

# HINTERGRUND

26. Juni 2013

## Nordhemisphärischer Transport – auch andere Kontinente beeinflussen unsere Schadstoffbelastung

### 1 Änderungen der Ozonkonzentrationen in Deutschland: zwei Trends

Seit 1990 haben die Ozonspitzenkonzentrationen in Deutschland abgenommen, der Sommersmog der 90er Jahre gehört der Vergangenheit an. Im gleichen Zeitraum hat der Ozon-Jahresmittelwert allerdings zugenommen. Obwohl die Spitzenwerte abgenommen haben und hohe Ozonkonzentrationen seltener geworden sind, sind auch niedrige Ozonkonzentrationen seltener geworden. Mittlere Ozonkonzentrationen werden häufiger – auf Kosten der hohen, aber auch der niedrigen Ozonkonzentrationen. Weil niedrige Ozonkonzentrationen häufiger waren (und sind) als hohe Ozonkonzentrationen, konnte der Jahresmittelwert steigen.

Abbildung 1 illustriert diese Entwicklung anhand der UBA-Messstation im brandenburgischen Neuglobsow. Dargestellt ist die Zahl der Ozon-Stundenmittelwerte, die in den Jahren 1992 und 2012 in einem bestimmten Bereich (z. B. zwischen 20 und 40 µg/m<sup>3</sup>) lagen.

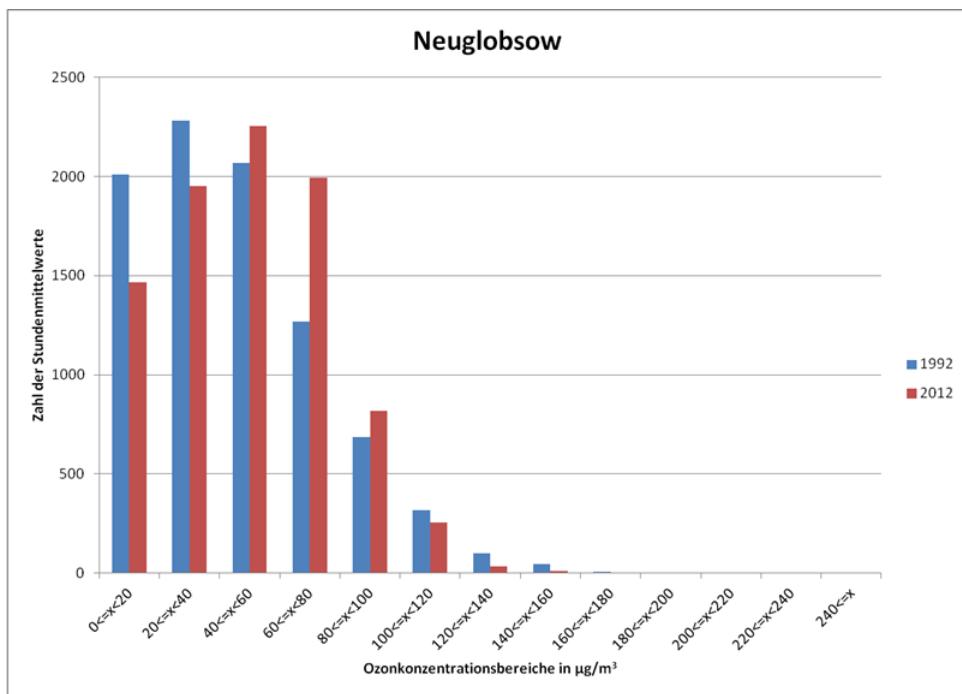


Abbildung 1: Häufigkeit von Ozonkonzentrationsbereichen in Neuglobsow (Brandenburg) - 1992 (blau) und 2012 (rot)

### 2 Gründe?

Die höchsten Ozonkonzentrationen treten typischerweise im Sommer auf, wenn bei intensiver Sonneneinstrahlung aus sogenannten Ozonvorläuferstoffen das bodennahe Ozon gebildet wird. Die wichtigsten Ozonvorläuferstoffe sind Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) und flüchtige Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC). Da deren Emissionen in Deutschland deutlich reduziert werden konnten, sind die Abnahme der Ozonspitzenkonzentrationen und das seltener Auftreten

hoher Ozonkonzentrationen nicht erstaunlich. Warum aber gibt es die Verschiebung von niedrigen zu mittleren Ozonkonzentrationen und damit die Zunahme des Jahresmittelwerts?

Für die Suche nach möglichen Gründen ist die Betrachtung der Quellen von bodennahem Ozon von Bedeutung. Welche Quellen gibt es, welche könnten eine Verschiebung von niedrigen zu mittleren Ozonkonzentrationen bewirken? Die bekannteste Quelle ist die schon erwähnte Produktion von bodennahem Ozon aus Vorläuferstoffen, die in der Region selbst durch menschliche Aktivitäten freigesetzt wurden. Im Jahresdurchschnitt macht dies in Europa, Nordamerika, Ostasien und Südasien schätzungsweise etwas über ein Viertel des gesamten bodennahen Ozons aus. Daneben gibt es mehrere weitere Quellen: Ozon kann aus Vorläuferstoffen gebildet werden, die natürlichen Ursprungs sind. Dies macht schätzungsweise knapp ein Viertel aus. Ein ähnlicher Anteil wird aus der Stratosphäre, also aus der schützenden Ozonschicht, nach unten transportiert. Schließlich gibt es noch Ozon, das aus anthropogenen Emissionen von anderen Kontinenten gebildet wird. Aufgrund des sogenannten nordhemisphärischen Transports beeinflussen Ozonvorläuferstoffe, die in Nordamerika oder Asien freigesetzt wurden, die Ozonkonzentration bei uns. Dieser Transport ist einer der Gründe für die Verschiebung von niedrigen zu mittleren Ozonkonzentrationen in Deutschland. Er soll Thema dieses Beitrags sein.

### 3 Nordhemisphärischer Transport

Was steckt hinter dem „nordhemisphärischen Transport“? Freigesetzte Schadstoffe breiten sich in der Atmosphäre aus, und zwar je nach Schadstoff nicht nur innerhalb eines Landes oder Kontinents, sondern durchaus auch über Kontinente hinweg. Welche Transportsysteme dafür wichtig sind, hängt davon ab, in welchen Breiten sich das Gebiet befindet: in den Tropen oder Subtropen, in den mittleren Breiten, oder in den Polargebieten. Die mittleren Breiten ( $30^{\circ}$  -  $60^{\circ}$ ) werden durch Westwinde dominiert. Die Windstärke nimmt mit der Höhe zu. Schadstoffe können zwar auch in den unteren Luftsichten von einem Kontinent zum anderen gelangen, dieser Transport ist jedoch relativ langsam. Ein schnellerer Transport ist möglich, wenn die mit Schadstoffen belasteten Luftmassen in die mittlere oder obere Troposphäre gelangen, d.h. in eine Höhe von 3 km bis 15 km. Für eine solch umfassende Hebung gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten: „Warm Conveyor Belts“ (WCB) oder hochreichende Konvektion.

Ein „Warm Conveyor Belt“ (wörtlich übersetzt „warmes Transportband“) ist ein Luftstrom auf der östlichen Seite eines Tiefdruckgebiets. Bodennahe Luft aus dem Warmsektor des Tiefdruckgebiets strömt in Richtung Pol und steigt im Laufe von mehreren Stunden oder Tagen in die mittlere und obere Troposphäre auf. Mittels hochreichender Konvektion können Luftpakete einschließlich darin enthaltener Schadstoffe deutlich schneller, innerhalb von Minuten, in die mittlere und obere Troposphäre gehoben werden. Dieser Unterschied ist vor allem für Schadstoffe wichtig, die in der unteren Troposphäre eine kurze Lebensdauer haben; wenn sie durch hochreichende Konvektion schnell gehoben werden, gelangt eine deutlich größere Menge in die mittlere und obere Troposphäre, als bei der relativ langsamen Hebung in „Warm Conveyor Belts“. Aufgrund der anderen Umgebungsbedingungen haben viele Schadstoffe dort eine längere Lebensdauer. Bei Ozon etwa beträgt die ungefähre Lebensdauer in der Grenzschicht (bodennahe Luftsicht) Stunden bis Tage, während sie in der freien Troposphäre (höhere Luftsichten) auf Wochen bis Monate ansteigt.

Im Zuge der Hebung erhöhen sich jedoch nicht einfach nur die Transportgeschwindigkeit und (oft) die Lebensdauer der Schadstoffe. Es spielen sich weitere physikalische und chemische Prozesse ab: Kommt es bei der Hebung der Luftmasse zu Niederschlagsbildung, wird ein Teil

der Schadstoffe ausgewaschen. Auch wird beispielsweise ein großer Teil des in der Luftmasse enthaltene NO<sub>x</sub> in andere Stoffe wie PAN (Peroxyacetylinitrat) umgewandelt. PAN kann in diesem Zusammenhang als eine Art Zwischenspeicher für NO<sub>x</sub> angesehen werden.

Zu einem späteren Zeitpunkt, nachdem die Luftmasse mit hoher Geschwindigkeit transportiert wurde, sinkt sie wieder ab. Dies geschieht meist langsam in Hochdruckgebieten am Ende der typischen Zugbahnen von Tiefdruckgebieten über dem Pazifik und Atlantik. Dabei spielen sich wiederum verschiedene physikalische und chemische Prozesse ab: Die Luftmasse erwärmt sich; deshalb kommt es z. B. zum Abbau von PAN, wobei NO<sub>x</sub> freigesetzt wird. Beim Absinken werden die Schadstoffe zudem verdünnt.

Abbildung 2 illustriert diese Prozesse am Beispiel des Transports von Ozon, Ozonvorläuferstoffen und Feinstaub von Ostasien an die Westküste Nordamerikas. Der Transport von der Ostküste Nordamerikas nach Europa verläuft im Prinzip gleich, allerdings sind die Transportzeiten etwas kürzer. Auch Schadstoffe aus Asien können nach Europa transportiert werden; sie beeinflussen unsere Luftqualität im Allgemeinen aber schwächer als nordamerikanische Emissionen. In welchem Ausmaß Schadstoffe aus anderen Kontinenten nach Europa transportiert werden, hängt unter anderem von der Art des Schadstoffs und der Jahreszeit ab.

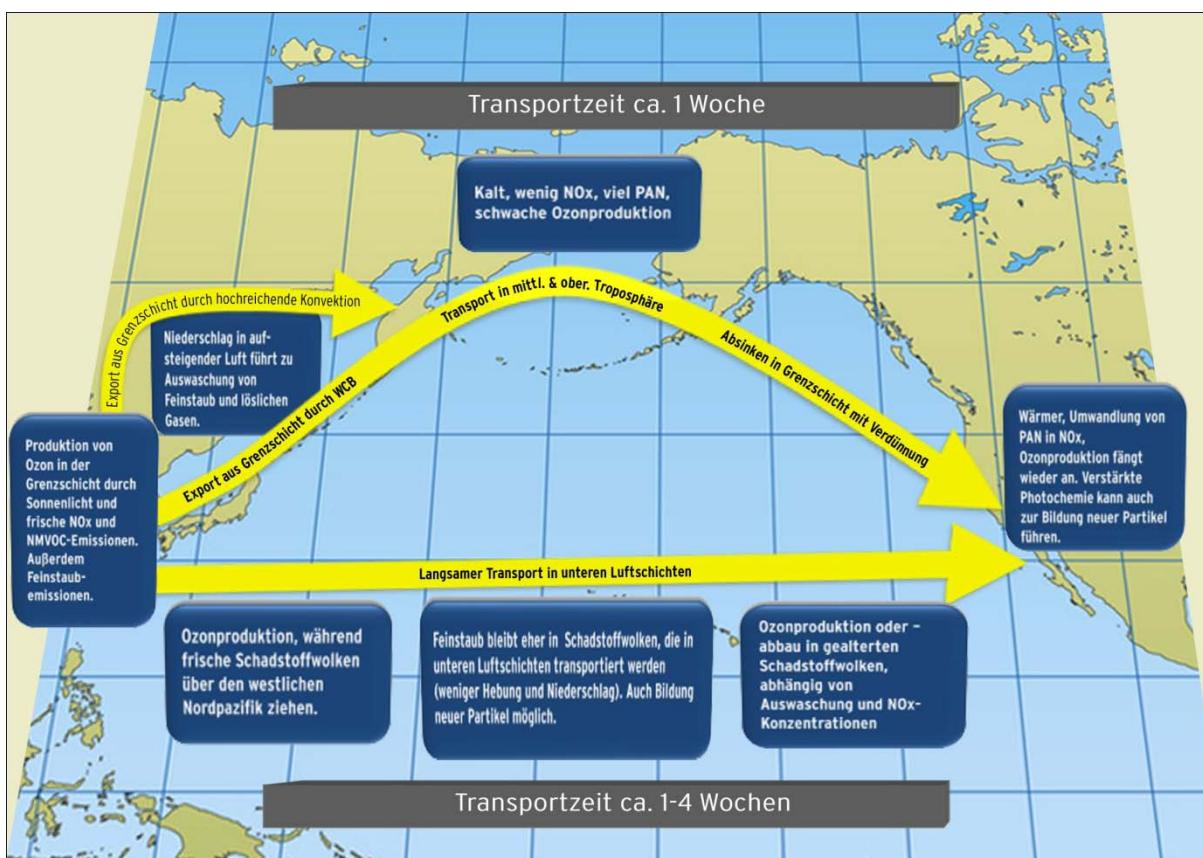


Abbildung 2: Interkontinentale Transportprozesse, am Beispiel des Transports von Ozon, Ozonvorläuferstoffen und Feinstaub von Ostasien an die Westküste Nordamerikas, nach: United Nations Economic Commission for Europe: Hemispheric Transport of Air Pollution 2010, Part A

Ergänzend zu Abbildung 2 soll noch bemerkt werden, dass bei der Ozonbildung nicht nur NO<sub>x</sub> und NMVOC eine Rolle spielen. Kohlenmonoxid (CO) kann bei der Ozonbildung eine ähnliche

Rolle einnehmen wie NMVOC. CO hat eine längere Lebensdauer als NMVOC (CO: Wochen bis Monate, NMVOC: Stunden bis Monate) und kann deshalb die Ozonbildung länger beeinflussen.

## 4 Auswirkungen auf Europa

Welcher Anteil der Ozonbelastung in Europa stammt aus Nordamerika? Eine Antwort auf diese Frage zu geben, ist schwierig, u.a. wegen der komplizierten nicht-linearen Ozonchemie. Einen ungefähren Eindruck, wie die Emissionen aus anderen Kontinenten die Ozonbelastung bei uns beeinflussen, können jedoch Modellrechnungen geben, die für die „Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution“ durchgeführt wurden. Für dieses Modellexperiment wurden die anthropogenen Emissionen von Ozonvorläuferstoffen ( $\text{NO}_x$ , CO, NMVOC, Aerosole und ihre Vorläufer) in verschiedenen Weltregionen um 20 % reduziert und es wurde von verschiedenen Modellen berechnet, wie sich die Ozonkonzentration ändern würde. Im Mittel lieferten die Modelle folgende Ozonänderungen in Europa:<sup>1</sup>

- $1,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , wenn die Emissionsminderung in Europa stattfindet
- $0,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , wenn die Emissionsminderung in Nordamerika stattfindet
- $0,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , wenn die Emissionsminderung in Ostasien stattfindet
- $0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , wenn die Emissionsminderung in Südasien stattfindet

Demnach beeinflussen uns nordamerikanische Emissionen ungefähr halb so stark wie europäische, und ostasiatische Emissionen wiederum ungefähr halb so stark wie nordamerikanische. Emissionen aus Südasien haben den geringsten Einfluss auf unsere Ozonbelastung.

Bei diesen Werten ist zu beachten, dass sie das Mittel aus unterschiedlichen Modellrechnungen darstellen und dass sie für den Jahresdurchschnitt gelten. Die jahreszeitlichen Schwankungen und die erheblichen Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Zudem gibt es noch räumliche Unterschiede innerhalb Europas. Die niedrigen Zahlenwerte sollten im Übrigen nicht dahingehend missverstanden werden, dass der hemisphärische Transport eine geringe Rolle spielt. Vielmehr ist darauf zu achten, dass bei diesem Experiment nur die Auswirkungen einer 20 %igen Emissionsminderung simuliert wurden. Wegen der nichtlinearen Ozonchemie würde eine 100 %ige Emissionsminderung von Vorläuferstoffen zudem eine andere Ozonänderung bewirken, als das Fünffache der Ozonänderung infolge einer 20 %igen Emissionsminderung von Vorläuferstoffen.

---

<sup>1</sup> Alle Werte wurden ursprünglich in ppbv veröffentlicht; ppbv (parts per billion by volume) steht für „Teile pro Milliarde Volumenanteil“. 1 ppbv entspricht für Ozon in Bodennähe ca.  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; diese Näherung wurde für die Umrechnung der Werte für diesen Beitrag verwendet.

Ursprungsregion	Jahr	Winter	Frühjahr	Sommer	Herbst
Nordamerika	0,40 - 1,02	0,28 - 0,94	0,42 - 1,24	0,42 - 1,06	0,40 - 0,98
Ostasien	0,14 - 0,52	0,14 - 0,58	0,16 - 0,68	0,12 - 0,42	0,14 - 0,42
Südasien	0,08 - 0,30	0,08 - 0,40	0,08 - 0,34	0,06 - 0,22	0,02 - 0,28

Tabelle 1: Ozonabnahme in Europa (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) bei Reduzierung der anthropogenen Ozonvorläuferstoffe um 20% in verschiedenen Weltregionen im Jahresmittel und im Jahreszeitenmittel; Simulation durch 15 Modelle für die „Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution“

## 5 Auswirkungen auf andere Weltregionen

Wie sieht die Situation in anderen Weltregionen aus? Wie stark wird die dortige Ozonbelastung durch Emissionen aus anderen Gegenden der Erde beeinflusst? Abbildung 3 zeigt den Mittelwert der erwähnten Modellrechnungen für alle vier betrachteten Weltregionen. Prinzipiell ergibt sich für Nordamerika, Ostasien und Südasien ein ähnliches Bild wie für Europa: Auch dort wird die Ozonbelastung vor allem durch eigene Emissionen bestimmt, aber überall spielen auch die Emissionen anderer Weltregionen eine nicht unerhebliche Rolle.

Demnach profitiert jede Weltregion am meisten von eigenen Emissionsminderungen bei Ozonvorläuferstoffen, es würden aber auch alle von Emissionsminderungen anderer Nutzen haben. Deshalb ist es für alle Länder sinnvoll, ergänzend zu den nationalen und regionalen Anstrengungen weitergehende internationale Kooperationen anzustreben.

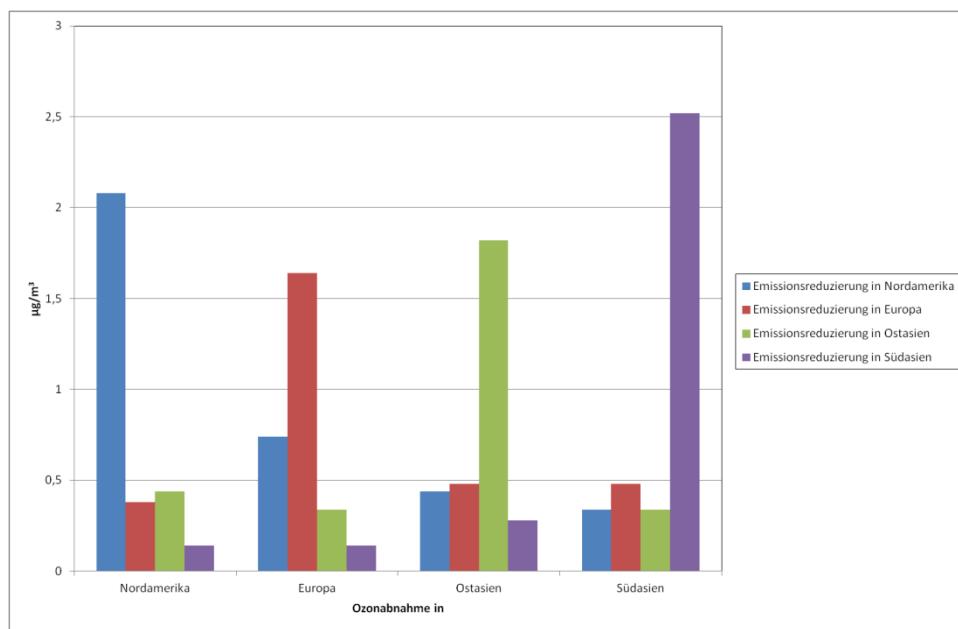


Abbildung 3: Ozonabnahme in vier Weltregionen bei Reduzierung der anthropogenen Ozonvorläuferstoffe um 20% in den einzelnen Weltregionen im Jahresmittel; Mittelwert aus der Simulation durch 15 Modelle für die „Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution“

## 6 Ein Beispiel

Wie Ozontransport konkret verlaufen kann, kann man in der im Monatsbeitrag verlinkten Simulation verfolgen. Diese zeigt das Ozon vom 1.7. - 6.7.2012 über der Nordhalbkugel. Dargestellt wird die Summe des Ozons vom Boden bis zu der Höhe, in der nur noch ein Druck

von 100 hPa herrscht; so können Transportvorgänge in unterschiedlichen Höhen gemeinsam erfasst werden. In den ersten Tagen ist der Transport von Ozon von Nordamerika nach Europa gut erkennbar. Auch in Ostasien kann man vor allem in der zweiten Hälfte der Simulation den Transport von Luftmassen mit erhöhter Ozonkonzentration nach Westen beobachten.

## 7 Zum Schluss noch eine andere wichtige Schadstoffgruppe

Eine weitere Schadstoffgruppe, die beim Thema „hemisphärischer Transport“ zumindest kurz erwähnt werden sollte, sind die sogenannten POPs. POPs ist die englische Abkürzung für „Persistent Organic Pollutants“, auf Deutsch „Persistente organische Schadstoffe“. Zu dieser Schadstoffgruppe gehören z. B. bestimmte Pestizide wie DDT. Die verschiedenen POPs haben unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften. Allen ist jedoch gemeinsam, dass sie in der Umwelt nur langsam abgebaut werden. Aus diesem Grund können sie auf verschiedenen Wegen weite Strecken zurücklegen. Dabei ist nicht nur der schnelle Transport in der Luft wichtig, sondern auch der langsamere Transport im Wasser. Einige POPs können jahrzehntelang zwischen der Atmosphäre und anderen Teilen des Erdsystems (Wasser, Boden, Vegetation, Schnee, Eis) hin- und her wandern und dabei auch sehr große räumliche Distanzen zurücklegen. Im Gegensatz zu Ozon, das seine schädigende Wirkung über die Luft entfaltet, schaden POPs hauptsächlich durch Kontamination der Nahrungskette. Dies geschieht auch in entlegenen Gegenden wie der Arktis, wo es kaum lokale Quellen von POPs gibt.

## 8 Quelle

United Nations Economic Commission for Europe: Hemispheric Transport of Air Pollution 2010, Part A (Ozone and Particulate Matter), Part C (Persistent Organic Pollutants) und Part D (Answers to Policy-Relevant Science Questions),  
[http://www.htap.org/publications/assessment\\_reports.htm](http://www.htap.org/publications/assessment_reports.htm)

## IMPRESSUM

Herausgeber: Umweltbundesamt  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel.: 0340/2103-0  
Telefax: 0340/2103 2285  
E-Mail: [info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>  
Fachgebiet: II 4.2 Beurteilung der Luftqualität

Dessau-Roßlau, 26. Juni 2013