



Ozon nimmt in der oberen Stratosphäre wieder zu

Aufgrund des internationalen Montrealer Protokolls (1987) und der nachfolgenden weitergehenden Vereinbarungen wurde seit Ende der 1980er Jahre die Produktion ozonschädigender Substanzen (ODS) weltweit eingestellt. Seit etwa 1994 geht die ODS Konzentration in der Troposphäre langsam zurück (graue Fläche in Abb. 1). Mit ein paar Jahren Verzögerung, ab 1997 in der unteren Stratosphäre, ab etwa 2000 in der oberen Stratosphäre, nimmt nun auch ozonerstörendes Chlor (und Brom) in der Ozonschicht ab. Langjährige Messungen der Gesamtsäule von Salzsäure (HCl), die neben Chlornitrat einen großen Teil des stratosphärischen Chlors bindet, zeigen bis Ende der 1990er die bekannte Zunahme, danach den Rückgang des stratosphärischen Chlorgehalts (siehe Abb. 1, mit überlagerten transportbedingten Schwankungen). Hat der Chlorrückgang auch die erwünschten positiven Auswirkungen auf die Ozonschicht? Nimmt das Ozon wieder zu?

Seit 2003 ist zwar nachgewiesen, dass das Ozon nicht mehr weiter abgenommen hat, signifikante Ozonzunahmen und positive Ozontrends konnten aber bis vor kurzem nicht beobachtet werden. In neuen Auswertungen im Rahmen des WMO/UNEP Ozon Assessments 2014 und der SPARC-IGAC-IOC-NDACC Initiative on Ozone Vertical Profile Trends (SI2N) hat sich das nun geändert: Abb. 2 zeigt z. B. die Höhenverteilung der Ozontrends, links vor 1997, bei zunehmenden Chlorgehalt, rechts seit 2000, bei abnehmendem Chlorgehalt. Schwankungen durch QBO, 11-jährigen Sonnenzyklus, stratosphärisches Aerosol und El-Niño/La Niña Ereignisse wurden vor der Trendberechnung abgezogen. Als Beobachtungen gingen ein: Amerikanische Satellitendaten von SBUV und GOZCARDS (ein Komposit, hauptsächlich aus SAGE I, SAGE II, HALOE, MLS-AURA); europäische und kanadische Satellitenmessungen von SMR, OSIRIS, GOMOS, MIPAS, SCIAMACHY; sowie Messungen von Bodenstationen mit Ozonsonden, Umkehr, Lidar, Mikrowellenradiometern, und FTIRs. Neben dem beobachteten mittleren Trend (schwarze Linie) zeigt Abb. 2 auch Ergebnisse von Modellrechnungen der Chemistry-Climate-Model-Validation Initiative (CCMVal-2, grauer Bereich). Diese Rechnungen berücksichtigen die Einflüsse ozonerstörender Substanzen, zunehmender Treibhausgase (CO_2 , CH_4 , N_2O), des 11-jährigen Sonnenzyklus, realistischer Meeresoberflächentemperaturen (incl. El Niño/ La Niña) und Seeisbedeckung, sowie der QBO.

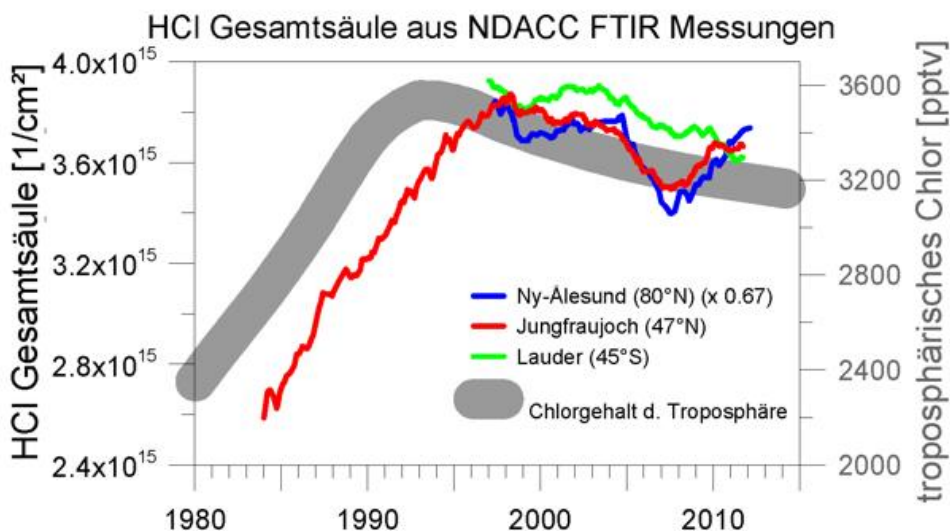


Abbildung 1: Zeitreihen der HCl Gesamtsäule aus Messungen mit Fourier-Transform Infrarot Spektrometern (FTIRs) an drei Bodenstationen. Für bessere Vergleichbarkeit sind die Daten von Ny-Alesund um den Faktor 0.67 verringert. Außerdem sind die Zeitreihen mit einem gleitenden Mittel über 3 Jahre geglättet. Die Schwankungen der HCl Säulen in Ny-Alesund und am Jungfrauoch resultieren aus Transportschwankungen auf der Nordhalbkugel. Die graue Fläche zeigt den troposphärischen Chlorgehalt (ODS). Die Stratosphäre folgt mit ca. 5 Jahren Verzögerung. Quelle: Mahieu et al., Nature, 2014.

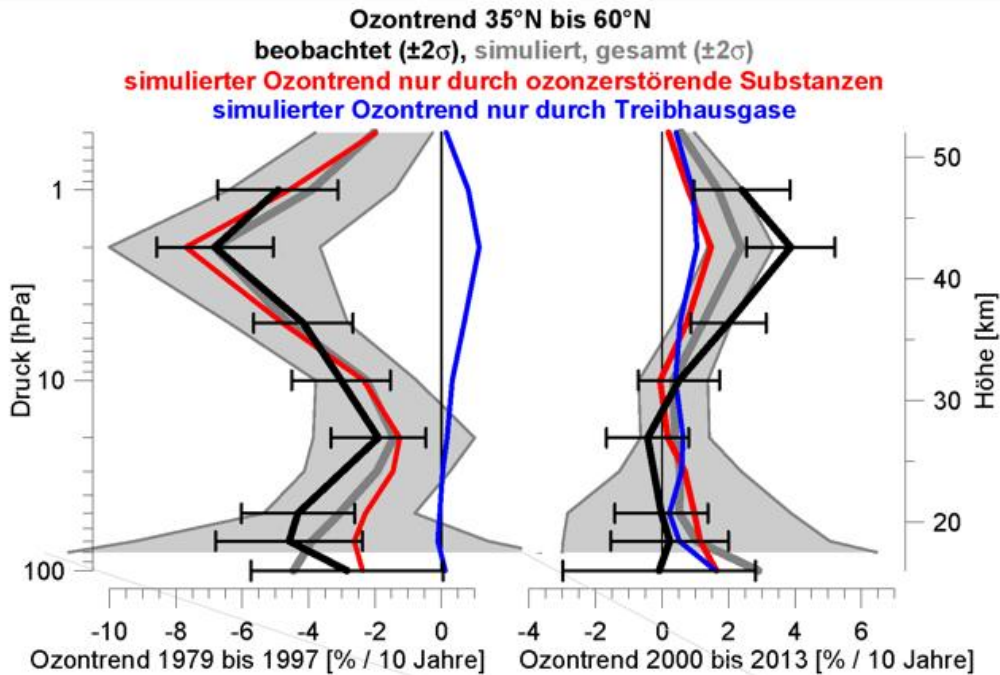


Abbildung 2: Gemessene und simulierte Ozontrends für verschiedene Höhen bzw. Druckniveaus in der Atmosphäre (schwarze bzw. dunkelgraue Linie). Fehlerbalken bzw. graue Schattierung zeigen den Unsicherheitsbereich. Die schwarze Kurve basiert auf Messungen von Satelliten und Bodenstationen. Die graue Kurve beruht auf CCMVal-2 Modellsimulationen (alle Einflüsse). Die Einzel-Wirkungen von ODS Zu- und Abnahme, sowie von stratosphärischer Abkühlung durch CO_2 Zunahme auf die Ozontrends sind auch noch separat dargestellt (rote bzw. blaue Kurven, aus CCMVal-2 Simulationen). Quelle: WMO/UNEP Ozon Assessment 2014.

Beobachtete und modellierte Trends in Abb. 2 zeigen gute Übereinstimmung, sowohl im Höhenverlauf, als auch in der Stärke. Bis 1997, zu Zeiten zunehmenden Chlorgehalts, nahm das Ozon in den meisten Höhen ab, mit negativen Trends bis zu -7% pro 10 Jahre bei 40 km / 2 hPa. Seit 2000, seitdem der Chlorgehalt abnimmt, haben sich die Ozontrends umgekehrt. In der oberen Stratosphäre, um 40 km / 2 hPa, ist jetzt eine signifikante Zunahme zu verzeichnen, um rund 3% pro 10 Jahre. Wie vom Verlauf des Chlorgehalts erwartet (Abb. 1, steile Zunahme bis 1998, flache Abnahme nach 2000), war die Ozonabnahme vor 1997 stärker als die Ozonzunahme nach 2000. Neben dem Chlorgehalt spielt die fortschreitende Abkühlung der oberen Stratosphäre (um 1 bis 2 K pro 10 Jahre) eine erhebliche Rolle. Sie wird durch zunehmendes CO_2 verursacht, das weniger Wärmestrahlung in die Stratosphäre gelangen lässt und in der oberen Stratosphäre zu mehr Wärmeabstrahlung ins Weltall führt. Beides führt zu Abkühlung, vor allem der oberen Stratosphäre. Dort führen niedrigere Temperaturen zu mehr Ozon, weil normale Gasphasen-Ozonabbau-Reaktionen langsamer ablaufen. Beide Einflüsse auf das Ozon können die Modellsimulationen getrennt darstellen (rote und blaue Linien in Abb. 2). Die stratosphärische Abkühlung hat demnach früher die Ozonabnahme etwas gemildert. Seit etwa 2000 trägt die Abkühlung rund die Hälfte, also ganz erheblich, zur beobachteten Ozonzunahme in der oberen Stratosphäre bei. In der unteren Stratosphäre (100 hPa bis 10 hPa) und bei der Ozongesamtsäule zeigt Abb. 2 dagegen bisher keine signifikante Zunahme. Nach den Modellrechnungen ist dort auch noch nichts zu erwarten. Abb. 2 gibt ein deutliches Beispiel, dass die zukünftige Entwicklung der Ozonschicht nicht nur vom Rückgang ozonzerstörender Substanzen geprägt sein wird, sondern auch vom Klimawandel und von der zu erwartenden CO_2 Zunahme. Andere Spurengase, wie CH_4 und N_2O , werden in den nächsten Jahrzehnten ebenfalls zunehmen. Bisher war ihr Einfluss auf die Ozonschicht gering. Wie das Ozon Assessment 2014 aber zeigt, werden auch diese Gase in den nächsten Jahrzehnten zu Ozonveränderungen beitragen. Wie eines der nächsten Ozonbulletins diskutieren wird, könnten die Auswirkungen dieser Spurengase auf die Ozonschicht ähnlich groß sein, wie der (gerade noch rechtzeitig begrenzte) Einfluss menschengemachten Chlors und Broms in der Vergangenheit. Wir sollten also auch in Zukunft ein wachsames Auge auf die Ozonschicht und auf den Spurengasgehalt der Atmosphäre haben.