



Die Ozonabnahme unter besonderer Berücksichtigung des „antarktischen Ozonlochs“

Erich Lacker

Zitieren dieses Artikels:

Lacker, E. (1995). Die Ozonabnahme unter besonderer Berücksichtigung des „antarktischen Ozonlochs“. *Geographie und ihre Didaktik*, 23(4), S. 191-211. doi 10.60511/zgd.v23i4.340

Quote this article:

Lacker, E. (1995). Die Ozonabnahme unter besonderer Berücksichtigung des „antarktischen Ozonlochs“. *Geographie und ihre Didaktik*, 23(4), pp. 191-211. doi 10.60511/zgd.v23i4.340

Die Ozonabnahme unter besonderer Berücksichtigung des "antarktischen Ozonloches"

von ERICH LACKER (Karlsruhe)

Die Frage nach der Bedeutung des atmosphärischen Ozons ist zur Zeit nicht einhellig zu beantworten. Die Diskussion über räumliches Auftreten (Südpol, Nordpol), jahreszeitliches Vorkommen (Winter oder auch Übergangsjahreszeiten), über Veränderungstrends, Ursachen sowie Auswirkungen auf Mensch und Natur werden kontrovers geführt. Gerade für die gymnasiale Oberstufe, in der eine kritische Auseinandersetzung mit Naturphänomenen, ihren Ursachen, ihren Wechselbeziehungen untereinander und ihren Veränderungen bei Einwirkung menschlicher Tätigkeit erwartet wird, ist eine sachliche Darlegung der Problematik sinnvoll.

Am 19. Februar 1992 konnte Vf. an einer Fachsitzung im Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes über "Neues aus der Ozonforschung" teilnehmen. Dabei stellte BRÜHL vom Max-Planck-Institut für Chemie die bisher bekannte Chronologie sowie Ergebnisse aus durchgeführten Modellrechnungen vor.

Die folgenden Ausführungen basieren auf diesen Ergebnissen und sind um weitergehende Erkenntnisse und Schlußfolgerungen fachinhaltlicher wie didaktischer Art ergänzt.

1. Das Phänomen des atmosphärischen Ozondichterückgangs und seine Entdeckungsgeschichte

"Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, daß am Ozonrückgang keine anthropogenen Einflüsse beteiligt sind". Mit diesem Satz schließt eine bei der Redaktion der Meteorologischen Rundschau schon am 24.2.1984 eingereichte und bis heute kaum zitierte Arbeit der Autoren ATTMANNSPACHER, HARTMANNSGRUBER und LANG (1984) vom DWD-Observatorium Hohenpeißenberg. In ihr werden die seit 1967 in Troposphäre und Stratosphäre durchgeführten Ozonmessungen analysiert. Die seit 1977 oberhalb 28 km Höhe nachgewiesene stetige Abnahme und das absolute Ozonminimum im 21 km-

Niveau des Jahres 1983 ließen sich durch eine 26 monatige stratosphärische Ozonperiode nicht mehr erklären. Auch der heiße Sommer 1983 versagte als Argument, denn das Minimum trat im Spätwinter auf. Die zukünftige wissenschaftliche Entwicklung erahnend, ließ die Forscher Vermutungen in die danach als richtig bestätigte Richtung anstellen. Demnach wurde (nach BRÜHL 1990) der atmosphärische Ozonrückgang nicht in der Antarktis, sondern auf dem Hohenpeißenberg festgestellt.

Auf dem Ozonsymposium in Chalkidiki/Griechenland zeigte der Japaner CHUBACHI im September 1984 ein wenig beachtetes Poster. Es veranschaulichte den Abfall der Ozonschichtdicke über der Antarktisstation Syowa (69°S) in den Monaten September bis Oktober 1982 von 300 auf 200 Dobson-Einheiten (DU) und geriet ebenfalls wieder in Vergessenheit (vgl. Definition von DU im Glossar am Schluß des Beitrages). Daher gelten FARMAN & al. (1985) als Entdecker des antarktischen Ozonloches. Sie konnten anhand der langen Meßreihe von Halley-Bay (76°S) zeigen, daß die Oktobermittel der Ozonschicht ab 1960 von 320 DU bis 200 DU im Jahre 1984 abfielen. Meßdaten des Satelliten NIMBUS 7, die diese geringen Werte registriert hatten, waren zunächst als Fehlmessungen gedeutet worden (STOLARSKI & al. 1986). Bei der Ursachenforschung verwies LABITZKE (1980) auf die Bedeutung der Vulkanausbrüche von Mt.St.Helen und El Cichon, und FARMAN bezog weiterhin anthropogene Einflüsse in seine Überlegungen mit ein.

Heute wird den chlorierten Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffverbindungen (FCKW) die Hauptbedeutung für die Ozondichteabschwächung zugesprochen, auf die bereits MOLINA und ROWLAND (1974) hingewiesen hatten.

2. Der Weg der FCKW's in die Stratosphäre

Wegen ihres chemisch inaktiven Verhaltens schienen die FCKW's als Treibgas in Sprühdosen und zum Aufschäumen ebenso geeignet zu sein wie als Kühlmittel in Kühlschränken und anderen Kühlaggregaten. Nachteilige Folgen für die Umwelt wurden solange nicht befürchtet, bis die Reaktionen mit Ozon in der Stratosphäre offenbar wurden, also bis 1985.

Die Gase steigen aufgrund ihrer geringen Dichte in die Peplosphäre auf und werden teilweise mit dem Niederschlag wieder ausgewaschen. Reaktionen mit dem Erdboden sind aus dem Schrifttum nicht bekannt.

Der nicht ausgewaschene Teil wird von der planetarischen Zirkulation eingefangen und horizontal zur ITC verfrachtet. Dort lassen sich drei Hauptpfade verfolgen: Der erste Teil wird von tropischen Gewittern ausgewaschen, ein anderer Teil in die Passatzirkulation einbezogen, und der dritte, entscheidende Anteil diffundiert in die Stratosphäre. Dort drifft dieses Gas zu den stratosphärischen Kältepolen der jeweiligen Winterhalbkugel und reichert sich bei Temperaturen um -80° an.

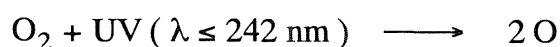
3. Die bekannten Reaktionsabläufe

Die bis vor wenigen Jahrzehnten für einfach strukturiert gehaltene und folglich rücksichtslos als 'Kloake' benutzte Atmosphäre erweist sich mit den zunehmenden Erkenntnissen aus der Ozonforschung als komplexes, nicht lineares Zusammenhängen gehorchendes Gebilde. Die nachfolgend angegebenen Reaktionen beziehen sich auf die Quellen von BRÜHL (1960), FISHER (1990) und FABIAN (1988).

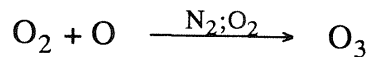
3.1 Reaktionen in der Stratosphäre

Unter dem Einfluß der UV-Strahlung werden atmosphärische Moleküle in reaktionsfreudige Radikale gespalten. Diesen Vorgang nennt man Photolyse. Im Wellenlängenbereich von 200 – 300 nm filtert das Ozon die gesamte Strahlung in der Stratosphäre heraus und bedingt dadurch die Erwärmung zwischen 10 und 50 km Höhe (MÖLLER 1984, S. 30). Genau gegen diese Wellenlänge ist aber die Erbsubstanz in den Zellkernen von Lebewesen äußerst störungsanfällig (BRÜHL 1990, S. 7). Nachfolgend werden Einzelschritte aufgeführt:

Im ersten Schritt wird durch Photolyse atomarer Sauerstoff erzeugt nach der Gleichung

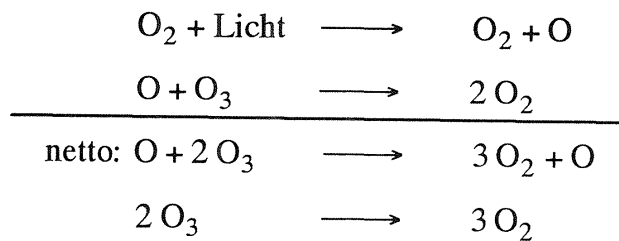


und im zweiten Schritt katalytisch zu O₃ (= Ozon) umgesetzt:



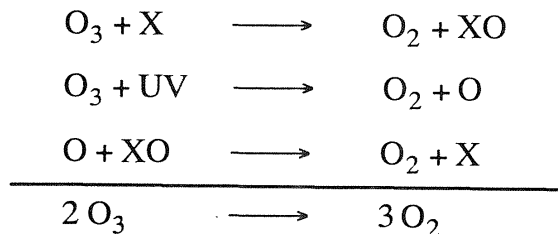
Als Katalysator dient Luftstickstoff wie das oben aufgeführte N₂.

Der Abbau des Ozons erfolgt dann unter Einwirkung des Sonnenlichtes nach der Gleichung:

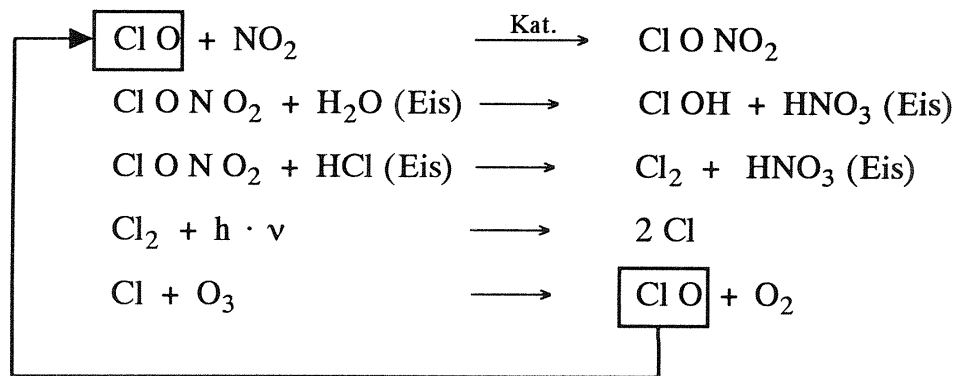


Somit hat sich unter dem Einfluß der Sonnenfleckenzyklen eine gering schwankende Insolation und daraus eine im labilen Gleichgewicht befindliche atmosphärische Zusammensetzung von O₂, O₃ und O gebildet. Dieses Gleichgewicht wird nun anthropogen durch das Einbringen katalytischer Moleküle gestört. Genannt seien neben dem schon erwähnten N₂ vor allem NO, Cl, H und OH.

Ein Katalysatormolekül (hier vereinfachend X genannt) zerstört ein Ozonmolekül, wird umgewandelt in eine XO-Verbindung und aus dieser wieder durch Oxidation mit radikalem O freigesetzt. Wegen des Gleichgewichts von O und O₃ bedeutet die Oxidation eines freien Sauerstoffatoms (Radikal) die Vernichtung eines weiteren Ozonmoleküls, und X steht erneut zu einer vielfach wiederholbaren Reaktionskette zur Verfügung:



Beispielhaft sei die Reaktion der aus FCKW stammenden Chlorverbindung mit dem im polaren Winter bei Stratosphärentemperaturen unter -80°C ausfrierendem Stickoxid angegeben (SCHNEIDER 1989):

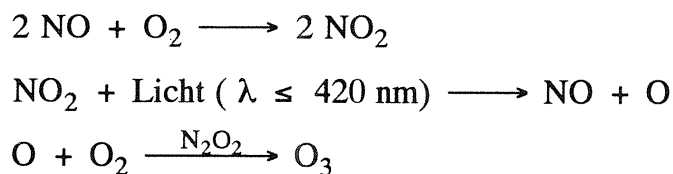


Das heißt: für polare Bedingungen steht das gesamte in der Atmosphäre vorhandene Chlor zur Ozonvernichtung zur Verfügung.

Die Lebensdauer der verschiedenen Chlorverbindungen beträgt nach FISHER & al. zwischen 6 und 690 Jahren (BRÜHL 1990, S. 10).

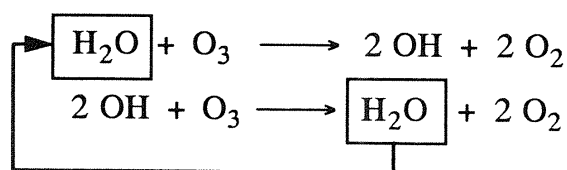
3.2 Reaktionen in der Troposphäre

In der Troposphäre ist die Ozonproduktion durch Hydrolyse wegen der bereits weitgehend absorbierten UV-Strahlung vernachlässigbar. Es gibt aber, wie die heißen Sommer 1989 bis 1991 gezeigt haben, einen anderen Bildungsmechanismus. Zunächst wird dabei das durch Verbrennung entstandene und durch Inversionswetterlagen angereicherte NO zu NO₂ oxidiert und durch Photolyse wieder reduziert:



Zur Vorwarnung für einen neuerlichen Ozonanstieg im Sommer 1992 wurde bereits ein Informationsdienst durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg eingerichtet (BADISCHE NEUESTE NACHRICHTEN, Karlsruhe, vom 13.4.1992).

Die Zerstörung des Ozons erfolgt nach folgenden Reaktionsgleichungen:



Das heißt, die troposphärische Ozonzerstörung erfolgt überwiegend in Reinluftgebieten. Ein zeitweilig gemessener Ozonüberschuß ist advektiv, z.B. aus der Stratosphäre stammend.

4. Beobachtungen und Messungen

Für das winterliche Ozonloch auf der Nordhalbkugel 1991/92 liegen dem Vf. nur mündliche Mitteilungen von BRÜHL vor. Danach ist das den Winter bestimmende mitteleuropäische Hoch mit dem stratosphärischen Kältepol der Nordhalbkugel gekoppelt. Dieser Kältepol pendelt jeweils zwischen Nordamerika und Sibirien und sorgte in den Medien der USA für entsprechende Aufregung. Nach Presseberichten ist dieses über dicht besiedelten Gebieten entstandene 'Ozonloch' mit zunehmend höherem Sonnenstand jeweils schnell wieder verschwunden (BADISCHE NEUESTE NACHRICHTEN, vom 8.4.1992).

Aus dem umfassenden Schrifttum über die antarktischen Verhältnisse seien nachfolgend einige Beispiele von grundsätzlicher Bedeutung aufgeführt. Zu verweisen ist in diesem Zusammenhang auf die Arbeiten von FABIAN (1988) WINKLER(1986), CRUTZEN (1988), EHEHALT (1987) und SCHNEIDER (1989).

Abbildung 1 zeigt das inzwischen bekannte Bild des auf den Südpol zentrierten und bis auf Höhen um 4000 m ansteigenden antarktischen Kontinents. Die aus der Topographie resultierende Folge zeigt sich in deutlich ablandigen Winden, verbunden mit einem starken Absinken der Tropopause und einer stabilen winterlichen Kältefalle mit Temperaturen um -90°C , in der sich auch die FCKW's anreichern.

Im Gegensatz dazu sind auf der Nordhemisphäre Land und Meer intensiv verzahnt; die winterlichen, synoptischen Wellenstörungen dringen, bei gründlicher Durchmischung der Atmosphäre, weit in die Arktis vor. Die arktische Polarzklone liegt somit, wie im Winter 1991/92, exzentrisch zum geographischen Pol. Auch die Temperaturen erreichen meist nicht die tiefen Werte der Antarktis (vgl. Abb. 2, LABITZKE 1980). Aus Abbildung 3 ist zudem eine kontinuierliche Abnahme des Ozongehaltes über Halley-Bay seit Ende der 50er Jahre er-

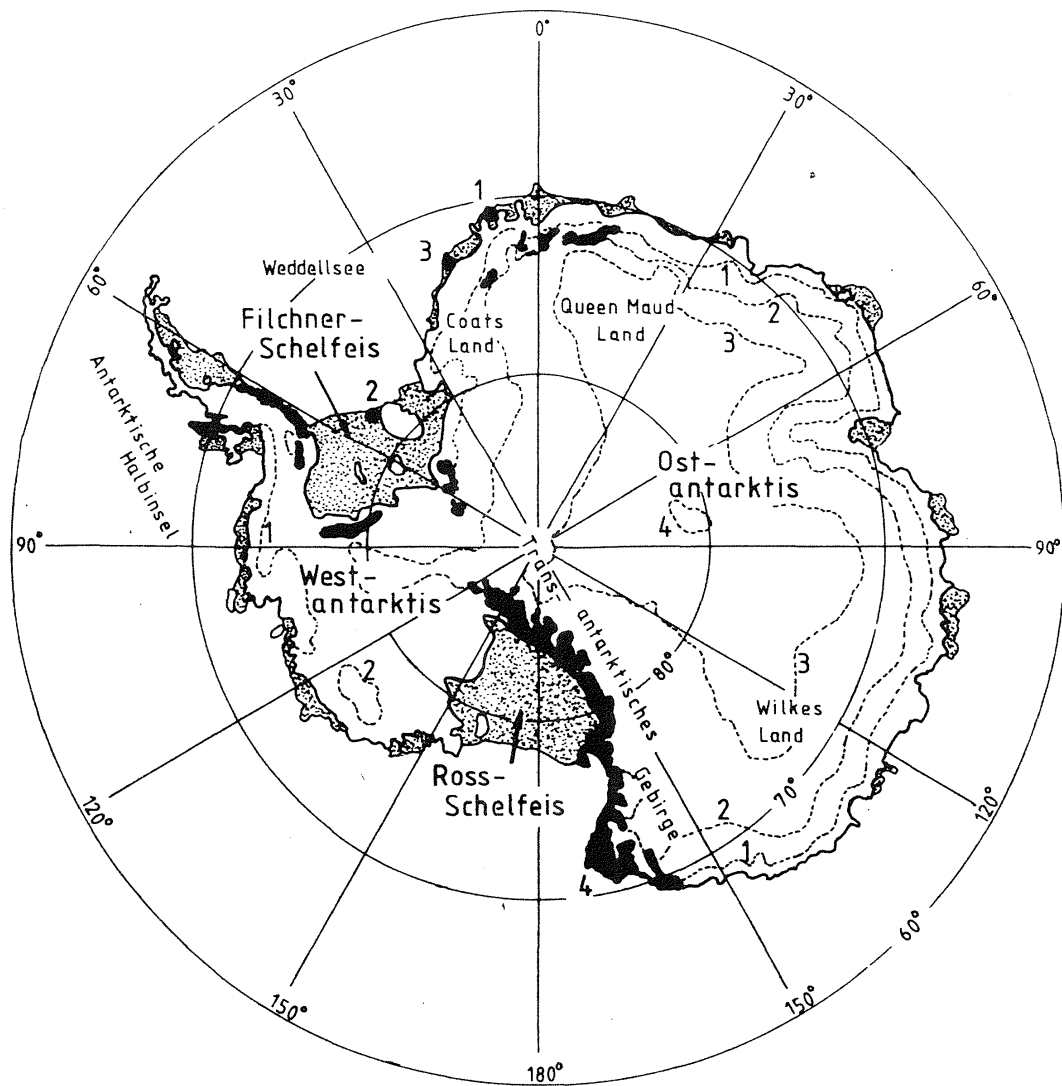


Abb. 1: Die Antarktis in der Übersicht. Die punktierten Flächen zeigen die Verbreitung des Schelfeises (nach BRÜHL & al. 1990)

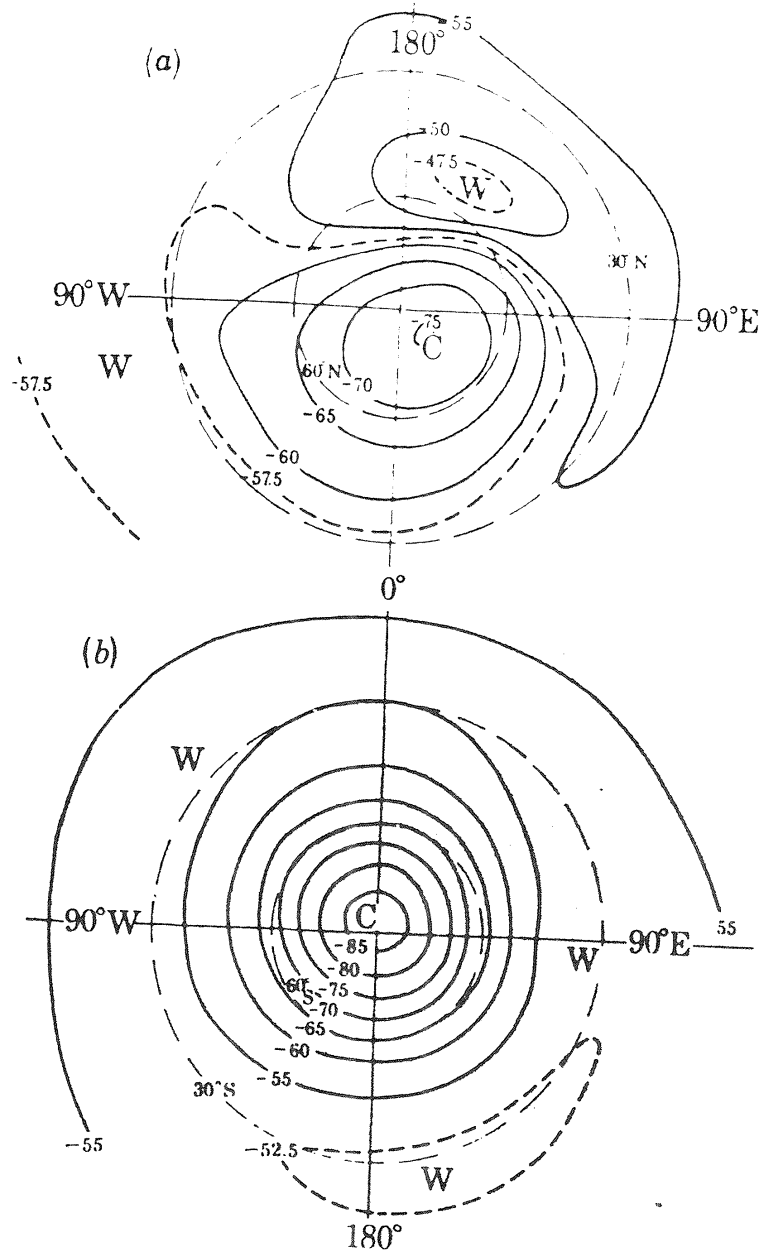


Abb. 2: Vergleich der winterlichen Polarzyklonen, die sich in der arktischen (oben) und antarktischen (unten) Stratosphäre ausbilden (nach LABITZKE und FABIAN)

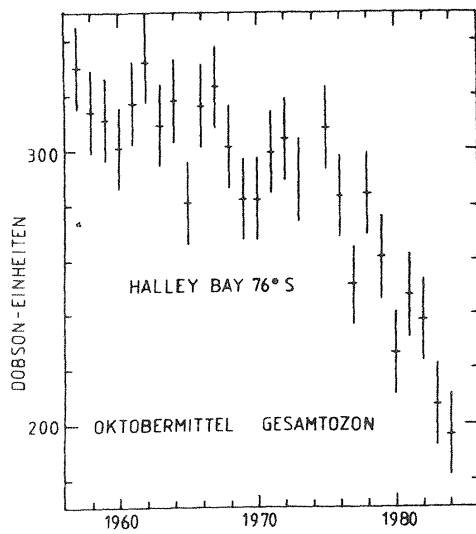


Abb. 3: Oktoberwerte der Ozonschichtdicke (Monatsmittel), gemessen in Halley-Bay

(nach FARMAN und FABIAN)

Abb. 4: Ozonprofile, gemessen am 16.10.1986 in McMurdo

(nach HOFMANN und FABIAN)

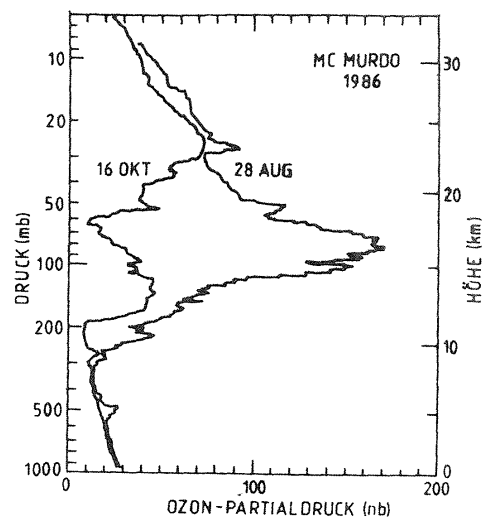
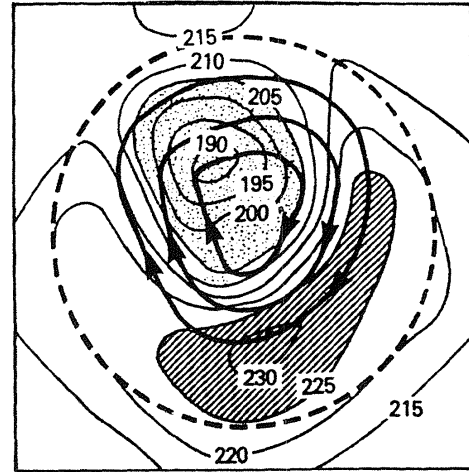


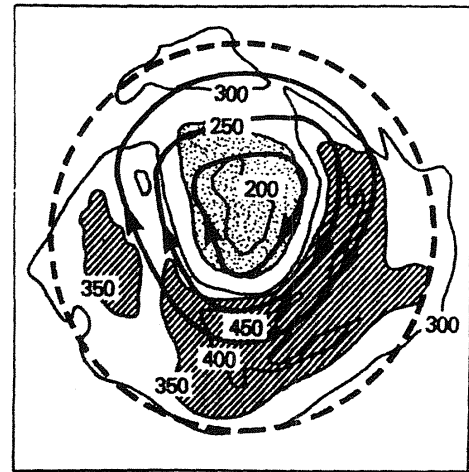
Abb. 5: oben: Isothermen auf der 50 hPa-Fläche (Höhe etwa 20 km)

unten: Ozonschichtdicke (in Dobson-Einheiten) am 3.10.1982. Der Südpol liegt in Bildmitte; der gestrichelte Breitenkreis ist 40°S. Fett gezeichnet sind die Linien des geostrophischen Windes.

(nach STOLARSKI und FABIAN)



(A) TEMPERATUR (50mb)



(B) OZON

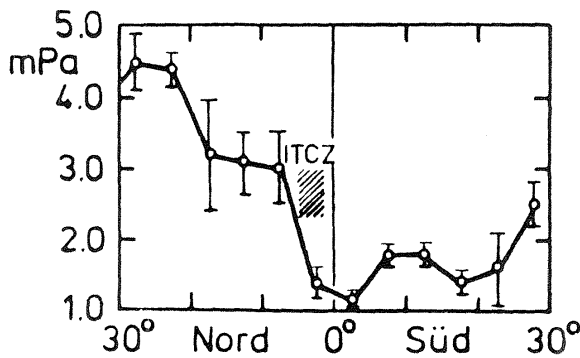
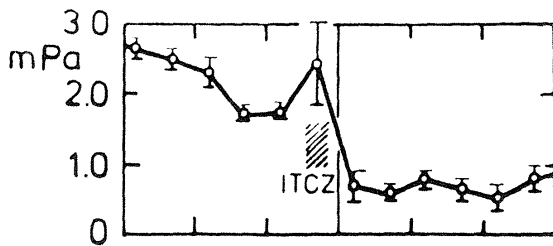


Abb. 6: Zwei typische Ozonprofile beim Übergang von der Nord- zur Südhemisphäre. Häufig wird in der ITC ein Ozonmaximum beobachtet (oben). Manchmal findet man in der ITC nur einen Übergang von hohen nord- zu niederen südhemisphärischen Werten (unten).

(nach WINKLER und STALLARD)

sichtlich (FARMAN 1985). Das bedeutet für die Antarktis eine grundsätzliche Neigung der Winde und Luftschichtungen zum Aufbau eines quasi ortsfesten, immer wiederkehrenden Kältepols mit relativ hoher zeitlicher Konstanz.

In Abbildung 4 ist beispielsweise für den 28.8.1986 das noch ungestörte spätwinterliche Ozonprofil mit einem Maximum in 16 km Höhe deutlich ausgeprägt. Nach Aufgang der Polarsonne wurde bis zum 16. 10. das Ozon über Mc Murdo zwischen 10 und 22 km Höhe fast völlig zerstört (HOFMANN 1987). Abbildung 5 gibt hierzu die Korrelation zwischen Temperaturfeld (k) in etwa 20 km Höhe (50 hPa) und der Ozonmächtigkeit in Dobson-Einheiten mit guter Deckungsgleichheit wieder. Die dick eingezeichneten Linien markieren die geostrophischen Winde (STOLARSKI 1986).

Widersprüchlich muten die beiden Darstellungen der meridionalen, oberflächennahen, maritimen Ozonkonzentrationen an (Abb. 6). So findet sich in Abbildung 6a im Bereich der ITC, statt des in gealterter troposphärischer Luft erwartbaren Ozonminimums, nach der Theorie von der HADLEY-Zirkulation sogar ein Ozonmaximum. Abbildung 6b zeigt dagegen einen minimalen Übergangswert von den hohen nordhemisphärischen zu den geringeren südhemisphärischen Werten. Eine Erklärung dieser Sachverhalte bietet nach STALLARD & al. das genaue Studium der Zirkulationsverhältnisse in der ITC (STALLARD 1975).

Die Zone der ITC ist nämlich nicht durch einen weltumspannenden aufsteigenden Luftschlauch gekennzeichnet, sondern durch ein Nebeneinander von Aufstiegs- und Abstiegsbewegungen. Quellen Cumulonimbus-Wolken bis in die Stratosphäre auf, so zapfen sie die dortige Ozonproduktion an und saugen sie im absteigenden Luftstrom daneben bis zur Erdoberfläche herab. Sind die Cumulonimbus-Wolken nur schwach ausgeprägt und quellen sie nicht so weit nach oben, so unterbleibt dieser deszendente Ozontransport, und es kommt zur Ausbildung des – erwarteten – schwachen Ozonminimums.

5. Die Auswirkung des Ozondefizits auf die Biosphäre

Auf die zellkernschädigende Auswirkung der UV-Strahlung wurde bereits eingangs verwiesen (BRÜHL 1990; MOLINA 1974). SCHNEIDER (1989) unter-

suchte die Ozonkonzentration in industriiefernen Gebieten von Rheinland-Pfalz. Sie fand eine ganzjährige überdurchschnittliche Ozonbelastung. Da die Vegetation lediglich auf natürliche Schwankungen der Ozonbelastung angepaßt ist, sieht die Autorin in Übereinstimmung mit Untersuchungen des KFA Jülich (1987) und von ARNOLD & al. (1982) in der hohen Ozonbelastung eine Mitverursachung von aufgetretenen Waldschäden.

Nach Ansicht amerikanischer Autoren führen schon geringe Abnahmen des antarktischen Ozons zu Schädigungen des Planktons in den subpolaren Meeren (in: FRANKFURTER ALLGEMEINE, vom 24.5.1989). Die Folgen für die globalen Nahrungsketten sind heute allenfalls abzuschätzen. Auf jeden Fall wird es dort zu einem dramatischen Umbruch der biotischen Verhältnisse kommen.

6. Mögliche Entwicklungsmodelle und Prognosen

Nach Erkenntnis der gefährlichen katalytischen Reaktionen der FCKW's in der polaren Stratosphäre erhebt sich die Frage, welche dieser Fluorchlorkohlenwasserstoffe mit welcher Intensität und mit welcher Dauer reaktionsaktiv bleiben werden. Eine exakte Antwort darauf wurde bisher und wird auch weiterhin deshalb sehr erschwert, weil die Atmosphäre ein offenes System mit oftmals nicht-linearen Wechselbeziehungen ist. In der nachfolgenden Tabelle (vgl. BRÜHL 1990, S. 10) bedeutet die Lebensdauer eines derartigen Moleküls diejenige Zeit, in der bei Emissionsstop die vorhandene Schadstoffmenge auf $1/e$ abgesunken ist. E ist dabei die Menge der zuvor emittierten Schadstoffe. Das Ozonabbaupotential wird mittels einer hier nicht weiter auszuführenden Formel festgestellt (BRÜHL 1990, S. 11). Daraus ist ersichtlich, daß die Lebensdauer zwar autoren- und modellbedingt schwankt, jedoch mit 10 bis nahezu 700 Jahren besorgniserregend groß ist. Einzige Ausnahme ist die Stoffklasse von $\text{CH}_3 \text{Cl}_3$.

Über Ansätze und Ergebnisse verschiedener Modelle, die auf der numerischen Lösung eines Systems gekoppelter Differentialgleichungen und des Wellenlängenintegrals basieren, berichtet BRÜHL zusammenfassend (1990, S. 16-17).

Abbildung 7 zeigt die über derartige Szenarien ermittelten prozentualen Ozonänderungen für beide Halbkugeln auf der Basis von 1987 auf (BRÜHL 1990, S. 41).

Gas	Formel	Lebensdauer (Jahre)					ODP			
		Bereich*	MPIC	IAS	UIO	M2D	Bereich*	MPIC	IAS	UIO
F11	CCl ₄	40-73	58	64	52	33	1,0-1,2	1,1	1,0	1,2
	CFCl ₃	46-80	67	85	60	40	1,00			
F12	CF ₂ Cl ₂	95-154	135	166	105 [†]	105	0,9-1,0	1,0	0,9	0,9
F113	C ₂ F ₃ Cl ₃	79-117	108	113	101	75	0,8-0,9	0,9	0,9	0,9
F114	C ₂ F ₄ Cl ₂	197-320	230	319	236	175	0,6-0,8	0,8	0,8	0,6
F115	C ₂ F ₅ Cl	393-690	455	548	522	378	0,3-0,5	0,4	0,4	0,4
H1301	CF ₃ Br	72-107	82	-	72	58	7-12	7	-	8
H1211	CF ₂ ClBr	12-18	12	-	18	11	2-4	2	-	3
F22	CHF ₂ Cl	16-20	16	?	17	16	,04-,06	,06	,05	,04
	CH ₃ CCl ₃	6-8	6	?	6	5	,08-,18	,10	,06	,14

* für FCKW nach FISHER & al., 1990; für Halone nach WMO, 1990

† Druckfehler bei FISHER & al., 1990

Tab.1: Die Lebensdauer verschiedener Spurenstoffe in der Atmosphäre (Quelle: BRÜHL & al. 1990, S. 10)

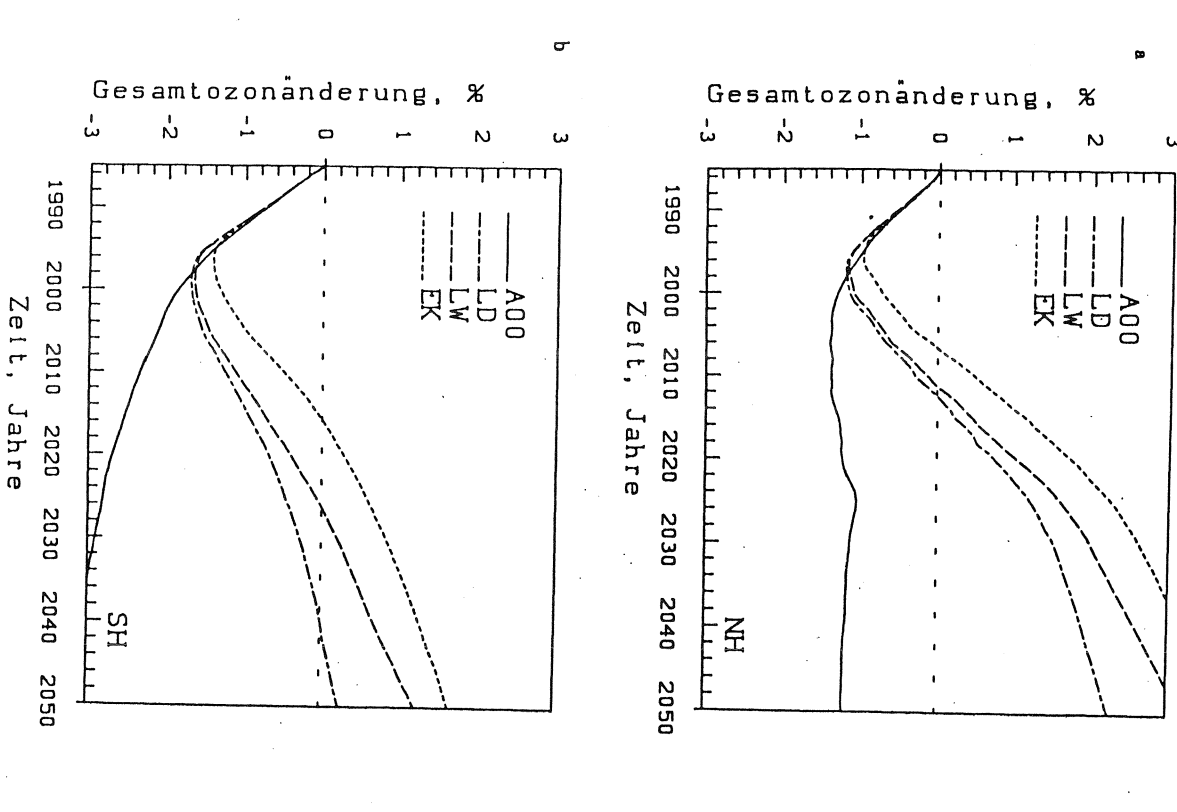


Abb. 7: Mit dem 1/2 D-Modell berechnete hemisphärische Gesamt Ozonänderungen in den Londoner Szenarien und Szenario A00 oben: Nordhemisphäre, unten: Südhemisphäre (aus BRÜHL & al. 1990, S. 41)

Das Standardszenario AOO basiert auf der Annahme, daß *alle Ausnahmeregelungen* bei der FCKW-Produktion ausgeschöpft werden. Es geht davon aus, daß diese Ausnahmeregelungen für eine geringere Produktionsreduzierung größtenteils auch ausgenützt werden.

LD nimmt die Angleichung des Pro-Kopf-Verbrauchs an Kühlmitteln der Entwicklungsländer an das Niveau der Industrieländer binnen 40 Jahren an.

EK: bei diesem optimistischen Szenario sollen die Ausnahmeregelungen nicht zum Tragen kommen und eine Reduktion der Halonproduktion in der EG früher als ursprünglich geplant erfolgen.

Alle Szenarien stimmen darin überein, daß der Ozonabbau mindestens bis zur Jahrtausendwende fortschreiten und dann nach den Modellen LW, LD und EK auf der Nordhalbkugel schneller, aber insgesamt sehr langsam zurückgehen wird. Nach dem Modell AOO bleibt der Abbaueffekt irreversibel und nimmt auf der Südhalbkugel sogar weiter zu.

BRÜHL verweist in seiner Schlußbetrachtung auf die Unmöglichkeit, derzeit eine exakte Vorhersage über die Ozonänderung zu erstellen. Die für den Winter theoretisch ermittelte Ozonabnahme um bis zu 30 % und eine damit korrespondierende Zunahme der biologisch wirksamen UV-Strahlung um 7 % des Jahresdurchschnitts (Zunahme im Winter bis zu 16 %) ist mittlerweile für beide Hemisphären durch Messungen belegt.

Ein besonderes Augenmerk wird auch auf die Wechselbeziehung zwischen Ozon und der atmosphärischen CO₂-Zunahme zu richten sein. Eine dadurch bedingte stratosphärische Temperaturabnahme um 8 % und die damit verbundene Verstärkung der 'Kältefalle' geben zu echter Besorgnis Anlaß.

Weltweit haben die Wissenschaftler die Grundprobleme einer atmosphärischen FCKW-Verseuchung erkannt und arbeiten an verbesserten Vorhersagemodellen.

7. Zur unterrichtlichen Aufarbeitung des Ozonproblems

Da Geographie einmal als Fach mit wesentlichen Aussagen und Lösungsansätzen in der Umwelterziehung gilt, andererseits durch ihre wissenschaftliche Einbettung im Fächerkanon in ihrer Grundstruktur interdisziplinär angesehen werden kann, liefern Themen dieser Art erdkundliches Wissen sowie Ansätze zur Umwelterziehung und weiterhin Verknüpfungspunkte der Fächer untereinander. Ermittlung und Analyse der Ozonlochproblematik sind zwar zunächst physikalisch-chemischer Natur, wie in diesem Beitrag unschwer zu erkennen war; jedoch ist in der Auswirkung auf Wetter und Klima, auf Vegetation und Landwirtschaft, auf Gesundheit und mögliche Verhaltensweisen sowie auf sämtliche denkbaren Wechselbeziehungen untereinander jeweils eine differenzierte räumliche Sichtweise notwendig. Dies ist die Aufgabe der Geographie bzw. der Schulerdkunde, und kein anderes Fach kann diese für unsere Zukunft so wichtige Aufgabe vergleichbar übernehmen und erfüllen.

Welche Behandlung kann dieses Problem aber konkret erfahren? Ozon, Ozonloch, Hautkrebs, Fahrverbot – diese Begriffe nahmen im Sommer 1994 in den Medien einen breiten Raum ein und wurden politisch kontrovers und z.T. sehr emotional diskutiert. Somit gelangen diese Schlagworte entsprechend belastet auch in die Schule.

Aufgabe des Unterrichts kann es aber nicht sein, jedes beliebige Tagesthema aufzugreifen und irgendwo in den Stoffplan einzufügen. Vielmehr ist es Aufgabe der Schule, Sensibilität für Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft zu wecken, ohne im Fluß befindliche Forschung als abgeschlossen hinzustellen.

In erster Linie muß mit fortschreitender Entwicklung der Lernenden das Bewußtsein wachsen, daß die Atmosphäre ein offenes System mit einer unvorstellbar großen Zahl von Einflußfaktoren ist, während der in der Schule übliche Laborversuch lediglich *eine* Erscheinung ausschnitthaft in den Vordergrund rückt. Dabei ist die Erziehung zu verantwortungsbewußtem Verhalten innerhalb eines solchen offenen Systems oberstes Erziehungsziel, weil es aufgrund der vielen Variablen von uns nicht gesteuert oder geregelt werden kann.

Am Beispiel von Baden-Württemberg sei die unterrichtliche Aufarbeitung dieses Problemkreises näher umrissen. So bietet der neue Lehrplan (gültig ab

Schuljahr 1994/95) eine Reihe von Einstiegs- und Vertiefungsmöglichkeiten bei der Erörterung aktueller Umweltfragen, die jedoch immer altersspezifisch erarbeitet werden sollten:

Klasse 5: Lehrplaneinheit (LPE) 2: Natur und Mensch im Heimatraum. Erkundung eines landwirtschaftlichen Betriebes.

In einer aufgeschlossenen Klasse werden sicher die Begriffe "Nitratbelastung von Böden und Gewässern" sowie die "Methanfreisetzung" durch Gülle und Massentierhaltung zur Sprache kommen. Wesentlich ist bei der Klärung der Probleme, daß oberflächliches Vorwissen und vielfach nur nachgeplapperte Begriffe sowohl kausallogisch aufgearbeitet als auch in einen historischen Zusammenhang eingebunden werden sollten. So konnte beispielsweise erst die Einführung der künstlichen Düngung durch Justus v. Liebig den Hunger in einem restlos überbevölkerten Mitteleuropa bannen. In kargen landwirtschaftlichen Gebieten wurden noch vor 150 Jahren im Winter dürrig gekleidete Kinder im Alter dieser Klassenstufe auf Betteltouren ("auf den Bettel") geschickt.

Klasse 6 (LPE 3): Die Alpen

Mit dem Hinweis auf die Bräunung von Winterurlaubern im Gebirge besteht ein wesentlicher Anknüpfungspunkt an UV- und Ozonproblematik. Sonnenbrand und Schneeblindheit können als typische Folgen von zu hoher UV-Konzentration bei starker Oberflächenreflektion herausgestellt werden. Relativ einfach scheint eine Übertragung dieser Erkenntnis auf sommerliche Klimaverhältnisse in den Alpen sowie auf sommerliche Strahlungsverhältnisse allgemein. Ohne auf den Bildungsmechanismus (vgl. Kap. 4) einzugehen, kann hier die Wirkung von UV-Strahlung sowie die absorbierende Wirkung des Ozons auf eben diese UV-Strahlung in ihrer jeweiligen Bedeutung qualitativ erarbeitet werden.

Klasse 6 (LPE 4): Luftreinhaltung

Neben der anschaulichen Beschreibung der Erzeugung von Luftschadstoffen und deren Einwirkung auf die Ozonschicht soll in dieser LPE eine Sensibilisierung und eine praktische Umwelterziehung, also ein Überdenken der eigenen Position und Aktivitäten im Vordergrund stehen.

Klasse 7: Planetarische Zirkulation

Erzeugung und Transportwege von Luftschadstoffen können innerhalb der Planetarischen Zirkulation lokalisiert werden. So ist eine unterschiedliche Reaktion

einzelner Klimazonen auf die Immission von Luftschadstoffen herauszustellen, etwa beim Ozon- und Säuretransport in höhere Breiten. Besonderer Wert ist also auf die Verschiedenheit der einzelnen Klimazonen, aber auch auf die topographischen Unterschiede etwa im Vergleich von Arktis und Antarktis zu legen.

Klasse 8: Entwicklungsländer und ihre Versorgung

Die Bedeutung der Methanfreisetzung beim großflächigen Anbau von Naßreis für den Strahlungs- und Wärmehaushalt der Atmosphäre ist unbedingt anzusprechen, aber immer unter dem Blickwinkel einer wachsenden Bevölkerung, um eine Kategorisierung in gute (lernfähige) und schlechte (unflexible) Verhaltensweisen zu vermeiden.

Klasse 9 und 10: Kein Erdkundeunterricht

Im Fach Physik ist Vorarbeit für die Klassenstufen 12 und 13 möglich. Besonders bieten sich dazu die Vorgänge der Energieübertragung durch Konvektion und die Brown'sche Molekularbewegung an.

Klasse 11: Anthropogen bedingte Klimaveränderung

Der auf eine Wochenstunde geschrumpfte Erdkundeunterricht läßt lediglich eine oberflächliche Behandlung des vorgesehenen Themenkreises zu. Doch sollte es möglich sein, unter Einbeziehung physikalischer und chemischer Grundlagen die unterschiedlichen Reaktionen des Ozons in der Tropo- und Stratosphäre zu erarbeiten.

Klasse 12/13: Wetter und Klima

Die Fülle des Stoffes und mangelnde Grundlagen aus den vorangegangenen drei Schuljahren lassen eine intensivere Behandlung der Ozonfrage nur im Leistungskurs und auch dort oft nur bedingt zu. Eine Erarbeitung kann vor allem in den Teilbereichen Strahlungshaushalt, Klimazonen und Umweltprobleme erfolgen. Dabei sollten Produktion und Entsorgung der FCKW's sowie deren regionale Anwendungsschwerpunkte angesprochen werden. Gerade in der Oberstufe ist jedoch darauf hinzuweisen, daß viele Fragen zur Ozonbildung und Ozonzerstörung sowie zum Transportmechanismus sich erst im Stadium der Forschung befinden.

Wesentlich einfacher stellt sich das Aufgreifen der Ozonproblematik dann dar, wenn diese als eigenständiges Thema im Lehrplan vorgesehen ist. Andererseits

kann der meist vorhandene Spielraum innerhalb des Lehrplans zur Aufnahme und Behandlung des Ozonproblems genützt werden.

Allerdings entbinden auch derartige Lehrplanbedingungen nicht von der Notwendigkeit, das Ozonproblem, wie zuvor demonstriert, auch integriert in 'ozon-relevante' Themen zu berücksichtigen, da sonst wesentliche Erklärungs- und Wirkungszusammenhänge unverstanden bleiben bzw. da auf diese Weise eine hierarchisch gestufte kontinuierliche statt einer möglicherweise nur einmaligen Beschäftigung mit dem Ozonproblem möglich ist.

Glossar:

DU (Dobson-Einheit): 1 DU entspricht einer Ozonschichtdicke von 1/1000 cm unter Normalbedingungen.

Geostrophischer Wind: weht parallel zu den Isobaren und senkrecht zum Druckgradienten.

Hadley-Zirkulation: beschreibt großräumig die Strömungszellen innerhalb der Passatzirkulation.

ITC (Innertropische Konvergenz): Zone des Zusammentreffens von Nordost- und Südostpassat. Die ITC windet sich nicht als globales Band, sondern gliedert sich in mehr oder minder ausgedehnte Zellen auf- und absteigender Luftmassen.

Ozon: Verbindung von 3 Atomen Sauerstoff. Das Gas besitzt eine bläuliche Färbung und ist hochgiftig. Zwei Ozonmoleküle zerfallen unter exothermer Reaktion in drei Moleküle von je zwei Sauerstoffatomen.

Peplosphäre (Mantelschicht): diejenige Luftschicht, deren Temperaturverlauf durch die tägliche Ein- und Ausstrahlung bestimmt wird.

Synoptische Welle: Aufeinanderfolge von Zwischenhochs und wandernden Tiefdruckgebieten.

Literatur

ARNOLD, F. (1988): Neue Erkenntnisse zur Entstehung des Ozonloches. – In: Phys. Bl. 44, S. 404.

ARNOLD, F. & al. (1982): Die Belastung der Luft unter Ozon. – In: Staubreinheit der Luft 6, S. 243-247.

ATMANNSPACHER, W. & al. (1984): Langzeittendenzen des Ozons der Atmosphäre auf Grund der 1967 begonnenen Ozonmeßreihe am Meteorolo-

- gischen Observatorium Hoßenpeißenberg. – In: Meteor.Rdsch. 37, S. 193-199.
- BRÜHL, Chr. / HENNING, R. (1990): Analyse und Bewertung der Modellsysteme zur Vorhersage von Veränderungen des Ozongehaltes der Atmosphäre. – Umweltbundesamt, Schlußber. zum FE Vorhaben 104 02 521.
- CHUBACHI, F. (1984): Atmosphärische Ozone. – Dordrecht.
- CRUTZEN, P.J. (1988): Ozonabnahme in der antarktischen Stratosphäre. – In: *promet* 18, Heft 4, S. 21-25.
- EHEHALT, D.P. (1987): Grundlagen der atmosphärischen Ozonchemie. – In: *promet* 17, Heft 1/2, S. 41-44.
- FABIAN, P. (1988): Antarktisches Ozonloch – Indizien weisen auf Umweltverschmutzung. – In: *Phys. Blätter* 44, S. 2-7.
- FARMAN, J. & al. (1985): Variations in antarctical ozone-concentration. – In: *Nature* 315, S. 207.
- FISHER, D.A. & al. (1990): Model calculations of the relative effects CFC's and their replacements on stratospheric ozone. – In: *Nature* 344, S. 508-512.
- HOFMANN, D. & al. (1987): Ballon-borne observations of the development and vertical structure of the Antarctic ozone hole. – In: *Nature* 326, S. 59-62.
- KFA Jülich (1987): Waldschäden, Ursachenforschung. – (KFA) Jülich.
- KHALIL, M. / RASMUSSEN, R. (1989): Ozone in the Antarctic Winters. – In: *Geo. Res. Lett.* Vol. 16, S. 679.
- MADURO, R. / SCHEUERHAMMER, R. (1991): Ozonloch. – Wiesbaden.
- LABITZKE, K. (1980): Temperatures of the Antarctic atmosphere. – In: *Phil. Trans. Roy. Soc., A* 296, S. 7. – London.
- LABITZKE, K. (1987): The vertical structure of the Antarctic ozone hole. – In: *Annales Geophysicae* 5A, S. 95.
- MOLINA, J. / ROWLAND, F. (1974): Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine-atom catalysed destruction of ozone. – In: *Nature* 249, S. 810.
- MÖLLER, F. (1974): Einführung in die Meteorologie. Bd.2. – Mannheim.
- SCHNEIDER, U. (1989): Die Ozonbelastung in den Waldgebieten von Rheinland-Pfalz. – In: *Meteorol. Rdsch.* 41, S. 173-180.
- SOLOMON, S. (1988): The mystery of the Antarctic ozone "hole". – In: *Rev. of Geophys.* 26, S. 131-148.
- STALLARD, R.F. & al. (1975): Surface ozone in the south east Atlantic between Dakar Walvis Bay. – In: *Geophys. Res. Letters* 7, S. 289-292.
- STANLEY (1885): Eruption of Krakatao. – In: *Meteor. Zeitschrift* 2, S. 347.
- STOLARSKI, R. & al. (1986): Chlorofluoromethanes in the stratosphere. – In: *Nature* 322, S. 808.

- VANDERSEE, W. & al. (1992): Photochem. Ozonproduktion am Hohenpeißenberg. – In: Meteorol. Zeitschr. N.F., S. 186-194.
- VERBEEK (1885): Die Krakatao-Katastrophe. – In: Meteorol. Zeitschr. 2, S. 416.
- WEGE, K. (1992): Ozontrends am Hohenpeißenberg. – In: Meteorol. Zeitschr. N.F., S. 260-262.
- WINKLER, P. (1986): Ozonmessungen über See. – In: promet 16, S. 36-40.