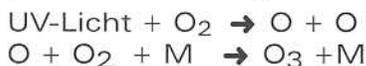


Die Stratosphäre ist das zweite 'Stockwerk' der Erdatmosphäre. Sie schließt sich ab etwa 12km Höhe an die Troposphäre an und erstreckt sich bis in etwa 60 km Höhe. Während es in der Troposphäre, wo sich alle Wetterphänomene abspielen, z.T. sehr turbulent zugeht, ist die Stratosphäre stabil geschichtet (stratos= Schicht).

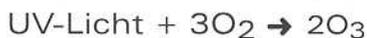
In der Stratosphäre spielen chemische Reaktionen der Atmosphärgase eine große Rolle. Die Hauptbestandteile der Luft sind molekularer Stickstoff (N_2 , ca. 78%), molekularer Sauerstoff (O_2 , ca. 21%) und das Edelgas Argon (Ar, ca. 1%). Daneben gibt es aber noch viele andere Gase, die nur in sehr geringen Konzentrationen vorhanden sind. Davon ist das Kohlendioxid mit 0,03 % noch recht häufig, andere Gase wie z.B. Ozon, Methan oder Kohlenmonoxid sind nur in ppm-Konzentrationen vorhanden und werden daher Spurengase genannt. 'ppm' bedeutet 'parts per million' und kennzeichnet eine Konzentration von einem Volumenteil Gas in einer Million Volumenteile Luft. Folgendes Beispiel soll dieses Maß verdeutlichen: Ein Zimmer von 3 m Länge, 4 m Breite und 2,5 m Höhe enthält 30.000 Liter Luft. 1 ppm davon wären 0,03 Liter, d.h. etwa der Inhalt eines Schnapsglases.

Ozon

Ozon (O_3) ist eines der wichtigsten Spurengase in der Stratosphäre. Es entsteht aus dem Luftsauerstoff unter der Einwirkung ultravioletter Strahlung in einer zweistufigen Reaktion:



In der ersten Reaktion wird ein Sauerstoffmolekül durch das UV-Licht in zwei Sauerstoffatome aufgespalten, in der zweiten reagiert ein Sauerstoffatom mit einem Sauerstoffmolekül, wobei noch ein beliebiges anderes Molekül als Stoßpartner benötigt wird. Da die erste Reaktion zwei O-Atome bereitstellt, kann die zweite Reaktion zweimal ablaufen. Es ergibt sich aus beiden Reaktionen daher die Nettobilanz:



Neben dieser Ozon-aufbauenden Reaktion gibt es auch viele Reaktionen, in denen Ozon wieder abgebaut wird, so daß sich als Gleichgewicht eine bestimmte Ozonkonzentration einstellt. Durch Zusammenwirken der Aufbau- und Abbaureaktionen sowie Transportvorgängen entsteht die Ozonschicht. Abb. 1 zeigt die Schicht erhöhter relativer Ozonkonzentration in 30-40 km Höhe.

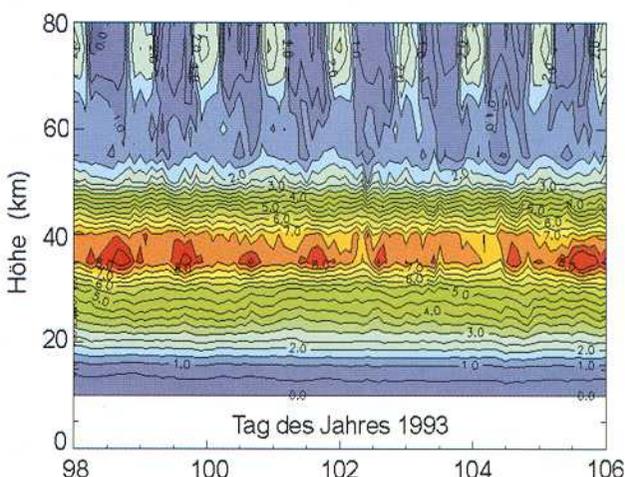


Abb. 1 Ozonkonzentration in der Stratosphäre über Lindau, aufgenommen mit dem Mikrowellenradiometer des MP Ae. Die Zahlen an den Konturlinien geben die Ozonkonzentration in ppm an, rot und gelb kennzeichnen hohe, blau niedrige Konzentrationen.

Durch die Bildung des Ozons wird bereits ein großer Teil der für das Leben auf der Erde schädlichen Ultraviolettstrahlung in der Stratosphäre verbraucht, einen weiteren Teil absorbieren die gebildeten Ozonmoleküle. Die Ozonschicht ist daher für das Leben auf der Erde von großer Bedeutung, und ihr Abbau durch vom Menschen produzierte Stoffe (anthropogene Gase, s.u.) muß unbedingt vermieden werden.

Andere Spurengase

Neben dem Ozon gibt es noch weitere natürliche Spurengase in der Stratosphäre, die in die dort ablaufenden chemischen Reaktionen eingreifen. Methan (CH_4) entsteht hauptsächlich in Sümpfen, Marschen und dem tropischen Regenwald durch Vergärung von organischem Material. Interessanterweise tragen auch Termiten signifikant zur globalen Methanproduktion

bei. Zu diesen natürlichen Methanquellen kamen in den letzten Jahrzehnten noch durch Massentierhaltung verursachte: In den Verdauungstrakten von Nutztieren werden erhebliche Methanmengen gebildet. Ein weiteres wichtiges Spurengas ist das Lachgas (N_2O). Es wird durch mikrobiologische Prozesse durch Bakterien im Boden, aber auch durch chemische Reaktionen aus dem Luftsauerstoff gebildet. Der Mensch hat die natürliche Lachgasmenge aber noch durch die Produktion und Benutzung stickstoffhaltiger Düngemittel sowie durch Verbrennung von Kohle und Öl erhöht. Kohlenmonoxid (CO) entsteht bei natürlichen Wald- und Steppenbränden, aber auch bei vom Menschen verursachten Verbrennungsvorgängen, besonders in Kraftwerken und Kraftfahrzeugen. Dabei entsteht auch molekularer Wasserstoff (H_2). Auf natürliche Weise wird dieser auch aus Kohlenwasserstoffen gebildet, die bestimmte Pflanzen emittieren (z.B. Nadelbäume, die typische Waldluft).

Diese und noch andere Spurengase stehen durch komplizierte chemische Reaktionen miteinander in Wechselwirkung, so daß die vermehrte Produktion eines Gases sich auch auf viele andere (auch besonders auf das Ozon) auswirkt. Es ist daher wichtig, daß die Konzentration dieser Spurengase in der Stratosphäre ständig überwacht wird. Abb. 2 zeigt entsprechende Meßergebnisse von Spurengasen. Im rechten Teil dieser Abbildung finden sich einige natürlich vorkommende Spurengase, deren Konzentration im ppm-Bereich liegen. Auf der linken Seite sind einige Spurengase eingetragen, die in noch erheblich geringerem Mischungsverhältnis (ppt = parts per trillion, ein

Volumenteil Gas auf eine Trillion Volumenteile Luft) vorhanden sind. Bei diesen Gasen handelt es sich ausschließlich um anthropogene Gase, die sogenannten Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW). Obwohl ihre Konzentration in der Stratosphäre etwa eine Million mal geringer ist als die der natürlichen Spurengase (rechts), sind sie entscheidend am Ozonabbau beteiligt. Das liegt zum großen Teil daran, daß diese Gase in der Atmosphäre eine Lebensdauer von bis zu einigen 100 Jahren haben. Während es für die natürlichen Spurengase Abbaumechanismen gibt, fehlen diese bei den chemisch sehr stabilen FCKWs. Sie können also sehr lange ihr Ozon-zerstörendes Potential entfalten. Auch das bekannte Ozonloch über der Antarktis wird durch das in vielen FCKWs enthaltene Chlor und Brom verursacht. Aufgrund dieser Erkenntnis haben sich viele Industrienationen inzwischen darauf geeinigt, einige dieser Produkte (die als Treibmittel, Kühlmittel und Feuerlöschmittel verwendet werden) überhaupt nicht mehr oder nur vermindert zu produzieren. Es wird aber noch mehr als 50 Jahre dauern, bis die heutigen FCKW-Mengen in der Atmosphäre auf ungefährliche Konzentrationen zurückgegangen sind.

Ballonmessungen

Mit einem großen Stratosphärenballon wird ein sogenannter Kryosammler in die Stratosphäre getragen (Abb.3). Dieser Kryosammler besteht aus 16 Probenzylindern, die mit flüssigem Neon (Temperatur -245 Grad) gekühlt sind, das sich in einem Thermosgefäß (Dewar) befindet. Alle Probenzylinder sind mit Ventilen abgeschlossen und über eine gemeinsame

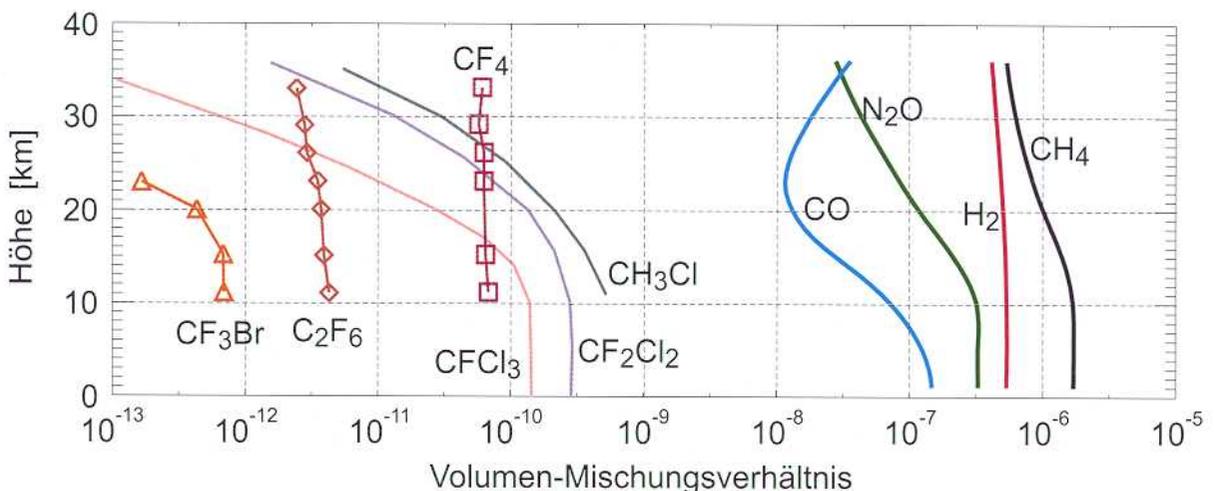


Abb. 2 Einige natürliche (rechts) und anthropogene (links) Spurengase in der Stratosphäre, gemessen mit dem Kryosammler des MPAe. Das Volumen-Mischungsverhältnis 10^{-6} entspricht 1 ppm, 10^{-12} entspricht 1 ppt.

Einlaßleitung mit der Außenluft verbunden (Abb. 4). Wird nun per Fernsteuerung ein Ventil geöffnet, kann Luft in den vor dem Start leergepumpten Zylinder einströmen. Wäre dieser nicht gekühlt, würde nur sehr wenig Luft eindringen, da in der Stratosphäre der Luftdruck sehr viel kleiner ist als am Erdboden. Wegen des Neon-Bades ist aber die Innenwand des Probenzylinders so kalt, daß die Luft sofort ausfriert und neue nachströmen kann. Es handelt sich um eine sehr effektive 'Kryopumpe'. Je länger das Ventil geöffnet bleibt, um so mehr Luft wird ausgefroren. Ist genügend Luft gesammelt, wird das Ventil wieder geschlossen. Auf diese Weise können 16 Luftproben in verschiedenen Höhen bis zur Flugspitzhöhe von etwa 35 km genommen werden.

Nach Beendigung des Sammelprogramms wird der Kryosammler vom Ballon getrennt und kommt mit einem Fallschirm herunter. Die Analyse der Luftproben erfolgt dann im Labor, wobei massenspektrometrische und gaschromatografische Verfahren angewendet werden. Alle Spurengase können sehr genau und mit großer Empfindlichkeit gemessen werden, wobei die Konzentrationen oft kleiner als ein ppt (vergl. Abb. 2) sind.

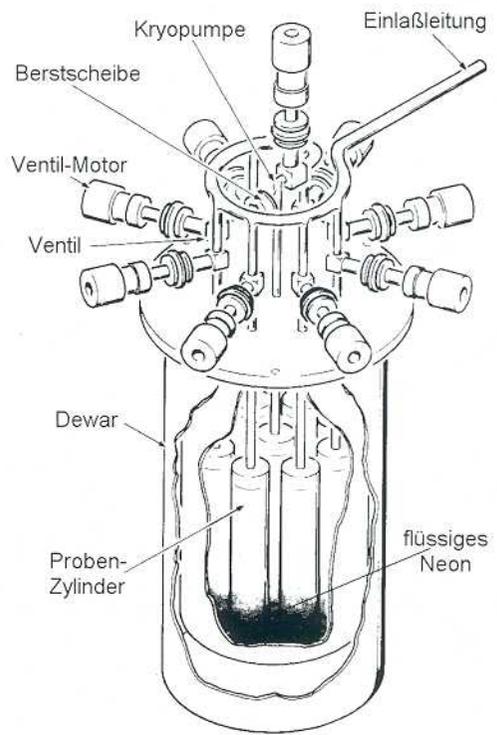


Abb. 4 Kryosammler des MPAe (schematisch)

Mikrowellenspektrometrie

Bei diesem Meßverfahren wird die Mikrowellenstrahlung registriert, die bestimmte Gasmoleküle der Atmosphäre aussenden. Die Moleküle werden durch Zusammenstöße mit anderen Atmosphärenbestandteilen und durch Wärmestrahlung zu Rotationsbewegungen um verschiedene Symmetrieachsen angeregt. Bei einer Änderung derartiger Rotationszustände wird Energie in Form von elektromagnetischen Wellen mit Wellenlängen zwischen etwa 0,1 mm und 10 cm abgestrahlt, diese Strahlung nennt man Mikrowellenstrahlung. Da jedes Molekül nur ganz bestimmte Wellenlängen abstrahlt, kann es anhand dieser Strahlung - wie ein Mensch an seinen Fingerabdrücken - eindeutig identifiziert werden.

Mikrowellenspektrometer sind komplizierte Meßgeräte, die aber wie ein Radio nach dem Prinzip eines Überlagerungsempfängers arbeiten (Abb. 5). Eine Antenne sammelt die Mikrowellenstrahlung aus der Atmosphäre längs eines eng gebündelten Strahls. In dem Mischer wird ein Referenzsignal überlagert, wodurch die hohe Frequenz der Mikrowellenstrahlung (20 - 3000 GHz) in niedrige Frequenzen umgewandelt wird, wie sie in der Fernsehtechnik benutzt werden (MHz). Das anschließende Spektrometer analysiert die spektrale Verteilung der Mikrowellenstrahlung, die aus dem Bereich vom Erdboden bis etwa 80 km Höhe stammt.



Abb. 3 Aufstieg eines Stratosphärenballons (hinten) in Kiruna/Schweden. Im Vordergrund ist der Hilfsballon zu sehen, an dem der Kryosammler hängt.

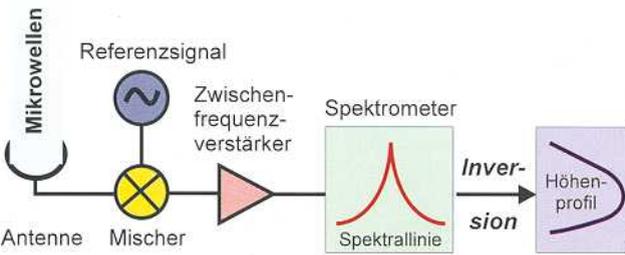


Abb. 5 Prinzip eines Mikrowellenspektrometers

Durch einen mathematisch sehr komplizierten und rechenaufwendigen Prozeß, der sog. Inversion, kann die Höheninformation zurückgewonnen werden. Um aussagekräftige Höhenprofile mit geringen Fehlern zu erhalten, muß man allerdings über viele Einzelprofile mitteln. Das führt dazu, daß eine solche Messung einige Stunden dauern kann. Die vom Boden aus eingesetzten Geräte des MPAe ermöglichen einen Dauerbetrieb, so daß die Veränderung der Höhenprofile über viele Tage oder Monate erfaßt werden kann (z.B. Abb. 1).

Am MPI für Aeronomie wurden Mikrowellenspektrometer entwickelt, die die charakteristische Mikrowellenstrahlung von Ozon (O₃), Wasserdampf (H₂O), Chlormonoxid (ClO), Salzsäure (HCl) und Kohlenmonoxid (CO) registrieren. Diese Spurengase sind für die Erforschung der Ozonschicht und ihrer Veränderung besonders interessant, weil sie in enger Wechselwirkung miteinander stehen.

Meist werden die Spektrometer vom Boden aus eingesetzt, um Höhenprofile der Spurengase zu ermitteln. Derartige Messungen können aber auch von Flugzeugen, Ballonen und Satelliten aus durchgeführt werden. So wurden in den Jahren 1992-94 im Rahmen der drei ATLAS Space Shuttle Missionen der NASA mit unserem Mikrowellengerät Spurengasmessungen in der Erdatmosphäre durchgeführt.

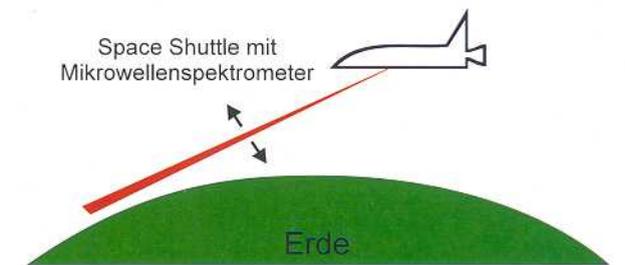


Abb. 6 Mikrowellenmessungen vom Space Shuttle aus

Durch eine kleine Schwenkbewegung der Antenne wurde dabei die Erdatmosphäre in verschiedenen Höhen abgetastet (Abb. 6). Derartige Messungen bieten den Vorteil, daß sie nicht - wie bei bodengebundenen Spektrometern - auf einen Ort der Erde beschränkt sind. Während der Erdumrundung durch das Shuttle kann ein großer Bereich der gesamten Erdatmosphäre abgetastet werden.

Abb. 7 zeigt die so ermittelte globale Verteilung von Ozon und Chlormonoxid, beide Spurengase wurden gleichzeitig gemessen. Man erkennt deutlich, daß an Orten mit hohem ClO-Gehalt die Ozonkonzentration erniedrigt ist (links unten von der Bildmitte, über Sibirien).

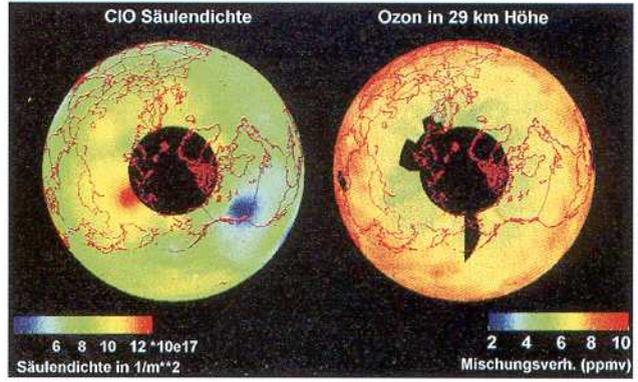


Abb. 7 Verteilung von Ozon und Chlormonoxid auf der nördlichen Halbkugel der Erde. (siehe http://www.mpae.gwdg.de/mpae_projects/MAS)

Die am Institut gewonnenen Meßergebnisse dienen zum Studium von räumlichen und zeitlichen Variationen der Spurengase. Sie fließen aber auch in Modelle ein, die Aussagen über die langfristigen Veränderungen der Spurengase liefern. Mikrowellenspektrometer des MPAe werden inzwischen auch erfolgreich zur Erforschung der Atmosphären anderer Planeten (besonders Mars) eingesetzt.

Weiterführende allgemeinverständliche Literatur:
 P. Fabian, Atmosphäre und Umwelt, Springer Verlag, Berlin, 1992,
 T.E. Graedel, P.J. Crutzen, Chemie der Atmosphäre, Spektrum Verlag, Heidelberg, 1994.
 Internet: <http://toms.gsfc.nasa.gov/>
<http://www.epa.gov/ozone/>

R. Borchers, G. Hartmann, P. Hartogh, K. Schlegel