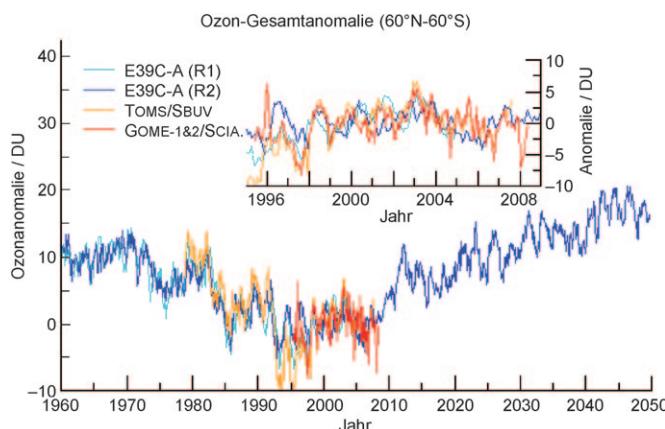


Abbildung 2. Gemittelte Anomalien der Ozongesamtsäule (in Dobson-Einheiten, DU) für den Bereich von 60°N bis 60°S. Es wurde jeweils der mittlere Jahressang für den Zeitraum von 1995 bis 2004 abgezogen. Die orangefarbene sowie die rote Kurve stellen Messdaten dar, die von Satelliten-gestützten Instrumenten gewonnen wurden. Die blauen Kurven zeigen Ergebnisse von numerischen Simulationen mit einem Klima-Chemie-Modell (E39C-A). Deutlich zu erkennen ist der Rückgang der stratosphärischen Ozonschicht in den 1980er und 1990er Jahren sowie der prognostizierte Anstieg bis Mitte dieses Jahrhunderts. Der Einschub zeigt einen Teil der Datenreihen in vergrößerter Form. (Aktualisierte Fassung von Abbildung 9 in Lit. [7].)

In einer jüngst in *Science* erschienenen Publikation von Ravishankara und Mitarbeitern wird ein weiterer wichtiger Aspekt beleuchtet, der die zukünftige Entwicklung der Ozonschicht maßgeblich beeinflussen wird und zuverlässige Vorhersagen zusätzlich erschwert.^[8] Diskutiert wird hier die Rolle von Lachgas (N_2O) im Zusammenhang mit dem Ozonabbau. N_2O -Emissionen nahe der Erdoberfläche sind die wichtigste Quelle für Stickoxide (NO_x) in der Stratosphäre, obwohl nur etwa 10% des emittierten N_2O in NO_x ($=NO + NO_2$) umgewandelt wird. NO_x trägt ganz wesentlich zum stratosphärischen Ozonabbau bei.^[9] Lachgas entstammt aus natürlichen (z.B. aus Ozeanen, tropischen Wäldern) wie auch aus anthropogenen Quellen (z.B. Emissionen aus kultivierten Böden, bei industriellen Prozessen, bei der Verbrennung von fossilen Treibstoffen, Biomasse und Biokraftstoffen).^[10] Es ist – wie auch die FCKW – in der Troposphäre sehr stabil und hat eine mittlere Lebenszeit von etwa 120 Jahren. N_2O ist, wie bereits erwähnt, auch ein wichtiges Treibhausgas und wird daher durch das Kyoto-Protokoll überwacht.

Bisher wurde Lachgas im Zusammenhang mit dem Montreal-Protokoll nicht als Ozon zerstörende Substanz be-

wertet und reguliert, obwohl die Emissionen von Lachgas, verglichen mit den Emissionen aller anderen Ozon zerstörenden Substanzen, heute am größten sind und es voraussichtlich auch für den Rest des 21. Jahrhunderts bleiben werden. Insgesamt ist das Ozonzerstörungspotenzial von Lachgas sehr gut bekannt. Ravishankara und Mitarbeiter halten fest, dass der Ozonabbau durch NO_x die chemische Kontrolle von Ozon in der mittleren Stratosphäre (etwa von 25–40 km) dominiert. Stickoxide tragen also am meisten zur Ozonzerstörung im Bereich der maximalen Ozonkonzentrationen bei. Deshalb ist der Ozonabbau durch Stickoxide sehr effizient. Zu beachten ist aber auch, dass Stickoxide Chlorradikale durch die Bildung von Chlornitrat ($ClONO_2$) binden und damit den Effekt der Ozonzerstörung mindern.

In ihrer Studie zeigen Ravishankara et al., dass die Ozonzerstörungskraft von Lachgas (pro emittierte Masseneinheit) um etwa 50% ansteigen wird, wenn der stratosphärische Chlorgehalt im Verlauf dieses Jahrhunderts wieder auf vorindustrielle Konzentrationen zurück geht. Obwohl das Ozonzerstörungspotenzial von N_2O z. B. nur etwa ein Sechzigstel dessen von FCKW-11 ist, stellen die großen anthropogenen Lachgasemissionen bereits heute die wichtigste anthropogene Emission Ozon zerstörender Substanzen dar. Derzeit werden global etwa 10.5 Millionen Tonnen N_2O pro Jahr durch menschliches Handeln in die Erdatmosphäre emittiert; im Vergleich dazu: Es wurden etwa eine Million Tonnen FCKW (alle) pro Jahr zu Zeiten der maximalen Emissionen Ende der 1980er Jahre freigesetzt. Jüngste Abschätzungen der zukünftig zu erwartenden N_2O -Emissionen zeigen, dass selbst bei strengsten Szenarien zur Minderung von Treibhausgasemissionen kaum geringere N_2O -Emissionsraten als heute zu erwarten sind.^[11] Diese Abschätzungen der zukünftig zu erwartenden anthropogenen Lachgasemissionen sind allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet. Sollten die durch menschliches Handeln verursachten N_2O -Emissionen jedoch unvermindert weitergehen, könnten sie bis zur Mitte dieses Jahrhunderts über 30% der Ozon zerstörenden Wirkung von FCKW zu Zeiten der höchsten Konzentrationen erzielen.

Es bleibt festzuhalten, dass eine Regulierung des Lachgasanteils in der Erdatmosphäre nicht nur für den Schutz des Erdklimas von Bedeutung ist (Kyoto-Protokoll), sondern auch für die weitere Entwicklung der stratosphärischen Ozonschicht (Montreal-Protokoll). Eine Reduzierung der N_2O -Emissionen würde sowohl den anthropogenen Treibhauseffekt mindern, als auch die Erholung der Ozonschicht positiv beeinflussen.

Anhand der dargelegten Zusammenhänge wird deutlich, dass es bei der Bewertung von Veränderungen in der Erdatmosphäre nicht damit getan ist, Vorgänge singulär zu betrachten. Veränderungen des Klimas und der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre sind eng miteinander gekoppelt. Dynamische, physikalische und chemische Prozesse beeinflussen sich gegenseitig, zum Teil auf sehr komplexe Weise. Überraschende Entwicklungen können daher auch in Zukunft nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren sowie der komplexen Wechselwirkungen ist eine verlässliche Vorhersage zukünftiger Entwicklungen des Erdklimas und der stratosphärischen Ozon-

schicht für die Wissenschaft nach wie vor eine große Herausforderung.

Eingegangen am 10. November 2009
Online veröffentlicht am 8. Dezember 2009

-
- [1] WMO (World Meteorological Organisation), *Global Ozone Research and Monitoring Project* **2007**, Report No. 50, S. 572.
 - [2] J. Haigh, J. Pyle, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **1982**, *108*, 551–574.
 - [3] N. Butchart, A. A. Scaife, M. Bourqui, J. de Grandpré, S. H. E. Hare, J. Kettleborough, U. Langematz, E. Manzini, F. Sassi, K. Shibata, D. Shindell, M. Sigmond, *Climate Dyn.* **2006**, *27*, 727–741.
 - [4] N. Butchart, I. Cionni, V. Eyring, T. G. Shepherd, D. W. Waugh, H. Akiyoshi, J. Austin, C. Brühl, M. P. Chipperfield, E. Cordero, M. Dameris, R. Deckert, S. Dhomse, S. M. Frith, R. R. Garcia, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, D. E. Kinnison, F. Li, E. Manzini, C. McLandress, S. Pawson, G. Pitari, D. A. Plummer, E. Rozanov, F. Sassi, J. F. Scinocca, K. Shibata, B. Steil, W. Tian, *J. Climate* **2009**, eingereicht.
 - [5] R. Deckert, M. Dameris, *Geophys. Res. Lett.* **2008**, *35*, L10813.
 - [6] R. R. Garcia, W. J. Randel, *J. Atmos. Sci.* **2008**, *65*, 2731–2739.
 - [7] D. G. Loyola, R. M. Coldewey-Egbers, M. Dameris, H. Garny, A. Stenke, M. Van Roozendael, C. Lerot, D. Balis, M. Koukouli, *Int. J. Remote Sensing* **2009**, *30*, 4295–4318.
 - [8] A. R. Ravishankara, J. S. Daniel, R. W. Portmann, *Science* **2009**, *326*, 123–125.
 - [9] P. J. Crutzen, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **1970**, *96*, 320–327.
 - [10] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change* **2001**, S. 881.
 - [11] D. P. van Vuuren, M. G. J. den Elzen, P. L. Lucas, B. Eickhout, B. J. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, R. van Houdt, *Clim. Change* **2007**, *81*, 119–159; Kurzaufsatz zur Bindung und Aktivierung von N_2O an Übergangsmetallzentren: W. B. Tolman, *Angew. Chem.*, DOI: 10.1002/ange.200905364; *Angew. Chem. Int. Ed.* DOI: 10.1002/anie.200905364.
-