

III. Hintergrundinformation: Sommersmog – Ein Bericht des Umweltbundesamtes

Inhalt:

1. Ozon in der Atmosphäre
2. Entstehung von bodennahem Ozon
3. Emissionsquellen der Vorläufersubstanzen
4. Gibt es einen Ozontrend?
5. Wirkungen auf den Menschen
6. Wirkungen auf Pflanzen
7. Grenz- und Schwellenwerte
8. Maßnahmen
9. Fazit

Mit diesem Hintergrundpapier gibt das Umweltbundesamt eine umfassende Einführung und Übersicht über die chemischen Grundlagen der Entstehung des Sommersmogs, die Wirkungen des Ozons auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt sowie die aus Sicht des Umweltbundesamtes notwendigen Maßnahmen zur Bekämpfung des Sommersmogs.

1. Ozon in der Atmosphäre

Ozon ist eine Verbindung, die aus drei Sauerstoffatomen besteht ("normaler" molekularer Sauerstoff – O_2 – ist zweiatomig). Die chemische Formel lautet: O_3 . Ozon entsteht aus der Reaktion von molekularem mit atomarem Sauerstoff. Es ist chemisch sehr reaktiv, greift also viele andere Stoffe an und kann deshalb Menschen, Pflanzen und Materialien (zum Beispiel Kunststoffe und Metalle) schädigen. Darüber hinaus ist Ozon ein Treibhausgas, trägt also zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei.

Ozon spielt in der Erdatmosphäre eine Doppelrolle:

- In den Luftschichten oberhalb von etwa zehn Kilometern (der Stratosphäre) befindet sich mit über 90 % der Hauptanteil dieses Gases. Das Ozon hat dort die lebenswichtige Funktion eines Filters gegen den schädlichen ultravioletten Anteil der Sonnenstrahlung (UV-B und UV-C). In dieser Luftschicht wird Ozon unter anderem durch Chlor und Brom abgebaut. Sie stammen von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), Halogenen und anderen halogenhaltigen Stoffen, die überwiegend vom Menschen hergestellt und freigesetzt werden. Im "Montreal Protokoll" von 1987 und folgenden internationalen Konferenzen sind weltweite Vereinbarungen getroffen worden, um die Emissionen dieser Stoffe zu verringern. Seit Ende 1995 dürfen weltweit keine FCKW mehr hergestellt und verwendet werden (Ausnahmen gelten für Entwicklungsländer). Trotzdem wird sich der Abbau des stratosphärischen Ozons bis Ende dieses Jahrhunderts verstärken, da diese langlebigen, ozonabbauenden Gase auch weiterhin freigesetzt werden und in die Stratosphäre aufsteigen. Der stärkste Ozonabbau (über 50 %) wird über der Antarktis im Zeitraum von September bis November, dem antarktischen Frühling, beobachtet (das sogenannte Ozonloch). In unseren Breiten findet ein

- verstärkter Abbau in den Winter- und Frühjahrsmonaten statt. Während des Zeitraums von 1968 bis 1992 betrug der Ozonrückgang über Europa im Durchschnitt drei Prozent pro Jahrzehnt. Dieser Trend hat sich seit Ende der siebziger Jahre verschärft. Derzeit wird ein Ozonrückgang von fünf Prozent pro Jahrzehnt erwartet. Dies machen auch Ergebnisse aus Messungen des Deutschen Wetterdienstes im Süden Deutschlands deutlich.
- In den unteren Luftschichten bis zehn Kilometern Höhe (der Troposphäre) gibt es einen Sockelanteil natürlich vorhandenen Ozons. Zusätzliches Ozon bildet sich durch komplexe photochemische Reaktionen von Luftverunreinigungen – vor allem flüchtigen organischen Verbindungen (englisch: VOC = volatile organic compounds) und Stickstoffoxiden (NO_x), aber auch Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH_4) – und Sauerstoff bei intensiver Sonneneinstrahlung. Diese Luftverunreinigungen stammen zum großen Teil aus menschlicher Tätigkeit. Ozon wird also nicht direkt emittiert und daher als sekundärer Schadstoff bezeichnet. Ozon führt zu Gesundheits- und Umweltschäden (\Rightarrow Abschnitte 5 und 6).

Zwischen dem "oberen" (stratosphärischen) und "unteren" (bodennahen) Ozon gibt es nur einen eingeschränkten Austausch. Zum einen verläuft ein Gasaustausch zwischen den beiden Luftschichten nur sehr langsam, zum anderen ist die Lebensdauer von Ozon in der unteren Atmosphäre relativ kurz. Wenn keine Neubildung erfolgen kann – also zum Beispiel nach Sonnenuntergang –, nimmt die Ozonkonzentration in den bodennahen Luftschichten schnell wieder ab.

2. Entstehung von bodennahem Ozon

Beim photochemischen Smog (auch Sommersmog genannt) handelt es sich um ein Schadstoffgemisch, das in der unteren Atmosphäre aus einer Vielzahl von Vorläufersubstanzen unter dem Einfluß von Sonnenlicht entsteht: Bei intensiver Sonneneinstrahlung werden durch komplexe photochemische Reaktionen vor allem aus den Vorläufersubstanzen Stickoxide (NO_x) und flüchtige organische Verbindungen (VOC) sogenannte photochemische Oxidantien (Photooxidantien) wie Ozon, Stickstoffdioxid, organische Nitrate wie Peroxyacetylnitrat (PAN), Wasserstoffsuperoxid (H_2O_2), Aldehyde und organische Säuren gebildet (\Rightarrow Abschnitt 3). Ozon ist die Leitsubstanz des Sommersmogs, da es von der Konzentration und den Wirkungen her dominiert. Für hohe Ozonkonzentrationen müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein: Das Vorhandensein der beiden Vorläuferstoffe NO_x und VOC, eine intensive Sonneneinstrahlung und eine mehrere Tage andauernde stabile sommerliche Schönwetterperiode, die zu einer Akkumulation des Ozons innerhalb der atmosphärischen Mischungsschicht führt.

Voraussetzung für die Bildung des Ozons ist die NO_2 -Photolyse (NO_2 -Stickstoffdioxid), das heißt die Abspaltung eines Sauerstoffatoms (von NO_2) durch Licht. Nachfolgend reagiert das abgespaltene Sauerstoffatom mit molekularem Sauerstoff (O_2) zu Ozon. Von entscheidender Bedeutung ist die schnelle Rückbildung des entstandenen Stickstoffmonoxid (NO) zu NO_2 , damit dies für eine erneute Ozonbildung zur Verfügung steht. Diese Oxidation geschieht letztlich durch Peroxiradikale. Gebildet werden diese durch die Reaktion flüchtiger, organischer Verbindungen mit OH-Radikalen nach Anlagerung von Luftsauerstoff. Die NO_2 -Photolyse ist also der "Motor" der Ozonbildung und flüchtige organische Verbindungen sind der "Treibstoff", der dafür sorgt, daß NO immer wieder schnell zu NO_2 umgesetzt wird.

Stickstoffmonoxid (NO) reagiert aber auch mit Ozon, wobei Ozon abgebaut wird. Es bildet sich "normaler" Sauerstoff und NO_2 . Da NO (neben NO_2) zu großen Teilen durch den Verkehr emittiert

wird, kommt es im Sommer regelmäßig – vornehmlich in großen Städten – zu der scheinbar paradoxen Situation, daß die Ozonbelastung an besonders verkehrsreichen Straßen niedriger ist als am Stadtrand und in den angrenzenden ländlichen Gebieten. An verkehrsreichen Straßen übersteigt also der Ozonabbau die Ozonbildung. Eine vordergründige Folgerung, deshalb bei hohen Ozonkonzentrationen vermehrt Auto zu fahren, ist jedoch widersinnig. Obwohl dadurch tatsächlich die Ozonbelastung in den Innenstädten verringert würde, steigt gleichzeitig die Belastung durch andere Schadstoffe an. Außerdem wird das zusätzlich gebildete NO₂ großräumig zu einem Anstieg des Ozonniveaus führen. Dies hätte entsprechende Folgen für entfernter lebende Menschen und die Vegetation, zum Beispiel Folgen für die Landwirtschaft (⇒ Abschnitt 6).

3. Emissionsquellen der Vorläufersubstanzen

Ozon und andere Photooxidantien entstehen aus Stickoxiden (NO_x) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) unter dem Einfluß von Sonneneinstrahlung. Diese Ozonvorläufer kommen sowohl aus natürlichen (biogenen) als auch aus anthropogenen (vom Menschen verursachten) Quellen. In Mitteleuropa sind die natürlichen gegenüber den anthropogenen Emissionen im Jahresmittel zwar gering, während sommerlicher Ozonepisoden können sie aber in erheblichem Maße zu den Gesamtemissionen beitragen, vor allem zu den VOC-Emissionen. In der Umweltberichterstattung zählt das Treibhausgas Methan nicht zu den VOC. Deshalb wird hier die Abkürzung NM-VOC verwendet (NM=Nicht-Methan). Die in den folgenden Tabellen aufgeführten Schadstoffgruppen anthropogener Emissionen haben nicht nur einen Verursacher, sondern viele Quellen. Der Verkehr ist bei Stickoxiden der wichtigste und bei NM-VOC ein bedeutender Emissionsbereich. Die Tabelle auf der folgenden Seite zeigt die Emissionsentwicklung von NO_x und NMVOC in Deutschland von 1990 bis 1996.

Stickoxide stammen zu circa 60 % aus dem Verkehrsbereich (Basis: 1996; vorläufige Angaben). Hierzu tragen Pkw und Nutzfahrzeuge (LKW und Busse) knapp 48 % - vor allem ältere Fahrzeuge ohne moderne Abgasminderungstechnik. Der Anteil des übrigen Verkehrs liegt bei etwa 12 %. Der restliche Anteil der Stickoxid-Emissionen stammt überwiegend aus Feuerungsanlagen. Das sind Anlagen, die fossile Energieträger wie Kohle oder Öl zur Wärmeenergiegewinnung oder Stromerzeugung verbrennen (zum Beispiel Kraftwerke). Als eine Folge der gesetzlichen Vorschriften nahmen in den letzten Jahren (insbesondere aufgrund der technischen Anleitung (TA) Luft und der Großfeuerungsanlagenverordnung diese Emissionen deutlich ab. Das Gleiche gilt im Grundsatz für den Verkehrsbereich. Zu berücksichtigen ist, daß im Sommer der Wärmeenergiebedarf geringer und der Beitrag des Verkehrs dann größer ist als im Jahresdurchschnitt. Im Verkehrsbereich und hier insbesondere bei den NO_x-Emissionen sind in den nächsten Jahren weitere Schritte zur Emissionsminderung erforderlich.

NM-VOC werden zu über 50 % bei der Verwendung von Lösemitteln freigesetzt (Basis: 1996; vorläufige Angaben). Lösemittel finden sich in sehr vielen Produkten, die in Industrie, Gewerbe und Haushalten Verwendung finden, wie in Farben und Lacken, Abbeizern, Reinigungsmitteln usw.. Ebenso werden Lösemittel auch in großen Druck- und Lackieranlagen verwendet. Beim Verkehr (Anteil rund ein Drittel) kommen NM-VOC überwiegend aus dem Auspuff von Pkw mit Ottomotoren (unverbrannter Kraftstoff) und durch die Verdampfung von Kraftstoffen aus dem Tank, dem Kraftstoffsystem und an Tankstellen. Daneben gewinnen die NM-VOC-Emissionen von motorisierten Zweirädern und mobilen Geräten (Rasenmäher, Kettensägen) zunehmend an Bedeutung.

Nach neueren Erkenntnissen wurde die Rolle, die biogene Emissionen von VOC und NO_x für die sommerliche Ozonbildung spielen, bisher möglicherweise unterschätzt. Biogene Emissionen erfolgen hauptsächlich in Form von Kohlenwasserstoffen wie Terpenen und Isoprenen aus Laub- und Nadelbäumen, während die biogenen NO_x-Emissionen überwiegend aus überdüngten Böden stammen.

4. Gibt es einen Oztrend?

In Deutschland messen heute rund 380 Bodenstationen die Ozonkonzentrationen. Die Stationen gehören größtenteils zu den Meßnetzen der Bundesländer. Das Umweltbundesamt betreibt zur Zeit 31 Ozon-Meßstationen.

Die Emissionen der Vorläufersubstanzen, ihre daraus resultierenden Konzentrationen sowie die jeweiligen meteorologischen Gegebenheiten bestimmten den Ozongehalt in der bodennahen Luft. Die sehr komplizierten Bedingungen für das Entstehen hoher Ozonbelastungen aus anderen Luftverunreinigungen haben dazu geführt, daß trotz des seit 1990 in Deutschland zu beobachtende Abnahme der Ozonbelastung erst sehr undeutlich zu beobachten ist. Im Gegenteil: während der Phase der höchsten Schadstoffemissionen um die Mitte der achtziger Jahre waren die Tage mit hohen Ozonwerten wegen mehr oder weniger verregneter Sommer seltener als zu Beginn der neunziger Jahre, was ansatzweise aus der Anzahl der Sommertage und der Ozonmittelwerte in der Tabelle zu entnehmen ist.

Die maximalen Ein-Stunden-Mittelwerte (Mittelwerte bei einstündigen Messung) haben in Deutschland seit 1984 von 365 µg/m³ bis 1997 auf 253 µg/m³ abgenommen (siehe Tabelle). Wenn auch Maximalwerte für eine statistisch gesicherte Bewertung ungeeignet sind, so ist doch bemerkenswert, daß diese Spitzenwerte ausnahmslos an Meßstationen beobachtet wurden, die in der Umgebung von petrochemischen Anlagen installiert sind. Hieraus läßt sich ein Einfluß industrieller VOC-Emissionen auf die Ozonbildung in der Umgebung ableiten. Zum anderen geht die Verminderung der Ozonspitzenwerte einher mit einer deutlichen Verringerung der Emissionen an Vorläufersubstanzen. Der Ozonjahresmittelwert hat sich hingegen seit Ende der 80er Jahre an den Stationen des Umweltbundesamtes kaum verändert.

Wegen der beherrschenden Einflüsse des Wetters – wenn überhaupt – Trendaussagen nur anhand langer Meßreihen möglich. Ozon wurde bereits im vorigen Jahrhundert gemessen, zum Beispiel in Montsouris bei Paris über den Zeitraum von drei Jahrzehnten. Langjährige Messungen weisen darauf hin, daß sich der Jahresmittelwert der Ozonkonzentration an ländlichen Meßstationen gegenüber der Jahrhundertwende mehr als verdoppelt hat. Dies ist aufgrund der Zunahme der Emissionen von NO_x und NM-VOC um ein Vielfaches seit dieser Zeit plausibel, auch wenn die Vergleichbarkeit dieser historischen mit heutigen Meßwerten eingeschränkt ist.

Tabelle: Anzahl der Sommertage und Ozonkonzentrationen in Deutschland von 1984 bis 1997 (Saison von April bis September)

Jahr	Anzahl Sommertage ⁶⁾ Region Küste ¹⁾	Anzahl Sommertage ⁶⁾ Region Nordhälfte ¹⁾	Anzahl Sommertage ⁶⁾ Region Südhälfte ¹⁾	Jahresmittelwert der Ozonkonzentration ⁴⁾ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1-h-Maximum ⁵⁾ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1984	9	18	31	58	365
1985	7	20	44	57	351
1986	10	31	52	57	309
1987	5	15	40	54	278
1988	2	21	46	66	292
1989	17	40	58	69	276
1990	12	32	50	66	323
1991	9	32	61	63	305
1992	12	47	63	62	320
1993	4	26	50	65	300
1994	25	39	57	71	293
1995	30	49	55	68	293
1996	17	22	41	66	271
1997	26	40	57	70	253

¹⁾ Station Schleswig

²⁾ Mittel der Stationen Essen, Hannover, Berlin, Kassel

³⁾ Mittel der Stationen Frankfurt/Main, Nürnberg, München, Karlsruhe, Freiburg

⁴⁾ Mittel der UBA-Stationen Westerland, Waldhof, Deuselbach, Schauinsland, Brotjackriegel

⁵⁾ gemessen an allen deutschen Stationen

⁶⁾ Tage mit Maximaltemperatur über 25°C

5. Wirkungen auf den Menschen

Das für den Sommersmog typische Photooxidantengemisch enthält eine Vielzahl von Reizstoffen, allerdings nicht in konstanter Zusammensetzung. Die starke Reizwirkung des "photochemischen Smogs" auf die Augen und Schleimhäute der oberen Atemwege (Nasen-Rachen-Raum) kommt nur zu einem geringen Teil durch Ozon zustande, hauptsächlich aber durch andere Photooxidantien, die als Nebenprodukt der atmosphärischen Ozonbildung entstehen, zum Beispiel Peroxiacetylnitrat (PAN), Peroxibenzoylnitrat (PBN), Acrolein und Formaldehyd. Diese Substanzen sind – im Gegensatz zu Ozon – gut wasserlöslich. Im Hinblick auf ihre gesundheitlichen Wirkungen sind sie allerdings weniger bedeutend als Ozon, da sie in geringeren Konzentrationen auftreten und weniger toxisch (giftig) sind als Ozon.

Ozon selbst reagiert durch seine hohe Reaktionsbereitschaft fast ausschließlich am Auftreffort, das heißt an den Oberflächen des Atemtraktes. Durch seine geringe Wasserlöslichkeit wird es in viel geringerem Maße als beispielsweise Schwefeldioxid in den oberen Atemwegen zurückgehalten. Folglich dringt Ozon viel weiter in die Lunge ein. In der Lungenperipherie trifft es auf Gewebe, das nicht durch eine Schleimschicht geschützt ist. Hier kann es zur Schädigung der Zellmembran mit den damit entzündlichen Prozessen kommen.

Im Gegensatz zum Wintersmog (hier sind insbesondere Asthmakranke betroffen) gibt es bei Ozon keine genau eingrenzbare Risikogruppe. Die individuelle Empfindlichkeit gegenüber Ozon ist sehr unterschiedlich ausgeprägt. Es ist davon auszugehen, daß etwa 10 – 15 % der Bevölkerung (quer durch alle Bevölkerungsgruppen) besonders empfindlich auf Ozon reagieren. Gesundheitliche Beeinträchtigungen sind um so eher zu erwarten

- je höher die Ozonkonzentration der inhalierten Luft ist,
- je länger die Exposition dauert und
- je höher das Atemminutenvolumen (Luftvolumen, das während einer Minute ein- oder ausgeatmet wird) während der Exposition ist.

Körperliche Aktivität oder Anstrengung steigern das Atemminutenvolumen. Durch Ozon besonders betroffen sind deshalb alle diejenigen Personen, die während Sommersmog-Episoden bei Spiel, Sport oder Arbeit häufig längere, anstrengende körperliche Tätigkeiten im Freien ausüben. Darüber hinaus müssen aus Vorsorgegründen grundsätzlich alle Säuglinge und Kleinkinder als Risikogruppe eingestuft werden, da sie, bezogen auf ihre Körpergröße, ein relativ erhöhtes Atemminutenvolumen haben. Zudem ist ihr Immunsystem noch nicht vollständig ausgebildet eine zusätzliche Reizung durch Ozon könnte die Anfälligkeit gegenüber Infektionen des Atemtraktes erhöhen.

Nicht abschließend geklärt ist die Frage, ob Asthmatiker als Gruppe empfindlicher auf Ozon reagieren als Nicht-Asthmatiker: Einerseits wird in der Fachliteratur beschrieben, daß Asthmatiker oder Patienten mit chronischen Atemwegserkrankungen nicht grundsätzlich stärker reagieren als andere Personen. Auf der anderen Seite wird zum Teil doch über stärkere Reaktionen von Kindern mit Asthma berichtet.

Potentielle, konzentrations-, beziehungsweise dosisabhängige Wirkungen von Ozon auf Menschen sind sensorische Wirkungen (Geruch), Wirkungen auf die Lungenfunktion und Wirkungen auf die körperliche Leistungsfähigkeit. Die durch Ozonexposition verursachten Symptome treten nur nach mehrstündiger Exposition bei gleichzeitiger körperlicher Aktivität auf:

- Veränderungen von Lungenfunktionsparametern (zum Beispiel Abnahme des forcierten Ausatemvolumens, Zunahme des Widerstands in den Atemwegen) bei Schulkindern und Erwachsenen ab $160 \text{ bis } 300 \text{ g/m}^3$ nach reger körperlicher Aktivität im Freien; in klinischen Expositionsversuchen mit freiwilligen Probanden ab $160 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ bei sechsstündiger, beziehungsweise ab $240 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ bei dreistündiger Exposition mit intermittierender (zwischen Anstrengung und Ruhe wechselnder) körperliche Aktivität. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen bereits bei Ozonkonzentrationen von $100 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ Einschränkungen der Lungenfunktion, wobei neben Ozon sehr wahrscheinlich noch andere Schadstoffe eine Rolle spielen.
- Reduzierung der physischen Ausdauer-Leistungsfähigkeit ab $240 \text{ }\mu\text{g/m}^3$
- Entzündliche Reaktion des Lungengewebes ab $160 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ bei 6,6-stündiger Exposition mit intermittierender körperlicher Belastung.
- Zunahme der Häufigkeit von Asthmaanfällen ($240 \text{ bis } 300 \text{ }\mu\text{g/m}^3$).

Diese funktionellen Veränderungen und Beeinträchtigungen normalisieren sich im allgemeinen weitgehend im Laufe von ein bis drei Stunden nach Expositionsende. Bei besonders starken Belastungen lassen sich allerdings geringe Abweichungen noch nach 24 bis 48 Stunden feststellen.

Subjektive Befindlichkeitsstörungen wie Tränenreiz (verursacht durch Begleitstoffe des Ozons), Reizung der Atemwege, Husten, Kopfschmerzen und Atembeschwerden werden ab $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ genannt. Die akuten Reizerscheinungen an Augen und Schleimhäuten sind von der körperlichen Aktivität weitgehend unabhängig; ihr Ausmaß wird primär durch die Aufenthaltsdauer in der ozonbelasteten Atmosphäre bestimmt.

Um gesundheitliche Beeinträchtigungen durch hohe Ozonkonzentrationen zu vermeiden, sollte man folgende Regeln beachten.

- Da hohe Ozonkonzentrationen üblicherweise bei hohen Temperaturen auftreten, kann als Faustregel gelten: Vernünftiges Verhalten im Hinblick auf hohe Temperaturen auftreten, kann als Faustregel gelten: Vernünftiges Verhalten im Hinblick auf hohe Temperaturen ist auch vernünftig im Hinblick auf Ozon.
- Längere körperliche Anstrengungen sollten möglichst nicht in die Mittags- und Nachmittagsstunden gelegt werden, wenn sie auch zu anderen Tageszeiten möglich sind.

Bei besonders hoher chronischer Belastung kann es, wie Tierversuche (zum Beispiel bei Affen, Ratten und Mäusen) zeigen, zu irreversiblen Veränderungen in der Lunge kommen. Die Frage nach dem Auftreten chronischer Wirkungen beim Menschen kann anhand neuer Studien dahingehend beantwortet werden, daß bei den extremen Konzentrationsverhältnissen, wie sie beispielsweise in Los Angeles herrschen – dort wurden im Jahr 1985 an circa 70 Tagen Ozon-Stundenmittel von über $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen -, sich nach mehrjährigem Aufenthalt in der Region bei einem Teil der Bevölkerung eine persistente (dauernde) und zum Teil vermutlich irreversible Verschlechterung der Lungenfunktion entwickeln kann.

Neben den bereits genannten Wirkungen kann Ozon die menschliche Gesundheit noch durch andere Wirkungen beeinträchtigen, die aber nicht konkreten Konzentrationen zugeordnet werden können. Dazu zählen:

- allergiefördernde Wirkung: Ozon selbst ist kein Allergen. Durch die beschriebene Reizwirkung können aber im peripheren Lungengewebe entzündliche Prozesse ausgelöst werden. Dies führt möglicherweise dazu, daß gleichzeitig anwesende chemische oder biologische Allergene tiefer in das geschädigte Gewebe eindringen, was eine Allergisierung begünstigen könnte.
- gentoxische (erbgutschädigende) und kanzerogene (krebserzeugende) Wirkung: In Zellkulturen wirkt Ozon sowohl bei Bakterien und Pflanzen als auch bei Säugetierzellen eindeutig gentoxisch. Auch nach der Ozonexposition von Tieren ist ein gentoxisches Potential nachweisbar, allerdings nicht so durchgängig wie in der Zellkultur; darüber hinaus kann Ozon infolge seiner starken Reizwirkung kokanzerogen wirken, das heißt bei Anwesenheit von Kanzerogenen die Krebsentstehung fördern (in manchen Fällen aber auch abschwächen).

Eine Studie im Rahmen des US-amerikanischen "National Toxicology Program" (NTP) ergab Hinweise auf kanzerogene Wirkungen von Ozon im Tierversuch. In der Studie wurden weibliche und männliche Ratten und Mäuse in Gruppen zu je 50 Tieren zwei Jahre lang oder über die Lebenszeit der Tiere sechs Stunden täglich an fünf Tagen pro Woche Ozon ausgesetzt. Als Expositionskonzentrationen wurden 0,12 ppm¹ (240 µg/m³; entspricht dem US-Luftqualitätsstandard²), 0,5 ppm (1000 µg/m³) als mittlere Konzentration und 1,0 ppm (2000 µg/m³) als höchste Konzentration, bei der Versuchstiere lange genug überleben können ("maximum concentration believed compatible with long-term survival"), gewählt.

Die Ergebnisse der Zwei-Jahres-Studie bei weiblichen Mäusen belegen eine statistisch signifikant erhöhte Bildung von Lungentumoren bei 1 ppm. Ein von der Tendenz her gleichartiges Ergebnis im Lebenszeit-Versuch bei 1 ppm war statistisch nicht signifikant. Statistisch signifikant war jedoch bei den weiblichen Mäusen eine Verminderung der Lebertumore, so daß sich bei der Auswertung der Gesamt-Tumorhäufigkeit bei 11ppm ein signifikanter Rückgang ergab. Bei den männlichen Mäusen wurde bei 0,5 und 11ppm sowohl in der Zwei-Jahres-Studie als auch in der Lebenszeitstudie eine geringfügige Erhöhung der Lungentumorraten festgestellt, die aber nicht signifikant war. Da eine chronische Reizwirkung ein möglicher Wirkungsmechanismus der Tumorentstehung in der Lunge sein kann, für die Verminderung der Lebertumore aber keine plausible Hypothese vorliegt, können derzeit nur die Lungenbefunde interpretiert werden.

Bei den Versuchen mit Ratten trat keine erhöhte Tumorraten unter der gewählten Ozonexposition auf. Es wurden jedoch bei Ratten und Mäusen bei 0,1 und 11ppm (nicht aber bei 0,12 ppm) vermehrt Zellveränderungen (Hyper- und Metaplasien) in den Atemwegen gefunden, die als Vorstufe von Tumoren angesehen werden können. Diese Zellveränderungen weisen daher in die gleiche Richtung wie die erhöhte Lungentumorraten bei den weiblichen Mäusen bei 1 ppm.

Betrachtet man die im NTP-Bericht beschriebenen Ergebnisse aller Versuche mit Mäusen zusammen, so ist eine klare Dosis-Wirkungs-Beziehung nicht zu erkennen. Die Befunde deuten aber darauf hin, daß für die Tumorbildung an der Lunge eine Wirkungsschwelle existiert. Da die übliche Voraussetzung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung nicht vorliegt, läßt sich auf der Basis dieser Versuche kein "unit risk"³ für Ozon ableiten.

¹ ppm = parts per million (ein Millionstel des Volumens oder Gewichts).

² Die US-Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) hat vorgeschlagen, die Meßbasis für den Ozongrenzwert von einem 1-Stunden-Maximum auf ein 8-Stunden-Maximum zu verändern. Der Grenzwert soll von 0,12 ppm auf 0,08 ppm (das entspräche 160 µg/m³ Luft) abgesenkt werden. Dieser Vorschlag wird zur Zeit diskutiert.

³ Als "unit risk" bezeichnet man das geschätzte Risiko, an Krebs zu erkranken, wenn man dauerhaft (70 Jahre) einem Gefahrstoff in einer Konzentration von 1 µg/m³ Luft ausgesetzt ist (inhalative Exposition).

Für die in Deutschland vorkommenden Konzentrationen läßt sich zur Zeit nicht klären, ob das kanzerogene Potential von Ozon beim Menschen eine Rolle spielt. Geht man direkt von den Ergebnissen der Mäuseversuche in der NTP-Studie aus, so spricht vieles dafür, daß die Wirkungsschwelle, wenn überhaupt, nur selten überschritten wird und damit insgesamt keine nennenswerte Erhöhung des Lungenkrebsrisikos durch Ozon vorliegt. Bei dieser Betrachtung sind allerdings keine zusätzlichen Sicherheitsfaktoren einbezogen. Ob diese auf die Allgemeinbevölkerung bezogene Aussage auch generell für Expositionen an Freiluft-Arbeitsplätzen zutrifft, an den regelmäßig auch in Zeiten erhöhter Ozonkonzentrationen langandauernde, körperlich anstrengende Tätigkeiten im Freien erforderlich sind, läßt sich derzeit nicht beurteilen.

Bei schönem Wetter gelangt durch verstärktes Lüften mehr Ozon in die Innenräume. Zwar wird das Ozon dort binnen weniger Stunden abgebaut. Doch kann das Ozon mit organischen Verbindungen aus im Raum befindlichen Materialien (zum Beispiel aus Tapeten und Anstrichen) reagieren. Das ist jedoch abhängig von den Bau- und Ausstattungsmaterialien in den Räumen. Messungen des Umweltbundesamtes haben gezeigt, daß bei diesen Reaktionen weitere, potentiell gesundheitsschädliche Luftschadstoffe wie zum Beispiel Formaldehyd entstehen. Bei hohen Ozonkonzentrationen sollte daher vornehmlich in den Morgen- und Abendstunden stärker gelüftet werden.

Fazit: Unabhängig von der Kanzerogenitäts-Diskussion gibt es wegen der anderen, in diesem Abschnitt genannten Wirkungen ausreichend Gründe, Maßnahmen zur Reduzierung der Ozon-Konzentrationen zu ergreifen.

6. Wirkungen auf Pflanzen

Zur Wirkung von Ozon auf Pflanzen liegen hauptsächlich Untersuchungen an landwirtschaftlichen Nutzpflanzen und an Waldbäumen vor. Einige wenige Untersuchungen wurden an Wildpflanzen durchgeführt. Sobald Ozon von der Pflanze direkt über die Spaltöffnungen aufgenommen wird, greift es hier wegen seiner oxidativen Wirkung (chemische Vereinigung eines Stoffs mit Sauerstoff) die Zellstruktur des Pflanzengewebes an.

Bei einer gezielten Begasung sind sowohl Zuwachsminderungen als auch sichtbare Schädigungen wie Blattnekrosen (abgestorbene Blätter) oder Verfärbungen zu verzeichnen. Untersucht worden sind vor allem Sommerweizen, Klee, Bohnen und Mais sowie Buche, Eiche, Fichte und Kiefer.

Das Ausmaß der Schädigung hängt nicht allein von der einwirkenden Konzentration, sondern auch von der Dauer der Belastung ab. Daher ist unter Mitwirkung des Umweltbundesamtes ein Schwellenwertkonzept ausgearbeitet worden, das beide Komponenten der Ozonbelastung – die Konzentration und die Dauer des Einwirkens – berücksichtigt. Danach wird die Belastungsschwelle, die nicht überschritten werden sollte, als die Summe der Konzentrationen oberhalb eines Grundwertes definiert. Das bedeutet, daß oberhalb des Grundwertes die stündlich gemessenen Konzentrationen während einer festgesetzten Zeit (zum Beispiel unter Tageslicht und in der Vegetationsperiode) zu einem Summenwert addiert werden (gemessen in ppb⁴, mal Stundenzahl). Diese Summe darf einen bestimmten Schwellenwert nicht überschreiten. Für landwirtschaftliche Nutzpflanzen insgesamt 3000 ppb*h nicht überschreiten. So ist zum Beispiel die Gefahr eines fünfprozentigen Ernteverlustes bei Weizen gegeben, wenn der Wert von 40 ppb über die dreimonatige Vegetationsperiode täglich drei Stunden lang mit Konzentrationen von 11 ppb (entspricht ca. 20 µg/m³) überschritten wird oder täglich nur eine Stunde mit Konzentrationen von 33 ppb (66 µg/m³) (90 x 3 h x 11 ppb = 3000 ppb*h, beziehungsweise 90 x 1 h x 33 ppb = 3000 ppb*h).

Die Schwellenwerte für Waldbäume sind bislang weniger gut fundiert. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, daß Buche und Eiche empfindlicher gegenüber Ozon sind als die Nadelbäume Tanne, Kiefer und Fichte. Als Schwellenwert für eine über die Vegetationsperiode (sechs Monate, gezählt unter Tageslicht) akkumulierte Belastung wird für Bäume ein Wert von 10.000 ppb*h angenommen. Bei Laubbäumen kann zum Beispiel an Setzlingen ein zehnpromtiger Zuwachsverlust verzeichnet werden, wenn die Bäume an insgesamt 28 Tagen im Jahr einer Belastung von 55ppb (entspricht circa 110 µg/m³) ausgesetzt sind.

Da die Untersuchungen an Wildpflanzen derzeit noch lückenhaft sind, können entsprechende tolerierbare Werte für Ökosysteme derzeit noch nicht festgelegt werden.

7. Grenz- und Schwellenwerte

Da Ozon nicht direkt emittiert wird (⇒ Abschnitt 2), sondern aus anderen Schadstoffen unter Einfluß von Sonnenlicht gebildet wird, gibt es für Ozon keine Emissionsgrenzwerte. Demgegenüber wird die Emission der Vorläufersubstanzen NO_x und NM-VOC mit einer Vielzahl von Grenzwerten geregelt (zum Beispiel für genehmigungsbedürftige Industrieanlagen durch die TA Luft, europäische Grenzwerte für die Zulassung von Pkw und Lkw, Verordnungen über Verdunstungsverluste beim Kraftstoff).

⁴ ppb = parts per billion (ein Milliardstel des Volumens oder Gewichts).

Zur Beurteilung der Ozonkonzentrationen in der Atemluft sowie zur Information und Warnung der Bevölkerung sind für die Europäische Union (EU) folgende "Schwellenwerte" festgelegt worden. Diese Werte sind mittels der 22. Bundesimmissionsschutzverordnung (BlmSchV) in das deutsche Immissionsschutzrecht übernommen worden.

- Schwellenwert für den Gesundheitsschutz (Ozonkonzentrationen, die zum Schutz der menschlichen Gesundheit im Falle länger andauernder Belastung nicht überschritten werden sollten): Unterhalb $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Acht-Stunden-Mittelwert, das heißt Mittelwert der Konzentration über acht Stunden) wird davon ausgegangen, daß keine gesundheitsbeeinträchtigenden Wirkungen auftreten.
- Schwellenwert für den Schutz der Vegetation: $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ein-Stunden-Mittelwert) und $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24-Stunden-Mittelwert).
- Schwellenwert für die Unterrichtung der Bevölkerung (Ozonkonzentrationen, bei deren Überschreiten es bei besonders empfindlichen Gruppen der Bevölkerung auch im Fall einer kurzen Exposition begrenzte und vorübergehende gesundheitliche Auswirkungen gibt): Ab einer Ozonkonzentration von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ein-Stunden-Mittelwert) sollen Personen, die erfahrungsgemäß gegenüber Luftschadstoffen empfindlich reagieren, insbesondere ungewohnte und starke Anstrengungen im Freien am Nachmittag vermeiden.
- Schwellenwert für die Auslösung des Warnsystems (Ozonkonzentrationen, bei deren Überschreiten im Falle einer kurzen Exposition eine Gefahr für die menschliche Gesundheit besteht): Ab einer Konzentration von $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ein-Stunden-Mittelwert) wird der gesamten Bevölkerung empfohlen, länger andauernde und körperlich anstrengende Tätigkeit im Freien, insbesondere am Nachmittag, zu vermeiden.

Einen rechtsverbindlichen Konzentrationswert für Ozon zur Auslösung von Emissionsminderungsmaßnahmen enthält das Gesetz zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes ("Ozongesetz") vom Juli 1995 (\Rightarrow Abschnitt 8). Er liegt dort bei $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ein-Stunden-Mittelwert). Durch das Gesetz werden großräumige Fahrverbote für Fahrzeuge mit hohem Schadstoffausstoß bewirkt. Es dient der Bekämpfung kurzfristig auftretender Ozonspitzen.

8. Maßnahmen

Um die Ozonkonzentrationen spürbar zu reduzieren, ist eine deutliche und dauerhafte Verringerung der Emissionen der beiden Vorläufersubstanzen NO_x und NM-VOC erforderlich.

Würden beispielsweise nur die Emissionen einer der beiden Stoffgruppen um einige Prozent verringert, wäre nicht mit einer nennenswerten Auswirkung auf die Ozonbelastung zu rechnen.

Bei der Verringerung der sommerlichen Ozonkonzentration sind zwei Strategien von Bedeutung: Zum einen muß langfristig angestrebt werden, während des gesamten Jahres (also nicht nur während der Smogperioden) die Emissionen der Vorläufersubstanzen zu verringern. Die Reduktion muß bei beiden Stoffgruppen etwa 70 bis 80 % bezogen auf die Emissionen Mitte der 80er Jahre betragen, um nach heutigem Kenntnisstand gesundheitlich gefährdende Ozonkonzentrationen in Deutschland weitgehend auszuschließen.

Da eine Reduktion in dieser Größenordnung nur langfristig zu realisieren sein wird, müssen zudem Maßnahmen ergriffen werden, die nur während der eigentlichen Smogperioden gelten. Diese kurzfristigen, zeitlich begrenzten Maßnahmen haben das Ziel, die Spitzenwerte zu senken und damit akute gesundheitliche Beeinträchtigungen zu verringern. Sie führen allerdings erst dann zu einer Senkung der Ozonkonzentrationen, wenn die Eingriffstiefe der Maßnahmen ausreicht und können sogar unter bestimmten Voraussetzungen innerstädtisch zu einer Erhöhung der Ozonbelastung führen (⇒ Abschnitt 2).

8.1 Mittelfristige und langfristige Maßnahmen

Mittel- und langfristig wirkende Maßnahmen umfassen eine veränderte und verbesserte Technik von Anlagen und Fahrzeugen sowie eine veränderte Zusammensetzung von verschiedenen lösemittelhaltigen Produkten.

Beispiele für solche Maßnahmen sind im Verkehrsbereich:

- Verringerung der NO_x und NM-VOC-Emissionen von Pkw durch die Erhöhung des Anteils von Pkw mit geregelterm Drei-Wege-Katalysator (1996 lag der Anteil der von Fahrzeugen mit geregelterm Drei-Wege-Katalysator zurückgelegten Fahrleistung an der gesamten Fahrleistung bei 61,9 %, bei Dieselfahrzeugen: 19,3 %, bei Pkw ohne geregelten Drei-Wege-Katalysator: 18,8 %).
- Weitere Verschärfung der europäischen Grenzwerte für neu zuzulassende Fahrzeuge aller Art (für neue Grenzwertstufen 2000/2005 liegt ein Vorschlag der Europäischen Kommission vor, der vom Europäischen Rat und dem Europäischen Parlament behandelt wird).
- Einsatz moderner Abgasreinigungstechnik für Diesel-Lkw und Busse zur deutlichen Verminderung der NO_x-Emissionen. Solche Techniken werden in Pilotprojekten getestet und können in den nächsten Jahren zur Serienreife entwickelt werden.
- Stärkere Überwachung der bestehenden Tempolimits von 80km/h für Lkw auf Bundesautobahnen und 60 km/h für Lkw über 7,5 Tonnen auf Landstraßen.
- Senkung des Schwefelgehaltes im Ottokraftstoff sowie Senkung der Siedegrenzen und des Dampfdrucks des Ottokraftstoffes.
- Weitergehende Minderung der NM-VOC-Emissionen beim Umfüllen und Lagern von Ottokraftstoffen und beim Betanken von Kraftfahrzeugen durch verbesserte Lager- und Umfülltechnik sowie höheren Wirkungsgrad von Gasrückführungssystemen.

Grundsätzlich ist darüber hinaus in der Verkehrspolitik eine Verminderung der Fahrleistung sowie eine Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger (Bahn, Schiff, Bus, Fahrrad, zu Fuß gehen) anzustreben. Dies setzt umfangreiche Maßnahmen voraus, die hier nicht im einzelnen dargestellt werden sollen. Ein zentraler Punkt dabei ist jedoch, daß die heutigen Preise sowohl für den Personen- als auch für den Gütertransport auf der Straße nicht den Kosten der Umweltbelastung entsprechen. Zukünftige Transportpreise müssen auch die verkehrsbedingten ökologischen Belastungen, die sogenannten externen Kosten, widerspiegeln.

Da inzwischen über die Hälfte der NM-VOC-Emissionen aus dem Bereich der Lösemittelverwendung kommen, sind dort zum Beispiel folgende Maßnahmen erforderlich:

- Umsetzung der Anforderungen der Lösemittelrichtlinie der EU (Inkrafttreten für Herbst 1998 erwartet).
- EU-weite Begrenzung des Lösemittelgehaltes in Produkten wie z.B. Lacken, Klebstoffen, Druckfarben und Reinigungsmitteln.

8.2 Nationale Emissionshöchstgrenze für Stickstoffoxid und VOC

Als langfristig wirkende Maßnahmen sind auch die Bestrebungen der EU und der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (ECE) zur Festlegung von nationalen Emissionsobergrenzen für Stickstoffoxid und leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC) anzusehen.

In beiden Gremien werden diese Schadstoffe zusammen mit Ammoniak- und Schwefeldioxidemissionen übergreifend zu einer Gesamtstrategie gegen Versauerung und Ozon geregelt. Die Kommission der EU will hierzu Ende 1998 einen Vorschlag vorlegen und ist in einen intensiven Dialog mit den Mitgliedsstaaten über die technischen Grundfragen für die Festlegung solcher nationalen Emissionsobergrenzen eingetreten. Das Zieljahr für die Einhaltung der Emissionsobergrenzen ist das Jahr 2010. In der ECE haben im Rahmen der Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung entsprechende Arbeiten an einem Multischadstoff-/Multieffekt-Protokoll begonnen.

Die in beiden Aktivitäten gegen Versauerung und Ozon festgelegten Kriterien für die Ableitung nationaler Emissionsobergrenzen sind

- die Orientierung an kritischen Belastungswerten für den Schutz von Ökosystemen bzw. der menschlichen Gesundheit und
- eine ökonomische Optimierung der Maßnahmen im jeweiligen Regelungsgebiet mit dem Ziel, die Maßnahmenkosten insgesamt zu minimieren.

8.3 Ozongesetz

Das Gesetz zur Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) vom 19.07.1995, Bundesgesetzblatt Teil I, S. 930 ("Ozongesetz"), ist am 26.07.1995 in Kraft getreten. Ziel des "Ozongesetzes" ist die kurzfristige Absenkung sommerlicher Ozon-Spitzenwerte durch großräumige Fahrverbote. Nach diesen Bestimmungen ist für hoch emittierende Kraftfahrzeuge ein Fahrverbot vorgesehen, wenn an mindestens drei Meßstationen im Bundesgebiet, die mehr als 50 Kilometer und weniger als 250 Kilometer voneinander entfernt sind, ein Stundenmittelwert von $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht wird und wenn im Bereich dieser Meßstationen auch am nächsten Tag Ozonkonzentrationen gleicher Höhe zu erwarten sind. Die Fahrverbote gelten an dem auf die Bekanntmachung des Ozonalarms folgenden Tag und dauern 24 Stunden ab sechs Uhr morgens. Für die Stadtstaaten Berlin, Hamburg, Bremen sowie das Saarland genügt es, wenn nur eine der drei Meßstationen in diesen Bundesländern oder einem angrenzenden Landkreis liegt.

Ausgenommen von diesen Fahrverboten sind Fahrten mit Kraftfahrzeugen, die im Anhang des "Ozongesetzes" als Kraftfahrzeuge mit geringem Schadstoffausstoß genannt sind, sowie Fahrten zu besonderen Zwecken, die dem öffentlichen Interesse dienen oder beruflich bedingt sind und auf zumutbare Weise anders nicht bewältigt werden können. Die für den Vollzug zuständigen Länder können darüber hinaus Ausnahmen in Einzelfällen zulassen. Fahrverbote sollen bewirken, daß Nutzer von Kraftfahrzeugen mit hoher Schadstoffemission auf schadstoffarme Kraftfahrzeuge umsteigen, denn für die dauerhafte Absenkung der Ozonkonzentrationen ist eine flächendeckende Umstellung des Kraftfahrzeugbestandes auf schadstoffarme Fahrzeuge notwendig. Bei Erreichen des Schwellenwertes von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sieht das Gesetz einen Appell an die Bevölkerung vor, Kraftfahrzeuge, motorbetriebene Rasenmäher und andere nicht gewerbliche Verbrennungsmotoren nicht zu benutzen. Nach Auffassung der Bundesregierung entspricht dieser Appell an das Verantwortungsbewußtsein jedes einzelnen in diesem Konzentrationsbereich den Grundsätzen der Verhältnismäßigkeit.

Der Bundesrat hat die Bundesregierung mit Beschluß vom 14.07.1995 gebeten, eine zentrale Stelle mit der Organisation eines wissenschaftlichen Begleitprogramms zum "Ozongesetz" zu beauftragen. In diesem Begleitprogramm sollen die mit den temporären Maßnahmen auf der Basis des "Ozongesetzes" und anderen langfristigen Maßnahmen erreichten Ozonminderungserfolge untersucht und daraus der Bedarf an weiteren Regelungen abgeleitet werden. Die Bundesregierung hat mit dieser Aufgabe das Umweltbundesamt beauftragt. Eine Projektgruppe des Umweltbundesamtes führt diese Arbeiten aus. Die Bundesregierung berichtet dem Bundesrat jährlich zum 31.12. über die aktuellen Erkenntnisse.

8.4 Kurzfristige Maßnahmen

Regionale Maßnahmen

In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, inwieweit regional begrenzte Maßnahmen (zum Beispiel regionale Fahrverbote für Pkw ohne Katalysator, regionale Tempolimits für Pkw auf Autobahnen) einen Beitrag zur Senkung der Belastungsspitzen liefern können. Dieser Beitrag ist grundsätzlich gering einzuschätzen, da die Vorläufersubstanzen – je nach Wetterlage – pro Tag mehrere hundert Kilometer auf dem Luftweg transportiert werden können. Emissionen tragen also weit von ihrem Entstehungsort entfernt zur Ozonbildung bei. Das belegen auch die regelmäßig hohen Ozonwerte in ländlichen Regionen und den Mittelgebirgen, wo die Emissionen der Vorläufersubstanzen relativ gering sind.

Im Sommer 1994 gab es in zwei Bundesländern regional begrenzte Maßnahmen.

In Baden-Württemberg wurden an vier Tagen im Untersuchungsgebiet Heilbronn/Neckarsulm Fahrverbote für Pkw ohne Katalysator und ein Tempolimit von 60 km/h auf einem Autobahnteilstück ausgesprochen. Im Untersuchungsgebiet durften ferner nur Lkw fahren, die die Abgaswerte der Euronormen I und II ohne Einschränkung erfüllen.

Die Ergebnisse des Versuchs zeigten eine deutliche Verringerung der Konzentration von Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen im Nahbereich der Straßen, der Benzolkonzentrationen in den untersuchten Innenstädten und der Lärmbelastung. Diese Ergebnisse sind aufgrund der eingeleiteten Maßnahmen nicht unerwartet. Eine Verringerung der Ozonkonzentration konnte im Untersuchungsgebiet jedoch nicht festgestellt werden. Die Größe des Untersuchungsgebietes war zu klein.

Gleiches gilt für das 1994 in mehreren Zeitabschnitten in Hessen verhängte Tempolimit von 90 km/h auf Autobahnen und 80 km/h auf sonstigen Straßen. Voraussetzung für die Verhängung des Tempolimits in der damals gültigen hessischen Ozon-Verordnung war, daß eine Ozonkonzentration von 240 µg/m³ (Einstundenmittel, später auf 215 µg/m³ geändert) an mindestens drei Meßstellen, die untereinander einen Abstand von mindestens 50 Kilometern haben, zeitgleich überschritten wurde.

Es besteht heute in Deutschland weitgehend Einigkeit, daß Maßnahmen zur Verminderung der Ozonspitzen überregional und länderübergreifend angelegt werden müssen.

Überregionales Tempolimit:

Das Umweltbundesamt hat die Auswirkungen eines Tempolimits – wie dies in der früheren hessischen Ozonverordnung festgelegt war – für den Fall der bundesweiten Anwendung geschätzt.

Auf der Basis der Modellabschätzungen kann man davon ausgehen, daß die bundesweite, überregionale Anwendung eines Tempolimits (mit Kontrolle) zu einer deutlichen Reduzierung der gesamten NO_x-Emissionen, aber nur zu einer geringen Reduzierung der NM-VOC-Emissionen führen wird. Die aus einem bundesweiten überregionalen Tempolimit von 80 km/h (Pkw auf Bundesautobahnen) und 60 km/h (Lkw auf Bundesautobahnen, Pkw und Lkw auf sonstigen außerörtlichen Straßen) mit einer unterstellten Befolgungsrate von 80 % resultierende Minderung der Ozonspitzenwerte liegt bei bis zu fünf Prozent. Damit trägt ein überregionales, großräumiges Tempolimit nur geringfügig zur Minderung der Ozonbelastung bei.

Überregionale Fahrverbote:

Wie der Heilbronner Modellversuch gezeigt hat, können lokal eng begrenzte Fahrverbote nur unwesentlich zur Verminderung der Ozonspitzen beitragen. Demgegenüber ist bei großräumigen, länderübergreifenden Fahrverboten für Pkw ohne Katalysator und ältere Dieselfahrzeuge eine spürbare Reduzierung der Ozonbelastung zu erwarten. Ein großräumiges Fahrverbot für nicht-schadstoffarme Pkw (Pkw ohne Drei-Wege-Katalysator sowie nicht-schadstoffarme Diesel-Pkw auf allen Straßenkategorien) bringt Modellrechnungen zufolge eine Minderung der Ozonspitzenwerte, die bei bis zu zehn Prozent liegt.

Wie nicht anders zu erwarten, ergeben die oben angegebenen Modellrechnungen die effektivsten Minderungen von NO_x und NM-VOC bei einer Kombination der oben genannten Maßnahmen: ein großräumiges Tempolimit mit Fahrverboten. Aus den Modellrechnungen wird deutlich, daß die Wirksamkeit temporärer Maßnahmen hinsichtlich des Vermeidens hoher Ozonwerte größer sein wird, wenn diese Maßnahmen frühzeitig eingeleitet werden. Falls die Atmosphäre bei Einleitung einer Maßnahme bereits stark mit Oxidantien und Vorläufersubstanzen vorbelastet ist, wird die Reduktion nur abgeschwächt erfolgen.

9. Fazit

Bodennahes Ozon entsteht unter Einfluß von Sonnenstrahlung aus flüchtigen organischen Verbindungen (NM-VOC) und Stickoxiden (NO_x). Das bodennahe Ozon erreicht auch in Deutschland während sommerlicher Schönwetterperioden Konzentrationen, die die Gesundheit der Menschen gefährden können und zu Vegetationsschäden führen. Die Entwicklung der Ozonbelastung zwischen Anfang der 70er Jahre und Ende der 80er Jahre wurde in Deutschland im wesentlichen durch die Zahl der sommerlichen Sonnentage bestimmt, da sich die Vorläuferemissionen während dieser Zeit auf hohem Niveau nur wenig änderten. In Deutschland ist in den letzten Jahren ein abnehmender Trend bei den beobachteten Ozonspitzenkonzentrationen erkennbar, was einhergeht mit einer etwa 30prozentigen Reduzierung der Emissionen von NO_x und VOC. Um Gesundheitsgefahren zukünftig ausschließen zu können, ist eine Verringerung der Emissionen dieser Vorläufersubstanzen um 70 bis 80 % bezogen auf die Emissionen Mitte der 80er Jahre erforderlich. Bedeutende Emittenten der Vorläufersubstanzen NO_x und NM-VOC sind der Verkehr (NO_x , NM-VOC) und die Verwendung von Lösemitteln in Industrie, Gewerbe und im Verbraucherbereich (NM-VOC), weshalb Minderungsmaßnahmen bevorzugt dort ansetzen sollten.

Die genannte 70 bis 80%ige Minderung ist allerdings nur mittel- bis langfristig und durch die Kombination einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen zu erreichen, die auch strukturelle Veränderungen einschließen. Kurzfristige Maßnahmen lassen nur dann deutliche Verringerungen der Ozonspitzen erwarten, wenn sie großräumig zu einer erheblichen Verringerung der Emissionen der Vorläufersubstanzen führen. Entscheidend für die Wirksamkeit der temporären Maßnahmen sind ihr Umfang und ihre Eingriffstiefe (z.B. Zahl der Ausnahmen bei Fahrverboten, Schärfe des Tempolimits, rechtzeitiger Einsatz und Dauer). Ein Schritt auf diesem Weg ist das Ozongesetz, das mit Ablauf des 31.12.1999 außer Kraft treten wird. Bis dahin wird sich herausgestellt haben, mit welchen, nötigenfalls weiteren Maßnahmen kurzfristiger oder langfristiger Art in den Bereichen des Verkehrs oder andere Emittenten der Entstehung hoher Ozonkonzentrationen vorgebeugt werden kann und muß.