

# **Jahresbericht 1999 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes**

## **3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME**

### **3.1 Ausgewählte Treibhausgase in Deutschland**

*Autoren: Siegfried Beilke und Karin Uhse, II 6.5 Langen*

**Inhalt:**

<b>3.</b>	<b>SPEZIELLE UMWELTPROBLEME .....</b>	<b>1</b>
<b>3.1</b>	<b>Ausgewählte Treibhausgase in Deutschland .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Ausgewählte Treibhausgase .....</b>	<b>5</b>
3.1.2.1	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) .....	5
3.1.2.2	Methan (CH <sub>4</sub> ) .....	12
3.1.2.3	Distickstoffoxid (N <sub>2</sub> O) .....	14
<b>3.1.3</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>17</b>

Herausgeber: Umweltbundesamt  
 Postfach 33 00 22  
 14191 Berlin  
 Tel.: 030/8903-0  
 Telex: 183 756  
 Telefax: 030/8903 2285  
 Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>  
 Internet Messnetz: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/mbm.htm>

Redaktion: Fachgebiet II 6.5, Langen  
 Siegfried Beilke  
 Karin Uhse  
 Telefax: 06103/704-184  
 email: [karin.uhse@uba.de](mailto:karin.uhse@uba.de)

## 3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME

### 3.1 Ausgewählte Treibhausgase in Deutschland

*Autor: Siegfried Beilke*

#### 3.1.1 Einleitung

Als Treibhausgase bezeichnet man die Gase in der Atmosphäre, die wesentliche Absorptionsbanden im infraroten Wellenlängenbereich haben, die also bei Anstieg ihrer Konzentrationen den Treibhauseffekt verstärken und damit eine Erhöhung der Temperatur an der Erdoberfläche bewirken können. Atmosphärische Treibhausgase werden sowohl durch natürliche als auch durch anthropogene Quellen in die Atmosphäre emittiert, wobei letztere zu einem zusätzlichen, vom Menschen ausgelösten Treibhauseffekt führen.

Die wichtigsten Gase, die den zusätzlichen Treibhauseffekt verursachen, sind Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), teilhalogenierte FCKW (HFC), Halone, perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>), Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) und Ozon. Im Unterschied zu den anderen Treibhausgasen wird Ozon nicht direkt in die Atmosphäre emittiert, sondern es bildet sich in der Atmosphäre durch photochemische Reaktionen aus Vorläufersubstanzen.

Neben diesen Treibhausgasen gibt es eine Reihe von Gasen, die indirekt klimarelevant sind. Diese Gase absorbieren zwar nicht selbst im infraroten Wellenlängenbereich, sie können aber in vielfältiger Weise die Kreisläufe einer Reihe von Treibhausgasen beeinflussen, oder sie sind als Vorläufer für die Bildung des troposphärischen Ozons notwendig. Des Weiteren können diese Gase an der Bildung atmosphärischer Aerosolteilchen beteiligt sein, die ebenfalls klimarelevant sind. Die wichtigsten Gase mit indirekter Klimawirksamkeit sind Stickoxide (NO<sub>x</sub>), flüchtige organische Substanzen (VOC), Kohlenmonoxid (CO) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>). Diese Gase haben im Gegensatz zu den direkt klimarelevanten Treibhausgasen eine sehr kurze atmosphärische Lebensdauer.

Fast alle Treibhausgase haben eine im Vergleich zu typischen troposphärischen Mischungszeiten sehr lange atmosphärische Verweilzeit. Die troposphärischen Mischungszeiten liegen zwischen einigen Tagen bis Wochen für den vertikalen Austausch zwischen der Erdoberfläche und der Tropopause in etwa 10 km Höhe sowie zwischen 1 bis 2 Jahren für den Luftmassenaustausch zwischen der Nord- und Südhalbkugel über die innertropische Konvergenzzone (ITC) hinweg. Dagegen liegen die atmosphärischen Verweilzeiten der meisten Treibhausgase zwischen mehreren Jahren bis Jahrtausenden. Das bedeutet einmal, dass die globale Verteilung der Konzentrationen der Treibhausgase - im Gegensatz zur Verteilung der Gase mit indirekter Klimawirksamkeit - recht homogen ist und dass zum anderen die Konzentrationen der meisten Treibhausgase in Deutschland im Wesentlichen durch die globalen Emissionen bestimmt werden mit geringen Beiträgen durch die Emissionen in Deutschland ([siehe auch Tabelle 1](#)).

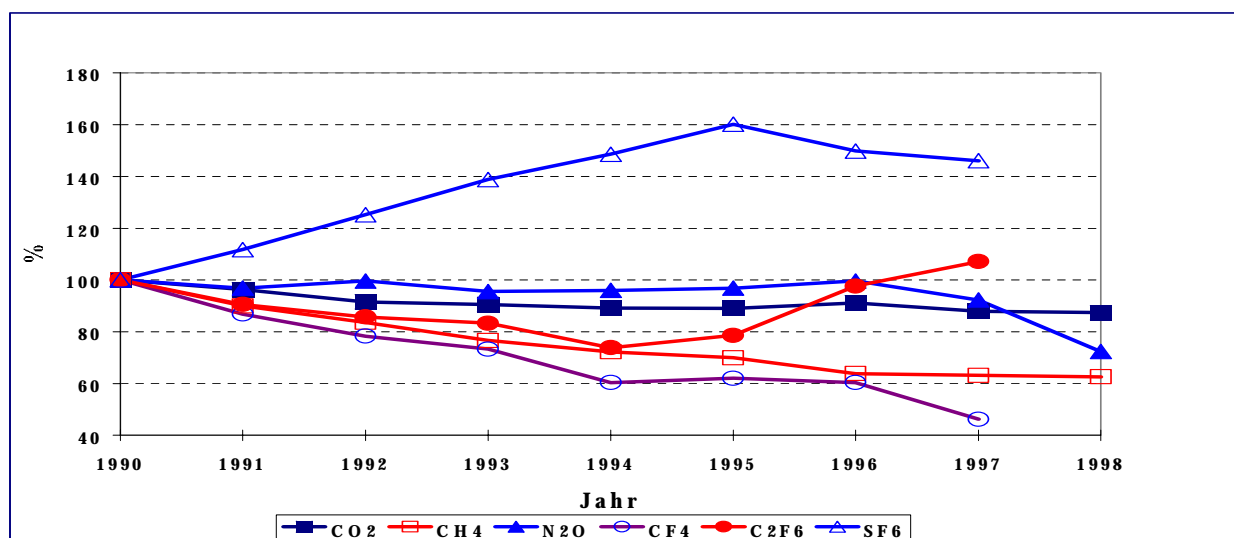
In [Tabelle 1](#) sind wesentliche globale Daten zu Emissionen, Konzentrationen, Verweilzeiten und Trends für einige der wichtigsten Treibhausgase zusammengestellt. Mit angegeben sind die Anteile (in Prozent) der deutschen Emissionen an den globalen Emissionen (*Ref. 1, 2, 3*).

Treibhausgas	Jährliche glob. Emissionen Ende der 90er Jahre	Anteile der deutsche Emissionen 1998	Konzentrationen 1760	Hintergrundkonzentrationen 1998	gemessener Trend (%/Jahr)	Lebensdauer (Jahre)
CO <sub>2</sub>	32.6 Pg	ca. 3%	278 ppm	365 ppm	0.4	50-200
CH <sub>4</sub>	550 Tg	ca. 1%	0.70 ppm	1.75 ppm	0.2	9
N <sub>2</sub> O	18 TgN	ca. 1%	0.27 ppm	0.31 ppm	0.25	120
CF <sub>4</sub>	ca. 15 Gg	ca. 1%	40 ppt	80 ppt	1.25	50 000
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	ca. 2 Gg	ca. 2%	0 ppt	3.0 ppt	2.7	10 000
SF <sub>6</sub>	ca. 2 Gg	ca. 4%	0 ppt	4.2 ppt	5.7	3 200
CFCl <sub>3</sub>			0 ppt	268 ppt	-0.5	45
CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>			0 ppt	533 ppt	0.8	100

**Tabelle 1: Globale Daten zu anthropogenen Emissionen, Konzentrationen, Trends sowie atmosphärische Verweilzeiten einiger Treibhausgase. Mit eingetragen sind die deutschen Emissionsanteile (in %) an den globalen anthropogenen Emissionen (Ref. 1, 2, 3).**

Während die globalen Emissionen einiger wichtiger Treibhausgase wie beispielsweise CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O weiter angestiegen sind, wurden die Emissionen für diese und einige andere Treibhausgase in Deutschland während des letzten Jahrzehnts z.T. erheblich reduziert (Ref. 1, 2).

Wie [Abbildung 1](#) zeigt, sind beispielsweise die Emissionen von CO<sub>2</sub> in Deutschland zwischen 1990 und 1998 um 13% (zwischen 1990 und 1999 um ca. 15%, Ref. 16), die von CH<sub>4</sub> um fast 40% und die des N<sub>2</sub>O um etwa 25% zurückgegangen. Ebenfalls zurückgegangen sind die Emissionen von CF<sub>4</sub> (um mehr als 50%), während die Emissionen von SF<sub>6</sub> (um etwa 50%) und vor allem die von HFC (um mehr als 1200%) stark angestiegen sind. Die Fluorchlorkohlenstoffe (FCKW) CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> und CCl<sub>3</sub>F werden seit 1995 in Deutschland nicht mehr hergestellt (Ref. 1, 2).



**Abbildung 1: Trend der jährlichen Emissionen von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> und SF<sub>6</sub> in Deutschland, bezogen auf das Jahr 1990 (Ref. 1, 2).**

In den folgenden Abschnitten sollen für die Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O, die zusammen mit mehr als 80% für den zusätzlichen, anthropogen verursachten Treibhauseffekt verantwortlich sind, regionale Bilanzierungen vorgenommen werden. Dies beinhaltet Messungen von Konzentrationen und deren kontinentaler Erhöhung gegenüber dem globalen nordhemisphärischen Hintergrund sowie Abschätzungen von Emissionen im regionalen Maßstab für ausgewählte Emissionsgebiete in Deutschland. Diese auf der Basis atmosphärischer Messungen bestimmten Emissionen werden dann den mittels statistischer Erhebungen berechneten Emissionsdaten gegenübergestellt und mögliche Abweichungen diskutiert.

Die folgenden Untersuchungen basieren zum großen Teil auf den z.T. langjährigen Messungen der Konzentrationen von Treibhausgasen an den Stationen des UBA-Messnetzes sowie auf Untersuchungen zur regionalen Bilanzierung, die im Rahmen von zwei UBA-Forschungsvorhaben von der Universität Heidelberg durchgeführt worden sind (*Ref. 4, 5*).

### **3.1.2 Ausgewählte Treibhausgase**

#### **3.1.2.1 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)**

Kohlendioxid ist zur Zeit mit über 60% für den zusätzlichen, anthropogen verursachten Treibhauseffekt verantwortlich (kumulative Emission inkl. Entwaldung). Obwohl die anthropogenen Quellen nur etwa 4% der Brutto-Austauschflüsse zwischen Atmosphäre und den anderen Kohlenstoffreservoirs (Biosphäre und Ozean) beitragen, bedingen diese Emissionen die langzeitige Zunahme des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre. Von den anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen stammten Mitte der 90er Jahre knapp 80% aus der Verbrennung fossiler Energieträger und etwa 20% aus geänderter Landnutzung (*Ref. 6, 7*). Ende der 1990er Jahre wurden knapp 3% der weltweit anthropogen in die Atmosphäre abgegebenen CO<sub>2</sub>-Mengen in Deutschland emittiert, der deutsche Anteil wird in den kommenden Jahren noch weiter zurückgehen (*Ref. 2, 8*).

Wirksame CO<sub>2</sub>-Senken sind die Ozeane und die Biosphäre, während der Abbau durch chemische Prozesse innerhalb der Atmosphäre bedeutungslos ist. Nach Messungen an Lufteinschlüssen in Eisbohrkernen sind die atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von etwa 280 ppm zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf etwa 365 ppm am Ende des 20. Jahrhunderts angestiegen. Kontinuierliche CO<sub>2</sub>-Messungen werden seit 1972 an 5 Messstationen des UBA (Westerland, Waldhof, Deuselbach, Brotjackriegel und Schauinsland) durchgeführt, seit 1995 auch an den Stationen Zingst, Neuglobsow, Schmücke und Zugspitze.

[Abbildung 2](#) zeigt beispielhaft den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Monatsmittel an der Station Schauinsland und zum Vergleich die entsprechenden Trends, die am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii und an anderen globalen Stationen gemessen wurden.

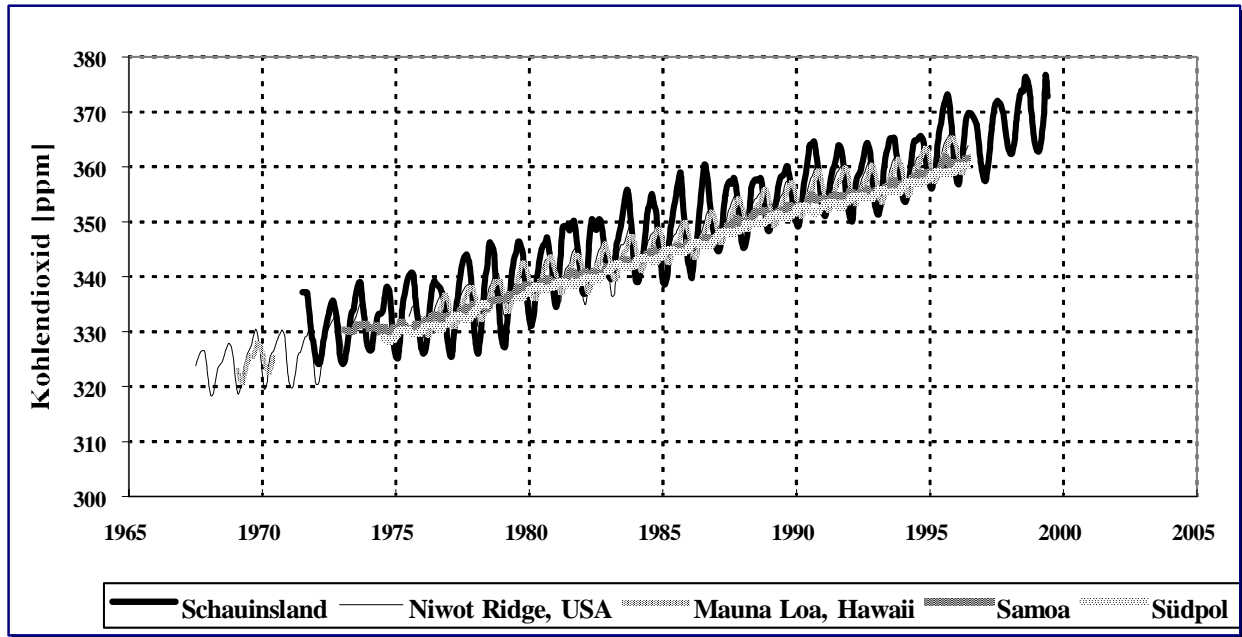


Abbildung 2: Verlauf der CO<sub>2</sub>-Monatsmittel an der UBA-Station Schauinsland im Vergleich zu globalen Hintergrundstationen von 1968 bis 1999.

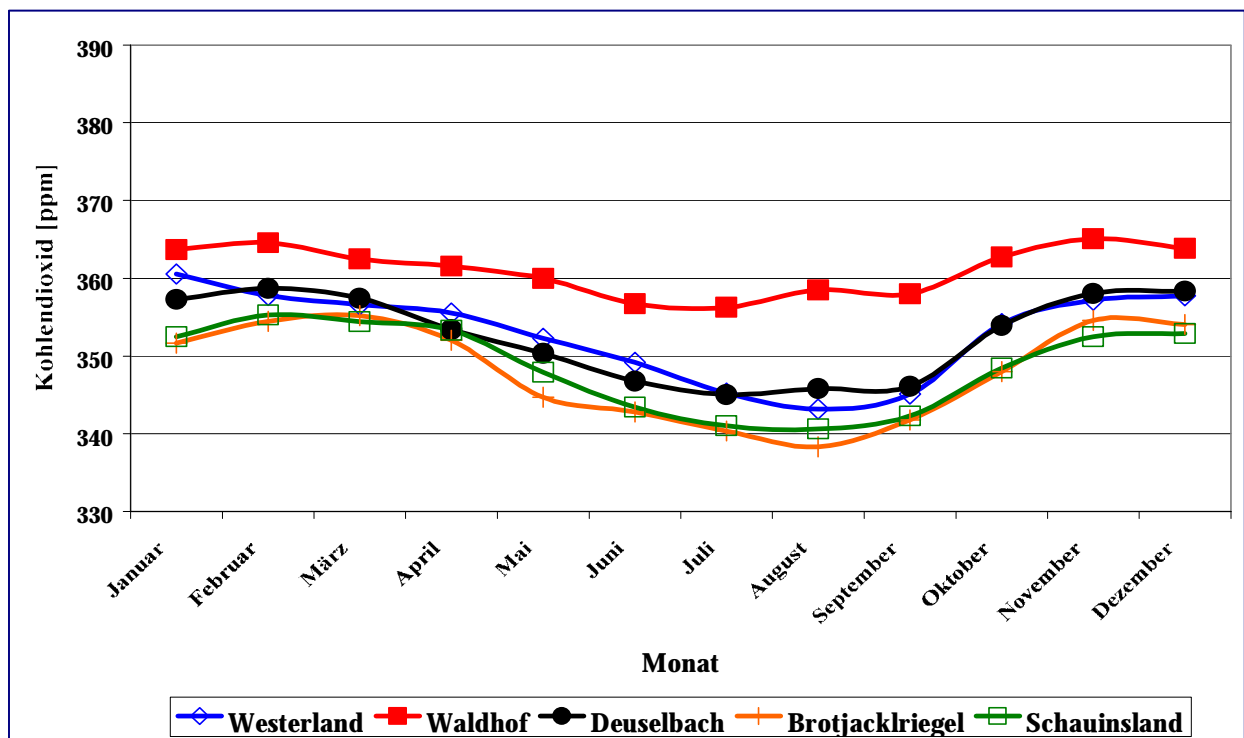
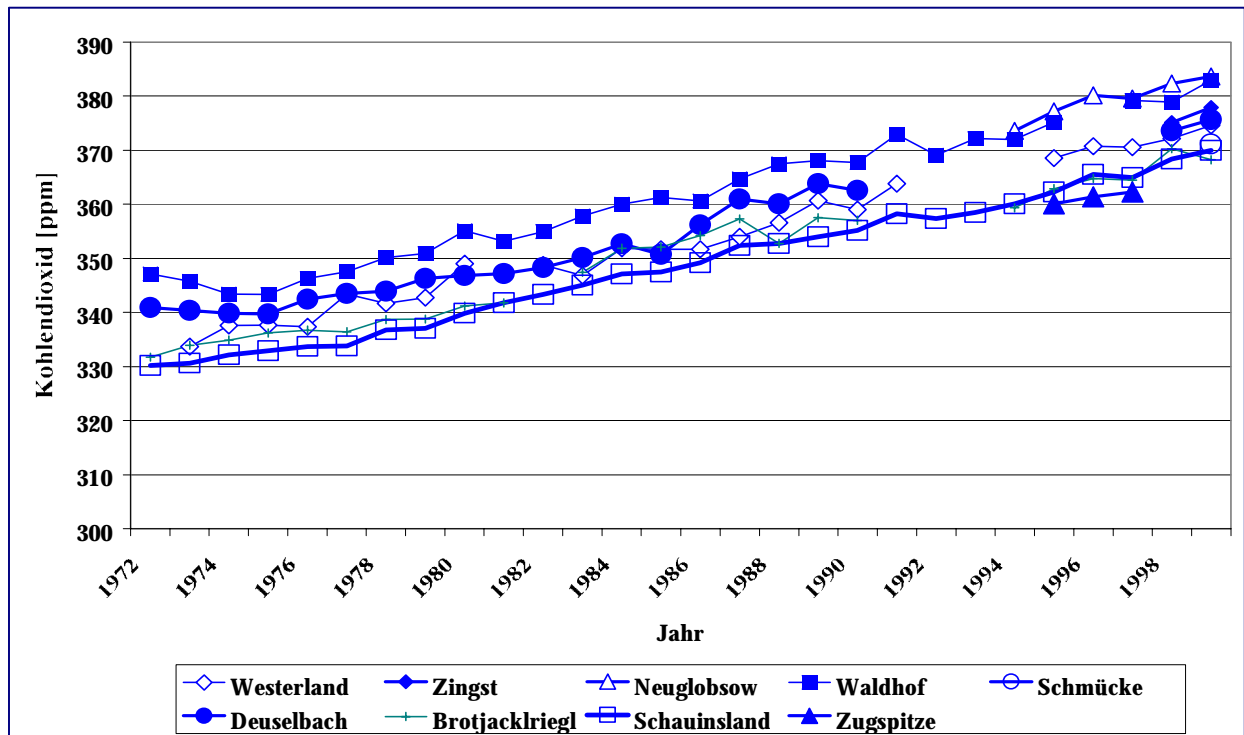


Abbildung 3: Mittlerer Jahresgang der CO<sub>2</sub>-Monatsmittel von 1972 bis 1999 an 5 personell besetzten Messstellen



**Abbildung 4: Verlauf der CO<sub>2</sub>-Jahresmittel von 1972 bis 1999 an den Messstellen des UBA.**

Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unterscheiden sich sowohl zeitlich als auch räumlich nur wenig. Der Jahrgang der Monatswerte mit einem Maximum im Frühling und einem Minimum im Spätsommer und Frühherbst ([Abbildung 2](#) und [Abbildung 3](#)) wird durch das Zusammenspiel der biologischen Aktivität, der Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie der Höhe der Mischungsschicht verursacht. Durch die verstärkte Wirkung der Photosynthese wird der nordhemisphärischen Troposphäre vom Frühling bis zum Herbst CO<sub>2</sub> entzogen. Durch die Mineralisation von Biomasse wird anschließend wieder CO<sub>2</sub> bis zum Frühjahr freigesetzt. Wie die [Abbildung 2](#) und [Abbildung 3](#) weiter zeigen, beträgt die Jahresamplitude an den UBA-Messstellen etwa 15 ppm, in guter Übereinstimmung mit anderen Stationen auf den mittleren Breiten der Nordhalbkugel.

Wie [Abbildung 4](#) zeigt, sind zum Beispiel die Jahresmittelwerte an der Station Schauinsland von 330 ppm im Jahre 1972 auf 370 im Jahre 1999 gestiegen. Das entspricht einer mittleren Anstiegsrate von 1.4 ppm pro Jahr (0.4%/Jahr) innerhalb der letzten 28 Jahre. Ganz ähnliche Anstiegsraten wurden auch an den anderen UBA-Stationen ([Abbildung 4](#)) beobachtet. Generell ist das Konzentrationsniveau an den kontinentalen Flachlandstationen etwas höher als an den Bergstationen. Der Grund liegt darin, dass die Bergstationen vor allem im Winter relativ häufig oberhalb der mit CO<sub>2</sub> angereicherten Mischungsschicht liegen. Die gegenüber den kontinentalen Flachlandstationen niedrigeren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen an der Nordseestation Westerland/Sylt sind auf den starken maritimen Einfluss zurückzuführen.

Kohlendioxid ist wegen seiner relativ langen atmosphärischen Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten annähernd gleichmäßig über die globale Atmosphäre verteilt. Da die atmosphärische Mischung nicht unendlich schnell erfolgt, werden in Gebieten mit hohen fossilen und biogenen Emissionen (d.h. über den Kontinenten) geringfügig höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beobachtet als im nordhemisphärischen Hintergrund. Auf den mittleren Breiten der Nordhalbkugel kann der CO<sub>2</sub>-Hintergrund, der sich aus einem natürlichen und

einem anthropogenen Anteil zusammensetzt, näherungsweise an Backgroundstationen wie Izaña (Teneriffa), Jungfrauoch (Schweiz) oder an den maritimen Stationen Mace Head (Westküste Irlands) und Westerland (Sylt) bei Seewind gemessen werden.

Die kontinentale CO<sub>2</sub>-Überhöhung gegenüber dem nordhemisphärischen Hintergrund ist beispielhaft für die Station Westerland in [Abbildung 5](#) und [Abbildung 6](#) dargestellt. [Abbildung 5](#) zeigt einen Vergleich der Jahreswerte der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Westerland (Sylt) für Windrichtungen aus zwei entgegengesetzten Sektoren, nämlich die Windrichtungen aus dem Sektor Nordwest (Seewind, Antransport von CO<sub>2</sub> über den Atlantik und die Nordsee, Nordhemisphärischer Hintergrund) zum einen und die Richtungen aus dem Sektor Südost (Landwind, Antransport von CO<sub>2</sub> vom europäischen Kontinent) zum anderen. Beide Sektoren umspannen je einen Winkel von 135 Grad. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Jahresmittel liegen bei Antransport vom Kontinent um 10 bis 15 ppm (3 bis 4%) über den Werten, die beim Antransport vom Atlantik und der Nordsee beobachtet werden.

[Abbildung 6](#) zeigt mittlere monatliche Tagesgänge der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Westerland bei Seewind und bei Landwind (Windsektoren wie in [Abbildung 5](#)) aus den Jahren 1990 bis 1999. Abgebildet sind die für jede Stunde eines Tages über den jeweiligen Monat gemittelten Werte. Während die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bei Seewind nur geringe Tagesschwankungen auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau zeigen, sind die Änderungen bei Landwind sowohl im Tages-, als auch im Jahresverlauf stärker.

Letztere werden durch das Zusammenwirken und den starken Einfluss der von der Tages- und Jahreszeit abhängigen biologischen Aktivität, der Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie der Höhe der Mischungsschicht über dem europäischen Kontinent verursacht. Diese Prozesse spielen über See bezüglich der Beeinflussung der bodennahen Vertikalprofile keine bzw. nur eine untergeordnete Rolle.

Die CO<sub>2</sub>-Hintergrundkonzentration in der Atmosphäre (z.B. in [Abbildung 4](#)) steigt nicht von Jahr zu Jahr proportional zur anthropogenen CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Ein Teil des Anstieges der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ist darauf zurückzuführen, dass die Aufnahme des atmosphärischen CO<sub>2</sub> durch die Ozeane von Jahr zu Jahr erheblich variieren kann. So nimmt die globale atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration beispielsweise in El Nino-Jahren besonders stark zu (*Ref. 6*).

Mit Hilfe von Radiokohlenstoffmessungen am atmosphärischen CO<sub>2</sub> (<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>) ist es möglich, den fossilen Anteil an der kontinentalen CO<sub>2</sub>-Überhöhung zu bestimmen. Da das radioaktive Isotop des Kohlenstoffs, <sup>14</sup>C, mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren nicht mehr in fossilen Brennstoffen enthalten ist, sollte das Verhältnis von <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> zu <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> in der Nähe von fossilen CO<sub>2</sub>-Quellen geringer sein als im nordhemisphärischen Hintergrund.

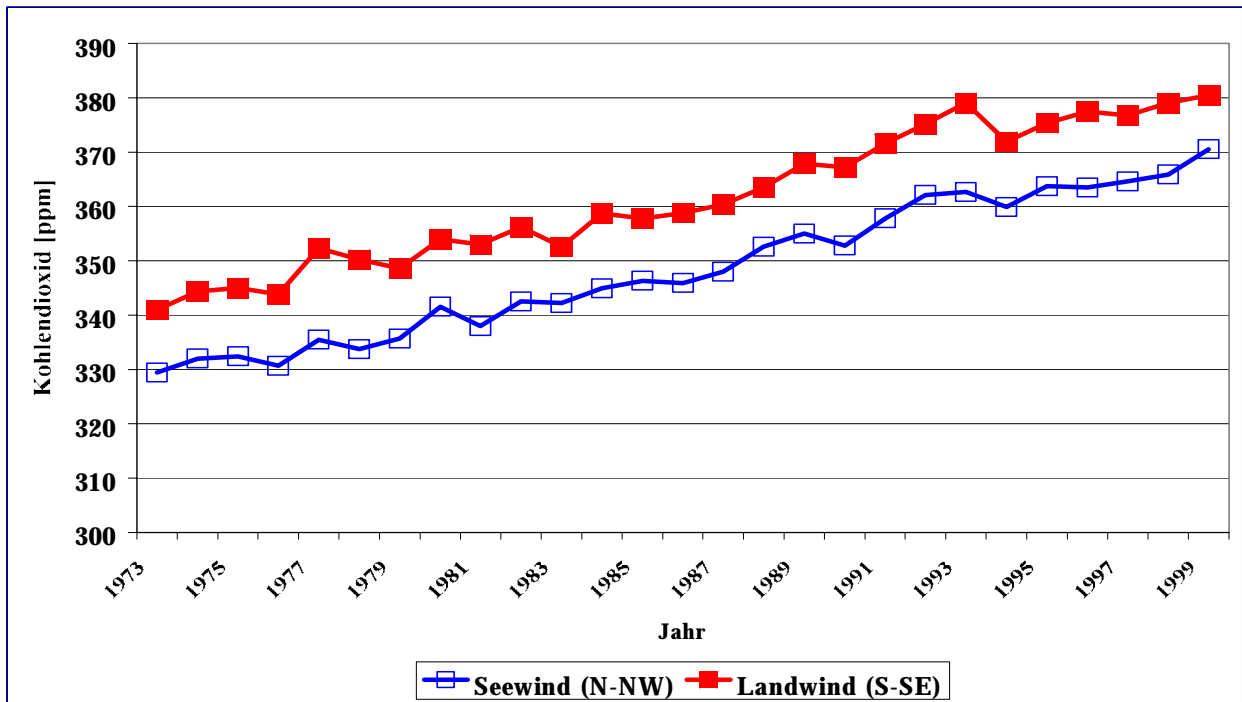


Abbildung 5: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Jahreswerte in Westerland/Sylt von 1973 bis 1999, für Seewind (Antransport von CO<sub>2</sub> über den Atlantik und die Nordsee, Nordhemispärischer Hintergrund) und Landwind (Antransport von CO<sub>2</sub> vom europäischen Kontinent).

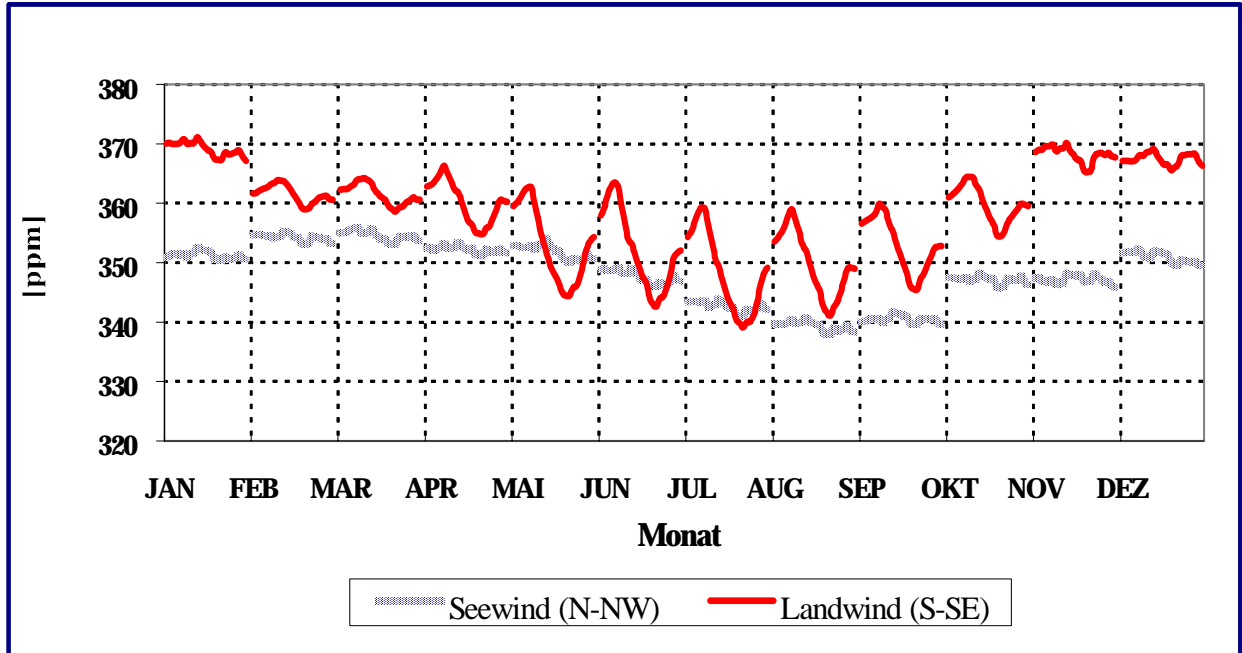


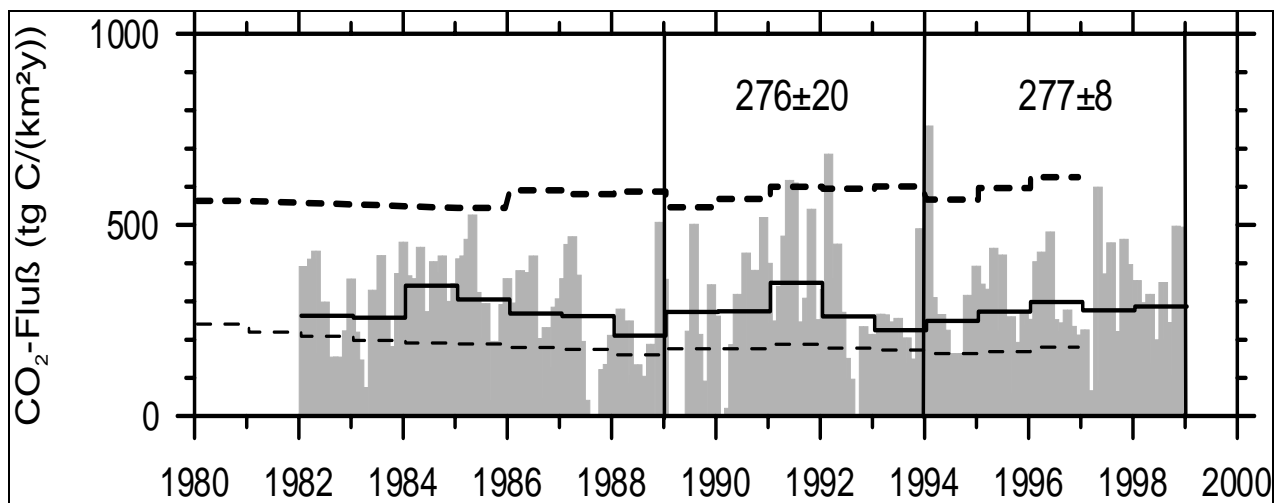
Abbildung 6: Mittlere monatliche Tagesgänge der Kohlendioxidkonzentration in Westerland/Sylt aus den Jahren 1972 bis 1999, bei Seewind (Antransport von CO<sub>2</sub> über den Atlantik und die Nordsee, Nordhemispärischer Hintergrund) und Landwind (Antransport von CO<sub>2</sub> vom europäischen Kontinent).

In einem vom Umweltbundesamt geförderten Vorhaben der Universität Heidelberg konnte die regionale CO<sub>2</sub>-Überhöhung durch die fossilen CO<sub>2</sub>-Quellen für die drei UBA-Stationen Westerland, Brotjacklriegel und Schauinsland bestimmt werden (Ref. 4)

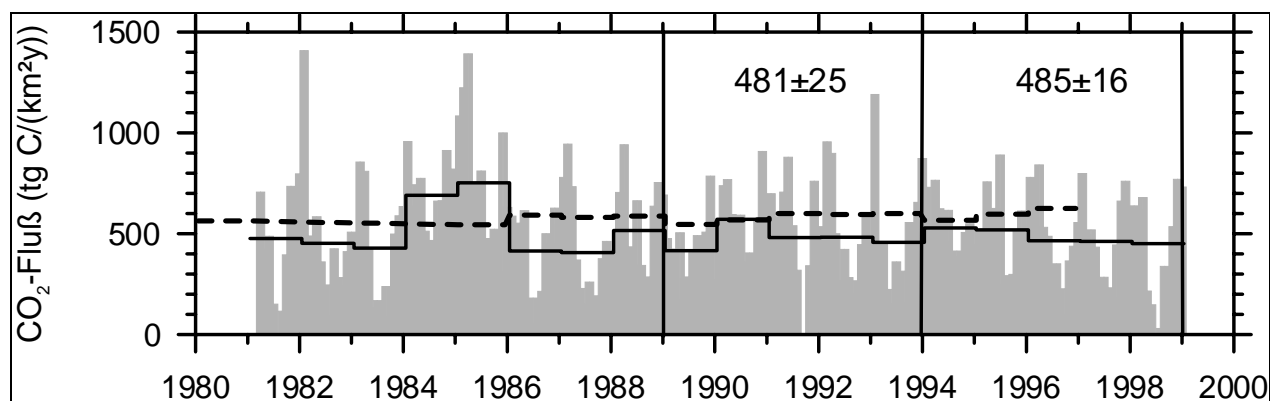
Der Anteil von fossilem Verbrennungs-CO<sub>2</sub> an der kontinentalen Überhöhung betrug zwischen 1986 und 1989 im Jahresmittel am Schauinsland 1.9 ppm, am Brotjacklriegel 3.0 ppm und in Westerland 3.9 ppm. In den Wintermonaten ist der fossile Anteil etwa um den Faktor 3 höher als während des Sommers.

Neuere Untersuchungen über einen längeren Zeitraum (1980-1999) ergaben für die Bergstation Schauinsland (1205 m ü NN) eine fossile Überhöhung der Monatsmittel von bis zu 10 ppm CO<sub>2</sub>, für eine Messstelle im Stadtgebiet von Heidelberg wegen der Nähe zu fossilen Quellen sogar eine entsprechende Überhöhung bis 50 ppm. (Ref. 5). Die fossilen Beiträge an der Überhöhung lagen in Heidelberg im Mittel zwischen 0-10 ppm im Sommer und zwischen 20-50 ppm CO<sub>2</sub> im Winter.

Mit der an der Universität Heidelberg entwickelten Radon-Tracer-Methode (Ref. 5) kann aus den fossilen CO<sub>2</sub>-Überhöhungen eine fossile CO<sub>2</sub>-Quelldichte berechnet werden. Das Grundprinzip der Radon-Tracer-Methode beruht auf der parallelen Messung des zu untersuchenden Gases (hier CO<sub>2</sub>) und des Tracers <sup>222</sup>Rn. Da das radioaktive Radon (Halbwertszeit: 3.8 Tage) mit annähernd konstanter Quellstärke aus allen natürlichen Böden emaniert und an den atmosphärischen Transportvorgängen ebenso teilnimmt wie andere Spurengase, die ihre Quellen in Bodennähe haben, kann bei bekannter Radonquellstärke die Quellstärke z.B. des CO<sub>2</sub> für ein bestimmtes Einzugsgebiet bestimmt werden.



**Abbildung 7:** CO<sub>2</sub>-Quelldichten (in Tonnen Kohlenstoff pro km<sup>2</sup> und Tag) berechnet aus der <sup>14</sup>C-Aktivität des atmosphärischen CO<sub>2</sub> am Schauinsland (graue Balken: Monatsmittel, durchgezogene Linie: Jahresmittel) im Vergleich mit den statistischen Daten für Baden-Württemberg (obere fett gestrichelte Linie) und Frankreich (untere dünn gestrichelte Linie). Die 5-Jahresmittel von 1989-1993 und 1994-1998 unterscheiden sich praktisch nicht (Ref. 5).



**Abbildung 8:** CO<sub>2</sub>-Quelldichten (in Tonnen Kohlenstoff pro km<sup>2</sup> und Tag) berechnet aus der <sup>14</sup>C-Aktivität des atmosphärischen CO<sub>2</sub> in Heidelberg (graue Balken: Monatsmittel, durchgezogene Linie: Jahresmittel) im Vergleich mit den statistischen Daten für Baden-Württemberg (gestrichelte Linie). Wie an der Station Schauinsland sind die 5-Jahresmittelwerte von 1989-1993 und 1994-1998 nicht signifikant unterschiedlich (Ref. 5).

In [Abbildung 7](#) und [Abbildung 8](#) sind die aus den Messungen von <sup>14</sup>C und Radon ermittelten fossilen CO<sub>2</sub>-Quelldichten für die Einzugsgebiete von Schauinsland und Heidelberg für die beiden Zeiträume 1989-1993 sowie 1994-1998 angegeben und mit den aus statistischen Verfahren für Baden-Württemberg und Frankreich gewonnenen Daten verglichen.

Das Einzugsgebiet für Heidelberg entspricht einer Fläche mit etwa 150 km Radius, das Einzugsgebiet des Schauinsland entspricht etwa der Fläche Baden-Württembergs sowie benachbarter Regionen in Frankreich.

Der Vergleich hat für beide Zeiträume nahezu identische Quelldichten für das Einzugsgebiet des Schauinsland ergeben:  $276 \pm 20$  t C/km<sup>2</sup>y (1989-1993) und  $277 \pm 8$  t C/km<sup>2</sup>y (1994-1998). Die Werte für das Einzugsgebiet des Schauinsland sind deutlich niedriger als die aus statistischen Daten für Baden-Württemberg ermittelten Flussdichten von etwa 600 t C/km<sup>2</sup>y, was zu einem erheblichen Teil auf den Einfluss der niedrigeren CO<sub>2</sub>-Flussdichte Frankreichs ( $175 \pm 3$  t C/km<sup>2</sup>y) zurückzuführen sein dürfte (siehe [Abbildung 7](#)). Die CO<sub>2</sub>-Flussdichte in Frankreich ist wahrscheinlich auch wegen des hohen Anteils der Kernenergie kleiner als in Baden-Württemberg.

Ähnlich wie für das Einzugsgebiet des Schauinsland zeigte ein Vergleich der fossilen CO<sub>2</sub>-Quelldichten auch für das Einzugsgebiet von Heidelberg für die beiden Zeiträume 1989-1993 gegenüber 1994-1998 keine Abnahme:  $481 \pm 25$  t C/km<sup>2</sup>y gegenüber  $485 \pm 16$  t C/km<sup>2</sup>y.

Für das Einzugsgebiet von Heidelberg war die aus atmosphärischen Messungen bestimmte CO<sub>2</sub>-Quelldichte mit  $510 \pm 28$  t C/km<sup>2</sup>y über die Jahre 1985 bis 1996 etwa um den Faktor 2 höher als für das Einzugsgebiet des Schauinsland, aber immer noch um ca. 15% niedriger als aus den statistischen Daten für Baden-Württemberg berechnet. Wahrscheinlich werden diese Abweichungen zwischen den gemessenen und den statistisch berechneten Quelldichten, ähnlich wie am Schauinsland, auch durch die niedrigeren fossilen CO<sub>2</sub>-Quelldichten in Frankreich mit verursacht. Möglicherweise werden die mit der Radon-Tracer-Methode für Heidelberg berechneten Emissionen auch systematisch unterschätzt, da sich hier die Inhomogenität des Radonflusses wegen der Unsicherheit der Größe des Einzugsgebietes

wesentlich stärker bemerkbar macht als für das Einzugsgebiet des Schauinslands.

### 3.1.2.2 Methan (CH<sub>4</sub>)

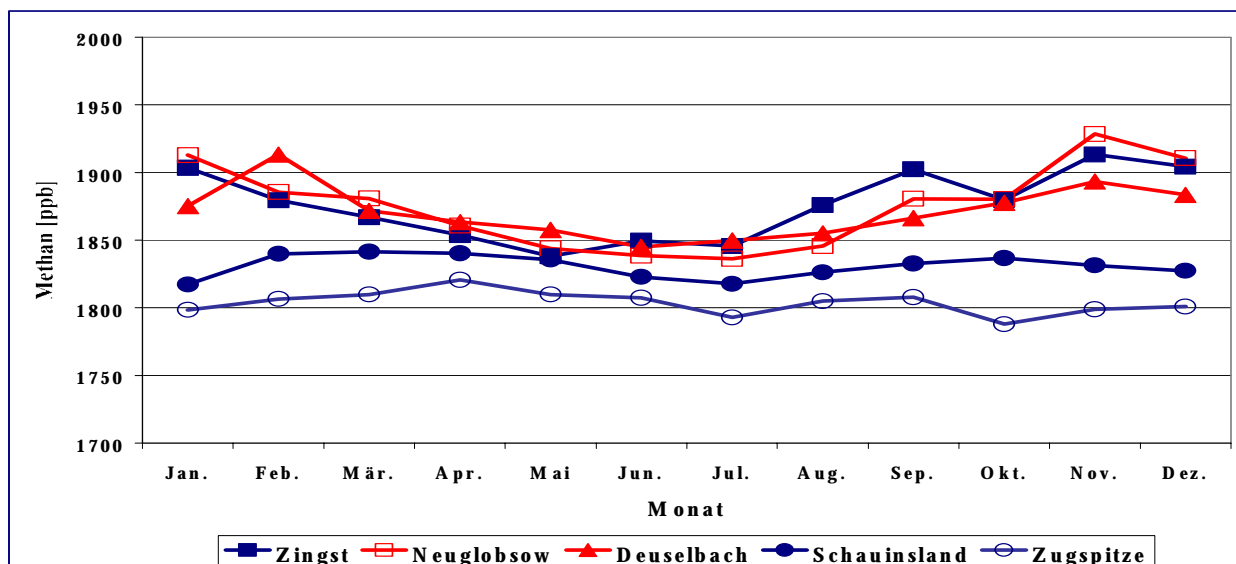
Methan trägt mit etwa 20% zum anthropogenen Treibhauseffekt bei. Sein Anteil ist leicht rückläufig. Im Gegensatz zum CO<sub>2</sub> stammt das atmosphärische CH<sub>4</sub> heute überwiegend aus anthropogenen Quellen. Die anthropogenen Methan-Emittenten wie z.B. Reisfelder, Viehwirtschaft, fossile Quellen und Mülldeponien tragen mit etwa 70% zu den globalen Emissionen bei (Ref. 7). Allerdings können die globalen Emissionsquellen nur sehr ungenau quantifiziert werden. Ende der 90er Jahre hat Deutschland etwa 1% zu den weltweit anthropogen emittierten Mengen beigetragen (Ref. 2, 7). Der deutsche Anteil wird in den kommenden Jahren weiter sinken.

Nach dem statistisch ermittelten Emissionskataster trugen in Deutschland 1998 hauptsächlich folgende Quellgruppen zur Methanemission bei: Landwirtschaft (Fermentation, tierische Abfälle) mit ca. 45%, Kohle-, und Gaswirtschaft mit ca. 30% sowie Abfallbehandlung (Mülldeponien, Abwasserbehandlung, Klärschlammverwertung) mit ca. 23% (Ref. 2). Die wirksamste globale Senke ist die Reaktion von CH<sub>4</sub> mit OH-Radikalen (ca. 90%). Dagegen spielt die Oxidation in Böden nur eine vergleichsweise geringe Rolle.

Nach Messungen an Lufteinschlüssen in Eisbohrkernen sind die atmosphärischen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen seit etwa 1700 von 0.7 ppm auf heute etwa 1.8 ppm angestiegen, hauptsächlich als Folge der Rinderhaltung, des Reisanbaus und des Energieverbrauchs, verursacht durch den weltweiten Bevölkerungsanstieg. Die Konzentrationen von Methan nehmen weiter zu; allerdings hat sich der globale Anstieg der Konzentration in den letzten Jahren abgeschwächt: auf 3 bis 4 ppb/Jahr in den Jahren 1996/1997 verglichen mit durchschnittlich etwa 10 ppb/Jahr in den späten 80er Jahren. Die Methan-Zunahme hat sich im Jahre 1998 wieder auf 10 ppb/Jahr erhöht (Ref. 3). Die schwächere Methanzunahme in den letzten Jahren gibt Hinweise auf eine Entkoppelung vom Bevölkerungswachstum. Die Ursachen hierfür sind noch nicht bekannt.

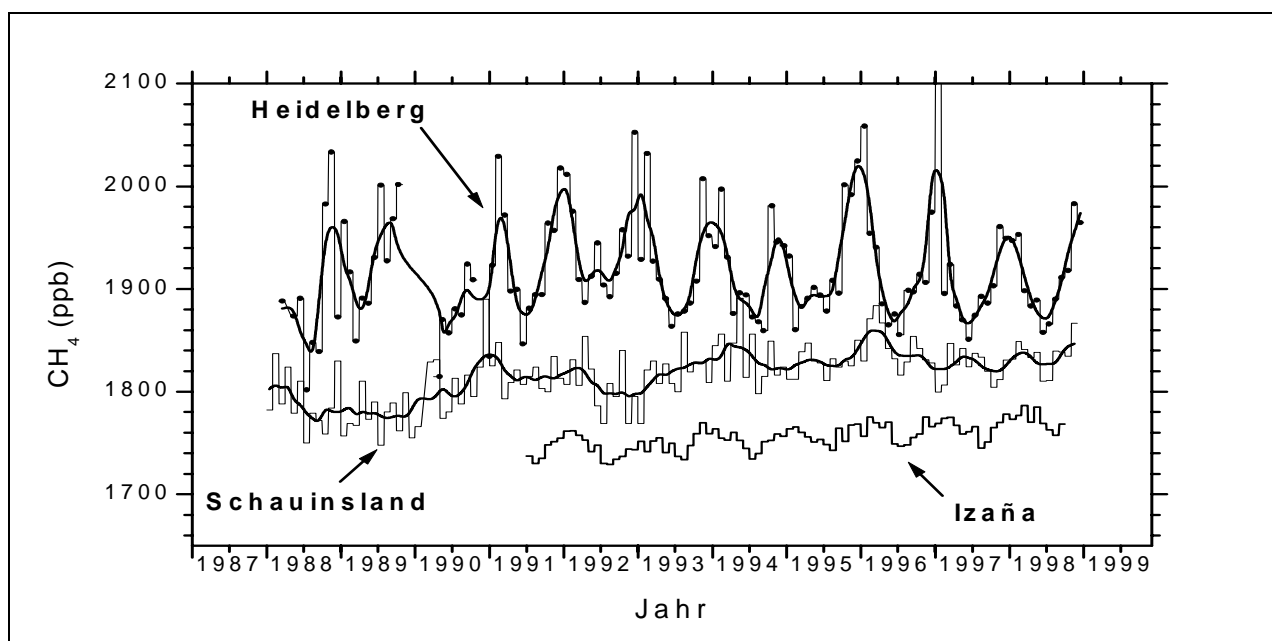
Methan wird kontinuierlich an 5 Stationen des UBA gemessen: Schauinsland (seit September 1991), Deuselbach (ab November 1993), Zingst (seit Februar 1994), Neuglobsow (seit August 1994), Schmücke (seit 1997) und Zugspitze (ab 1996).

Abbildung 9 zeigt mittlere Jahregänge für Methan an den Stationen Schauinsland (1992-1999), Neuglobsow (1995-1999), Deuselbach (1994-1999), Zingst (1994-1999) und Zugspitze (1995-1997). Der Jahresgang der Monatswerte unterliegt nur geringen Schwankungen. An den Flachlandstationen tritt ein schwaches Minimum im Sommer und das Maximum im Winter auf, während am Schauinsland kein signifikanter Jahresgang zu beobachten ist und der Jahresgang an der Zugspitze in etwa dem an maritimen Reinluftstationen entspricht. Der Grund für die etwas unterschiedlichen Jahregänge zwischen den Berg- und Flachlandstationen dürfte im Wesentlichen im Jahresgang der Mischungsschicht begründet sein. Dagegen dürften jahreszeitliche Schwankungen der globalen und regionalen CH<sub>4</sub>-Emissionen eine geringere Rolle spielen.



**Abbildung 9:** Mittlere Jahressgänge für Methan an den UBA-Stationen Schauinsland (1992-1999), Neuglobsow (1995-1999), Deuselbach (1994-1999), Zingst (1994-1999) und Zugspitze (1995-1997).

Die mittlere Anstiegsrate betrug am Schauinsland zwischen 1992 und 1999 5.6 ppb/Jahr (0.3%/Jahr). Diese Zunahme stimmt mit anderen Ergebnissen auf der Nordhalbkugel überein (z.B. 4.7 ppb/Jahr an der stark maritim beeinflussten Station Mace Head an der Westküste Irlands). Die kontinentale Überhöhung der  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen ist am Beispiel der Messstellen Heidelberg und Schauinsland im Vergleich zur stark maritim beeinflussten Station Izaña deutlich zu erkennen (siehe [Abbildung 10](#)).



**Abbildung 10:** Monatsmittelwerte der  $\text{CH}_4$ -Mischungsverhältnisse an den Messstellen Heidelberg, Schauinsland (kontinentaler Background) und Izaña (maritimer Background) von 1988 bis 1998. Die glatten Linien entsprechen einem gleitenden Mittel (Ref. 5, 13).

Da nahezu das gesamte  $\text{CH}_4$  über den Kontinenten emittiert wird (insgesamt etwa 98% und nur etwa 2% des globalen  $\text{CH}_4$  aus den Ozeanen, *Ref. 3*) und da außerdem der hemisphärische Austausch Zeit benötigt, liegen – ähnlich wie bei  $\text{CO}_2$  – auch die  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen an den kontinentalen Stationen immer mehr oder weniger deutlich über den maritimen Hintergrundkonzentrationen, trotz der recht langen atmosphärischen Lebensdauer des Methans von etwa 9 Jahren (*Ref. 3*). Im Gegensatz zum  $\text{CO}_2$  ist die kontinentale Überhöhung beim  $\text{CH}_4$  im Wesentlichen auf anthropogene Quellen zurückzuführen. Zwischen 1992 und 1998 betrug beispielsweise die mittlere Konzentrationsdifferenz zwischen Heidelberg und Izaña etwa 170 ppb und etwa 80 ppb zwischen Schauinsland und Izaña. Diese Überhöhung entspricht etwa 10% bzw. 5% der globalen nordhemisphärischen Hintergrundkonzentration, vgl. 3 bis 4% beim  $\text{CO}_2$ .

Ähnlich wie beim  $\text{CO}_2$  können auch beim  $\text{CH}_4$  Quelldichten aus atmosphärischen  $\text{CH}_4$ -Messungen in Verbindung mit der Radon-Tracer-Methode für verschiedene Quellgebiete ermittelt und mit den auf statistischen Erhebungen basierenden Emissionsabschätzungen verglichen werden.

Innerhalb der Unsicherheit der atmosphärischen Messungen waren die  $\text{CH}_4$ -Quelldichten für die Einzugsgebiete der 4 Stationen Schauinsland (Einzugsgebiet Baden-Württemberg), Heidelberg (Einzugsgebiet Oberrheingraben), Neuglobsow (Einzugsgebiet Brandenburg) und Zingst (Einzugsgebiet Mecklenburg-Vorpommern) mit  $0.23 \pm 0.07 \text{ g CH}_4/\text{km}^2\text{s}$  nahezu gleich. Dieses etwas überraschende Ergebnis ist möglicherweise auf einen stark dominierenden Beitrag aus der Quellgruppe „Landwirtschaft“ (Rinderhaltung) zu den Gesamtemissionen sowie auf eine relative homogene Emissionsdichte bei dieser Quellgruppe in allen 4 Einzugsgebieten zurückzuführen (*Ref. 5*).

Auf Grund atmosphärischer Messungen in Heidelberg in Verbindung mit  $\text{CH}_4$ -Isotopenmessungen konnte gezeigt werden, dass der statistische Ansatz, nach dem die  $\text{CH}_4$ -Emissionen aus Mülldeponien proportional zur Bevölkerungsdichte zunehmen, offensichtlich zu fehlerhaften Emissionswerten führt (*Ref. 11, 13*). Als ein weiteres Ergebnis der atmosphärischen Messungen konnte für das Einzugsgebiet des Schauinsland im Zeitraum zwischen 1991 und 1998 kein Trend der  $\text{CH}_4$ -Emissionen festgestellt werden.

### 3.1.2.3 Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ )

$\text{N}_2\text{O}$  trägt mit etwa 6% zum zusätzlichen globalen Treibhauseffekt bei. Eine Bilanzierung der  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen ist sowohl im globalen als auch im regionalen Maßstab nur mit erheblichen Unsicherheiten möglich.

$\text{N}_2\text{O}$  wird im Wesentlichen durch mikrobiologische Denitrifikation und Nitrifikation in Böden erzeugt. Etwa zwischen 50 und 70% der globalen Emissionen sind natürlichen Ursprungs (Ozeane und Böden), etwa 30 bis 50% sind anthropogen (Landwirtschaft, Verbrennung von Biomasse, Industrie, *Ref. 3*).

Von den globalen anthropogenen Emissionen entfallen ca. 1% auf  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen in Deutschland (*Ref. 2, 3*). Die wichtigsten Quellen in Deutschland (1998) sind die Land- und Abfallwirtschaft mit mehr als 50%, gefolgt von industriellen Prozessen (Produktion von Adipinsäure und Salpetersäure sowie direkte Produktion von  $\text{N}_2\text{O}$  hauptsächlich als Narkosemittel) mit knapp 20% sowie dem Verkehrsbereich (etwas über 10%) und den Kraft-

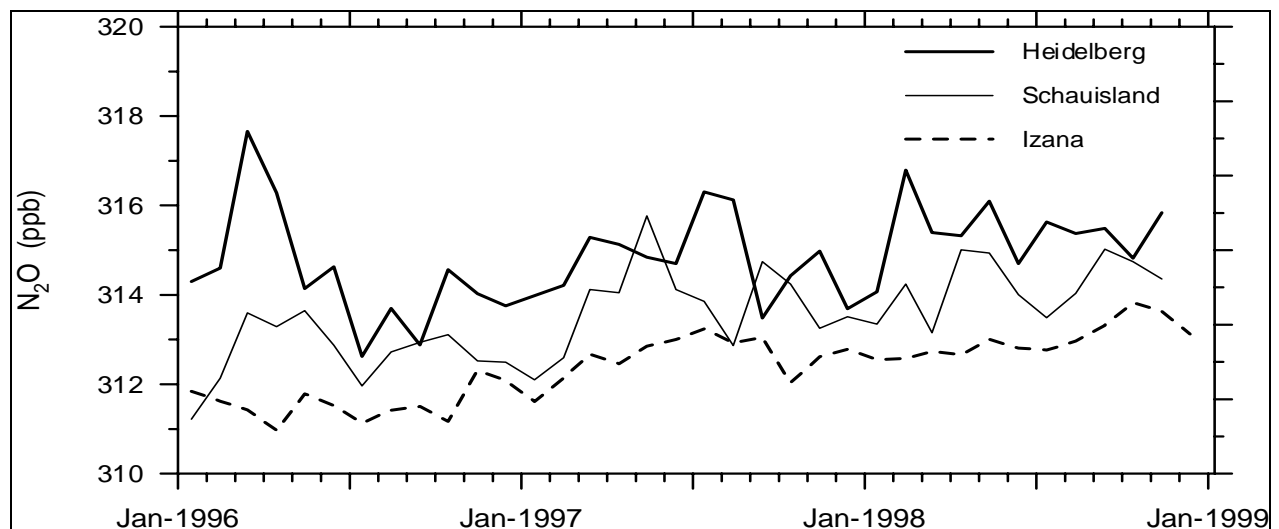
und Fernheizwerken (ca. 8%, *Ref. 2*).

Zwischen 1990 und 1998 wurden die  $N_2O$ -Emissionen in Deutschland um etwa 25% reduziert, vor allem durch die Absenkung der industriellen Emissionen in den Jahren nach 1996. Der Beitrag der industriellen  $N_2O$ -Emissionen in Deutschland hat sich beispielsweise zwischen 1997 und 1998 vor allem durch die drastische Reduktion der Emissionen aus der Adipinsäureproduktion bei der BASF (Ludwigshafen) in etwa halbiert (*Ref. 2, 5*).

Die einzige nennenswerte troposphärische Senke für  $N_2O$  ist der Fluss in die Stratosphäre, wo  $N_2O$  photolytisch zersetzt wird und mit O (1D) reagiert.

Im globalen Mittel haben die  $N_2O$ -Konzentrationen von etwa 270 ppb vor Beginn der Industrialisierung auf etwa 314 ppb im Jahre 1998 zugenommen (*Ref. 3*). Die durchschnittliche Zunahme zwischen 1980 und 1998 betrug 0.8 ppb/Jahr (0.25%/Jahr). Im Messnetz des UBA wird  $N_2O$  bisher nur am Schauinsland gemessen.

**Abbildung 11** zeigt den Verlauf der Monatsmittelwerte von Anfang 1996 bis Ende 1998 an den 3 unterschiedlich belasteten Stationen Heidelberg, Schauinsland (kontinental beeinflusst) und Izaña (stark maritim beeinflusst, *Ref. 5, 14, 15*).



**Abbildung 11: Monatsmittelwerte der  $N_2O$ -Mischungsverhältnisse an den Meßstellen Heidelberg, Schauinsland (kontinentaler Background) und Izaña (maritimer Background) von 1996 bis 1998 (*Ref. 5, 14, 15*).**

Die mittlere kontinentale Überhöhung der  $N_2O$ -Konzentrationen an den Stationen Schauinsland bzw. Heidelberg gegenüber Izaña ist mit  $(1.1 \pm 0.1)$  ppb bzw.  $(5.1 \pm 0.4)$  ppb (entspricht 0.4-1.6%) deutlich niedriger als beispielsweise für Methan (5-10%) und auch niedriger als für  $CO_2$  (3-4%). Ein Grund liegt möglicherweise neben der langen atmosphärischen Lebensdauer von ca. 120 Jahren auch darin, dass die Ozeane im Gegensatz zum Methan (nur etwa 2%) mit 15 bis 30% nicht unerheblich zu den globalen  $N_2O$ -Emissionen beitragen.

Die  $N_2O$ -Emissionen für die Einzugsgebiete von Schauinsland und Heidelberg wurden analog zu der für Methan (Kapitel 3.1.2.2) angewendeten Radon-Tracer-Methode für die Jahre 1996 bis 1998 berechnet. Die Monatsmittelwerte zeigten mit Werten zwischen 50 und 300  $\mu g N_2O-N/m^2h$  in Heidelberg und zwischen 90 und 1000  $\mu g N_2O-N/m^2h$  am Schauinsland eine

erhebliche Variabilität. Wegen der starken Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden sind die Monatswerte im Sommerhalbjahr höher als im Winter.

Als weiteres Ergebnis der atmosphärischen Messungen konnte der drastische Rückgang der N<sub>2</sub>O-Emissionen in Deutschland aus der Quellgruppe „Industrieprozesse“ (Ref. 1, 2), der im wesentlichen auf die starke Reduzierung der Emissionen aus der Adipinsäureproduktion aus einer Punktquelle im Einzugsbereich der südwestdeutschen Stationen zurückzuführen war, im Einzugsbereich von Heidelberg eindeutig nachgewiesen werden.

Ein Vergleich der atmosphärischen mit den statistischen Emissionsabschätzungen zeigte für das Einzugsgebiet des Schauinsland nach Eliminierung lokaler N<sub>2</sub>O-Quellen durch Datenselektion eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

### **3.1.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Die Einhaltung der von Deutschland im Rahmen der Klimarahmenkonvention und deren Nachfolgeprotokollen eingegangenen internationalen Verpflichtungen zur Verminderung der Emissionen von Klimagasen wird auf der Grundlage von Emissionsinventaren überprüft, die mittels statistischer Verfahren erstellt worden sind. Die Daten zu den Emissionen von CO<sub>2</sub> können dabei als gut gesichert, die von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O insbesondere aus der Landwirtschaft müssen dagegen als mit großer Unsicherheit behaftet betrachtet werden.

Vor diesem Hintergrund kommt einer alternativen Emissionsabschätzung aus atmosphärischen Messungen zur Verifizierung der statistischen Emissionskataster eine besondere Bedeutung zu. Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) hat bezüglich der Ermittlung von Emissionen von Treibhausgasen ein strenges Qualitätsmanagement gefordert. Hierzu gehört auch die Entwicklung und der Einsatz alternativer Methoden zu den statistischen Verfahren.

Die auf der Basis von Messungen der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O und ihrer Isotope unter Verwendung von <sup>222</sup>Rn als Transporttracer bestimmten Emissionsdichten von CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O und fossilem CO<sub>2</sub> stellen eine originelle Alternative zur statistischen Emissionsabschätzung dar. Die aus den atmosphärischen Messungen gewonnen Emissionsdaten stimmen z.T. recht gut mit den statistischen Emissionsabschätzungen überein, zum Teil ergaben sich aber auch erhebliche Diskrepanzen, deren Ursachen auf Fehlern bei den Abschätzungen (z.B. systematische Fehler bei den Anwendung der Radon-Tracer-Methode) und/oder auf fehlerhaften Abschätzungen bei den statistischen Emissionsabschätzungen beruhen können.

Der Abschlußbericht des Forschungsvorhabens der Universität Heidelberg mit dem Titel „Zeitliche Entwicklung des anthropogenen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Anteils in Deutschland und dessen Bedeutung für den globalen atmosphärischen Kohlenstoffkreislauf“ (UBA-Forschungsvorhaben Nr. 295 43 173) kann unter FB-Nr. 000050 bei der Bibliothek des Umweltbundesamtes, Bismarckplatz 1, 14191 Berlin, ausgeliehen werden.

### **Danksagung**

Für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Berichtes sei Frau Prof. Ingeborg Levin und Frau Dr. Martina Schmidt (Universität Heidelberg) sowie Herrn Dr. Rolf Sartorius (UBA Berlin) gedankt.

### 3.1.4 Literatur

- (1) UBA (1999a)  
*Entwicklung der Emissionen von direkten und indirekten Treibhausgasen sowie SO<sub>2</sub> seit 1990 in Deutschland. Stand: April 1999*
- (2) UBA (1999b)  
*Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland 1990 bis 1998, Stand: Dezember 1999.*
- (3) IPCC WG1 Third Assessment Report (2000)  
*Chapter 4*
- (4) Levin, I. (1991)  
*Abschlussbericht zum UBA-Forschungsvorhaben: Der Beitrag der fossilen Energieträger zum CO<sub>2</sub>-Haushalt über dem europäischen Kontinent. Förderung durch das UBA: FE 104 02 627.*
- (5) Schmidt, M.; Cuntz, M.; Kromer, B. und Levin, I. (1999)  
*Abschlussbericht zum UBA-Forschungsvorhaben: Zeitliche Entwicklung des anthropogenen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Anteils in Deutschland und dessen Bedeutung für den globalen atmosphärischen Kohlenstoffkreislauf. UBA-Forschungsvorhaben 295 43 173.*
- (6) Bericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages,  
*Schutz der Erdatmosphäre, 5/88 (1988)*
- (7) ICPP (1996)  
*Climate Change 1995. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996.*
- (8) UBA-Jahresbericht 1997
- (9) Levin, I. (1984)  
*Atmosphärisches CO<sub>2</sub>, Quellen und Senken auf dem europäischen Kontinent. Dissertation Universität Heidelberg, 1984.*
- (10) WMO (1998)  
*Report 44: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998*
- (11) Glatzel-Mattheier, H. (1996)  
*Bilanzierung von CH<sub>4</sub>-Emissionen in Deutschland anhand atmosphärischer Messungen in Heidelberg, Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.*
- (12) Flessa et al. (1995)  
*Seasonal variation of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes in differently managed arable soils in Southern Germany, Journal of Geoph. Research 100 (D11), 23, pp.115-123, 1995.*

(13) *Levin et al., 1999*

*Levin, I., Glatzel-Matheier, H., Marik, T., Cuntz, M., Schmidt, M. und Worthy, D.E., Verification of German methane emission inventories and their recent changes based on atmospheric observations, Journal of Geophysical Research, 104 (D3), 3, 447-3, 456, 1999.*

(14) *Schmidt et al., 2000*

*Schmidt, M., Glatzel-Mattheier, H., Sartorius, H., Worthy, D.E., und Levin, I., Western European N<sub>2</sub>O Emissions – a Top Down Approach Based on Atmospheric Observations, submitted to Journal of Geophysical Research.*

(15) *Schmidt, 1999*

*Schmidt, M., Messung und Bilanzierung anthropogener Treibhausgase in Deutschland, Dissertation, Ruprecht-Karls Universität Heidelberg, Heidelberg, 1999*

(16) *BMU-Umwelt, Nr. 11/2000*