

Krank durch Ozon?

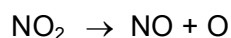
1. Ozon und andere Photooxidantien

In dem komplexen Gemisch, das der photochemische Smog darstellt, ist Ozon tatsächlich, was die Menge betrifft, die Hauptkomponente: Bis zu 90 % des Oxidantienanteils kann Ozon betragen. Gleichzeitig ist Ozon auch eines der stärksten Oxidationsmittel überhaupt und somit einer der reaktionsfähigsten Stoffe, die wir kennen. Man kann folglich davon ausgehen, dass dieser extrem reagible Stoff die hygienisch relevanteste Komponente des photochemischen Smogs ist.

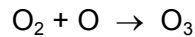
Es gibt eine Vielzahl von Reizstoffen in dem photochemischen Oxidantienmischung. Neben kurzlebigen, aber hochreaktiven Radikalen kommen auch noch stabile Zwischen- oder Endprodukte des photochemischen und oxidativen Abbaus organischer Verbindungen als mögliche Schadstoffe in Frage. So wird beispielsweise die starke Augenreizwirkung des "photochemischen Smogs" nicht durch das wenig wasserlösliche Ozon bewirkt, sondern solchen Stoffen wie Peroxiacetylnitrat (PAN), Peroxibenzoylnitrat (PBN), Acrolein, Formaldehyd etc. zugeschrieben. Diese Verbindungen treten jedoch in ihrer hygienischen Bedeutung hinter die des Ozons zurück, da sie einerseits in wesentlich geringeren Konzentrationen vorliegen, andererseits meist nicht die Toxizität von Ozon besitzen.

2. Entstehung

Das "anthropogene" Ozon wird durch eine photochemische - also durch intensives Sonnenlicht ausgelöste - Reaktion aus Vorläuferverbindungen (Stickoxide und Kohlenwasserstoffe) in der unteren Troposphäre (i.e. in bodennahen Schichten) gebildet. Die Schlüsselrolle bei der Entstehung des Ozons in Bodennähe kommt dem Stickstoffdioxid zu. Bereits durch relativ energiearme langwellige UV-Strahlung zerfällt es photolytisch zu Stickstoffmonoxid (NO) und atomarem Sauerstoff:



Dieses hochreaktive Sauerstoffatom verbindet sich sofort mit dem molekularen Sauerstoff der Luft zu Ozon:



Das Stickstoffmonoxid (NO) ist ein farbloses Gas, das sich nicht photochemisch zersetzt, aber an der Luft relativ langsam zu Stickstoffdioxid oxidiert wird.

Flüchtige organische Verbindungen werden, vor allem durch oxidierende Stoffe, je nach chemischer Struktur verschieden schnell abgebaut. Hierbei entstehen auch Radikale mit stark oxidierenden Eigenschaften. Besonders reaktiv sind ungesättigte organische Verbindungen (Olefine und Aromaten). Durch die Radikalbildung tragen sie zur beschleunigten Oxidation des Stickstoffmonoxids zu Stickstoffdioxid bei. Sie wirken somit katalytisch, d.h. beschleunigend auf die Ozonbildung.

Hauptemittenten dieser Reaktionskomponenten und damit Quellen der Vorläuferverbindungen sind Kraftfahrzeuge, die petrochemische Industrie, Kraftwerke etc. Auf dem Gebiet der Europäischen Gemeinschaft sind die Quellen etwa folgendermaßen verteilt:

Stickoxide:	Verkehr	63 %
	Kraftwerke	20 %
	Andere Benutzer fossiler Brennstoffe	14 %
Organ. Verb.:	Verkehr	47 %
	Industrielle Lösemittelverwendung	37 %
	Haushalte	8 %

3. Langfristiger Trend der Ozonkonzentrationen

Die in Mitteleuropa gemessenen "Hintergrundkonzentrationen" haben sich im letzten Jahrhundert ungefähr verdoppelt. Sie liegen jetzt bei etwa 0 bis 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft. Seit ca. 1990 ist in Deutschland kein einheitlicher Trend der troposphärischen Ozonkonzentrationen mehr zu erkennen. Die Spitzenbelastungen haben zum Teil deutlich abgenommen (siehe Abb. 1), die Jahresmittelwerte sind an einigen Stationen jedoch weiter angestiegen.

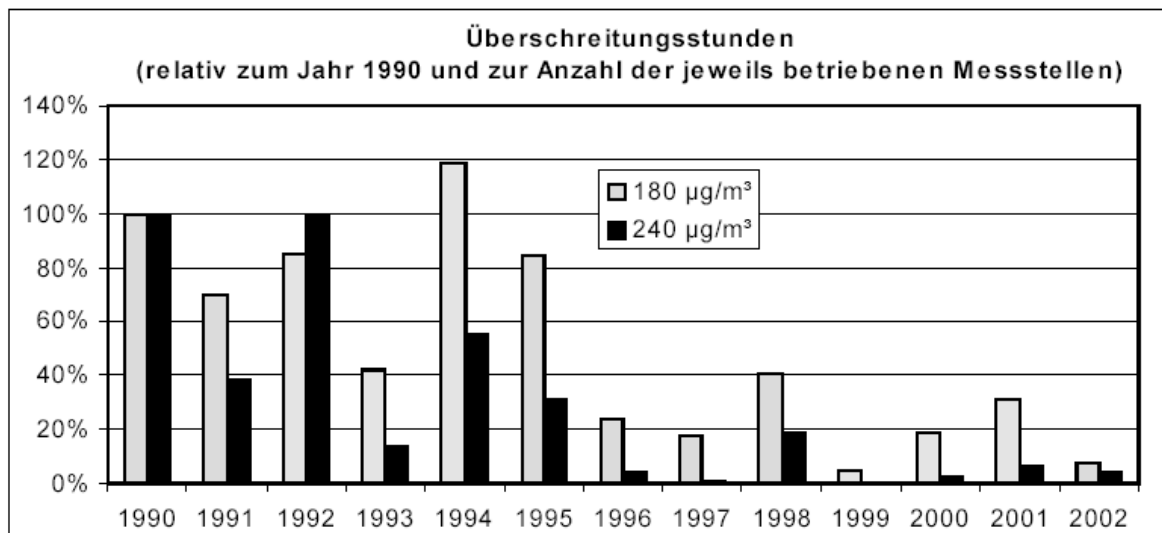


Abb. 1 Überschreitungsstunden 1990 bis 2002

4. Regionale Verteilung der Ozonkonzentration

Die Höhe der Immissionskonzentrationen nimmt von Norden nach Süden zu. Am Alpenrand, wo sich die "Oxidantienpakete" stauen, können z.T. außergewöhnlich hohe Konzentrationen auftreten (z.B. 1989 in Varese: ca. 500 µg/m³). Auch an anderen Orten können durch besondere Emissionsbedingungen und räumliche Voraussetzungen (Talkessel, breite Flussebenen) Spitzenkonzentrationen gemessen werden.

In den Ballungszentren, vor allem solchen mit hoher Verkehrsdichte, findet man zwar die höchsten "Vorläufer-Werte", nicht aber die höchsten Ozonkonzentrationen. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass das zunächst hauptsächlich emittierte Stickstoffmonoxid, aber auch die ungesättigten Kohlenwasserstoffe, als "Ozonfänger" wirken können. Deshalb gehen die Ozonkonzentrationen in den Abend- und Nachtstunden in Ballungsgebieten auch erheblich rascher zurück als in sog. "Reinluftgebieten". Dies ist auch der Grund für die höheren mittleren Ozonkonzentrationen (z.B. Tagesmittelwerte), in sog. "Reinluftgebieten" gemessen, verglichen mit jenen in den Ballungsgebieten.

5. Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen

Da die Bildung von photochemischen Oxidantien, insbesondere Ozon, in der unteren Troposphäre von der Intensität der Sonneneinstrahlung abhängt, finden wir nennenswert erhöhte Ozonkonzentrationen im Allgemeinen nur in den Sommermonaten und nur an Schönwettertagen.

Der Tagesverlauf ist sehr charakteristisch: Er folgt der Intensität des Sonnenlichts mit der Einschränkung, dass die Ozonbildung mit einer zeitlichen Verzögerung - die für das "Anlaufen" der photochemischen Reaktion benötigt wird - einsetzt.

Es kommt zu einem steilen Anstieg in den Morgenstunden, der etwa in den frühen Nachmittagsstunden in ein Konzentrationsplateau mündet, das mehrere Stunden anhält. Das heißt, dass hohe Ozonbelastungen mehrere Stunden dauern können (eine Ozonkonzentration im Bereich bis zu etwa 80 % des maximalen Halbstundenmittelwertes kann bis zu acht Stunden auftreten).

6. Richt-, Grenz- und Anhaltswerte

Seit September 1992 gibt es eine EU-Richtlinie Tochterrichtlinie für Ozon, die im Jahr 2000 revidiert wurde. Als aktuelle Schwellenwerte sind dort festgelegt:

Zielwert:
120 µg/m³ als 8-Stunden-Mittelwert

Schwellenwert für die Unterrichtung der Bevölkerung:
180 µg/m³ als 1-Stunden-Mittelwert

Schwellenwert für die Auslösung von Ozon-Warnungen
240 µg/m³ als 1-Stunden-Mittelwert

Der Zielwert von 120 µg/m³ (8-Stunden-Mittelwert eines Tages) darf an höchstens 25 Tagen im Jahr gemittelt über drei Jahre überschritten werden und muss bis 2010 erreicht werden. Der Langfristzielwert von ebenfalls 120 µg/m³ stellt einen höchsten 8-Stunden-Mittelwert während eines Kalenderjahres und muss bis 2020 erreicht sein. Bei gemessener oder vorhergesagter Überschreitung während drei aufeinander folgender Stunden müssen kurzfristige Aktionspläne eingesetzt werden, wenn „ein nennenswertes Potenzial zur Verringerung der Gesundheitsrisiken oder zur Reduzierung der Dauer oder des Ausmaßes einer Überschreitung besteht“. Ein solches Potential besteht für Deutschland nach Angaben des Umweltbundesamtes allerdings nicht. So haben Erfahrungen mit überregionalen Fahrverboten bestätigt, dass die Überwachung ihrer Einhaltung zwar sehr aufwendig aber wenig effizient ist.

Der seit 1958 eingeführte MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatzkonzentration) der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft betrug 200 µg/m³ (8-Stundenmittelwert) und bezieht sich lediglich auf die schleimhautreizende Wirkung von Ozon. Auf Grund neuer Hinweise auf eine Krebs erregende Wirkung und das genotoxische Potential von Ozon wurde 1995 der MAK-Wert ausgesetzt und 1998 durch einen TRK-Wert (technische Richtkonzentration) für Stoffe mit begründetem Verdacht auch Kanzerogenität ersetzt.

7. Exposition

Die höchsten Ozonkonzentrationen werden im Allgemeinen während sommerlicher Schönwetterperioden gemessen. Das sind die Tage, an denen der Mensch bestrebt ist, sich möglichst lange im Freien aufzuhalten. Gleichzeitig wird diese Gegebenheit von Jugendlichen oder Erwachsenen dazu genutzt, sich durch sportliche Betätigung "fit" zu machen oder sich einfach "auszutoben". Das bedeutet, dass die Expositionszeit mehrere Stunden dauern kann und die Belastungsintensität durch das gesteigerte Atemvolumen Extremwerte erreicht.

Dies ist auch der Grund dafür, dass fast alle neueren Wirkungsuntersuchungen über Ozon am Menschen - ob unter kontrollierten Bedingungen in Inhalationskammern oder in Feldstudien mit Kindern und Erwachsenen - bei gleichzeitiger körperlicher Belastung der Probanden durchgeführt wurden. Wenn also über eine Lungenfunktionsänderung bei einer Ozonkonzentration von beispielsweise $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berichtet wird, so ist dieser Befund fast immer im Zusammenhang mit einer langstündigen Exposition bei gleichzeitiger körperlicher Belastung zu sehen.

Ein Vergleich der Expositionsbedingungen zwischen einer für deutsche Verhältnisse stark belasteten Stadt wie Ludwigshafen am Rhein und Los Angeles relativiert etwas die bei uns auftretenden Höchstwerte: In Ludwigshafen gab es im Jahr 1988 insgesamt elf Tage, an denen Ozon-Konzentrationen über $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurden (Halbstundenmittelwerte). In Los Angeles waren es (1985) 141 Tage. Noch deutlicher wird der Unterschied, wenn man berücksichtigt, dass an 68 Tagen in Los Angeles $400 \mu\text{g}$ und an fünf Tagen $700 \mu\text{g}$ überschritten wurden. Keine der letztgenannten Konzentrationen wurden jemals in Ludwigshafen erreicht.

8. Wirkungen auf den Menschen

Die biologische Wirkung des Ozons wird durch seine extreme Reaktionsbereitschaft geprägt: Anders als Systemgifte (wie Kohlenmonoxid), die überwiegend erst an bestimmten Systemen im Organismus wirken entfaltet es nach Inhalation seine Wirkung fast ausschließlich am Auftreffort selbst, d.h. am Gewebe des Atemtraktes. Durch seine geringe Wasserlöslichkeit wird es in viel geringerem Maße als beispielsweise Schwefeldioxid in den oberen Atemwegen zurückgehalten; d.h., dass Ozon vermehrt bis in die Lungenperipherie dringt und hier auf Gewebe trifft, das nicht durch eine Schleimschicht geschützt ist.

8.1 Akute Wirkungen

Im Folgenden sind die akuten Wirkungen von Ozon auf den Menschen aufgeführt; dabei sind die niedrigsten Konzentrationen, bei denen die Wirkungen beobachtet wurden, angegeben:

- Subjektive Befindlichkeitsstörungen wie Tränenreiz (verursacht durch Begleitstoffe des Ozons), Reizung der Atemwege und Atembeschwerden ab $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Veränderung von Lungenfunktionsparametern (z.B. Abnahme des forcierten Ausatemvolumens, Zunahme des Widerstandes in den Atemwegen) bei Schulkindern und Erwachsenen ab $140\text{-}300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und in klinischen Expositionsversuchen mit freiwilligen Probanden ab $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 6,6-stündiger bzw. ab $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 1- bis 3-stündiger Exposition mit körperlicher Belastung.
- Reduzierung der körperlichen Leistungsfähigkeit ab $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Entzündliche Reaktion des Gewebes ab $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 6,6-stündiger Exposition mit körperlicher Belastung.
- Zunahme der Häufigkeit von Asthmaanfällen ($240\text{-}300 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Die für eine akute Wirkung charakteristische Ozondosis hängt in erster Linie von der Ozonkonzentration und dem Atemminutenvolumen (Aktivität) und erst in zweiter Linie von der Expositionsdauer ab. Nach einer Expositionszeit von einigen Stunden verstärken sich die akuten Effekte kaum mehr, selbst wenn man ozon-exponiert bleibt.

In Tab. 2 sind akute gesundheitliche Auswirkungen bei verschiedenen Ozonkonzentrationen nach einer Zusammenstellung der WHO angegeben.

Ozon-Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Reduzierung der FEV1 bei den 10 % ozon-sensibelsten gesunden jungen Erwachsenen und Kindern (im Freien aktiv)	Entzündliche Veränderungen (Einstromen von Neutrophilen) bei jungen, gesunden Erwachsenen; aktiv (>40 l/min) im Freien	Anstiege der Prävalenzen von subjektiven Symptomen (gesunde Kinder, Erwachsene und Asthmatiker, normale Aktivität)	Empfohlene Einschränkungen von Aufenthalt und Tätigkeiten im Freien
1h- Mittelwerte				
100	-	-	-	keine
200	- 5 %	-	+ 25 %	wenige empfindliche Pers.
300	- 10 %	-	+ 35 %	empfindliche Personen
400	- 15 %	+ 100 %	+ 50 %	empfindliche Personen
8h-Mittelwerte				
100	- 5 %	-	+ 25 %	keine
200	- 15 %	+ 200 %	+ 50 %	empfindliche Personen
300	- 25 %	+ 600 %	+ 100 %	empfindliche Personen

Tab. 2: Zu erwartende akute Gesundheitseffekte bei photochemischem Smog mit Angabe der maximalen 1h- bzw. 8h-Mittelwerte für Ozon ausgehend von WHO (1997 und 1992) mit Interpolationen. (FEV1- und Entzündliche Veränderungen aus kontrollierten Expositionsstudien, Symptome aus epidemiologischen Studien)

8.2 Chronische Wirkungen

Die Frage nach chronischen Wirkungen kann anhand neuer Studien dahingehend beantwortet werden, dass bei extremen Expositionsverhältnissen, wie sie in Los Angeles herrschen (an ca. 70 Tagen im Jahr Werte über $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$), es nach langjährigem Aufenthalt zu einer geringen, jedoch statistisch nachweisbaren, Zunahme der Häufigkeit chronischer Lungenerkrankungen (chronische obstruktive Bronchitis, Asthma bronchiale) kommt. Hierbei spielt jedoch Ozon mit großer Wahrscheinlichkeit nur als Teilfaktor neben der Wirkung der erheblichen Schwebstaubbelastung in diesen Gebieten eine Rolle.

Die Risikogruppen für Ozon sind, anders als im Fall des "Wintersmog", wo wir wohldefinierte Risikokollektive (Asthmatiker, chronische Bronchitiker, Herz-/Kreislaufkranke) haben, sehr viel schwerer zu charakterisieren: Die Empfindlichkeit des Atemtraktes gegenüber Ozon ist bei Gesunden und Personen mit Atemwegserkrankungen ungefähr gleich verteilt. Man kann zwar davon ausgehen, dass ein Asthmatiker oder Bronchitiker, der zusätzlich noch "hyperreagibel" gegenüber Ozon ist, besonders gefährdet ist; gleichzeitig ist die Wahrscheinlichkeit, dass er sich bei einer Außentemperatur von 25-32 Grad Celsius (stabile Hochwetterlage im Sommer) einer anstrengenden körperlichen Belastung im Freien über mehrere Stunden aussetzt - und nur das führt zur Aufnahme einer relevanten Ozondosis -, äußerst gering.

Man muss folglich bei der Definition von Risikogruppen gegenüber Ozon davon ausgehen, dass alle diejenigen Personen betroffen sind, die sich häufig längeren, anstrengenden körperlichen Tätigkeiten an der Außenluft an heißen Sommertagen aussetzen. Dies sind im Wesentlichen Kinder und junge Erwachsene, die sich im Spiel oder Sport betätigen. Hierzu gehören auch Personen, die eine mehrstündige, mit körperlicher Anstrengung verbundene berufliche Tätigkeit im Freien ausüben.

Wissenschaftler berichten aber auch noch über andere Auswirkungen: Menschen, die sich nach Meldungen über erhöhte Ozonwerte und damit verbundenen Verhaltensempfehlungen als "Betroffene" fühlen, können Bedrohungsängste entwickeln. Ein erheblicher Teil reagiert im Sinne einer so genannten "Toxikopie"; d.h. sie empfinden die Symptome, die sie aus den Medien als "ozontypisch" erfahren haben: Augenreizung, Schluckbeschwerden, erschwerte Atmung, Schmerzen beim tiefen Einatmen, Kopfschmerz, Schläffheit, Kreislaufbeschwerden. Das Problem ist, dass sie diese Beschwerden schon bei einer Ozondosis entwickeln, die effektiv nicht ausreicht, um diese Symptome hervorzurufen.

9. Maßnahmen

Wirklich wirksame Maßnahmen müssen - darüber sind sich zumindest Wissenschaftler weitgehend einig - eine Senkung der Vorläuferemissionen auf überregionaler Ebene zum Ziel haben. Räumlich und zeitlich begrenzte Maßnahmen haben kaum oder nur in ganz spezifischen Situationen (Tal- und Beckenlagen wie eventuell die Rheinebene oder das Los Angeles Becken) Aussicht auf Erfolg.

Am 31.12.1999 ist die bundeseinheitliche Sommersmog-Regelung für Fahrverbote bei hohen Ozonwerten ersatzlos ausgelaufen. Zur Zeit gibt es in Deutschland keine rechtsverbindlichen Grenzwerte für Ozon, die eine Handlung in Richtung der Verminderung von Emissionen der Vorläufersubstanzen (z.B. Fahrverbote) bedingen würden.

Wissenschaftler empfehlen, einen Immissionsschutzwert für Ozon festzulegen. Bisher treffen die in der TA Luft aufgelisteten Immissionswerte nur Schadstoffe, die direkt aus genehmigungsbedürftigen Anlagen emittiert werden. Sie schließen somit nur Primäremissionen ein. Stoffe, die erst durch Sekundärreaktionen in der Atmosphäre entstehen, also "sekundäre" Luftschadstoffe, wie das Ozon, das aus Vorläuferverbindungen in der Atmosphäre entsteht, wurden bisher nicht berücksichtigt. Aber nur solche rechtsverbindlichen Grenzwerte können mit allen zu ihrer Einhaltung erforderlichen vielschichtigen und langfristig wirksamen Maßnahmen auf Dauer Erfolg haben.

In den USA gibt es zwei Typen von rechtsverbindlichen Grenzwerten für Ozon:

1. Den lufthygienischen Grenzwert als langfristig einzuhaltender Zielwert ("Standard"). Er liegt bei $160 \mu\text{g Ozon/m}^3$ (8 h-Mittelwert) und ist von medizinisch/biologischen Kriterien abgeleitet.
2. Die für kurzfristige Belastungsspitzen vorgesehenen Warnstufen- und Schwellenwerte (Smog-Regelung).

Zusätzlich zu einem rechtsverbindlichen Grenzwert müsste das Problem international, im europäischen Rahmen angegangen werden.

Der überregionale, grenzüberschreitende Transport von schadstoffbefrachteten Luftmassen im Sommerhalbjahr würde andernfalls selbst umfassende und kostspielige nationale Bemühungen zur Emissionsverminderung zunichte machen.

Zur weiteren Absenkung der Ozon-Grundbelastung in Deutschland sind unter anderem folgende Maßnahmen geplant:

- Verschärfung europäischer Richtlinien zur Senkung des Ausstoßes von Ozon-Vorläufersubstanzen
- Reduzierung der Stickstoffdioxid-Emissionen aus Flugzeugen

Literatur und andere Quellen

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (2001): Fachinformation Umwelt und Gesundheit „Bodennahes Ozon“. – Informationspapier der Zentralen Informationsstelle für bayerische Umweltberater und –beratungsstellen. – München

Deutsche Forschungsgemeinschaft (1995): Begründeter Verdacht auf krebserzeugende Wirkung von Ozon - DFG-Kommission stuft Reizgas neu ein. - Pressemitteilung 11. Bonn

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (2001): Fachinformation Umwelt und Gesundheit „Bodennahes Ozon“. – Informationspapier der Zentralen Informationsstelle für bayerische Umweltberater und –beratungsstellen. – München
Höppe, P., Rabe, G., Lindner, J., Praml, G. (1997): Forschungsvorhaben: Der Einfluss erhöhter Ozonkonzentrationen auf die Lungenfunktion ausgewählter Bevölkerungsgruppen. - Umwelt & Entwicklung Materialien 125 (Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München)

Verein Deutscher Ingenieure (1987): VDI-Richtlinie 2310, Blatt 15: Maximale Immissionskonzentrationen für Ozon (und photochemische Oxidantien). VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1

Wagner, M., Höppe, P. (1998): Anorganische Gase / 125

Ozon. In: Handbuch der Umweltmedizin. Hrsg. Wichmann, Schlipkötter, Fülgraff. Ecomed, Landsberg, VI-1, 1-43

WHO (1997): Air Quality Guidelines for Europe. Update. Genf

WHO (World Health Organization) 1997 Update and revision of the WHO air quality guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe Publ. ICP EHH 018 VD96.2/11, Bilthoven, Netherlands.

Ozoninformationen des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz:
<http://www.bayern.de/lfu/luft/index.html>

Ozoninformationen des Umweltbundesamtes:
<http://www.env-it.de/luftdaten/start.fwd>

Stand: August 2003

Verfasser: Prof. M. Wagner, Prof. Dr. Peter Höppe, Ulrike Koller

Wissenschaftliche Unterstützung:

Prof. Dr. Peter Höppe, Univ. München, Inst. f. Arbeits- u. Umweltmedizin