



Einfluss der Klimaänderung auf die Ozonschicht

Stahelin¹, J., F. Tummon¹, A. Stenke², C. Arndt¹ und P. Bratfisch¹

¹SPARC Office, ETH Zürich, johannes.stahelin@env.ethz.ch, fiona.tummon@env.ethz.ch, carndt@ethz.ch, petra.bratfisch@env.ethz.ch;

²Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich, andrea.stenke@env.ethz.ch

Ozonschicht und Klimaänderung

Die Erdatmosphäre enthält verschiedene Stockwerke: Die Troposphäre, die die Umgebungsluft enthält, erstreckt sich in mittleren Breiten von der Meeresoberfläche bis auf eine Höhe von etwa 10 km (Mittelwert). Oberhalb liegt die Stratosphäre, die bis in eine Höhe von 50 km reicht. Die Trennschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre wird Tropopause genannt. Der grösste Teil des atmosphärischen Ozons befindet sich in der Stratosphäre (oft „Ozonschild“ genannt). Dort ist das Ozon lebensnotwendig, da es die Lebewesen auf der Erde vor den schädigenden (ultravioletten) Anteilen der Sonnenstrahlung schützt. Grosse Ozonkonzentrationen in der Umgebungsluft hingegen können etwa für die menschliche Gesundheit schädigend sein. Schliesslich ist Ozon insbesondere in der Höhe der Tropopause ein starkes Treibhausgas.

Der globale Klimawandel, die Ozonschicht und die menschliche Ozonschichtzerstörung sind miteinander verknüpft: Vermehrte Emissionen von Treibhausgasen wie dem langlebigen Kohlendioxid (das hauptsächlich bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen entsteht) führen zur globalen Erwärmung, die Teil der Klimaänderung ist. Im Faktenblatt „Montreal Protokoll: Auswirkungen auf den Ozonschild und das Klima“ (SPARC, 2013) wird gezeigt, dass das Montreal Protokoll (1987) und die nachfolgenden Verschärfungen nicht nur zum Schutz der globalen Ozonschicht entscheidend waren, sondern auch wesentlich zum Klimaschutz beitragen, da die ozonzerstörenden Substanzen (d.h. halogenhaltige Gase) auch starke

Treibhausgase sind. Im vorliegenden Faktenblatt wird gezeigt, wie sich die anthropogene Klimaänderung auf die Stratosphäre und damit den globalen Ozonschild auswirken dürfte.

Luftbewegungen in der Stratosphäre

Das Ozon in der Stratosphäre wird bei der Einstrahlung kurzwelliger Sonnenlichts mit Wellenlängen kürzer als 252 nm durch die photolytische Spaltung aus dem molekularen Sauerstoff gebildet ($O_2 + h\nu \rightarrow O + O$ gefolgt von $O + O_2 (+M) \rightarrow O_3 (+M)$, dabei bedeutet M ein an der Reaktion nicht beteiligter Stosspartner). Da die Intensität der Sonnenstrahlung in den Tropen am stärksten ist, wird das stratosphärische Ozon grösstenteils in der tropischen Stratosphäre gebildet. Die sogenannte „Brewer-Dobson Zirkulation“ beschreibt die gemittelten Luftbewegungen, die den Transport der Luft und damit der Spurengase in der Stratosphäre bestimmen (**Abb. 1**). Von den Tropen wird die stratosphärische Luft in die mittleren Breiten der Winterhemisphäre verfrachtet. Der Transport in die Sommerhemisphäre findet in viel geringerem Ausmass statt. In höheren Breiten, insbesondere in den polaren Gebieten, wird die Luft nach unten transportiert. Diese stratosphärischen Transportprozesse werden durch unterschiedliche troposphärische Prozesse (synoptische Wellen, planetare Wellen und Schwerewellen) bedingt. Aufgrund der geographischen Verteilung der Bildung und der Transportmechanismen in der Stratosphäre weist die Schichtdicke des Gesamtozons über mittleren Breiten einen typischen Jahresgang mit grössten

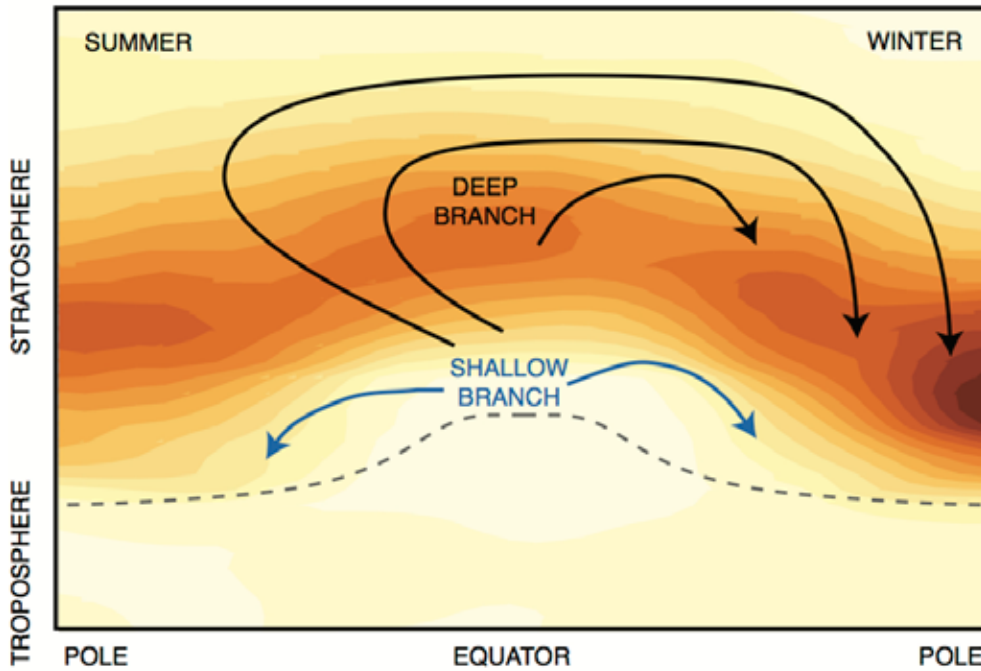


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Brewer-Dobson-Zirkulation in der Stratosphäre (WMO/UNEP 2014): Die Pfeile zeigen den Verlauf der Luftbewegungen, die auf verschiedenen Höhen erfolgen. Die gestrichelte Linie zeigt den gemittelten Verlauf der Höhe der Tropopause. Die Farbschattierung stellt die Ozonkonzentration im Nordwinter im meridionalen Querschnitt dar.

Mengen im Frühjahr und einem Minimum am Ende des Herbstes auf.

Wie verändert der Klimawandel die Ozonschicht?

Erhöhte Treibhausgaskonzentrationen beeinflussen die verschiedenen „Stockwerke“ der Atmosphäre in unterschiedlicher Art und Weise: In der Troposphäre führt eine Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen zu einer Erwärmung, in der Stratosphäre hingegen zu einer Abkühlung, die in der oberen Stratosphäre am stärksten ist. Die Temperaturabnahme in der Stratosphäre führt zu Veränderungen der Geschwindigkeiten wichtiger chemischer Reaktionen: Ozonabbauende Reaktionen laufen verlangsamt ab, was sich in grösseren stratosphärischen Ozonkonzentrationen auswirkt. Zudem wird erwartet, dass die Klimaänderung zu einer Beschleunigung der Brewer-Dobson Zirkulation führt (s. unten). Durch den beschleunigten Transport der Luftmassen aus den Tropen in höhere Breiten verbleibt weniger Zeit für ozonabbauende Reaktionen, was ebenfalls eine Ozonzunahme in mittleren und hohen Breiten bewirkt.

Woher wissen wir, wie die Ozonschicht Ende dieses Jahrhunderts beschaffen sein könnte?

Die komplexen globalen Zusammenhänge zwischen chemischen Prozessen und Transport werden heute mit Chemie-Klimamodellen untersucht, welche die Einflüsse der menschlichen Ozonzerstörung durch ozonzerstörende Substanzen und der Klimaänderung beschreiben. Die Ergebnisse derartiger numerischer

Simulationen sind in **Abb. 2** beispielhaft dargestellt. Anfangs der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts haben die ozonzerstörenden Substanzen die Stratosphäre noch kaum erreicht und der Einfluss der Klimaänderung war noch gering. Bis zur Mitte der 90er Jahre hat die Dicke des Ozonschields infolge der stratosphärischen Ozonzerstörung abgenommen, was auch durch die vorhandenen Ozonmessungen in mittleren Breiten (rote Linien in Abb. 2) bestätigt wird (das Fehlen einer Abnahme der Ozonschichtdicke in den Tropen kann vielleicht durch eine Zunahme des Ozons in der Troposphäre erklärt werden). Anschliessend nahmen die Ozonkonzentrationen in den Extratropen wieder zu. Dies ist zunächst hauptsächlich die Folge des Montreal Protokolls, was sich in der Abnahme der ozonzerstörenden Substanzen zeigt (grüne Kurve in Abb. 2). Ab etwa 2060 wird die Regenerierung des Ozonschields von den ozonzerstörenden Substanzen als FolgedesMontrealProtokolls weitgehend abgeschlossen sein und die weitere Ozonveränderung wird durch die Veränderung der Brewer-Dobson Zirkulation dominiert. In den Extratropen werden stratosphärische Ozonkonzentrationen erwartet, die grösser als die Werte der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts sind, da das Ozon rascher aus den Quellgebieten (den Tropen) in die Extratropen transportiert wird (was auch als „super recovery“ bezeichnet wird). In den tropischen Gebieten hingegen bleiben die Werte der Ozonschicht erniedrigt.

Können wir den Vorhersagen der Ozonklimamodelle vertrauen?

Da der Effekt der erfolgreichen Umsetzung des Montreal

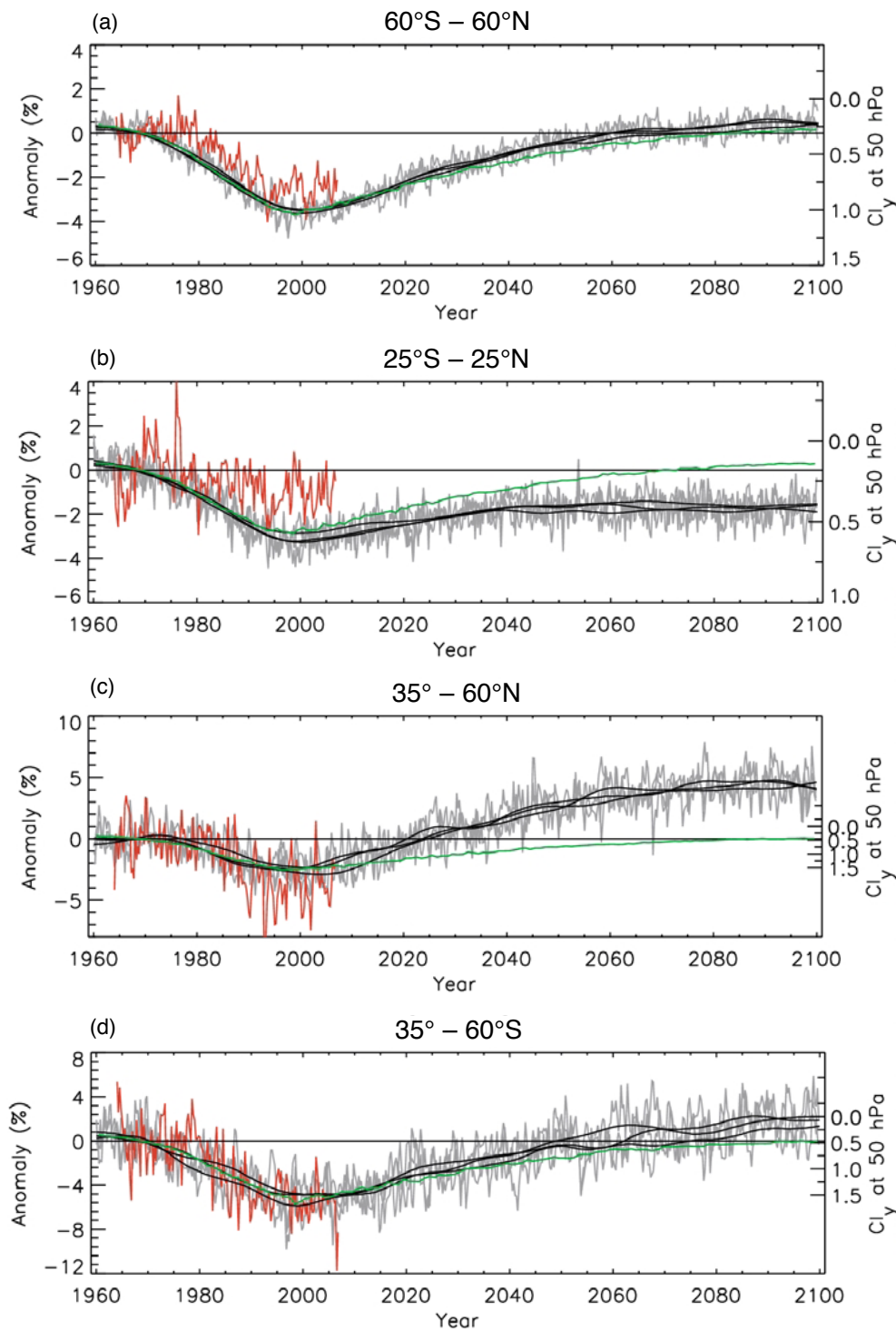


Abbildung 2: Zeitreihe der globalen stratosphärischen Ozonverteilung. Schwarze Linien: Ergebnisse eines Ensembles des stratosphärischen Chemie-Klimamodells CMAM; rote Linien: Ozonmessungen; grüne Linien: Cl_y , ein Maß für die stratosphärische Ozonzerstörung durch ozonzerstörende Substanzen. Abbildung nach Shepherd (2008).

Protokolls die langsame Veränderung der Ozonschicht bis heute dominiert, kann aus den vorliegenden Ozonmessungen nicht abgeleitet werden, ob die durch die Klimaänderung verursachte Veränderung der stratosphärischen Zirkulation schon wirksam ist. Die Verstärkung der Brewer-Dobson Zirkulation führt zu einer Zunahme des Austauschs von troposphärischer und stratosphärischer Luft, wobei der Eintritt der Luft in die Stratosphäre hauptsächlich in den Tropen erfolgt und die stratosphärische Luft vor allem in den polaren Gebieten wieder in die Troposphäre eingemischt wird. Das Ausmass der vorhergesagten Beschleunigung dieses

Luftaustauschs liegt im Bereich von ca. 2.0 bis 3.2 % pro Jahrzehnt, abhängig vom Ausmass der Klimaänderung und vom Modell. Aus Spurengasmessungen kann das „Alter der (stratosphärischen) Luftmassen“ („age-of-air“) abgeleitet werden, welches als Mass für die Beschleunigung der Brewer-Dobson Zirkulation verwendet werden kann. Die Skala des „Luftmassenalters“ bezieht sich auf den Übertritt der Luft von der tropischen Troposphäre in die Stratosphäre. Werte dieser Skala können aus dem Vergleich von stratosphärischen und troposphärischen Messungen von sehr langlebigen Spurengasen wie Schwefelhexafluorid

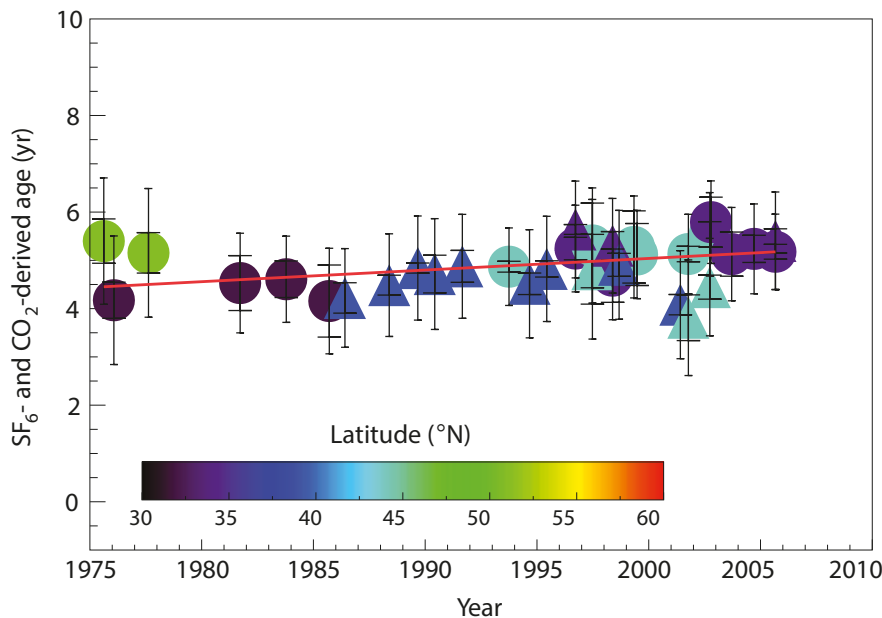


Abbildung 3: Gemitteltetes „Luftmassenalter“ bestimmt aus stratosphärischen Ballon-Messungen von SF₆ (Kreise) oder CO₂ (Dreiecke), wobei die Farben die nördlichen Breiten der Messorte zeigen. Abbildung nach Engel *et al.* (2009).

(SF₆) und Kohlendioxid (CO₂) bestimmt werden. Die langsam ansteigenden Konzentrationen in der troposphärischen Hintergrundluft sind gut bekannt. Die in **Abb. 3** dargestellten Messungen des „Luftmassenalters“ zeigen seit Mitte der 1970er-Jahre eine Tendenz zu einer (geringen) Zunahme, was den Erwartungen der Zunahme der Brewer-Dobson Zirkulation widerspricht. Die Interpretation dieser Messungen ist aber umstritten, da neben dem Transport aus der Troposphäre zusätzliche Mischprozesse in der Stratosphäre die Konzentrationsverhältnisse der Spurenstoffe beeinflussen können und bisher nur sehr wenige derartige Messungen vorliegen.

In den Chemie-Klimamodellen werden normalerweise keine Messungen der stratosphärischen Luftbewegungen berücksichtigt. Zur Wettervorhersage werden heute Wettermodelle eingesetzt, die ebenfalls Informationen über die Transportprozesse in der Stratosphäre enthalten. Die Archive dieser Wettermodelle könnten deshalb Informationen enthalten, ob sich die Brewer-Dobson Zirkulation in den letzten Jahrzehnten tatsächlich systematisch verändert hat. Derartige Analysen sind heute im Gange, erste Ergebnisse überprüfter Daten scheinen mit einer Zunahme der Geschwindigkeit der Brewer-Dobson Zirkulation vereinbar.

Vorausgesagte Auswirkungen der klimabedingten Änderungen der Ozonschicht auf das troposphärische Ozon

Der Transport des Ozons von der Stratosphäre in die Troposphäre ist ein wichtiger Teil des troposphärischen Ozonkreislaufs. Die Menge dieses Flusses wird in den Extratropen durch die Beschleunigung der Brewer-

Dobson Zirkulation erhöht (**Abb. 4**). Modellergebnisse dieses Ozonflusses zeigen starke Unterschiede zwischen beiden Hemisphären. In der nördlichen Hemisphäre ist nicht nur die Menge des Flusses sondern auch die zeitliche Zunahme viel grösser als in der südlichen Hemisphäre, was hauptsächlich mit den hemisphärischen Unterschieden der Dynamik und deren Veränderung durch die Klimaänderung erklärt werden kann. Da durch die Veränderung der stratosphärischen Zirkulation durch den Klimawandel (und die Erholung von den ozonzerstörenden Substanzen) mehr Ozon aus der Stratosphäre in die Troposphäre fließt, ergibt dies ein klimawirksames Feedback, weil Ozon besonders in der Höhe der Tropopause ein starkes Treibhausgas ist. Die troposphärische Ozonbildung und deren zeitliche Veränderung hängen stark von den anthropogenen Emissionen der Ozonvorläuferschadstoffe ab (Stickoxide, flüchtige Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid), was im in **Abb. 4** verwendeten Modell nicht berücksichtigt wird. Auch wenn anzunehmen ist, dass in diesem Jahrhundert der Verlauf der Ozonkonzentrationen in der Troposphäre vom Verlauf der Emissionen der Vorläuferschadstoffe dominiert werden dürfte, bleibt die vorhergesagte Zunahme des Zuflusses des Ozons aus der Stratosphäre ein wichtiger Prozess, der den anthropogenen Treibhauseffekt verstärkt.

Schlussfolgerungen

Die besten heute verfügbaren Chemie-Klimamodelle ergeben, dass die Klimaänderung auch die weltweite Ozonschicht nachhaltig verändern dürfte (Butchard, 2014): Es wird erwartet, dass etwa am Ende dieses Jahrhunderts die Mächtigkeit des Ozonschilds über

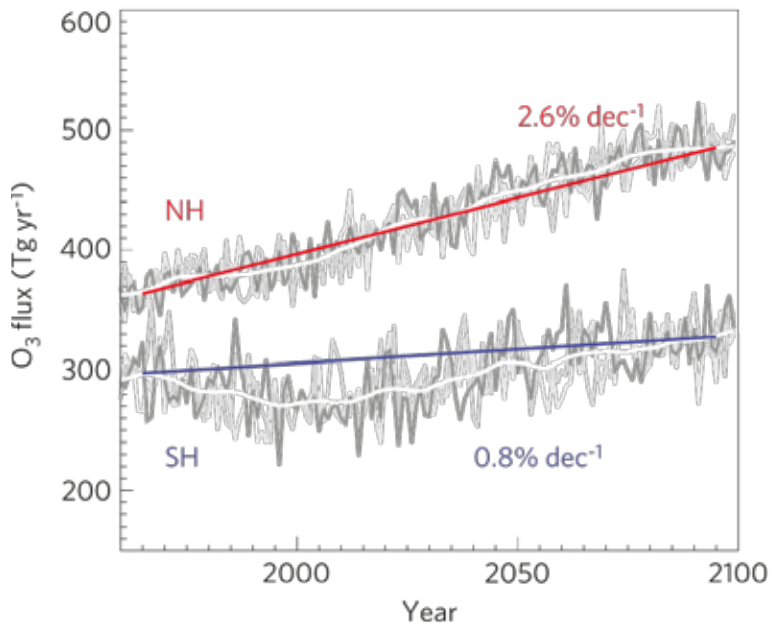


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung des Flusses von Ozon aus der Stratosphäre in die Troposphäre. Abbildung nach Hegglin und Shepherd (2009).

den Tropen reduziert ist im Vergleich zur ungestörten Stratosphäre (60er-Jahre des letzten Jahrhunderts), wohingegen die Schichtdicke in den extratropischen Gebieten insbesondere in der nördlichen Hemisphäre erhöht sein wird. Damit nimmt in den Extratropen insbesondere der nördlichen Hemisphäre der Transport von stratosphärischem Ozon in die Troposphäre zu, was sich auch auf den troposphärischen Ozonhaushalt und die Klimawirksamkeit des troposphärischen Ozons auswirken wird.

Arblaster and N.P. Gillett (Lead Authors), Fig. 4-7, p. 4.14. Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. No. 55, 416 pp., World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2014. Verfügbar auf https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2014/ozone_asst_report.html.

Literatur

Butchart, N., 2014: The Brewer-Dobson circulation. *Rev. Geophys.*, **52**, 157–184, doi:10.1002/2013RG000448.

Engel, A., *et al.*, 2009: Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years. *Nat. Geosci.*, **2**, 28–31, doi:10.1038/ngeo388.

Hegglin M. I., und T. G. Shepherd, 2009: Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux. *Nat. Geosci.*, **2**, 687–691.

Shepherd, T. G., 2008: Dynamics, stratospheric ozone, and climate change. *Atmos. Ocean*, **46**, 117–138, doi:10.3137/ao.460106.

SPARC, 2013: Montreal Protokoll: Auswirkungen auf den Ozonschild und das Klima. J. Staehelin, S. Reimann und C. Arndt, verfügbar auf <http://www.sparc-climate.org/publications/sparc-office-publications/>.

WMO/UNEP, 2014: Scientific Assessment of Ozone Depletion 2014, Chapter 4: Stratospheric Ozone Changes and Climate, by J.M.

SPARC Office

Das SPARC Office, das heute an der ETH Zürich angesiedelt ist, ist ein wichtiger Teil des internationalen Projekts SPARC (Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate (www.sparc-climate.org/)). SPARC ist ein Kernprojekt des Weltklimaforschungsprogramms WCRP (World Climate Research Programme). SPARC koordiniert weltweit Forschungsprojekte, die sich mit dynamische und chemische Prozesse in der Atmosphäre beschäftigen. Eine Forschungsaktivität von SPARC untersucht beispielsweise die Bewegung der Luftmassen und andere dynamische Prozesse (also auch die Zirkulation des Ozons) in der Stratosphäre und Troposphäre und vergleicht diese mit Modellergebnissen (Dynamic Variability, DynVar). Eine andere Aktivität evaluiert und verbessert Klima-Chemie-Modelle, die insbesondere chemische Prozesse in der Atmosphäre abbilden (Chemistry-Climate Model Initiative, CCMi). Das SPARC Office wird von der ETH Zürich, BAFU, Meteo Schweiz und WCRP unterstützt.