

# Das antarktische Ozonloch und die Ursachen seiner Entstehung

Peter Fabian

Die atmosphärische Ozonverteilung weist als Folge des Ineinandergreifens photochemischer und meteorologischer Prozesse starke meridionale und jahreszeitliche Variationen auf. Aus dem Hauptquellgebiet, das sich in etwa 30 bis 35 km Höhe über den Tropen befindet, wird mit der allgemeinen Zirkulation ständig Ozon polwärts und in niedere Höhen verfrachtet. Dieser Transport, der im Spätwinter am stärksten ist, bewirkt auf der Nordhalbkugel, daß die untere Stratosphäre, also der Höhenbereich zwischen 10 und 25 km, mit wachsender Breite zunehmend mit Ozon aufgefüllt ist. Entsprechend nimmt auch die Ozonschichtdicke von etwa 250 Dobson-Einheiten (Dobson Units, DU<sup>\*</sup>) bzw. 2,5 mm (bezogen auf Normalbedingungen) am Äquator auf 400 bis 500 DU (je nach Jahreszeit) über dem Nordpol zu.

Auf der Südhalbkugel nimmt die Ozonschichtdicke nur bis zu einem Maximum von ca. 400 DU bei 55°S zu und von dort zu einem Minimum von ca. 300 DU am Südpol wieder ab. Diese Asymmetrie im Vergleich zur Nordhalbkugel beruht darauf, daß wegen der unterschiedlichen Land-See-Verteilung die Zirkulation beider Hemisphären nicht symmetrisch abläuft (siehe z.B.<sup>1)</sup>).

Das Ozonloch ist eine temporäre Vertiefung des Ozonschicht-Minimums in hohen südlichen Breiten, die sich zur Zeit des südlichen Frühjahrs, während der Monate September/Oktober, ausbildet und die anschließend wieder verschwindet. Wissenschaftler des British Antarctic Survey konnten anhand der langen Meßreihen von Halley Bay (76°S) zeigen, daß die Oktober-Mittel der Ozonschichtdicken über dieser Station von etwa 320 DU während der 60er Jahre auf unter 200 DU im Oktober 1984 abgefallen waren, wobei das Ausmaß dieser Ozonreduktion seit Mitte der 70er Jahre besonders rapide zugenommen hatte (Abb. 1).

Messungen der Vertikalverteilungen zeigen im Oktober ein starkes Ozondefizit im Höhenbereich zwischen 10 und 25 km, welcher auch das Konzentrationsmaximum umfaßt. Abb. 2 zeigt ein normales Winterprofil (28. Aug.) und zum Vergleich ein gestörtes Oktober-Profil (16. Okt.), bei dem ein Großteil des Ozons dieses Höhenbereiches verschwunden ist.

Nach den Messungen der Ozonsensoren an Bord des Satelliten NIMBUS 7, dem Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) und dem Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) Instrument ist das Ozonloch in erster Linie ein Effekt der Südhemisphäre. Ozondefizite werden zwar auch über der Arktis gemessen, doch diese sind bei weitem nicht so dramatisch wie über der Antarktis<sup>4)</sup>.

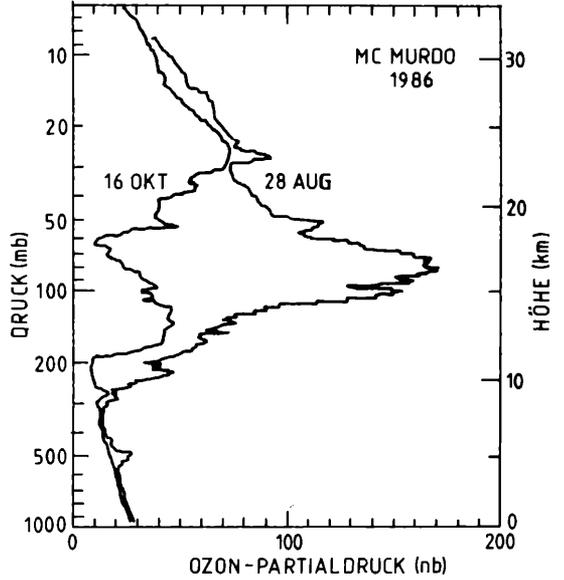
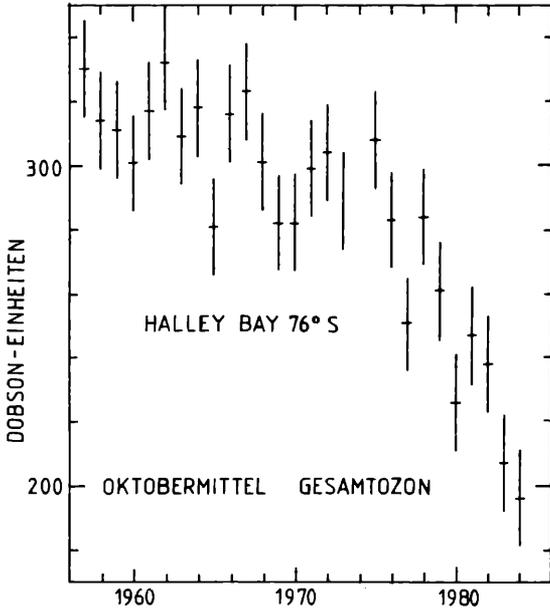
Beide Hemisphären sind bezüglich ihrer Zirkulation nicht symmetrisch. Besonders drastisch unterscheiden sich die winterlichen Zyklonen, die sich als Folge der Abkühlung in der polaren Stratosphä-

re ausbilden: Der Winterwirbel über der Antarktis ist recht symmetrisch und über dem Südpol zentriert. Die stratosphärische Luft zirkuliert daher auf nahezu konzentrischen Kreisen um den Pol und verbleibt für die Dauer der Polarnacht in Dunkelheit. Der arktische Polarwirbel ist dagegen asymmetrisch und besteht häufig aus mehreren Zellen, so daß für die einzelnen Luftmassen ein ständiger Wechsel zwischen Tag- und Nachtbedingungen herrscht. Das Innere des Südpolarwirbels ist abgeschlossen und gewissermaßen von der übrigen Atmosphäre abgetrennt, bis sich schließlich nach Rückkehr der Sonne im Frühjahr die Stratosphäre wieder erwärmt und die winterliche Zyklone in die sommerliche Antizyklone übergeht (Final Warming). Die gleichen Prozesse finden auch über dem Nordpolgebiet statt, jedoch bewirken dort Wellenstörungen bereits während des Winters gelegentliche Zwischenerwärmungen. Die arktische Stratosphäre kühlt daher während der Polarnacht nicht so stark ab wie ihr antarktisches Gegenstück, wo durchweg etwa 10 Grad niedrigere Temperaturen beobachtet werden.

Ein weiteres hervorstechendes Merkmal der Antarktis sind die dichten Wolken und Aerosolschichten, die während des polaren Winters und Frühjahrs in der Stratosphäre beobachtet werden<sup>5) 6)</sup>. Diese polaren stratosphärischen Wolken bilden sich offensichtlich als Folge der extrem tiefen Wintertemperaturen, wobei ungeklärt ist, ob die Wolkenpartikel reines Wasser oder Salpetersäure- und/oder Salzsäuregemische darstellen<sup>7) 8)</sup>. Die Wolken treten in der Region der tiefsten Temperaturen innerhalb der polaren Winterzyklone auf, in der sich auch das Ozonloch ausbildet. Sie verschwinden mit höhersteigender Sonne im Frühjahr, wobei es nach Satellitenbeobachtungen so aussieht, als ob sie unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung von oben nach unten fortschreitend verdampfen<sup>8)</sup>.

Die komplexe Morphologie der Ozonverteilung über der Südhalbkugel wird durch die Satellitendaten erhellt. Abb. 3 zeigt dies anhand der Verteilung der Ozonschichtdicke (unten) und der Temperatur der 50-mb-Fläche (etwa 20 km) für den 3. Oktober 1982. Das bereits erwähnte Maximum der Ozonschichtdicke bei 55°S umschließt nicht den gesamten Polbereich, sondern ist überwiegend zwischen 90° und 180° östlicher Länge konzentriert. Es wandert, wie die Satellitendaten aufeinanderfolgender Tage<sup>9)</sup> zeigen, im Uhrzeigersinn um das polare Tief von etwa 180° bis 270° östlicher Länge, verschwindet dort und taucht erneut bei 90° östlicher Länge auf. Die Minimumregion im Innern des Wirbels nimmt an dieser Rotation teil und deformiert sich dabei. Den gleichen Befund zeigen die Tempe-

\*) Dobson-Einheit, DU =  $1 \times 10^{-3}$  cm Ozonschichtdicke (reduziert auf Normalbedingungen)

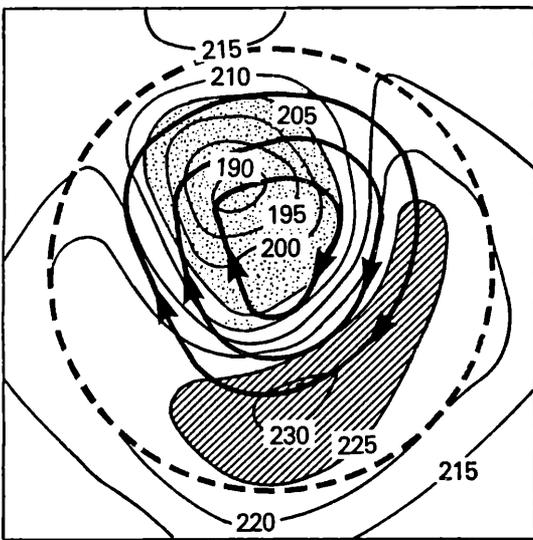


**Abbildung 1:**

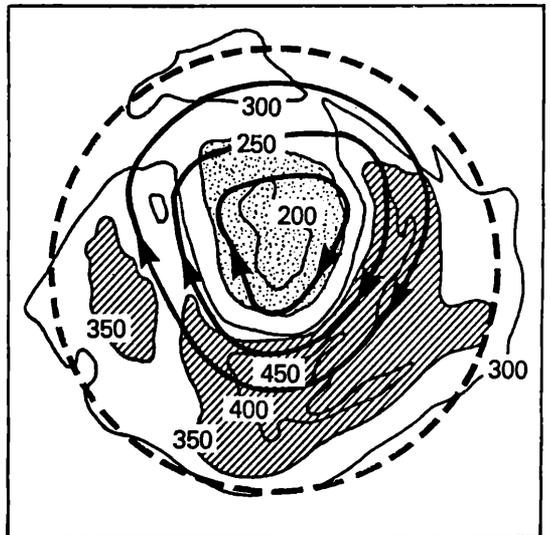
Oktober-Werte der Ozonschichtdicke (Monatsmittel) gemessen in Halley Bay. Nach FARMAN et al.<sup>2)</sup>.

**Abbildung 2:**

Ozonprofile, gemessen am 28. August und 16. Oktober 1986 in McMurdo. Nach HOFMAN et al.<sup>3)</sup>.



(A) TEMPERATUR (50mb)



(B) OZON

**Abbildung 3:**

**Oben:** Konturlinien der Temperatur (in Kelvin) auf der 50-mb-Fläche (Höhe ca. 20 km). **Unten:** Konturlinien der Ozonschichtdicke (in Dobson-Einheiten) für den 3. Oktober 1982. Der Südpol ist in der Mitte, der gestrichelte Breitenkreis entspricht 40°S. Die fett gezeichneten Linien mit Pfeilen markieren die geostrophischen Stromlinien. Nach<sup>9)</sup>.

raturverteilungen der Stratosphäre, die im oberen Teilbild dargestellt sind.

Die enge Korrelation zwischen Ozonschichtdicke und Stratosphärentemperatur ist ein deutlicher Hinweis darauf, daß dynamische Prozesse entscheidenden Einfluß auf die Ozonverteilung haben. Dabei sind zwei Ergebnisse bemerkenswert: Es sieht so aus, als habe sich der Zeitpunkt des „Final Warming“ über dem Südpolgebiet im Laufe der letzten 15 Jahre von Oktober/November auf November/Dezember verzögert, wobei nach wie vor starke Unterschiede von Jahr zu Jahr auftreten<sup>10)</sup><sup>11)</sup>, und als sei die polare Stratosphäre der Antarktis im gleichen Zeitraum kälter geworden<sup>12)</sup><sup>13)</sup><sup>14)</sup>. Es gibt aber weder eine Erklärung dafür, ob und inwieweit verzögertes Final Warming, Temperaturabfall und (damit korreliert) Ozonverminderung kausal in Beziehung stehen, noch kann eine der zitierten Arbeiten eine Deutung anbieten, warum sich die südliche Atmosphäre in den letzten Jahren so verändert hat.

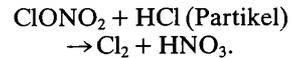
Ansatzpunkte hierzu bietet der Vorschlag von Labitzke, wonach die Trübung der Atmosphäre durch vulkanisches Material von Agung, St. Helens und El Chichón zu der genannten Abkühlung, die übrigens auch über der Arktis beobachtet wurde, und den verzögerten Final Warmings über der Antarktis geführt haben kann<sup>14)</sup>. Labitzke zeigt ferner, daß die Korrelation zwischen Ozonschichtdicke und Stratosphärentemperatur an den Stationen Syowa (60°S), Halley Bay (76°S) und dem Südpol (90°S) nach 1980 deutlich in Richtung tiefer Ozonwerte gestört ist, was darauf hindeutet, daß innerhalb der polaren Zyklone Prozesse, wahrscheinlich komplexe chemische Prozesse ablaufen, welche Ozon zerstören.

Es lag nahe, den als Folge anthropogener Emission stark gestiegenen Halogengehalt der Atmosphäre als Ursache des Ozonloches in Betracht zu ziehen, ging es doch um die Erklärung eines Phänomens, das erst in den letzten 10 bis 15 Jahren akut geworden ist. Bereits Farman, Gardiner und Shanklin<sup>2)</sup> haben dies in ihrer historischen Arbeit versucht, jedoch haben Modellrechnungen klar gezeigt, daß die beobachteten tiefen Ozoneinbrüche über der Antarktis mit der bislang in Stratosphärenmodellen benutzten reinen Gasphasen-Photochemie nicht reproduziert werden können (siehe z.B.<sup>15)</sup>). Andererseits zeigen die gemessenen Ozonprofile, von denen zwei typische als Beispiel in Abb. 2 gezeigt sind, daß innerhalb des antarktischen Polarwirbels mit großer Wahrscheinlichkeit chemische Prozesse ablaufen müssen, die während des Frühjahrs Ozon zwischen 10 und 25 km Höhe regelrecht vernichten. Molina und Rowland<sup>16)</sup> haben bereits 1974 darauf hingewiesen, daß durch UV-Photolyse in der Stratosphäre aus halogenierten Kohlenwasserstoffen wie CCl<sub>3</sub>F oder CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> Chloratome freigesetzt werden, die in katalytischen Zyklen Ozon abbauen. Dieser Ozonabbaumechanismus ist am wirksamsten im Höhenbereich oberhalb 30 km. Das beobachtete Ozonloch manifestiert sich jedoch in weit niedrigeren Höhen, im Bereich zwischen 10 und 25 km. In diesen Höhen liegt das gebildete Chlor aber überwiegend als Chlorwasserstoff (HCl) und Chlornitrat (ClONO<sub>2</sub>) vor, deren Konzentrationen diejenigen der aktiven ClO<sub>x</sub>-Radikale Cl und ClO um das hundertfache und mehr überwiegen. HCl bildet sich bei der Reaktion von Cl und Methan (CH<sub>4</sub>), während ClONO<sub>2</sub> als Folge der Reaktion

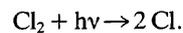
von ClO mit NO<sub>2</sub> einen Großteil des aktiven ClO<sub>x</sub> wegpuffert.

Die Existenz polarer stratosphärischer Wolken über dem Südpolargebiet ermöglicht den Ablauf weiterer chemischer Prozesse, durch welche die Gasphasenchemie entscheidend modifiziert wird. An den Wolkenpartikeln laufen heterogene Prozesse ab, die das Gleichgewicht der Chlor-Komponenten zu höheren Konzentrationen aktiver ClO<sub>x</sub>-Radikale verschieben.

Nach Solomon et al.<sup>17)</sup> könnte in der Polarnacht folgende heterogene Reaktion ablaufen:



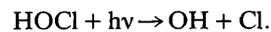
HNO<sub>3</sub> wird an den Wolkenpartikeln gebunden (wie erwähnt gibt es Anhaltspunkte dafür, daß die Wolken aus einer Mischung von HNO<sub>3</sub> und Wasser bestehen), während Cl<sub>2</sub> sich bis zur Wiederkehr der Sonne anreichert, um dann schlagartig zu photolytischen, gemäß



McElroy et al.<sup>18)</sup><sup>19)</sup> schlagen die heterogene Reaktion



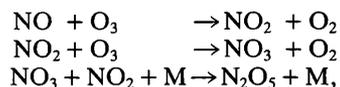
vor. HNO<sub>3</sub> wird an den Wolkenpartikeln gebunden, während HOCl nach Sonnenaufgang photolytisch gemäß



Hierbei ist es notwendig, daß die polaren Wolken auch nach Sonnenaufgang eine Zeit lang weiterbestehen, damit HNO<sub>3</sub> weiterhin gebunden bleibt und nicht mit dem so gebildeten OH reagieren kann. Ferner wird vorgeschlagen, daß Stickoxide bereits weitgehend aus dem System entfernt werden, damit sich ClONO<sub>2</sub> gar nicht erst bilden kann. Dazu muß die heterogene Reaktion



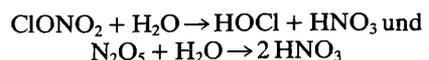
zusätzlich ablaufen. Da N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> laufend aus Stickoxiden gebildet wird, gemäß



wird über diese Reaktionskette somit ein Großteil der Stickoxide als HNO<sub>3</sub> an den Wolkenpartikeln gebunden.

Alle diese heterogenen Reaktionen erfordern Reaktionsraten, die verglichen mit den entsprechenden Gasphasenreaktionen erheblich größer sind. Den zitierten Arbeiten sind hierzu keine genauen Werte zu entnehmen, die Erhöhungen der Raten dürften im Bereich um einen Faktor 10<sup>4</sup> bis 10<sup>5</sup> liegen. Bislang gibt es keine experimentellen Labormessdaten, welche diese Reaktionsraten für heterogene Reaktionen bestätigen.

Crutzen und Arnold<sup>20)</sup> eliminieren einen Teil dieser Schwierigkeiten, indem sie statt der unsicheren heterogenen Reaktionen Ionenprozesse einführen, deren Kinetik besser bekannt ist. Aufgrund der nunmehr durch Ionenreaktionen beschleunigten Prozesse



wird wie bei den vorigen Arbeiten ClO<sub>x</sub> aus dem

Reservoir  $\text{ClONO}_2$  freigesetzt bzw. die Bildung von  $\text{ClONO}_2$  durch das Entfernen der  $\text{NO}_x$ -Radikale aus der Gasphase verhindert. Zusätzlich wird Cl aus dem Reservoir HCl durch vermehrte OH, das bei der Methanoxidation und durch kosmische Strahlung gebildet wird, in den Ozonabbauzyklus zurückgeführt.

Krüger, Wang und Fabian<sup>21)</sup> schlagen einen anderen Mechanismus vor, bei dem verstärkt aktive  $\text{ClO}_x$ -Radikale freigesetzt werden, nämlich die heterogene Photolyse halogener Kohlenwasserstoffe. Diese Hypothese basiert auf Beobachtungen im Labor, wonach die Photolyse halogener Kohlenwasserstoffe an Oberflächen schneller und bei längeren Wellenlängen abläuft als in der reinen Gasphase<sup>22)-24)</sup>. Oberflächen für einen derartigen Effekt sind in Form der polaren stratosphärischen Wolken vorhanden.

Die Entdeckung des Ozonloches war völlig unerwartet, und der damalige Wissensstand ermöglichte keine Deutung des Phänomens. Heute, 3 Jahre später, lassen die Ergebnisse international koordinierter fieberhafter Forschungstätigkeit den Schluß zu, daß das Phänomen Ozonloch in erster Linie ein chemischer Effekt ist, der primär auf der Freisetzung von Chlor als Folge des gestiegenen Pegels halogener Kohlenwasserstoffe zurückzuführen ist. Die Art und Weise, wie das aktive Chlor freigesetzt wird, ist bei den Hypothesen unterschiedlich. Gemeinsam ist allen Arbeiten, daß eine Erhöhung des Pegels der aktiven  $\text{ClO}_x$ -Radikale um einen Faktor 10 bis 100 je nach Höhe erforderlich ist, um den beobachteten Ozonabbau zu erzielen. Messungen von OClO während der US-Südpolexpedition 1986 haben gezeigt, daß diese Erhöhung, die sich mit der normalen Gasphasenchemie nicht erklären läßt, tatsächlich beobachtet wird<sup>25)</sup>. Diese Messungen wurden während der letzten US-Antarktisexpedition 1987 durch Flugzeugmessungen voll bestätigt<sup>26)</sup>. Auch die vorläufigen, bislang nicht veröffentlichten Meßdaten über andere Chlorverbindungen wie HCl und ClO sind in Einklang mit den chemischen Theorien.

Die vorliegenden Messungen machen deutlich, daß die Dynamik eine der wesentlichen Grundvoraussetzungen für die Ausbildung des Phänomens ist. Sie zeigen, daß das größte Ozondefizit im Innern der winterlichen polaren Zyklone auftritt, die sich in der antarktischen Stratosphäre kräftiger und symmetrischer als über der Arktis ausbildet. Beobachtete Ozonvariationen korrelieren mit Temperaturvariationen und sind direkt von der Konfiguration der Zyklone und deren Entwicklung bestimmt. Von verschiedenen Autoren vorgeschlagene Aufwärtstransporte<sup>27), 28)</sup> troposphärischer Luft können aber als Ursache für das stratosphärische Ozondefizit ausgeschlossen werden. Messungen anderer Spurengase, insbesondere von  $\text{N}_2\text{O}$  haben gezeigt, daß derartige Aufwärtstransporte nicht signifikant sind. Die drastische Ozonabnahme zwischen 10 und 25 km Höhe im Innern der Zyklone ist vielmehr ein deutliches Indiz dafür, daß dort chemische Prozesse ablaufen, die Ozon abbauen.

Unklar ist, warum sich während der letzten 10 bis 15 Jahre die antarktische Stratosphäre abgekühlt hat und warum sich die Final Warmings verzögert haben. Die von Labitzke vorgeschlagene Vulkanhypothese bietet hier den Ansatz einer Erklärung. Man muß aber angesichts der atmosphärischen

Aufenthaltszeiten von vulkanischem Material von nicht wesentlich mehr als zwei Jahren fragen, wie es kommt, daß der letzte größere Vulkanausbruch (El Chichón, März 1982) immer noch wirksam sein soll. Trotz aller Unklarheiten im Detail sieht es so aus, als sei die Entstehung des Ozonloches grundsätzlich verstanden. Demnach ist das Ozonloch primär ein vom Menschen als Folge der Emission halogener Kohlenwasserstoffe verursachter Effekt, wobei die Meteorologie die ganz speziellen Bedingungen schafft, die zum Ablauf der Prozesse erforderlich sind<sup>29)</sup>.

Dennoch verbleiben wichtige offene Fragen, die zu beantworten erst möglich sein wird, wenn der photochemische Mechanismus auch im Detail bekannt ist.

Das Ozonloch ist 1987 gegenüber den bisher tiefsten Werten von 1985 wieder um etwa 15 % tiefer geworden<sup>26)</sup>, nachdem 1986 in Einklang mit der bekannten etwa zweijährigen Oszillation der Atmosphäre, eine geringfügige Erholung eingetreten war. Seine geographische Ausdehnung umfaßt heute den gesamten Kontinent Antarktis, eine Fläche also, die etwa derjenigen der USA entspricht. Das tiefste Loch wird in wenigen Jahren erreicht sein, wenn praktisch alles Ozon zwischen 10 und 25 km Höhe innerhalb der Vortex zeitweise verschwunden sein wird. Ob sich dann das Ozondefizit sowohl höhenmäßig als auch geographisch weiter ausdehnen wird oder ob es in anderen Regionen zu ähnlichen saisonalen Ozondefiziten kommen wird, kann erst beurteilt werden, wenn die chemischen und dynamischen Prozesse im Detail besser verstanden sind. Schließlich sei auf den interessanten Tatbestand hingewiesen, daß das Ozonloch über dem südlichen Polargebiet auftritt, während über 90 Prozent der halogenierten Kohlenwasserstoffe, die nach den vorliegenden Indizien für das polare Ozondefizit verantwortlich sind, in den Industrieländern der Nordhalbkugel freigesetzt werden.

## Literatur

- 1) FABIAN P. (1987): Atmosphäre und Umwelt. 2. Aufl., Springer-Verlag.
- 2) FARMAN, J.C., B.G. GARDINER, J.D. SHANKLIN (1985): Nature 315, 207.
- 3) HOFMANN, D., J.W. HARDER, S.R. ROLF, J.M. ROSEN (1987): Nature 326, 59.
- 4) BOWMAN, K. (1986): Geophys. Res. Lett. 13, 1193.
- 5) McCORMICK, M.P., C.R. TREPTE (1986): Geophys. Res. Lett. 13, 1276.
- 6) McCORMICK, M.P., J.C. LARSEN (1986): ibid. 13, 1280.
- 7) TOON, O.B., P. HAMILL, R.P. TURCO, J. PINTO (1986): ibid. 13, 1284.
- 8) HAMILL P., O.B. TOON, R.P. TURCO (1986): ibid. 13, 1288.
- 9) STOLARSKI, R.S., A.J. KRUEGER, M.R. SCHOEBERL, R.D. McPETHERS, P.A. NEWMAN, J.C. ALPERT (1986): Nature 322, 808.
- 10) CHUBACHI, S. (1986): Geophys. Res. Lett., 13, 1221.

- 11)** NEWMAN, P. (1986):  
ibid. 13, 1228.
- 12)** NEWMAN, P.A., M.R. SCHOEBERL (1986):  
ibid. 13, 1206.
- 13)** SCHOEBERL, M.R., A.J. KRUEGER, P.A. NEWMAN (1986):  
ibid. 13, 1217.
- 14)** LABITZKE, K. (1987):  
Annales Geophysicae 5A, 95.
- 15)** CARIOLLE, D., M. DEQUE, J.-J. MORCRETTE (1986):  
Geophys. Res. Lett., 13, 1304.
- 16)** MOLINA, J.M., F.S. ROWLAND (1974):  
Nature 249, 810.
- 17)** SOLOMON, S., R.R. GARCIA, F.S. ROWLAND, D.J. WUEBBLES (1987):  
Nature 321, 755.
- 18)** McELROY, M.B., R.J. SALAWITCH, S.C. WOFKY, J.A. LOGAN (1986):  
Nature 321, 759.
- 19)** McELROY, M.B., R.J. SALAWITCH, S.C. WOFKY (1986):  
Geophys. Res. Lett. 13, 1296.
- 20)** CRUTZEN, P.J., F. ARNOLD (1986):  
Nature 324, 651.
- 21)** KRÜGER, B.C., G. WANG, P. FABIAN (1987):  
Geophys. Res. Lett. 14, 523.
- 22)** AUSLOOS, P., R.E. REBBERT, L. GLASGOW (1977):  
J. Res. Nat. Bur. Stand. 82, 1.
- 23)** PARLAR, H. (1984):  
Fresenius Z. Anal. Chem. 319, 114.
- 24)** MOZA, P.N., H. PARLAR (1987):  
Naturwiss. 74, 137.
- 25)** SOLOMON, S., G.H. MOUNT, R.W. SANDERS, A.K. SCHMELTEKOPF (1987):  
J. Geophys. Res. 92, 8329.
- 26)** LINDLEY, D. (1987):  
Nature 239, 473.
- 27)** TUNG, K.K. (1986):  
Geophys. Res. Lett., 13, 1308.
- 28)** EVANS, W.F.J., B.W. BOVILLE, J.C. McCONNELL, G.S. HENDERSON (1986):  
ibid. 13, 1323.
- 29)** FABIAN, P. (1988):  
Physikal. Blätter 44, 2.

**Anschrift des Verfassers:**

Prof. Dr. Peter Fabian  
Lehrstuhl für Bioklimatologie und  
Angewandte Meteorologie  
der Universität München  
Amalienstraße 52/III  
8000 München 40

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1988

Band/Volume: [3\\_1988](#)

Autor(en)/Author(s): Fabian Peter

Artikel/Article: [Das antarktische Ozonloch und die Ursachen seiner Entstehung 8-12](#)