

# Jahresbericht 2002 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes

## 3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME

### 3.1 Der nordhemisphärische Transport von Ozon und Feinstaub und sein Beitrag zur Luftqualität in Deutschland

*Siegfried Beilke*

**Inhalt:**

<b>3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1 Der nordhemisphärische Transport von Ozon und Feinstaub und sein Beitrag zur Luftqualität in Deutschland .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.1 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.2 Ergebnisse der Workshops.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1.2.1 Hemisphärische Emissionen .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1.2.2 Transportpfade der nordhemisphärischen Luftschadstoffe.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1.2.3 Herkunft der Luftverunreinigungen.....</b>	<b>6</b>
<b>3.1.2.4 Nordhemisphärische Ozon–Langzeittrends .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1.2.5 Globale Emissionsminderung und nordhemisphärischer Hintergrund....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.1 Literatur.....</b>	<b>15</b>

### **3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME**

#### **3.1 Der nordhemisphärische Transport von Ozon und Feinstaub und sein Beitrag zur Luftqualität in Deutschland**

*Siegfried Beilke*

##### **3.1.1 Einleitung**

Dass Luftverunreinigungen nicht am Ort ihrer Entstehung verbleiben, ist schon seit vielen Jahrzehnten hinreichend bekannt. Bisher haben sich Wissenschaftler und Politiker nahezu ausschließlich mit der Ausbreitung von Schadstoffen innerhalb eines Kontinentes beschäftigt, seit einigen Jahren stoßen Schadstoffflüsse zwischen den Kontinenten, vor allem zwischen den Kontinenten auf der Nordhalbkugel, auf verstärktes Interesse.

Der Hauptgrund für das zunehmende Interesse liegt darin, dass der nordhemisphärische Transport von Luftschadstoffen wie beispielsweise Ozon und Feinstaub in erheblichem Maße zu den in Deutschland gemessenen Konzentrationen dieser Stoffe beitragen kann. Da in Nordamerika und vor allem in Europa die Spitzenbelastungen dieser Stoffe aufgrund erheblicher Emissionsminderungen zurückgehen, wird der Unterschied zwischen den nordhemisphärischen Hintergrundkonzentrationen und den nationalen Standards zunehmend geringer, vor allem bei Ozon. Mit der weiteren Verschärfung der nationalen Standards in Nordamerika und Europa sowie angesichts der zunehmenden Hintergrundbelastungen, wie sie beispielsweise beim Ozon beobachtet werden, wird die Bedeutung des interkontinentalen Transports für die Überschreitungen dieser Standards zunehmen. Die Kenntnis des nordhemisphärischen Hintergrundes und dessen langzeitige Änderung ist für die Beurteilung der Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen wichtig, denn dieser Hintergrund markiert eine Grenze, die durch emissionsmindernde Maßnahmen in Deutschland allein nicht unterschritten werden kann. Vor allem beim Ozon ist es deshalb wichtig, die natürlichen und anthropogenen Anteile am nordhemisphärischen Hintergrund zu quantifizieren, denn nur der anthropogene Anteil kann durch weltweite Maßnahmen in Asien, Nordamerika und Europa vermindert werden (*Ref. 1, 2, 3*).

Zwei Workshops, an denen Wissenschaftler und Behördenvertreter aus Asien, Nordamerika und Europa teilnahmen, befassten sich mit Problemen der interkontinentalen grenzüberschreitenden Belastung vor allem durch Ozon und Feinstaub:

- Workshop in Palisades, New York, USA, 12. bis 15. Juni 2001 (*Ref. 2*)
- Workshop in Bad Breisig, Deutschland, 7. bis 9. Oktober 2002. (*Ref. 3*)

In beiden Workshops standen Fragen der Herkunft dieser Luftschadstoffe, ihrer Transportpfade sowie ihrer Langzeittrends im Vordergrund des Interesses.

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden die wichtigsten Ergebnisse beider Workshops zusammen mit neueren Erkenntnissen präsentiert, interpretiert und die Beiträge des nordhemisphärischen Hintergrundes zu den an einigen Stationen im UBA-Messnetz gemessenen Konzentrationen geschätzt.

### 3.1.2 Ergebnisse der Workshops

Die Ergebnisse beider Workshops basieren auf Feldmessungen (Messkampagnen und Langzeitbeobachtungen) sowie auf Modellstudien im regionalen, hemisphärischen und globalen Maßstab.

#### 3.1.2.1 Hemisphärische Emissionen

Feinstaub und Ozonvorläufer ( $\text{NO}_x$ , NH-VOC,  $\text{CH}_4$ , CO) werden durch natürliche und anthropogene Quellen in die Atmosphäre emittiert. Die Emissionen der Ozonvorläufer aus Asien, Nordamerika und Europa haben sich seit der vorindustriellen Zeit mehr als verdoppelt (*Ref. 3*), im Wesentlichen durch die Emissionen aus Industrie und Verkehr ( $\text{NO}_x$ , CO, VOC) sowie aus der Landwirtschaft ( $\text{CH}_4$ ).

Wahrscheinlich haben auch die Feinstaubemissionen seit der vorindustriellen Zeit in Nordamerika, Europa und Asien erheblich zugenommen. Dies betrifft sowohl die direkten Emissionen aus stationären und mobilen Quellen (Industrie, Haushalte, Verkehr) als auch die Emissionen von sog. Sekundärpartikeln, die aus Gasen wie z.B.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  und VOC innerhalb der Atmosphäre gebildet werden.

Eine einigermaßen verlässliche Angabe der globalen Emissionen und deren Trends ist jedoch nicht möglich vor allem durch die erheblichen Unsicherheiten der Emissionen in Asien. Entsprechend lassen Untersuchungen zur globalen nordhemisphärischen Emissionsentwicklung kein einheitliches Bild erkennen. Es besteht Konsens, dass die globale nordhemisphärische Ozonbildung weitgehend  $\text{NO}_x$ -kontrolliert ist und in Zukunft es auch bleiben wird (*Ref. 4, 5, 6, 7*). Aus diesem Grunde interessiert vor allem, wie sich die  $\text{NO}_x$ -Emissionen in Zukunft entwickeln werden.

Während in einer Arbeit (*Ref. 8*) die nordhemisphärischen  $\text{NO}_x$ -Emissionen zwischen 1990 und 2020 als weitgehend konstant angegeben werden, da die abnehmenden Emissionen in Europa und Nordamerika durch zunehmende Emissionen in Asien kompensiert werden, wird in einer anderen Untersuchung (*Ref. 6*) davon ausgegangen, dass die asiatischen Emissionen die Abnahme in Europa und Nordamerika überkompensieren.

Aber auch bei konstanten nordhemisphärischen Emissionen wird das nordhemisphärische Hintergrund-Ozon sehr wahrscheinlich weiter zunehmen, da die  $\text{NO}_x$ -Emissionen in Asien aufgrund der klimatischen Gegebenheiten wesentlich stärker zum nordhemisphärischen Hintergrund-Ozon beitragen als in Europa oder Nordamerika (*Ref. 3, 9*). Dieser sehr überraschende Befund, wonach die gleiche Menge  $\text{NO}_x$  in Asien wesentlich stärker zum nordhemisphärischen Hintergrund-Ozon beiträgt als in Europa oder Nordamerika, liegt an dem effektiveren Vertikaltransport durch Konvektion (ein  $\text{NO}_x$ -Molekül bildet in höheren Schichten der Troposphäre mehr  $\text{O}_3$ -Moleküle als in Bodennähe bei höheren  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen, *Ref. 9, 10*) und an der längeren Ozonsaison in Südostasien im Vergleich zu Europa und Nordamerika (*Ref. 10*).

Beim Feinstaub dürften die zurückgehenden Emissionen der Primär- und Sekundärpartikel in Nordamerika und vor allem in Europa ebenfalls durch zunehmende Emissionen in Asien weitgehend kompensiert oder sogar überkompensiert werden.

### 3.1.2.2 Transportpfade der nordhemisphärischen Luftschadstoffe

Die Emissionen eines Kontinents können die Luftqualität auf einem anderen Kontinent durch eine allgemeine Zunahme der nordhemisphärischen Schadstoffbelastung sowie durch Episoden mit hohen Schadstofftransporten beeinflussen. Der Beitrag von interkontinentalen Transporten zur regionalen Luftqualität hängt von den Transportbedingungen sowie von den jeweiligen Stoffen ab.

Beim Feinstaub tragen vor allem Episoden mit verstärkten Transporten zur Überschreitung von Standards bei. Beispiele für verstärkte Staubtransporte sind die in Europa relativ häufig beobachteten Episoden mit Saharastaub oder die vor allem an der Westküste Nordamerikas beobachteten Staubtransporte aus der Wüste Gobi in Asien. Weitere Beispiele sind die im September 2002 in weiten Teilen Norddeutschlands beobachteten stark erhöhten Feinstaubkonzentrationen, die durch Waldbrände im Gebiet um Moskau verursacht worden sind oder der großräumige Transport von radioaktiven Staubteilchen aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl (Ukraine) nach Deutschland im Jahre 1986.

Grundsätzlich ist die räumliche und zeitliche Verteilung des Feinstaubes im hemisphärischen Maßstab wesentlich heterogener als die des Ozons, was hauptsächlich auf die episodische Natur von starken Emissionsereignissen (z.B. Sandstürme, Waldbrände, Vulkanausbrüche) und weniger auf die Beseitigung des Feinstaubes durch Regen und Wolken zurückzuführen ist.

Im Gegensatz zum Feinstaub zeigten Ozon- Bodenmessungen (z.B. an der UBA-Station Westerland auf Sylt oder in Mace Head an der Westküste Irlands) bisher kaum einen entsprechenden Beitrag von Episoden, d.h. das aus Nordamerika, Asien und Europa stammende Ozon ist weitgehend in den nordhemisphärischen Hintergrund eingemischt.

Der interkontinentale Transport kann erfolgen durch:

- (a) Advektion innerhalb der Grenzschicht und/oder
- (b) durch Transport innerhalb der freien Troposphäre.

Bei Transportprozess (b) wird ein Teil der aus bodennahen Quellen stammenden Stoffe Ozon und Feinstaub sowie deren Vorläufer durch verschiedene meteorologische Prozesse (z.B. Konvektion, orographische Effekte, Wettersysteme im synoptischen Scale wie z.B. warm conveyor belts) quasi-kontinuierlich aus den bodennahen Schichten in die freie Troposphäre gepumpt. In der freien Troposphäre ist die atmosphärische Lebensdauer dieser Stoffe deutlich höher als in der bodennahen Troposphäre: Sie steigt von wenigen Tagen in der bodennahen Atmosphäre auf einige Wochen bis Monate in der freien Troposphäre. Die längeren Lebenszeiten resultieren beim Ozon vor allem aus dem sehr niedrigen Wasserdampfgehalt in der freien Troposphäre, wodurch der radikalische Ozonabbau sehr langsam erfolgt. Die lange Lebensdauer des Feinstaubes resultiert hauptsächlich aus dem Fehlen von Wolken und Niederschlag (Hauptsenke für Feinstaub) in der freien Troposphäre.

Mit der allgemeinen Westwindzirkulation auf den gemäßigten Breiten der Nordhemisphäre können diese Stoffe innerhalb der freien Troposphäre unter Umständen mehrmals um die Nordhalbkugel zirkulieren bevor sie durch quasi-kontinuierliche Absinkprozesse wieder in die bodennahen Luftschichten heruntergemischt werden. Die wichtigsten Pfade beim Transport zwischen den einzelnen Kontinenten sind wahrscheinlich verschieden: Während der Transport von Ozon und Feinstaub zwischen Nordamerika und Europa über den Atlantik sowie zwischen Asien und Nordamerika über den Pazifik hinweg hauptsächlich in der freien Troposphäre und

kaum innerhalb der maritimen Grenzschicht erfolgt, wird zwischen Europa und Asien ein nicht unerheblicher Teil auch innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht transportiert (Ref. 3).

### 3.1.2.3 Herkunft der Luftverunreinigungen

Die Entwicklung einer quantitativen Beziehung zwischen den Quellen und Senken im interkontinentalen Maßstab ist sehr schwierig. Entsprechend unsicher (Faktor 2 und mehr) sind die bisher mit Hilfe von globalen 3D-Chemie-Transport-Modellen (CTM) berechneten Zahlen, wie am Beispiel des Ozons deutlich gemacht werden soll.

Die nordhemisphärischen Ozon-Hintergrundkonzentrationen auf den gemäßigten Breiten der Nordhalbkugel liegen in Bodennähe etwa zwischen 30 und 40 ppb. Dieser Konzentrationsbereich wurde beispielsweise bei länger andauernden Westwindwetterlagen an den europäischen Küstenstationen Westerland auf Sylt (Ref. 11, 12) und Mace Head an der Westküste Irlands (Ref. 13, *Transport von Ozon über den Atlantik*) sowie an Stationen an der Westküste Nordamerikas (Ref. 14, *Transport von Ozon über den Pazifik*) festgestellt.

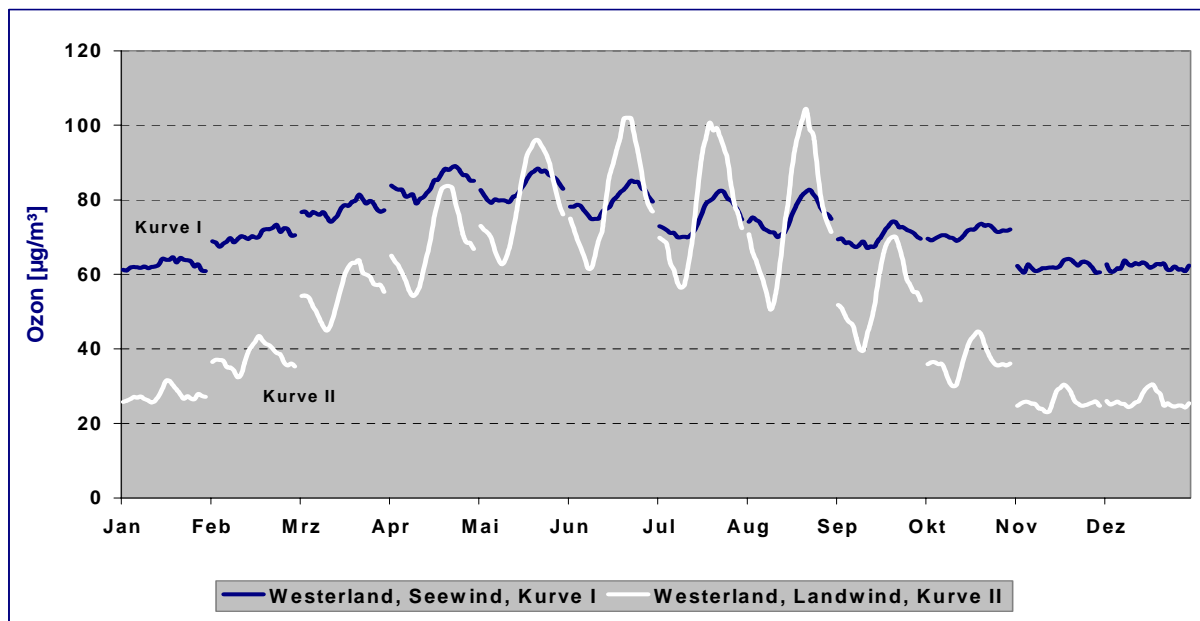


Abbildung 1: Mittlere monatliche Tagesgänge von Ozon für Westerland, gemittelt über den Zeitraum 1990 bis 2002, getrennt nach Süd bis Ostwind (Wind vom europäischen Kontinent) und Nord- bis Westwind (Wind von Atlantik und Nordsee).

In Abbildung 1 sind die von der Jahreszeit abhängigen Hintergrund-Ozonkonzentrationen beispielhaft für die UBA-Station Westerland dargestellt. Die Hintergrundkonzentrationen entsprechen der Kurve I (Wind von See aus westlichen Richtungen, Antransport von Ozon über den Atlantik und die Nordsee nach Sylt). Zum Vergleich ist auch die entsprechende Kurve für Wind aus süd- bis östlichen Richtungen (Antransport von Ozon vom europäischen Kontinent) mit eingezeichnet (Kurve II). Während die Ozonkonzentrationen bei Wind von See nur geringe Schwankungen auf einem vergleichsweise hohem Niveau (30-45 ppb) zeigen, sind die Änderungen bei Ozontransporten vom europäischen Kontinent sowohl im Tages-, als auch im Jahresverlauf stärker (10 bis 50 ppb).

Woher stammen diese vergleichsweise hohen Ozon-Hintergrundwerte von 30 bis 40 ppb auf den gemäßigten Breiten der Nordhalbkugel und welche Beiträge liefern die verschiedenen Quellen zu den aktuellen Ozonkonzentrationen?

Diese Ozonwerte stammen sowohl aus der Troposphäre (Luftschicht zwischen Boden und ca. 10 km Höhe), wo das Ozon photochemisch aus Ozonvorläufern gebildet wird, als auch aus der darüber liegenden Stratosphäre (Schicht zwischen 10 und 50 km), aus der ein Teil des Ozons bis zum Erdboden herunter gemischt werden kann.

### **Stratosphärischer Beitrag**

Es besteht weitgehender Konsens, dass der stratosphärische Beitrag zu den bodennahen Ozonkonzentrationen gegenüber dem photochemisch innerhalb der Troposphäre gebildeten Ozon gering ist, vor allem im Sommer.

In neueren amerikanischen Arbeiten (*Ref. 15, 16*) wird der stratosphärische Beitrag zu den bodennahen sommerlichen Hintergrund-Konzentrationen in den USA (nördlich 13° N, 69 – 126° W) beispielsweise mit bis zu 2 ppb (bis ca. 5% Beitrag zu den aktuellen Ozonkonzentrationen) angegeben. (Modellrechnungen: Globales 3D-CT-Modell GEOS-CHEM)

Geringfügig höhere stratosphärische Beiträge zu den bodennahen sommerlichen Ozonkonzentrationen werden mit 2-4 ppb (5 bis 10%) für die Station Mace Head (53° N, 10° W) an der Westküste Irlands in einer englischen Arbeit angegeben, während im Winter bis maximal 8 ppb (bis ca. 20%) und im Jahresmittel etwa 5 ppb (ca. 15%) aus der Stratosphäre stammen (*Ref. 7*).

Der stratosphärische Beitrag zu den Jahresmitteln der Ozon-Bodenkonzentrationen für 20 mitteleuropäische EMEP–Stationen (u.a. auch die UBA- Station Waldhof) war mit 3 bis 4 ppb (ca. 5-10%) etwas geringer als für die Station Mace Head.

Ähnlich geringe stratosphärische Beiträge zu den bodennahen sommerlichen Ozonkonzentrationen in Mace Head wie in *Referenz 7* wurden in einer anderen Arbeit (*Ref. 5, 6*) mit etwa 2 bis 5 ppb (5-15%) angegeben, deutlich höhere stratosphärische Anteile dagegen für den Winter mit Beiträgen bis maximal 20 ppb (50% und mehr).

Für die gesamte außertropische Troposphäre der Nordhalbkugel (15° – 90° N) wurden im Jahresdurchschnitt ca. 25% als stratosphärischer Beitrag zu den bodennahen Ozonkonzentrationen berechnet, für den Sommer im Mittel etwa 15% (*Ref. 5, 6*). Der restliche Beitrag von 75% (Jahresmittel) bzw. 85% (im Sommer) stammt aus photochemischer Ozonbildung innerhalb der Troposphäre. Von den 75% photochemisch gebildeten Ozons stammen nach diesen Modellrechnungen etwa 15% aus natürlichen Ozonvorläufern und etwa 60% aus anthropogenen Vorläufern (*Ref. 6*).

In Tabelle 1 sind die verschiedenen stratosphärischen Ozonbeiträge zu den bodennahen Ozonkonzentrationen, die mittels 3-D Chemie-Transport-Modellen berechnet worden sind, nochmals übersichtlich zusammengestellt.

Tabelle 1: Stratosphärische Ozonbeiträge zu den bodennahen Ozonkonzentrationen an verschiedenen Orten/Gebieten der Nordhalbkugel

Ort/Gebiet	Stratosphärischer Beitrag zum bodennahen Ozon	Referenzen
Nordhalbkugel (15° - 90° N)	ca. 15% (Sommer) ca. 25% (Jahresdurchschnitt)	5, 6
Nordamerika (13 °N, 69-126 °W)	bis ca. 2 ppb (ca. 5%) im Sommer	15, 16
Mace Head (Westküste Irland) (53 °N, 10 °W)	2-4 ppb (ca. 5 – 10%) im Sommer bis 8 ppb (bis ca. 20%) im Winter ca. 5 ppb (ca. 15%) im Jahresmittel	7
Mace Head (53 °N, 10 °W)	2-5 ppb (ca. 5 – 15%) im Sommer bis 20 ppb (ca. 50% im Winter)	5, 6
20 EMEP-Stationen (darunter die UBA-Station Waldhof)	3-4 ppb (ca. 5 – 10%) im Jahresmittel	7

### Troposphärischer Beitrag

Es besteht weitgehender Konsens, dass der Beitrag des photochemisch innerhalb der Troposphäre aus natürlichen und anthropogenen Ozonvorläufern gebildeten Ozons zu den bodennahen Ozonkonzentrationen erheblich größer ist als der Beitrag des stratosphärischen Ozons. Weniger Konsens besteht dagegen bezüglich des Beitrages der anthropogenen gegenüber den natürlichen Ozonvorläufern. Während der anthropogene Beitrag bei einigen Autoren deutlich überwiegt (*Ref. 6, 7*), ist der natürliche Beitrag in einer anderen Arbeit etwa von gleicher Größe wie der anthropogene Beitrag (*Ref. 16*).

Die verschiedenen Beiträge von natürlichen gegenüber den anthropogenen Ozonvorläufern resultieren wahrscheinlich vor allem aus den sehr unterschiedlichen Annahmen in den 3D-CT-Modellen bezüglich der natürlichen NO<sub>x</sub>-Emissionen aus Böden sowie aus der Gewittertätigkeit. Möglicherweise wurde von einigen Autoren (*z.B. Ref. 16*) nicht berücksichtigt, dass die „natürlichen“ NO<sub>x</sub>-Emissionen aus Böden mit hoher Wahrscheinlichkeit anthropogenen Ursprungs sind, da NO-Emissionen auch aus ungedüngten Böden (*z.B. Waldböden*) erst durch den atmosphärischen Eintrag von N-Verbindungen (überwiegend anthropogen) in die Böden zustande kommen (*Ref. 17*). Da der atmosphärische Eintrag von N-Verbindungen seit Beginn der Industrialisierung stark zugenommen hat, ist es streng genommen nicht statthaft, die heute gemessenen NO-Emissionen aus (ungedüngten) Böden mit den entsprechenden Emissionen vor Beginn der Industrialisierung gleichzusetzen. Die Folge wären zu hohe damalige Ozonkonzentrationen und eine Überschätzung der Beiträge der natürlichen Ozonvorläufer in den Modellrechnungen.

## Beiträge aus Asien, Nordamerika und Europa

Erste Abschätzungen, wie hoch die Beiträge von Ozon und Feinstaub aus Asien, Nordamerika und Europa zu den auf diesen Kontinenten gemessenen Konzentrationen sind, liegen zum Teil weit auseinander. Die Gründe für diese Diskrepanzen sind vielfältiger Natur. Sie können sich beispielsweise ergeben aus den Unsicherheiten bei den natürlichen und anthropogenen Emissionen vor allem von NO<sub>x</sub> und Feinstaub aus Asien, der nichtlinearen Kopplung der verschiedenen chemischen und physikalischen Prozesse, usw.

Für Ozon wurden erhebliche Beiträge aus Nordamerika und Asien zu den bodennahen Ozonkonzentrationen in Europa in einer englischen Arbeit berichtet (*Ref. 7*). Für die Stationen Mace Head an der Westküste Irlands und Waldhof (UBA- Station in Lüneburger Heide) zeigten die 3D-CT-Modellrechnungen (STOCHEM) beispielsweise die in Tabelle 2 aufgelisteten Beiträge zum Ozon-Jahresmittelwert für 1998. Ähnliche prozentuale Beiträge wie für Waldhof wurden auch für 20 weitere EMEP-Stationen auf dem europäischen Festland berechnet.

Tabelle 2: Beiträge aus Nordamerika, Asien, Europa sowie anderer Quellen zu den bodennahen Ozon-Jahresmittelkonzentrationen 1998 an zwei europäischen Stationen berechnet nach Ref. 7 mittels 3D-CT-Modell STOCHEM.

	<b>Nordamerika</b>	<b>Asien</b>	<b>Europa</b>	<b>Rest: Globale Quellen, Stratosphäre</b>
<b>Mace Head</b>	ca. 40%	ca. 20%	ca. 25%	ca. 15%
<b>Waldhof</b>	ca. 25%	ca. 15%	ca. 50%	ca. 10%

Wegen der exponierten Lage an der Westküste Irlands und der im Jahreszeitraum vorherrschenden Westwindwetterlagen sind naturgemäß die Beiträge aus Nordamerika und Asien an der Station Mace Head größer und die Beiträge vom europäischen Kontinent geringer als an der kontinentalen UBA-Station Waldhof.

Die in Tabelle 2 für die Stationen Mace Head und Waldhof berechneten prozentualen Ozonbeiträge zu den Ozon-Jahreswerten werden durch Transporte aus allen Windrichtungen verursacht. Beschränkt man sich bei der Station Mace Head auf Transporte aus westlichen Richtungen (Antransport von Ozon über den Atlantik hinweg), so lassen sich die nordhemisphärischen Hintergrundkonzentrationen (30 bis 40 ppb) direkt bestimmen.

Die Beiträge der in Tabelle 2 angegebenen Quellen zu den nordhemisphärischen Hintergrundkonzentrationen ändern sich unter diesen speziellen meteorologischen Bedingungen gegenüber den Tabellenwerten dahingehend, dass die Beiträge aus Nordamerika und Asien steigen, während die europäischen Ozonbeiträge erheblich sinken, da das europäische Ozon bei Westwindwetterlagen nicht direkt auf kürzestem Wege vom europäischen Festland nach Mace Head transportiert wird, sondern mit der Westwindzirkulation erst um den gesamten Globus über Asien und Nordamerika hinweg transportiert werden muss, bevor es die Station erreicht.

Für die Küstenstationen Mace Head und Westerland (UBA-Station auf Sylt) könnten die sommerlichen Beiträge zum nordhemisphärischen Ozon-Hintergrund von 30 – 40 ppb unter den speziellen meteorologischen Bedingungen von stationären Westwindwetterlagen nach Literaturveröffentlichungen (*Ref. 2, 3, 11*) und eigenen Abschätzungen wie folgt aussehen (Tabelle 3):

Tabelle 3: Geschätzte Beiträge von stratosphärischem sowie photochemischem Ozon aus Asien, Nordamerika und Europa im Sommer zu den nordhemisphärischen Hintergrund-Ozonkonzentrationen gemessen in Mace Head (Irland) und Westerland (Sylt) bei Wind aus westlichen Richtungen (Antransport von Ozon über den Atlantik).

Stratosphärischer Beitrag	2-5 ppb (5 – 15%)
Photochemisches Ozon aus natürlichen und anthropogenen Ozonvorläufern aus Nordamerika, Asien und Europa	30-35 ppb (85-95%)

Abbildung 2 zeigt die mit Hilfe des 3D-CT-Modelles STOCHEM berechneten saisonalen Ozonbeiträge aus Asien, Nordamerika und Europa zu den Ozonkonzentrationen an der UBA-Station Waldhof für das Jahr 1998 (*Ref. 7*). Die Modellwerte (ausgefüllte Flächen) sind Monatsmittel, die beobachteten Konzentrationen (schwarze, dicke Linie) sind Mittelwerte der täglichen maximalen 1-h-Werte. Während in den Sommermonaten die europäischen Beiträge gegenüber den Beiträgen aus Nordamerika und Asien klar dominieren, tragen in den Wintermonaten auch die außereuropäischen Ozontransporte erheblich zu den beobachteten Ozonkonzentrationen bei.

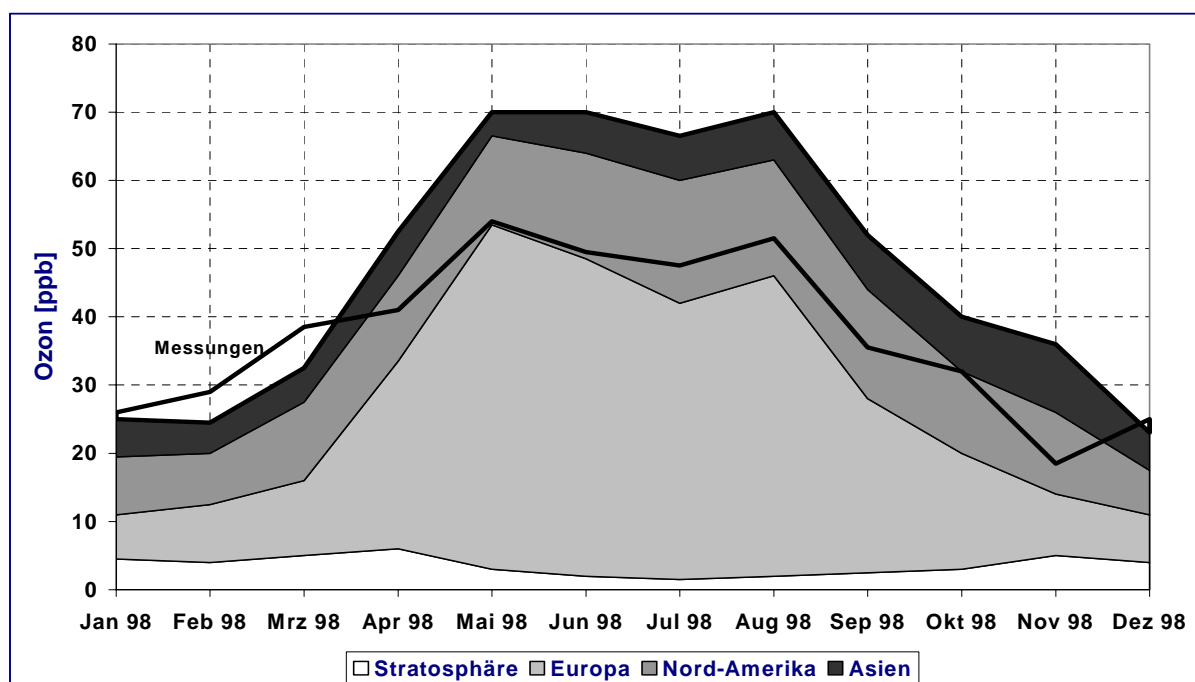


Abbildung 2: Ozonbeiträge aus Asien, Nordamerika und Europa zu den Ozonkonzentrationen an der UBA-Station Waldhof (1998). Modell: Monatsmittel, 3D, CTM STOCHEM, Derwent, 2002, *Ref. 7*, Beobachtungen: Mittelwerte der täglichen maximalen 1-Stundenwerte (durchgezogene Linie).

Abbildung 3 zeigt die entsprechenden saisonalen Ozonbeiträge zu den Ozonkonzentrationen an der irischen Küstenstation Mace Head. Neben den generell höheren Beiträgen aus Nordamerika und Asien und den geringeren Beiträgen aus Europa verglichen mit Waldhof tragen in Mace Head auch globale photochemische Quellen sowie stratosphärisches Ozon in geringem Maße zu den Ozonkonzentrationen bei.

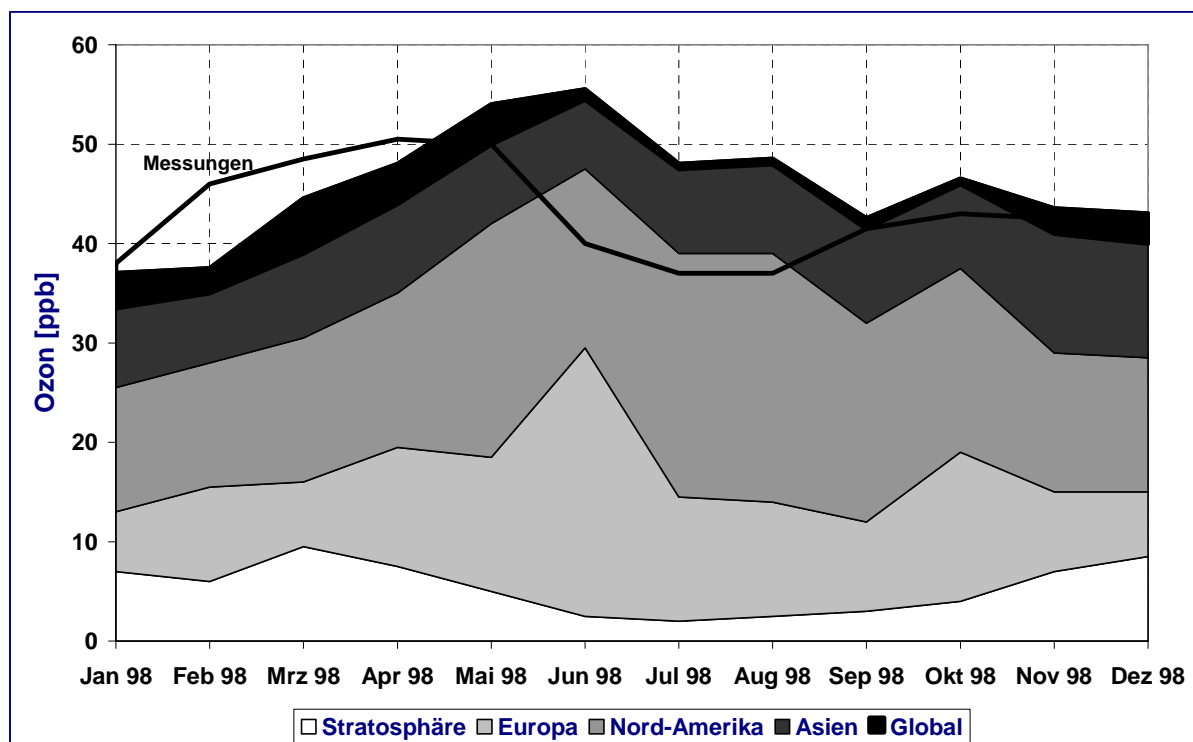


Abbildung 3: Ozonbeiträge aus Asien, Nordamerika und Europa zu den Ozonkonzentrationen an der Station Mace Head (Westküste Irlands, 1998), Ref. 7

Geringere Ozonbeiträge als im Beitrag von Derwent et al. (2002, Ref. 7) wurden in einer amerikanischen Arbeit (Ref. 15) berichtet. Im Unterschied zu der englischen Arbeit (Ref. 7) wurden in der amerikanischen Untersuchung (Ref. 15) relativ geringe anthropogene Beiträge aus Asien und Europa zu den Ozon-Hintergrundkonzentrationen in den USA angegeben. Die mit Hilfe des 3D-CT-Modells GEOS-CHEM berechneten Beiträge aus Asien plus Europa für den Sommer 1995 lagen in der Regel zwischen 4 und 7 ppb (typischer Bereich am Nachmittag, entspricht etwa 5% bis 15% Beitrag zu den gemessenen Ozonkonzentrationen in Bodennähe). In Einzelfällen wurden Beiträge bis 14 ppb berechnet (ca. 25%).

Noch geringere Ozon-Beiträge der Kontinente zu den Ozonbelastungen auf den jeweiligen anderen Kontinenten wurden in einer japanischen Arbeit berichtet (Ref. 3, 18). Nach diesen Berechnungen stammen im Jahresmittel nur etwa 1 ppb des Ozons in USA und nur etwa 0.8 ppb des Ozons in Europa aus Asien. Etwa 1.1 ppb des Ozons in Asien und etwa 0.9 ppb des Ozons in den USA stammen aus Europa, während 2 ppb des Ozons in Europa und 0.8 ppb des Ozons in Asien Quellen in den USA zuzuordnen sind.

Eine Abschätzung der Beiträge des quasi-kontinuierlichen nordhemisphärischen Transportes von Feinstaub aus anthropogenen Quellen in Asien, Nordamerika und Europa zu den aktuellen Feinstaub-Belastungen auf diesen Kontinenten ist schwieriger als beim Ozon, da die Beiträge des hemisphärischen Transportes relativ gering sind und eine genaue Separierung der Beiträge aus anderen Kontinenten sehr aufwändige chemische Analysen notwendig macht. Relativ einfach lassen sich dagegen die Beiträge von episodenhaften hohen Feinstaub-Transporten bestimmen.

Sehr gut dokumentiert sind beispielsweise stark erhöhte Feinstaubkonzentrationen im Westen Nordamerikas nach Sandstürmen in der Wüste Gobi (Asien) oder im Südosten der USA nach Staubausbrüchen in der Sahara (Afrika).

So wurden beispielsweise an einigen Stationen im Westen und Nordwesten der USA (*Ref. 3, 14, 22, 23, 24*) Überhöhungen gegenüber den normalen Werten zwischen 4 und 63  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  bei  $\text{PM}_{10}$  für Staubepisoden aus Asien sowie zwischen 16 und 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  an einer Station im Westen Kanadas (*Ref. 3, 25*) berichtet, d.h. während solcher Episoden mit starken Feinstaubtransporten können die Staubkonzentrationen um mehr als das Doppelte ansteigen.

#### **3.1.2.4 Nordhemisphärische Ozon–Langzeittrends**

Bezüglich der nordhemisphärischen Ozon-Langzeittrends lassen Beiträge in den letzten Jahren kein einheitliches Bild erkennen. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass oft keine saubere Trennung zwischen globalem nordhemisphärischen Hintergrund-Ozon und dem Ozon vorgenommen wird, welches durch lokale bis regionale ozonbildende bzw. ozonzerstörende Prozesse mehr oder weniger stark beeinflusst wird. Bei Letzterem kann eine Änderung der Vorläuferemissionen u.U. zu gegensätzlichen Ozontrends führen.

Für das nordhemisphärische Hintergrund-Ozon zeigen mehrere Beiträge von Bad Breisig eine Zunahme (*Ref. 7, 13, 19, 20, 21*). Da an Stationen an den Westküsten Nordamerikas und Europas die Ozonkonzentrationen in erheblichem Maße durch den nordhemisphärischen Hintergrund bestimmt werden, sollten vor allem an diesen Stationen einheitliche Trends sichtbar werden.

Messungen an mehreren Ozonstationen an der amerikanischen Westküste haben eine Zunahme der bodennahen Ozonkonzentrationen während der letzten 20 Jahre um  $0.5 \pm 0.36$  ppb /Jahr ergeben (*Ref. 19*).

Eine ähnliche jährliche Zunahme wurde für die irische Station Mace Head berichtet (*Ref. 7, 13*). Zwischen 1987 und 2001 betrug die jährliche Zunahme der bodennahen Ozonkonzentrationen 0.56 ppb/Jahr.

Im Gegensatz zu den Stationen an den Westküsten von Nordamerika und Europa können die nordhemisphärischen Ozon-Hintergrundkonzentrationen an kontinentalen Stationen wegen lokaler bis regionaler ozonbildender– und zerstörender Einflüsse nicht direkt bestimmt werden. Eine indirekte Bestimmung am Meteorologischen Observatorium des Deutschen Wetterdienstes auf dem Hohenpeißenberg (900 m ü NN) durch eine saisonabhängige Selektion der Ozondaten nach Windgeschwindigkeiten erlaubte eine Abschätzung der nordhemisphärischen Ozon-Hintergrundkonzentrationen und deren Langzeittrends (*Ref. 20, 21*). Danach haben die Jahreswerte zwischen 1975 und 1999 von 31 auf 40 ppb (0.38 ppb/Jahr) zugenommen.

### 3.1.2.5 Globale Emissionsminderung und nordhemisphärischer Hintergrund

Da die nordhemisphärische Ozonbildung weitgehend  $\text{NO}_x$ -kontrolliert ist, sollte eine weltweite Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen das nordhemisphärische Ozon und dessen Beitrag zu den aktuellen Ozonwerten am effektivsten mindern.

Erste sehr grobe globale Modellrechnungen (*Ref. 7*) bestätigen dies. Mit Hilfe des 3D-CT-Modells (STOCHEM) wurde abgeschätzt, um wie viele ppb sich die aktuelle Ozonbelastung an 21 europäischen EMEP-Stationen vermindert, wenn die globalen anthropogenen Emissionen von Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) um jeweils 50% reduziert werden.

Die Abbildung 4 und Abbildung 5 und zeigen beispielhaft die Ergebnisse einer 50%igen Reduzierung von  $\text{CO}$  und  $\text{NO}_x$  für die UBA-Station Waldhof. Während eine 50%ige Reduzierung der globalen  $\text{CO}$ -Emissionen die Ozonkonzentrationen saisonabhängig nur um 0.5 bis 2.5 ppb senkt, liegt die Minderung bei einer entsprechenden Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen zwischen 3 und 11 ppb. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse einer 50%igen Reduzierung der globalen anthropogenen  $\text{CH}_4$ -Emissionen. Die Verminderung der Ozonkonzentrationen für die europäischen Länder ist mit 1 bis 1.5 ppb relativ gering.

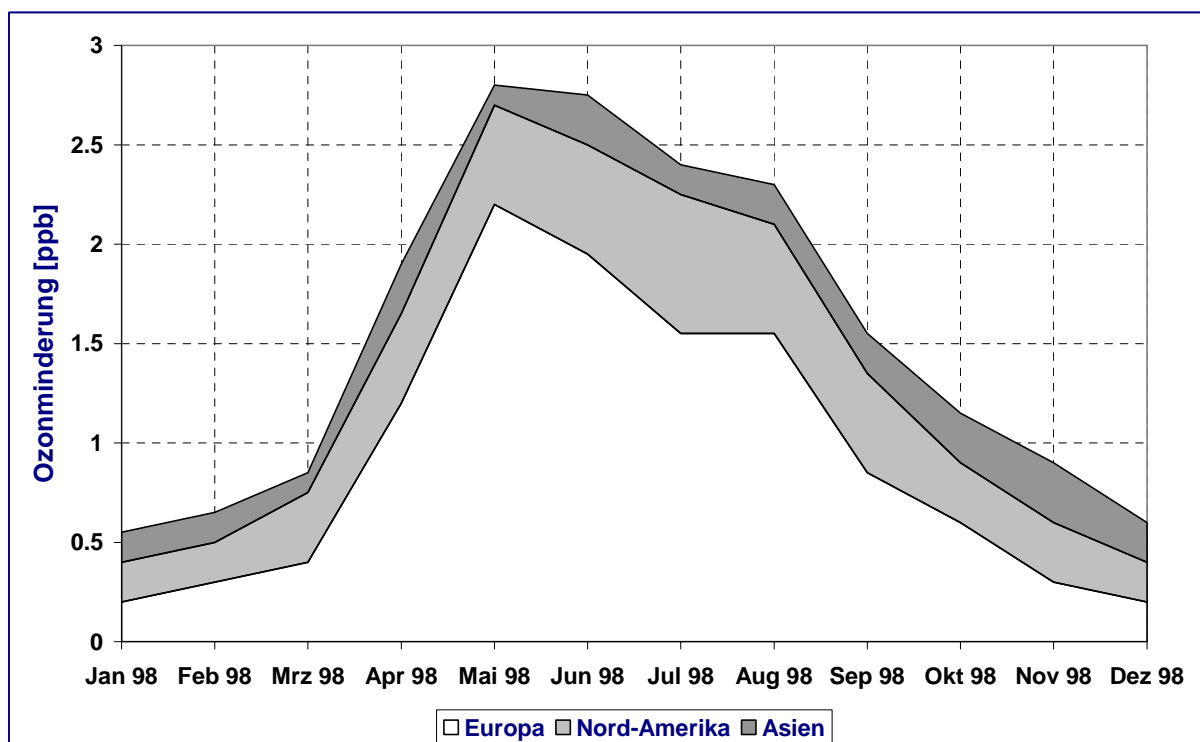


Abbildung 4: Ozonminderung in Waldhof unter der Annahme einer 50%igen Reduktion der globalen anthropogenen  $\text{CO}$ -Emissionen (*Ref. 7*)

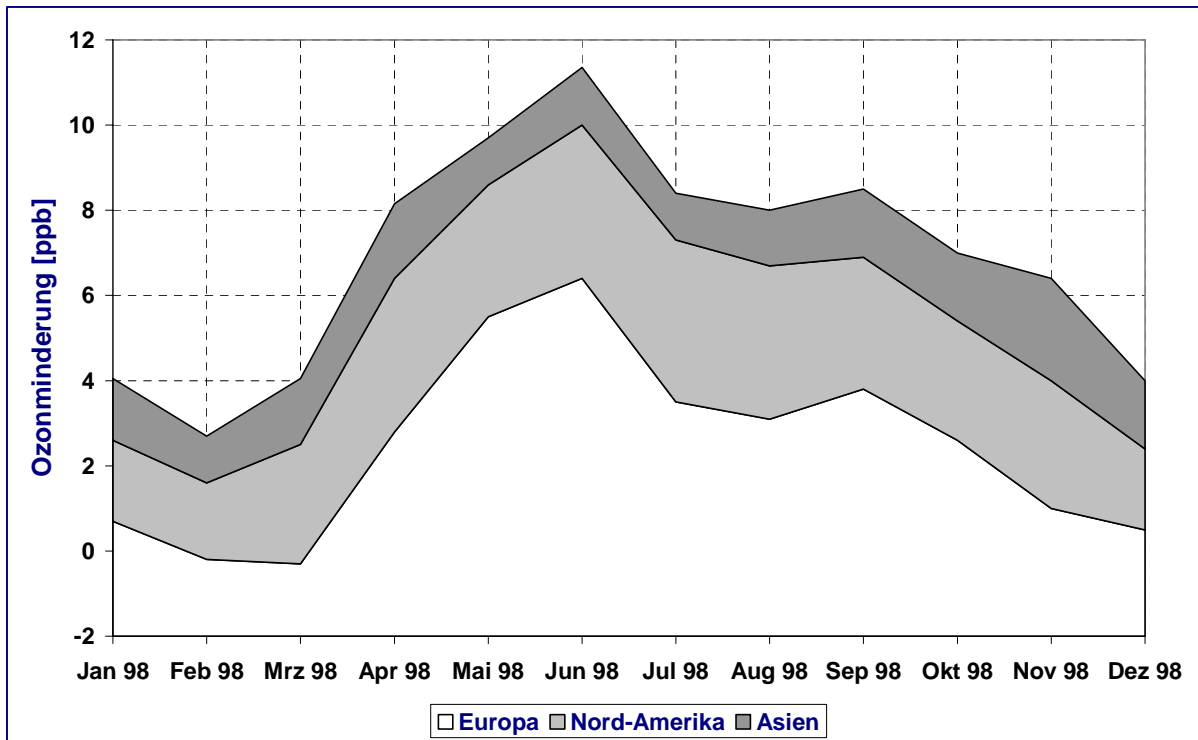


Abbildung 5: Ozonminderung in Waldhof unter der Annahme einer 50%igen Reduktion der globalen anthropogenen  $\text{NO}_x$ -Emissionen (*Ref. 7*)

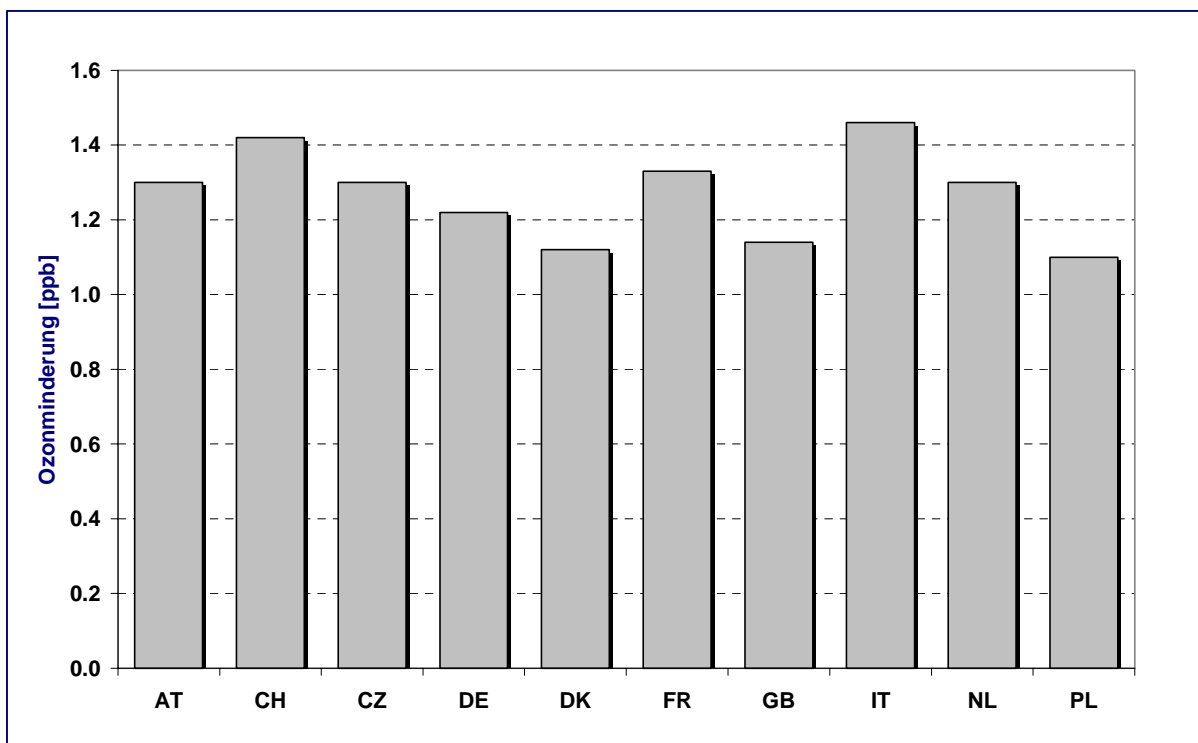


Abbildung 6: Ozonminderung unter der Annahme einer 50%igen Reduktion der globalen anthropogenen Methan-Emissionen (*Ref. 7*)

Noch unsicherer als beim Ozon sind die Auswirkungen globaler Emissionsänderungen beim Feinstaub. Satellitenmessungen zum Transport von Feinstaub über den Nordatlantik bzw. Nordpazifik zeigten hohe Feinstaubkonzentrationen an den Osträndern des amerikanischen bzw. asiatischen Kontinentes, dagegen in der Regel aber eine starke Abnahme der Konzentrationen während des weiteren Transportes. Dies steht im Gegensatz zum Ozon, dessen Konzentrationen sich über den gesamten Nordpazifik bzw. Nordatlantik hinweg nur relativ wenig ändert (*Ref. 26*).

Für Deutschland bedeutet dies, dass der interkontinentale Transport über den Nordatlantik hinweg für die deutsche Feinstaubgesetzgebung nicht die gleiche Bedeutung hat wie der entsprechende Transport von Ozon für die Ozongesetzgebung.

Angesichts der drastischen Reduzierung der Emissionen von Feinstaub in Deutschland während der letzten 15 Jahre werden dessen Konzentrationen in zunehmendem Maße durch die natürlichen Emissionen und vor allem durch den Ferntransport bestimmt, wobei aber der interkontinentale Transport – außer bei relativ selten vorkommenden Episoden mit hohen Feinstaubtransporten (z.B. Saharastaub) – gegenüber dem Ferntransport aus den europäischen Nachbarstaaten sehr gering zu sein scheint.

### 3.1.1 Literatur

(1) *NARSTO Report, USA (2000)*

*An Assessment of Tropospheric Ozone Pollution: A North American Perspective, NARSTO: The North American Research Strategy for Tropospheric Ozone, July 2000*

(2) *Workshop Conclusions: Photooxidants, Particles, and Haze across the Arctic and North Atlantic: Transport, Observations and Models, Palisades, New York, USA, 12-15 June 2001.*

(3) *Workshop Conclusions: Trends and Intercontinental Transport of Photo-oxidants, Particles and Their Precursors across the Northern Hemisphere (Observations, Models, Policy Implications). Bad Breisig, Germany, 7-9 October 2002.*

(4) *Penkett, S. A. (2001)*

*Trans-Atlantic Transport: A European Perspective. Paper presented under ref.2*

(5) *Lelieveld, J. and F. Dentener (2000)*

*What controls tropospheric ozone ? J. Geoph. Research, Vol.105, No.D3, pp.3531-3551.*

(6) *Lelieveld, J. (2002)*

*Global Northern Hemispheric Modeling of Tropospheric Ozone. Paper presented under ref. 3.*

(7) *Derwent, R. (2002)*

*Intercontinental transport and the contribution from global emission controls to ozone levels within Europe. Paper presented under ref. 3.*

(8) *Amann, M. (2002)*

*Hemispheric emission scenarios. Paper presented under ref. 3.*

(9) *Derwent, R. (2001)*

*Source-receptor relationships for ozone between North America and Europe calculated with a 3-D Lagrangian CTM Model. Paper presented under ref.2.*

- (10) Neftel, A. (2000)  
*NO-Emissionen aus Agrarflächen in Mitteleuropa, Vortrag gehalten am 20. November 2000 bei DECHEMA in Frankfurt/M.*
- (11) Beilke, S. und Wallasch, M. (2000)  
*Die Ozonbelastung in Deutschland seit 1990 und Prognose der zukünftigen Entwicklung. Immissionsschutz, 5. Jahrgang, Heft Nr.4, Dezember 2000, S. 149-155.*
- (12) Stick, C.; Beilke, S.; Adolphsen, A.; Hundhausen, E.; Wallasch, M. (1998)  
*Die lufthygienische Charakterisierung des Seeklimas an der deutschen Nordseeküste im Vergleich zum Binnenland. Phys. Rehab. Kur Med 8, S. 75-83.*
- (13) Derwent, D. (2002)  
*Persönliche Mitteilung*
- (14) Jacob, D. and Fiore, A. (2001)  
*Origin of background ozone in surface air over the United States in summer: contribution to pollution episodes. Paper presented at workshop under ref.2.*
- (15) Fiore, A.; Jacob, D. et al. (2002)  
*Background ozone over the United States in summer : origin, trend, and contribution to pollution episodes. J. Geoph. Research, 107 (D15), p.1029, 2002.*
- (16) Butterbach - Bahl, K. (2002)  
*Wälder als NO<sub>x</sub> – Quelle, Vortrag bei DECHEMA Frankfurt, 18. April 2002, DECHEMA/GDCh/DBG – Gemeinschaftsausschuss „Chemie der Atmosphäre“*
- (17) Wild, O. and Akimoto, H. (2001)  
*Intercontinental transport of ozone and its precursors in a three-dimensional global CTM, J.Geoph. Research, 106, 27, 729-27, 744, 2001.*
- (18) Jaffe, D. (1999)  
*Transport of Asian Air Pollution to North America, Geoph. Res. Letters 26, pp.711-714.*
- (19) Husar, R.B. et al. (2001)  
*Asian dust events of April 1998, J. Geoph. Research, 106, pp.18317-18330, 2001.*
- (20) Husar, R.B. (2002)  
*Global and local dust over North America. Paper presented at Bad Breisig, 7-9 October 2002.*

- (21) Vaughan, J.K. et al. (2001)  
*April 1998 Asian dust event over the Columbia Plateau, J. Geoph. Research, 106, pp. 18381-18402, 2001.*
- (22) Mc Kendry I.G. et al. (2001)  
*Long-range transport of Asian dust to the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada. J. Geoph. Research, 106, 18361-18370, 2001.*
- (23) Parrish, D. (2002)  
*Intercontinental transport of pollution: inflow to the West Coast and outflow from the East Coast of North America, Paper presented under ref.2.*
- (24) Fricke, W. (2002)  
*Diskussionsbeitrag, Bad Breisig Workshop, 7-9 Oktober 2002.*
- (25) DWD (2000)  
*Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Nr. 75, 6. Juni 2000, Autoren: Kaminski, U.; Gilge, S.*
- (26) Stordal, F. (2001)  
*A European component of the analysis of relationships between anthropogenic emissions and Concentrations of photooxidants and particles with focus on transport across the North Atlantic and the Arctic, Paper presented under ref.2*