



SPARC

Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate
Core project of the World Climate Research Programme

Faktenblatt
zusammengestellt vom
SPARC Office

www.sparc-climate.org

Montreal Protokoll: Auswirkungen auf den Ozonschild und das Klima

Stahelin¹, J., S. Reimann² und C. Arndt¹

¹ SPARC Office, ETH Zürich, johannes.stahelin@env.ethz.ch, und carolin.arndt@sparc-climate.org, ² Empa, Abteilung Luftfremdstoffe/ Umwelttechnik, stefan.reimann@empa.ch

Vom Menschen produzierte ozonzerstörende Substanzen (auf Englisch: Ozone Depleting Substances, ODSs, siehe Tabelle 1) haben seit Beginn der 1970er Jahre die Stratosphäre, also in mittleren Breiten die atmosphärische Schicht zwischen ungefähr 10 km bis 50 km über dem Meeresspiegel, erreicht. Dort haben sie hauptsächlich während der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts zur Abnahme des Ozonschildes geführt (siehe **Abbildung 1**) und die Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht über dem Südpol verursacht; dieses jährlich auftretende Phänomen wird auch gemeinhin ‘Ozonloch’ genannt. Der stratosphärische Ozonschild ist zum Schutz gegen die gefährlichen Anteile der Sonnenstrahlung für alle Landlebewesen lebensnotwendig.

Die ozonzerstörenden Substanzen sind halogenhaltige Kohlenwasserstoffe mit unterschiedlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften (siehe **Tabelle 1** und **Abbildung 3**). Sie werden nach der Emission an der Erdoberfläche in der unteren Atmosphäre zunächst verteilt aber kaum abgebaut. Anschliessend gelangen sie in die Stratosphäre wo sie in grosser Höhe durch die kurzwellige Sonnenstrahlung (UV-Strahlung) umgewandelt werden. Dabei werden Chlor und Brom Atome freigesetzt, die das stratosphärische Ozon zerstören.

Beruhend auf der Wiener Konvention von 1985 wurde im Jahr 1987 das Montreal Protokoll als erstes internationales Abkommen zum Schutze der Ozonschicht wirksam. Im Montreal Protokoll werden die stratosphärischen

Substanzklasse	englischer Name	Zusammensetzung
<u>ozonzerstörende Substanzen</u> FCKW Fluorchlorkohlenwasserstoff	CFC chlorofluorocarbon	Cl, F, C
Halon bromhaltiger Kohlenwasserstoff	halon	Br, Cl, C, H
<u>wenig ozonzerstörend</u> HFCKW Hydrofluorchlorkohlenwasserstoff	HCFC hydrochlorofluorocarbon	H, Cl, F, C
<u>nicht ozonzerstörend</u> HFKW teil-halogenierter Fluorkohlenwasserstoff	HFC hydrofluorocarbon	H, F, C
PFKW voll-halogenierter Fluorkohlenwasserstoff	PFC perfluorocarbon	F, C

Tabelle 1: Ozonzerstörende Substanzen und Ersatzstoffe. Sie gehören zur Familie der halogenhaltigen Kohlenwasserstoffe (engl.: Halocarbons). Alle aufgeführten Substanzen sind Treibhausgase.



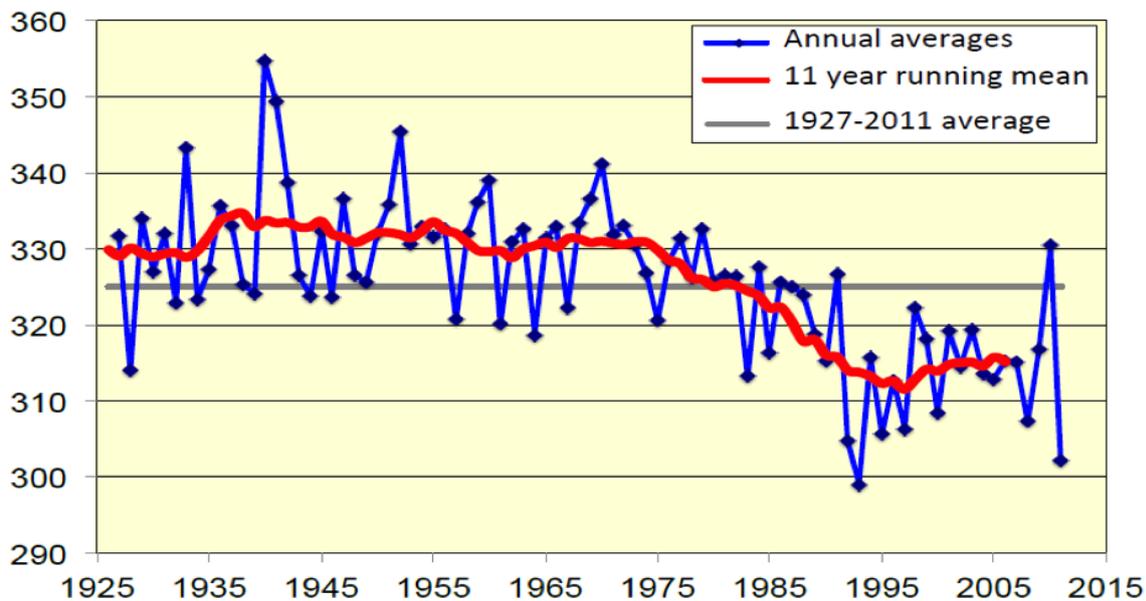


Abbildung 1: Jahresmittel des Gesamtozons über Arosa, Schweiz. Begonnen im Jahr 1926 ist dies die längste derartige Messreihe der Welt. Die Messungen werden seit 1988 von der Meteo Schweiz durchgeführt. Weil verschiedene Arten von Dobsonspektrophotometern eingesetzt wurden, musste die Zeitreihe sorgfältig homogenisiert werden (Stahelin *et al.*, 1998). Die Einheit ist DU = Dobson Unit, was ein Mass ist für das Ozon über die gesamte Höhe der Atmosphäre (Gesamtsäule). Die Menge des Ozons in den unteren 10 km (wo Ozon als Schadstoff zum sogenannten Sommersmog beiträgt) ist im Vergleich zur Gesamtsäule gering, weshalb die Veränderungen im Gesamtozon fast ausschliesslich die Verhältnisse des stratosphärischen Ozons wiedergeben.

Konzentrationen der ozonzerstörenden Substanzen durch deren globale Produktion und Verwendung geregelt. **Abbildung 2** zeigt den zeitlichen Verlauf der Gesamtheit aller ozonzerstörenden Substanzen in der Skala EESC (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine), die die Wirkung von Chlor und Brom auf die stratosphärische Ozonschicht berücksichtigt. Wenn die gesetzlich erlaubten Emissionsmengen der ursprünglichen Vereinbarungen des Montreal Protokolls sowie der ersten Verschärfung (London, 1990) vollständig ausgeschöpft worden wären, hätte dies die zunehmende Ozonzerstörung zwar verlangsamt und zeitlich verzögert, jedoch nicht verhindert. Erst die in Kopenhagen (1992) und später ausgehandelten Verschärfungen gewährleisteten die nachhaltige (langsame) Erholung der globalen Ozonschicht. Dabei haben sich die Unterzeichnerstaaten verpflichtet, auf die Verwendung der FCKWs ab 2010 vollständig zu verzichten, und für die HFCKWs wurde ein Zeitplan ausgearbeitet, der in den nächsten Jahren ebenfalls ein vollständiges Verbot beinhaltet.

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) wurden als Kältemittel, Löschmittel, Schäumungsmittel in Schaumstoffen, Lösemittel und früher als Lösemittel und Treibgase in Spraydosen verwendet. Als Ersatz für die frühere Verwendung von FCKWs wurden im Montreal Protokoll (1987) für eine gewisse Zeit Hydro-

fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKWs) als Kühlmittel zugelassen; diese schädigen das stratosphärische Ozon in viel geringerem Ausmass als die FCKWs (Tabelle 1).

Die Abnahme der Konzentrationen der meisten der FCKWs in der wenig belasteten Umgebungsluft erfolgt langsam wegen der langen Aufenthaltszeiten dieser Stoffe in der Atmosphäre. Die Messungen auf dem Jungfraujoch (Abbildung 3) dokumentieren die Abnahme von FCKWs (z.B. CFC-11). Gleichzeitig mit der Abnahme der Konzentrationen der FCKWs nahmen während der 1990er Jahre infolge von deren Ersatz die Konzentrationen von HFCKWs (HCFC-141b in Abbildung 3) zunächst stark, seit Beginn dieses Jahrhunderts nur noch langsam zu. Heute ist auch der Einsatz von HFCKWs in Industrienationen praktisch verboten und in den Entwicklungsländern ab 2030. Als Ersatz für die HFCKWs wurden Fluorkohlenwasserstoffe (also sowohl die teil- als auch die vollhalogenierten HFCKWs und PFKWs) eingeführt, deren Konzentrationen kontinuierlich ansteigen (siehe HFC-134a in Abbildung 3). Fluorkohlenwasserstoffe schädigen den Ozonschild nicht und ihre Verwendung wird durch das Montreal Protokoll nicht geregelt. Sie sind jedoch starke Treibhausgase und deshalb im Kyoto Protokoll aufgeführt.

Die in Arosa durchgeführten kontinuierlichen Messungen der Ozonschichtdicke zeigen, dass die Abnahme

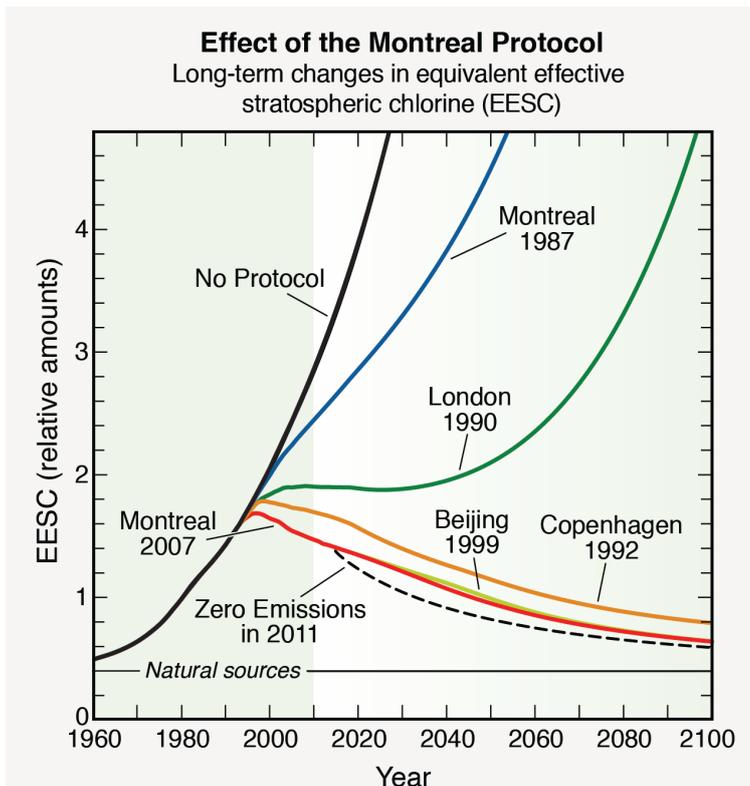


Abbildung 2: Einfluss des Montreal Protokolls und dessen Verschärfungen auf den tatsächlichen und bis 2100 angenommenen Konzentrationsverlauf der ozonzerstörenden Substanzen in der Stratosphäre (WMO, 2011, vgl. Text). Im Falle „No Protocol“ wurde ein jährliches Wachstum der globalen Emissionen der ozonzerstörenden Substanzen von 3% („business-as-usual scenario“) angenommen, den anderen Kurven liegt die Annahme zugrunde, dass die zulässigen Emissionen vollständig ausgeschöpft wurden.

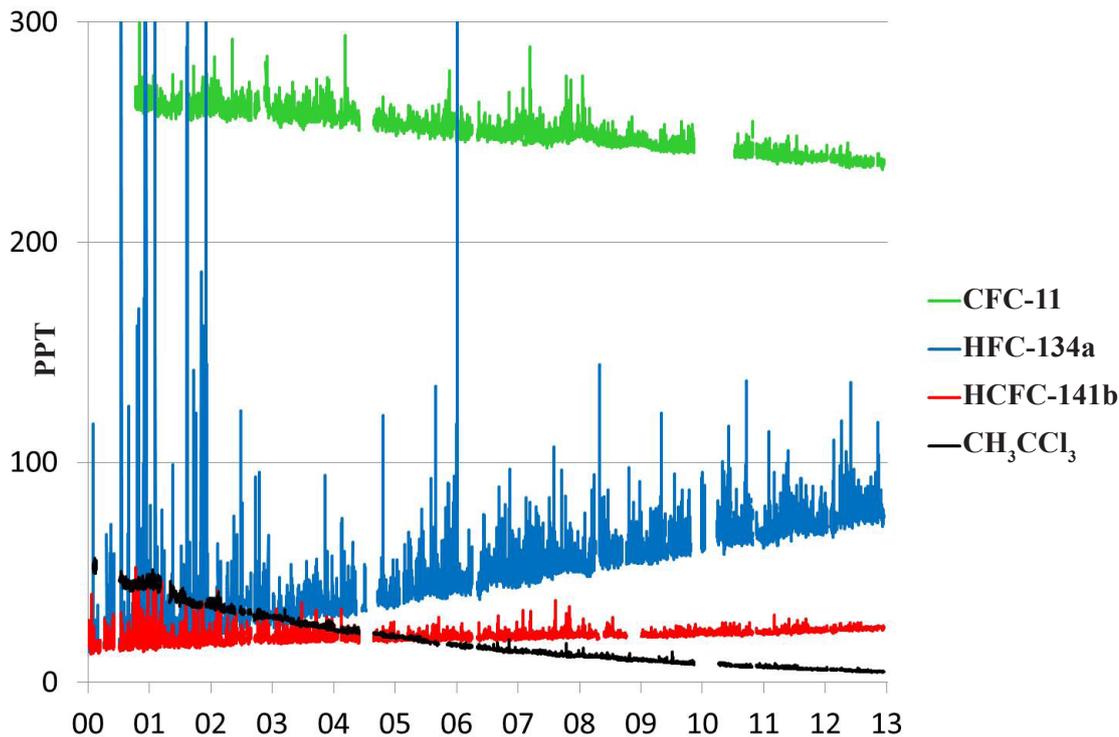


Abbildung 3: Zeitreihe 2000-2013 der Messungen von ausgewählten FCKWs (CFC-11), HFCKWs (HCFC-141b), CH_3CCl_3 und HFKWs (HFC-134a) vom Jungfraujoch in der Schweiz (3580 m über dem Meeresspiegel). Die Messungen werden von der Empa durchgeführt (Einheiten in ppt: parts per trillion, 1×10^{-12}). Für Abkürzungen siehe Tabelle 1 (gemäss Daten aus dem HALCLIM-5 Report, Reimann *et al.*, 2013).

des Ozonschildes in mittleren Breiten gestoppt wurde (Abbildung 1). Die Messreihe zeigt ebenfalls, dass die Jahr-zu-Jahr Schwankungen im Ozonschild in mittleren Breiten gross sind. Sie sind durch die Unterschiede in der Meteorologie bedingt. Wegen der sehr langsamen Abnahmen der stratosphärischen Konzentrationen der ozonzerstörenden Substanzen braucht es noch viele Jah-

ren, bis sich der globale Ozonschild regeneriert haben wird und es wird noch viele Jahrzehnte dauern, bis sich das ‘Ozonloch’ über dem Südpol schliessen wird.

Die ozonzerstörenden Substanzen wie auch andere halogenhaltige Kohlenwasserstoffe sind teilweise starke Treibhausgase. Der Strahlungsantrieb (auf

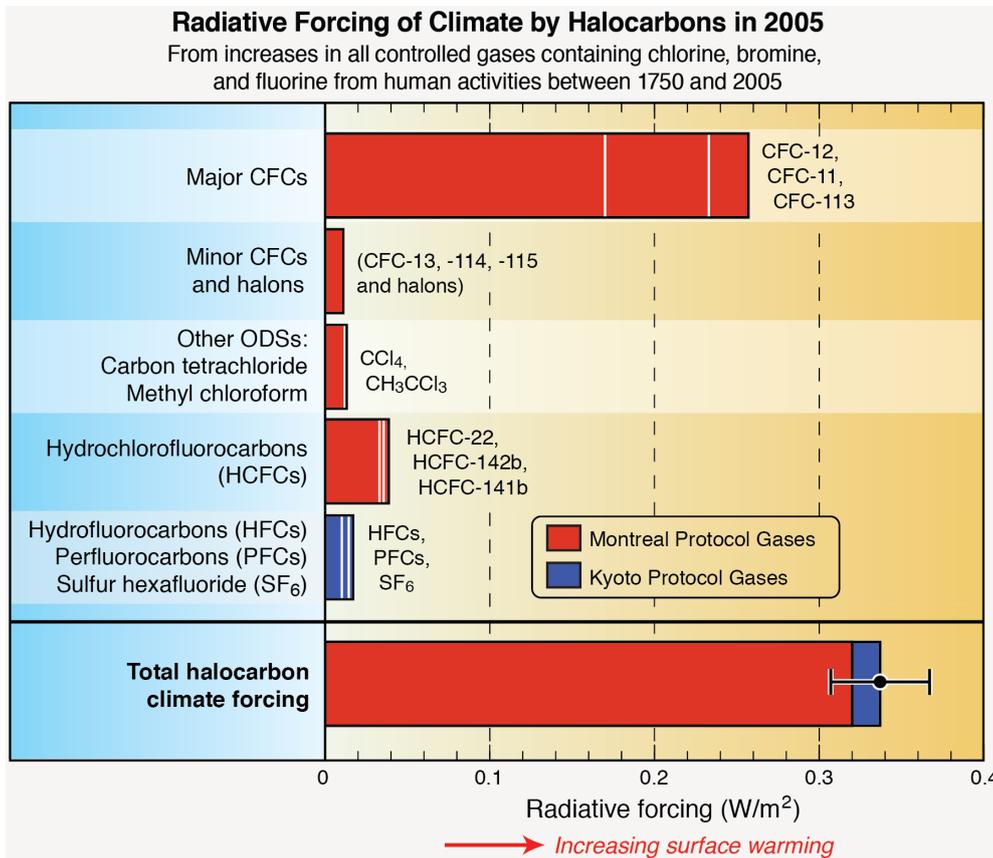


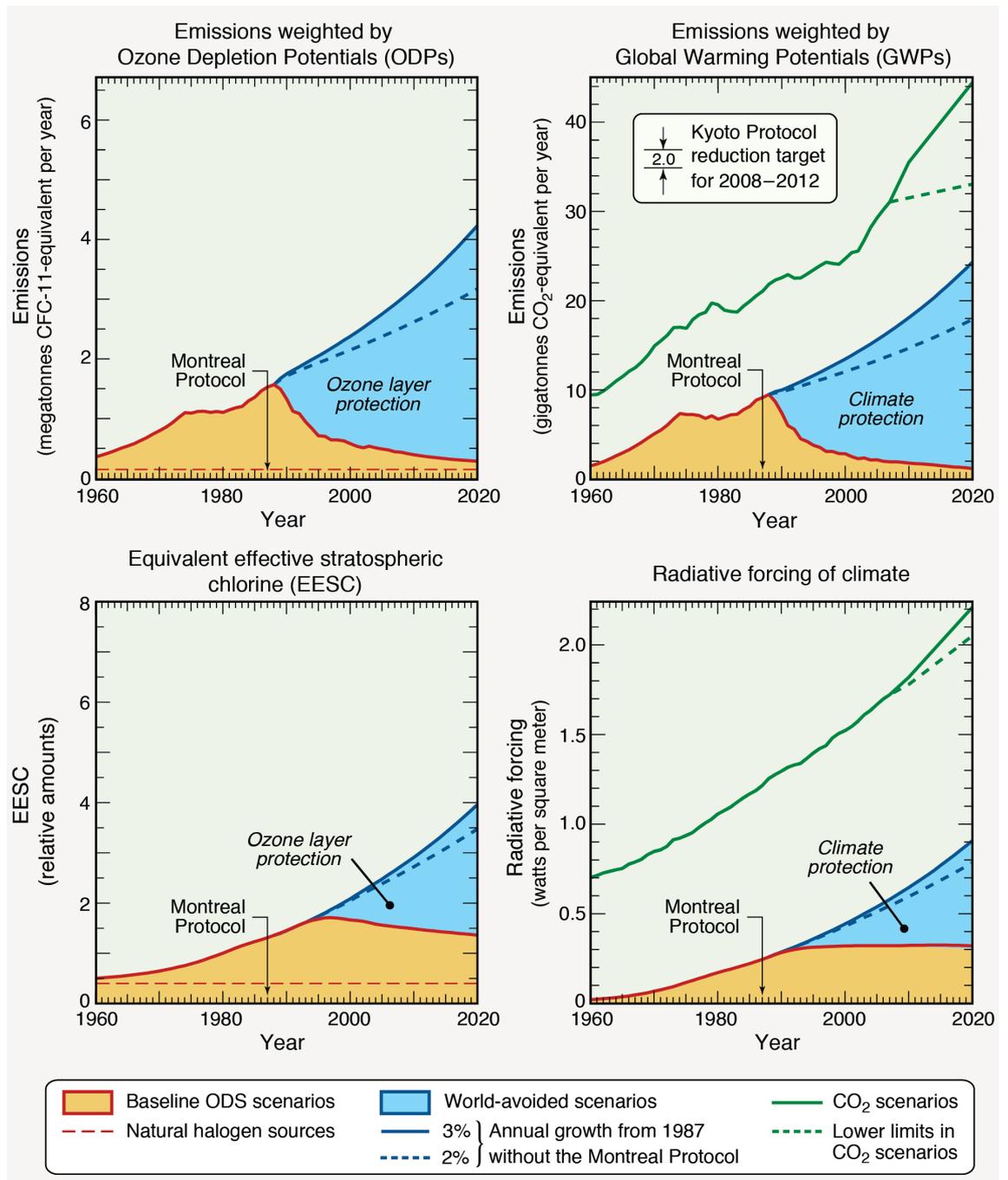
Abbildung 4: Strahlungsantrieb (1750 bis 2005) von halogenhaltigen Gasen (ozonzerstörenden Substanzen sowie von Stoffen, die als Ersatzstoffe von ozonzerstörenden Substanzen eingesetzt werden). Die Abbildung zeigt auch welche Gase von welchem internationalen Abkommen geregelt werden (WMO, 2011). Der Wert des Strahlungsantriebs für Kohlendioxid beträgt bis ins Jahr 2005 etwa 1.62 W/m². Für Abkürzungen siehe Tabelle 1.

Englisch: Radiative Forcing) ist ein Mass für die Erwärmung des Klimas, die durch Stoffe in der Atmosphäre (Treibhausgase, Aerosole etc.) oder die Änderung der Bestrahlungsstärke der Sonne bewirkt wird. Für Treibhausgase werden beim Strahlungsantrieb die physikalisch-chemischen Eigenschaften (wie etwa atmosphärische Verweilzeit) der entsprechenden Gase berücksichtigt sowie die zeitliche Entwicklung ihrer Emissionen von Anfang der Industrialisierung bis zu einem bestimmten Zeitpunkt. Der Strahlungsantrieb von halogenhaltigen, oft auch ozonzerstörenden Gasen und damit deren Beitrag zur Klimaänderung sind in **Abbildung 4** dargestellt. Die Beiträge der einzelnen halogenhaltigen Gase zur Klimaerwärmung sind stark unterschiedlich. Die Emissionen von Kohlendioxid (CO₂, nicht in Abbildung 4 aufgeführt) haben am meisten zur anthropogenen Klimaänderung beigetragen; der Beitrag aller halogenhaltigen Gase zum gesamten Strahlungsantrieb ist mit mehr als 20% desjenigen von Kohlendioxids für das Jahr 2005 erheblich.

In **Abbildung 5** werden die Wirkungen des Montreal Protokolls auf die Ozonschicht (links) und die Klimaerwärmung (rechts) miteinander verglichen. Die blaue Kurve zeigt die Auswirkungen der halogenhaltigen Gase wie sie ohne Montreal Protokoll erwartet worden wären (für diesen Fall wurde anstelle der Abnahme der ozonzerstörenden Substanzen eine

jährliche Zunahme um 2% bzw. 3% angenommen). Die Skala ODP (Ozone Depletion Potential, Graphik oben links) beschreibt die Wirkungen der Emissionen; um die Einflüsse der Einzelstoffe zu berücksichtigen, wurden zur Beschreibung der Ozonschichtzerstörung die Emissionen der Substanzen mit denjenigen von FCKW-11 (also CFC-11 in Abbildung 5) verglichen. Zur Beschreibung der Klimaerwärmung wurde die Wirkung der halogenhaltigen Gase in CO₂-Äquivalente umgerechnet (Global Warming Potential, Graphik oben rechts). Die Skala EESC (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine, Graphik unten links) beschreibt die integralen Auswirkungen aller vergangenen anthropogenen Emissionen auf das stratosphärische Ozon. Für die Klimaschädigung (Graphik rechts unten) wurde die Skala des Strahlenantriebes („Radiative Forcing“) von CO₂-Äquivalenten verwendet (grüne Kurve), wobei der zukünftig erwartete Strahlungsantrieb für zwei Szenarien dargestellt ist. Wäre das Kyoto Protokoll (1997), das den Ausstoss von Treibhausgasen regelt, weltweit umgesetzt worden (einzelne Länder wie die USA und Kanada haben den Vertrag bis heute nicht ratifiziert), hätte dies für die Jahre 2008-2012 zu einer jährlichen Reduktion von Treibhausgasen von 2.5 Gigatonnen von CO₂-Äquivalenten pro Jahr geführt. Infolge der Reduktion der halogenhaltigen Gase durch das Montreal Protokoll hat der weltweite Strahlungsantrieb jährlich um 9 bis

Abbildung 5: Einfluss des Montreal Protokolls auf die Ozonschicht (links) und das Klima (rechts). Die blaue Kurve zeigt, wie sich die Einflüsse der ozonzerstörenden Substanzen ohne Montrealer Protokoll entwickelt hätten (Wachstum der Emissionen nach Inkrafttreten des Montrealer Protokoll mit einer jährlichen Erhöhung von 3% bzw. 2%), WMO, 2011, siehe Text.



12.5 Gigatonnen von CO₂-Äquivalenten abgenommen.

Heute sind der Gebrauch der FCKWs und Halone (bromhaltige Kohlenwasserstoffe) durch das Montreal Protokoll weltweit untersagt (bis auf wenige Applikationen von Halonen zum Beispiel in der Medizin und dem Luftverkehr). Zudem ist der Gebrauch der HFCKWs in den Industrienationen praktisch verboten und in den Entwicklungsländern erheblich eingeschränkt, mit dem Ziel, 2030 ein globales Verbot zu erreichen. Die HFCKWs und PFKWs, also halogenhaltige Stoffe die ausschliesslich Fluor enthalten, schädigen die Ozonschicht nicht, sind aber Treibhausgase. Deshalb wird ihre Verwendung durch

das Kyoto Protokoll nicht aber durch das Montreal Protokoll geregelt. Der Beitrag der HFKWs und der PFKWs zur Klimaänderung ist heute noch klein (siehe die markierte Stoffe in Abbildung 4). Der weitere Ersatz der ozonzerstörenden Substanzen dürfte zu erhöhten Emissionen dieser Klimagase führen, die je nach ihren spezifischen Eigenschaften (etwa atmosphärischer Aufenthaltszeit) erheblich zur Klimaänderung beitragen könnten. Es wird daher befürchtet, dass die Emissionen dieser Gase in Zukunft stark zunehmen, was als Verlagerung des Problems der Ozonschicht auf das Klima angesehen werden kann.

Die Messungen von ozonzerstörenden Substanzen

(Abbildung 3) wie auch der Ozonschichtdicke (Abbildung 1) zeigen, dass die vereinbarten Reduktionen der Emissionen der ozonzerstörenden Substanzen erreicht worden sind. Die Zahlen illustrieren sehr eindrücklich, dass das Montreal Protokoll nicht nur zum Schutz der Ozonschicht sehr wirksam ist sondern auch einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz geliefert hat. Durch das weltweite, fast vollständige Verbot der ozonzerstörenden Substanzen wurden die durch das Kyoto Protokoll angestrebten Emissionsreduktionen von Klimagasen für die Jahre 2008-2012 um etwa einen Faktor vier übertroffen, als dies bei Erreichen der Ziele des Kyoto Protokolls erwartet worden wäre.

Der unbestrittene Erfolg des Montreal Protokolls wurde ermöglicht durch eine enge Zusammenarbeit der Regierungen, der Wissenschaft und der Industrie. Den Entwicklungsländern wurden längere Fristen bei der Verwendung der FCKWs und der HFCKWs zugestanden, wobei sie durch einen von den Industrieländern finanzierten Fonds bei der Einführung von Technologien ohne ozonzerstörende Substanzen unterstützt wurden.

Das Montreal Protokoll reguliert nur die ozonzerstörenden Substanzen und berücksichtigt nicht die schädigende Wirkung der Ersatzstoffe auf das Klima. Das Regulierungsverfahren des Montreal Protokolls, das die Produktion, Verwendung und Emittierung von ozonzerstörenden Substanzen regelt, sollte daher weltweit auch auf HFCKWs und PFKWs ausgedehnt werden, um einen wichtigen Beitrag für den Klimaschutz zu leisten.

Literatur

Reimann, S., M.K. Vollmer, D. Brunner, M. Steinbacher, M. Hill, und L. Emmenegger (2013) HALCIM-5: Kontinuierliche Messung von Nicht-CO₂-Treibhausgasen auf dem Jungfrauoch, 1. Zwischenbericht, Mai 2013. Verfügbar auf www.empa.ch/climate_gases.

Stachelin, J., A. Renaud, J. Bader, R. McPeters, P. Viatte, B. Högger, V. Bugnion, M. Giroud, und H. Schill (1998) Total ozone series of Arosa (Switzerland). Homogenization and data comparison. *J. Geophys. Res.*, **103**, 5827-5841.

SPARC Office

Das SPARC Office, das heute an der ETH Zürich angesiedelt ist, ist ein wichtiger Teil des internationalen Projektes SPARC (Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate (<http://www.sparc-climate.org/>)). SPARC ist ein Kernprojekt des Weltklimaforschungsprogramms WCRP (World Climate Research Programme). SPARC koordiniert weltweit Forschungsprojekte, die sich etwa mit der Stratosphäre (also auch der Ozonzerstörung), dem Einfluss der Stratosphäre auf das Klima und mit der Modellierung atmosphärenchemischer Prozesse beschäftigen. Eine Forschungsaktivität von SPARC untersucht beispielsweise die Veränderung der globalen Ozonverteilung, wobei Bodenmessungen und Satellitenmessungen verglichen werden, um die zeitlichen Veränderungen, die durch das Montreal Protokoll und allfällige Auswirkungen von Klimaänderungen verursacht sind, zu evaluieren und zu quantifizieren. Das SPARC-Office wird von der ETH Zürich, BAFU, Meteo Schweiz und WCRP unterstützt.