

Ergebnisse aus zehn Jahren

Von Martin Dameris und Ulrich Schumann

Nach zehn Jahren Ozonforschung ist die Abnahme der Ozonschicht in der Stratosphäre nicht nur über der Antarktis (Ozonloch), sondern auch über der Arktis und Europa ein Faktum, das man heute weitgehend, wenn auch immer noch nicht vollständig versteht und dessen weitere Entwicklung man mit Modellen berechnen kann. Der Stand des Wissens wurde in einem umfassenden Bericht „Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998“ unter Federführung der World Meteorological Organisation zusammengestellt. National gibt es eine Dokumentation „10 Jahre Deutsche Ozonforschung 1989 bis 1999“. Wissenschaftler des DLR haben zu den Erkenntnissen mit zahlreichen Publikationen wesentlich beigetragen. Einige der Projekte und Ergebnisse werden hier vorgestellt. Mit dem für 2001 geplanten Start des Umweltsatelliten ENVISAT der ESA erhält das Thema neue Aktualität.

Ozonforschung im DLR



Im Jahr 1985 hat die Entdeckung des so genannten Ozonlochs, einer Region über der Antarktis mit einer stark verdünnten Ozonschicht in der Stratosphäre, weltweit für größtes Aufsehen gesorgt. Erstmals gab es messbare Hinweise darauf, dass Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) aus Kühlschränken und Spraydosen die Ozonschicht, die das Leben auf der Erde vor der ultravioletten Strahlung der Sonne schützt, zerstören. Zwar hatten bereits Anfang der 70er Jahre M. Molina und

den (NO_x) in der Atmosphäre abnimmt, die sonst einen Teil der Chloroxide (ClO_x) zu Chlornitrat (ClONO_2) bindet. Gleichzeitig fanden amerikanische Kollegen, dass Salzsäuregas (HCl) zusammen mit Chlornitrat auf Eis zu Chlorgas und Salpetersäure zerlegt werden und dass Chlorgas dann sehr schnell Ozon abbauen kann. In archivierten Satellitendaten fand man das Ozonloch bereits seit Beginn der 80er Jahre. Von Jahr zu Jahr wurde es größer und überstieg bald eine Fläche größer als

abnahme führen? War etwa der Luftverkehr mit verantwortlich für den Ozonabbau? Waren die verabredeten FCKW-Reduktionen ausreichend, um einen weiteren Anstieg der Halogenkonzentrationen in der Stratosphäre und einen Abbau der Ozonschicht in den nächsten Jahrzehnten zu verhindern? Wie lange würde es dauern, bis die Ozonschicht wieder zum Stand der 70er Jahre zurückkehrte? Diese Fragen führten 1989 zur Einrichtung des Ozonforschungsprogramms (OFP) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Übersicht

Bereits vor Beginn des eigentlichen OFP, im Januar 1989, flogen Wissenschaftler des Instituts für Physik der Atmosphäre mit einem Flugzeug vom Typ DO-228 des DLR mit einem in den Jahren zuvor für andere Aufgaben entwickelten Rückstreu-Lidar nach Norwegen, um dort nach polaren stratosphärischen Wolken (polar stratospheric clouds, PSCs) Ausschau zu halten, die im Verdacht standen, Chlorverbindungen zu aktivieren. Diese Wolken sieht man zuweilen mit bloßem Auge. Mit dem Lidar gelang es, ihre Höhe und Breite zu vermessen. Diese erste Sondierung der Vertikalstruktur von PSCs über Skandinavien löste eine Serie umfangreicher Forschungsprojekte aus, die wesentlich dazu beitrugen, die Bildung von PSCs an Gebirgen und ihren Beitrag zum Ozonabbau zu verstehen. Inzwischen kann man mit dem Flugzeug-Lidar nicht nur Aerosole, sondern auch Ozon und Wasserdampf messen.



F. Rowland (gemeinsam mit P. Crutzen, Nobelpreisträger für Chemie 1995) postuliert, dass FCKW in die Stratosphäre aufsteigen, dort durch die kurzweilige Sonnenstrahlung in hochreaktive Halogenverbindungen zerlegt werden und Ozon abbauen können. Nach Modellrechnungen sollte dieser Effekt die Ozonschicht aber vorwiegend in der mittleren und oberen Stratosphäre, also oberhalb von etwa 30 Kilometer Höhe, um einige Prozent vermindern. Ozonsonden an Ballonen maßen aber über der Antarktis im dortigen Frühjahr (September bis November) in Höhen von 14 bis 20 Kilometer einen fast vollständigen Ozonabbau. Eine mögliche chemische Erklärung gaben P. Crutzen und F. Arnold im Jahre 1986, die zeigte, dass Salpetersäure (HNO_3) aus der Gasphase bei den niedrigen Temperaturen in der unteren polaren Stratosphäre zu festen Teilchen kondensieren kann, wodurch die Konzentration an Stickoxi-

den ganz Europa. Es handelte sich also nicht um einen zufälligen dynamischen Prozess. Die NASA schickte 1987 ein Höhenforschungsflugzeug in den antarktischen Polarwirbel. Mit neuen Instrumenten fand man im kalten Polarwirbel tatsächlich aktive Chlorverbindungen in hoher Konzentration, was den Befund des chemischen Ozonabbaus in der Antarktis erhärtete.

Fragen

Diese neuen, aufregenden Erkenntnisse beschleunigten die politische Willensbildung und führten zur weltweiten Reduktion der FCKW-Produktion, was zunächst noch recht vorsichtig im Montrealer Protokoll von 1987 vereinbart wurde. Maßgeblich trieb eine Enquetekommission des Deutschen Bundestags die Diskussion voran. Eine umfassende Bestandsaufnahme des Wissens zeigte, dass noch viele Fragen offen waren: Musste man mit einem Ozonabbau auch in der Arktis und in Europa rechnen? Konnten die Vorgänge in den Polregionen sich auf die Ozonschicht über den stark besiedelten Regionen in mittleren Breiten der Nordhemisphäre auswirken? Könnte ein zukünftiger Vulkanausbruch in der stark mit Halogenverbindungen belasteten Stratosphäre zu einer plötzlichen katastrophalen Ozon-

Im folgenden Jahrzehnt wurden im OFP vom BMBF 129 Projekte mit einem Finanzvolumen von 92,4 Millionen DM gefördert. Das Institut für Physik der Atmosphäre mit der Lidargruppe, das Institut für Optoelektronik, das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) und der Flugbetrieb des DLR haben zu diesem Forschungsprogramm maßgeblich beigetragen. Wissenschaftler der genannten Institute des DLR haben als Koordinatoren das OFP mit gesteuert, hierfür neue Instrumente zur Messung der Spurengase und Partikel vor Ort (in situ) oder mit Fernerkundung entwickelt, im Labor die für die Fernerkundung wichtigen Eigenschaften von Chlorverbindungen gemessen, Messkampagnen mit Forschungsflugzeugen, insbesondere der TRANSALL der Bundeswehr und der Falcon des DLR durchgeführt, Fernmessungen von Ozon mit dem GOME-Sensor auf dem euro-

Abb. vorherige Doppelseite: Das DLR-Forschungsflugzeug Falcon während einer Messkampagne in der Arktis.

Abb. 1: Polare stratosphärische Wolken (PSCs) von Typ PSC II (Wassereis, Perlmutterwolken) über Kiruna, Schweden im Januar 1997. Foto: Anne Rêchou, IRF Kiruna.

päischen Satellit ERS-2 zur Modellvalidierung genutzt, Satellitendaten mit Messungen vom Flugzeug aus validiert und ganz wesentlich die Modellierung und das Verständnis der dynamischen und chemischen Prozesse vorangebracht. Für die globale Klima-Chemie-Modellierung wurde 1991 eigens eine neue Arbeitsgruppe aufgebaut. Eine kleine Auswahl der in jüngster Zeit erzielten Ergebnisse wird hier vorgestellt und diskutiert.

Bildung polarer stratosphärischer Wolken

Man unterscheidet zumindest zwei Klassen von PSCs: PSC-Typ I besteht aus Salpetersäure-Wasser-Eispartikeln (Nitric Acid Trihydrate: NAT; Typ Ia) oder aus flüssigen Tröpfchen von HNO_3 , H_2O und H_2SO_4 (Typ Ib). PSC-Typ II besteht aus Partikeln aus reinem Wassereis. Wasser gefriert in der Stratosphäre in etwa 23 Kilometer Höhe bei den dort typischen Wasserdampfkonzentrationen bei ca. minus 88 Grad Celsius. Derart niedrige Temperaturen treten in der Arktis im Vergleich zur Antarktis selten auf, da der polare Wirbel im Norden durch planetare Wellen in der Atmosphäre häufiger gestört wird und sich daher die Luft dort nicht so weit abkühlen kann wie im Süden. Wiederholt wurden PSCs beobachtet, ohne dass dies durch die großräumige Temperaturverteilung in der Atmosphäre erklärbar wäre. Messungen und Modellrechnungen des DLR haben gezeigt, dass sich die PSCs in solchen Fällen in Wellen in der Stratosphäre bilden, die bei der Überströmung von Gebirgen auftreten.

Beispielsweise wurden PSCs vom Typ II am 9. Januar 1997 beobachtet, obwohl es nach Berechnungen globaler Modelle hierfür zu warm war. Ein Polartief über dem Nordkap führte zu einer starken Luftströmung über das nordskandinavische Bergmassiv und damit zur Anregung von Gebirgswellen. Der Wind war schon in Bodennähe sehr stark und änderte seine Richtung wenig mit der Höhe. Daher verursachte die Überströmung auf- und abschwingende Wellen in der Atmosphäre, die sich als Gebirgswellen bis in die Stratosphäre ausbreiteten. Dort wo die Luftmasse angehoben wurde, kühlte sie sich adiabatisch ab und führte über dem Gebirge und in dessen Lee zu starken lokalen Abkühlungen. Ein solcher mesoskaliger Prozess kühlte am 9. Januar 1997 eine Höhenschicht von 23 bis etwa 27 Kilometer unter den Frostpunkt ab

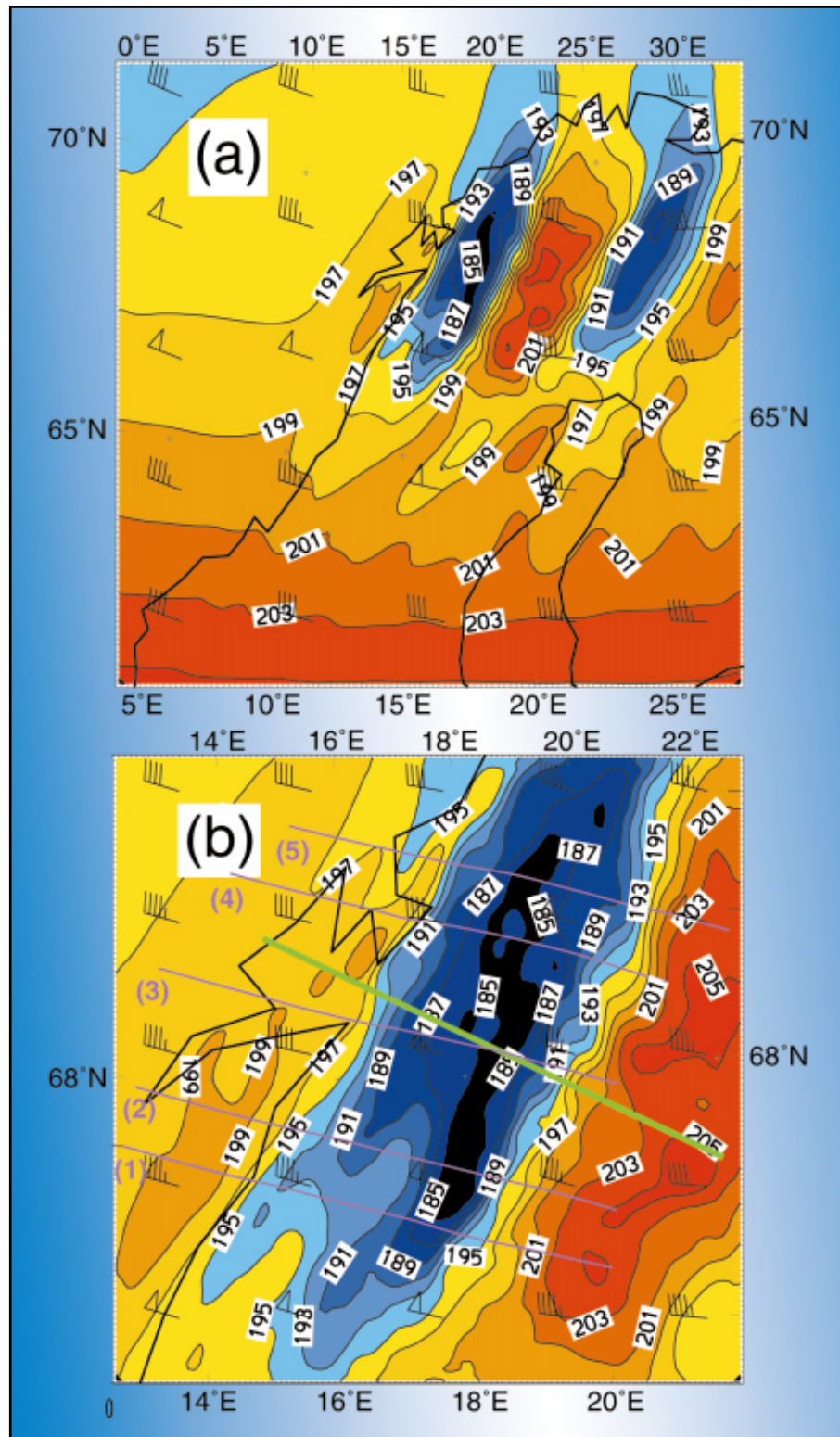


Abb. 2: (a) Horizontalschnitt der Temperaturverteilung in Kelvin (dünne Linien und Farbschattierung) und horizontale Windvektoren (lange bzw. kurze Fahnen: zehn bzw. fünf ms^{-1}) in etwa 25 Kilometer Höhe. Ergebnisse von Modellrechnungen mit zwölf Kilometer horizontaler Maschenweite. (b) Ausschnitt aus (a) mit vier Kilometer horizontaler Auflösung. Die grüne Linie zeigt die Ost-West-Flugroute der Falcon am 9.1.1997.

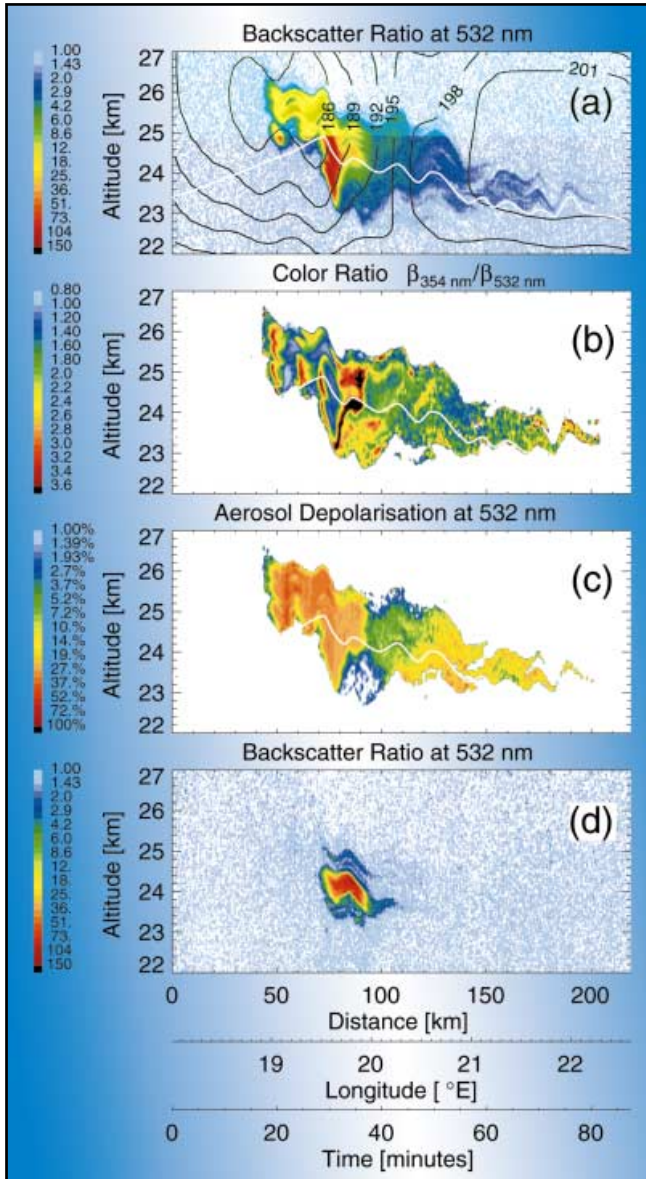


Abb. 3: Lidarmessungen am 9. Januar 1997 entlang der in Abb. 2b gezeigten Flugroute um 16:15 Uhr (a-c) und um 19:00 Uhr (d). (a) Rückstreuverhältnis bei 532 nm, (b) Farbverhältnis, (c) Aerosoldepolarisation bei 532 nm und (d) Rückstreuverhältnis 2:45 Stunden später. Die Zeitachse bezieht sich auf Luftpakete, die sich mit etwa 150 km/h durch die Wolke bewegen. Die Temperaturlinien (a) stammen aus Vertikalschnitten der Modellrechnung mit vier Kilometer horizontaler Auflösung. Die weißen Linien markieren die Bahn von Luftpaketen.

Antarktis Chlor aktiviert und Ozon chemisch abgebaut wird.

Aufnahme von Salpetersäure durch Eispartikel?

In mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre werden die höchsten relativen Ozonverluste von bis zu acht Prozent pro Dekade in der untersten Stratosphäre in Höhen zwischen zehn und 15 Kilometer beobachtet. Bisher ist dieser Befund nicht ausreichend verstanden. Eine mögliche Ursache sind heterogene chemische Prozesse an Eispartikeln in den Zirruswolken, die häufig in der Tropopausenregion auftreten. Eispartikel in solchen Wolken können Salpetersäure (HNO_3) aufnehmen und sehr reaktive Verbindungen freiset-

und ermöglichte so die Bildung von Eispartikeln, die dann mit dem Lidar an Bord der Falcon über dem skandinavischen Bergrücken beobachtet wurden.

Während die großräumig entstehenden NAT-Partikel Tage brauchen, um sich zu bilden, können Partikel aus Wassereis bereits innerhalb von Minuten entstehen. Daher spielen mesoskalige Prozesse für die Bildung von PSCs auf der Nordhemisphäre eine entscheidende Rolle. Die an Gebirgen induzierten PSCs tragen entscheidend bei zur Aktivierung von Chlorverbindungen. Ihr Effekt wird von den globalen Modellen mit groben Maschen nicht erfaßt, und daher unterschätzen diese die Ozonzerstörungsraten. Die Gebirgs-PSCs sind zum Teil dafür verantwortlich, dass auch in der wärmeren arktischen Stratosphäre wie in der

zen, die Ozon abbauen. Dass HNO_3 sich sehr rasch auf der Oberfläche reiner Eispartikel niederschlägt und dass dies bei Temperaturen geschieht, bei denen sich noch keine neuen Salpetersäurepartikel aus der Gasphase bilden, hat man im Labor gefunden. Daher kann das HNO_3 schon bei relativ hohen Temperaturen aus der Gasphase in die Partikelphase übergehen. Wenn die Eispartikel groß genug sind, um eine wesentliche Fallgeschwindigkeit anzunehmen, können sie das aufgenommene HNO_3 sedimentieren. Offen war, ob Zirruswolken tatsächlich in der unteren Stratosphäre auftreten und ob sich die aus Labormessungen abgeleiteten Hypothesen in der Atmosphäre durch Messungen bestätigen lassen.

Zum Verständnis der Rolle der Aerosole in der Polarregion haben daher DLR-Wissenschaftler mit Partnern aus dem OFP das Polare Stratosphärische Aerosolexperiment (POLSTAR) konzipiert. Dabei kam erstmalig eine Reihe neuer Messsysteme zum Einsatz, deren Entwicklung vom BMBF gefördert wurde. Im DLR wurden neue, sehr empfindliche Instrumente zur Messung der Konzentration von Stickstoffmonoxid (NO), der Konzentration der Summe aller reaktiven Stickstoffverbindungen (NO_y) und der von Ozon (O_3) für Sondierungen in der unteren Stratosphäre und oberen Troposphäre entwickelt und ein neuartiges Streulichtlaserspektrometer (MASP) aufgebaut. Die Instrumente kamen erfolgreich auf Ballonen oder Forschungsflugzeugen, insbesondere der Falcon des DLR, zum Einsatz. Die neuen Instrumente wurden benutzt, um die Aufnahme von NO_y durch Eispartikel zu bestimmen.

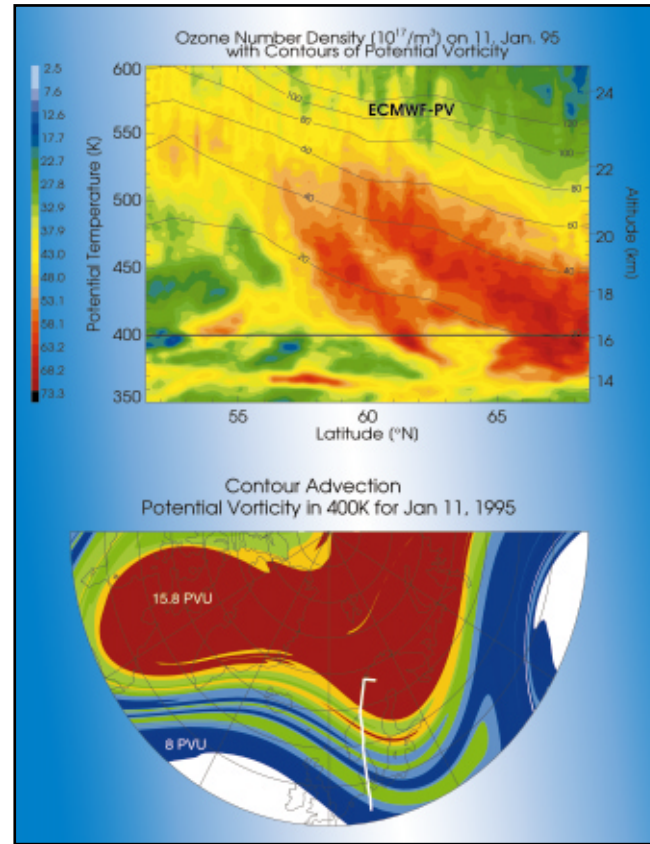
Im Januar und Februar 1997 und 1998 kam die Falcon für das Projekt POLSTAR in Kiruna in Nordschweden mit insgesamt 14 Messflügen zum Einsatz. Da die Falcon nur einen Teil der Instrumente aufnehmen kann, hat man sie auf zwei Flugzeugen verteilt, die nebeneinander fliegen. Mit zwei Einlässen am Rumpf der Falcon, einer nach vorne und einer nach hinten gerichtet, wurde Außenluft mit und ohne Eispartikeln mit Durchmessern größer als einem Meter aufgenommen und der NO_y -Gehalt in der Probenluft nach Verdampfung der Eispartikel gemessen. Damit konnte neben dem NO_y -Gehalt in der Gasphase auch der an Eispartikeln gebundene NO_y -Anteil bestimmt werden. Gleichzeitig wurde auf der Falcon Ozon gemessen, und Kollegen aus Mainz maßen die Konzentration von Lachgas

(N₂O). Anhand der Konzentration dieser langsam reagierenden Gase kann man die Herkunft der Luft zurückverfolgen und zwischen stratosphärischen und troposphärischen Luftmassen unterscheiden.

Bei den Messungen in Kaltgebieten im Bereich der Tropopause über Skandinavien wurden tatsächlich Zirruswolken auch in der unteren Stratosphäre gefunden. Die Messungen ergaben aber entgegen den Erwartungen relativ hohe NO_y-Werte in der Gasphase und sehr niedrige Werte in den Eisparkeln. Die relativ großen absoluten NO_y-Konzentrationen in der Gasphase konnten nicht durch Eintrag von NO_y aus größeren Höhen durch sedimentierende Eisparkel verursacht sein. Dagegen sprachen die relativ kleinen Werte der Konzentrations-Verhältnisse von NO_y zu O₃ und von NO_y zu N₂O. Offenbar waren im frühen Winter 1996/1997 die Bedingungen für die Bildung von polaren Stratosphärenwolken noch nicht gegeben. Die relativ großen absoluten NO_y-Konzentrationen in der Gasphase in der Tropopause-Region waren daher wahrscheinlich auf Flugzeugemissionen zurückzuführen (was den Ozonabbau durch Halogene mindert). Im Winter 1997/1998 wurden außergewöhnlich niedrige NO_y/O₃- und NO_y/N₂O-Verhältnisse gemessen. Sie deuten auf einen Transport von subtropischen Luftmassen in die polare untere Stratosphäre hin. Die unerwartet niedrige NO_y-Konzentration auf den Eisparkeln kann daran liegen, dass sich die Eisparkeln in einer Luft mit geringer HNO₃-Konzentration bildeten oder dass die HNO₃-Aufnahme durch einen Überzug der Eisparkel mit einer ternären H₂O/HNO₃/H₂SO₄-Lösung vermindert wurde oder dass die Eisoberfläche infolge einer Verschmutzung durch andere adsorbierte Spurengasmoleküle nur wenig HNO₃ aufnehmen konnte. Es sind also noch längst nicht alle Fragen beantwortbar. Weitere Messungen sind notwendig und geplant.

Verbesserungen der Fernerkundung

Die bei POLSTAR mit der Falcon gemessenen Konzentrationen von NO₂, O₃ und NO_y wurden auch benutzt, um die Fernerkundungs-Daten des ILAS-Instruments an Bord des Satelliten ADEOS zu validieren. ILAS misst das Emissionsspektrum der Atmosphäre im Infraroten. Aus den Spektren lassen sich Konzentrationsprofile für NO₂, O₃ und HNO₃ ableiten. Der



gesamte reaktive Stickstoff (NO_y) besteht in der untersten Stratosphäre zu etwa 90 Prozent aus HNO₃. Daher kann man die NO_y-Messungen aus POLSTAR mit den HNO₃-Werten von ILAS vergleichen. Es zeigte sich, dass ILAS die HNO₃-Werte im Vergleich zu den NO_y-Werten von POLSTAR um ca. 30 Prozent überschätzt. Die Ozonwerte stimmten dagegen innerhalb von ca. zehn Prozent und damit im Rahmen der erwarteten Messfehler der Instrumente überein. Für NO₂ liegen die ILAS-Werte in zwölf Kilometer Höhe jedoch um einen Faktor 50 höher als die POLSTAR-Messungen. Genaue Fernmessung von NO₂ in diesem Höhenbereich sind offenbar sehr schwierig.

Zur Verbesserung der Fernerkundung benötigt man genaue Daten über die spektroskopischen Eigenschaften der zu messenden Spurengase. Im Rahmen des OFP erweiterte das DLR die spektroskopische Datenbasis von Chlornitrat (ClONO₂), Chlorperoxid (ClOOCl), Ozon (O₃) und Distickstoffpentoxid (N₂O₅). Die Daten werden insbesondere für die Auswertung der Messungen mit dem MIPAS-Instrument (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) vom Boden, Ballon, Flugzeug oder vom zu-

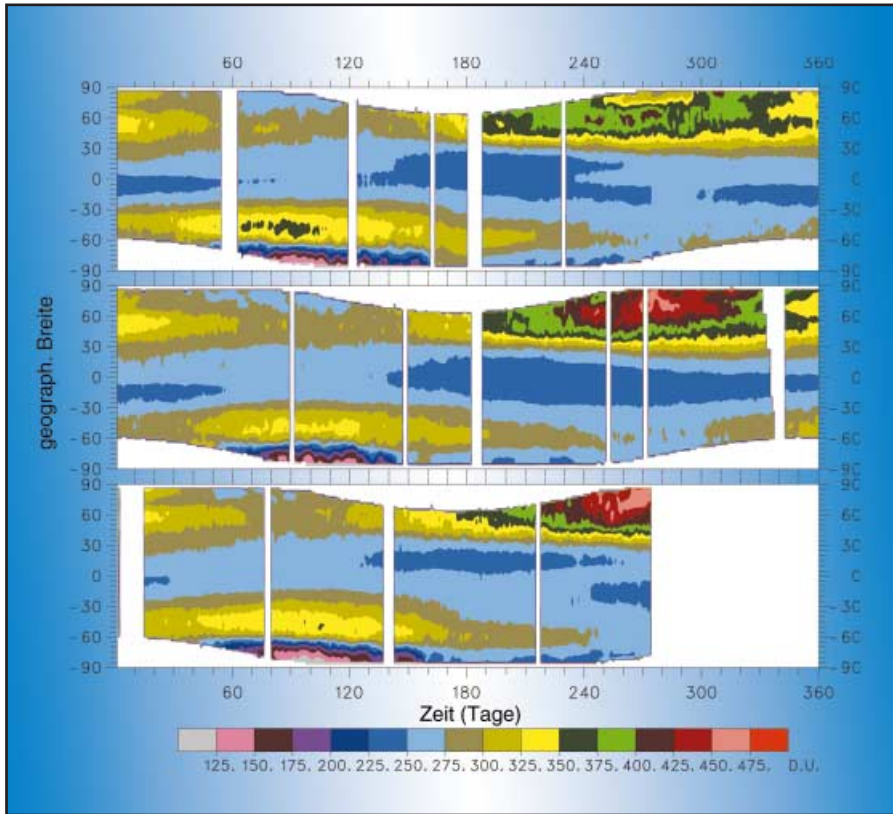
O₃ selbst, sondern auch anderer Spurengase, da O₃ aufgrund seiner großen Anzahl von Infrarotsignaturen andere Spurengase überlagert.

Veränderungen der Ozonschicht heute und in Zukunft

Die gemessenen Ozon- und Aerosolkonzentrationen werden zumeist durch die sehr komplexen Bewegungsvorgänge in der Atmosphäre bestimmt. Zum Beispiel wird die Ozonverteilung stark durch brechende planetare Wellen am Rand des Polarwirbels in der arktischen Winter-Stratosphäre beeinflusst. Die chemischen Veränderungen lassen sich hiervon nur

Abb. 4: Oben: Ozonmischungsverhältnis als Funktion der geographischen Breite und der Höhe bzw. potenziellen Temperatur entlang der Flugstrecke eines Lidar-Messfluges am 11. Januar 1995. Ebenfalls eingetragen sind Linien konstanter Wirbelstärke (ECMWF-PV). Unten: Die für den 11. Januar 1995 berechnete Wirbelstärken-Verteilung auf der 400 Kelvin Isentrope. Die Flugroute der Falcon ist weiß markiert. Das Flugzeug hat den Rand des arktischen Wirbels etwa bei 67°N erreicht.

künftigen ENVISAT-Satellit aus benötigt. Obwohl ClOOCl beim polaren Ozonabbau eine bedeutende Rolle spielt, existieren bislang keine atmosphärischen Messungen. Daher waren bisher nicht einmal Machbarkeitsstudien zur Fernerkundung dieses wichtigen Spurengases möglich. Im Institut für Optoelektronik wurde die spektroskopische Datenbasis mit Messungen im Labor entscheidend verbessert. Für O₃ wurde die Datenbasis aller Fundamentalbanden im mittleren Infrarot vollständig überarbeitet. Dies dient nicht nur der Fernerkundung von



mit Hilfe von Modellanalysen trennen. Die Transportprozesse in der Stratosphäre werden u.a. mit Modellen untersucht, die die großräumige Bewegung der Luftmassen rein dynamisch (ohne Chemie) mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung berechnen. Dabei verfolgt man im Modell numerisch das Feld einer Luft-eigenschaft, die sich bei rein dynamischen Prozessen nicht ändert. Ein praktisch sehr wichtiges Beispiel ist hierfür die Wirbelstärke (potential vorticity, PV) der Atmosphäre auf Flächen konstanter Entropie. Durch den Vergleich von Vertikal-schnitten des Ozonmischungsverhältnisses entlang eines Messfluges mit Linien

konstanter PV aus den Daten des European Center for Medium Range Weather Forcasts (ECMWF) auf isentropen Flächen kann gezeigt werden, dass die in den Ozondaten beobachteten Strukturen durch langgezogene PV-Filamente verursacht sind, die vom Rand des durch hohe PV (PVU = Potential Vorticity Units) gekennzeichneten Polarwirbels abgeschält werden. Das heißt, ein Großteil der Ozonvariabilität ist auf rein dynamische Prozesse zurückzuführen. Dennoch gibt es auch langfristige Ozontrends.

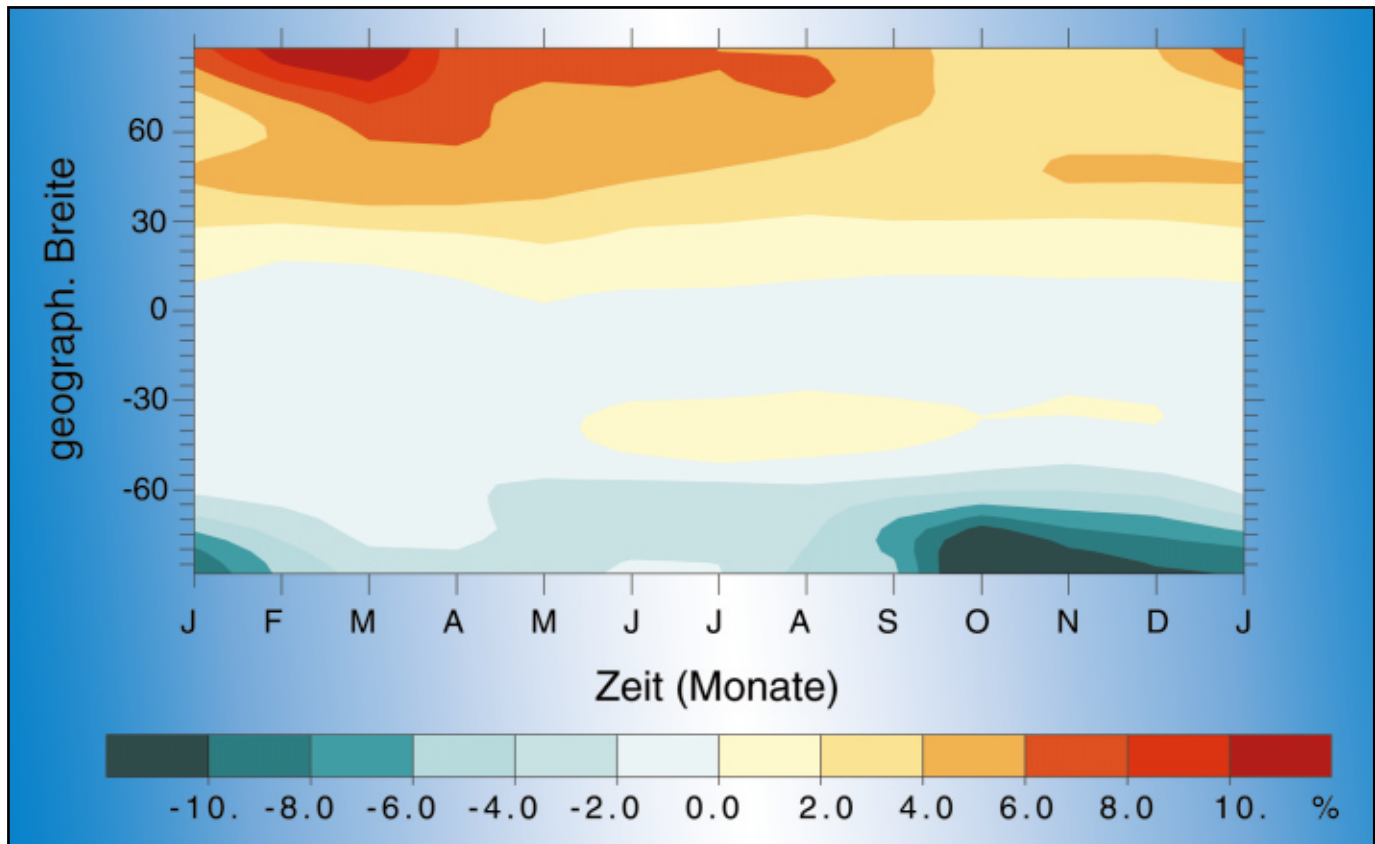
Eine Vorhersage der zukünftigen Ozonentwicklung ist nur mit Modellen möglich. Am DLR wurde daher gemeinsam mit den Max-Planck-Instituten für Meteorologie und für Chemie das globale, gekoppelte Klima-Chemie-Modell ECHAM/CHEM entwickelt. Anhand von Rechnungen für die Jahre 1980 und 1990 konnte gezeigt werden, dass das Modell den gegenwärtigen Zustand der Erdatmosphäre sowie die Veränderungen während der letzten Jahre gut wiedergibt. Die Modellergebnisse stimmen recht gut mit Satellitenbeobachtungen überein. Das Modell ermöglicht erstmalig eine

Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre sowie des Klimas. Für die Zukunft wird für die Rechnungen in realistischer Weise angenommen, dass die Konzentration an Chlorkomponenten in der Stratosphäre von 1990 bis 2015 gemäß dem Kopenhagener Protokoll um etwa 10 Prozent abnimmt. Gleichzeitig unterstellt das Modell eine Zunahme an Treibhausgasen (Szenario „business as usual“). Trotz abnehmenden Chlorgehalts findet das Modell bis zum Jahr 2015 nur geringe Änderungen der Ozonschicht. In den Tropen und in mittleren Breiten der Südhemisphäre sind die Änderungen generell klein. In der Südpolarregion nimmt die Ozonschicht sogar noch weiter ab, vor allem in den Monaten September bis November. In der Nordhemisphäre errechnet das Modell hingegen eine geringe Zunahme der Ozonschicht. Die maximale Zunahme findet man in den polaren und mittleren Breiten im Winter und Frühling. Die nur sehr geringe Ozonerholung ist eine Folge der erwarteten Zunahme der Treibhausgase von 1990 bis 2015. Diese lassen die Stratosphäre global in allen Jahreszeiten um ein bis zwei Grad Celsius kälter werden. Aufgrund der geringeren Temperaturen bilden sich mehr PSCs und folglich wird Chlor stärker aktiviert, trotz des deutlich reduzierten Gesamtchlorgehalts. Es ist daher mit einer Verstärkung des Ozonlochs in der Antarktis in den nächsten Jahren zu rechnen. In der Nordhemisphäre ist die Bewertung der Modellergebnisse wegen der hohen dynamischen Variabilität schwieriger. Obwohl sich im Modell die Ozonkonzentration in der mittleren Stratosphäre kaum ändert, wird insgesamt mit einer leichtem Zunahme der Ozonschicht gerechnet. Diese Zunahme ist im wesentlichen eine Folge der im Szenario 2015 gegenüber 1990 erhöhten Stickoxid-Emissionen am Erdboden, z.B. durch Verkehr.

Antworten und Ausblick

Diese und andere Ergebnisse des DLR und des gesamten OFP erlauben es heute, einige der anfangs gestellten Fragen sehr klar zu beantworten. Nicht nur in der Antarktis, auch in der Arktis und über Europa hat sich inzwischen ein messbarer Ozonverlust eingestellt. Besonders stark ist der Ozoneinbruch in Wintern mit kal-

Abb. 5: Zonal gemittelte gesamte Ozonschichtdicke (in Dobson Einheiten) für den Zeitraum 1. Juli 1996 bis 31. März 1999. Die Messungen des Global Ozone Monitoring Experiments (GOME) vom Satelliten ERS-2 der ESA werden zum Vergleich mit Modellergebnissen herangezogen. (Datenbereitstellung durch das DLR-DFD.)



ter Stratosphäre. Starke Vulkaneruptionen können die Aerosolkonzentration in der Stratosphäre über Jahre vervielfachen und zeitweilig den Ozonabbau deutlich verstärken. Dies wurde in den Jahren nach Ausbruch des Pinatubo 1991 auch tatsächlich beobachtet. Der heutige Unterschall-Luftverkehr und die wenigen vorhandenen Überschallflugzeuge sind nicht erkennbar am gemessenen Ozonabbau beteiligt. Aufgrund der verminder-

Abb. 6: Prozentuale Änderung der Ozonschichtdicke im Zeitraum zwischen 1990 und 2015 nach einer Modellrechnung mit dem gekoppelten Klima-Chemie-Modell ECHAM/CHEM. Grüne Farbtöne stehen dabei für eine weitere Ausdünnung der Ozonschicht, gelb und rot zeigen eine „Erholung“ der Ozonschicht an. Die Prognose zeigt, dass auf der Nordhalbkugel (obere Bildhälfte) eine Verbesserung, über der Antarktis jedoch eine weitere Verschlechterung der Situation erwartet wird.

ten FCKW-Emissionen nimmt der Chlorgehalt der Atmosphäre derzeit nicht mehr signifikant zu. Es wird allerdings Jahrzehnte dauern, bis die Chlorkonzentration wieder auf den Stand der 70er Jahre zurückgekehrt ist. Die Entwicklung der Ozonschicht in den nächsten Jahrzehnten ist noch immer ungewiss. Im günstigsten Fall wird sich die Ozonschicht in einigen Jahrzehnten wieder erholen. Im ungünstigen Fall führen die Zunahmen von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen aber zu einer weiteren Abkühlung der Stratosphäre, dadurch zu mehr Eiswolken, zu mehr Chloraktivierung und daher stärkerem Ozonabbau. Dies zeigt, wie wichtig die weitere Erforschung der Prozesse, die Überwachung der Atmosphäre und die Weiterentwicklung der Modelle für Klima und Chemie der Atmosphäre sind.

Derzeit laufen neue Forschungsprogramme zum globalen Wandel im fünften Rahmenprogramm der Europäischen Union an. Anfang 2000 wird von Kiruna aus versucht, die Lidar-Messungen des

DLR mit Messungen der NASA zur Chloraktivierung an PSCs zu verbinden. Für 2001 bereitet die ESA den Start des europäischen Umweltsatelliten ENVISAT vor. Das DFD ist auf den Empfang und die Verarbeitung der Daten der Sensoren SCIAMACHY und MIPAS vorbereitet. Wissenschaftler der beteiligten Institute planen Messungen zur Validierung der Satellitendaten, u.a. mit dem russischen Höhenforschungsflugzeug Geophysica. Weitere wichtige Themen der Zukunft stehen an: so die Erklärung der beobachteten Zunahme an Wasserdampf in der Stratosphäre und die Erforschung der Zusammenhänge zwischen Luftchemie, Aerosolen, Zirren und Klima.

Prof. Ulrich Schumann ist Direktor des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen. Dr. Martin Dameris ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am gleichen Institut. ◀