

Dem Ozon auf der Spur

Ozon ist ein äußerst wichtiger Bestandteil der irdischen Atmosphäre, schützt es uns doch vor der energiereichen ultravioletten Strahlung der Sonne. Dabei ist die natürliche Ozonkonzentration in der Lufthülle unseres Planeten äußerst gering. Würde man alles Ozon in einer dünnen Gasschicht am Boden zusammenfassen können, ergäbe sich eine Schicht von nur drei Millimeter Dicke. Doch die Menschheit ist dabei, durch Abgase aus Industrie, Haushalt und Kraftfahrzeugverkehr die Zusammensetzung der Atmosphäre und damit auch die Ozonkonzentration zu verändern. Einerseits kann dadurch in der unteren

Troposphäre, die Ozonkonzentration erhöht werden, andererseits kann in der Stratosphäre die schützende Ozonhülle verringert werden. Beides ist für das Leben auf der Erde schädlich. Am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre wird das Verhalten des Ozons schon seit vielen Jahren mit Hilfe von Meßflugzeugen untersucht. Demnächst wird auch ein Differential-Absorptions-Lidar zur Fernerkundung von Ozon aus dem Flugzeug eingesetzt werden.



*Dr.rer.nat. Gerhard Ehret,
Dipl.-Met. Jutta Graf,
Dr.rer.nat. Dieter Paffrath,
Dipl.-Phys. Frank M. Rösler,
Prof.Dr.-Ing.habil. Ulrich Schumann,
Institut für Physik der Atmosphäre,
Oberpfaffenhofen*

Ozon ist zu einem Reizwort geworden, denn es reizt die menschlichen Schleimhäute und schadet den Pflanzen. Aber Ozon, die dreiatomige Form des Sauerstoffs, O_3 , bildet auch einen wichtigen Schutzschild für das Leben auf der Erde, da es die energiereiche, ultraviolette Strahlung von der Sonne in der irdischen Atmosphäre ausfiltert und damit von der Erdoberfläche fernhält.

Die natürliche Ozonkonzentration in der Atmosphäre ist sehr gering. Würde man alles Ozon in einer Gasschicht am Boden zusammenfassen können, dann ergäbe sich nur eine Schicht von etwa drei Millimeter Dicke.

Das meiste Ozon befindet sich in der Stratosphäre oberhalb der Tropopause. Deren Höhe liegt an den Polen etwa bei acht Kilometer, am Äquator bei etwa 17 Kilometer. Jahreszeitlich bedingt kann sich die Höhe der Tropopause aber auch verändern. In der Stratosphäre ist die Ausfilterung der energiereichen ultravioletten Strahlung durch das Ozon eine Ursache für die dort mit der Höhe zunehmende Temperatur. Unterhalb der Tropopause, in der Troposphäre, nimmt hingegen die Temperatur mit der Höhe ab. Wegen dieser Temperaturprofile ist die Troposphäre nur schwach stabil geschichtet, während die Stratosphäre sehr stabil geschichtet ist. Deshalb spielen sich Wetterprozesse mit großen senkrecht verlaufenden Bewegungen nur in der Troposphäre ab, während die senkrechte Durchmischung in der Stratosphäre sehr langsam, in Zeiträumen von etwa einem Jahr abläuft.

Die Menschheit ist dabei, die Zusammensetzung der Erdatmosphäre zu verändern. Treibgase und Verbrennungsrückstände entweichen in nicht länger vernachlässigbaren Mengen in die Luft. Die in ihnen enthaltenen Stickoxide, Fluor-Chlor-Kohlen-Wasserstoffe (FCKWs), Methan und andere Stoffe erhöhen einerseits die Ozonkonzentration in der Troposphäre, verringern aber andererseits die abschirmende Ozonschicht in der Stratosphäre. Beides ist für das Leben auf der Erde schädlich. Des-

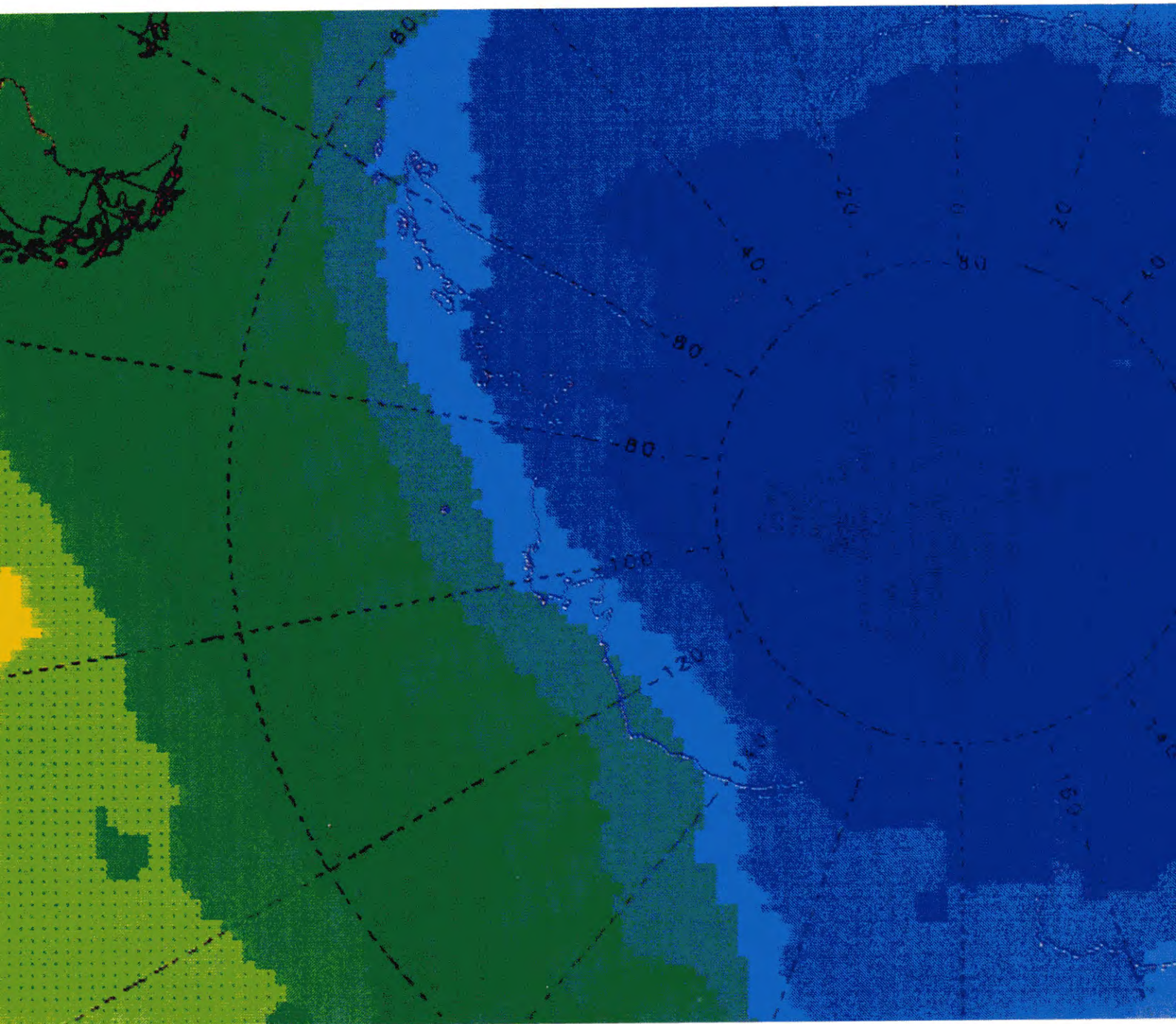


DLR-Forschungsflugzeug Queen Air im Flug.

halb hat weltweit eine intensive Forschung eingesetzt, um den Zustand der Atmosphäre und die Prozesse, die zur Veränderung der Ozonkonzentration führen können, zu ermitteln. Großes Interesse in der Öffentlichkeit hat hierbei die Beobachtung des sogenannten Ozonlochs über der Antarktis gefunden, dessen Ausmaß anhand von Satellitendaten nachweisbar ist. Neuerdings versucht man zu klären, ob ähnliche Prozesse auch über der Arktis ablaufen und auch dort zu einem Ozonloch führen. Für den Bereich der Troposphäre stützen sich die Erkenntnisse bisher vorwiegend auf Messungen vom Boden oder von fliegenden Meßträgern aus. Modelle der Luftchemie und von Transportprozessen tragen wesentlich zum Verständnis der maßgeblichen Abläufe bei.

Das DLR-Institut für Physik der Atmosphäre erforscht schon seit mehreren Jahren mit Hilfe von Meßflugzeugen das Verhalten des Ozons in der Troposphäre. In dieser Zeit wurden Hinweise darauf gefunden, daß das Ozon in den unteren Luftschichten für beobachtete Waldschäden mit verantwortlich sein kann. Um zu erforschen, welche Prozesse die Ozonzusammensetzung in der arktischen Stratosphäre beeinflussen, wurden Lidar-Sondierungen (Lidar = Light Detection and Ranging) von polaren stratosphärischen Wolken durchgeführt. Derartige Wolken enthalten Kristalle aus Salpetersäure (HNO_3) und Wasser (H_2O). Durch chemische Reaktionen aus Chlorverbindungen (aus dem FCKW) werden Prozesse aktiviert, die den Ozonabbau in der polaren Stratosphäre verursachen.

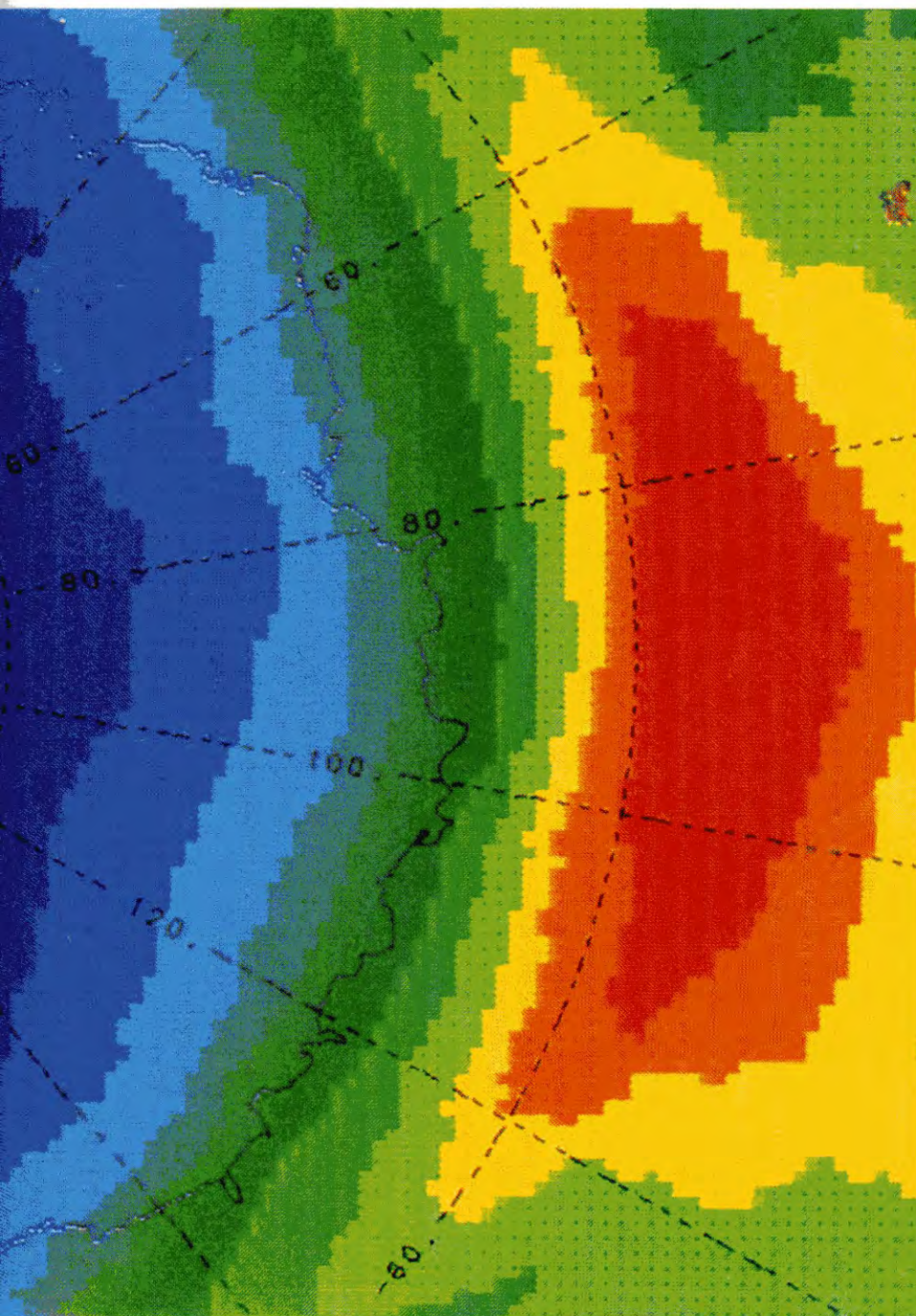
Aus Satellitendaten werden die Veränderungen des Ozonlochs über der Antarktis nachweisbar. (Quelle: NASA).



Die Lidar-Messungen werden auch in Zukunft fortgesetzt. Zusätzlich soll die Ozonkonzentration mit Hilfe eines Differential-Absorptions-Lidars (DIAL) bestimmt werden. Ergänzende Rechenmodelle sollen die Transporte und die photochemische Bildung von Ozon unter Einschluß der von Bergen beeinflussten Windfelder berechnen. Auch Flugzeugmessungen liefern wichtige Daten über die Verteilung der maßgeblichen Luftbeimengungen in der Atmosphäre.

Ozonmessungen vom Flugzeug

Für die Ozonmessungen vom Flugzeug aus konnte das Institut für Physik der Atmosphäre ein zweistrahliges Düsenflugzeug Falcon 20 E, eine zweimotorige Propellermaschine Queen Air Be-65 und zwei Motorsegler ASK-16 verwenden. Die verschiedenen Flugzeuge ergänzten sich dabei. Während die Falcon Höhen bis zu 12 Kilometer erreichte und damit in den Bereich der unteren Stratosphäre vorstoßen konnte, eignete sich die Queen Air zur Messung des Ozon im



unteren und mittleren Troposphärenbereich, also für Höhen von 100 Meter bis drei Kilometer. Ergänzend wurden die Motorsegler bis einige hundert Meter Höhe eingesetzt.

Meßflüge mit der Falcon im Bereich der oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre haben gezeigt, daß Ozon aus der Stratosphäre in bestimmten Fällen durch die Tropopause hindurch in die Troposphäre transportiert wird. Dieser Ozontransport tritt immer dann auf, wenn im Gebiet einer Frontalzone die

Tropopause am Rand eines sogenannten Jetstreams aufgespalten war. Damit erklären sich auch stärkere Schwankungen des ansonsten weitgehend konstanten Hintergrundozons in der mittleren und oberen Troposphäre.

Messungen aus der Queen Air zeigten, daß es durch den Menschen hervorgerufene, also anthropogene Ursachen gibt, die einen merklichen Beitrag zur Ozonverteilung in der Grenzschicht liefern. Ein markantes Beispiel ist die Abgasfahne einer Großstadt, wie z. B. München. In

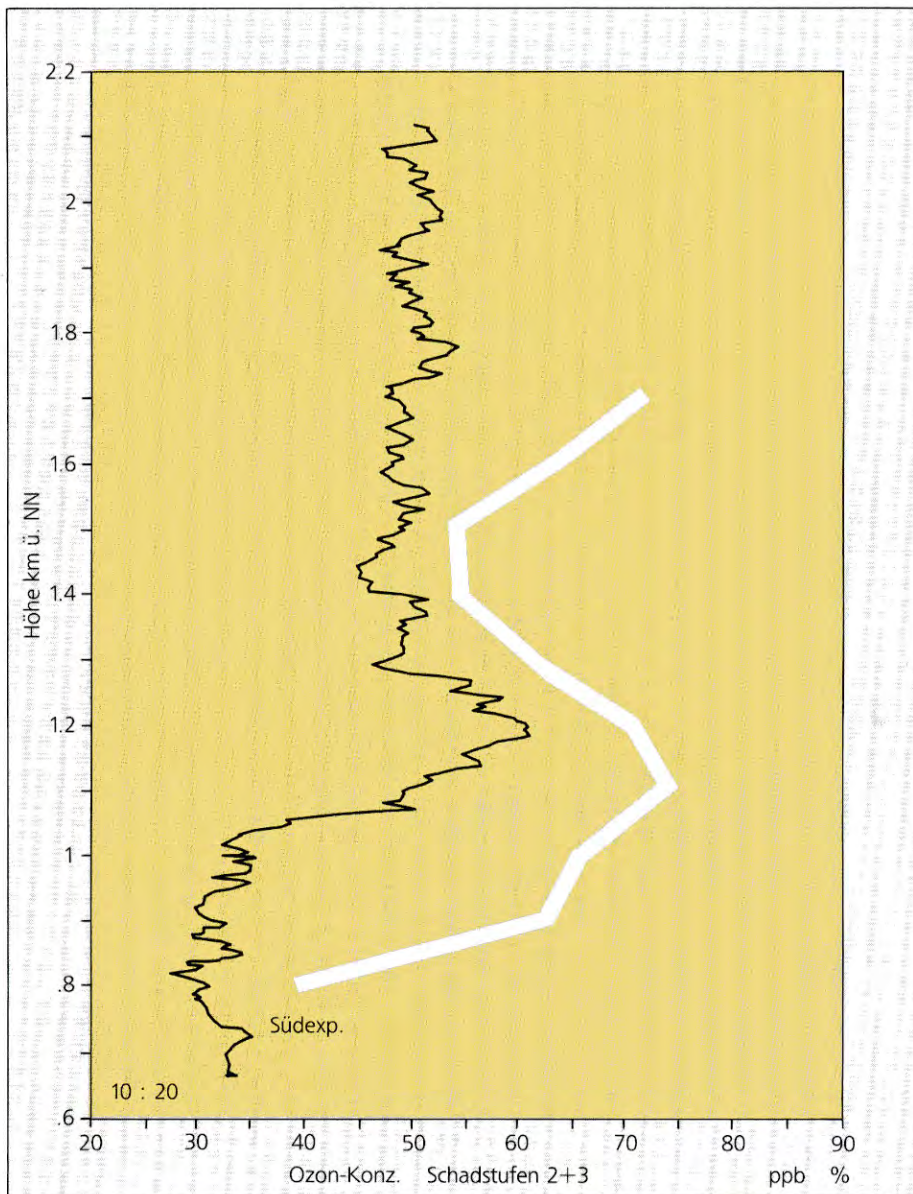
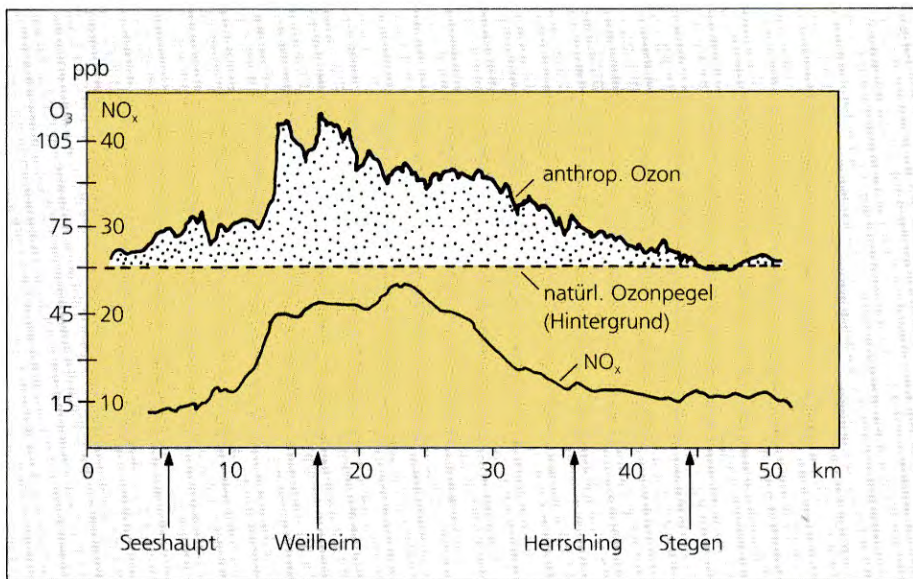
ihnen lassen sich Stickstoffoxide und Kohlenwasserstoffverbindungen nachweisen, die beide von der Industrie und vom Kraftfahrzeugverkehr produziert werden. Vor allem Stickstoffoxide und Kohlenwasserstoffverbindungen gelten als Ozonvorläufersubstanzen. Wenn sie in genügender Form vorhanden sind und wenn die Sonneneinstrahlung stark und außerdem die Temperatur hoch ist, kommt es zur Ozonerzeugung. Das Bild auf Seite 62 (oben) zeigt ein Beispiel für das Ergebnis eines Meßfluges durch die Abgasfahne von München in rund 30 Kilometer Abstand von der Quelle und in etwa 250 Meter über Grund. Die Meßkurve der Abgasfahne ist gekennzeichnet durch die Maxima in der Stickstoffoxid- und in der Partikelkonzentrationsverteilung. Deutlich erkennt man, daß in der Abgasfahne eine erhebliche Ozonanreicherung vorhanden ist. Die maximalen Ozonwerte liegen um fast 100 Prozent über den Hintergrundwerten von etwa 60 ppb. Dieses Ergebnis verdeutlicht, daß eine Stadt merklich zur Ozonerzeugung beiträgt.

Bei Wetterlagen mit hoher Temperatur und starker Sonneneinstrahlung zeigt sich ein typischer Ozontagesgang. Sein Verlauf ergibt sich aus der Wirkung von Einstrahlung, Erwärmung und Austauschprozessen in der atmosphärischen Grenzschicht. Aus Flugzeugmessungen der Ozonvertikalverteilung in der Atmosphäre kann man ein anschauliches Bild dieser Prozesse in der Troposphäre ableiten, das sich kurz folgendermaßen beschreiben läßt: Während der Nacht nimmt die Ozonkonzentration in einer sich bodennah ausbildenden Sperrschicht (Inversion) sehr stark ab. Denn einerseits lagert sich das Ozon an der Erdoberfläche ab, andererseits reagiert es mit oxidablen Stoffen, vor allem mit dem anthropogenen Stickstoffmonoxid. Oberhalb der Inversion bleibt dagegen die Ozonkonzentration meist weitgehend erhalten, wenn das Ozon nicht durch starken Wind wegtransportiert wird. Es bildet sich hier eine Ozon-Sammelschicht, die noch am nächsten Morgen nachweisbar ist. Während des Tages wird in der Mischungsschicht durch photochemische Prozesse neues Ozon gebildet, das zu dem bereits vorhandenen hinzukommt, so daß sich im Verlauf einer solchen Entwicklung gefährlich hohe Konzentrationen aufbauen können.

Wirkungen auf den Wald

Das oben geschilderte Ozonverhalten wurde vom DLR-Institut für Physik der Atmosphäre im Zusammenhang mit dem Auftreten der sogenannten neuartigen Waldschäden studiert. Hierbei konnte festgestellt werden, daß sich die Ozon-Sammelschicht auch im Bereich

Querschnitt der Ozonkonzentrationsverteilung in der Abgasfahne von München, gemessen aus der Queen Air.



des Bayerischen Voralpenlandes ausgebildet und daß die Bäume in dieser Höhe unter den geschilderten Voraussetzungen einer hohen Temperatur und einer starken Sonneneinstrahlung Tag und Nacht hohen Ozonkonzentrationen ausgesetzt sind. Gerade in dieser Höhe ist aber ein Maximum der Waldschäden zu finden, wie durch Infrarotluftbildkartierung am Wank in den Bayerischen Alpen festgestellt wurde. Es ist daher möglich, daß hier ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten des für Pflanzen giftigen Ozons und den Waldschäden in Erscheinung tritt.

Modell der photochemischen Ozonentstehung

Seit einem Jahr wird am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre an einem numerischen Modell gearbeitet, mit dem die Bildung und Ausbreitung von Ozon über topographisch gegliedertem Gelände untersucht werden soll. Grundlage dafür bildet ein Mesoscale-Modell namens Rewimet, mit dem meteorologische Größen wie Wind, Temperatur und die Ausbreitung von Luftbeimengungen simuliert werden können. Zur Simulation der Bildung und Verteilung von Ozon mußte aber das Modell dahingehend erweitert werden, daß auch chemische Prozesse berücksichtigt werden konnten. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der relevanten chemischen Reaktionen.

Ozon bildet sich in der Atmosphäre durch die Reaktion von atomarem mit molekularem Sauerstoff. Molekularer Sauerstoff ist ausreichend vorhanden. Atomarer Sauerstoff bildet sich in der Troposphäre u. a. aus Stickstoffdioxid (durch Photodissoziation). Dazu muß vorher Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid oxidiert werden, da Stickoxide hauptsächlich in Form von Stickstoffmonoxid in die Atmosphäre gelangen. In einer verunreinigten Luft geschieht diese Oxidation überwiegend durch den Abbau der anthropogenen Kohlenwasserstoffe. Erhöhte Emissionen von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen und deren weiträumiger Transport kommen somit als Ursache für die steigenden Ozonkonzentrationen in der Troposphäre in Betracht.

Vertikalverteilung des Ozons über dem Murnauer Moos, gemessen aus der Queen Air (dünne Kurve), und Höhen-

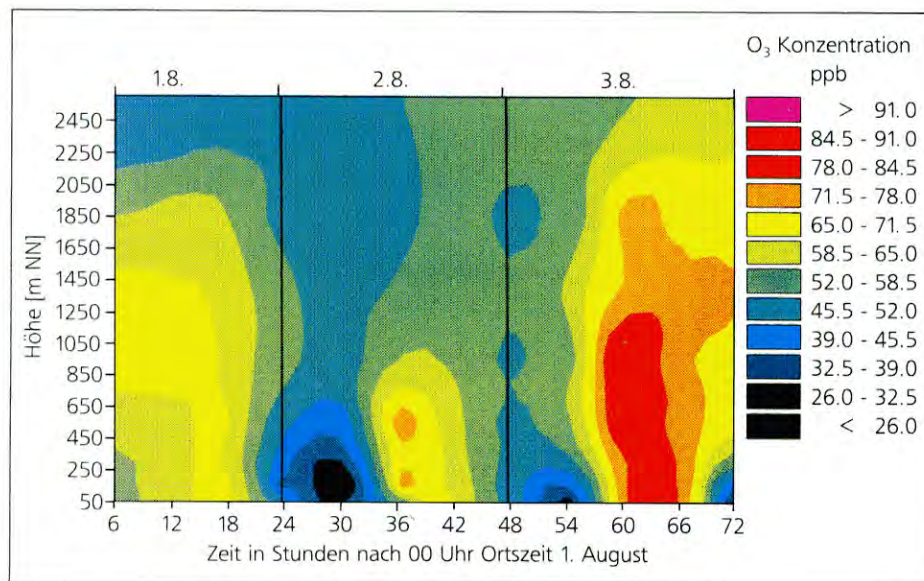
abhängigkeit der Waldschäden (dicke Kurve) am Wank aus einer Infrarotluftbildkartierung.

Wird in einer bestimmten Gegend ein Ozonanstieg beobachtet, so stellt sich die Frage, ob das Ozon lokal erzeugt oder ob es in diese Region transportiert wurde. Diese Frage kann mit Hilfe von Messungen nicht geklärt werden. Jedoch können Modellsimulationen Aufschlüsse über die mögliche Ursache des Ozonanstiegs liefern. Da hohe Ozonkonzentrationen hauptsächlich in ländlichen Gebieten beobachtet werden, läßt sich vermuten, daß der Transport von Ozon oder seiner Vorläufersubstanzen eine wichtige Rolle spielt. Tatsächlich ergaben Sensitivitätsstudien, daß die relativ hohen Ozonkonzentrationen in den industriearmen Gebieten hauptsächlich durch den Transport der Vorläufersubstanz Stickstoffdioxid und nicht durch den Transport von Ozon selbst verursacht wird. Ein weiteres Ergebnis dieser Studien ist, daß die vorwiegend horizontale Heranführung der Luftbeimengungen mit dem vorherrschenden Strömungsfeld einen unterschiedlichen Effekt auf die verschiedenen chemischen Komponenten hat. Erfolgt die Produktion eines Stoffes in erster Linie aufgrund chemischer Prozesse, so ist die Verteilung dieses Stoffes durch die horizontalen Transporte geprägt. Diese sekundär erzeugten Stoffe, wie zum Beispiel Stickstoffdioxid, werden in emissionsarme Gebiete verfrachtet. Primär emittierte Stoffe haben dagegen ihre maximalen Konzentrationen in den emissionsreichen Gebieten. Infolge horizontaler Strömungen wird zwar auch die Stickstoffmonoxid-Konzentration in den weniger lokal belasteten Gebieten erhöht, aber in stärkerem Maße erhöht sich die Stickstoffdioxid-Konzentration. Folglich wird sich in diesen Gegenden aus dem Stickstoffdioxid mehr Ozon bilden als durch Stickstoffmonoxid abgebaut wird. In industriearmen Gebieten werden daher höhere Ozonkonzentrationen erreicht.

Anwendung des Modells

Neben diesen Parameterstudien wurde das Modell zur Nachahmung einer realen Situation verwendet. Eine Modellanwendung wurde für den nordost-bayerischen Raum durchgeführt, da in dieser Region hohe Schadstoffimmissionen beobachtet werden. Hier liegen die Maximalwerte für Ozon in den Wintermonaten bei 50 ppb und in den Sommermonaten bei 100 ppb. Die lokale Primäremission von Schadstoffen ist in diesem Gebiet relativ gering. Man kann daher davon ausgehen, daß ein großer Teil der Luftverunreinigungen aus den angrenzenden Industriegebieten stammt.

Zeitlicher Verlauf der Ozonvertikalverteilung über der Po-Ebene, gemessen aus der Queen Air.



Für die Anwendung eines Modells auf eine reale Situation werden zahlreiche Eingabedaten benötigt. Neben den Oberflächenparametern (Topographie) müssen meteorologische Daten (großräumiger Druckgradient, vertikales Temperaturprofil, Oberflächentemperatur) und Emissionsdaten vorhanden sein. Für die hier geschilderten Studien waren aber nur Angaben über die Stickoxidemissionen vorhanden, die Emission der Kohlenwasserstoffe wurde aus den Stickoxidemissionen abgeleitet.

Die Verteilung von Schadstoffen wird in erster Linie durch das vorherrschende Windfeld bestimmt. Eine möglichst realistische Simulation der Strömung ist Voraussetzung für eine realitätsnahe Berechnung der Schadstoffverteilung.

Die berechnete Ozonverteilung um 15.00 Uhr ist im Bild auf Seite 64 dargestellt. Dabei handelt es sich um das anthropogen erzeugte Ozon. Hohe Ozonkonzentrationen wurden für die Gebiete berechnet, in denen die lokale Emission gering ist. Ein Vergleich mit Messungen ergab, daß die berechneten Ozonwerte in der Größenordnung der beobachteten liegen.

Mit dem Lidar dem Ozon auf der Spur

Für die aktive Fernerkundung von atmosphärischem Ozon sowohl in der Stratosphäre als auch in der Troposphäre ist das sogenannte Differentialabsorptions-Lidar-(DIAL-)Verfahren im ultravioletten Spektralbereich geeignet. Am DLR-Insti-

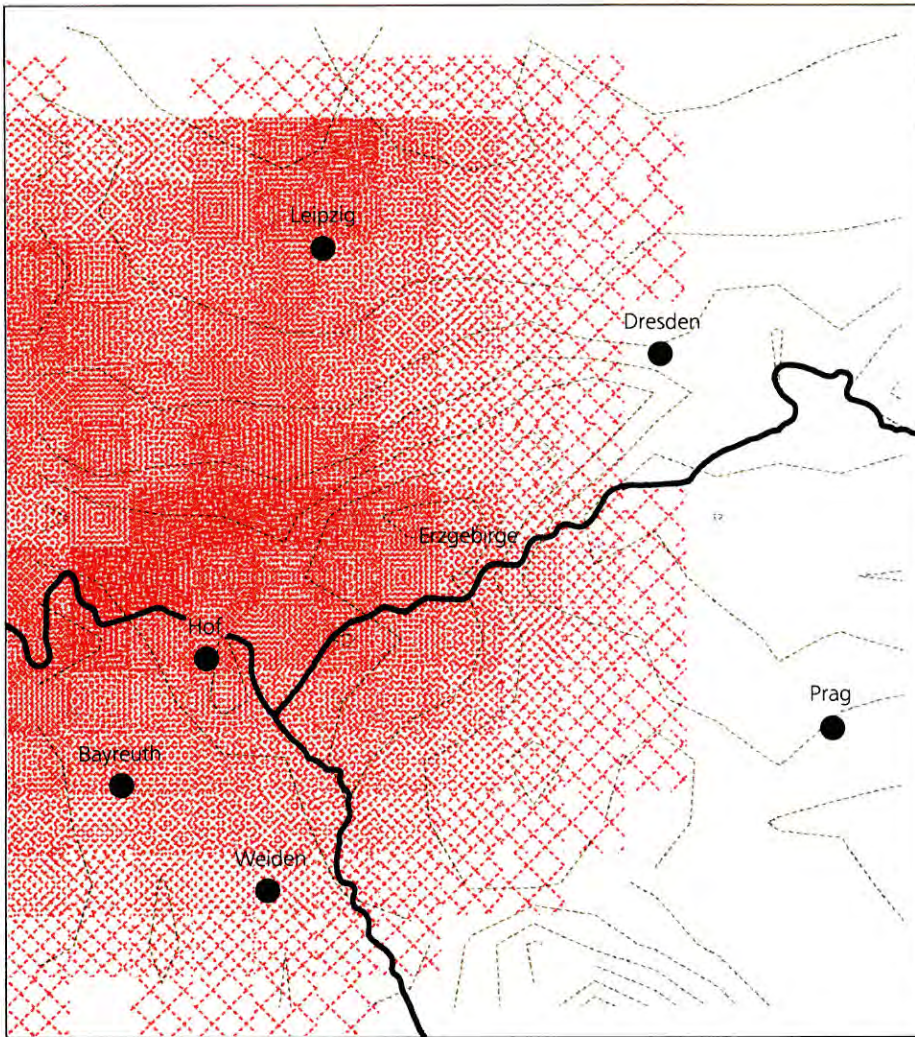
tut für Physik der Atmosphäre wurde erst vor kurzem ein DIAL-Gerät fertiggestellt, mit dem man vom Flugzeug aus Wasserdampffelder messen kann. Das Gerät kann ohne größeren apparativen und damit finanziellen Aufwand zu einem Ozon-DIAL-Gerät erweitert werden.

Ausgangspunkt des Ozon-DIAL-Systems ist ein leistungsstarker ND:YAG-Laser, der bei einer Wellenlänge von 1064 Nanometer im Infraroten emittiert. Diese Strahlung wird verwendet, um gleichzeitig, aber räumlich getrennt die für das DIAL-Verfahren benötigten Wellenlängen Λ_{on} und Λ_{off} im ultravioletten Spektralbereich zu erzeugen.

Λ_{on} und Λ_{off} bedeuten Frequenzverdrehung bzw. Frequenzverdoppelung. Die On-line-Wellenlänge ist durchstimmbare und kann abhängig von der jeweilig zu messenden Ozonkonzentration innerhalb des sehr breiten Absorptionskontinuums von Ozon zwischen 310 nm und 270 nm verändert werden.

Großraum Bayern-
CSSR-DDR.
Horizontalschnitt der
Ozonverteilung in

Bodennähe am
25. Februar 1982
um 15.00 Uhr.



Die mit dem Teleskop empfangenen Rückstreuintensitäten werden für On- und Off-line in zwei getrennten Kanälen gleichzeitig nachgewiesen. Jeder Kanal besteht aus einem Interferenzfilter zur Unterdrückung der Hintergrundstrahlung, Photomultiplier zur Erzeugung eines analogen Photostroms, Verstärker und Analog-Digital-Wandler. Als Speichermedium stehen Wechselwinchesterplatten zur Verfügung. Die Steuerung des Gesamtsystems erfolgt mit einem schnellen Prozessor J 11 der Familie PDP 11/73.

Ein frequenzverdoppelter Festkörperlaser pumpt im grünen Spektralbereich einen Farbstofflaser, der je nach Farbstoff im gewünschten Wellenlängenbereich emittiert. Das austretende Licht wird in einem nicht-linearen Kristall frequenzverdoppelt. Dieses nun kurzwellige Licht wird über Spiegel, koaxial zur Achse eines Cassegrain-Teleskops, in die freie Atmosphäre entsendet. Das rückgestreute Licht wird mit dem Spiegelteleskop wieder aufgefangen und mit entsprechender Elektronik gemessen.

Neben Ozon lassen sich mit dem eben beschriebenen Aufbau auch die Spurengase Stickstoffdioxid und Schwefeldioxid

nachweisen. Für Ozon-Messungen in der Troposphäre ist dies besonders wichtig, da sich die Absorptionsbanden von Stickstoffdioxid und Schwefeldioxid mit dem Absorptionskontinuum von Ozon überlagern und somit die gemessene Ozonkonzentration verfälschen.

Ein typisches Meßergebnis der Fernmessung von Wasserdampf in der Atmosphäre mit Hilfe des an Bord der Falcon installierten DIAL-Systems ist auf der gegenüberliegenden Seite dargestellt. Im oberen Bild sieht man zunächst die mit dem Gerät gemessene Aerosoldichtevertelung zwischen Erdboden und Flugzeug (in relativen Einheiten; rot ist hohe, blau geringe Rückstreuung), aufgetragen über der Flugzeit als Funktion der Höhe. Eine Flugzeit von 3 Minuten entspricht einer Flugstrecke von ca. 20 Kilometer. Die Höhe und Form der planetarischen Grenzschicht (ca. 2500 m) ist deutlich zu erkennen. Die Aerosolpartikel sind unterhalb der Grenzschichtoberkante angereichert. Im unteren Bild ist die unterhalb der Grenzschicht mit dem DIAL gemessene Wasserdampfverteilung zu sehen. Die Bilder demonstrieren, daß man die Struktur der Wasserdampfverteilung in der Atmosphäre mit diesem Verfahren gut erfassen kann. In ähnlicher Weise werden sich Strukturen der Ozonverteilung mit dem DIAL-System gewinnen lassen.

Zukünftige Mitwirkung bei internationalen Projekten

Für die Zukunft ist geplant, die beschriebenen Meßmethoden und Modelle weiterzuentwickeln und für eine Reihe von Fragestellungen im Rahmen nationaler und internationaler Projekte einzusetzen: So gilt es, die lokal oder durch Ferntransport entstehenden Anteile von Ozon in Süddeutschland und in den Alpen im Rahmen von Projekten des Programms EUROTRAC und der Arbeitsgemeinschaft der Alpenländer (ARGE ALP) zu untersuchen. Im Rahmen des BMFT-Ozonforschungsprogramms sollen polare stratosphärische Wolken im Zusammenhang mit der Ozonverteilung vermessen werden. Auch soll eine Vermessung von vertikalen Transporten von Luftbeimengungen durch hochreichende konvektive Wolken (Gewitter) im Rahmen des Bayerischen Klimaprogramms erfolgen.

Beispiel für eine Fernmessung der atmosphärischen Wasserdampfverteilung mittels DIAL.

