

## 03.06 Bodennahes Ozon (Ausgabe 1996)

### Problemstellung

#### Was ist Ozon und wo kommt es vor?

**Ozon** ist ein natürliches Spurengas der Atmosphäre. Im Gegensatz zum zweiatomigen Sauerstoff ( $O_2$ ) besteht Ozon aus Sauerstoff mit drei Atomen ( $O_3$ ). Während  $O_2$  zu etwa 20 % in der Luft enthalten ist, kommt Ozon in sehr viel geringeren Konzentrationen vor.

Im Vergleich zum Luftsauerstoff ist der Ozongehalt sehr großen zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterworfen, die durch Entstehung und Abbau von Ozon verursacht werden. Damit  $O_3$  gebildet werden kann, muß zunächst ein Sauerstoffatom aus dem Luftsauerstoff oder anderen sauerstoffhaltigen Molekülen abgespalten werden. Dies ist aufgrund der chemischen Stabilität meist mit erheblichem Energieaufwand verbunden. Deshalb kann Ozon auf natürliche Weise nur dort entstehen, wo elektrische Entladungen stattfinden (z.B. Blitze) oder energiereiche (Sonnen-) Strahlung (UV-Licht) vorhanden ist, wie am oberen Rand der Atmosphäre, der sogenannten **Stratosphäre** in 12-40 km Höhe.

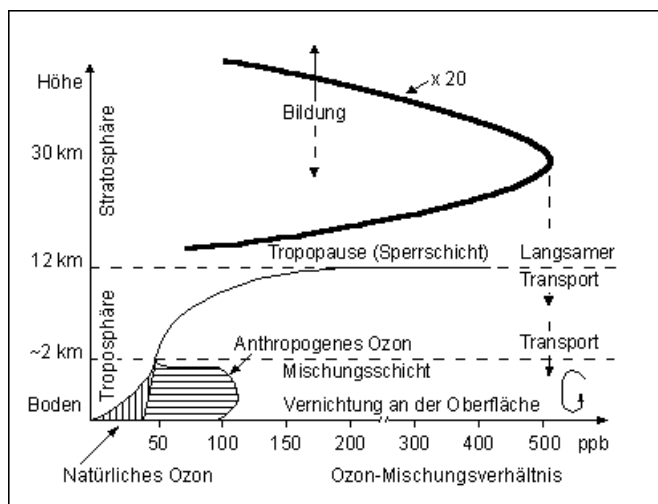


Abb. 1: Schematisches Vertikalprofil des Ozon-Mischungsverhältnisses in der Atmosphäre (nach Schurath 1984)

Ein Teil der lebensbedrohenden UV-Strahlung wird dort für die Bildung von Ozon aus  $O_2$  verbraucht. Ein weiterer Teil wird vom Ozon selbst absorbiert (vgl. Abb. 1). Die Existenz der Ozonschicht ist deshalb unbedingte Voraussetzung für das Leben auf unserem Planeten. Ihr Bestand ist durch die anthropogene Emission von Stoffen gefährdet, deren Bestandteile das empfindliche chemische Gleichgewicht zwischen Ozonbildung und -abbau zugunsten der Ozonzerstörung in der Stratosphäre verschieben.

In der **Troposphäre**, dem unteren Stockwerk der Atmosphäre, ist die Ozonbildung aus  $O_2$  mangels energiereicher Strahlung nicht mehr möglich. Der schwächere, durch die Ozonschicht hindurchtretende, Teil des UV-Lichts ist allerdings in der Lage, aus Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen Ozon zu bilden. Da diese Stoffe ohne menschliches Zutun nur in relativ geringen Konzentrationen in der Atmosphäre vorhanden sind und sich Ozon durch Kontakt mit Materialien am Boden abbaut, kommen normalerweise, auch aufgrund des nur langsam ablaufenden vertikalen Transports aus der Stratosphäre, nur relativ geringe Ozonkonzentrationen in der Troposphäre zustande (vgl. Abb. 1).

Hier wirkt Ozon aufgrund seiner Reaktionsfreudigkeit als Reinigungsmittel der Atmosphäre. Es oxidiert andere Spurenstoffe, wie Schwefeldioxid und Stickoxide. Am Ende dieser chemischen Prozesse

entstehen feste Reaktionsprodukte, sogenanntes Aerosol, das den Dunst in der Atmosphäre ausmacht und mit dem Regen ausgewaschen wird.

Eine weitere Rolle spielt das troposphärische Ozon als Treibhausgas. Es absorbiert ähnlich wie Kohlendioxid einen Teil der vom Erdboden ausgehenden Wärmestrahlung und trägt damit zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Die Wirkung jedes Ozonmoleküls als Treibhausgas ist dabei umso geringer, je weiter es vom Erdboden, der die Wärme in die Atmosphäre abstrahlt, entfernt ist. Daher trägt das mengenmäßig überwiegende Ozon in der Stratosphäre in relativ geringem Maße zum Treibhauseffekt bei, während das Ozon in der Troposphäre trotz seiner relativ geringen Konzentration für etwa acht Prozent des anthropogenen Treibhauseffektes verantwortlich gemacht werden kann (vgl. Deutscher Bundestag 1992).

## Mögliche Schadwirkungen von Ozon am Boden

Die Reaktionsfreudigkeit von Ozon wirkt sich jedoch nachteilig auf die Natur aus, wenn zusätzlich Ozon aus den anthropogenen Vorläuferstoffen durch photochemische Vorgänge produziert wird und dadurch höhere Konzentrationen in Bodennähe auftreten. Aufgrund seiner stark oxidierenden Eigenschaft tritt eine Schadwirkung an Oberflächen auf, die mit höheren Ozonkonzentrationen in Kontakt kommen. Dies sind

- bei Bauwerken die Oberfläche von Metallteilen, auf die Ozon eine korrodierende Wirkung ausübt,
- bei Pflanzen die Blatt- und Nadeloberfläche. O<sub>3</sub> kann die entsprechende Schutzschicht bzw. das Blattgewebe selbst schädigen. Die Folgen können erhöhter Schädlingsbefall und eine Minderung des Pflanzenwachstums sein. Verschiedene Pflanzenarten reagieren sehr unterschiedlich auf Ozon. Die erhöhten Ozonwerte im Sommer werden als waldschädigender Faktor angesehen,
- bei Menschen und Tieren vor allem der Atemtrakt. Da Ozon schwer wasserlöslich ist, gerät es bis in die Lunge und wirkt dort in höheren Konzentrationen zerstörerisch auf das Lungengewebe.

Bei der Frage nach den **Verursachern** der **für Ozonbildung** verantwortlichen primären Emissionen steht der Kraftfahrzeugverkehr an erster Stelle. Stickoxide werden bei der Kraftstoffverbrennung im Motor erzeugt, ebenso wie ein Teil der Kohlenwasserstoffe durch unvollständige oder fehlende Verbrennung des Benzins. Als weitere Stickoxidemittenten sind die Kraftwerke, industrielle Feuerungsanlagen und der Hausbrandsektor zu nennen (vgl. SenStadtUm 1995b).

Ein wesentlicher Teil der Kohlenwasserstoffe gelangt durch Verdunstung des Benzins aus dem Tank der Fahrzeuge oder beim Umschlagen des Kraftstoffes in Tanklagern in die Atmosphäre. Er erreicht fast die Hälfte der direkt aus dem Auspuff der Kraftfahrzeuge stammenden Kohlenwasserstoffmenge (vgl. Obermeier 1995 und Karte 03.09, SenStadtUm 1997). Weitere Quellen für Kohlenwasserstoffe sind die Verflüchtigung von Lösemitteln aus Farben und Lacken, verschiedene Prozesse der Industrie und des Kleingewerbes, aber auch die Abgabe durch die Vegetation und durch die Ozeane. Die aus natürlichen Quellen abgegebenen Mengen an flüchtigen Kohlenwasserstoffen übersteigen im weltweiten Maßstab die anthropogenen Emissionen deutlich (vgl. Deutscher Bundestag 1990). Auch in industriell geprägten Regionen spielen sie für die Ozonbildung eine wichtige Rolle. So erreicht die ozonbildende Wirkung der in Baden-Württemberg emittierten Kohlenwasserstoffe, die überwiegend von Laub- und Nadelwäldern stammen, fast die gleiche Größenordnung wie die der übrigen anthropogenen Kohlenwasserstoffquellen (vgl. Obermeier 1995).

In Tabelle 1 sind u.a. **Schwellenwerte der Ozonkonzentration** aufgeführt, die der seit September 1992 europaweit gültigen EG-Richtlinie zu Ozon entnommen sind und die 1994 in die 22. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchV) übernommen wurden. Der sogenannte Schwellenwert für den (menschlichen) Gesundheitsschutz gibt die Konzentration an, die im Falle länger andauernder Belastungen nicht überschritten werden sollte. Das gleiche gilt für die Schwellenwerte für den Schutz der Vegetation, bei deren Überschreitung eine Schädigung von Pflanzen eintreten kann. Der Schwellenwert für die Unterrichtung der Bevölkerung von 180 µg/m<sup>3</sup> Ozon als Mittelwert über eine Stunde gilt als Schwelle, bei der besonders empfindlich auf Ozon reagierende Personen beeinträchtigt werden können. Es wird dann von der zuständigen Behörde die Empfehlung ausgesprochen, insbesondere ungewohnte und starke Anstrengungen im Freien am Nachmittag zu vermeiden. Bei 360 µg/m<sup>3</sup> wird eine gleichlautende Warnung an die gesamte Bevölkerung gerichtet. Bei solchen und höheren Konzentrationen kann die erwähnte irreversible Schädigung der Lunge eintreten. Die oftmals zu beobachtende Reizung des Rachens und das Tränen der Augen sind jedoch nicht auf Ozon, sondern auf andere, gleichzeitig vorkommende Substanzen (z.B. PAN) zurückzuführen.

Tab. 1: Richt- und Leitwerte zur Konzentration von Ozon		
EG-Richtlinie 92/72/EWG/22. BImSchV Schwellenwerte: für den Gesundheitsschutz	110 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über 8 Stunden
für den Schutz der Vegetation	200 µg/m <sup>3</sup> 65 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über eine Stunde als Mittelwert über 24 Stunden
für die Unterrichtung der Bevölkerung	180 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über eine Stunde
für die Auslösung des Warnsystems	360 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über eine Stunde
Ozonalarm nach § 40a BImSchG	240 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über eine Stunde an drei Stationen im Abstand von jeweils 50 – 250 km
Maximale Immissionswerte des VDI <sup>1)</sup> (zum Schutz der Gesundheit) – Richtlinie 2310, Bl. 15	120 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über eine halbe Stunde
Maximale Immissionswerte des VDI <sup>1)</sup> (zum Schutz der Vegetation) – Richtlinie 2310, Bl. 6	150 µg/m <sup>3</sup> 300 µg/m <sup>3</sup>  350 µg/m <sup>3</sup> 500 µg/m <sup>3</sup>  500 µg/m <sup>3</sup> 1.000 µg/m <sup>3</sup>	für sehr empfindliche Pflanzen: als Mittelwert über eine Stunde als Mittelwert über eine halbe Stunde für empfindliche Pflanzen: als Mittelwert über eine Stunde als Mittelwert über eine halbe Stunde für weniger empfindliche Pflanzen: als Mittelwert über eine Stunde als Mittelwert über eine halbe Stunde
WHO-Richtwert <sup>2)</sup> (zum Schutz der Gesundheit)	150 bis 200 µg/m <sup>3</sup> 100 bis 120 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über eine Stunde als Mittelwert über 8 Stunden
WHO-Richtwert <sup>2)</sup> (zum Schutz der terrestrischen Vegetation)	60 µg/m <sup>3</sup> 65 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über die Vegetationszeit als Mittelwert über 24 Stunden
Critical Level des UN ECE <sup>3)</sup> (1988)	150 µg/m <sup>3</sup> 60 µg/m <sup>3</sup>	als Mittelwert über eine Stunde als Mittelwert über 8 Stunden
Critical Level UN ECE <sup>3)</sup> Vorschläge von 1992	3.000 ppb x h  10.000 ppb x h	AOT 40 <sup>4)</sup> für landwirtschaftliche Nutzpflanzen AOT 40 <sup>4)</sup> für Wälder
<p><sup>1)</sup> Als Grundlage für die Festlegung von begrenzenden Immissionswerten dienen "Maximale Immissions-Werte", die darauf abzielen, eine Gesundheitsschädigung des Menschen, insbesondere auch von Kindern, Alten und Kranken, selbst bei langfristiger Einwirkung zu vermeiden und einen Schutz vor Schädigungen von Tieren, Pflanzen und Sachgütern zu gewährleisten. Die "Maximalen Immissions-Werte" sind rein wirkungsbezogene, wissenschaftlich begründete und aus praktischer Erfahrung abgeleitete Werte mit medizinischer oder naturwissenschaftlicher Indikation. Sie berücksichtigen nicht die technische Realisierbarkeit.</p> <p><sup>2)</sup> Die Luftqualitätsleitlinie der WHO wurde auf der Grundlage toxikologischer und ökologischer Befunde entwickelt. Sie hat empfehlenden Charakter bei der Festlegung gesetzlicher Normen.</p> <p><sup>3)</sup> Diese Werte basieren auf den Maßnahmebeschlüssen der UN-ECE-Mitgliedsländer im Rahmen des Genfer Luftreinhalteabkommens von 1979 zur Verminderung der grenzüberschreitenden Luftverunreinigungen in Europa (SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Protokolle von 1985 und 1988) (vgl. Köhle et al. 1992).</p> <p><sup>4)</sup> AOT 40 (Accumulated Ozone above Threshold 40 ppb): kumulative Dosis als Summe der Differenzen zwischen der stündlichen Durchschnittskonzentration und 40 ppb (0,80 µg/m<sup>3</sup>), wenn die Konzentration 40 ppb übersteigt (nur bei Tageslicht).</p>		

**Tab. 1: Richt- und Leitwerte zur Konzentration von Ozon**

Ein weiterer, oftmals zur Beurteilung benutzter Wert ist der sogenannte MIK-Wert (VDI 2310) (vgl. Tab. 1), der mit 120 µg/m<sup>3</sup> (im Halbstundenmittel) eine untere Grenze für Einwirkungen auf die Gesundheit durch Ozon und mögliche begleitende weitere photochemische Substanzen darstellt.

Neu hinzugekommen ist am 28.7.1995 der Grenzwert von 240 µg/m<sup>3</sup> Ozon im Stundenmittel als Schwelle für Ozonalarm nach § 40a Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Bei Überschreitung dieses Wertes an mindestens drei Meßstationen, die zwischen 50 und 250 km voneinander entfernt sein müssen, tritt am darauffolgenden Tag ab 6.00 Uhr ein Fahrverbot für Kraftfahrzeuge ein, die nicht als schadstoffarm eingestuft sind, wenn an diesem Tag ähnlich hohe Werte erwartet werden. Das Fahrverbot gilt dann in den Bundesländern, in denen mindestens zwei Meßstationen mit Überschreitungen liegen. Bei Stadtstaaten, wie Berlin, reicht bereits eine Meßstation dort oder in einem benachbarten Kreis aus.

# Datengrundlage

## Meßeinheiten

Ozon wird meist in ppm ("parts per million" =  $10^{-6}$ ) oder ppb = 1/1 000 ppm gemessen. Ppm bedeutet, daß sich unter einer Million Teilchen Luft nur wenige Teilchen Ozon befinden. In Bodennähe wird statt dieses Mischungsverhältnisses auch oftmals die Ozonkonzentration in  $\mu\text{g Ozon / m}^3$  Luft angegeben. In die Formel für die Umrechnung vom Mischungsverhältnis (X) in Konzentrationseinheiten ( $\rho$ ) von Ozon

$$\rho [\mu\text{g/m}^3] = 0.5773 \times P/T \times (X) [\text{ppb}]$$

gehen auch der Luftdruck (P) [hPa] und die Temperatur (T) [K] ein. Als Faustformel für mittlere Druck- (1013 hPa) und Temperaturbedingungen (20 °C = 293 K) in Bodennähe gilt:

$$[\mu\text{g/m}^3] = 2 \times [\text{ppb}].$$

Eine weitere Einheit, die insbesondere bei der Darstellung der Vertikalverteilung des Ozons benutzt wird, ist der sogenannte Ozonpartialdruck [Pa], ausgedrückt in nbar [nanobar] = 0,1 mPa. Damit ist der Anteil des Drucks gemeint, den das wenige Ozon alleine zum Luftdruck beiträgt, also das Produkt aus X [ppb =  $10^{-9}$ ] und Luftdruck.

## Vertikalverteilung

Schon vor Entdeckung des Abbaus der Ozonschicht in der Stratosphäre wurde die vertikale Verteilung von Ozon an vielen Orten auf der Welt mit Hilfe von Ballonaufstiegen gemessen. Diese auch heute noch routinemäßig angewandte Methode bedient sich einer meist naßchemisch arbeitenden Ozonsonde, die an einem mit Helium gefüllten Ballon bis in die Stratosphäre aufsteigt und auf ihrem Weg kontinuierlich die Ozonkonzentration aufzeichnet. In Deutschland werden solche täglichen Messungen in Hohenpeißenberg (Bayern) und in Berlin seit 1966 bzw. 1967 vorgenommen. Die Berliner Messung wurde 1973 eingestellt und kurz darauf im 50 km entfernten Lindenberg fortgesetzt.

Informationen aus Höhen über 35 km wurden in der Vergangenheit mit Hilfe von Raketensonden gewonnen. In letzter Zeit hat man sich stärker die immer präziser werdenden spektralen Meßmethoden von Satelliten zunutze gemacht. Der Vorteil der Satellitenmessungen besteht in der Verfügbarkeit von großräumigen Bildern der Ozonverteilung, mit deren Hilfe die geographische Erstreckung des Ozonabbaus in der Antarktis (Ozonloch) erstmals deutlich wurde.

Mit Hilfe des spektralen Fingerabdrucks des Ozons kann seine Konzentration auch bei der Untersuchung der Rückstreuung künstlich ausgestrahlten Laser-Lichts gewonnen werden. Diese sogenannten LIDAR-Geräte können sowohl zur Messung vertikaler als auch horizontaler Ozonprofile benutzt werden. Ein solches Gerät der Freien Universität Berlin ist seit Juni 1996 auf dem Dach der Charité in Berlin-Mitte installiert.

## Dicke der Ozonschicht

Zur Beurteilung der möglichen Auswirkungen der Veränderung des Ozongehalts auf die am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung ist meist schon die Kenntnis des Gesamtzongehalts in der Atmosphäre ausreichend. Er wird in DOBSON-Einheiten gemessen. Sie entsprechen der in 1:100 mm angegebenen Dicke der reinen Ozonschicht, wenn man sie unter am Erdboden anzutreffenden Druck- und Temperaturverhältnissen bestimmen würde.

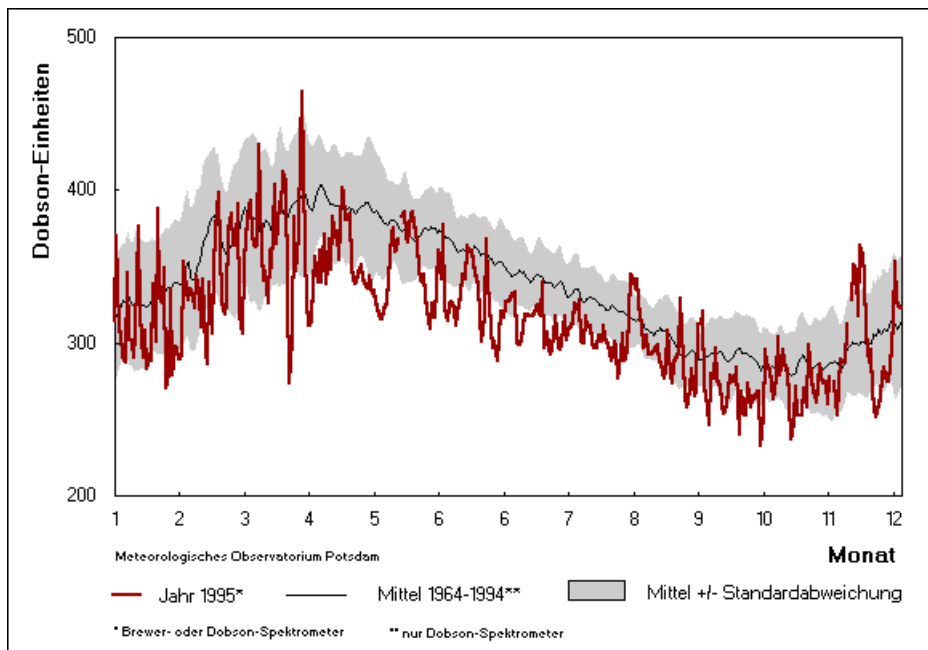


Abb. 2: Dicke der Gesamtozonschicht, gemessen am meteorologischen Observatorium Potsdam (Feister 1995)

Das am häufigsten angewandte, schon in den 20er Jahren entwickelte Verfahren nutzt die oben beschriebene UV-Filterwirkung des Ozons, um seine Schichtdicke zu bestimmen. Es wird inzwischen an etwa 85 Meßstationen auf der ganzen Welt benutzt. Die Ergebnisse der vom Deutschen Wetterdienst betriebenen Station am Meteorologischen Observatorium Potsdam zeigt, daß das in der Atmosphäre vorhandene, auf Bodenluftdruck zusammengepreßte Ozon nur eine zwischen 2,5 und 4 mm dicke Schicht ergibt (vgl. Abb. 2). Die flächendeckende Messung des Gesamtozons erfolgte in den letzten Jahren weitgehend von Satelliten, deren Meßwerte mit Hilfe der o.g. Bodenmessungen geeicht werden.

## Bodennahes Ozon und andere Parameter

Schon 1840 wurden die ersten Messungen von bodennahem Ozon mit Hilfe des nach seinem Entdecker benannten Schönbein-Papiers durchgeführt. Das mit Kaliumjodid getränktes Papier färbt sich durch die von Ozon angeregte Bildung von Jod blau. Heute werden sehr viel genauere Meßgeräte benutzt, die sich die UV-Absorptionseigenschaft von Ozon zunutze machen und damit auf einer rein physikalischen Meßmethodik (UV-Photometrie) beruhen. Sie wurden aber bis vor einigen Jahren mit dem naßchemischen Kalium-Jodid-Verfahren (VDI-Richtlinie 2468, Blatt 1) geeicht, während seit Inkrafttreten der EG-Richtlinie zu Ozon 1992 europaweit das direkte UV-photometrische Verfahren als Eichverfahren vorgeschrieben ist. Dies ist wesentlich genauer, liefert aber im Vergleich zu dem vorher benutzten naßchemischen Verfahren systematisch zehn Prozent niedrigere Werte. Das führte dazu, daß die in Berlin vor der Umstellung am 1.1.1995 gemessenen Werte zehn Prozent höher ausfallen als heutige Meßwerte. Es betrifft auch die Vergleichbarkeit der Daten zwischen den Bundesländern, die zudem teilweise mit einer Bezugstemperatur von 0 °C statt der jetzt vorgeschriebenen 20 °C von ppb in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  umgerechnet wurden. Durch die Anwendung der EG-Richtlinie werden die möglichen systematischen Unterschiede von bis zu 16 % bei der Messung und Berechnung der Ozonkonzentration künftig vermieden.

Eine weitere Methode für die Messung von Ozon, die häufig zu Vergleichszwecken benutzt wird, basiert auf der Aussendung von Licht bei der Reaktion von Ozon mit Äthylen (Chemielumineszenz).

Verursacht durch das zunehmende öffentliche Interesse an den erhöhten Ozonkonzentrationen im Sommer wurde die Zahl der Ozonmeßstellen in den letzten Jahren erheblich vergrößert. In den USA wird schon seit den 70er Jahren insbesondere in Kalifornien aufgrund der dort gemessenen extrem hohen Konzentrationen von 400 bis über 800  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (vgl. NRC 1991) ein dichtes Netz kontinuierlich arbeitender Meßstellen betrieben. In den letzten Jahren wurde auch in Deutschland mit 365 kontinuierlich messenden Stationen der Länder und des Umweltbundesamtes (UBA) eine quasi flächendeckende Registrierung erreicht (vgl. UBA 1996). In Berlin wird Ozon seit 1984 an einer Station in Wedding und seit 1987 an mehreren Stationen des Berliner Luftgütemeßnetzes (BLUME) kontinuierlich gemessen. Der seit 1994 erreichte Endausbau des Meßnetzes umfaßt insgesamt zehn

Stationen für Ozon, an denen auch andere Schadstoffe, wie Schwefeldioxid und Stickoxide, registriert werden (vgl. SenStadtUm 1995a). Davon befinden sich fünf Meßstationen am Stadtrand und drei in innerstädtischen Wohngebieten. Je eine Meßstelle ist an der Stadtautobahn und in 324 m Höhe auf dem Funkturm in Frohnau eingerichtet. Die Meßstelle im Grunewald ermittelt abwechselnd jede halbe Stunde die Schadstoffkonzentrationen in etwa 4,5 m Höhe sowie in 24 m Höhe über dem Boden bzw. 10 m über den Baumkronen.

## Methoden

Die zum Teil komplizierten Zusammenhänge zwischen Entstehung und Abbau von Ozon in den verschiedenen Schichten der Atmosphäre sowie dessen Wirkung auf die belebte und unbelebte Umwelt verdeutlicht die schematische Darstellung der Karte 03.06.1.

Karte 03.06.2 enthält die großräumige, durch Interpolation flächenhaft dargestellte Verteilung der Ozon-Maximalwerte von 1995 in Deutschland.

Zur Charakterisierung der Ozonbelastung in Berlin ist in Karte 03.06.3 die Häufigkeit der Überschreitungen von Richtwerten an den Berliner Meßstellen im Jahr 1995 dargestellt.

Hohe Ozonkonzentrationen in der bodennahen Atmosphäre sind, wie die Karte 03.06.2 illustriert, offensichtlich ein überregionales Problem. Trotzdem stellt sich die Frage, ob und in welchem Umfang Ballungszentren von der Größe Berlins eine zusätzliche Produktion von Ozon im Stadtgebiet oder im Umland bewirken. Die Antwort darauf und auf die Frage, ob und welchen Beitrag kurzzeitige Maßnahmen zur Minderung des Ausstoßes an ozonproduzierenden Substanzen im Großraum Berlin zur Senkung der Ozonbelastung leisten können, war Ziel des gemeinsam mit dem Land Brandenburg durchgeführten Meßprojektes "FluMOB" (Flugzeug- und Bodenmessungen von Ozon und Vorläuferstoffen zur Abschätzung der Wirksamkeit von emissionsmindernden Maßnahmen im Großraum Berlin-Brandenburg).

Wesentlicher Inhalt war die Messung von Ozon und anderer maßgeblicher Schadstoffe während einer typischen Ozonwetterlage vom 23.7. bis 27.7.1994, sowohl in Bodennähe als auch mit Flugzeugen in der freien Atmosphäre. Die Ergebnisse eines solchen Meßfluges sind in den Karten 03.06.5 und 03.06.6 dargestellt, während die Entwicklung der großräumigen Ozonbelastung aus Karte 03.06.4 und der zeitliche Verlauf einiger in Berlin gemessener Parameter aus Karte 03.06.7 ersichtlich sind.

Die Frage nach der potentiellen Wirkung emissionsmindernder Maßnahmen läßt sich nur mit Hilfe einer Simulationsrechnung der Ozonkonzentration (für den 25.7.1994, 16.00 Uhr in der Karte 03.06.8) beantworten. Bei unveränderten sonstigen Randbedingungen läßt sich dann die Emission im Untersuchungsgebiet um beliebige Beträge (hier um 30 % für Stickoxide und Kohlenwasserstoffe) reduzieren. Die Auswirkung eines solchen Minderungsszenarios auf die Ozonverteilung ist schließlich in der Karte 03.06.9 dargestellt.

## Kartenbeschreibung

### Karte 03.06.1: Entstehung - Abbau

#### Das natürliche Gleichgewicht in der Stratosphäre

Wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, nimmt die Ozonkonzentration oberhalb von 12 km Höhe in der Stratosphäre stark zu und erreicht das 20- bis 30fache der Werte in Bodennähe. Ursache dafür ist die Entstehung von Ozon durch die Einwirkung der energiereichen Sonnenstrahlung aus dem Weltraum (Wellenlängen < 240 nm) auf die obersten Schichten der Atmosphäre. Der dort reichlich vorhandene molekulare Sauerstoff  $O_2$  wird in seine beiden Atome aufgespalten, die sich anschließend mit einem noch intakten  $O_2$ -Molekül zu Ozon ( $O_3$ ) verbinden (vgl. Abb. 3).

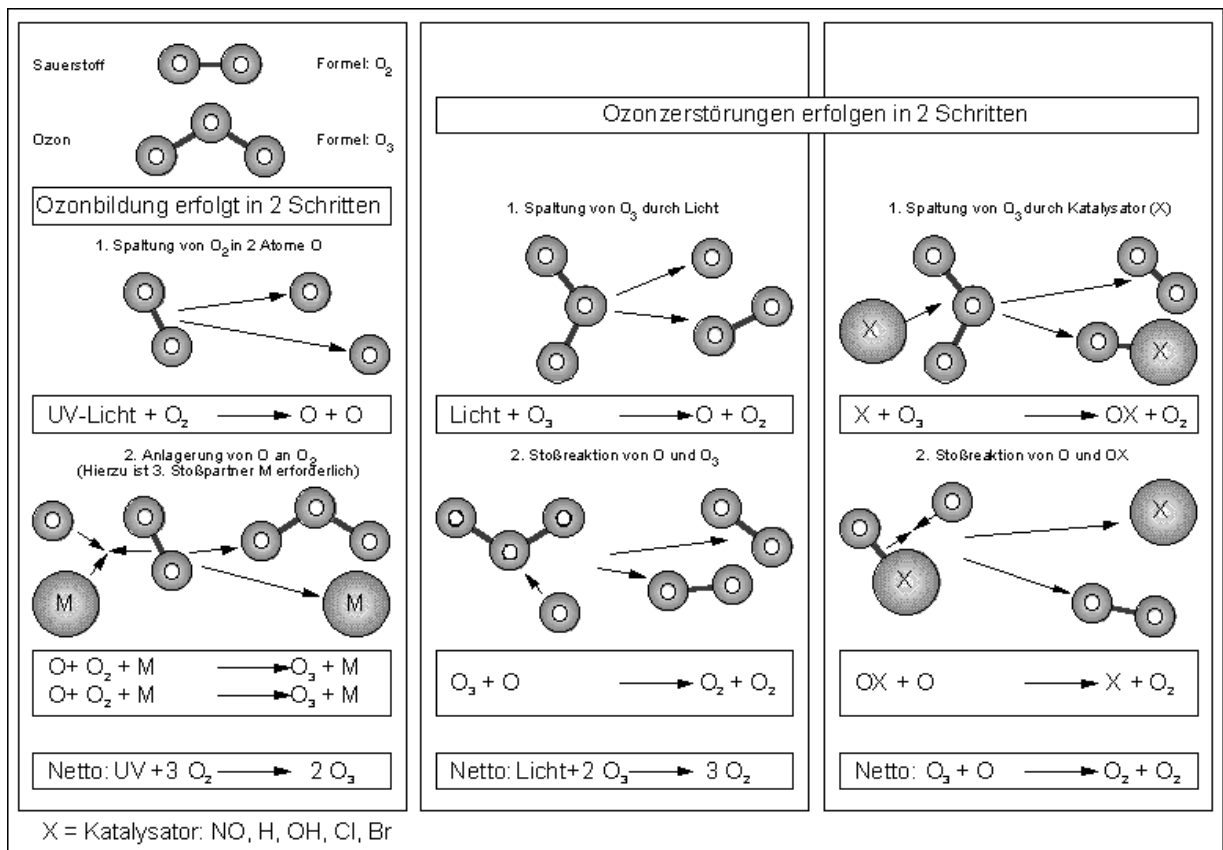


Abb. 3: Schematische Darstellung der Ozonbildung und -zerstörung in einer reinen Sauerstoff-Atmosphäre und die der katalytischen Ozonzerstörung (von links nach rechts; nach Deutscher Bundestag 1990)

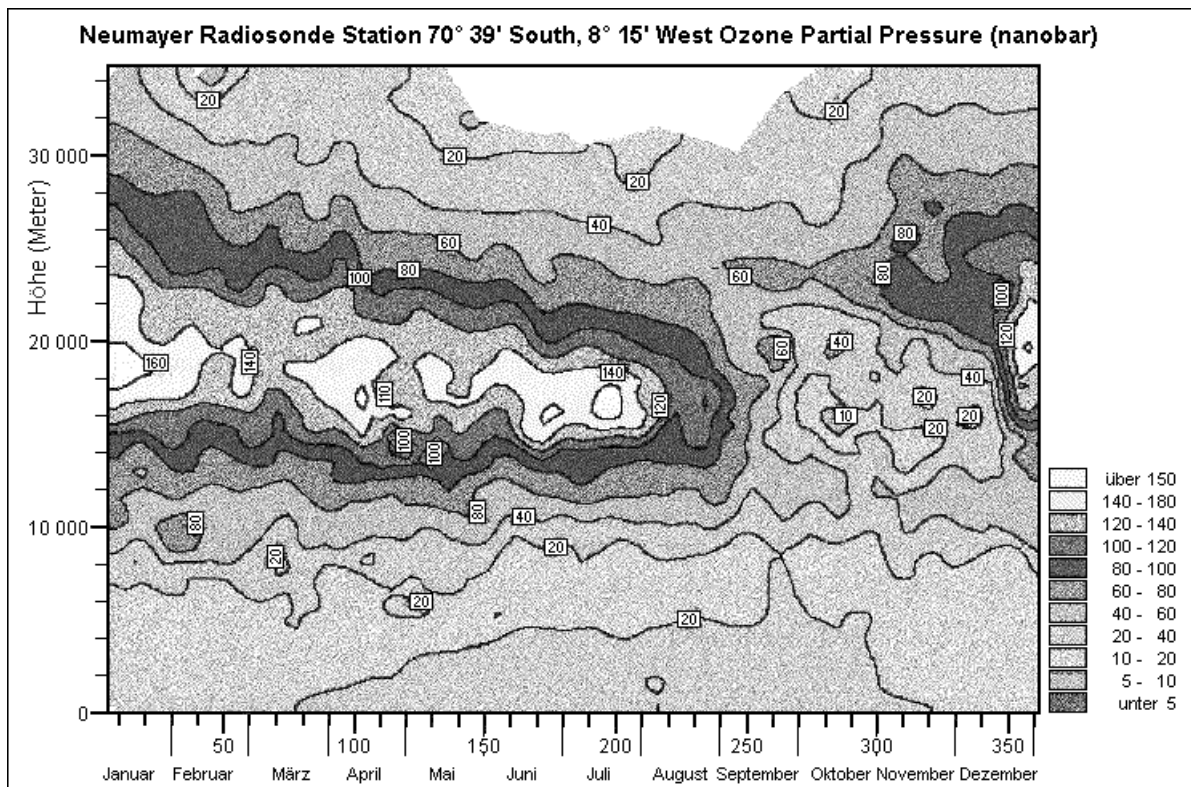
Diese Ozonproduktion steht im Gleichgewicht mit dem natürlichen Ozonabbau, der durch die Absorption von weniger energiereicher Strahlung (Wellenlängen von 200 bis etwa 300 nm und schwächer) bedingt ist. Da Ozon eine geringere Bindungsenergie besitzt als Sauerstoff, entstehen als Abbauprodukte O<sub>2</sub> und ein einzelnes Sauerstoffatom (vgl. Abb. 3). Dieses kann sich mit einem Sauerstoffmolekül wieder zu O<sub>3</sub> verbinden, so daß in der Bilanz der Ozonverlust zunächst gering bleibt. Berechnet man die **globale Ozonverteilung** unter Berücksichtigung allein dieser von Chapman 1930 entdeckten Reaktionen, so erhält man gegenüber der tatsächlich beobachteten Dichte der Ozonschicht in der Stratosphäre etwa 50 % mehr Ozon und eine falsche vertikale Verteilung. Es müssen daher noch andere ozonzerstörende Reaktionen existieren, auf die weiter unten eingegangen wird.

In Höhen über 30 km herrscht photochemisches Gleichgewicht, und die atmosphärischen Transporte spielen für die Ozonverteilung kaum eine Rolle. Die höchsten Ozonwerte werden im Gebiet mit der höchsten Einstrahlung angetroffen, also in Äquatornähe, und nehmen zum Pol hin ab.

In Schichten zwischen 15 und 30 km Höhe wird die Ozonverteilung deutlich von den horizontalen und vertikalen Transportvorgängen beeinflusst. Die mittlere globale Verteilung des Gesamtozons, das zu über 70 % vom stratosphärischen Ozon in dieser Schicht bestimmt ist, zeigt ein Minimum um 250 Dobson-Einheiten (DU) in der Äquatorregion und eine Zunahme zu den Polen hin.

Da in den Tropen durch die starke Wetteraktivität eine aufsteigende Luftbewegung vorherrscht, steigt dort ozonarme Luft von unten her in die Stratosphäre auf. Sie wird von dort in meridionaler Richtung zu den Polen transportiert und sinkt dabei wieder ab. Aufgrund der hohen UV-Einstrahlung findet die größte Ozonproduktion in der tropischen und subtropischen Stratosphäre statt, so daß polwärts aufgrund des Transportvorganges die Ozonwerte auf über 400 DU ansteigen. Da die meridionale Luftbewegung im Spätwinter und Frühling der jeweiligen Hemisphäre am stärksten ausgeprägt ist, sind die Ozonmaxima in den höheren Breiten beider Hemisphären jeweils um diese Jahreszeit zu beobachten. Im jeweiligen Sommer gehen die Gesamtozonwerte zurück und erreichen im Spätherbst ihr Minimum. Als Beispiel für den Jahresgang in unseren Breiten ist in Abbildung 2 der langjährige mittlere Verlauf der Gesamtozonwerte (und die Standardabweichung davon) am Observatorium in Potsdam dargestellt.

Seit mehreren Jahren ist das Frühjahrsmaximum des Ozons in der **Antarktis** mit durchschnittlich über 340 DU einem dramatischen **Rückgang** auf weniger als die Hälfte gewichen. Im antarktischen Frühling 1993 (September/Oktober) sank dort die Gesamtozonmenge großräumig sogar unter 100 DU, ein Effekt, der sich in den Jahren 1994 und 1995 wiederholte. In der Abbildung 4 ist das Einbrechen der Ozonschicht Ende September anhand der dargestellten jahreszeitlichen Variation der vertikalen Ozonverteilung deutlich zu erkennen. Die an der Deutschen Antarktisstation in 70°S mit Hilfe von Ozonsonden gemessenen Konzentrationen in der Ozonschicht von über 140 nbar im Winter gingen schlagartig auf zum Teil unter 10 nbar Ende Oktober zurück. Zu Beginn des Sommers stieg die Ozonschichtdicke wieder auf nahezu normale Werte an. Dies geht auf die einsetzenden Transporte von ozonreicher Luft aus niederen Breiten zurück. Sie sind im Winter und bis zum Beginn des Frühjahrs wegen des stabilen winterlichen Polarwirbels über der Antarktis nahezu unterdrückt. Auf die Ursache des rasanten Ozonabbaus wird noch eingegangen.



**Abb. 4:** Ozonvertikalverteilung in 1995 an der Georg von Neumayer Station (nach Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research; aus dem Internet)

Die als "Ozonloch" bekannte Erscheinung hat auf der **Nordhalbkugel** kein Gegenstück. Dort setzen die meridionalen Transportvorgänge früher ein, weil der über dem Nordpol vorhandene winterliche Polarwirbel früher verschwindet. Allerdings wird auch auf der Nordhalbkugel ein allmählicher **Abbau der Ozonschichtdicke** beobachtet. Er betrug - bezogen auf den Wert zehn Jahre zuvor - Ende der 80er Jahre im Winter über Nordamerika und Europa etwa drei Prozent (vgl. Deutscher Bundestag 1990), in den Wintern 1992 und 1993 mit sieben bis neun Prozent deutlich mehr. Im Sommer ist hier, ebenso wie in den äquatornahen Regionen, der Rückgang geringer. Allerdings ist die am Meteorologischen Observatorium in Potsdam in 1995 gemessene Ozonschichtdicke (vgl. Abb. 2) auch im Sommer gegenüber dem zurückliegenden 30jährigen Mittel deutlich vermindert. Die Abweichung betrug ebenso wie im Sommer 1994 und 1996 etwa minus acht Prozent. Im Hinblick auf den höheren Sonnenstand und damit stärkeren UV-B-Hintergrund ist dies von größerer Bedeutung als gegebenenfalls stärkere Abweichungen im Winterhalbjahr.

### Die anthropogene Zerstörung des Ozons in der Stratosphäre

Seit die beiden amerikanischen Wissenschaftler Molina und Rowland 1974 die Weltöffentlichkeit mit ihrer These von der Zerstörung der Ozonschicht durch von Menschen verursachte Emissionen von Spurengasen alarmierten, ist immer mehr deutlich geworden, daß das komplexe luftchemische Gleichgewicht in der Atmosphäre durch anthropogene Aktivitäten leicht gestört werden kann. Dazu tragen Spurenstoffe bei, die aufgrund ihrer chemischen Trägheit den langen Transport vom Erdboden



bis in die Stratosphäre überstehen oder durch Flugzeuge und Vulkanausbrüche direkt dorthin verbracht werden. Wie der Luftsauerstoff werden auch sie von der energiereichen Sonnenstrahlung in ihre Bestandteile zerlegt, von denen einige massiv in das chemische Gleichgewicht zu Lasten des Ozons eingreifen.

Die bekanntesten durch menschliche Aktivitäten emittierten Spurengase sind die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) und die mit ihnen verwandten Halone. Die aufgrund ihrer chemischen Trägheit industriell vielseitig eingesetzten Stoffe (Kühlmittel, Lösemittel, Treibmittel etc.) sind Kohlenwasserstoffverbindungen, bei denen ein oder mehrere Wasserstoffatome durch Fluor und Chlor bzw. Brom ersetzt wurden. Ihr Ausstoß hat weltweit die beträchtliche Menge von 1 Mio Tonnen pro Jahr (t/a) erreicht. Die einzige bekannte Verbindung aus dieser Klasse von Stoffen mit natürlichem Ursprung ist Methylchlorid, das von den Ozeanen in die Atmosphäre abgegeben wird. Es trägt aber nur zu 10 bis 20 % des Chlorgehalts in der Stratosphäre bei, der für den dortigen Ozonabbau verantwortlich ist.

Eine weitere wichtige Stoffklasse mit sowohl natürlichen als auch anthropogenen Quellen sind die Stickoxide. Sie spielen in Form von Lachgas ( $N_2O$ ) eine Rolle, das sowohl als Folge von bakteriologischen Prozessen im Boden als auch durch die verstärkte Stickstoff-Düngung in die Atmosphäre abgegeben wird. Auch NO als Bestandteil der Flugzeugabgase gilt als ozonabbauender Faktor.

Wasser spielt in der Stratosphäre ebenfalls eine Rolle als ozonabbauende Substanz. Aufgrund der extrem niedrigen Temperaturen am unteren Rand der Stratosphäre gelangen aber nur durch den Flugverkehr und Vulkanausbrüche nennenswerte Wassermengen in die höheren Atmosphärenschichten.

### **Katalytischer Ozonabbau**

Die signifikante ozonabbauende Wirkung der angeführten Spurenstoffe ist ohne den Einfluß energiereicher Sonnenstrahlung tageszeitunabhängig, und sie steht im Gegensatz zu den meist verschwindend geringen Konzentrationen, in denen diese Stoffe in der Atmosphäre vorkommen. Aufgrund der in Abbildung 3 skizzierten katalytischen Abbaureaktionen kann beispielsweise ein FCKW-Molekül unter einer Milliarde sonstiger Luftteilchen für die Zerstörung mehrerer Tausend Ozonmoleküle verantwortlich sein. Die ozonabbauenden Bestandteile der Spurenstoffe - in Abbildung 3 stellvertretend für die verschiedenen Substanzen mit X bezeichnet - liegen nämlich am Ende einer Reaktionskette wieder in ihrer ursprünglichen Form vor und können damit ihr zerstörerisches Werk mehrmals verrichten, bevor sie zum Teil erst nach mehreren Jahren durch andere chemische Reaktionen aus dem Kreislauf entfernt werden.

Der Katalysator greift dabei auf doppelte Weise zu Lasten des Ozons in das chemische Gleichgewicht ein: Zum einen verwandelt er selbst ein Ozonmolekül in Sauerstoff  $O_2$  und bindet das restliche Sauerstoffatom. Zum anderen werden bei dieser Rückbildung von Ozon in Sauerstoff einzelne freie Sauerstoffatome verbraucht, die damit für die Ozonbildung nicht mehr zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 3).

Als Katalysatoren wirken Chlor und Brom, die überwiegend von den FCKW bzw. den Halonen stammen, sowie NO und OH-Radikale. Letztere entstehen aus Wasserdampf, Methan und Wasserstoff und stammen damit überwiegend aus natürlichen Quellen.

Die Einfachheit der bisherigen Darstellung täuscht über die hochgradige Komplexität und Nichtlinearität der luftchemischen Vorgänge in der Stratosphäre hinweg, weil die verschiedenen Reaktionszyklen stark miteinander und in unterschiedlicher Weise gekoppelt sind. Beispielsweise kann bei der Rückreaktion von ClO zu Cl statt eines O-Atoms als Partner auch BrO, NO oder OH beteiligt sein. Eine weitere wichtige Rolle spielen heterogene Reaktionen, bei denen die ozonabbauenden Stoffe in ungefährliche Substanzen überführt werden oder umgekehrt aus ozonunschädlichen Reservoirverbindungen die Katalysatorsubstanzen wieder aktiviert werden. Dies ist für die Erklärung des plötzlichen Abbaus der Ozonschicht im Frühling über der Antarktis von ausschlaggebender Bedeutung.

### **Heterogene Reaktionen**

Ursache dafür sind chemische Reaktionen an stratosphärischen Wolken. Sie bestehen aus Eis- und Salpetersäurepartikel, an denen das Chlor aus Verbindungen zurückgebildet wird, in denen es zuvor gespeichert und dem Ozonabbauzyklus entzogen war. Die Wolken entstehen nur bei Temperaturen

unter minus 80 °C und werden überwiegend im Bereich des stabilen winterlichen Polarwirbels über der Antarktis beobachtet. Zur Reaktivierung des Chlors ist außerdem energiereiche Sonnenstrahlung notwendig, die erst am Ende der Polarnacht, also zu Beginn des antarktischen Frühlings, zur Verfügung steht. In diesem Zeitraum wird das Chlor in großen Mengen aus den im Winterhalbjahr gebildeten Reservoirsubstanzen freigesetzt. Da die Zufuhr von ozonreicher Luft aus niederen Breiten durch den Polarwirbel bis zum Frühlingsende unterdrückt ist, nimmt der massive Ozonschwund über der Antarktis seinen Lauf. Durch die im Sommer einsetzenden Transportvorgänge wird das Defizit an Ozon wieder weitgehend ausgeglichen (vgl. Abb. 4).

Auf der Nordhalbkugel existiert ein vergleichbarer großer und länger bestehender Polarwirbel nicht, so daß die erforderlichen tiefen Temperaturen nur selten oder kurzzeitig erreicht werden und meridionale Luftströmungen häufiger vorkommen. Allerdings stellt sich die Frage, ob durch den zunehmenden Treibhauseffekt eine Abkühlung der Stratosphäre und damit der verstärkten Bildung von stratosphärischen Wolken auch in der Nordhemisphäre Vorschub geleistet wird. Dies würde zu einem verstärkten Abbau des Ozons durch heterogene Reaktionen führen. Im Februar und März 1996 sind in 20 bis 24 km Höhe solche polaren stratosphärischen Wolken mit Hilfe des von der FU Berlin betriebenen LIDAR-Gerätes erstmals in mitteleuropäischen Breiten entdeckt worden. Gleichzeitig gingen die Werte der Ozonschichtdicke aus Potsdam auf etwa 250 DU zurück - der langjährige Mittelwert beträgt etwa 370 DU. Der Einbruch hielt aber nur wenige Tage an.

### **Weitere Einflußfaktoren**

Wie eingangs erwähnt, beeinflussen auch Vulkanausbrüche die thermische Struktur und die Chemie in der oberen Atmosphäre. Aufgrund der hohen Intensität der bei einem Ausbruch freigesetzten Energie werden Material und Gase bis in die Stratosphäre geschleudert, die von der chemischen Zusammensetzung der frühen Erdkruste geprägt sind und sich deshalb sehr stark von der heutigen Zusammensetzung der Atmosphäre unterscheiden. Sie stehen im Verdacht, direkt und indirekt die Entstehung der oben beschriebenen polaren stratosphärischen Wolken zu begünstigen. Außerdem wird das ozonabbauende Chlor in Form von Salzsäure direkt in die Stratosphäre gebracht. Wie Meßergebnisse aus einem groß angelegten Forschungsprogramm 1993 über dem Nordpolargebiet zeigten, wurden auch verstärkt Staubteilchen gefunden, die vom Ausbruch des Pinatubo 1991 stammten und sich über weite Teile der Hemisphäre ausbreiteten. Allerdings gab es keine räumliche Übereinstimmung zwischen dem Vorkommen der Vulkanstäube und den im Winter 1992/93 gehäuft aufgetretenen stratosphärischen Wolken im Bereich des Nordpolarwirbels. Die Verminderung der Ozonschicht zu dieser Zeit kann damit nicht unmittelbar auf den Vulkanausbruch zurückgeführt werden. Im Gegensatz zu den relativ seltenen Emissionen durch Vulkanausbrüche ist die Ozonschicht nicht in der Lage, sich von den sie dezimierenden kontinuierlichen FCKW-Emissionen zu erholen.

Dies gilt auch für die mögliche Zunahme des Überschallflugverkehrs in der Stratosphäre, durch den unmittelbar Stickoxide und Wasserdampf emittiert werden, die direkt und indirekt zum Ozonabbau beitragen.

### **Zukünftige Entwicklung**

Welche Auswirkungen eine weitere Zunahme der Spuregasemissionen auf die Ozonschicht in ferner Zukunft haben wird, läßt sich aufgrund der zahlreichen Einflußgrößen nur mit Hilfe von mathematischen Modellrechnungen abschätzen.

Werden bei der langfristigen Folgenabschätzung einer ungebremsten FSKW-Emission auch die wichtigen heterogenen Reaktionen, die zur Entstehung des antarktischen Ozonlochs führen, berücksichtigt, kann die Zunahme der UV-Strahlung am Boden im globalen Mittel 20 bis 25 % erreichen (vgl. Deutscher Bundestag 1990).

### **Schädigung des Ökosystems**

Da der als UV-B bezeichnete Bereich kurzweiliger Strahlung (290 bis 330 nm) eine zellschädigende Wirkung entfaltet, wirkt sich eine signifikante Steigerung der Intensität unmittelbar negativ auf die Tier- und Pflanzenwelt und auch auf den Menschen aus.

Mittelbar ist der Mensch als letztes Glied in einer langen Nahrungskette von einem möglichen **Rückgang des Pflanzenwachstums** betroffen. Auf diesem Umstand beruht auch ein wichtiger, sich wechselseitig verstärkender Zusammenhang zwischen Ozonabbau und globaler

Temperaturerhöhung. Eine höhere UV-Dosis beeinträchtigt die Photosyntheseleistung von Pflanzen, insbesondere die des Phytoplanktons im Ozean. Es entzieht durch seinen Stoffwechsel der Atmosphäre ähnlich viel Kohlendioxid wie alle Landpflanzen zusammen. Würde die zunehmende UV-B-Strahlung beispielsweise zehn Prozent des Planktons abtöten, würde jährlich fast soviel Kohlenstoff weniger aus der Atmosphäre entfernt, wie die gesamte Menschheit durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe an sie abgibt. Das Ergebnis wäre eine weitere **Verstärkung des Treibhauseffektes** und damit eine weitere Erwärmung der Erdatmosphäre.

Eine zunehmende UV-B-Strahlungsintensität kann unmittelbar zur Gefahr werden, da größere Strahlungsmengen beim Auftreffen auf die Haut eine **karzinogene Wirkung** entfalten und darüber hinaus **Schädigungen der Augenlinse** (Grauer Star) verursachen können. Weil die Schädigung mit der Kürze der Wellenlänge zunimmt und bei einer Schwächung der Ozonschicht gerade der kurzwellige Anteil des UV-Lichts stärker wird, ist bei einer Ozonschichtausdünnung von ein Prozent mit einer Zunahme der Hautschädigung um 1,7 % zu rechnen. Aufgrund der starken jahreszeitlichen Schwankung der UV-Intensität, die im Sommer das Vier- bis Fünffache der im Winter üblichen Werte bei wolkenlosem Himmel beträgt, spielt für die Beurteilung einer möglichen zusätzlichen Gefährdung vor allem die Ozonschichtdicke im Sommerhalbjahr eine Rolle.

Auch die Variation der UV-Strahlung mit der geographischen Breite ist wegen des unterschiedlich langen Weges der Strahlung durch die Atmosphäre recht groß. Die Sonnenstrahlung ist im Sommer bei wolkenlosem Himmel in den Tropen um 40 bis 100 % intensiver als in unseren Breiten. Deshalb ist der deutliche Anstieg der Hautkrebskrankungen auch auf die Reiselust einer zunehmenden Zahl von Menschen zurückzuführen, deren Haut genetisch nur an die geringeren Strahlungsintensitäten in höheren Breiten angepaßt ist und der intensiveren Sonnenstrahlung in den äquatornäheren Urlaubsgebieten ausgesetzt wird.

Spektral hochaufgelöste Messungen der UV-B-Strahlung, wie sie für die Beurteilung der Schädigung erforderlich sind, liegen aufgrund der späten Entwicklung der entsprechenden Meßtechnik erst seit einigen Jahren vor. So wird erst seit Juli 1993 in Deutschland an insgesamt sieben Meßstellen des Umweltbundesamtes und des Deutschen Wetterdienstes der UV-B-Bereich spektral so hoch aufgelöst registriert, daß die mit der Frequenz stark variierende Schädigung als sogenannte "biologisch gewichtete UV-B-Strahlung" berechnet werden kann.

Vergleiche solch neuartiger Messungen zwischen Deutschland und einem Ort ähnlicher geographischer Breite auf der Südhemisphäre in Neuseeland haben dort eine 1,4- bis 1,8fach höhere UV-B-Strahlung ergeben. Dabei ist ein Faktor von 1,3 bis 1,6 allein auf den Abbau der Ozonschicht auf der Südhalbkugel zurückzuführen (vgl. Seckmeyer und McKenzie 1992). Messungen in Kanada ergaben zwischen 1989 und 1993 eine Zunahme der Sonnenbrand erzeugenden UV-B-Strahlung vom fünf Prozent im Winter und zwei Prozent im Sommer (vgl. Kerr und McElroy 1993). Eine Zunahme der DNA-schädigenden Strahlung von sieben Prozent pro Jahrzehnt für die Regionen zwischen 45 und 55° N konnte aus Satellitenmeßdaten der vergangenen 15 Jahre abgeleitet werden (vgl. Herman et al. 1996). Die Zunahme des Ozons und des Staubgehalts in den unteren Atmosphäreschichten in Europa und den USA könnte bisher einen dämpfenden Effekt auf die Zunahme der UV-B-Strahlung ausgeübt haben.

### **Ozonproduktion und -zerstörung in der Troposphäre**

Die im Vergleich zu den bodennahen Werten bis zu 100mal höheren Ozonkonzentrationen in der Stratosphäre (vgl. Abb. 1) tragen aufgrund des vertikalen Austausches dazu bei, daß Ozon natürlicherweise auch in den bodennahen Luftschichten vorkommt. Allerdings ist dieser Beitrag begrenzt, da je nach geographischer Breite in 8 - 15 km Höhe zwischen beiden Stockwerken der Atmosphäre eine Sperrschicht existiert. Diese sogenannte Tropopause bildet den unteren Rand einer den Globus umspannenden Temperaturinversion, d. h. die Temperatur nimmt nicht wie sonst mit der Höhe ab, sondern zu. Diese Zunahme ist auf die Aufheizung der Luft durch die oben beschriebene Filterwirkung der Ozonschicht zurückzuführen. Sie verhindert, daß sich in größerem Maße die wärmere und relativ gesehen leichtere ozonreiche Stratosphärenluft mit der unter ihr liegenden kälteren Troposphärenluft vermischt. Die Amboßform von hochreichenden Gewitterwolken, die sich an der Tropopause wie an einer unsichtbaren Zimmerdecke auszubreiten scheinen, kommt dadurch zustande.

Der **vertikale Transport** von Ozon aus der stratosphärischen Ozonschicht nach unten ist daher nur relativ schwach ausgeprägt. Er findet vorwiegend im Bereich von Tiefdruckgebieten statt. Sein Beitrag zu den erhöhten Ozonkonzentrationen, die bei Hochdruckwetterlagen mit hoher Sonneneinstrahlung vorkommen, ist demzufolge sehr gering. Er ist zu Beginn des Frühlings am stärksten ausgeprägt, weil

zu dieser Zeit sowohl die Ozonschicht in der Stratosphäre als auch die Tiefdrucktätigkeit im Mittel ein Maximum erreichen.

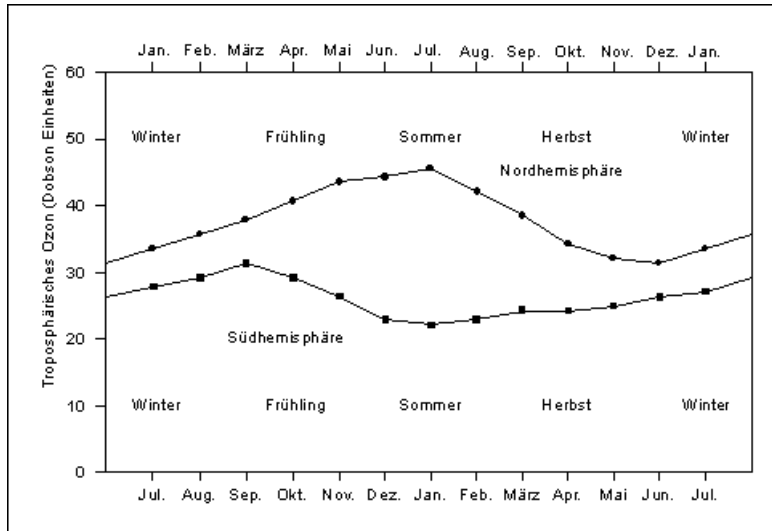


Abb. 5: Jahresgang der troposphärischen Ozonkonzentration beider Hemisphären (35 - 45 °C) (nach Deutscher Bundestag 1992)

Der in Abbildung 5 gezeigte **mittlere Jahresgang** der Ozonkonzentration auf der Südhemisphäre zeigt wie erwartet das Maximum im Frühjahr. Einen qualitativ gleichen Verlauf zeigen historische Ozonmessungen aus dem vorigen Jahrhundert in der Nähe von Paris (vgl. Volz-Thomas et al. 1988). In der Südhemisphäre und in vorindustrieller Zeit auch in Europa ist bzw. war der Vertikaltransport von Ozon aus der Stratosphäre der hauptsächliche Einflußfaktor für das Ozonniveau in Bodennähe. Der heute registrierte Jahresgang auf der Nordhalbkugel mit einem Maximum im Hochsommer zeigt, daß ein weiterer sehr gewichtiger Faktor zur Bildung des bodennahen Ozons hinzugekommen ist. Er geht überwiegend auf die aus anthropogenen Verbrennungsprozessen stammenden Emissionen von Schadstoffen zurück, die auf der Südhemisphäre relativ gering sind.

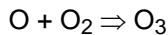
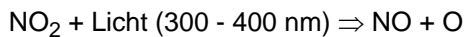
Wie hoch das durch natürliche Prozesse verursachte bodennahe Ozonniveau in unseren Breiten ist, kann nur ungenau abgeschätzt werden, da es kaum Meßreihen gibt, die von anthropogen gebildetem Ozon unbeeinflusst bleiben. Aufgrund von Messungen auf Bergstationen (vgl. Schurath 1984), mit Ozonsondenaufstiegen und Meßreihen aus industriefernen Gegenden (vgl. Logan 1985) liegt dieser Anteil zwischen 50 und 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ähnliche Werte werden auf dem Funkturm in Frohnau in 324 m Höhe erreicht, wenn frische, saubere Polarluftmassen den Berliner Raum von der Nordsee her erreichen.

Das in Abbildung 1 gezeigte schematische Ozonprofil mit einem stetigen Rückgang des Ozons bei abnehmender Höhe ist durch den **natürlichen Abbau des Ozons** auf seinem Weg zur Erdoberfläche und am Boden durch Kontakt mit Materialien bedingt. Dieser Effekt spiegelt sich im Unterschied der Ozonmeßwerte an der Meßstelle Grunewald im Bestand in 4,5 m Höhe und 10 m über Bestandeshöhe wider (vgl. Abb. 7).

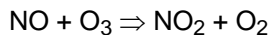
Darüber hinaus existieren weiterhin vorwiegend **anthropogen verursachte Abbauprozesse**. Ozon reagiert als starkes Oxidationsmittel mit anderen, als Schadstoffe zu bezeichnenden, Substanzen und übernimmt dabei eine wichtige Reinigungsfunktion in der Atmosphäre. So wird beispielsweise das Schwefeldioxid durch Ozon in Sulfat und damit in feinen Schwebstaub verwandelt, der sich entweder am Boden ablagert oder als saurer Regen ausgewaschen wird. Noch wichtiger ist in diesem Zusammenhang die Reaktion von Ozon mit Stickoxiden. Sie werden als ein Endprodukt von nahezu allen Verbrennungsprozessen als Stickstoffmonoxid ausgestoßen, das sofort mit Ozon reagiert. Deshalb ist in den meisten Fällen innerhalb der Ballungsgebiete und Industrieregionen, also dort, wo Schadstoffe und insbesondere NO emittiert werden, eine geringere Ozonkonzentration vorzufinden. Die Zahl der Überschreitungen des EG-Informationswertes von 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ist in vielen sogenannten Reinluftgebieten und am Rand der Städte ähnlich hoch oder sogar höher als in den Zentren der Ballungsgebiete (vgl. UBA 1996).

Um diese häufigen Überschreitungen der Schwellenwerte zu erreichen, bedarf es eines zusätzlichen **Bildungsprozesses für Ozon am Boden**. Die Voraussetzung dafür ist wie für die beschriebene Entstehung in der Stratosphäre das Vorhandensein von freien Sauerstoffatomen. Allerdings ist die Spaltung von Sauerstoffmolekülen in der unteren Atmosphärenschicht mangels energiereicher

Strahlung nicht möglich. Stattdessen steht als Lieferant der Sauerstoffatome das Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) zur Verfügung, der einzige Stoff, der schon bei der weniger energiereichen Strahlung in Erdbodennähe photolysiert werden kann und einzelne Sauerstoffatome liefert:



Global betrachtet stammen 60 % des an die Atmosphäre abgegebenen Stickoxids aus anthropogenen Quellen. Der übrige Teil ist vorwiegend Ergebnis mikrobieller Prozesse im Boden (vgl. Deutscher Bundestag 1990). Im hochindustrialisierten Mitteleuropa spielt dieser Teil gegenüber den aus den vielfältigen Verbrennungsprozessen stammenden Stickoxidgehalten kaum eine Rolle. Dabei werden jedoch fast 90 % der Stickoxide als Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) abgegeben, das erst durch oxidierende Prozesse zu Stickstoffdioxid umgewandelt werden muß. Wie erwähnt spielt auch Ozon selbst eine wichtige Rolle, da es  $\text{NO}$  in  $\text{NO}_2$  überführt und dabei abgebaut wird:



In der Nähe von Stickoxidquellen ist dies die wichtigste Abbaureaktion für Ozon. Der Abbau läuft aufgrund der schnellen Reaktionszeit innerhalb von Sekunden und Minuten ab.

Die in der Nähe der Ballungsgebiete stattfindende Bildung von Ozon aus der Photolyse von  $\text{NO}_2$  wird durch die Reaktion mit Stickstoffmonoxid teilweise kompensiert. Da aber auch dort manchmal hohe Ozonwerte auftreten, muß es zusätzliche Prozesse geben, die frisch emittiertes  $\text{NO}$  in ozonbildendes  $\text{NO}_2$  überführen, ohne daß dabei Ozon als Oxidationsmittel wirkt und abgebaut wird.

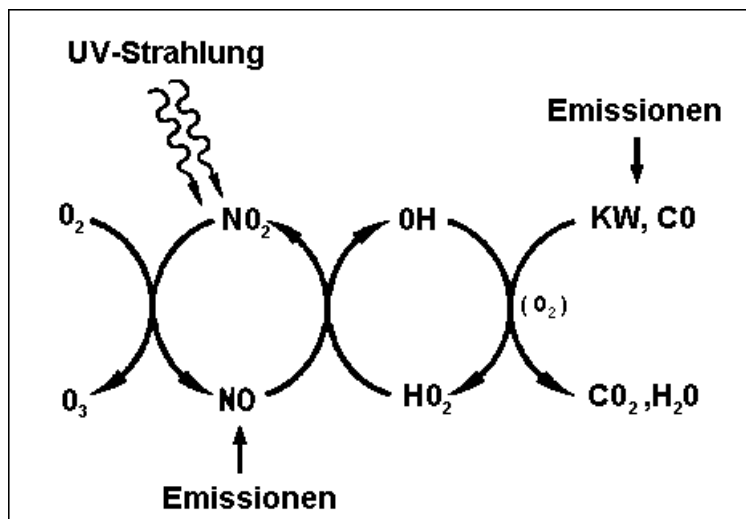


Abb. 6: Schematische Darstellung der photochemischen Ozonbildung in der Troposphäre (Volz-Thomas et al. 1990).

Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein von Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und verschiedener reaktiver Kohlenwasserstoffverbindungen ( $\text{KW}$ ), die zusammen mit  $\text{OH}$ - und Peroxyradikalen ( $\text{HO}_2$ ) innerhalb mehrfacher und komplizierter Reaktionsschemata die Oxidation von  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  ohne Ozonverbrauch bewirken und damit das chemische Gleichgewicht in Richtung Ozonbildung verschieben. Dabei ist es gerade die gleichzeitige Emission von Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden, die bei entsprechend hoher Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur die Bildung hoher Ozonkonzentrationen ermöglicht.  $\text{CO}$  und Kohlenwasserstoffe wirken als Brennstoff für photochemische Ozonbildung. Radikale ( $\text{OH}$  und  $\text{HO}_2$ ) und Stickoxide ( $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$ ) spielen die Rolle von Katalysatoren, ohne die kein Ozon gebildet wird (vgl. Abb. 6). Den notwendigen Antrieb leistet die UV-Strahlung bis 400 nm.

Die Geschwindigkeit, mit der diese Bildungsreaktionen ablaufen, ist sehr unterschiedlich und hängt hochgradig nichtlinear von den meteorologischen Bedingungen und der Konzentration und Zusammensetzung der beteiligten Vorläufersubstanzen ab. Eine Ursachenanalyse hoher Ozonkonzentrationen allein aus den Meßverläufen ist deshalb schwer möglich. Es wird daher auf die Möglichkeit zurückgegriffen, den Zusammenhang zwischen Emission, meteorologischen Bedingungen und Ozonkonzentration durch Modellrechnungen aufzuhellen, in denen die chemischen Prozesse und atmosphärischen Transportvorgänge simuliert werden (vgl. Karte 03.06.8). Anhand der Meßverläufe von Ozon ist immerhin festzustellen, daß die Bildung von Ozon, verglichen mit seiner Zerstörung durch  $\text{NO}$ , relativ langsam abläuft, mit einer Zeitskala von mehreren Stunden bis hin zu Tagen.

Trotz seiner Reaktionsfreudigkeit bleibt Ozon, wie zahlreiche Messungen mit Flugzeugen, auf Bergstationen und nicht zuletzt an der Frohnauer Turmmeßstelle zeigen (vgl. Abb. 7), in der freien Atmosphäre über mehrere Tage erhalten. Im Laufe einer hochsommerlichen Wetterlage mit starker Sonneneinstrahlung und photochemischer Ozonbildung können sich daher in den bodennahen Luftschichten hohe Ozonkonzentrationen bilden. Außerdem bleibt im Bereich von Hochdruckgebieten aus dynamischen Gründen auch am Nachmittag die vertikale Durchmischung auf die unteren 2 000 m beschränkt, was die Anreicherung von Ozon begünstigt.

Nachts bildet sich bei klarem Himmel durch Abkühlung am Boden eine Temperaturinversion, die den vertikalen Luftaustausch fast gänzlich zum Erliegen bringt. Der Rückgang der Ozonwerte findet daher nur in den unteren 100 m in Bodennähe statt. In der Schicht darüber bleibt das höhere Ozonniveau vom vergangenen Tage fast vollständig erhalten. Es wirkt am nächsten Morgen, wenn die Sonne die Kaltluft am Boden erwärmt hat und der vertikale Luftaustausch in Gang kommt, als Ozonreservoir, so daß die Ozonkonzentration auch am Boden rasch ansteigt.

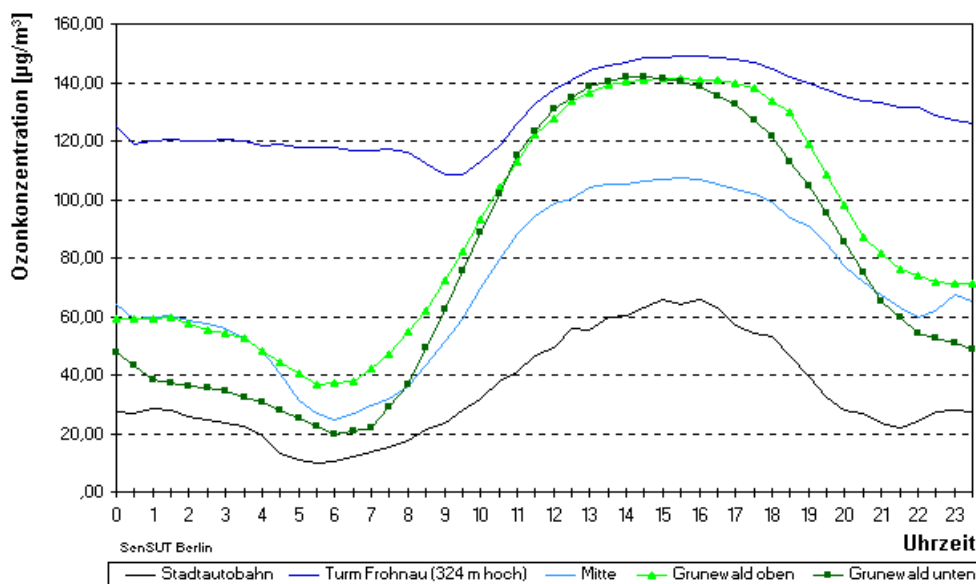


Abb. 7: Mittlerer Ozon-Tagesgang an BLUME-Stationen an Sommertagen (Tage mit Temperaturen über 25 °C) in den Jahren 1994 und 1995

Anhand der für ozonträchtige Tage typischen Tagesgänge an verschiedenen BLUME-Meßstationen (vgl. Abb. 7) lassen sich diese Vorgänge anschaulich beschreiben.

Die Form der Tagesgangkurven an den drei Bodenstationen Grunewald, Mitte und Autobahn sind in erster Näherung aus der Überlagerung des Ganges der Stickoxidemissionen durch den Kfz-Verkehr und der Austauschbedingungen der Atmosphäre zu erklären. Das Minimum des Ozons tritt zwischen 5.00 und 7.00 Uhr in den Morgenstunden ein. Zu dieser Zeit ist der Kfz-Verkehr schon recht stark, die nächtliche Bodeninversion aber immer noch gut ausgeprägt und daher kaum ein Abtransport der ozonzerstörenden Stickoxide nach oben bzw. die Zufuhr ozonreicher Luft von oben möglich. Der Ozonabbau ist auch am Stadtrand wirksam, weil die Schadstoffe aus der Stadt auch dorthin transportiert werden - so auch z.B. von der AVUS zur 1,5 km entfernten Meßstelle Grunewald. Dadurch ergibt sich dort ein stärkerer Ozonabbau am Boden und somit niedrigere Werte als über den Baumwipfeln. Allerdings ist dieser Unterschied auch eine Auswirkung der ständigen Abbaureaktionen des Ozons mit den Materialien am Boden und mit reaktiven Kohlenwasserstoffverbindungen, die von den Bäumen insbesondere nachmittags abgegeben werden. Letzteres könnte eine Begründung dafür sein, daß diese vertikale Ozondifferenz selbst am Nachmittag ab 16.00 Uhr, zur Zeit des guten vertikalen Austauschs, sichtbar ist.

Völlig anders sind die Verhältnisse in 324 m Höhe, die durch das Meßgerät am Funkturm in Frohnau dokumentiert werden. Dort verbleibt das Ozonniveau bei etwa  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , weil diese Luftschicht nachts von ozonabbauenden Prozessen am Boden isoliert ist. Dies ändert sich am Vormittag, wenn die Sonne die Sperrschicht am Boden soweit erwärmt hat, daß der vertikale Luftaustausch in Gang kommt. Dann wird die Turmmeßstelle vorübergehend von der vom Boden aufsteigenden schadstoffbelasteten Luft tangiert, in der geringere Ozonkonzentrationen vorhanden sind. Das Minimum am Turm tritt meist zwischen 9.00 und 10.00 Uhr vormittags auf.

Zu dieser Zeit ist die Ozonkonzentration an den anderen Stationen bereits deutlich angestiegen, weil Ozon aus der darüberliegenden Speicherschicht zum Boden transportiert wird. Die weitere Verdünnung der ozonzerstörenden Schadstoffe und die photochemischen Prozesse, angetrieben durch die intensive Sonneneinstrahlung, haben die Ozonkonzentration in der gesamten unteren Atmosphäre weiter ansteigen lassen.

In der Nähe von Stickoxidquellen, also insbesondere an der Stadtautobahn und etwas schwächer an der Station Mitte (Parochialstraße), bleibt die ozonzerstörende Wirkung der frisch emittierten Schadstoffe auch am Nachmittag deutlich spürbar. Allerdings wirkt sich die Zunahme des Verkehrs zur Zeit der Rush-Hour am späten Nachmittag zunächst kaum aus. Der horizontale und vertikale Luftaustausch sorgen für eine relativ schnelle Verdünnung der ozonabbauenden Schadstoffe. Erst am Abend, wenn der Wind und auch der vertikale Transport schwächer werden, geht die Ozonkonzentration stark zurück, beschleunigt durch die Stickoxidemission des anhaltenden Kfz-Verkehrs am Abend. Davon unberührt ist die Ozonkonzentration oberhalb der bodennahen Kaltluftschicht. Es bildet mit dem nur geringfügig abnehmenden Ozonniveau in Turmhöhe ein Reservoir für einen weiteren Anstieg am nächsten Tag.

Da in Höhen über 300 m wegen der fehlenden Bodenreibung auch bei Schönwetterlagen ein merklicher Wind weht, ist mit einem **Transport von Ozon** auch über größere Entfernungen zu rechnen. Dies ist auch der Grund dafür, daß erhöhte Ozonkonzentrationen keine räumlich eng begrenzten Phänomene sind, sondern genauso wie entsprechend hohe Lufttemperaturen meist weiträumig vorkommen (vgl. Karte 03.06.4).

In diesem Zusammenhang soll kurz auf den **langzeitlichen Trend der Ozonkonzentration** eingegangen werden. Aus Abbildung 8 ist ersichtlich, daß in Berlin der mittlere Höchstwert an Sommertagen keinen signifikanten Trend anzeigt.

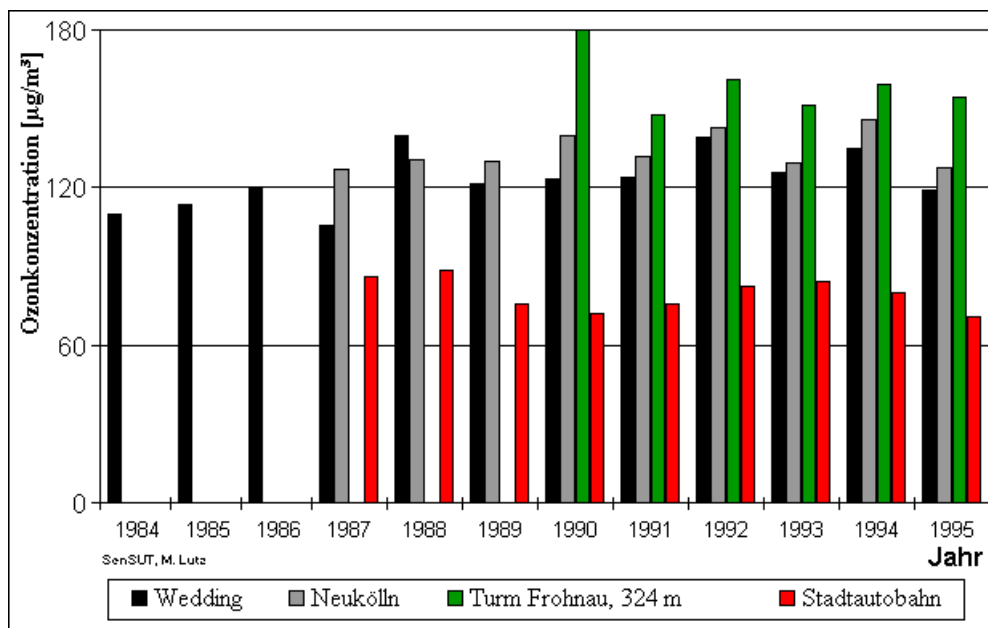


Abb. 8: Mittelwert der täglichen Ozonmaxima an Sommertagen (Tage mit Höchsttemperaturen über 25 °C)

Allerdings ist an anderen Stationen, insbesondere fernab von Ballungsgebieten, z.B. auf der Zugspitze, von einer ein- bis zweiprozentigen Zunahme der Ozonkonzentration pro Jahr seit Mitte der 70er Jahre auszugehen (vgl. Deutscher Bundestag 1990). Diese Zunahme der großräumigen Hintergrundkonzentration ist wahrscheinlich auf den Anstieg insbesondere der Verkehrsemissionen in den 70er und 80er Jahren zurückzuführen. Auch an ländlichen Stationen in Baden-Württemberg ist ein ansteigender Trend zu verzeichnen, der sich jedoch in den letzten drei Jahren nicht fortzusetzen scheint (vgl. UBA 1996).

## Karte 03.06.2: Verteilung der Ozon-Maxima 1995

Die Karte zeigt die Verteilung der höchsten Ein-Stunden-Maximalwerte 1995 an allen Meßstationen der Bundesländer und des Umweltbundesamtes. Um eine flächendeckende Darstellung zu erhalten, wurden die Werte zwischen den einzelnen Stationen räumlich interpoliert.

Mit Ausnahme einiger Gebiete in Südbayern und im Osten Deutschlands wurden überall Werte über  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  registriert. Insbesondere im Südwesten und Westen gibt es auch Regionen, wo Konzentrationen von über  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen wurden. Diese Gebiete finden sich meist in der Nähe industrieller und dichtbesiedelter Ballungsgebiete, wie dem Ruhrgebiet, dem Rhein-Main-Gebiet um Frankfurt, der Region Mannheim und Karlsruhe sowie dem Stuttgarter Raum, wo der Maximalwert von  $297 \mu\text{g}/\text{m}^3$  auftrat (vgl. UBA 1996).

Es besteht demnach ein deutliches Belastungsgefälle von Westen und Südwesten in Richtung der östlichen Landesteile. Allerdings korrespondierte diese Situation in den vergangenen Sommern meist mit einer ähnlichen Verteilung der Sonnenscheindauer und der Temperatur, so daß damit eine rein klimatologische Erklärung nahelag. Im Sommer 1995 war die Verteilung der Tageshöchsttemperatur in Deutschland jedoch sehr gleichmäßig (vgl. Bruckmann et al. 1994 und FU Berlin 1995). Im Nordosten wurden sogar gebietsweise mehr Sonnenstunden gezählt als im Westen. Allerdings lag in den Hochsommermonaten der Schwerpunkt hohen Luftdrucks oftmals nordwestlich und nördlich von Deutschland, das bei ansonsten hochsommerlichen Bedingungen häufig im Bereich einer nordöstlichen bis östlichen Luftströmung lag. Dies birgt gerade für den Nordosten den Vorteil der Zufuhr von Luftmassen, die Gebiete mit relativ geringer Emissionsdichte ozonbildender Substanzen überstrichen haben (z.B. Baltikum, Nordhälfte Polens). Das führte schon in der Vergangenheit zu relativ niedrigen Ozonwerten im Berliner Raum (vgl. Lutz 1994), obwohl für die Ozonbildung günstige Wetterverhältnisse vorherrschten. Der Westen und Südwesten sind in diesen Fällen benachteiligt, weil sich auf dem weiteren Weg bis dorthin die Luft bereits stärker mit ozonbildenden Stoffen aufgeladen hat. Zusammen mit dem durch die Orographie (z.B. Oberrheingraben) bedingten lokalen Beitrag kommen daher höhere Ozonniveaus zustande. Die Frage, welchen Einfluß die Schadstoffemissionen vor Ort auf die Ozonbildung haben, wird bei der Beschreibung der Ergebnisse der FluMOB-Meßkampagne behandelt.

### Karte 03.06.3: Überschreitung von Ozon-Schwellenwerten 1995

In dieser Karte kommt die mittlere räumliche Verteilung der Ozonbelastung in Berlin zum Ausdruck, dargestellt als Häufigkeit der Überschreitung von Schwellenwerten an den einzelnen Stationen des Berliner Luftgütemeßnetzes. Angegeben ist die Anzahl der Halbstundenmittel über dem "Maximalen Immissionskonzentrationswert" (MIK) nach VDI 2310 von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Zusätzlich sind die Tage mit Überschreitungen der EG-Schwellenwerte zur Information der Bevölkerung und zum Schutz der Vegetation dargestellt (vgl. Tab. 1).

Um die Abhängigkeit der Ozonbelastung von der Stickoxidemission vor Ort deutlich zu machen, wurden die Überschreitungshäufigkeiten mit der Verteilung der Stickoxidemission aus dem Verkehr hinterlegt. Beim Vergleich der beiden Angaben wird deutlich, daß hohe Stickoxidemissionen in der Umgebung einer Meßstelle zu deutlich weniger Überschreitungen der Ozonschwellenwerte führen. So wird an der Stadtautobahn der MIK-Wert 20- bis 40mal seltener überschritten als an den Stationen am Stadtrand, wo im Sommer der Wert von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Ozon an über 300 Stunden gemessen wurde. Die Belastung an den übrigen, nicht unmittelbar an Hauptverkehrsstraßen liegenden Meßstellen in der Innenstadt, liegen mit 70 bis 200 Stunden Überschreitungsdauer dazwischen. Die jeweiligen Überschreitungszahlen an den Meßstellen sind in erster Näherung auch auf andere Stadtgebiete mit vergleichbaren Stickoxidemissionen übertragbar.

Für die Überschreitung des EG-Schwellenwertes von  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ergibt sich ein ähnliches Bild. An den innerstädtischen Wohngebietsmeßstellen kam dies überhaupt nicht bzw. in Neukölln dreimal vor, während am Stadtrand bis zu neun Überschreitungen auftraten.

In den Stadtrandgebieten und damit im Einwirkungsbereich liegen aber in der Regel die Berliner Wälder, wo die Belastung an der Waldmeßstelle Grunewald mehrere in der Tabelle 1 aufgeführten Richt- und Leitwerte zum Schutz der Vegetation übersteigt. So wurde z.B. der Tagesmittelwert der EG-Richtlinie von  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  an 75 Tagen an der Probenahme in 10 m Höhe über den Bäumen und an 57 Tagen in 4,5 m Höhe im Wald, wo Ozon sich an den Pflanzenteilen abbauen kann, überschritten. Damit ist aber zugleich eine pflanzenschädliche Wirkung verbunden, die zudem einen wesentlichen Bestandteil für die Beeinträchtigung des gesamten Waldökosystems darstellt (vgl. Ergebnisse des Monitoringprogramms Naturhaushalt/Ökologische Dauerbeobachtung Waldökosysteme).

### Karten 03.06.4, 03.06.5, 03.06.6 und 03.06.7: Ergebnisse der FluMOB-Meßkampagne in Berlin und Brandenburg vom 23. bis 27. Juli 1994

Die häufigste Überschreitung der Schwellenwerte für Ozon und die daraus resultierende Diskussion, ob und in welcher Weise auch regionale Maßnahmen zur Verminderung der Ozon-Vorläuferstoffe



einen Beitrag leisten, waren Anlaß für ein gemeinsam von den Ländern Berlin und Brandenburg finanziertes Meßprojekt. Neben den Auftraggebern waren weitere sieben Forschungseinrichtungen aus Berlin, Brandenburg, Bayern und der Schweiz beteiligt.

Vom 23. bis zum 27. Juli 1994 wurde im Verlauf einer typischen sommerlichen Schönwettersituation mit zwei Motorseglern am Vormittag und Nachmittag die Ozon-, Stickoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentration (VOC) in 300 bis 3 000 m Höhe sowohl im Umland als auch über der Stadt registriert.

Diese Messungen wurden ebenfalls am Funkturm Frohnau und an drei Luftgüte-Meßwagen vorgenommen, die zusätzlich zu den festen Bodenmeßstellen des Berliner und Brandenburger Meßnetzes im Umland postiert waren, um die Belastung vor und hinter der Stadt festzuhalten. Durch zusätzliche Vertikalsondierungen an mehreren Standorten wurden die Strömungsverhältnisse und andere meteorologische Größen festgehalten (vgl. Stark et al. 1995)

### **Wetterlage und großräumige Ozonvorbelastung**

Die Meßkampagne vom 23. bis 27. Juli 1994 fiel in die erste Phase einer langanhaltenden hochsommerlichen Wetterlage mit einer im Berliner Raum bisher nicht beobachteten Serie von elf sogenannten "heißen Tagen", mit Maximumtemperaturen über 30 °C. Die großräumige Luftdruckverteilung war durch tiefen Druck über dem Ostatlantik und einem Hochdruckgebiet über der Ostsee, Südkandinavien und dem Baltikum geprägt.

Als beispielhaft für die Region Berlin sind in **Karte 03.06.7 (Wechselbeziehungen verschiedener Parameter 23. - 27.7.1994)** die Windrichtung und -geschwindigkeit an der BLUME-Meßstelle 314, Rathausturm Charlottenburg, dargestellt. Zum Vergleich mit dieser in 60 m über Grund befindlichen Meßstelle sind auch die Meßwerte der Windgeschwindigkeit der Station Grunewald (10 m über Bestandeshöhe) angegeben.

Vom 23. bis 25.7. herrschte im Berliner Raum eine östliche bis südöstliche Luftströmung mit geringer Luftfeuchte und bis zum 25.7. mittags eine sehr kontinental geprägte Luftmasse vor. Am 26.7. drehte der Wind am Vormittag auf Nordwest, verbunden mit der Zufuhr feuchterer, stärker subtropisch geprägter Luftmassen mit höherem Staubgehalt.

Um den **Beitrag des überregionalen Transportes** für die Episode beurteilen zu können, wurden Rückwärtstrajektorien aus dreidimensional analysierten Feldern meteorologischer Meßwerte berechnet (vgl. Reimer und Scherer 1991). In der **Karte 03.06.4 (Ozon-Konzentration 23. - 27.7.1994 um 16 Uhr MEZ)** sind die Rückwärtstrajektorien mit Angabe der Reisezeiten bis zur Ankunft in Berlin jeweils nachmittags an vier verschiedenen Tagen der Kampagne dargestellt. Nach der Trajektorie vom 24.7., die so ähnlich auch am 23.7. verlief, stammte die Luft bis zum 25.7. aus dem Ostseeraum und dem mittleren und nördlichen Polen, einer Region mit relativ geringer Emissionsdichte an Ozon-Vorläuferstoffen. Sie enthielt deshalb nur eine relativ geringe Ozonbelastung von 120 bis 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Der Karte 03.06.4 ist weiterhin zu entnehmen, wo die räumlich interpolierte Ozoankonzentration jeweils für 16.00 Uhr MEZ an den fünf Tagen der Meßkampagne dargestellt ist. Sie repräsentiert damit etwa die großräumige Ozonverteilung zur Zeit des täglichen Maximums. Bis zum 25.7. sind im Nordosten nur Werte unter 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  zu verzeichnen.

Am 26.7. kommt die Rückwärtstrajektorie aus Tschechien, Österreich und Sachsen und am 27.7. aus der Schweiz und Süddeutschland. Wenn man die Ozonkonzentration auf der Reise der Luftmasse 48 Stunden zurück anhand der Abbildung in Karte 03.06.4 bestimmt, kommt man jeweils zu Beginn der Reise schon auf 180 bis 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  Ozon, und die jeweils hohe Sonneneinstrahlung auf dem Weg in Richtung Berlin läßt in der zweiten Phase der Kampagne eine deutlich gestiegene Vorbelastung in dieser Größenordnung erwarten.

Dies deckt sich mit dem Verlauf der Ozon- und  $\text{NO}_2$ -Konzentration auf dem Funkturm Frohnau, dokumentiert in der Karte 03.06.7. Insbesondere während der letzten beiden Meßtage sind am Turm, dessen Meßreihe, weil zu der Zeit luvseitig Berlins gelegen, eher den überregionalen Immissionseinfluß wiedergab, ein um 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  höheres Ozonniveau und sogar höhere Stickoxidwerte zu beobachten.

### **Ergebnisse der Flugzeugmessungen**

Im Laufe der vom 23. bis zum 27.7. andauernden Meßkampagne wurde im Durchschnitt von beiden Flugzeugen je ein Flug am Vormittag und Nachmittag durchgeführt.

Die **horizontale Verteilung** der Minutenmittelwerte der Ozonkonzentration auf dem Flugweg in etwa 500 m Höhe ist beispielhaft in **Karte 03.06.5 (Räumliche Verteilung der Ozonkonzentration)** für den 25.7. nachmittags dargestellt.

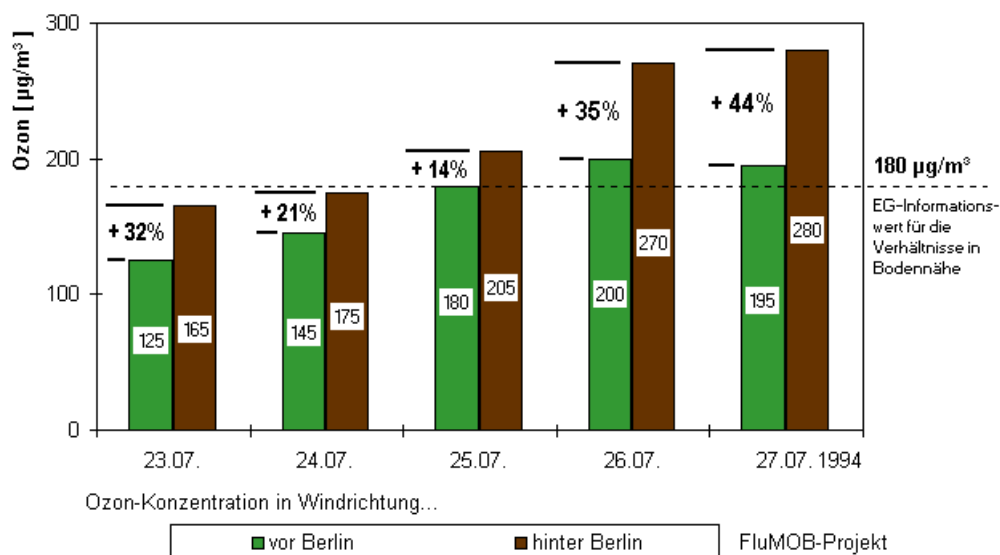
Der Durchmesser der Kreise ist ein Maßstab für die gemessene Konzentration in ppb (entspricht etwas weniger als  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) interpoliert zwischen dem jeweils kleinsten und größten registrierten Meßwert. **Karte 03.06.6 (Räumliche Verteilung der  $\text{NO}_2$ -Konzentration)** enthält das gleiche Bild für die Stickstoffdioxidwerte.

Im Lee der Hauptwindrichtung ist eine deutliche Erhöhung der Ozonkonzentration zu erkennen. Dieser Bereich liegt am 25.7. (und an den Tagen zuvor) nordöstlich der Stadt, während am 27.7. wegen der Winddrehung auf NW-N die südlich Berlins liegenden Gebiete vom Ozonzuwachs betroffen waren. Dies ist die Erklärung für den starken Anstieg der Ozonwerte an der Station Müggelsee am 26. und 27.7., wie er in Karte 03.06.7 dargestellt ist. An diesen Tagen übersteigen dort die Maximalwerte das am Funkturm Frohnau gemessene luvseitige Niveau um über  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

In beiden Karten mit der Darstellung der Flugmeßwerte korrespondiert die Breite des sich ausbildenden Ozon- bzw.  $\text{NO}_2$ -Maximums gut mit der räumlichen Ausdehnung Berlins als Emissionsschwerpunkt der ozonbildenden Stoffe. Als Indikator dient insbesondere die gemessene  $\text{NO}_2$ -Konzentration, die im Luv-Bereich nur zwei bis vier ppb betrug, während in der Luftschicht über der Stadt Konzentrationsspitzen über 20 ppb registriert wurden. Wie Karte 03.06.6 zeigt, ist auch in Lee der Stadt selbst im 30 bis 40 km Entfernung noch eine merkliche Erhöhung des  $\text{NO}_2$ -Niveaus feststellbar.

Im Gegensatz zu quellnahen Bereichen, wo Maxima der Stickoxidkonzentration wegen ihrer zunächst ozonabbauenden Wirkung mit Ozonminima korrespondieren (vgl. Karte 03.06.3), zeigt der Verlauf der Ozon- und  $\text{NO}_2$ -Konzentration in der Abluftfahne einen gleichzeitigen Anstieg beider Spezies. Die höchsten Ozonwerte traten demnach in Lee auf und sind im Vergleich zu den Luv-Werten meist mit höheren  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen verbunden. Dies trifft auch auf die meisten gemessenen Kohlenwasserstoffverbindungen zu und weist auf ein deutlich erhöhtes Ozon-Bildungspotential in Lee hin.

Eine Gegenüberstellung des bei allen Nachmittagsflügen gemessenen Ozonniveaus in Luv und Lee zeigt Abbildung 9. Vom 23. bis zum 25.7. nimmt der Lee-Effekt aufgrund der Zunahme der Mischungsschicht und der höheren Windgeschwindigkeit am 24.7. ab. Er fällt deutlich geringer aus als an den beiden letzten Tagen, an denen eine Zunahme der Ozonkonzentration von bis zu 44 % des in Luv vorhandenen Pegels auftritt.



**Abb. 9: Ozonkonzentration während der Flugzeugmessungen in ca. 500 m Höhe vom 23. bis zum 27.7.1994, jeweils nachmittags**

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der im Berliner Stadtgebiet in Luf und Lee jeweils nachmittags gemessenen Bandbreite der **Ozonkonzentration am Boden**. Wie bei den nachmittags gemessenen Flugzeugdaten ist eine kontinuierliche Zunahme der luvseitigen Vorbelastung im Umland um etwa 20

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  pro Tag festzustellen. Sie überschritt am 26. und 27.7. den Informationswert der EG-Richtlinie von  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Innerhalb der städtischen Wohngebiete in Berlin herrschte aufgrund der Ozonzerstörung durch frisch emittierte Stickoxide ein geringfügig niedrigeres Niveau.

Der prozentuale Zuwachs der Ozonbelastung in Lee bezogen auf das Luvniveau liegt vom 23. bis zum 25.7. in der gleichen Größenordnung wie der aus den Flugzeugmessungen berechnete und war am 25.7. am geringsten. Er nahm an den Folgetagen, 26. und 27.7., deutlich zu.

## Karten 03.06.8 und 03.06.9: Ergebnisse der photochemischen Simulationsrechnungen

In **Karte 03.06.8 (Berechnete bodennahe Ozon-Konzentration)** ist beispielhaft für den 25.7.1994, 16.00 Uhr MEZ, das Ergebnis einer Simulation der Ozonverteilung in Berlin und großen Teilen Brandenburgs mit dem photochemischen Ausbreitungsmodell REGOZON (vgl. Mieth u. Unger 1993) dargestellt. Unter Verwendung aller verfügbaren meteorologischen Daten und Informationen über die Emissionen möglichst vieler relevanter Schadstoffe, die aus den Emissionskatastern Berlins und Brandenburgs gewonnen wurden, wird versucht, die komplizierten chemischen und meteorologischen Prozesse rechnerisch nachzuvollziehen. Dies hat den Vorteil, daß im Modell bei exakt gleichen sonstigen Randbedingungen mehrere Emissionsszenarien durchgespielt und damit ihre Wirksamkeit im Hinblick auf die Ozonminderung getestet werden können - vorausgesetzt, daß die Simulation die Wirklichkeit ausreichend genau wiedergibt.

**Tab. 2: Niveau der gemessenen Ozonkonzentration in Bodennähe vom 23. bis zum 27.7.1994 angegeben in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

Datum	23.7.	24.7.	25.7.	26.7.	27.7.
LUV	120 - 135	130 - 150 (13 h) 130 - 140 (16 h)	160 - 180	180 - 205	150 - 180 (Umland) 200 - 210 (Stadt)
Stadt (Wohngebiete)	140 - 150	140 - 150	140 - 170	170 - 195	180 - 210
LEE	180	170	200	230 - 255	230 - 250
Zuwachs (rel. zu LUV)	42%	21% (13 h) 26% (16 h)	18%	26%	37% (Umland) 17% (Stadt)

**Tab. 2: Niveau der gemessenen Ozonkonzentration in Bodennähe vom 23. bis zum 27.7.1994 angegeben in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

Wie die Karte 03.06.8 zeigt, werden die höchsten Ozonwerte am Nachmittag im Land Brandenburg nordwestlich von Berlin berechnet. Innerhalb Berlins sind lediglich die nordwestlichen Bezirke Spandau, Heiligensee und Frohnau von erhöhten Ozonkonzentrationen betroffen. Gebiete hoher Emissionen (insbesondere der Innenstadtbereich) zeigen dagegen signifikant geringere Ozonwerte während der gesamten Simulation. Insgesamt kann auch für den 25.7. ein sichtliches Ozonbildungspotential, verursacht durch die Emissionen im Untersuchungsgebiet, festgestellt werden. Die berechneten Hintergrundkonzentrationen liegen bei 160 bis  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Lage der berechneten Ozonfahne sowie die berechneten Werte in der Fahne am Nachmittag stimmen gut mit den Beobachtungen überein, die Breite der Fahne wird dabei leicht unterschätzt (vgl. Karte 03.06.5 mit 03.06.8).

### Szenarien

Die Emissionsreduzierung für diese Szenarienrechnung orientiert sich an Maßnahmen und prognostizierten Wirkungen, die nach den derzeitigen Planungen als akute Maßnahmen im Rahmen einer Sommersmog-Verordnung getroffen werden können.

Die Reduktionen, die dadurch unterschiedlich für die einzelnen Verursacherguppen erzielt werden können, sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tab. 3: Emissions-Reduktionen für einzelne Verursacherguppen in Prozent		
	VOC	NO <sub>x</sub>
Kraftwerke und Industrieanlagen	10%	10%
Gewerbe und kleine Industrieanlagen	15%	15%
Haushalte	5%	5%
Kfz - fahrender Verkehr	47%	40%
Kfz - ruhender Verkehr	26%	-
Alle Verursacherguppen	27%	32%

**Tab. 3: Emissions-Reduktionen für einzelne Verursacherguppen in Prozent**

Die Wirkung der Reduktion der Emissionen um die o.g. etwa 30 % als Differenz der berechneten Konzentrationen zwischen Szenario- und Realfall zeigt **Karte 03.06.9 (Differenz der OX-Konzentration  $OX = O_3 + NO_2$ )**. Das Resultat ist eine deutliche Abnahme der Ozonbelastung in der Abluffahne des Ballungsraumes um bis zu  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , bzw. um etwa sieben Prozent. Im Berliner Innenstadtbereich steigt die Ozonkonzentration jedoch geringfügig über den Pegel der Hintergrundbelastung an. Da die Innenstadt durch die hohe NO-Emission des Kraftverkehrs belastet ist, die mit dem herangeführten Ozon zunächst zu  $NO_2$  reagiert, sinkt im Referenzlauf die Ozonkonzentration relativ zur Hintergrundbelastung ab, die Summe der Oxidantien OX ( $OX = O_3 + NO_2$ ) steigt jedoch in der Regel an. Zur Beurteilung der Wirkung der Maßnahmen, wird in Karte 03.06.9 die Differenz der OX-Konzentration zwischen Referenzlauf und Szenario dargestellt. Sie läßt auch in der besonders emissionsbelasteten Berliner Innenstadt eine Verbesserung der Luftbelastung durch die Verringerung der Oxidantienbelastung erkennen.

Die gleiche Simulation der Verhältnisse am letzten Tag der Kampagne (27.7.94) ergibt eine etwas stärkere Minderung der Ozonmaxima um zehn Prozent im Leebereich der Stadt. Berechnet man die Größe der Fläche mit Konzentrationen über  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Ozon für Referenz- und Szenariofall, so ergibt sich am 25.7. ein respektablem Rückgang um 60 %. Wegen der hohen Vorbelastung von nahezu  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  am 27.7. (vgl. Abb. 9 und Tab. 2), auf die die Maßnahmen in der Region keinen Einfluß haben können, ist die Abnahme der Fläche mit Ozonwerten über  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nur marginal.

## Maßnahmen zum Schutz der stratosphärischen Ozonschicht und zur Verminderung der bodennahen Ozonbelastung

**Hohe Konzentrationen in Bodennähe** sind in Mitteleuropa ein großräumiges Problem. Aus den Messungen und Simulationen im Rahmen des FluMOB-Projektes und aus ähnlichen Aktivitäten anderer Bundesländer (vgl. LAI 1996) sind in Lee großer Ballungsgebiete an wenigen Tagen im Jahr hohe Ozonspitzenwerte nachweisbar, die um 15 bis 40 % über der weiträumigen Ozonbelastung liegen. Diese regionale Zusatzproduktion kann durch temporäre regionale Maßnahmen bei einem Ozonalarm vermindert werden, wenn die Absenkung der Emissionen der Ozonvorläuferstoffe (Stickoxide und Kohlenwasserstoffe) mindestens 20 % erreicht. Allerdings muß das Maßnahmenggebiet einen großen Ballungsraum, bei regionalen Transporten zwischen benachbarten Ballungsräumen sämtliche Räume, einschließen. Insofern ist der im Ozongesetz (§ 40a BImSchG) verwirklichte Ansatz sinnvoll, Ozonalarm meist in einem größeren Gebiet auszurufen. Eine Ozonminderung, die Überschreitungen der EU-weit gültigen Schwellenwerte vermeiden soll, erfordert allerdings eine Kombination von großräumigen und regionalen Maßnahmen, die dauerhaft mindestens eine Drittelung der Emission der Vorläuferstoffe beinhalten. Dies erfordert eine abgestimmte Konzeption auf nationaler und europäischer Ebene.

Um die **Abnahme der Ozonschicht in der Stratosphäre** global zu verhindern oder zu beschränken, muß eine schnellstmögliche Reduktion der FCKW-Emissionen und die Verminderung von Flugverkehr in der Stratosphäre angestrebt werden. Ein erster Versuch im Rahmen der Montrealer Konferenz von 1987 erwies sich aufgrund der zu langen Ausstiegsfristen und der vielfältigen Ausnahmeregelungen als untauglich. Auf den Nachfolgekonzferenzen 1990 und 1992 in London und Kopenhagen konnte für die meisten FCKW-Verbindungen immerhin ein Produktionsausstieg bis zur Jahrtausendwende vereinbart werden. Im europäischen Rahmen ist dies bereits geschehen. Ausnahmen bestehen bis zum Jahr 2015 für teilhalogenierte Stoffe, die ein vermindertes Ozonerstörungspotential besitzen. Entscheidend für eine weltweite Reduzierung der Chlor- und Bromemissionen wird sein, den Entwicklungs- und Schwellenländern für die baldige Einstellung ihrer nicht unerheblichen Produktionskapazitäten für FCKW und Halone finanzielle Hilfe und Unterstützung bei der Herstellung von Ersatzstoffen zu gewähren.

# Literatur

- [1] **Bruckmann, P., Pielert, W., Lacombe, R., Lutz, M., Müller, W.J., Külske, S., Pfeffer, H.U. 1994:**  
Die erhöhten Ozonkonzentrationen der Sommer 1990 und 1992 in Deutschland, Staub - Reinhaltung der Luft 54, S. 33-38, Springer-Verlag, Berlin.
- [2] **Deutscher Bundestag (Hrsg.) 1990:**  
Schutz der Erde: eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik. 3. Bericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre". Zur Sache 90,19 Bd I, Bonn.
- [3] **Deutscher Bundestag (Hrsg.) 1992:**  
Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. Zukunft sichern, jetzt handeln. Bericht der Enquete-Kommission des 12. Deutschen Bundestages "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre", Economia-Verlag, Bonn.
- [4] **Feister, U. 1995:**  
Gesamtozonwerte (Dicke der Ozonschicht), Meteorologisches Observatorium Potsdam, unveröffentlicht.
- [5] **FU Berlin 1995:**  
Berliner Wetterkarte. Klimatologische Übersicht Juni, Juli, August, September 1995, KEU VI - IX/95. Amtsblatt des Instituts für Meteorologie der Freien Universität Berlin.
- [6] **Hermann, J.R., Bahtia, P.K., Ziemke, J., Ahmad, Z., Larko, D. 1996:**  
UV-B increases (1979-92) from decreases in total ozone, Geophys. Res. Lett. 23, 2117.
- [7] **Kerr, J.B., McElroy, C.T. 1993:**  
Evidence for Large Upward Trends of Ultraviolet-B Radiation Linked to Ozone Depletion, Science 262, 1032.
- [8] **Köble, R., Nagel, H.-D., Smiatek, G., Werner, B., Werner, L. 1992:**  
Luftreinhaltung. Erfassung immissionsempfindlicher Biotope in der Bundesrepublik Deutschland und in anderen ECE-Ländern. Endbericht des F+E-Vorhabens 108 02 080, gefördert durch das Umweltbundesamt, Berlin und Stuttgart.
- [9] **LAI (Länderausschuß für Immissionsschutz) 1996:**  
Bewertung temporärer Maßnahmen zur Senkung von Ozon-Belastungsspitzen. Synopse der in der Bundesrepublik Deutschland durchgeführten Modelluntersuchungen und Modellrechnungen. Bericht des LAI-Arbeitskreises "Ozon", Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft (Hrsg.), Düsseldorf, in Druck.
- [10] **Logan, J.A. 1985:**  
Tropospheric Ozone: Seasonal Behaviour, Trends and Anthropogenic Influence, in Journal of Geophysics Res. 90, No. 6, S. 10463-10482.
- [11] **Lutz, M. 1994:**  
Analysis of Episodes with Elevated Ozone Concentrations in the Summer of '91 and '92 in Germany, Meteorol. Zeitschrift, N.F. 3, 127-131.
- [12] **Mieth, P., Unger, S. 1993:**  
Szenarienrechnungen und Fallstudien zur Ozonanalyse im Berliner Raum mittels eines mesoskaligen Ausbreitungsmodells. GMD First im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin.
- [13] **NRC (National Research Council) 1991:**  
Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution. National Academy Press, Washington, D.C.
- [14] **Obermeier, A. 1995:**  
Ermittlung und Analyse von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen in Baden-Württemberg. Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [15] **Reimer, E., Scherer, B. 1991:**  
An Operational Meteorological Diagnostic System for Regional Air Pollution Analysis and Long Term Modelling. Proc. of the 19th ITM on Air Poll. Modelling and its Application 1991 in Crete.

- [16] **Schurath, U. 1984:**  
Entstehung und Verbreitung von anthropogenem Ozon in der Bundesrepublik Deutschland, Wissenschaft und Umwelt 2/1984.
- [17] **Seckmeyer, G., McKenzie, R.L. 1992:**  
Increased ultraviolet radiation in New Zealand (45 degrees S) relative to Germany (48 degrees N.), Nature 359, 135
- [18] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995a:**  
Das Berliner Luftgüte-Meßnetz (BLUME). Informationsreihe zur Luftreinhaltung in Berlin, Heft 5, 3. Auflage, Berlin.
- [19] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1995b:**  
Luftreinhalteplan für das Belastungsgebiet Berlin 1994-2000, Informationsreihe zur Luftreinhaltung in Berlin, Heft 19, Berlin.
- [20] **Stark, B., Lutz, M., Lenschow, P., Scherer, B., Abraham, H.-J., Reichenbächer, W., Reimer, E. 1995:**  
Flugzeug- und Bodenmessungen von Ozon und Vorläuferstoffen zur Abschätzung der Wirksamkeit von emissionsmindernden Maßnahmen im Großraum Berlin-Brandenburg (FluMOB-Projekt). Abschlußbericht im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin und des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg.
- [21] **UBA (Umweltbundesamt) 1996:**  
Ozonsituation 1995 in der Bundesrepublik Deutschland, Berlin, in Druck.
- [22] **Volz-Thomas, A., Kley, D. 1988:**  
Ozone Measurements in the 19th Century. An Evaluation of the Montsouris Series, in Nature 332, S. 240-242.
- [23] **Volz-Thomas, A., Mihelic, D. 1990:**  
Ozonproduktion in Reinluftgebieten. Einfluß von Schadstoff-Konzentrationen, Gesellschaft Österreichischer Chemiker (Hrsg.), Tagungsband zum Symposium "Bodennahes Ozon" in Salzburg, Bd. 11 der Schriftenreihe "Umweltschutz".

## Gesetze, Richtlinien, Verordnungen

- [24] **Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnlichen Vorgängen (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I S. 880) zuletzt gerändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 19.7.1995, BGBl. I, S. 930)**
- [25] **Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.) 1991:**  
VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1, Nr. 2310 Bl. 6, Ausg. 04.89, Maximale Immissions-Werte zum Schutz der Vegetation, Maximale Immissions-Konzentration für Ozon;  
Nr. 2310 Bl. 15, Ausg. 04.87, Maximale Immissions-Werte zum Schutze des Menschen, Maximale Immissions-Konzentrationen für Ozon (und photochemische Oxidantien),  
Nr. 2468, Blatt 1: Messen der Ozon- und Peroxid-Konzentration, Manuelles photometrisches Verfahren, Kaliumjodid-Methode (Basisverfahren), Beuth-Verlag, Berlin.
- [26] **Richtlinie des Rates der Europäischen Gemeinschaften vom 21.9.1992 über die Luftverschmutzung durch Ozon, Nr. 92/72/EWG, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 297/1, Brüssel.**
- [27] **World Health Organization (WHO), Regional Office of Europe (Hrsg.) 1987:**  
Die Luftleitlinien der WHO, Air Quality Guidelines for Europe, WHO Regional Publications, European Series No. 23, Kopenhagen.
- [28] **Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) vom 26.10.1993, BGBl. Nr. 58/I, S. 1819f., Bonn.**

## Karten

- [29] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1994:**

Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1994, Bd. 2, Karte 03.06 Bodennahes Ozon, 1 : 200 000 / 1 : 4 200 000, Berlin.

**[30] SenStadtUmTech (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1997:**

Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1997, Bd. 2, Karte 03.03, Stickoxide - Emissionen und Immissionen, 1 : 200 000 / 1 : 300 000, Berlin.

**[31] SenStadtUmTech (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1997:**

Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe 1997, Bd. 2, Karte 03.09, Verkehrsbedingte Luftbelastung durch Kohlenwasserstoffe, in Vorbereitung.