Texte
69
02
ISSN
0722-186X

# Jahresbericht 2001 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: http://www.umweltbundesamt.de

Redaktion: Fachgebiet II 6.6
Siegfried Beilke
Karin Uhse

Berlin, Dezember 2002

# UBA-MESSNETZ - JAHRESBERICHT 2001

## Inhaltsverzeichnis

VORWORT ..... 5

KURZFASSUNG ..... 7

ABSTRACT ..... 9

1. DAS MESSNETZ DES UMWELTBUNDESAMTES ..... 10

1.1 Lage der Messstellen ..... 10
1.2 Messprogramm ..... 13
1.3 Aufgaben des Messnetzes ..... 17
1.4 Literatur zu Kapitel 1 ..... 20

2. ERGEBNISSE DER IMMISSIONS-MESSUNGEN 2001 UND VERGLEICH MIT FRÜHEREN WERTEN ..... 21

2.1 Gas- und partikelförmige Luftverunreinigungen ..... 21
2.1.1 Schwefeldioxid ($SO_2$) ..... 21
2.1.2 Stickoxide ($NO_x$) ..... 31
2.1.3 Ozon ($O_3$) ..... 43
2.1.4 Flüchtige Organische Substanzen (VOC) ..... 57
2.1.5 Kohlendioxid ($CO_2$) ..... 69
2.1.6 Methan ($CH_4$) ..... 74
2.1.7 Distickstoffdioxid ($N_2O$) ..... 76
2.1.8 Partikelförmige Luftverunreinigungen ..... 77
2.2 Ionen im Niederschlag ..... 85
2.2.1 Konzentrationen der Ionen im Niederschlag – Daily-bulk ..... 85
2.2.2 Depositionen von Ionen mit dem Niederschlag – Daily-bulk ..... 94
2.2.3 Weekly wet-only-Messungen ..... 100
2.3 Meteorologischer Überblick 2001 ..... 106
2.4 Literatur zu Kapitel 2 ..... 110

3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME ..... 111

3.1 Messungen von Feinstaub im Messnetz des Umweltbundesamtes.. 111
3.1.1 Einleitung ..... 111
3.1.2 Messungen von Feinstaub im Messnetz des UBA ..... 114
3.1.3 Herkunft des Feinstaubes ..... 132
3.1.4 Literatur ..... 133
3.2 Die Ozon-Episoden in Deutschland im Juli und August 2001 ..... 135
3.2.1 Einleitung ..... 135
3.2.2 Analyse der Ozonepisoden im Juli und August 2001 ..... 139
3.2.3 Zukünftige Entwicklung der Ozonbelastung in Deutschland .... 150
3.2.4 Literatur zu Kapitel 3.2 ..... 151
3.3 Einführung von Filterpack-Messungen im UBA-Messnetz ..... 153
3.3.1 Einleitung ..... 153
3.3.2 Probenahme ..... 155
3.3.3 Vorversuche mit NILU-Vergleichsmessungen ..... 156
3.3.4 Vergleiche der $SO_2$-Messergebnisse für 2001 ..... 159
3.3.5 Erste Messergebnisse für 2000 bis 2001 ..... 162
3.3.6 Literatur zu Kapitel 3.3 ..... 168

4 ZUSAMMENFASSUNG ..... 169

4.1 Gas- und partikelförmige Luftverunreinigungen ..... 169
4.2 Ionen im Niederschlag ..... 171
4.3 Spezielle Umweltprobleme (Kapitel 3) ..... 171
4.3.1 Messungen von Feinstaub im Messnetz des UBA ..... 171
4.3.2 Die Ozonepisoden in Deutschland im Juli und August 2001 ..... 173
4.3.3 Einführung von Filterpack-Messungen im UBA-Messnetz ..... 174

5 EXECUTIVE SUMMARY ..... 175

5.1 Gaseous pollutants and particulate matter ..... 175
5.2 Ions in precipitation ..... 176
5.3 Specific environmental topics ..... 177
5.3.1. Measurements of fine particul. matter in the FEA network ..... 177
5.3.2 Ozone episodes in Germany during July and August 2001 ..... 178
5.3.3 Installation of filterpack method in the FEA network ..... 179

# VORWORT

Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft *(Ref. 1)* Mitte der 60er Jahre gegründete und im Jahre 1974 vom Umweltbundesamt übernommene Messnetz zur Überwachung der großräumigen Luftqualität in der zentral-europäischen Atmosphäre hat seit mehr als 30 Jahren über die Ergebnisse seiner Messungen berichtet: zuerst in Form von unregelmäßig erscheinenden Forschungsberichten und ab 1974 in Form von Monatsberichten. Die "Monatsberichte aus dem Messnetz" erschienen bis Ende 1998 im Abstand von 2 Monaten mit einer Auflage von 500 Stück.

Um die Öffentlichkeitswirksamkeit der Arbeit im Messnetz qualitativ zu verbessern und gleichzeitig die Kosten zu senken, wurde ein neues Konzept für die Berichterstattung entwickelt: Die bisher in den Monatsberichten in gedruckter Form veröffentlichten Daten erscheinen seit Juni 1999 im Internet zusammen mit Informationen über das Messnetz unter folgender Internet-Adresse:

**http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/mbm/**

Dies ermöglicht den Interessenten einen schnelleren Zugriff auf die Messnetzdaten. Der Druck und damit der Versand der Monatsberichte wurde eingestellt. Gleichzeitig wurde erstmals für das Jahr 1998 ein Jahresbericht des Messnetzes herausgegeben. Die Berichterstattung wird nach der bisherigen Veröffentlichung der Berichte zu den Messwerten der Jahre 1998 bis 2000 mit dem hier vorgelegten Bericht zum Jahr 2001 fortgeführt. **Die deutsche und die englische Zusammenfassung (Kapitel 4.1 und 4.2) sowie die Berichte aus Kapitel 3 sind unter o.g. Internet-Adresse verfügbar. Dies gilt auch für die Berichte der Jahre 1998 bis 2000 sowie die deutsche Fassung der Messnetzbroschüre „Luft kennt keine Grenzen“.**

Zusätzlich werden ab dem Sommer 2000 die $SO_2$-, $NO_2$-, Ozon- und $PM_{10}$-Werte der Messnetze der deutschen Länder und des Umweltbundesamtes zusammen aktuell im Internet als Karten und Tabellen zur schnellen Information der Bevölkerung dargestellt. Die Internet-Adresse dieser Online-Darstellung, die alle 3 Stunden aktualisiert wird, lautet:

**http://www.umweltbundesamt.net/immission/admin/Test/**

**Der hier vorliegende Jahresbericht gliedert sich im Wesentlichen in drei Teile:**

- Im ersten Kapitel wird das Messnetz des Umweltbundesamtes mit seinen Stationen, Aufgaben und Messprogrammen vorgestellt. Dieser Abschnitt wurde in wesentlichen Teilen aus der Messnetz-Broschüre "Luft kennt keine Grenzen" *(Ref. 2)* übernommen. Dieser Teil ist - jeweils auf den neuesten Stand gebracht - in allen folgenden Jahresberichten enthalten, um dem Leser das mühsame Suchen der zum Verständnis der folgenden Kapitel notwendigen Informationen in früheren Berichten zu ersparen.

- Im zweiten Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen aus dem Jahre 2001 zusammenfassend dargestellt, bewertet und mit den Messungen aus früheren Jahren verglichen. Die Messergebnisse aus dem Jahre 2001 werden größtenteils in Form von

Monatswerten tabellarisch dargestellt. Der Vergleich mit früheren Jahren erfolgt in Form von Jahreswerten. Für Leser, die an einer höheren zeitlichen Auflösung der Daten interessiert sind, besteht die Möglichkeit, die entsprechenden Daten direkt in der Datenzentrale Langen anzufordern:

Adresse:
Umweltbundesamt
FG II 6.6 - Messnetzdatenzentrale
Karin Uhse
Paul-Ehrlich-Straße 29
D-63225 Langen
Tel.: ++49/6103/704-104
Fax.: ++49/6103/704-184
email: karin.uhse@uba.de

- Das dritte Kapitel enthält Übersichtsartikel zu speziellen Umweltproblemen, die in einem größeren zeitlichen und räumlichen Kontext unter besonderer Berücksichtigung der Beiträge aus dem Messnetz dargestellt werden. Der vorliegende Bericht greift das Thema Ozon und Feinstaub unter verschiedenen Gesichtspunkten auf.

Über die gleichfalls vom Messnetz an 3 Stationen (Zingst, Schauinsland und Langen) gemeinsam mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) durchgeführten UV-Messungen wird in einem gesonderten Jahresbericht ausführlich berichtet. Er ist unter nachfolgender Adresse im Internet aufrufbar:

**http://www.bfs.de/uvi/index.htm**

# KURZFASSUNG

Im vorliegenden Jahresbericht werden die Ergebnisse aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes für das Jahr 2001 präsentiert, interpretiert und mit den Messungen aus früheren Jahren verglichen. Das UBA-Messnetz besteht heute aus insgesamt 23 Stationen in ländlichen Regionen, wovon 9 Messstellen personell besetzt und 14 automatisch arbeitende Containerstationen sind. Die Messdaten sind in sich homogen und wurden einer eingehenden Qualitätskontrolle unterzogen.

Die Maßnahmen zur Reduzierung der Luftverunreinigungen haben während der letzten Jahrzehnte bei einer Reihe von Luftschadstoffen zu einem bemerkenswerten Rückgang der Konzentrationen geführt und somit - insbesondere nach 1990 - zu einer erheblichen Verbesserung der Luftqualität.

So wurden beispielsweise im Jahre 2001 die niedrigsten $SO_2$- und Schwebstaub(Feinstaub)-Massenkonzentrationen im Messnetz des Umweltbundesamtes seit Beginn der Messungen Ende der 60er und Anfang der 70er Jahre gemessen. Erfreulich ist auch der deutliche Anstieg der pH-Werte im Regen während der letzten 2 Jahrzehnte von 4.2 bis 4.3 im Jahre 1982 auf 4.7 bis 5.0 im Jahre 2001, d.h. der Regen ist heute erheblich weniger sauer als vor 20 Jahren.

Eine weitere erfreuliche Entwicklung ist der Rückgang der Ozonspitzenwerte während der letzten 12 Jahre , der im Wesentlichen auf die Reduzierung der Ozonvorläufer (NOx, VOC) in Deutschland und in einigen deutschen Nachbarstaaten zurückzuführen ist. Im Gegensatz zu den Ozon-Spitzenwerten haben die mittleren Ozonkonzentrationen im gleichen Zeitraum zugenommen. Diese Zunahme ist auf die Reduzierung der Stickoxide (Titrationseffekt) in Deutschland sowie sehr wahrscheinlich auf den zunehmenden Beitrag aus dem nord-hemisphärischen Hintergrund-Ozon zurückzuführen. Eine ähnliche Entwicklung, nämlich ein Rückgang der Ozon-Spitzenwerte und eine Zunahme der Mittelwerte, wurde auch in Österreich, der Schweiz sowie in Großbritannien beobachtet.

Die Maßnahmen zur Reduzierung der Luftverunreinigungen haben nicht bei allen Luftschadstoffen zu einem entsprechenden Rückgang der Konzentrationen geführt. Für eine Reihe von Stoffen haben die Konzentrationen weiter zugenommen (z.B. $CO_2$ um ca. 0.4 %/Jahr; $CH_4$ und $N_2O$ um ca. 0.2%/Jahr), für andere Schadstoffe haben sie nicht in dem Maße abgenommen, wie dies aufgrund der erheblichen Emissionsreduzierungen in Deutschland zu erwarten gewesen wäre (z.B. NOx, Feinstaub). Die Ursache für den Anstieg oder den vergleichsweise geringeren Rückgang der Konzentrationen dürfte im Wesentlichen in den unterschiedlichen Beiträgen des Ferntransports zu den in Deutschland gemessenen Schadstoffkonzentrationen liegen. Während der Ferntransport bei $CO_2$, $CH_4$ und $N_2O$ auch wegen der langen atmosphärischen Verweilzeit vor allem aus außereuropäischen Quellen der Nord- und Südhalbkugel zu den Konzentrationen dieser Treibhausgase in Deutschland beiträgt, sind für den gegenüber dem erheblichen Rückgang der Emissionen von $NO_x$ und Feinstaub vergleichsweise geringeren Rückgang der Konzentrationen dieser Stoffe in Deutschland vor allem die hohen Beiträge des Ferntransportes aus einigen deutschen Nachbarstaaten verantwortlich. Beim $NO_x$ könnte die Nichtberücksichtigung der NO-Emissionen aus Böden in den Emissionsinventaren des UBA ein möglicher weiterer Grund für die vergleichsweise langsame Abnahme der $NO_x$-Konzentrationen sein.

Der Ferntransport muss in den kommenden Jahren in zunehmendem Maße bei der nationalen und internationalen Umweltgesetzgebung berücksichtigt werden, da bereits heute einige der sehr niedrigen Zielwerte für den Schutz von menschlicher Gesundheit und Vegetation ohne eine Verminderung der Beiträge des Ferntransportes nur schwer einzuhalten sind (z.B. AOT40-Wert beim Ozon). Vor diesem Hintergrund bleibt die Überwachung der großräumigen Verteilungen einer Reihe von Luftschadstoffen eine bedeutende Aufgabe für das UBA-Messnetz.

# ABSTRACT

In this annual report the results of the air pollution monitoring network of the Federal Environmental Agency (FEA) are presented for the year 2001. The results for 2001 are evaluated and compared with previous measurements which started in the late 1960s. In 2001 the network consisted of 23 stations which are situated in rural areas. As the data set was thoroughly quality controlled reliable statements about long-term trends of air pollutants can be made.

Due to the stringent emission reductions in Germany and in some other European countries air quality in Germany has considerably improved over the last two decades especially in the years after 1990. As examples, lowest concentrations of $SO_2$ and fine particle mass have been observed in 2001 since the beginning of measurements in the late 1960s. Other examples are the increase of rainwater pH from 4.2 to 4.3 in 1982 to 4.7 to 5.0 in 2001 (i.e. today rain is much less acidic than 20 years ago) and the decline of ozone peak values over the last 12 years. The decline of ozone peak values was due to emission reductions of $NO_x$ and VOC in Germany and in some neighbouring countries.

In contrast to peak values ozone mean concentrations have increased over the same time period. The increase of ozone mean values is most likely a result of NOx emission reductions ($NO_x$ is emitted as NO) in combination with an increasing contribution of the northern hemispheric ozone background to the European ozone level.

On the other hand concentrations of a series of air pollutants have continued to rise (for example $CO_2$ by ca. 0.4%/year; $CH_4$ and $N_2O$ by ca. 0.2 %/year) in spite of considerable emission reductions of these greenhouse gases in Germany between 1990 and 2001. For other air pollutants concentrations have not decreased to the extent they should have in light of the considerable emission reductions in Germany (for example $NO_x$, fine particle mass).
The reason for the rising ($CO_2$, $CH_4$, $N_2O$) or relatively slowly decreasing ($NO_x$, fine particle mass) concentrations is the different extent to which medium and long-range transport of air pollutants contribute to the pollutant levels observed in Germany. The concentration level of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in Germany is largely determined by non-European sources in the northern and southern hemisphere whereas the concentration levels of $NO_x$ and fine particle mass are strongly influenced by medium range transport from some European countries.

Taking into account the considerable emission reductions in Germany in the past and the predicted reductions in the future the contribution of medium and long range transport to the pollutant concentrations in this country becomes more and more important including the intercontinental transport of air pollutants (for example $CO_2$, $CH_4$, $N_2O$, $O_3$). There is well documented evidence that intercontinental transport of ozone is important with respect to accumulated pollutant exposure ( for example AOT40 for the protection of vegetation). As objectives and air quality standards in the states of the European Union are made more stringent, the contribution of intercontinental transport to exceedances of those objectives will increase.

Against this background pollutant measurements in the large scale including their long-term trends remain an important task for the FEA monitoring network.

# 1. DAS MESSNETZ DES UMWELT-BUNDESAMTES

## 1.1 Lage der Messstellen

Das Luftmessnetz des Umweltbundesamtes besteht seit über 30 Jahren. Es wurde Mitte der 60er Jahre von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gegründet und 1974 vom Umweltbundesamt übernommen. Nähere Informationen über die Entwicklung des Messnetzes sind in den Referenzen 1 und 2 enthalten. Das Ziel für die Errichtung des Messnetzes war, die Zusammensetzung von "Normalluft" kennen zu lernen, die als Bezug für biologische und medizinische Wirkungsuntersuchungen in Gebieten mit erhöhten Verunreinigungen der Luft dienen sollte. Unter "Normalluft" wollte man dabei die über einen größeren Raum und eine längere Zeit repräsentative Luftzusammensetzung verstehen. Die Messstellen des UBA-Messnetzes liegen deshalb in ländlichen Gebieten außerhalb von Städten und Ballungsgebieten. Seit seiner Gründung hat sich das Messnetz durch entsprechende Umstrukturierungen kontinuierlich neuen und gestiegenen Anforderungen angepasst. Nach der Wiedervereinigung wurde das Messnetz durch die Eingliederung von Stationen in den neuen Ländern beträchtlich erweitert.

**Das Luftmessnetz besteht heute aus neun Messstellen, an denen Mitarbeiter des Umweltbundesamtes beschäftigt sind:**

| | |
|---|---|
| WESTERLAND | ZINGST |
| WALDHOF | NEUGLOBSOW |
| DEUSELBACH | SCHMÜCKE |
| SCHAUINSLAND | BROTJACKLRIEGEL |
| | ZUGSPITZE |

Zusätzlich sind 14 automatisch arbeitende Containerstationen eingerichtet. Die geographische Lage der im Jahre 2001 betriebenen personell besetzten Messstellen und der Containerstationen ist in Abbildung 1 dargestellt. Tabelle 1 enthält die geographischen Koordinaten der 35 UBA-Messstationen, deren Höhen über NN sowie Beginn und Ende der Messtätigkeit. Diese große Anzahl der Stationen ergibt sich daraus, dass 1998/1999 einige Container versetzt und an einigen Standorten die Messungen komplett eingestellt wurden. Dies ist auch bei allen nachfolgenden Tabellen zu beachten.

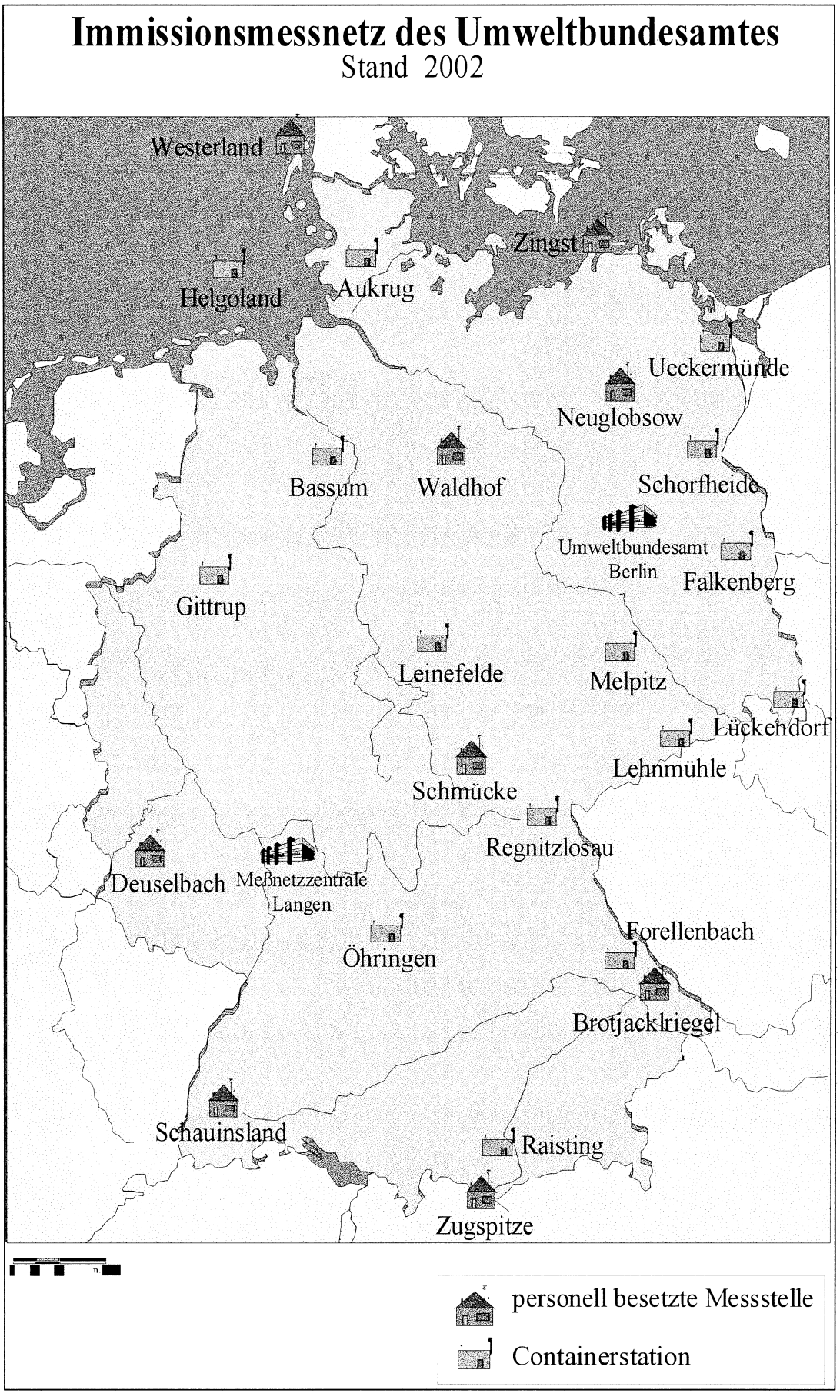



Abbildung 1: Das Messnetz des Umweltbundesamtes

Tabelle 1: Geographische Lage der Messstellen

| Stationsname | Stations-Kennung | geographische Koordinaten | | Höhe ü NN in m | Messbeginn | Messende |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Nord | Ost | | | |
| **Angermünde** | AN | 53°01'54" | 13°59'37" | 56 | Jul 91 | Apr 99 |
| **Ansbach** | AS | 49°14'54" | 10°35'07" | 481 | 1976 | Mrz 01 |
| **Aukrug** | AU | 54°04'29" | 09°47'34" | 15 | Jul 98 | |
| **Bassum** | BA | 52°51'08" | 08°42'05" | 52 | 1976 | |
| **Brotjacklriegel** | BR | 48°49'05" | 13°13'11" | 1016 | 1968 | |
| **Deuselbach** | DE | 49°45'47" | 07°03'18" | 480 | 1967 | |
| **Doberlug-Kirchhain** | DL | 51°38'49" | 13°34'31" | 97 | Mär 91 | Okt 98 |
| **Falkenberg** | FA | 52°10'01“ | 14°07'27“ | 73 | Okt 98 | |
| **Forellenbach *** | FB | 48°56'55“ | 13°25'20” | 858 | Jan 00 | |
| **Gittrup** | GI | 52°02'38" | 07°40'23" | 43 | Sep 87 | |
| **Herleshausen** | HE | 51°02'19" | 10°09'13" | 380 | Jun 89 | Jan 99 |
| **Helgoland** | HG | 54°11'18" | 07°52'38" | 50 | Aug 93 | |
| **Hohenwestedt** | HW | 54°06'58" | 09°42'44" | 75 | 1976 | Jun 98 |
| **Kyritz** | KY | 52°56'19" | 12°24'41" | 40 | Mär 91 | Jul 98 |
| **Leinefelde** | LF | 51°23'39" | 10°18'49" | 356 | Dez 91 | |
| **Lindenberg** | LI | 52°12'44" | 14°07'15" | 98 | Mär 91 | Okt 98 |
| **Lehnmühle** | LM | 50°49'55"' | 13°35'18" | 527 | Nov 93 | |
| **Lückendorf** | LU | 50°49'44" | 14°47'17" | 490 | Nov 91 | |
| **Meinerzhagen** | ME | 51°05'56" | 07°40'04" | 510 | 1976 | Aug 98 |
| **Melpitz** | MP | 51°31'32" | 12°55'39" | 86 | Nov 93 | |
| **Murnauer Moos** | MU | 47°39'05" | 11°12'12" | 622 | Feb 95 | Mai 99 |
| **Neuglobsow** | NG | 53°08'34" | 13°02'00" | 65 | Nov 91 | |
| **Öhringen** | OE | 49°14'32" | 09°26'50" | 283 | Apr 01 | |
| **Raisting** | RS | 47°53'59" | 11°06'45" | 552 | Jun 01 | |
| **Regnitzlosau** | RE | 50°18'28" | 12°03'49" | 595 | Sep 87 | |
| **Rottenburg** | RT | 48°27'21" | 08°57'29" | 427 | 1976 | Dez 98 |
| **Schauinsland** | SC | 47°54'51" | 07°54'32" | 1205 | 1968 | |
| **Schmücke** | SM | 50°39'19" | 10°46'15" | 937 | Jun 91 | |
| **Schorfheide** | SH | 52°58'24“ | 13°38'48“ | 70 | Apr 99 | |
| **Schwerin** | SW | 53°38'21" | 11°23'43" | 59 | Sep 90 | Jun 98 |
| **Schleiz** | SZ | 50°34'11" | 11°48'22" | 501 | Sep 90 | Dez 98 |
| **Teterow** | TE | 53°45'50" | 12°37'05" | 46 | Jul 91 | Sep 98 |
| **Ueckermünde** | UE | 53°45'03" | 14°04'24" | 1 | Jul 91 | |
| **Waldhof** | WA | 52°48'08" | 10°45'29" | 74 | 1970 | |
| **Westerland** | WE | 54°55'36 | 08°18'33" | 12 | 1968 | |
| **Wiesenburg** | WI | 52°07'21" | 12°27'41" | 107 | Sep 90 | Mär 99 |
| **Zingst** | ZG | 54°26'19" | 12°43'25" | 1 | Sep 91 | |
| **Zugspitze** | ZU | 47°24'54" | 10°58'55" | 2963 | Jan 94 | |

* Messstelle im Rahmen des Integrated Monitoring Programms (Qualitätssicherung durch das Messnetz)

## 1.2 Messprogramm

Das derzeitige Messprogramm ist in der Tabelle 2 übersichtlich zusammengestellt (Stand: Januar 2001). In den Tabellen sind nur die Messverfahren mit der höchsten zeitlichen Auflösung angegeben. Die Messverfahren sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Alle in $\mu g/m^3$ angegebenen Messwerte sind auf 20°C und 1013 hPa bezogen. Die im Messnetz des UBA gewonnenen Datensätze sind in Bezug auf Probenahme und Analyse konsistent und homogen. Sie werden eingehenden Qualitätskontrollen unterzogen, so dass belastbare Trendaussagen möglich sind.

Die Betriebszentrale für das Messnetz des Umweltbundesamtes zog im Juli 1998 von Offenbach nach Langen, das sich ca. 30 km südlich von Frankfurt/Main befindet. Hier sind zusammen mit anderen Fachgebieten u.a. die Zentrallabors, die Betriebszentrale und die Messnetzdatenzentrale untergebracht. Die Messnetzleitung befindet sich im Umweltbundesamt in Berlin. In den Zentrallabors werden mit hochempfindlichen Geräten die Schwermetallgehalte des Niederschlages und des Schwebstaubs einschließlich Quecksilber analysiert. Dazu ist ein erheblicher Aufwand bei der Probenahme, dem Probenaufschluss und der Analyse nach verschiedensten Methoden wie z.B. Gaschromatographie, Atomabsorptionsspektroskopie oder Plasma-Massenspektrometrie (ICP/MS) notwendig. Die Niederschlagsproben und die Staubfilter für die Analysen werden an den personell besetzten Messstellen gesammelt und im Zentrallabor in Langen analysiert. Die Analyse der Ionen im Niederschlag (daily bulk) erfolgt für das gesamte Messnetz im Zentrallabor in Langen, die Analyse der imprägnierten Filter im Zentrallabor auf dem Schauinsland und die Analyse der VOC auf der Schmücke.

Eine Reihe von Messaufgaben muss aus Kapazitätsgründen vergeben werden. Dies betrifft die Analyse von Carbonyl- und POP-Proben im Labor für Wasseranalytik des UBA, den Betrieb und die Analytik des wet-only-Messnetzes sowie einen Teil der Containerwartung.

In der Messnetzdatenzentrale laufen alle Werte aus dem Messnetz zusammen. Stündlich werden die Messwerte der kontinuierlich registrierenden Analysatoren von 8 der 9 Messstellen (außer der GAW-Station Zugspitze) und 14 Containern via ISDN abgerufen und die Ozon- und Meteorologie-Werte in das Sommer-Smog-Informations-System zur UMEG nach Karlsruhe weitergeleitet. Die Ergebnisse der $SO_2$-, NO-, $NO_2$- und Staubmessungen werden zusammen mit den Werten aus den deutschen Ländern nach Berlin weitergeleitet und dort von dem Fachgebiet II 6.2 alle 3 Stunden aktualisiert im Internet in Form von Karten und tabellarisch dargestellt. Wöchentlich werden Messgeräte-Funktionskontrollen durchgeführt und Störungen an die Wartungsteams weitergeleitet. Monatlich werden die Messwerte auf ihre Plausibilität überprüft und gegebenenfalls korrigiert und danach in die Datenbank eingespeist. Dort stehen sie in verschiedenen Aggregierungsformen für Datenanfragen, Auswertungen, Berichte und für den nationalen und internationalen Datenaustausch zur Verfügung.

In Fragen der Qualitätssicherung besteht eine enge Zusammenarbeit mit der Pilotstation (Fachgebiet II 6.5) des UBA in Langen. Von diesem Fachgebiet werden auch die Aufgaben im Zusammenhang mit Integrated Monitoring betreut.

Tabelle 2: Messprogramm des Messnetzes des Umweltbundesamtes

| Messstelle | Bestimmungen von Gasen | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SO_2$ | NOx | $O_3$ | $CO_2$ | $CH_4$ | $SF_6/N_2O$ | PAN | Hg | KW/FCKW | VOC | Carbonyle |
| Aukrug | R | R | R | | | | | | | | |
| Bassum | R | R | R | | | | | | | | |
| Brotjacklriegel | R | R | R | R | | | | | | 3T | 2T |
| Deuselbach | R | R | R | R | R | | | | T | | |
| Falkenberg | R | R | R | | | | | | | | |
| Forellenbach | R | R | R | | | | | | | | |
| Gittrup | R | R | R | | | | | | | | |
| Helgoland | R | R | R | | | | | | | | |
| Langen | | | | | | | | | | | |
| Lehnmühle | R | R | R | | | | | | | | |
| Leinefelde | R | R | R | | | | | | | | |
| Lückendorf | R | R | R | | | | | | | | |
| Melpitz | R | R | R | | | | | | | | |
| Neuglobsow | R | R | R | R | R | | | | | | |
| Öhringen | R | R | R | | | | | | | | |
| Raisting | R | R | R | | | | | | | | |
| Regnitzlosau | R | R | R | | | | | | | | |
| Schauinsland | R | R | R | R | R | R | R | | T | | |
| Schmücke | R | R | R | R | R | | | | | 3T | 2T |
| Schorfheide | R | R | R | | | | | | | | |
| Ueckermünde | R | R | R | | | | | | | | |
| Waldhof | R | R | R | R | | | R | R | | 3T | 2T |
| Westerland | R | R | R | R | | | | | | | |
| Zingst | R | R | R | R | R | | R | R | | 3T | 2T |
| Zugspitze | R | R | R | R | R | R | R | | T | 3T | 2T |

| Messstelle | Bestimmungen im Schwebstaub | | | | | Meteoro-logie | Bestimmungen im Niederschlag | | | | Strahlung | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $PM_{10}$ | $PM_{2.5}$ | $SO_4$ | $\Sigma$ N | SM | | Menge | pH/LF | Ionen | SM | UV | G |
| Aukrug | R | | | | | R | | | | | | |
| Bassum | R | | | | | R | | | | | | |
| Brotjacklriegel | R | | | | M | R | W | W | W | W | | |
| Deuselbach | R | T | T | T | M | R | T | T | T | W | | |
| Falkenberg | R | | | | | R | W | W | W | | | |
| Forellenbach | | | | | | R | W | W | W | | | R |
| Gittrup | R | | | | | R | | | | | | |
| Helgoland | T | | | | | R | W | W | W | | | |
| Langen | | | | | | | | | | | R | |
| Lehnmühle | R | | | | | R | W | W | W | | | |
| Leinefelde | R | | | | | R | | | | | | |
| Lückend. | R | | | | | R | | | | | | |
| Melpitz | R | | | | | R | W | W | W | | | |
| Neuglobsow | R | | T | T | M | R | W | W | W | W | | |
| Öhringen | R | | | | | R | W | W | W | | | |
| Raisting | R | | | | | R | W | W | W | | | |
| Regnitzlosau | R | | | | | R | W | W | W | | | |
| Schauinsland | R | T | T | T | M | R | W | W | W | W | R | R |
| Schmücke | R | | | | M | R | W | W | W | W | | |
| Schorfheide | R | | | | | R | | | | | | |
| Ueckermünde | R | | | | | R | | | | | | |
| Waldhof | R | T | | | M | R | T | T | T | W | | |
| Westerland | T | | T | T | M | R | W | W | W | W | | |
| Zingst | R | | T | T | M | R | W | W | W | W | R | R |
| Zugspitze | R | | | | | R | P | P | P | P | R | R |

Legende zu Tabelle 2:

| **Legende:** | |
|---|---|
| **$SO_2$** | Schwefeldioxid |
| **NOx** | Stickoxide: Stickstoffoxid (NO) und Stickstoffdioxid ($NO_2$) |
| **$O_3$** | Ozon |
| **$CO_2$** | Kohlendioxid |
| **$CH_4$** | Methan |
| **$SF_6/N_2O$** | Schwefelhexafluorid/Distickstoffoxid |
| **PAN** | Peroxyacetylnitrat |
| **Hg** | Quecksilber |
| **KW/FCKW** | Kohlenwasserstoffe/Fluorchlorkohlenwasserstoffe |
| **VOC** | Flüchtige oranische Kohlenwasserstoffe |
| **$PM_{10}$** | Staubteilchen $< 10\ \mu m$ |
| **$PM_{2.5}$** | Staubteilchen $< 2.5\ \mu m$ |
| **$SO_4$** | Sulfat im Staub |
| **S N** | $NH_3 + NH_4^+$, $HNO_3 + NO_3^-$ |
| **SM** | Schwermetalle: As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb |
| **Meteorologie** | Windricht. u. -geschw., Temperatur, Luftdruck, rel. Feuchte |
| **pH/LF** | pH-Wert/Leitfähigkeit |
| **Ionen** | $SO_4^{2-}$, $NO_3^-$, $Cl^-$, $K^+$, $Na^+$, $NH_4^+$, $Mg^{2+}$, $Ca^{2+}$ |
| **SM** | Schwermetalle: As, Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn, Hg |
| **UV** | UV-B-Strahlung |
| **G** | Globalstrahlung |
| **R** | kontinuierlich registrierendes Gerät (Halbstundenwerte) |
| **T** | Tagesproben |
| **2T** | alle 2 Tage 8-stündige Messung |
| **3T** | alle 3 Tage eine Probe |
| **W** | Wochenproben |
| **M** | Monatsproben |
| **P** | geplante Messung |

Tabelle 3: Messverfahren im Messnetz des Umweltbundesamtes

| Komponente | Messverfahren | Messintervall |
|---|---|---|
| **Schwefeldioxid ($SO_2$)** | UV-Fluoreszenz | Halbstunde |
| **Schwefeldioxid ($SO_2$)** | Imprägnierte Filter/Gaschro. | Tag |
| **Stickoxide: NO, $NO_2$, $NO_x$** | Chemilumineszenz | Halbstunde |
| **Stickstoffdioxid ($NO_2$)** | Saltzman | Tag |
| **Ozon ($O_3$)** | UV-Absorption | Halbstunde |
| **Kohlendioxid ($CO_2$)** | IR-Absorption | Halbstunde |
| **Kohlendioxid ($CO_2$)** | Gaschromatographie | Halbstunde |
| **Methan ($CH_4$)** | Gaschromatographie | Halbstunde |
| **Lachgas ($N_2O$)** | Gaschromatographie | Halbstunde |
| **Schwefelhexafluorid ($SF_6$)** | Gaschromatographie | Halbstunde |
| **Peroxyacetylnitrat (PAN)** | Gaschromatographie | Halbstunde |
| **Quecksilber (Hg)** | Atomfluoreszenz | Halbstunde |
| **Kohlenwasserstoffe (VOC)** | Gaschromatographie | 2x wöchent. Momentanpr. |
| **KW/FCKW** | Gaschromatographie | Tag |
| **Carbonyle** | HPLC | 8h 2x w |
| **Temperatur** | Thermometer | Halbstunde |
| **Windrichtung und -geschw.** | Anemometer | Halbstunde |
| **Relative Luftfeuchte** | Hygrometer | Halbstunde |
| **Luftdruck** | Barometer | Halbstunde |
| **Niederschlagsmenge** | Tropfenzähler | Halbstunde |
| **Niederschlagsmenge** | Bulk-Sammler | Tag |
| **Niederschlagsmenge** | Wet-only-Sammler | Woche |
| **pH-Wert des Niederschlags** | pH-Meter | Tag (daily bulk) |
| **pH-Wert des Niederschlags** | pH-Meter | Woche (wet-only) |
| **Leitfähigkeit des Niederschlag** | Konduktometrie | Tag (daily bulk) |
| **Leitfähigkeit des Niederschlag** | Konduktometrie | Woche (wet-only) |
| **Ionen im Niederschlag** | Ionenchromatographie | Tag (daily bulk) |
| **Ionen im Niederschlag** | Atomabsorption + Ionenchr. | Woche (wet-only, bulk) |
| **Schwermetalle im Niederschlag** | ICP/MS | Woche (wet-only) |
| **Schwermetalle im Staub** | ICP/MS | Monat |
| **Gesamtschwebstaub** | Beta-Absorption | Halbstunde |
| **$PM_{10}$** | Beta-Absorption | Halbstunde |
| **$PM_{10}$, $PM_{2.5}$** | Gravimetrie (high volume) | Tag |
| **Sulfat im Staub ($SO_4$)** | Imprägnierte Filter, Ionenchr. | Tag |
| **$\Sigma$ $NH_3$ + $NH_4^+$ im Staub** | Imprägnierte Filter, Ionenchr. | Tag |
| **$\Sigma$ $HNO_3$ + $NO_3^-$ im Staub** | Imprägnierte Filter, Ionenchr. | Tag |
| **Schwermetalle im Staub** | ICP/MS | Monat |
| **UV-Spektrum** | Monochromator | 6 Minuten |
| **Globalstrahlung** | Pyranometer | Halbstunde |

## 1.3 Aufgaben des Messnetzes

Das Messnetz des UBA hat eine Vielzahl von nationalen und internationalen Aufgaben zu erfüllen:

- **Untersuchungen der weiträumigen grenzüberschreitenden Luftverunreinigung**
- **Messungen zur Vorbereitung gesetzlicher Maßnahmen**
- **Beobachtungen langfristiger Trends von Luftschadstoffen und flächendeckende Erfassung wichtiger Luftverunreinigungen**
- **Verfolgung klimarelevanter Komponenten**
- **Verfolgung der Entwicklung der UV-Strahlung am Boden als Folge von Veränderungen der stratosphärischen Ozonschicht**
- **Messungen im Rahmen des bundesweiten Ozon-Informationssystems**
- **Ermittlung des Schadstoffeintrages aus der Atmosphäre in die Randmeere Nord- und Ostsee**
- **Mitarbeit bei der Überprüfung der internationalen Abkommen zur Verminderung von Luftverunreinigungen**
- **Mitarbeit in internationalen Messnetzen und Datenlieferungen an internationale Organisationen**
- **Auswertung der Messdaten und regelmäßige Berichterstattung**
- **Regelmäßige Berichterstattung zur Information der Bevölkerung im Internet**

Besondere Bedeutung kommt hierbei international koordinierten Mess-Aktivitäten zu, die auf Grundlage internationaler Verträge durchgeführt werden. Abgesehen von einzelnen, mehr lokalen Problemen ist nicht zu übersehen, dass die lokalen und regionalen Immissionsbelastungen an Bedeutung verlieren und immer stärker großräumige Probleme bis hin zu globalen Herausforderungen, wie Klimaveränderung und stratosphärischer Ozonabbau, im Vordergrund stehen. Sie erfordern weitere Maßnahmen zur Emissionsbegrenzung und -verminderung.

Das Messnetz des Umweltbundesamtes dient hierbei der Erfolgskontrolle von Abkommen zur Reinhaltung der Luft. Dies gilt nicht nur für Maßnahmen im eigenen Land. Wichtig ist, dass der angestrebte Effekt - z.B. Reduzierung des Sommersmogs als großräumiges Problem - erreicht wird. Gegebenenfalls lassen sich aus den Messresultaten in Verbindung mit meteorologischen Daten Hinweise erhalten, in welchen Staaten die Anstrengungen verstärkt fortgeführt werden müssen.

Seit der Vereinigung Deutschlands wurden in den neuen Ländern in starkem Umfang Emissionsminderungsmaßnahmen durch Einsatz modernster Anlagen an den Stand der Technik durchgeführt. Die dadurch hervorgerufenen Veränderungen der Luftqualität werden durch das Immissionsmessnetz des Umweltbundesamtes verfolgt.

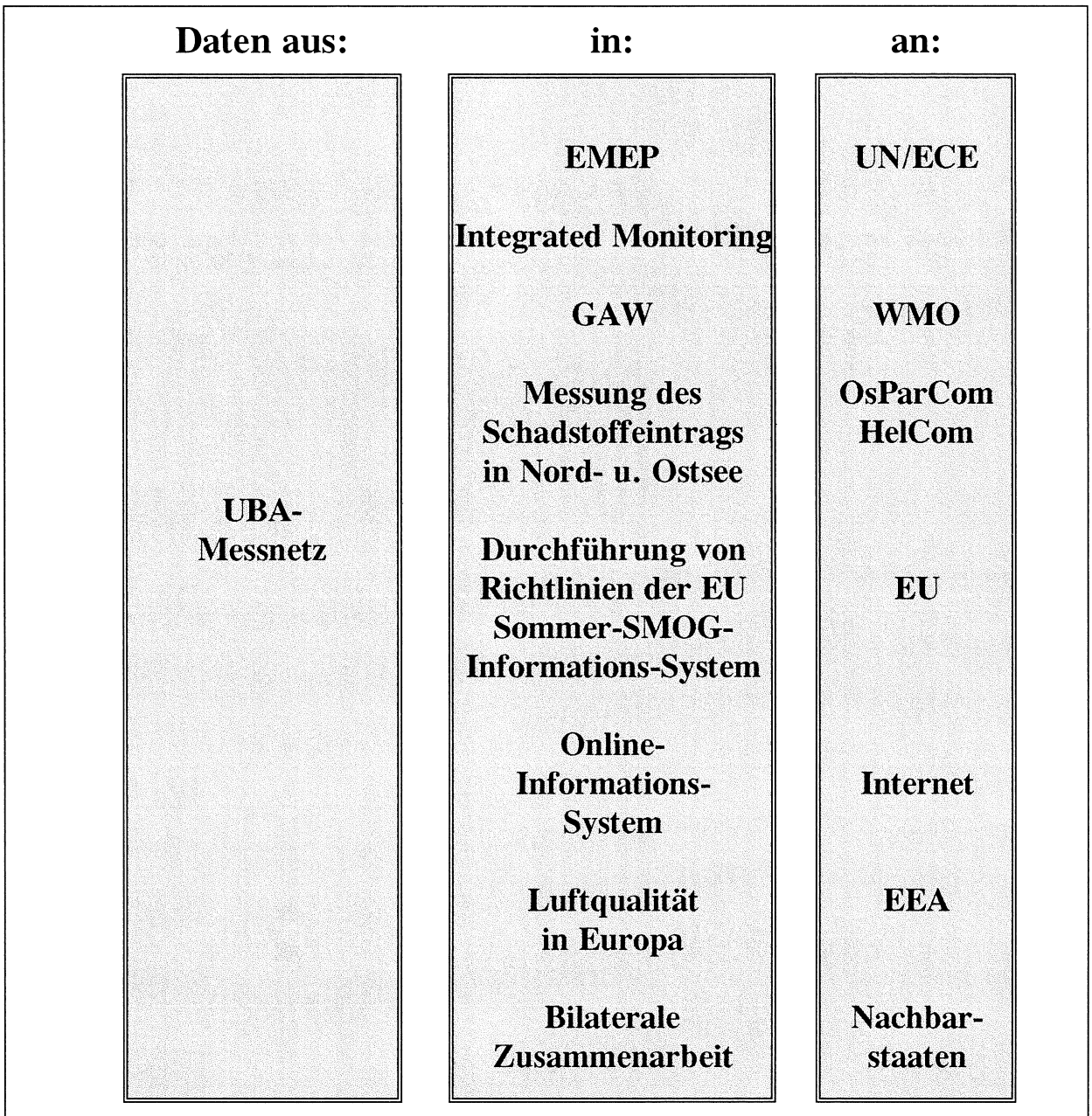



Abbildung 2: Einbeziehung der Messdaten des Umweltbundesamtes in internationale und nationale Programme

Zunehmende Bedeutung hat auch die Palette der organischen Verbindungen und dies aus verschiedenen Gründen. Teils sind sie wichtig für die Entstehung des Sommersmogs, teils

besitzen sie kanzerogene Eigenschaften oder sind auf andere Weise toxisch. Langlebige halogenierte Kohlenwasserstoffe greifen in die Chemie der Stratosphäre ein und werden unter anderem für das "Ozonloch" über der Antarktis verantwortlich gemacht. Manche Kohlenwasserstoffe in der Luft sind natürlichen Ursprungs. Ihr Anteil muss ermittelt werden, will man Minderungspotentiale realistisch abschätzen.

Nicht nur in der Frage der zukünftigen Aufgabenstellungen und der Messobjekte sind Änderungen und Weiterentwicklungen zu erwarten. Sowohl die Bewältigung der Daten als auch das wachsende Interesse der Öffentlichkeit an Informationen über die Umwelt erfordern neue Wege der Datenübertragung sowie der Verbreitung und Veröffentlichung von Messwerten.

Zunehmend setzt sich die Erkenntnis durch, dass nicht einzelne Messungen, sondern vielmehr eine umfassende Umweltbewertung national und international notwendig ist, d.h. neben der Erfassung der Stoffkonzentrationen in den einzelnen Umweltmedien tritt die multimediale Umweltbeobachtung einschließlich der Kontrolle der Wirkungen auf den Menschen und die Ökosysteme in den Vordergrund. Diesem Trend entsprechend wurde beginnend an der Station Brotjacklriegel in Realisierung des "Integrated Monitoring Programms" im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention UN/ECE mit Messungen in den Medien Luft, Niederschlag, Boden, Oberflächen-, Sicker-, Grundwasser und Biota begonnen. Auch an der Messstelle Neuglobsow wurden 1998 Messeinrichtungen für das Integrated Monitoring Programm aufgestellt. Im Rahmen der Neuorganisation des UBA wurde mittlerweile die Verantwortung für das Integrated Monitoring Programm dem Fachgebiet „Experimentelles Monitoring“ übertragen, wobei seitens des Messnetzes weiterhin die Qualitätssicherung für die Immissionsmessungen am Standort Forellenbach durchgeführt wird.

Generell wird bei Schaffung des Europäischen Umweltinformations- und Umweltbeobachtungsnetzes unter Beachtung der Repräsentativität der Stationen das UBA-Messnetz ein Kernstück bilden, mit dessen Hilfe die sektoral ausgerichteten Umweltüberwachungsprogramme angesiedelt und räumlich, zeitlich sowie inhaltlich verknüpft werden (für immissionsökologische Untersuchungen). Die Erfahrung der vergangenen Jahrzehnte zeigt, dass die Öffentlichkeit von Umweltdaten eine notwendige Voraussetzung für die Lösung von Umweltproblemen ist. Das Immissionsmessnetz des Umweltbundesamtes will hierzu einen Beitrag liefern.

Die in Abbildung 2 aufgeführten Aufgaben bestimmen zu einem hohen Anteil die Arbeit des Messnetzes. Dies wird auch in Zukunft so sein. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass sich die Proportionen zwischen den Messaufgaben verschieben, wobei vor allem aus den internationalen Programmen Festlegungen resultieren, neue Komponenten zu überwachen oder neue vereinheitlichte Messmethoden zur Überwachung anzuwenden. Hintergrund des letzt genannten Aspektes sind die notwendigen Bestrebungen, die Qualität und Vergleichbarkeit der von verschiedenen Ländern, Messnetzen und Stationen gewonnenen Daten für das gesamte jeweilige Überwachungsgebiet (z.B. EMEP für ganz Europa) auf das für die Beurteilung der interessierenden Sachverhalte (z.B. bei GAW Einflüsse der Luftverunreinigung auf das Klima) erforderliche Niveau zu heben.

Schwerpunkte der Arbeit der kommenden Jahre sind vor allem die Aufgaben, die sich aus den im Rahmen des Genfer Luftreinhalteabkommens unterzeichneten Protokollen (VOC,

Schwermetalle, POP's) ergeben. Die intensiven Abstimmungen zwischen den Programmen von EMEP, GAW, HelCom und OsParCom führen zu vergleichbaren Anforderungen bei Messmethoden und Datenformaten zur Berichterstattung. Auf diese Weise können z.T. die Messwerte für mehrere Programme verwendet werden. Die notwendigen Vorbereitungen zur Messung von flüchtigen Kohlenwasserstoffen und Carbonylverbindungen (VOC-Protokoll), Schwermetallen als $PM_{10}$- und $PM_{2,5}$-Fraktion, im Niederschlag (Schwermetall-Protokoll), aber auch polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) und chlororganischen Verbindungen (im Rahmen von OsPar und HelCom) haben ein Stadium erreicht, das den experimentellen Messungen im Jahr 2000 dauerhaften Charakter verliehen hat.

Neu sind auch die Messungen, die im Rahmen des weltweiten Atmosphärenüberwachungsprogramms (GAW) der WMO an der gemeinsamen Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg von UBA und DWD begonnen haben. Bestandteil des Programms sind vor allem klimarelevante Gase (Treibhausgase), wie $CO_2$, $CH_4$, $N_2O$, $SF_6$ und Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Letztere sind äußerst langlebig. Ihre besondere Wirkung der Ozonzerstörung entfalten sie in der Stratosphäre. Darüber hinaus gehören luftchemisch reaktive Komponenten wie $NO_x$, $NO_y$, CO, Ozon und PAN zum Messprogramm.

Zusätzlich zur Messung neuer Komponenten wurden zur Qualitätssteigerung auch neue Messmethoden eingeführt. Gleichzeitig wurde die Anzahl und Lage der Stationen optimiert. So wurde die Anzahl der Containerstandorte von 23 auf 13 und die Anzahl der wet-only-Probenahme-Standorte von 30 auf 20 reduziert.

Im Rahmen des Konzeptes der ökologischen Umweltbeobachtung bildet das UBA-Messnetz einen Kernbestandteil der Aktivitäten des Bundes. Das Konzept verknüpft sektoral und übergreifend angelegte Überwachungsprogramme aus Bund und Ländern. Das Messnetz des Umweltbundesamtes wird hierzu seinen Beitrag liefern.

## 1.4 Literatur zu Kapitel 1

*(1) Junge, C. (1970)*
*Repräsentanz luftchemischer Messungen an Background-Stationen, DFG Mitteilung VII, Kommission zur Erforschung der Luftverunreinigung, Mainz, Oktober 1970, S.5-20.*

*(2) UBA (2000)*
*Broschüre: Air knows no borders, Dezember 2000, Redaktion: Karin Uhse*

# 2. ERGEBNISSE DER IMMISSIONS-MESSUNGEN 2001 UND VERGLEICH MIT FRÜHEREN WERTEN

Die Messwerte der 22 Stationen des UBA-Messnetzes für das Jahr 2001 werden als Monats- und Jahresmittel, monatliche und jährliche Perzentile sowie als maximale monatliche Halbstundenmittel hauptsächlich in Tabellenform präsentiert. Den Perzentilen - mit Ausnahme der für Ozon (Bezugszeitraum 1 h) - liegen halbstündige Messwerte zugrunde. Der Vergleich der 2001er Daten mit früheren Werten erfolgt im Wesentlichen auf der Basis der Jahresmittelwerte. Leser, die an einer höheren zeitlichen Auflösung der Messdaten interessiert sind, können die Daten direkt in der Messnetzdatenzentrale in Langen anfordern. In den Tabellen werden die Stationen durch Stationskennungen (zwei Buchstaben) abgekürzt wiedergegeben, wobei die Reihung der Stationen nach geographischen Gesichtspunkten von Nord nach Süd vorgenommen wurde. In Tabelle 1 (Kapitel 1.1) sind die entsprechenden Stationsnamen und deren Kennungen nochmals in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt. Die genaue geographische Lage der Stationen ist ebenfalls Tabelle 1 zu entnehmen. Die NO-, $NO_2$-, $SO_2$- und Ozon-Messwerte sind auf 20 °C bezogen.

## 2.1 Gas- und partikelförmige Luftverunreinigungen

### 2.1.1 Schwefeldioxid ($SO_2$)

Auch im Jahre 2001 hat sich der Rückgang der $SO_2$-Konzentrationen fortgesetzt. Im Jahre 2001 wurden an fast allen Stationen in den alten und neuen Ländern die niedrigsten $SO_2$-Konzentrationen seit Beginn der Messungen in den frühen 70er und 80er Jahren beobachtet. In Tabelle 4 sind die Monats- und Jahresmittel der $SO_2$-Konzentrationen und in Tabelle 5 die maximalen monatlichen Halbstundenwerte für 2001 aufgelistet. Die höchsten Jahreswerte wurden an den beiden sächsischen Stationen Lückendorf (Schwarzes Dreieck im Zittauer Gebirge) mit 5.6 $\mu g/m^3$ (gegenüber 5.9 $\mu g/m^3$ in 2000 und 10 $\mu g/m^3$ in 1999) sowie Lehnmühle (Osterzgebirge) mit 5.0 $\mu$g/m3 (gegenüber 6.3 $\mu g/m^3$ in 2000 und 7 $\mu g/m^3$ in 1999) gemessen. Es folgen Regnitzlosau (Nordostbayern) mit 4.4 $\mu g/m^3$ und Falkenberg (ca. 60 km südöstlich von Berlin) mit 4.0 $\mu g/m^3$. Die höchsten Halbstundenwerte wurden an der Station Lückendorf im Dreiländereck zwischen Deutschland, Polen und Tschechien gemessen: 162 $\mu g/m^3$ im Dezember, 142 $\mu g/m^3$ im Mai, 123 $\mu g/m^3$ im August sowie 103 $\mu g/m^3$ im Juni. Dagegen lagen die höchsten Halbstundenwerte an den anderen Stationen deutlich unterhalb von 100 $\mu g/m^3$ (Tabelle 8).

Die monatlichen 50-Perzentile (Median) sind in Tabelle 6, die 98-Perzentile in Tabelle 7 und die jährlichen Maxima und Minima der Halbstundenwerte in Tabelle 8 angegeben. Die Perzentile geben an, wieviel Prozent der Werte unterhalb des angegebenen Konzentrationsniveaus liegen. So lagen beispielsweise in Lückendorf im Jahre 2001 98% aller $SO_2$-Halbstundenwerte unterhalb von 26 $\mu g/m^3$ und 50% unterhalb von 3$\mu g/m^3$. Aus den Werten in Tabelle 8 ist zu erkennen, dass für viele Stationen beim 25-Perzentil und z.T. beim 50-Perzentil die Messwerte unterhalb der Nachweisgrenze der bisher eingesetzten Messgeräte liegen und somit hier die Nachweisgrenze angegeben wird.

Besonders auffallend ist weiterhin der starke Abfall der Spitzenkonzentrationen im Jahre 2001 gegenüber den Vorjahren an einigen Stationen in den neuen Ländern, die noch bis 1997 erhöhte $SO_2$-Belastungen aufwiesen, wie Abbildung 3 bis Abbildung 5 anhand der monatlichen Perzentile für die Stationen Lückendorf, Lehnmühle, Melpitz und Schleiz (neue Bundesländer) und Waldhof (Lüneburger Heide, alte Länder) für den Zeitraum 1992 bis 2001 zeigen. Der in der Technischen Anleitung Luft (TA Luft) angegebene Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit für das 98-Perzentil von 400 $\mu g/m^3$ für $SO_2$ wird an keiner der Messstellen des UBA auch nur annäherungsweise erreicht. Alle UBA-Stationen blieben 2001 mit den 98-Perzentilwerten noch unter 26 $\mu g/m^3$.

Wie aus Tabelle 9 und Tabelle 10 sowie aus Abbildung 6 zu sehen ist, hat sich die $SO_2$-Belastung in Deutschland insgesamt weiter vermindert. Dieser Prozess setzte Mitte der 80er Jahre in den alten Ländern und Anfang der 90er Jahre in den neuen Ländern sowie in Tschechien und Polen ein, vor allem als Folge der Minderung der $SO_2$-Emissionen (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). In den neuen Ländern werden mittlerweile nahezu vergleichbare $SO_2$-Konzentrationen gemessen. Der Rückgang erfolgte hier wesentlich schneller als in den alten Ländern. Es ist zu erwarten, dass auch an den wenigen Stationen in den neuen Ländern (Abbildung 3 bis Abbildung 5), die noch leicht erhöhte $SO_2$-Konzentrationen aufweisen, die Konzentrationen im Zuge der weiteren Reduzierungen der $SO_2$-Emissionen in Deutschland, Tschechien und Polen in wenigen Jahren das sehr niedrige Niveau der anderen Stationen erreichen werden (Abbildung 7 und Abbildung 8).

Wie Abbildung 6 zeigt, haben die Jahresmittel der $SO_2$-Konzentrationen zwischen Mitte der 80er Jahre und 2001 um mehr als einen Faktor 10 abgenommen. Die $SO_2$-Konzentrationen in Deutschland werden in Zukunft kaum noch zurückgehen, da hier das $SO_2$-Minderungepotential weitgehend ausgeschöpft ist. Ein geringer Rückgang der $SO_2$-Konzentrationen ist deshalb in den kommenden Jahren lediglich als Folge der weiteren Emissionsreduzierungen in Tschechien und Polen an einigen Stationen in den neuen Ländern zu erwarten.

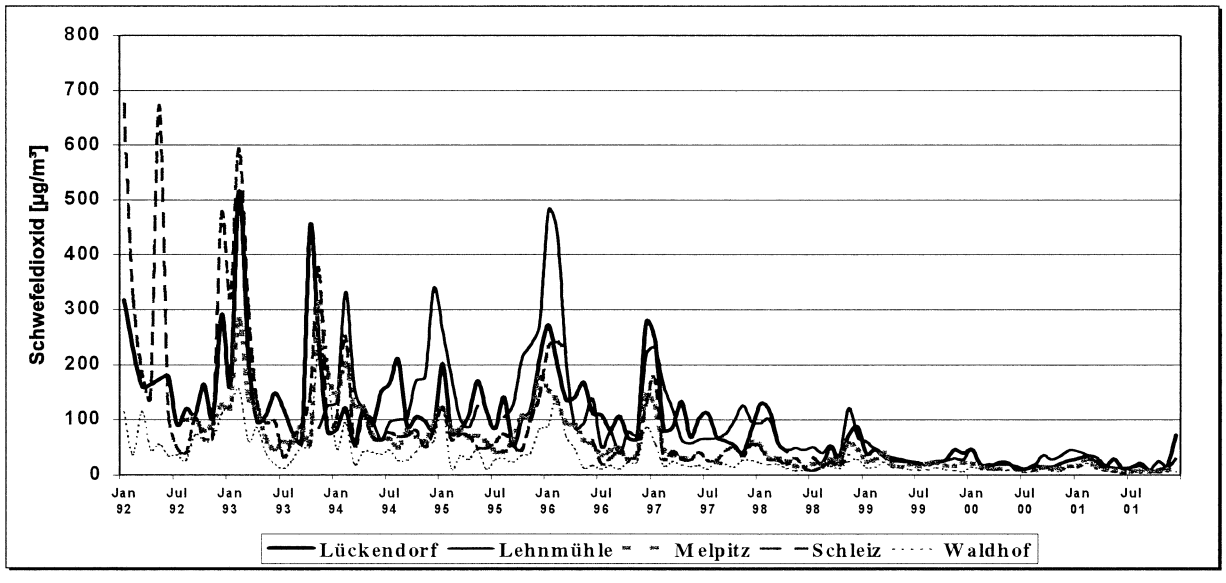



Abbildung 3: Monatliche 98-Perzentile der Halbstundenwerte von Schwefeldioxid, 1992 bis 2001 in Lückendorf, Lehnmühle, Melpitz, Schleiz und Waldhof, kontinuierliches Messverfahren

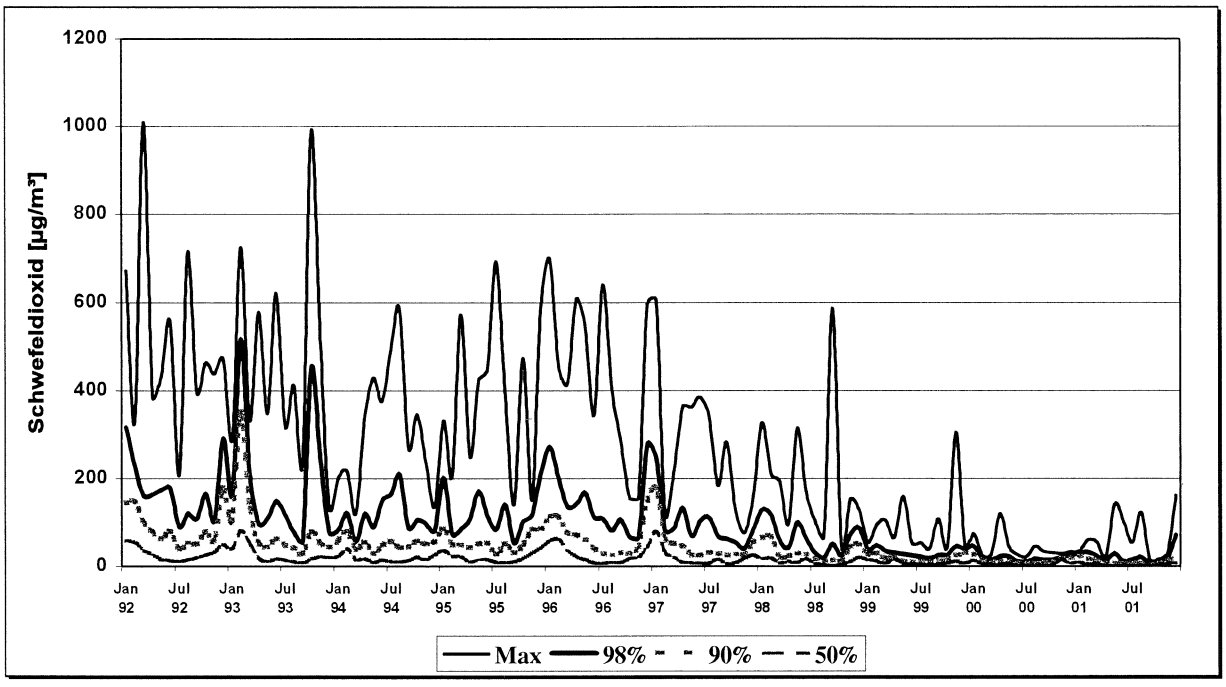



Abbildung 4: Maximale Halbstundenwerte sowie 98-, 90- und 50-Perzentile der Schwefeldioxidkonzentrationen in Lückendorf zwischen 1992 und 2001.

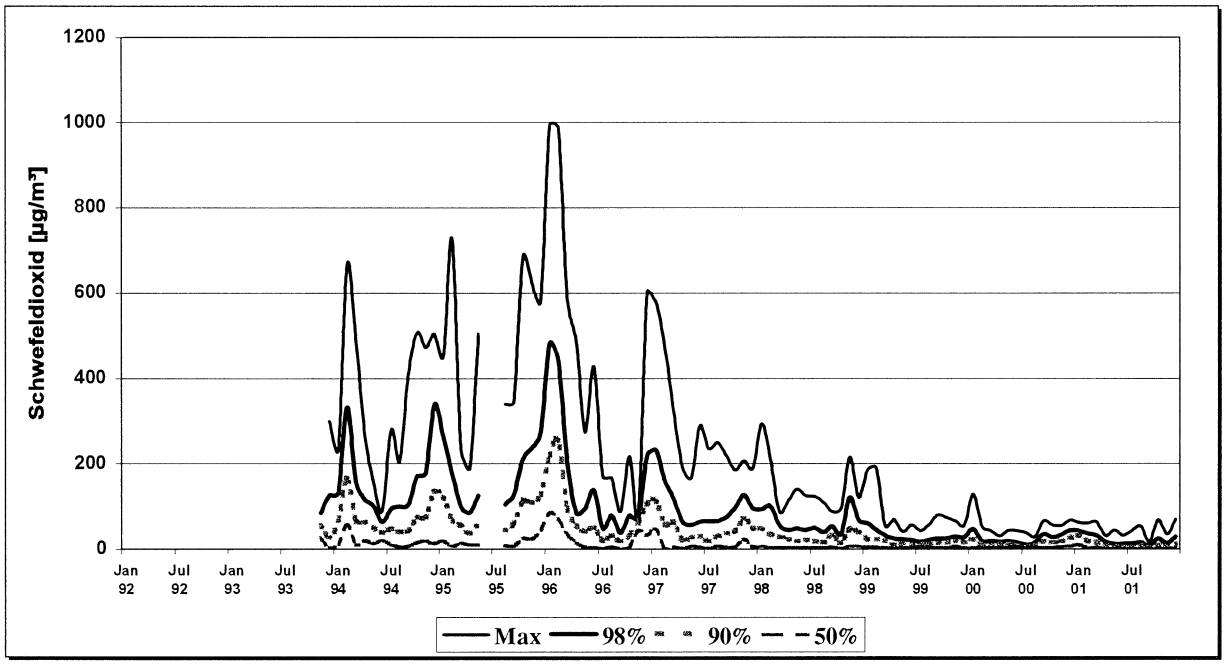



Abbildung 5: Maximale Halbstundenwerte sowie 98-, 90- und 50-Perzentile der Schwefeldioxidkonzentrationen in Lehnmühle zwischen 1993 und 2001.

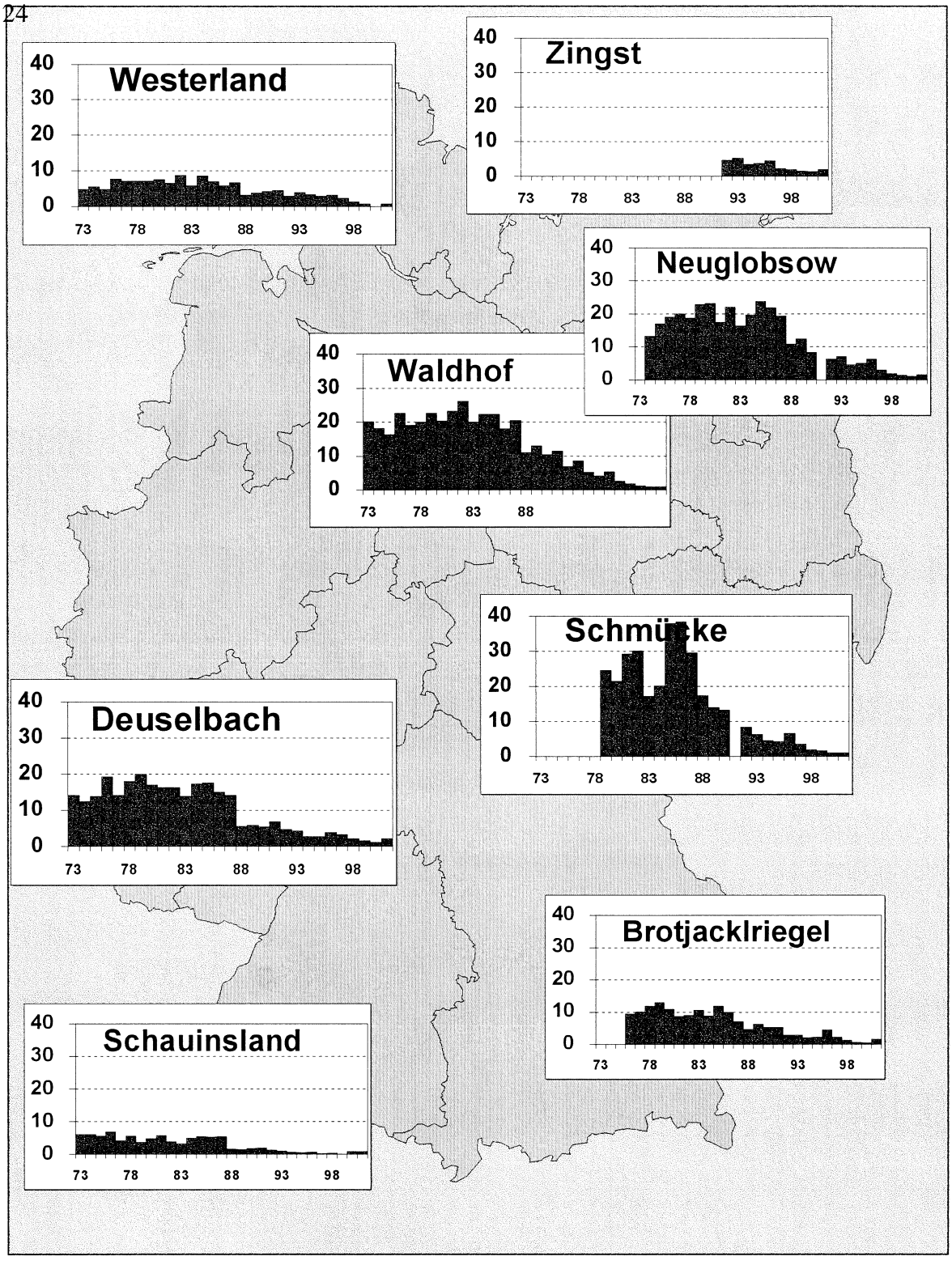



Abbildung 6: Jahresmittel der Schwefeldioxidkonzentrationen von 1973 bis 2001 in $\mu g/m^3$ an den personellen Messstellen des UBA, 1973-2000: nasschemisches TCM-Verfahren, 2001: Zingst, Neuglobsow und Schauinsland: Imprägnierte Filter, Westerland, Waldhof, Schmücke, Deuselbach und Brotjacklriegel: Trace Level Gerät (siehe Kapitel 3.3)

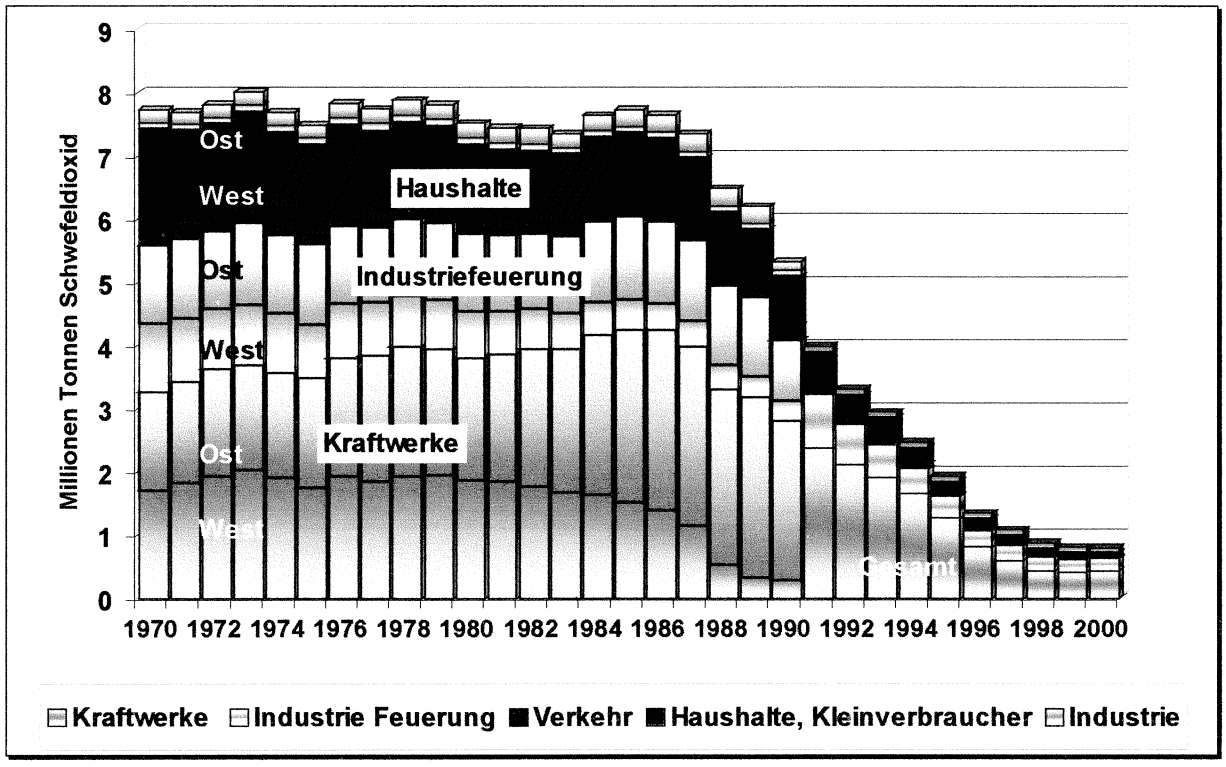



Abbildung 7: Jährliche Schwefeldioxid-Emissionen in Deutschland von 1970 bis 2000 *(Ref. 1, 2)*

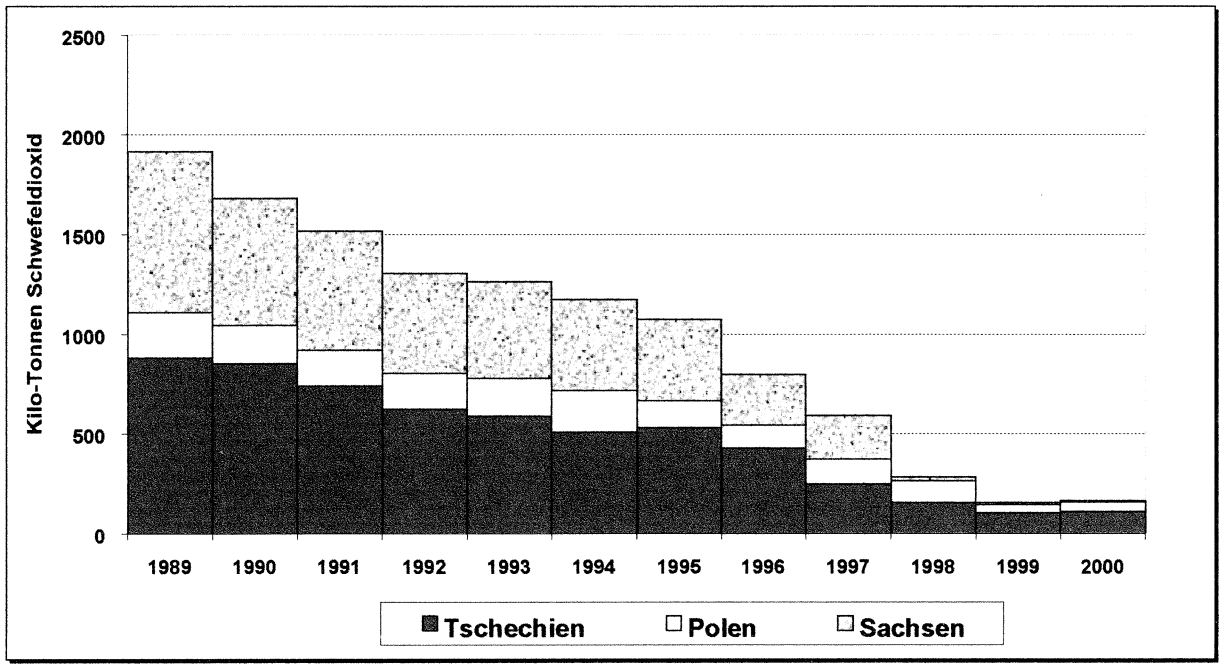



Abbildung 8: Jährliche Schwefeldioxid-Emissionen in Tschechien, Polen und Sachsen von 1989 bis 2000, *(Ref. 3)*

Tabelle 4: Monats- und Jahresmittel, Schwefeldioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 3.2 | 2.5 | 4.4 | 2.9 | 0.7 | 0.7 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 1.0 | 0.6 | 1.2 | 1.5 |
| ZG | 6.4 | 2.5 | 3.4 | 2.3 | 2.6 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 2.0 | 1.1 | 1.8 | 2.2 |
| HG | 3.9 | 2.8 | 3.1 | 2.9 | 2.3 | 2.2 | 2.0 | 2.5 | 1.9 | 3.1 | 1.7 | 1.7 | 2.5 |
| AU | 4.2 | 4.0 | 6.4 | 3.5 | 5.2 | 2.6 | 2.8 | 2.7 | 3.0 | - | - | 3.1 | 3.8 |
| UE | 8.6 | 4.6 | 4.0 | 2.4 | 3.2 | 3.0 | 3.9 | 3.0 | 2.3 | 4.1 | 2.3 | 3.9 | 3.8 |
| NG | 6.5 | 5.5 | 6.6 | 3.2 | 2.7 | 0.4 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 1.3 | 0.8 | 1.9 | 2.5 |
| SH | 4.9 | 3.5 | 4.8 | 3.2 | 2.3 | 2.1 | 2.2 | 2.5 | 1.7 | 3.7 | 3.9 | 2.6 | 3.1 |
| BA | 2.9 | 2.2 | 2.6 | 1.6 | 1.8 | 1.4 | 1.4 | 1.8 | - | - | - | - | 2.0 |
| WA | 4.4 | 4.6 | 5.0 | 4.6 | 0.9 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 1.4 | 1.2 | 1.4 | 2.2 |
| GI | 4.5 | 3.9 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 2.8 | 3.1 | 6.3 | 1.8 | 2.3 | 3.6 | 2.3 | 3.7 |
| FA | 7.6 | 6.1 | 5.5 | 3.2 | 3.4 | 1.9 | 2.3 | 3.1 | 2.7 | 3.0 | 2.2 | 7.5 | 4.0 |
| MP | 5.0 | 5.7 | 6.0 | 3.6 | 2.1 | 1.6 | 2.0 | 3.0 | 2.2 | 2.0 | 3.4 | 4.5 | 3.4 |
| LF | 4.0 | 3.5 | 4.6 | 1.6 | 5.0 | 4.8 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 1.8 | - | 3.5 | 3.1 |
| LM | 14.8 | 6.9 | 6.8 | 3.6 | 3.5 | 3.2 | 2.7 | 3.3 | 2.1 | 4.2 | 2.7 | 5.6 | 5.0 |
| LU | 11.4 | 7.7 | 7.2 | 3.3 | 3.9 | 2.9 | 3.4 | 3.7 | 1.9 | 2.7 | 7.0 | 11.2 | 5.6 |
| SM | 2.7 | 1.9 | 2.3 | 1.3 | 2.0 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | - | 0.6 | 0.6 | 1.4 | 1.4 |
| RE | 6.5 | 2.4 | 6.9 | 4.9 | 5.0 | - | - | 2.7 | 1.9 | 2.0 | 4.3 | 8.1 | 4.4 |
| DE | 6.9 | 3.2 | 3.1 | 2.3 | 2.0 | 1.5 | 1.5 | 1.7 | 1.8 | 2.9 | 2.3 | 3.0 | 2.7 |
| AS | 6.3 | 4.8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | 1.4 | 1.4 | - | - | - | - |
| FB | 2.2 | 2.3 | 1.7 | 1.7 | 3.4 | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 2.4 | 1.9 |
| BR | 6.1 | - | - | - | - | - | 0.9 | 0.7 | 0.9 | 1.3 | 2.3 | 3.3 | 2.2 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 3.3 | 3.2 | 3.4 | 4.1 | 2.8 | - |
| SC | 1.5 | 2.4 | 1.4 | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.5 | 1.1 |

Tabelle 5: Monatsmaxima der Halbstundenwerte, Schwefeldioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 22 | 39 | 21 | 16 | 4 | 7 | 7 | 5 | 4 | 4 | 9 | 13 |
| ZG | 37 | 25 | 26 | 15 | 19 | 7 | 10 | 10 | 10 | 18 | 13 | 11 |
| HG | 26 | 21 | 19 | 25 | 28 | 21 | 21 | 22 | 10 | 26 | 18 | 10 |
| AU | 19 | 27 | 17 | 10 | 25 | 11 | 7 | 11 | 9 | - | - | 9 |
| UE | 43 | 32 | 23 | 18 | 12 | 11 | 14 | 18 | 28 | 35 | 24 | 36 |
| NG | 25 | 44 | 24 | 22 | 19 | 28 | 10 | 11 | 5 | 18 | 13 | 16 |
| SH | 27 | 50 | 28 | 40 | 22 | 18 | 50 | 18 | 10 | 42 | 16 | 16 |
| BA | 18 | 13 | 21 | 8 | 12 | 5 | 7 | 11 | - | - | - | - |
| WA | 16 | 33 | 27 | 12 | 11 | 5 | 13 | 8 | 10 | 11 | 8 | 12 |
| GI | 35 | 20 | 15 | 20 | 17 | 29 | 21 | 21 | 16 | 18 | 39 | 19 |
| FA | 33 | 35 | 31 | 35 | 18 | 16 | 28 | 29 | 28 | 17 | 17 | 49 |
| MP | 28 | 38 | 26 | 16 | 17 | 17 | 16 | 22 | 21 | 14 | 16 | 23 |
| LF | 24 | 14 | 21 | 16 | 19 | 19 | 12 | 9 | 9 | 9 | - | 19 |
| LM | 63 | 61 | 64 | 33 | 45 | 32 | 44 | 54 | 18 | 68 | 35 | 71 |
| LU | 35 | 60 | 56 | 22 | 142 | 103 | 55 | 123 | 16 | 16 | 30 | 162 |
| SM | 20 | 12 | 21 | 7 | 24 | 8 | 10 | 8 | - | 10 | 9 | 14 |
| RE | 88 | 53 | 42 | 42 | 44 | - | - | 29 | 9 | 13 | 27 | 49 |
| DE | 34 | 36 | 14 | 29 | 12 | 27 | 16 | 40 | 38 | 27 | 15 | 25 |
| AS | 25 | 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | 7 | 5 | - | - | - |
| FB | 16 | 19 | 9 | 7 | 14 | 5 | 6 | 9 | 6 | 7 | 7 | 26 |
| BR | 22 | - | - | - | - | - | 9 | 7 | 8 | 15 | 17 | 25 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 10 | 7 | 8 | 10 | 15 |
| SC | 5 | 9 | 5 | 7 | 10 | 6 | 4 | 5 | 3 | 4 | 7 | 13 |

Tabelle 6: Monatliche 50-Perzentile der Halbstundenwerte von Schwefeldioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 1.4 | 1.4 | 4.2 | 2.1 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.9 | 0.4 | 0.8 |
| ZG | 3.4 | 1.4 | 1.4 | 2.0 | 2.4 | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 1.1 | 0.8 | 1.2 |
| HG | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| AU | 3.3 | 3.3 | 6.2 | 3.5 | 4.8 | 1.4 | 3.0 | 2.9 | 3.3 | - | - | 1.4 |
| UE | 5.6 | 3.4 | 1.4 | 1.4 | 3.1 | 3.1 | 3.5 | 2.9 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| NG | 4.4 | 4.2 | 5.4 | 2.5 | 2.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.4 | 0.9 |
| SH | 1.4 | 1.4 | 3.1 | 2.9 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 3.8 | 1.4 |
| BA | 2.9 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | - | - | - | - |
| WA | 3.7 | 3.5 | 4.5 | 4.6 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.9 | 0.7 | 0.8 |
| GI | 3.9 | 3.4 | 4.1 | 3.8 | 4.0 | 1.4 | 3.0 | 5.5 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| FA | 4.6 | 4.4 | 4.1 | 1.4 | 3.1 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 5.5 |
| MP | 3.4 | 4.1 | 5.3 | 3.3 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 3.0 | 1.4 | 1.4 | 3.3 | 2.9 |
| LF | 3.1 | 3.2 | 4.2 | 1.4 | 5.3 | 4.5 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 3.1 |
| LM | 10.7 | 3.1 | 3.5 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 3.1 |
| LU | 9.3 | 5.0 | 6.3 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 5.9 | 7.1 |
| SM | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 0.8 | 1.1 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.7 |
| RE | 4.0 | 1.4 | 5.0 | 4.6 | 4.0 | - | - | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 4.2 | 6.8 |
| DE | 6.0 | 1.4 | 2.9 | 1.5 | 1.4 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.6 | 1.9 | 2.3 |
| AS | 4.9 | 4.4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | 1.4 | 1.4 | - | - | - |
| FB | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 3.5 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| BR | 5.3 | - | - | - | - | - | 0.6 | 0.4 | 0.6 | 0.9 | 1.7 | 2.5 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 3.4 | 3.3 | 3.4 | 4.1 | 1.4 |
| SC | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 0.7 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 0.8 |

Tabelle 7: Monatliche 98-Perzentile der Halbstundenwerte von Schwefeldioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 9 | 8 | 11 | 8 | 2 | 4 | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| ZG | 28 | 15 | 13 | 6 | 9 | 4 | 4 | 5 | 5 | 11 | 4 | 6 |
| HG | 15 | 13 | 9 | 12 | 11 | 9 | 7 | 11 | 6 | 12 | 5 | 5 |
| AU | 13 | 17 | 13 | 8 | 13 | 6 | 6 | 5 | 6 | - | - | 8 |
| UE | 30 | 17 | 17 | 9 | 7 | 7 | 9 | 10 | 10 | 19 | 10 | 17 |
| NG | 20 | 23 | 17 | 11 | 7 | 3 | 4 | 4 | 2 | 7 | 4 | 9 |
| SH | 22 | 22 | 17 | 12 | 8 | 6 | 9 | 8 | 5 | 21 | 9 | 10 |
| BA | 9 | 8 | 6 | 4 | 5 | 1 | 1 | 6 | - | - | - | - |
| WA | 13 | 21 | 12 | 8 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 6 |
| GI | 13 | 12 | 11 | 13 | 10 | 11 | 9 | 15 | 6 | 10 | 19 | 11 |
| FA | 27 | 30 | 21 | 18 | 11 | 6 | 7 | 12 | 10 | 10 | 6 | 25 |
| MP | 17 | 29 | 16 | 10 | 8 | 5 | 6 | 8 | 7 | 6 | 9 | 18 |
| LF | 16 | 10 | 11 | 4 | 12 | 9 | 6 | 6 | 5 | 5 | 11 | 13 |
| LM | 43 | 37 | 33 | 18 | 13 | 13 | 13 | 16 | 9 | 25 | 14 | 30 |
| LU | 30 | 33 | 24 | 14 | 29 | 11 | 15 | 21 | 7 | 9 | 18 | 72 |
| SM | 12 | 6 | 8 | 4 | 9 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 4 | 8 |
| RE | 30 | 12 | 21 | 16 | 18 | - | - | 11 | 5 | 7 | 11 | 23 |
| DE | 18 | 14 | 8 | 11 | 7 | 7 | 6 | 7 | 9 | 13 | 7 | 10 |
| AS | 14 | 10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | - | - | - |
| FB | 9 | 9 | 6 | 4 | 8 | 1 | 4 | 3 | 1 | 4 | 4 | 11 |
| BR | 13 | - | - | - | - | - | 4 | 3 | 3 | 5 | 7 | 13 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 5 | 4 | 5 | 6 | 9 |
| SC | 4 | 7 | 1 | 3 | 3 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 10 |

Tabelle 8: Jährliche Perzentile der Halbstundenwerte von Schwefeldioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Min | 2% | 5% | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% | 98% | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.8 | 1.6 | 4.2 | 5.7 | 7.5 | 38.7 |
| ZG | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.6 | 1.4 | 2.5 | 4.4 | 6.5 | 12.6 | 36.6 |
| HG | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 28 |
| AU | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 12 | 27 |
| UE | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 8 | 12 | 17 | 43 |
| NG | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 1.4 | 3.7 | 5.8 | 8.8 | 13.6 | 43.6 |
| SH | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 6 | 10 | 16 | 50 |
| BA | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 5 | 6 | 21 |
| WA | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 1.2 | 3.6 | 5.4 | 6.7 | 9.5 | 32.7 |
| GI | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 12 | 39 |
| FA | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 9 | 13 | 19 | 49 |
| MP | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 8 | 10 | 14 | 38 |
| LF | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 6 | 8 | 10 | 24 |
| LM | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 13 | 21 | 30 | 71 |
| LU | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 7 | 12 | 17 | 26 | 162 |
| SM | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.9 | 1.4 | 3.2 | 4.5 | 7.0 | 23.7 |
| RE | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 6 | 9 | 13 | 18 | 88 |
| DE | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1.0 | 1.6 | 3.5 | 5.9 | 8.0 | 10.9 | 39.8 |
| AS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| FB | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 5 | 6 | 26 |
| BR | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SC | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.9 | 1.4 | 1.9 | 3.0 | 4.1 | 13.1 |

Tabelle 9: Jahresmittel von Schwefeldioxid in $\mu g/m^3$, 1985 bis 2001, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | WE | ZG | HG | AU | HW | TE | UE | SW | NG | AN | SH | KY | BA | WA | WI | GI | LI | FA | DL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1985 | 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 25 | - | - | - | - | - |
| 1986 | 6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 22 | - | - | - | - | - |
| 1987 | 6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 37 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 5 | - | - | - | 10 | - | - | - | - | - | - | - | 12 | 20 | - | 15 | - | - | - |
| 1989 | 5 | - | - | - | 10 | - | - | - | - | - | - | - | 13 | 20 | - | 13 | - | - | - |
| 1990 | 4 | - | - | - | 10 | - | - | - | - | - | - | - | 11 | 14 | - | 11 | - | - | - |
| 1991 | 6 | - | - | - | 17 | - | - | 32 | - | - | - | 14 | 13 | 18 | 62 | 13 | 22 | - | 31 |
| 1992 | 4 | 5 | - | - | 7 | 8 | 13 | 16 | 8 | 17 | - | 13 | 7 | 10 | 31 | 10 | 22 | - | 33 |
| 1993 | 6 | 5 | - | - | 13 | 9 | 11 | 13 | 10 | 15 | - | 12 | 13 | 11 | 29 | 11 | 21 | - | 32 |
| 1994 | 4 | 5 | 7 | - | 6 | 7 | 9 | 8 | 7 | 10 | - | 8 | 8 | 7 | 17 | - | 16 | - | 21 |
| 1995 | 3 | 6 | - | - | 6 | 7 | 9 | 7 | 7 | 10 | - | 8 | - | 6 | - | - | 16 | - | 16 |
| 1996 | 4 | 7 | 5 | - | 6 | 9 | 10 | 9 | 10 | 12 | - | 10 | - | 10 | - | - | 18 | - | 19 |
| 1997 | 3 | 4 | 5 | - | 3 | 4 | 7 | 5 | 4 | 7 | - | 5 | - | 7 | - | - | 11 | - | 13 |
| 1998 | 3 | 4 | 4 | - | - | 3 | 6 | - | 3 | 5 | - | - | - | 5 | - | - | 6 | - | 6 |
| 1999 | 4 | 4 | 5 | 3 | - | - | 4 | - | 4 | - | 4 | - | - | 4 | - | - | - | 5 | - |
| 2000 | 2 | 3 | - | 3 | - | - | 4 | - | 4 | - | 4 | - | 2 | 3 | - | 4 | - | 4 | - |
| 2001 | 2 | 2 | 3 | - | - | - | 4 | - | 3 | - | 3 | - | - | 2 | - | 4 | - | 4 | - |

| Station | MP | LF | ME | HE | LM | LU | SM | SZ | RE | DE | AS | OE | BR | FB | RT | SC | MU | RS | ZU |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1985 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 16 | - | 13 | 13 | - | - | 5 | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 14 | - | 9 | 9 | - | - | 6 | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 15 | - | 10 | 10 | - | - | 6 | - | - | - |
| 1988 | - | - | 14 | - | - | - | - | - | 29 | 9 | 9 | 6 | 6 | - | 9 | 3 | - | - | - |
| 1989 | - | - | 13 | - | - | - | - | - | 34 | 9 | 10 | 6 | 6 | - | 7 | 3 | - | - | - |
| 1990 | - | - | 15 | 25 | - | - | - | - | 29 | 6 | 9 | 6 | 6 | - | 8 | 4 | - | - | - |
| 1991 | - | - | 13 | 30 | - | - | - | 58 | 35 | 7 | 9 | - | 4 | - | 7 | 4 | - | - | - |
| 1992 | - | 20 | 10 | 17 | - | 40 | 14 | 38 | 25 | 5 | 7 | 3 | 3 | - | 6 | 3 | - | - | - |
| 1993 | 35 | 23 | 12 | 23 | - | 37 | 14 | 35 | 28 | 5 | 8 | - | 3 | - | 7 | 3 | - | - | - |
| 1994 | 21 | 12 | 10 | 14 | 30 | 24 | 11 | 14 | 22 | 4 | 6 | - | 3 | - | - | 2 | - | - | - |
| 1995 | 17 | 9 | - | - | 30 | 27 | 10 | 13 | - | 5 | 11 | 5 | 5 | - | - | 3 | 4 | - | - |
| 1996 | 17 | 12 | - | - | 35 | 33 | 16 | 22 | - | 8 | - | 8 | 8 | - | - | 3 | - | - | - |
| 1997 | 10 | 6 | - | - | 18 | 25 | 7 | 10 | - | 7 | - | - | - | - | - | 2 | - | - | - |
| 1998 | 5 | 4 | - | - | 11 | 14 | 4 | 5 | - | 4 | - | 4 | 4 | - | - | 3 | - | - | - |
| 1999 | 5 | 4 | - | - | 7 | 9 | 4 | - | 5 | 4 | - | - | 3 | - | - | 2 | - | - | - |
| 2000 | 4 | 3 | - | - | 6 | 6 | 3 | - | 4 | 4 | 2 | - | 4 | - | - | 2 | - | - | - |
| 2001 | 3 | 3 | - | - | 5 | 6 | 1 | - | 4 | 3 | - | - | - | 2 | - | 1 | - | - | - |

Tabelle 10: Jahresmittel von Schwefeldioxid für 1971 bis 2001 in $\mu g/m^3$, nasschemisches TCM- Messverfahren

| Station | WE | ZG | HG | HW | SW | NG | AN | BA | WA | LI | LF | ME | SM | DE | AS | BR | RT | SC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1971 | - | - | - | - | - | - | - | - | 31 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1972 | - | - | - | - | - | - | - | - | 30 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1973 | 5 | - | - | - | - | - | - | - | 20 | - | - | - | - | 14 | - | - | - | 6 |
| 1974 | 5 | - | - | - | - | 13 | - | - | 18 | - | - | - | - | 12 | - | - | - | 6 |
| 1975 | 5 | - | - | - | - | 17 | - | - | 16 | - | - | - | - | 14 | - | - | - | 6 |
| 1976 | 8 | - | - | - | - | 20 | - | - | 23 | - | - | - | - | 19 | - | 9 | - | 7 |
| 1977 | 7 | - | - | - | - | 20 | - | - | 19 | - | - | - | - | 14 | - | 10 | - | 4 |
| 1978 | 7 | - | - | - | - | 20 | - | - | 20 | - | - | - | - | 18 | - | 12 | - | 6 |
| 1979 | 7 | - | - | - | - | 24 | - | - | 23 | - | - | - | 31 | 20 | - | 13 | - | 4 |
| 1980 | 8 | - | - | 15 | - | 25 | - | 21 | 20 | - | - | 25 | 28 | 17 | 14 | 11 | 14 | 5 |
| 1981 | 7 | - | - | 14 | - | 19 | - | 21 | 23 | - | - | 29 | 37 | 16 | 14 | 9 | 14 | 6 |
| 1982 | 9 | - | - | 18 | - | 27 | - | 23 | 26 | - | - | 26 | 32 | 16 | 13 | 9 | 11 | 4 |
| 1983 | 6 | - | - | 12 | - | 19 | - | 16 | 20 | - | 44 | 24 | 18 | 14 | 13 | 11 | 10 | 3 |
| 1984 | 9 | - | - | 15 | - | 22 | 24 | 24 | 22 | - | 52 | 21 | 20 | 17 | 14 | 9 | 11 | 5 |
| 1985 | 7 | - | - | 13 | - | 25 | 34 | 16 | 22 | 45 | 65 | 31 | 39 | 18 | 23 | 12 | 17 | 5 |
| 1986 | 6 | - | - | 8 | 23 | 24 | 28 | 15 | 18 | 41 | 47 | 28 | 41 | 15 | 17 | 10 | 15 | 5 |
| 1987 | 7 | - | - | - | 19 | 20 | 24 | 20 | 21 | 36 | 71 | 25 | 30 | 14 | 14 | 7 | 16 | 5 |
| 1988 | 3 | - | - | - | 19 | 12 | 24 | 9 | 11 | 23 | 33 | 10 | 19 | 6 | 6 | 5 | 5 | 2 |
| 1989 | 4 | - | - | - | 18 | 14 | 21 | 10 | 13 | 31 | 27 | 7 | 15 | 6 | 6 | 6 | 4 | 1 |
| 1990 | 4 | - | - | - | 16 | 10 | 20 | 8 | 10 | 30 | 25 | 6 | 16 | 5 | 6 | 5 | 4 | 2 |
| 1991 | 4 | - | - | - | - | - | - | 12 | 12 | - | - | 9 | - | 7 | 8 | 5 | 4 | 2 |
| 1992 | 3 | 5 | - | - | - | 6 | - | 4 | 7 | - | - | 7 | 8 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1.3 |
| 1993 | 3.9 | 5.1 | - | - | - | 7.1 | - | - | 8.6 | - | - | 11 | 6.3 | 4.3 | 4.2 | 2.9 | 2.5 | 1.0 |
| 1994 | 3.3 | 3.4 | - | - | - | 4.5 | - | - | 5.3 | - | - | - | 4.5 | 2.7 | - | 2.1 | - | 0.6 |
| 1995 | 2.8 | 3.6 | - | - | - | 5.0 | - | - | 4.2 | - | - | - | 4.2 | 2.7 | - | 2.3 | - | 0.5 |
| 1996 | 3.2 | 4.4 | - | - | - | 6.3 | - | - | 5.4 | - | - | - | 6.6 | 3.9 | - | 4.4 | - | 0.7 |
| 1997 | 2.3 | 2.1 | - | - | - | 3.0 | - | - | 2.6 | - | - | - | 3.4 | 3.2 | - | 2.2 | - | 0.2 |
| 1998 | 1.2 | 1.8 | - | - | - | 1.8 | - | - | 1.9 | - | - | - | 1.8 | 2.1 | - | 1.2 | - | 0.4 |
| 1999 | 0.7 | 1.4 | - | - | - | 1.3 | - | - | 1.2 | - | - | - | 1.6 | 1.5 | - | 0.7 | - | 0.7 |
| 2000 | 0.7 | 1.3 | - | - | - | 1.0 | - | - | 1.0 | - | - | - | 0.9 | 1.2 | - | 0.5 | - | 0.8 |

## 2.1.2 Stickoxide ($NO_x$)

$NO_x$ ist die Summe aus NO und $NO_2$. $NO_x$ wird primär als NO hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen freigesetzt und in der Atmosphäre teilweise zu $NO_2$ oxidiert, im Wesentlichen durch Ozon ($O_3$). Abhängig von der Sonnenstrahlung stellt sich innerhalb weniger Minuten ein Gleichgewicht zwischen NO, $NO_2$ und $O_3$ ein, das bei geringen NOx-Konzentrationen, hohen $O_3$-Konzentrationen und hoher Strahlung weitgehend auf der Seite des $NO_2$ liegt, d.h. das $NO_x$ besteht unter diesen Bedingungen überwiegend aus $NO_2$ und nur in geringem Maße aus NO, vor allem im Sommerhalbjahr. Dies ist an den in ländlichen Regionen gelegenen Stationen des UBA-Messnetzes bei den mittleren Konzentrationen von NO und $NO_2$ meistens der Fall. So lagen beispielsweise an den personell besetzten UBA-Stationen im Jahresmittel (1997-2001) zwischen 88 und 98% des $NO_x$ als $NO_2$ vor (siehe Abbildung 9). An den Containerstationen lagen im gleichen Zeitraum zwischen 77 und 97% des $NO_x$ als $NO_2$ vor, wobei die niedrigeren Werte an Stationen beobachtet wurden, die durch regionale Quellen hauptsächlich aus dem Straßenverkehr beeinflusst werden. Noch wesentlich niedriger ist der $NO_2$-Anteil in einer Stadt wie beispielsweise Frankfurt/Main. In einer überwiegenden Wohngegend (Westend) lagen im Jahresmittel (1997-2001) 43.5% des NOx als $NO_2$ vor, an einer verkehrsreichen Station (Hauptwache) nur 38.0%.

In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind für $NO_2$ und NO die Monats- und Jahresmittel für 2001, sowie deren maximale monatliche Halbstundenwerte (Tabelle 13 und Tabelle 14) zusammengestellt. Die höchsten $NO_2$-Jahresmittel wurden an den Stationen Gittrup mit 22 $\mu g/m^3$, gefolgt von Aukrug mit 13 $\mu g/m^3$, die niedrigsten mit 5 $\mu g/m^3$ an der Bergstation Schauinsland im Schwarzwald gemessen. Die deutlich höchsten NO-Jahreswerte (6.2 $\mu g/m^3$) wurden ebenfalls an der verkehrsbeeinflussten Station Gittrup (Nordrhein-Westfalen) festgestellt, die niedrigsten Werte wurden an den Bergstationen Schauinsland und Brotjacklriegel (Bayerischer Wald) mit 0.3 $\mu g/m^3$ bzw. 0.2 $\mu g/m^3$ beobachtet. Die höchsten $NO_2$-Halbstundenwerte (Tabelle 13) wurden mit 102 $\mu g/m^3$ an der Station Deuselbach gemessen, die höchsten NO-Halbstundenwerte mit 144 $\mu g/m^3$ an der Station Gittrup. (Tabelle 14)

Die monatlichen 50-Perzentilwerte für $NO_2$ und NO sind in Tabelle 15 und Tabelle 16, die entsprechenden 98-Perzentile in Tabelle 17 und Tabelle 18 zu finden. In Tabelle 19 und Tabelle 20 sind die jährlichen Perzentilwerte für $NO_2$ und NO zusammen mit den Maxima und Minima der Halbstundenwerte zusammengestellt. Bei $NO_2$ und vor allem bei NO liegen die Messwerte für eine Reihe von Stationen beim 25-Perzentil ($NO_2$) und z.T. sogar beim 90-Perzentil (NO) unterhalb der Nachweisgrenze, die in Tabelle 19 und Tabelle 20 anstelle gemessener Konzentrationen angegeben wird. Zu beachten ist dabei, dass die Nachweisgrenzen an den personell besetzten Stationen wegen der dort eingesetzten empfindlicheren Messgeräte z.T. erheblich niedriger liegen als an den Containerstationen.

Der in der TA Luft angegebene Grenzwert für das 98-Perzentil zum Schutz der menschlichen Gesundheit von 200 $\mu g/m^3$ wurde an keiner UBA-Station auch nur annähernd erreicht. Der höchste Wert für das 98-Perzentil betrug 30 $\mu g/m^3$.

Die mit dem nasschemischen Saltzman-Verfahren seit 1968 ermittelten $NO_2$-Konzentrationen weichen von den mittels des genaueren kontinuierlichen Chemilumineszenz-Verfahrens (seit Mitte der 80er Jahre im Einsatz) gewonnenen Werten ab. Die Messergebnisse des Saltzman-Verfahrens sind deshalb nur für Betrachtungen zum Langzeittrend verwendbar.

In Tabelle 21 und Tabelle 22 sind die durch kontinuierliche Messungen bestimmten Jahresmittelwerte (1987-2001) für $NO_2$ (Tabelle 22) und NO (Tabelle 21) zusammengestellt, während die Tabelle 23 die mittels Saltzman-Verfahren nasschemisch ermittelten $NO_2$-Jahresmittelwerte enthält (1969-2001). Diese sind in Abbildung 12 graphisch dargestellt. Im Gegensatz zu $SO_2$ ist die $NO_2$-Belastung an den in ländlichen Regionen gelegenen Stationen des UBA-Messnetzes während der letzten 15 Jahre nur leicht zurückgegangen. An den Bergstationen Schauinsland und Brotjacklriegel sowie an der Nordseestation Westerland ist dagegen während der letzten Jahrzehnte kein entsprechender Rückgang der $NO_2$-Jahresmittel festzustellen, wahrscheinlich durch die vergleichsweise stärkeren Beiträge des Ferntransportes zu den gemessenen $NO_2$-Werten.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich die erhebliche Reduzierung der $NO_x$-Emissionen in Deutschland um mehr als 40% zwischen 1990 und 2001-im Gegensatz zu $SO_2$- (siehe Abbildung 11) nicht in einer entsprechenden Verminderung der $NO_x$-Konzentrationen an den Messstellen im UBA-Messnetz niedergeschlagen hat. Lediglich bei den oberen monatlichen 98-, 95- und 90-Perzentilen lässt sich der Rückgang nachweisen (siehe Abbildung 10). Ein wesentlicher Grund für die nur geringe Abnahme der $NO_x$-Konzentrationen in Deutschland dürfte der hohe Beitrag des Ferntransportes aus den europäischen Nachbarstaaten sowie möglicherweise auch die Nichtberücksichtigung der $NO_x$-Emissionen aus der Landwirtschaft (vor allem aus gedüngten Böden) in den UBA-Emissionsinventaren sein.

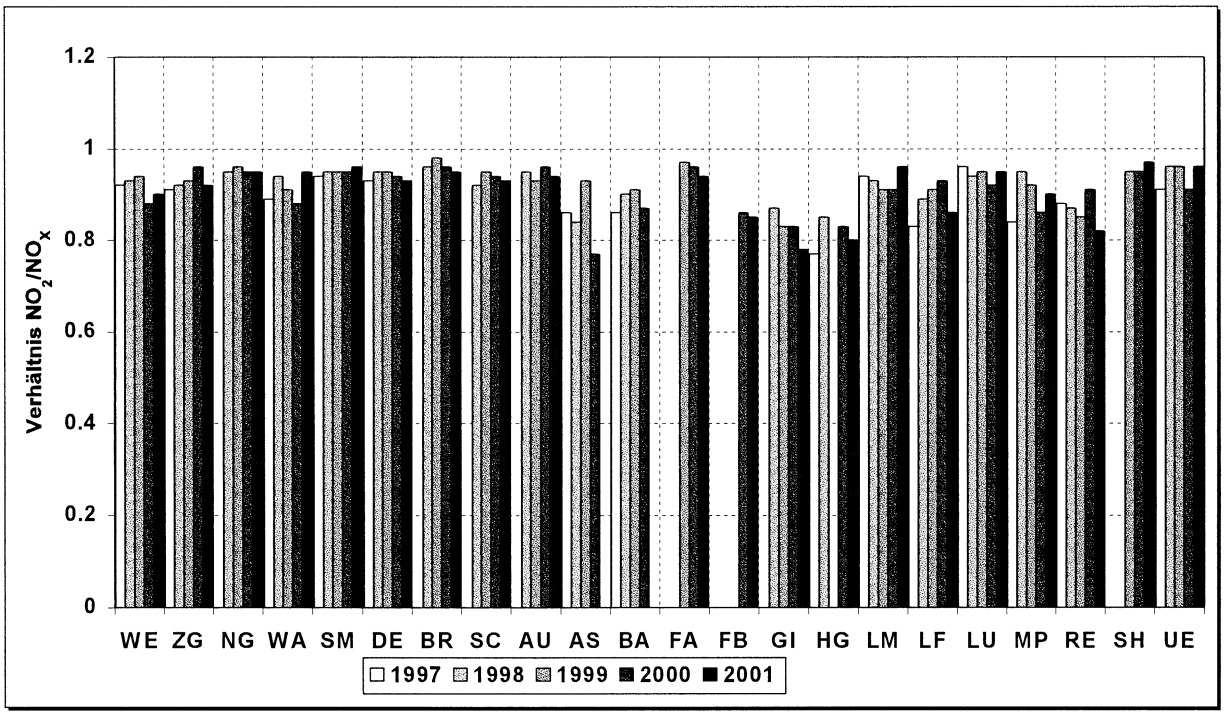



Abbildung 9: Mittleres jährliches Verhältnis der Konzentrationen von $NO_2$ zu $NO_x$ (NO + $NO_2$, jeweils in ppb) für den Zeitraum 1997 - 2001.

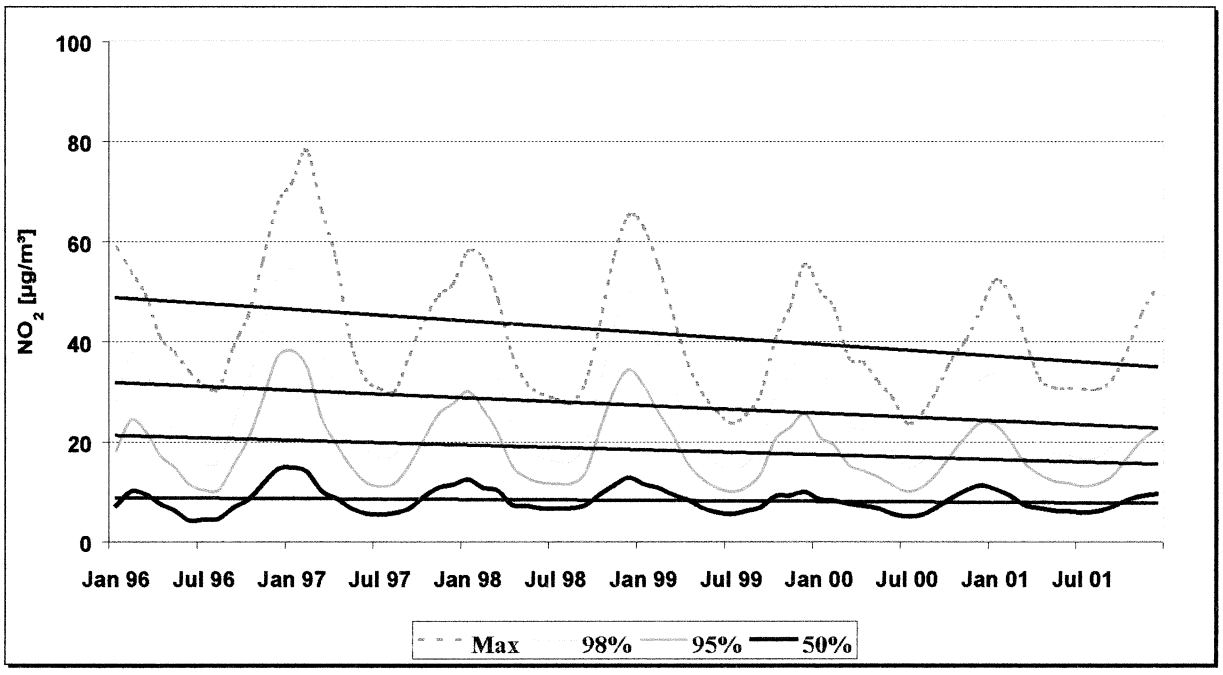



Abbildung 10: Monatliche Perzentile von Stickstoffdioxid von Januar 1996 bis Dezember 2001, gemittelt über die 8 personell besetzten Messstellen, kontinuierliches Messverfahren, Trace Level Geräte.

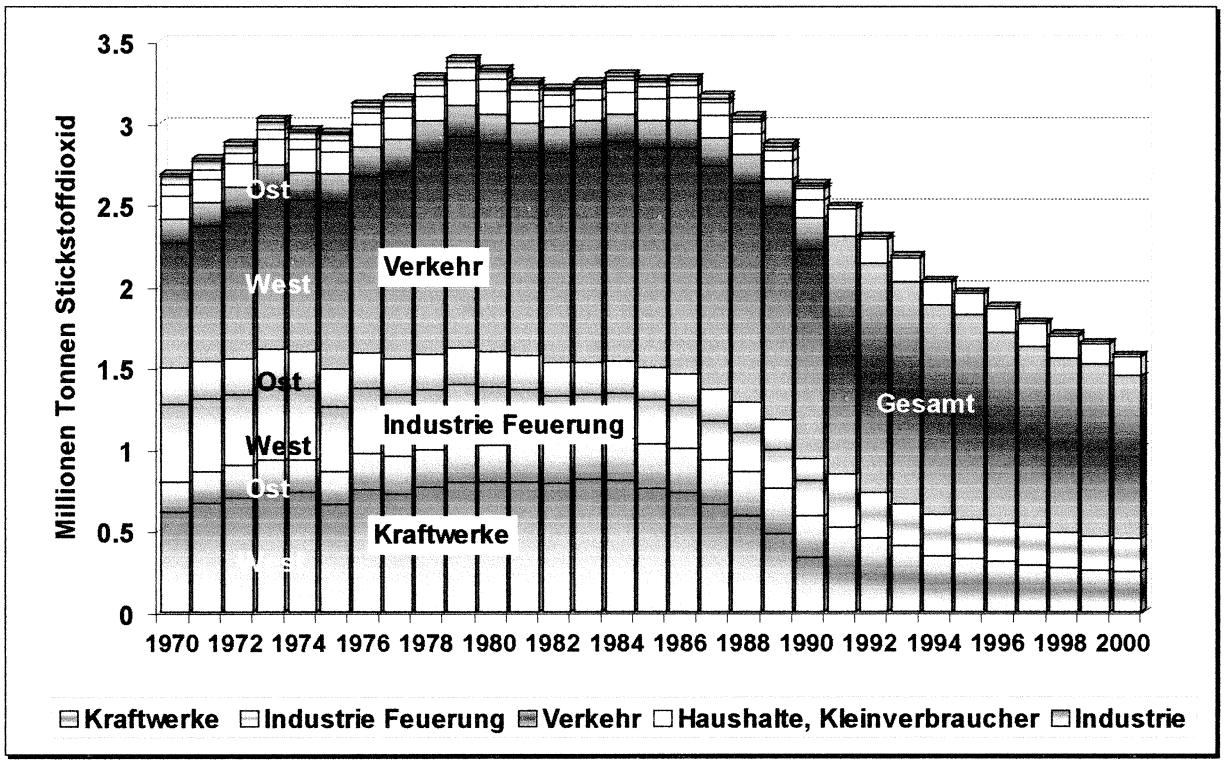



Abbildung 11: Jährliche Stickstoffoxid-Emissionen (berechnet als $NO_2$) in Deutschland von 1970 bis 2000 *(Ref. 1)*

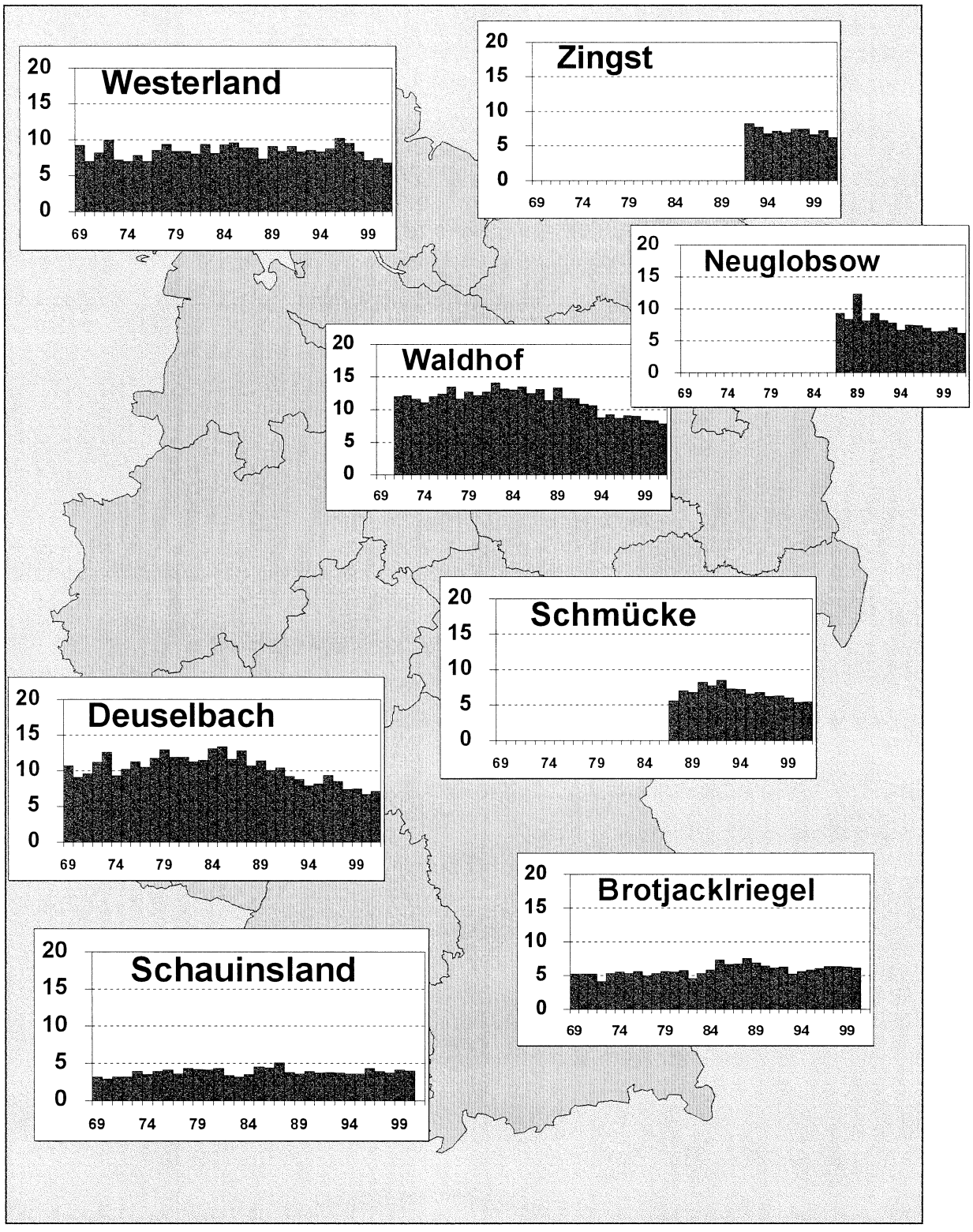



Abbildung 12: Jahresmittel von Stickstoffdioxid für 1969 bis 2001 in $\mu g/m^3$ an den personellen Messstellen des UBA, nasschemisches Saltzman-Messverfahren

Tabelle 11: Monats- und Jahresmittel, Stickstoffdioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 16 | 7 | 2 | 6 | 5 | 4 | 4 | 7 | - | - | - | - | 7 |
| ZG | 19 | 11 | 10 | 11 | 12 | 7 | 8 | 8 | 8 | 11 | 11 | 9 | 11 |
| HG | 24 | 12 | 11 | 10 | 8 | 6 | 6 | 10 | - | - | - | - | 11 |
| AU | 24 | - | - | 13 | 9 | 7 | 9 | 11 | 11 | 18 | 18 | 16 | 13 |
| UE | 13 | 11 | 11 | 9 | 5 | 5 | 6 | 7 | 7 | 10 | 8 | 10 | 8 |
| NG | 15 | 7 | 8 | 7 | 4 | 4 | 4 | 6 | 7 | 10 | 11 | 11 | 8 |
| SH | 19 | 10 | 10 | 6 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 7 | - | 4 | 7 |
| BA | 21 | 12 | 22 | - | - | 10 | - | - | - | - | 19 | 17 | - |
| WA | 16 | 11 | 11 | - | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 13 | 16 | 15 | 12 |
| GI | 31 | 23 | 33 | 21 | 15 | 14 | 12 | - | - | 22 | 29 | 24 | 22 |
| FA | 14 | 9 | 9 | 9 | 7 | 8 | 5 | 7 | 8 | 12 | 12 | 10 | 9 |
| MP | 16 | 12 | 12 | 10 | 9 | 10 | 7 | 12 | 11 | 13 | 18 | 18 | 12 |
| LF | 15 | 12 | 18 | 12 | 7 | 6 | 7 | 9 | 11 | 18 | - | 15 | 12 |
| LM | 15 | 12 | 11 | 8 | 6 | 6 | 3 | 8 | 8 | 11 | 12 | 14 | 10 |
| LU | 13 | 11 | 10 | 7 | 6 | 5 | 5 | 3 | 4 | 7 | 11 | 9 | 8 |
| SM | 12 | 11 | 11 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 | 9 | 9 | 12 | 12 | 9 |
| RE | 15 | 15 | 12 | - | 9 | 9 | 6 | 6 | 10 | 11 | 13 | 17 | 11 |
| DE | 17 | 16 | 11 | - | 9 | 7 | 7 | 7 | 8 | 11 | 16 | 17 | 11 |
| AS | 22 | 20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 15 | 19 | 19 | - |
| FB | - | 10 | 7 | 8 | 7 | 8 | 5 | 4 | 6 | 7 | 11 | 9 | 7 |
| BR | 11 | - | 8 | 5 | 6 | 7 | 6 | 5 | 8 | 10 | - | - | 8 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 5 | 7 | - | 12 | 14 | - |
| SC | 4 | 6 | 4 | 5 | 7 | 6 | - | 4 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 |

Tabelle 12: Monats- und Jahresmittel, Stickstoffmonoxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 1.6 | 0.6 | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.7 | - | - | - | - | 0.6 |
| ZG | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.5 |
| HG | 3.1 | 1.6 | 2.2 | 1.8 | 1.4 | 1.3 | 1.6 | 1.8 | - | - | - | - | 1.9 |
| AU | 3.3 | - | - | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 1.7 | 2.3 | 3.2 | 3.3 | 3.7 | 2.2 |
| UE | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 1.3 | 1.3 |
| NG | 0.8 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.8 | 0.5 | 0.4 | 0.4 |
| SH | 1.6 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.4 | - | 1.2 | 1.3 |
| BA | 5.4 | 2.6 | 2.3 | - | - | 1.4 | - | - | - | - | 3.7 | 5.2 | - |
| WA | 0.8 | 0.3 | 0.4 | - | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.5 | 0.9 | 0.9 | 1.5 | 0.7 |
| GI | 10.5 | 5.5 | 4.2 | 2.7 | 2.8 | 2.2 | 2.4 | - | - | 6.0 | 16.2 | 8.7 | 6.2 |
| FA | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.7 | 2.0 | 1.4 | 1.4 |
| MP | 2.5 | 2.2 | 1.5 | 2.0 | 1.7 | 1.4 | 1.5 | 2.6 | 1.8 | 3.0 | 1.9 | 2.6 | 2.1 |
| LF | 3.1 | 1.6 | 1.9 | 1.3 | 1.5 | 1.3 | 1.4 | 1.3 | 1.6 | 2.1 | - | 4.1 | 1.9 |
| LM | 1.3 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 1.3 | 1.9 | 1.3 |
| LU | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 3.7 | 1.4 | 1.6 | 1.5 |
| SM | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.8 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.4 |
| RE | 1.5 | 1.6 | 1.4 | - | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.7 | 1.4 | 4.0 | 2.8 | 1.8 |
| DE | 2.1 | 1.0 | 0.6 | - | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 1.1 | 1.5 | 0.8 |
| AS | 5.4 | 4.1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4.6 | 9.8 | 7.2 | - |
| FB | - | 2.4 | 1.4 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.6 | 1.8 | 1.4 |
| BR | 0.3 | - | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | - | - | 0.2 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 2.0 | 1.5 | - | 2.3 | 3.5 | - |
| SC | 0.2 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | - | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |

Tabelle 13: Monatsmaxima der Halbstundenwerte, Stickstoffdioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 70 | 42 | 15 | 34 | 30 | 31 | 36 | 64 | - | - | - | - |
| ZG | 57 | 49 | 39 | 42 | 80 | 32 | 34 | 55 | 33 | 34 | 54 | 51 |
| HG | 64 | 52 | 56 | 57 | 34 | 42 | 42 | 50 | - | - | - | - |
| AU | 63 | - | - | 48 | 51 | 41 | 39 | 54 | 38 | 53 | 78 | 54 |
| UE | 40 | 49 | 55 | 30 | 35 | 23 | 34 | 33 | 45 | 28 | 47 | 48 |
| NG | 47 | 43 | 37 | 34 | 14 | 16 | 17 | 24 | 24 | 33 | 44 | 42 |
| SH | 57 | 36 | 59 | 34 | 26 | 23 | 19 | 34 | 29 | 40 | - | 31 |
| BA | 55 | 57 | 70 | - | - | 32 | - | - | - | - | 67 | 53 |
| WA | 42 | 47 | 47 | - | 28 | 58 | 39 | 38 | 35 | 31 | 48 | 49 |
| GI | 78 | 76 | 79 | 65 | 69 | 50 | 51 | - | - | 57 | 72 | 63 |
| FA | 55 | 33 | 47 | 30 | 20 | 44 | 29 | 28 | 42 | 48 | 70 | 43 |
| MP | 38 | 42 | 33 | 27 | 26 | 43 | 32 | 44 | 28 | 33 | 43 | 66 |
| LF | 56 | 56 | 56 | 46 | 50 | 38 | 49 | 54 | 39 | 61 | - | 52 |
| LM | 46 | 63 | 46 | 43 | 25 | 28 | 28 | 37 | 60 | 38 | 48 | 53 |
| LU | 42 | 43 | 35 | 24 | 41 | 30 | 37 | 22 | 27 | 23 | 43 | 43 |
| SM | 54 | 66 | 41 | 25 | 25 | 20 | 25 | 15 | 49 | 34 | 48 | 60 |
| RE | 57 | 60 | 44 | - | 33 | 37 | 28 | 37 | 57 | 47 | 46 | 60 |
| DE | 70 | 102 | 37 | - | 32 | 25 | 34 | 27 | 22 | 50 | 58 | 70 |
| AS | 55 | 83 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 52 | 54 | 65 |
| FB | - | 41 | 24 | 19 | 15 | 18 | 17 | 15 | 18 | 24 | 50 | 43 |
| BR | 50 | - | 35 | 15 | 22 | 29 | 21 | 17 | 23 | 36 | - | - |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 45 | 30 | - | 45 | 55 |
| SC | 45 | 50 | 28 | 27 | 26 | 25 | - | 22 | 19 | 29 | 49 | 37 |

Tabelle 14: Monatsmaxima der Halbstundenwerte, Stickstoffmonoxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 74 | 13 | 9 | 13 | 6 | 6 | 7 | 30 | - | - | - | - |
| ZG | 6 | 9 | 4 | 4 | 10 | 6 | 14 | 5 | 7 | 19 | 9 | 23 |
| HG | 41 | 19 | 41 | 20 | 8 | 11 | 12 | 14 | - | - | - | - |
| AU | 54 | - | - | 16 | 12 | 26 | 27 | 38 | 59 | 58 | 56 | 84 |
| UE | 7 | 15 | 10 | 14 | 12 | 7 | 11 | 28 | 42 | 24 | 36 | 7 |
| NG | 14 | 9 | 9 | 8 | 2 | 3 | 3 | 5 | 7 | 28 | 18 | 12 |
| SH | 31 | 7 | 18 | 4 | 8 | 2 | 7 | 6 | 7 | 8 | - | 2 |
| BA | 47 | 75 | 26 | - | - | 7 | - | - | - | - | 41 | 69 |
| WA | 17 | 5 | 18 | - | 5 | 22 | 6 | 9 | 6 | 17 | 15 | 31 |
| GI | 129 | 96 | 52 | 32 | 91 | 36 | 49 | - | - | 48 | 118 | 144 |
| FA | 17 | 17 | 5 | 7 | 3 | 14 | 7 | 5 | 7 | 15 | 63 | 11 |
| MP | 52 | 42 | 12 | 24 | 25 | 10 | 25 | 41 | 34 | 44 | 38 | 45 |
| LF | 70 | 19 | 27 | 7 | 20 | 11 | 21 | 9 | 16 | 37 | - | 23 |
| LM | 9 | 21 | 7 | 6 | 8 | 17 | 6 | 5 | 5 | 27 | 11 | 25 |
| LU | 7 | 8 | 7 | 4 | 13 | 8 | 8 | 76 | 17 | 46 | 10 | 15 |
| SM | 20 | 5 | 7 | 5 | 13 | 4 | 15 | 2 | 33 | 7 | 10 | 15 |
| RE | 23 | 42 | 22 | - | 12 | 13 | 13 | 10 | 28 | 12 | 61 | 59 |
| DE | 43 | 31 | 13 | - | 5 | 21 | 8 | 5 | 12 | 9 | 27 | 55 |
| AS | 67 | 61 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 57 | 114 | 134 |
| FB | - | 50 | 7 | 4 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4 | 4 | 14 | 28 |
| BR | 4 | - | 8 | 4 | 9 | 12 | 10 | 3 | 17 | 9 | - | - |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 25 | 12 | - | 16 | 34 |
| SC | 19 | 10 | 9 | 8 | 7 | 11 | - | 8 | 7 | 8 | 23 | 8 |

Tabelle 15: Monatliche 50-Perzentile der Halbstundenwerte von Stickstoffdioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverf.

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 15 | 5 | 2 | 4 | 4 | 1 | 3 | 6 | - | - | - | - |
| ZG | 18 | 9 | 10 | 11 | 10 | 6 | 7 | 7 | 8 | 10 | 8 | 7 |
| HG | 21 | 9 | 8 | 8 | 7 | 2 | 5 | 8 | - | - | - | - |
| AU | 23 | - | - | 12 | 7 | 5 | 8 | 9 | 10 | 17 | 15 | 15 |
| UE | 11 | 9 | 9 | 9 | 5 | 4 | 6 | 6 | 7 | 10 | 7 | 9 |
| NG | 14 | 6 | 6 | 6 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 | 9 | 9 | 9 |
| SH | 19 | 8 | 9 | 6 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 7 | - | 2 |
| BA | 19 | 10 | 19 | - | - | 9 | - | - | - | - | 16 | 15 |
| WA | 15 | 10 | 9 | - | 7 | 9 | 10 | 10 | 8 | 12 | 15 | 13 |
| GI | 30 | 21 | 30 | 19 | 14 | 13 | 10 | - | - | 20 | 29 | 22 |
| FA | 12 | 8 | 8 | 8 | 6 | 7 | 5 | 6 | 7 | 11 | 9 | 7 |
| MP | 15 | 12 | 11 | 10 | 8 | 9 | 6 | 11 | 11 | 13 | 16 | 16 |
| LF | 11 | 9 | 16 | 10 | 5 | 5 | 6 | 7 | 10 | 16 | 18 | 12 |
| LM | 14 | 8 | 9 | 7 | 5 | 5 | 2 | 7 | 6 | 9 | 11 | 11 |
| LU | 12 | 9 | 9 | 7 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 6 | 8 | 6 |
| SM | 10 | 9 | 10 | 7 | 8 | 7 | 6 | 6 | 8 | 9 | 9 | 10 |
| RE | 14 | 12 | 11 | - | 8 | 9 | 5 | 6 | 8 | 9 | 11 | 13 |
| DE | 11 | 13 | 9 | - | 9 | 7 | 6 | 6 | 7 | 9 | 14 | 13 |
| AS | 21 | 18 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 13 | 17 | 15 |
| FB | - | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 2 | 5 | 7 | 9 | 7 |
| BR | 9 | - | 8 | 5 | 6 | 6 | 6 | 4 | 7 | 9 | - | - |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 6 | - | 10 | 11 |
| SC | 3 | 5 | 3 | 4 | 6 | 5 | - | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 |

Tabelle 16: Monatliche 50-Perz. der Halbstundenwerte von Stickstoffmonoxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverf.

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | - | - | - | - |
| ZG | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.3 |
| HG | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | - | - | - | - |
| AU | 1.2 | - | - | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| UE | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| NG | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| SH | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | - | 1.2 |
| BA | 1.2 | 1.2 | 1.2 | - | - | 1.2 | - | - | - | - | 1.2 | 2.2 |
| WA | 0.1 | 0.1 | 0.1 | - | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| GI | 2.8 | 1.2 | 2.1 | 1.9 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | - | - | 3.1 | 5.7 | 1.2 |
| FA | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| MP | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| LF | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 3.2 |
| LM | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| LU | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| SM | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| RE | 1.2 | 1.2 | 1.2 | - | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| DE | 0.1 | 0.1 | 0.1 | - | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| AS | 2.5 | 1.2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| FB | - | 2.5 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| BR | 0.1 | - | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | - | - |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 1.2 | 1.2 | - | 1.2 | 1.2 |
| SC | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | - | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |

Tabelle 17: Monatliche 98-Perzentile der Halbstundenwerte von Stickstoffdioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverf.

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 15 | 5 | 2 | 4 | 4 | 1 | 3 | 6 | - | - | - | - |
| ZG | 18 | 9 | 10 | 11 | 10 | 6 | 7 | 7 | 8 | 10 | 8 | 7 |
| HG | 21 | 9 | 8 | 8 | 7 | 2 | 5 | 8 | - | - | - | - |
| AU | 23 | - | - | 12 | 7 | 5 | 8 | 9 | 10 | 17 | 15 | 15 |
| UE | 11 | 9 | 9 | 9 | 5 | 4 | 6 | 6 | 7 | 10 | 7 | 9 |
| NG | 14 | 6 | 6 | 6 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 | 9 | 9 | 9 |
| SH | 19 | 8 | 9 | 6 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 7 | - | 2 |
| BA | 19 | 10 | 19 | - | - | 9 | - | - | - | - | 16 | 15 |
| WA | 15 | 10 | 9 | - | 7 | 9 | 10 | 10 | 8 | 12 | 15 | 13 |
| GI | 30 | 21 | 30 | 19 | 14 | 13 | 10 | - | - | 20 | 29 | 22 |
| FA | 12 | 8 | 8 | 8 | 6 | 7 | 5 | 6 | 7 | 11 | 9 | 7 |
| MP | 15 | 12 | 11 | 10 | 8 | 9 | 6 | 11 | 11 | 13 | 16 | 16 |
| LF | 11 | 9 | 16 | 10 | 5 | 5 | 6 | 7 | 10 | 16 | 18 | 12 |
| LM | 14 | 8 | 9 | 7 | 5 | 5 | 2 | 7 | 6 | 9 | 11 | 11 |
| LU | 12 | 9 | 9 | 7 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 6 | 8 | 6 |
| SM | 10 | 9 | 10 | 7 | 8 | 7 | 6 | 6 | 8 | 9 | 9 | 10 |
| RE | 14 | 12 | 11 | - | 8 | 9 | 5 | 6 | 8 | 9 | 11 | 13 |
| DE | 11 | 13 | 9 | - | 9 | 7 | 6 | 6 | 7 | 9 | 14 | 13 |
| AS | 21 | 18 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 13 | 17 | 15 |
| FB | - | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 5 | 2 | 5 | 7 | 9 | 7 |
| BR | 9 | - | 8 | 5 | 6 | 6 | 6 | 4 | 7 | 9 | - | - |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 6 | - | 10 | 11 |
| SC | 3 | 5 | 3 | 4 | 6 | 5 | - | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 |

Tabelle 18: Monatliche 98-Perz. der Halbstundenwerte von Stickstoffmonoxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverf.

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 15.1 | 4.4 | 3.0 | 3.9 | 2.5 | 1.9 | 1.4 | 3.4 | - | - | - | - |
| ZG | 3.2 | 2.5 | 2.1 | 2.2 | 3.6 | 1.8 | 3.2 | 2.3 | 2.4 | 4.0 | 3.1 | 3.6 |
| HG | 20.4 | 5.0 | 14.2 | 6.9 | 3.8 | 2.9 | 4.7 | 5.8 | - | - | - | - |
| AU | 21.9 | - | - | 2.8 | 4.3 | 3.3 | 5.4 | 8.7 | 17.4 | 24.5 | 31.3 | 37.5 |
| UE | 2.5 | 2.5 | 3.0 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.9 | 3.5 | 3.0 | 3.2 | 2.5 |
| NG | 6.1 | 4.2 | 3.1 | 1.2 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 1.3 | 2.3 | 5.1 | 4.0 | 3.4 |
| SH | 5.3 | 2.9 | 2.9 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 3.8 | - | 1.2 |
| BA | 30.9 | 16.4 | 11.1 | - | - | 3.9 | - | - | - | - | 27.4 | 31.1 |
| WA | 7.1 | 5.5 | 2.8 | - | 2.5 | 3.8 | 3.7 | 3.0 | 3.1 | 6.5 | 10.0 | 19.2 |
| GI | 73.3 | 46.0 | 23.1 | 14.0 | 15.6 | 7.9 | 13.6 | - | - | 26.8 | 80.8 | 76.6 |
| FA | 4.1 | 2.8 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.5 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 8.3 | 7.4 | 5.0 |
| MP | 14.1 | 16.6 | 5.9 | 7.8 | 7.2 | 4.7 | 5.1 | 14.7 | 9.3 | 18.3 | 9.7 | 19.0 |
| LF | 21.4 | 6.1 | 6.9 | 3.1 | 4.9 | 2.7 | 4.1 | 3.2 | 6.7 | 13.1 | 5.2 | 14.7 |
| LM | 2.8 | 4.9 | 2.6 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 4.0 | 3.2 | 19.2 |
| LU | 2.8 | 3.6 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 35.3 | 4.8 | 6.9 |
| SM | 3.6 | 3.3 | 2.8 | 1.4 | 1.9 | 1.3 | 1.4 | 0.9 | 9.3 | 2.2 | 4.2 | 6.5 |
| RE | 5.8 | 5.7 | 4.8 | - | 3.4 | 3.1 | 3.5 | 3.0 | 8.5 | 4.4 | 30.7 | 15.0 |
| DE | 26.3 | 7.6 | 5.0 | - | 2.0 | 2.0 | 1.8 | 1.9 | 3.4 | 3.7 | 12.4 | 15.0 |
| AS | 33.6 | 32.6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 28.2 | 62.8 | 58.8 |
| FB | - | 5.2 | 3.8 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.1 | 7.1 | 15.8 |
| BR | 1.7 | - | 2.0 | 1.1 | 0.9 | 0.8 | 1.0 | 0.6 | 1.5 | 1.5 | - | - |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 7.0 | 4.1 | - | 8.1 | 22.9 |
| SC | 1.2 | 2.7 | 2.1 | 2.0 | 2.7 | 1.5 | - | 1.7 | 0.9 | 1.5 | 2.9 | 2.3 |

Tabelle 19: Jährliche Perzentile von Stickstoffdioxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Min | 2% | 5% | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% | 98% | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.7 | 4.2 | 8.8 | 15.5 | 20.7 | 28.0 | 70.3 |
| ZG | 0.2 | 2.1 | 2.8 | 3.6 | 5.4 | 8.7 | 13.5 | 19.7 | 23.9 | 29.4 | 79.8 |
| HG | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 7 | 14 | 25 | 33 | 45 | 64 |
| AU | 2 | 2 | 2 | 2 | 6 | 11 | 19 | 27 | 33 | 40 | 78 |
| UE | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 7 | 11 | 17 | 21 | 27 | 55 |
| NG | 0.2 | 1.8 | 2.3 | 2.8 | 3.9 | 6.1 | 9.8 | 15.5 | 20.1 | 26.3 | 46.5 |
| SH | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 9 | 16 | 22 | 28 | 59 |
| BA | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| WA | 0.2 | 1.9 | 2.8 | 4.0 | 6.4 | 10.3 | 15.6 | 22.4 | 26.7 | 32.0 | 57.5 |
| GI | 2 | 2 | 4 | 6 | 11 | 20 | 31 | 44 | 50 | 58 | 79 |
| FA | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 8 | 12 | 17 | 21 | 27 | 70 |
| MP | 2 | 2 | 2 | 5 | 7 | 11 | 16 | 22 | 26 | 32 | 66 |
| LF | 2 | 2 | 2 | 2 | 6 | 10 | 17 | 25 | 31 | 39 | 67 |
| LM | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 7 | 13 | 20 | 26 | 32 | 63 |
| LU | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 6 | 10 | 16 | 20 | 26 | 43 |
| SM | 0.2 | 2.4 | 3.2 | 3.9 | 5.3 | 7.7 | 11.2 | 16.4 | 21.1 | 28.5 | 65.7 |
| RE | 2 | 2 | 2 | 4 | 6 | 9 | 14 | 22 | 27 | 34 | 60 |
| DE | 0.7 | 2.8 | 3.5 | 4.2 | 5.8 | 8.5 | 13.2 | 21.3 | 29.0 | 40.4 | 102.3 |
| AS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| FB | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 7 | 9 | 13 | 16 | 22 | 50 |
| BR | 0.9 | 2.4 | 3.0 | 3.5 | 4.7 | 6.4 | 9.0 | 12.6 | 15.5 | 20.6 | 50.2 |
| SC | 0.2 | 1.0 | 1.4 | 1.7 | 2.4 | 3.7 | 6.0 | 8.8 | 11.4 | 15.5 | 50.3 |

Tabelle 20: Jährliche Perzentile von Stickstoffmonoxid für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren

| Station | Min | 2% | 5% | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% | 98% | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 1.4 | 2.3 | 4.1 | 77.4 |
| ZG | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.6 | 1.2 | 1.8 | 2.8 | 22.9 |
| HG | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 8 | 41 |
| AU | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.5 | 6.9 | 16.9 | 84.2 |
| UE | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.4 | 42.2 |
| NG | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.8 | 1.4 | 3.0 | 28.2 |
| SH | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.3 | 30.6 |
| BA | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| WA | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 1.6 | 2.9 | 5.9 | 31.2 |
| GI | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.1 | 4.3 | 15.1 | 28.9 | 52.1 | 143.6 |
| FA | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 3.2 | 63.4 |
| MP | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 3.5 | 6.2 | 10.8 | 51.5 |
| LF | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 3.2 | 4.6 | 9.0 | 69.9 |
| LM | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.8 | 27.4 |
| LU | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 76 |
| SM | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 1.0 | 1.7 | 3.1 | 32.7 |
| RE | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.2 | 3.9 | 9.8 | 61.1 |
| DE | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.6 | 1.6 | 2.9 | 6.6 | 54.5 |
| AS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| FB | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.8 | 3.8 | 50.2 |
| BR | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.8 | 1.3 | 17.4 |
| SC | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 22.5 |

Tabelle 21: Jahresmittel von Stickstoffmonoxid, 1987 - 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren, seit 1996 Trace-Level-Geräte an den personellen Messstellen

| Station | WE | ZG | HG | AU | HW | TE | UE | SW | NG | AN | SH | KY | BA | WA | WI | GI | LI | FA | DL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1985 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 5.0 | - | - | - | - | - |
| 1988 | - | - | - | - | 4.3 | - | - | - | - | - | - | - | 3.8 | 2.8 | - | 8.7 | - | - | - |
| 1989 | - | - | - | - | 2.9 | - | - | - | - | - | - | - | 4.9 | 3.7 | - | 16 | - | - | - |
| 1990 | - | - | - | - | 4.2 | - | - | - | - | - | - | - | 3.3 | 1.9 | - | 10 | - | - | - |
| 1991 | - | - | - | - | 4.6 | - | - | 7.1 | - | - | - | 6.3 | 5.0 | 3.7 | 2.0 | 11 | 2.4 | - | 2.8 |
| 1992 | - | 1.5 | - | - | 2.7 | 2.8 | 1.6 | 5.0 | 1.7 | 2.0 | - | 4.6 | 3.5 | 2.5 | 1.9 | 13 | 1.7 | - | 2.4 |
| 1993 | - | 1.4 | - | - | 2.4 | 3.1 | 2.1 | 5.9 | 1.4 | 2.0 | - | 4.1 | 2.7 | 2.5 | 1.6 | 13 | 1.9 | - | 4.9 |
| 1994 | - | 1.4 | - | - | 1.9 | 3.5 | 1.7 | 4.2 | 1.4 | 2.4 | - | 4.7 | 2.3 | 2.2 | - | 6.1 | 1.9 | - | 2.8 |
| 1995 | - | 1.5 | - | - | 2.0 | 4.4 | 2.0 | 4.3 | 1.6 | 3.2 | - | 5.4 | 2.4 | 1.8 | 5.0 | 7.1 | 1.8 | - | 2.5 |
| 1996 | 1.6 | 1.5 | 1.9 | - | 2.7 | 4.3 | 2.1 | 5.4 | 1.7 | 2.5 | - | 3.9 | 2.8 | 1.9 | 4.9 | 6.5 | 1.7 | - | 2.6 |
| 1997 | 1.5 | 0.8 | 2.7 | - | 3.4 | 4.1 | 2.0 | 4.6 | 0.7 | 2.9 | - | 4.7 | 2.6 | 1.4 | - | 8.1 | 1.8 | - | 2.8 |
| 1998 | 1.2 | 0.7 | 1.9 | - | - | 2.7 | 1.5 | - | 0.8 | 2.6 | - | - | 2.4 | 1.2 | 2.1 | 6.0 | 1.3 | - | 1.8 |
| 1999 | 0.7 | 0.5 | 1.5 | 2.2 | - | - | 1.5 | - | 0.5 | - | 1.5 | - | - | 0.8 | - | - | - | 1.4 | - |
| 2000 | 0.8 | 0.6 | - | 2.2 | - | - | 1.6 | - | 0.7 | - | 1.6 | - | 2.2 | 1.0 | - | 4.7 | - | 1.4 | - |
| 2001 | 0.6 | 0.5 | - | 2.2 | - | - | 1.3 | - | 0.4 | - | 1.3 | - | - | 0.7 | - | 6.2 | - | 1.4 | - |

| Station | MP | LF | ME | HE | LM | LU | SM | SZ | RE | DE | AS | OE | BR | FB | RT | SC | MU | RS | ZU |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1985 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.9 | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1988 | - | - | 5.5 | - | - | - | - | - | 2.4 | 1.7 | 4.0 | - | - | - | 7.5 | - | - | - | - |
| 1989 | - | - | 6.1 | - | - | - | - | - | 2.5 | 5.7 | 3.6 | - | - | - | 6.4 | 1.3 | - | - | - |
| 1990 | - | - | 4.1 | 2.2 | - | - | - | - | 2.3 | 4.0 | 3.1 | - | - | - | 7.0 | 1.2 | - | - | - |
| 1991 | - | - | 5.6 | 2.8 | - | - | - | 3.0 | 2.6 | 3.3 | 4.7 | - | 2.6 | - | 3.6 | 1.2 | - | - | - |
| 1992 | - | 2.3 | 5.1 | 2.7 | - | 1.5 | 1.6 | 3.7 | 2.7 | 4.8 | 4.2 | 2.5 | 2.5 | - | 5.4 | 1.3 | - | - | - |
| 1993 | - | 2.4 | 6.8 | 3.2 | - | 1.5 | 1.4 | 3.6 | 2.8 | 4.2 | 2.9 | - | - | - | - | 1.3 | - | - | - |
| 1994 | 2.4 | 1.8 | 3.2 | - | 1.5 | 1.4 | 1.4 | 3.1 | - | 1.5 | 2.6 | - | 2.1 | - | - | 1.3 | - | - | - |
| 1995 | 2.5 | 2.1 | 10 | 5.0 | 1.7 | 1.4 | 1.5 | 2.1 | - | 1.7 | 2.6 | 2.0 | 2.0 | - | - | 1.6 | - | - | - |
| 1996 | 2.7 | 1.6 | 5.2 | 3.5 | 1.7 | 1.5 | 1.3 | 2.4 | 1.5 | 2.3 | 3.2 | 1.7 | 1.7 | - | - | 1.0 | 2.2 | - | 0.9 |
| 1997 | 2.9 | 1.9 | 6.3 | 2.6 | 1.8 | 1.5 | 0.8 | 3.3 | 1.9 | 1.0 | 3.6 | - | - | - | 4.8 | 0.3 | 3.9 | - | 0.1 |
| 1998 | 1.9 | 1.6 | 3.3 | 2.4 | 2.6 | 1.4 | 0.5 | 1.8 | 1.9 | 0.6 | 2.3 | 0.4 | 0.4 | - | 2.4 | 0.3 | 3.1 | - | - |
| 1999 | 2.0 | 1.6 | - | - | 1.3 | 1.4 | 0.4 | - | 1.8 | 0.6 | - | - | 0.3 | - | - | 0.3 | - | - | - |
| 2000 | 2.8 | 1.5 | - | - | 1.6 | 1.3 | 0.4 | - | 1.4 | 0.6 | 2.9 | - | 0.3 | - | - | 0.3 | - | - | - |
| 2001 | 2.1 | 1.9 | - | - | 1.3 | 1.5 | 0.4 | - | 1.8 | 0.8 | - | - | 0.2 | 1.4 | - | 0.3 | - | - | - |

Tabelle 22: Jahresmittel von Stickstoffdioxid, 1987 - 2001 in $\mu g/m^3$, bezogen auf 20 °C, kontinuierliches Messverfahren, seit 1996 Trace-Level-Geräte an den personellen Messstellen

| Station | WE | ZG | HG | AU | HW | TE | UE | SW | NG | AN | SH | KY | BA | WA | WI | GI | LI | FA | DL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1985 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 12 | - | - | - | - | - |
| 1988 | - | - | - | - | 14 | - | - | - | - | - | - | - | 18 | 13 | - | 31 | - | - | - |
| 1989 | - | - | - | - | 17 | - | - | - | - | - | - | - | 23 | 11 | - | 34 | - | - | - |
| 1990 | - | - | - | - | 15 | - | - | - | - | - | - | - | 23 | 8 | - | 28 | - | - | - |
| 1991 | - | - | - | - | 14 | - | - | 16 | - | - | - | 13 | 22 | 10 | 11 | 28 | 13 | - | 13 |
| 1992 | - | 8 | - | - | 18 | 9 | 7 | 17 | 9 | 10 | - | 12 | 24 | 12 | 12 | 26 | 12 | - | 13 |
| 1993 | - | 8 | - | - | 19 | 9 | 8 | 17 | 8 | 11 | - | 13 | 17 | 14 | 9 | 25 | 13 | - | 13 |
| 1994 | - | 8 | - | - | 16 | 14 | 10 | 13 | 7 | 13 | - | 14 | 8 | 14 | - | 22 | 12 | - | 13 |
| 1995 | - | 12 | - | - | 13 | 14 | 8 | 14 | 8 | - | - | 17 | 12 | 13 | 15 | 18 | 11 | - | 11 |
| 1996 | 12 | 10 | 11 | - | 16 | 14 | 10 | 16 | 8 | 14 | - | 15 | 12 | 16 | 18 | 17 | 12 | - | 12 |
| 1997 | 11 | 12 | 12 | - | 14 | 14 | 10 | 14 | - | 12 | - | 16 | 14 | 17 | - | 30 | 11 | - | 11 |
| 1998 | 12 | 13 | 11 | - | - | 11 | 9 | - | 10 | 13 | - | - | 15 | 15 | 11 | 29 | 10 | - | 11 |
| 1999 | 9 | 12 | 9 | 11 | - | - | 12 | - | 9 | - | 8 | - | - | 12 | - | - | - | 8 | - |
| 2000 | 7 | 14 | - | 12 | - | - | 11 | - | 9 | - | 8 | - | 15 | 10 | - | 20 | - | 9 | - |
| 2001 | 7 | 11 | - | 13 | - | - | 8 | - | 8 | - | 7 | - | - | 12 | - | 22 | - | 9 | - |

| Station | MP | LF | ME | HE | LM | LU | SM | SZ | RE | DE | AS | OE | BR | FB | RT | SC | MU | RS | ZU |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1985 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1988 | - | - | 29 | - | - | - | - | - | 23 | 11 | 17 | - | - | - | 16 | - | - | - | - |
| 1989 | - | - | 31 | - | - | - | - | - | 14 | 15 | 21 | - | - | - | 18 | 5 | - | - | - |
| 1990 | - | - | 30 | 16 | - | - | - | - | 17 | 12 | 20 | - | - | - | 16 | 6 | - | - | - |
| 1991 | - | - | 27 | 16 | - | - | - | 16 | 24 | 14 | 20 | - | 8 | - | 19 | 6 | - | - | - |
| 1992 | - | 15 | 29 | 18 | - | 7 | 13 | 16 | 25 | 10 | 21 | 8 | 8 | - | 18 | 5 | - | - | - |
| 1993 | - | 16 | 16 | 16 | - | 10 | 9 | 16 | 17 | - | 18 | - | - | - | - | 6 | - | - | - |
| 1994 | 10 | 12 | 17 | - | 10 | 9 | 9 | 14 | - | 6 | 14 | - | 3 | - | - | 6 | - | - | - |
| 1995 | 11 | 11 | 19 | 15 | 12 | 8 | 9 | 13 | - | 8 | 17 | 5 | 5 | - | - | 6 | - | - | - |
| 1996 | 12 | 11 | 20 | 15 | 15 | 11 | 8 | 15 | 9 | 16 | 18 | 5 | 5 | - | - | 7 | 10 | - | - |
| 1997 | 9 | 12 | 25 | 18 | 11 | 9 | 12 | 16 | 11 | 13 | 19 | - | - | - | 19 | 6 | 10 | - | - |
| 1998 | 11 | 11 | 17 | 16 | 11 | 10 | 11 | 13 | 12 | 12 | 12 | 8 | 8 | - | 14 | 6 | 11 | - | - |
| 1999 | 10 | 10 | - | - | 10 | 9 | 10 | - | 11 | 11 | - | - | 8 | - | - | 5 | - | - | - |
| 2000 | 12 | 11 | - | - | 10 | 7 | 10 | - | 12 | 9 | 15 | - | 8 | - | - | 5 | - | - | - |
| 2001 | 12 | 12 | - | - | 10 | 8 | 9 | - | 11 | 11 | - | - | 8 | 7 | - | 5 | - | - | - |

Tabelle 23: Jahresmittel von Stickstoffdioxid für 1968 bis 1999 in $\mu g/m^3$, nasschemisches Saltzman-Messverfahren

| Stationen | Wester-land | Zingst | Neuglob-sow | Waldhof | Schmücke | Deusel-bach | Brotjackl-riegel | Schau-insland |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1968 | - | - | - | - | - | 6.8 | - | 2.8 |
| 1969 | 9.2 | - | - | - | - | 10.7 | 5.2 | 3.2 |
| 1970 | 7.0 | - | - | 7.3 | - | 9.1 | 5.2 | 2.9 |
| 1971 | 8.2 | - | - | 12.0 | - | 9.6 | 5.2 | 3.2 |
| 1972 | 9.9 | - | - | 12.2 | - | 11.2 | 4.1 | 3.2 |
| 1973 | 7.2 | - | - | 11.6 | - | 12.6 | 5.3 | 3.9 |
| 1974 | 7.0 | - | - | 11.1 | - | 9.3 | 5.5 | 3.5 |
| 1975 | 7.8 | - | - | 12.0 | - | 10.2 | 5.3 | 3.9 |
| 1976 | 7.0 | - | - | 12.4 | - | 11.3 | 5.6 | 4.1 |
| 1977 | 8.5 | - | - | 13.5 | - | 10.5 | 4.9 | 3.6 |
| 1978 | 9.4 | - | - | 11.6 | - | 11.8 | 5.3 | 4.3 |
| 1979 | 8.4 | - | - | 12.7 | - | 13.0 | 5.6 | 4.2 |
| 1980 | 8.4 | - | - | 12.2 | - | 11.9 | 5.5 | 4.1 |
| 1981 | 8.0 | - | - | 12.7 | - | 11.9 | 5.7 | 4.3 |
| 1982 | 9.4 | - | - | 14.1 | - | 11.3 | 4.5 | 3.4 |
| 1983 | 8.1 | - | - | 13.2 | - | 11.5 | 5.3 | 3.2 |
| 1984 | 9.3 | - | - | 13.0 | - | 13.1 | 5.8 | 3.5 |
| 1985 | 9.6 | - | - | 13.5 | - | 13.4 | 7.3 | 4.5 |
| 1986 | 8.9 | - | - | 12.5 | - | 11.6 | 6.6 | 4.4 |
| 1987 | 8.9 | - | 9.3 | 13.1 | 5.6 | 12.8 | 6.7 | 5.1 |
| 1988 | 7.3 | - | 8.3 | 11.4 | 7.0 | 10.7 | 7.5 | 3.8 |
| 1989 | 9.1 | - | 12.3 | 13.3 | 6.8 | 11.4 | 6.8 | 3.6 |
| 1990 | 8.4 | - | 8.1 | 11.7 | 8.2 | 10.1 | 6.4 | 3.9 |
| 1991 | 9.1 | - | - | 11.7 | 7.1 | 10.4 | 6.1 | 3.7 |
| 1992 | 8.3 | 8.2 | 8.2 | 10.9 | 8.5 | 9.2 | 6.2 | 3.8 |
| 1993 | 8.5 | 7.7 | 7.8 | 10.6 | 7.3 | 8.8 | 5.2 | 3.7 |
| 1994 | 8.3 | 6.8 | 6.7 | 8.8 | 7.2 | 7.9 | 5.6 | 3.6 |
| 1995 | 8.7 | 7.1 | 7.5 | 9.2 | 6.6 | 8.2 | 5.8 | 3.6 |
| 1996 | 10.2 | 6.9 | 7.4 | 8.7 | 6.8 | 9.4 | 6.0 | 4.3 |
| 1997 | 9.5 | 7.4 | 7.0 | 9.1 | 6.2 | 8.5 | 6.3 | 3.9 |
| 1998 | 8.3 | 7.4 | 6.9 | 9.0 | 6.3 | 7.4 | 6.3 | 3.7 |
| 1999 | 7.1 | 6.6 | 6.5 | 8.4 | 6.0 | 7.5 | 6.2 | 4.1 |
| 2000 | 7.4 | 7.2 | 7.1 | 8.3 | 5.4 | 6.8 | 6.1 | 4.0 |
| 2001 | 6.7 | 6.1 | 6.2 | 7.8 | 5.4 | 7.1 | - | - |

## 2.1.2 Ozon ($O_3$)

Ozon wird im Gegensatz zu $SO_2$ und $NO_x$ nicht direkt in die Atmosphäre emittiert, sondern bei Sonnenstrahlung aus den sog. Ozonvorläufern ($NO_x$, VOC, CO, $CH_4$) innerhalb der Atmosphäre gebildet.

In Tabelle 26 sind die Monats- und Jahresmittel der Ozon-Konzentrationen und in der Tabelle 27 die maximalen monatlichen Stundenwerte zusammengestellt. Die Jahresmittel nehmen mit zunehmender Stationshöhe zu. Die höchsten Jahreswerte wurden auch im Jahr 2001 an den Bergstationen Schauinsland (84 $\mu g/m^3$), Brotjacklriegel (77 $\mu g/m^3$), Schmücke (71 $\mu g/m^3$) und Forellenbach (69 $\mu g/m^3$) gemessen. Auffallend ist der hohe Jahreswert an der Nordseestation Westerland (63 $\mu g/m^3$), der vor allem auf den dominierenden Beitrag des nordhemisphärischen Ozonhintergrundes zum Jahresmittelwert zurückzuführen ist.

Die maximalen Monatsmittel traten zwischen April und September auf. Die höchsten Monatsmittel wurden mit etwas über 100 $\mu g/m^3$ in den Monaten Mai bis August an den Bergstationen Schauinsland beobachtet, gefolgt von Brotjacklriegel mit knapp 100 $\mu g/m^3$ (Ausnahme: 107 $\mu g/m^3$ im Mai). Die maximalen Stundenwerte wurden an den meisten Stationen in den Monaten Juni, Juli und August 2001 beobachtet (Tabelle 27, siehe auch Kapitel 3.2). Die höchsten Stundenwerte wurden an den Stationen Schauinsland (236 $\mu g/m^3$ im Juni), Helgoland (203 $\mu g/m^3$) sowie Schmücke (195 $\mu g/m^3$ im Juli) und Deuselbach (195 $\mu g/m^3$ im Juni) beobachtet. Zum Vergleich: Der höchste Ozonwert in Deutschland wurde mit 299 $\mu g/m^3$ an der Station Plochingen (bei Stuttgart) beobachtet.

In der Tabelle 28 sind die monatlichen 50-Perzentilwerte, in Tabelle 29 die monatlichen 98-Perzentilwerte und in Tabelle 30 die jährlichen Perzentilwerte für 2001 zusammen mit den Minima und Maxima der Ozonstundenwerte zusammengestellt. Das höchste 98-Jahresperzentil wurde mit 175 $\mu g/m^3$ auf dem Schauinsland gemessen, gefolgt von Regnitzlosau (174 $\mu g/m^3$), Schmücke (172 $\mu g/m^3$), Deuselbach und Gittrup mit je 166 $\mu g/m^3$, d.h. 98% aller Ozonwerte lagen unterhalb dieser Werte. In Abbildung 13 sind monatliche Maxima, 98-, 90- und 50-Perzentile von 1994 bis 2001 dargestellt (Mittel über die 8 personell besetztenen Messstellen). Man erkennt einen leichten Rückgang der Maxima und der höheren Perzentile, kaum aber eine Änderung des Medians. Wie in Abbildung 14 bis Abbildung 16 zu sehen ist, hat auch die jährliche Zahl der Stunden mit Ozonkonzentrationen $>180$ $\mu g/m^3$ und $>240$ $\mu g/m^3$ sowohl im Mittel über alle UBA-Stationen als auch im Mittel über alle deutschen Stationen abgenommen.

Wie aus Tabelle 31, Abbildung 17 und Abbildung 14 zu sehen ist, sind dagegen die Ozon-Jahresmittel zwischen 1990 und 2001 an den meisten Stationen leicht angestiegen. Der Anstieg der Ozon-Mittelwerte in Deutschland, der übrigens auch in anderen Ländern Mitteleuropas (z.B. Österreich, Schweiz, Großbritannien) beobachtet wird, ist auf den Rückgang der NO-Emissionen in Mitteleuropa zurückzuführen, wodurch der Abbau von Ozon in Emittentennähe verringert wird (Titrationseffekt). Hinzu kommt sehr wahrscheinlich auch der Anstieg des nordhemisphärischen Ozon-Hintergrundes, der ebenfalls zu einer Zunahme der Ozon-Mittelwerte führt (*Ref. 4)*.

Vor diesem Hintergrund verwundert es nicht, dass bei den Langfristzielwerten für den Schutz der menschlichen Gesundheit und Vegetation im letzten Jahrzehnt keine Verbesserung

der Situation eingetreten ist, da diese Werte vor allem durch die mittleren Konzentrationen bestimmt werden und nicht durch die Spitzenwerte *(Ref. 5)*. Die neuesten EU-Zielwerte für den Schutz von menschlicher Gesundheit und Vegetation *(Ref. 6)*, die auf den neuesten Erkenntnissen auf dem Gebiet der Wirkungsforschung basieren, sehen wie folgt aus (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24: EU-Zielwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit und Vegetation *(Ref. 6, 7)*

| | | |
|---|---|---|
| **Schutz der menschlichen Gesundheit** | Langfristziel: | 120 $\mu g/m^3$ (gleitendes 8-h-Mittel) |
| | Zwischenziel bis 2010: | 120 $\mu g/m^3$ (gleitendes 8-h-Mittel), 25 Tage/Jahr mit Überschreitungen sind zulässig |
| | Informationsschwelle: | 180 $\mu g/m^3$ (1-h-Mittel) |
| | Alarmschwelle: | 240 $\mu g/m^3$ (1-h-Mittel) |
| **Schutz der Vegetation** | Langfristziel: | 6000 $\mu g/m^3$ h (AOT40, Mai bis Juli) |
| | Zielwert bis 2010: | 18000 $\mu g/m^3$ h (AOT40, Mai bis Juli) |

Bezüglich der Langzeit-Zielwerte erbrachten die Auswertungen der Messungen aus dem UBA-Messnetz folgende Ergebnisse:

### 2.1.3.1 Zielwerte für den Gesundheitsschutz:

Bezüglich der Einhaltung des Zielwertes von 120 $\mu g/m^3$ (gleitendes 8-h-Mittel) ist festzustellen, dass dieser Wert an den Stationen im Messnetz des UBA (ohne Station Zugspitze) im Jahr 2001 an 4 bis 58 Tagen überschritten worden ist. An 10 von 21 UBA-Stationen wurde der bis 2010 zulässige Zielwert von Überschreitungen an 25 Tagen/Jahr nicht eingehalten. Dies betrifft vor allem die Bergstationen.

In Tabelle 25 sind die Zielwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit für alle Stationen im UBA-Messnetz für die Jahre 1990 bis 2001 aufgelistet, wobei die Stationen nach Stationshöhe angeordnet sind. In Abbildung 18 und Abbildung 19 sind diese Werte für die 8 personell besetzten Stationen dargestellt. Folgende Ergebnisse sollen festgehalten werden:

- Die Zahl der Tage mit Überschreitungen der Zielwerte nimmt mit zunehmender Höhenlage der Stationen zu.

- Der bis 2010 zulässige Zielwert von 25 Tagen/Jahr wurde an den 8 personell besetzten Stationen zwischen 1990 und 2001 nur an den beiden norddeutschen Küstenstationen Zingst und Westerland in keinem Jahr erreicht oder überschritten. Die höchste Zahl an Überschreitungen wurde am Schauinsland 57x bzw. am Brotjacklriegel 58x beobachtet.

- Zwischen 1990 und 2001 traten an den 8 personell besetzten Stationen von Jahr zu Jahr erhebliche, meteorologisch bedingte Schwankungen der Zahl der Tage mit

Überschreitungen des EU-Zielwertes von 120 $\mu g/m^3$ (gleitende 8-Stunden-Mittelwerte) auf, ein systematischer Trend ist jedoch nicht erkennbar.

Tabelle 25: Anzahl der Tage/Jahr mit Überschreitungen von gleitenden 8-h-Mitteln >120 $\mu g/m^3$ Ozon an den Messstellen des Umweltbundesamtes zwischen 1990 und 2001. Fett gedruckt: Überschreitungen des bis 2010 zulässigen Zielwertes von 25 Tagen/Jahr. Höhe der Stationen in m über NN.

| | Höhe | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZG | 1 | | 10 | 9 | 10 | 9 | 14 | 15 | 13 | 10 | 7 | 10 | 5 |
| UE | 1 | | 6 | 7 | 9 | 14 | 19 | 19 | 16 | 11 | 10 | 10 | 10 |
| WE | 12 | 13 | 7 | 5 | 12 | 14 | 18 | 17 | 15 | 17 | 13 | 14 | 11 |
| AU | 15 | | | | | | | | | 23 | 14 | 14 | 4 |
| KY | 40 | | 6 | 3 | 14 | 21 | **29** | **29** | **30** | **36** | | | |
| GI | 43 | 11 | 17 | 24 | **35** | **38** | **33** | **30** | 23 | 25 | 21 | 22 | 16 |
| TE | 46 | | 10 | 8 | 12 | 16 | 18 | 15 | 9 | 9 | 4 | | |
| HG | 50 | | | | | | | 20 | 14 | 15 | 13 | 18 | 8 |
| BA | 52 | 20 | 17 | 20 | **31** | **34** | **29** | 22 | 16 | 17 | 15 | 17 | 12 |
| AN | 56 | | **27** | 23 | 23 | **29** | **31** | **26** | 17 | 14 | 18 | | |
| SW | 59 | 0 | 6 | 12 | 19 | **28** | 24 | 23 | 17 | 18 | | | |
| NG | 65 | | 17 | 23 | 24 | **28** | **28** | 24 | 17 | 21 | **28** | **35** | 20 |
| SH | 70 | | | | | | | | | | **30** | **30** | **26** |
| FA | 73 | | | | | | | | | 22 | 21 | 21 | 14 |
| WA | 74 | **31** | **32** | **35** | **47** | **44** | **38** | **29** | 22 | **27** | **29** | **33** | **29** |
| HW | 75 | 12 | 10 | 13 | 19 | **26** | 24 | 21 | 17 | 13 | | | |
| MP | 86 | | | 24 | 25 | **26** | **27** | **26** | 24 | 25 | 22 | 22 | 23 |
| DL | 97 | 5 | 5 | 11 | 14 | 21 | 20 | 23 | **26** | **29** | **34** | | |
| LI | 98 | 2 | 7 | 7 | 18 | 22 | **31** | **29** | **28** | **27** | 24 | | |
| WI | 107 | 22 | 14 | 12 | 7 | 19 | 24 | **26** | 23 | 25 | 19 | | |
| OE | 283 | | | | | | | | | | | | **49** |
| LF | 356 | | 23 | **28** | **25** | **30** | **28** | 25 | 22 | 22 | **26** | **26** | **28** |
| HE | 380 | **34** | **37** | **40** | **48** | **47** | 25 | **29** | 22 | **29** | 20 | | |
| RT | 427 | **32** | **32** | **38** | **52** | **58** | **54** | **46** | **39** | **40** | **28** | | |
| DE | 480 | **56** | **45** | **37** | **37** | **43** | **47** | **50** | **48** | **50** | **37** | **30** | **33** |
| AS | 481 | 10 | 17 | **31** | **44** | **35** | **27** | **27** | **26** | 21 | 23 | **28** | **32** |
| LU | 490 | | 17 | **27** | 20 | **27** | **26** | **30** | **30** | **29** | **33** | **32** | 20 |
| SZ | 500 | 1 | 9 | 16 | **27** | **41** | **39** | **38** | **32** | **35** | **37** | | |
| ME | 510 | 18 | 19 | 19 | 23 | **37** | **34** | **29** | 20 | 19 | | | |
| LM | 527 | | | | **33** | **43** | **40** | **36** | 24 | 22 | **25** | **30** | 23 |
| RS | 552 | | | | | | | | | | | | **29** |
| RE | 595 | 21 | **33** | **37** | **49** | **45** | **40** | **35** | **35** | **30** | **32** | **31** | **36** |
| MU | 622 | | | | | | **42** | **29** | **31** | **26** | **36** | | |
| EB | 816 | | | | | | | | | | | | **29** |
| FB | 858 | | | | | | | | | | | | **33** |
| SM | 937 | | **33** | **39** | **38** | **50** | **52** | **56** | **49** | **53** | **50** | **52** | **42** |
| BR | 1016 | **59** | **47** | **50** | **65** | **76** | **67** | **60** | **60** | **68** | **63** | **61** | **56** |
| SC | 1205 | **73** | **66** | **67** | **66** | **75** | **66** | **69** | **61** | **62** | **55** | **54** | **57** |
| ZU | 2963 | | | | | **95** | **114** | **96** | **119** | **111** | **104** | **97** | |

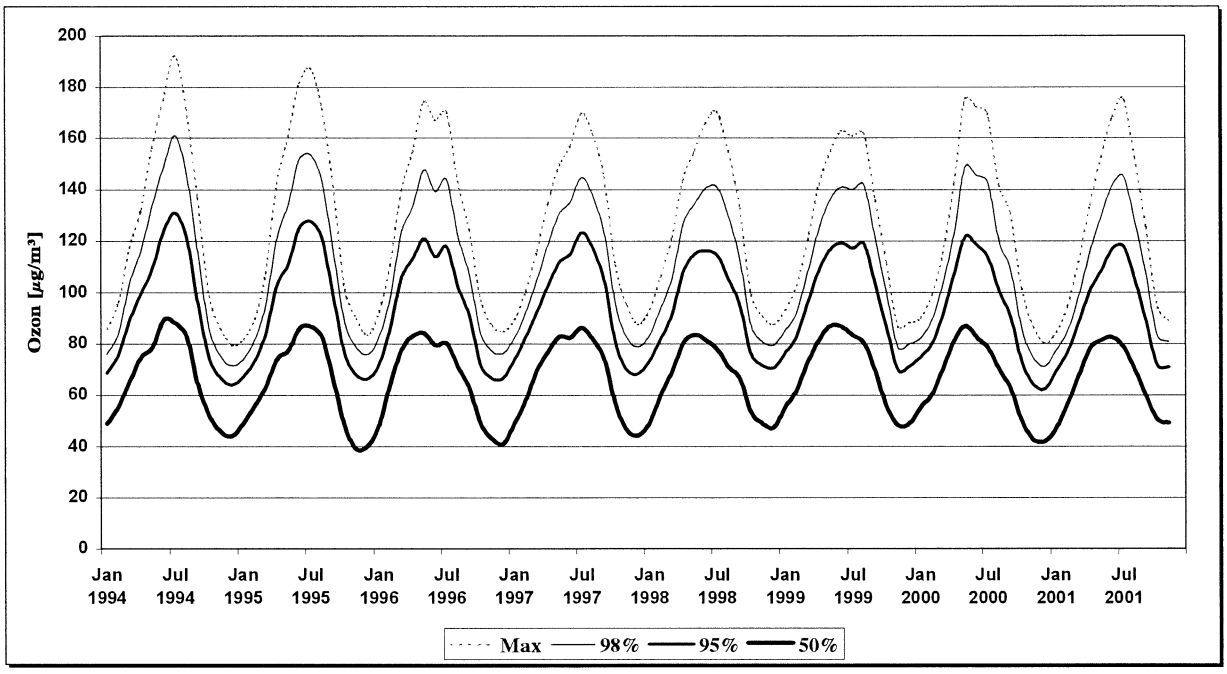



Abbildung 13: Monatliche Maxima, 98-, 90- und 50-Perzentile für Ozon von 1994 bis 2001, gemittelt über die 8 personell besetzten UBA-Messstellen.

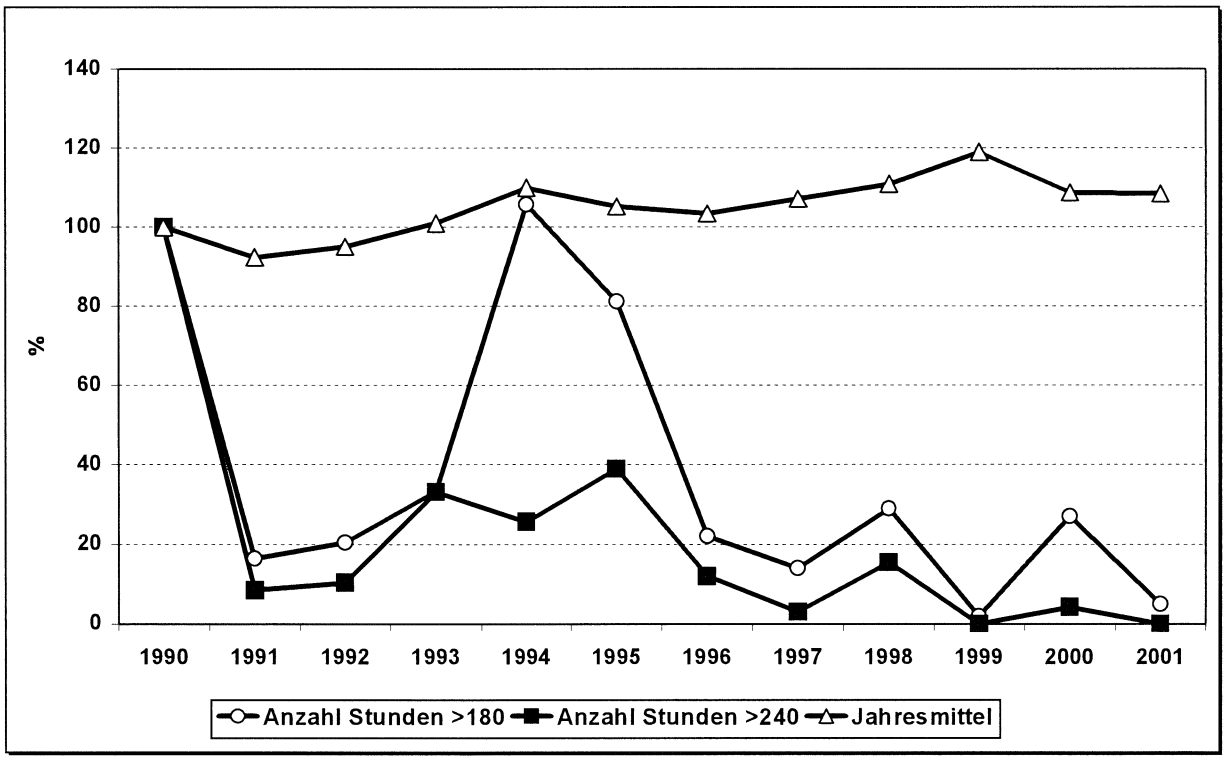



Abbildung 14: Zahl der jährlichen Stunden mit Ozonwerten > 180 $\mu g/m^3$ und > 240 $\mu g/m^3$ sowie Jahresmittel, gemittelt über alle UBA-Stationen und normiert auf 1990

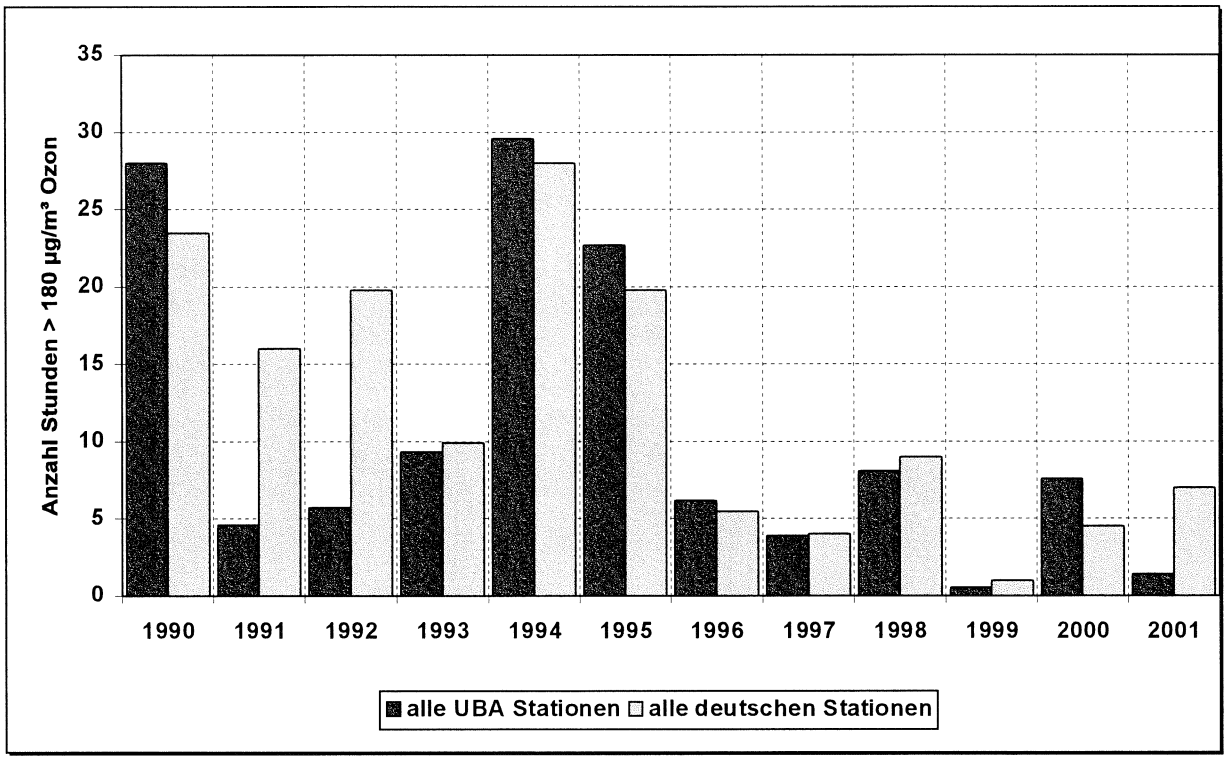



Abbildung 15: Zahl der jährlichen Stunden mit Ozonwerten > 180 $\mu g/m^3$, gemittelt über alle UBA-Stationen (dunkelgrau) und alle deutschen Stationen (hellgrau)

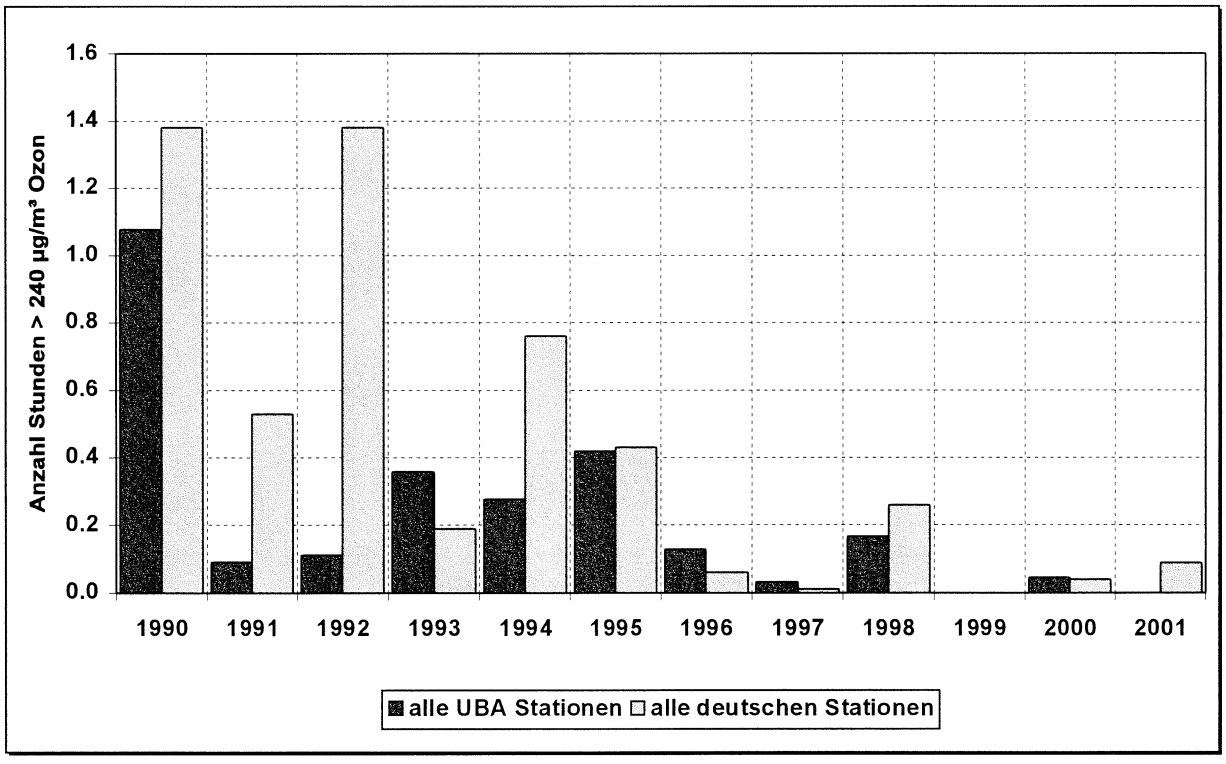



Abbildung 16: Zahl der jährlichen Stunden mit Ozonwerten > 240 $\mu g/m^3$, gemittelt über alle UBA-Stationen (dunkelgrau) und alle deutschen Stationen (hellgrau)

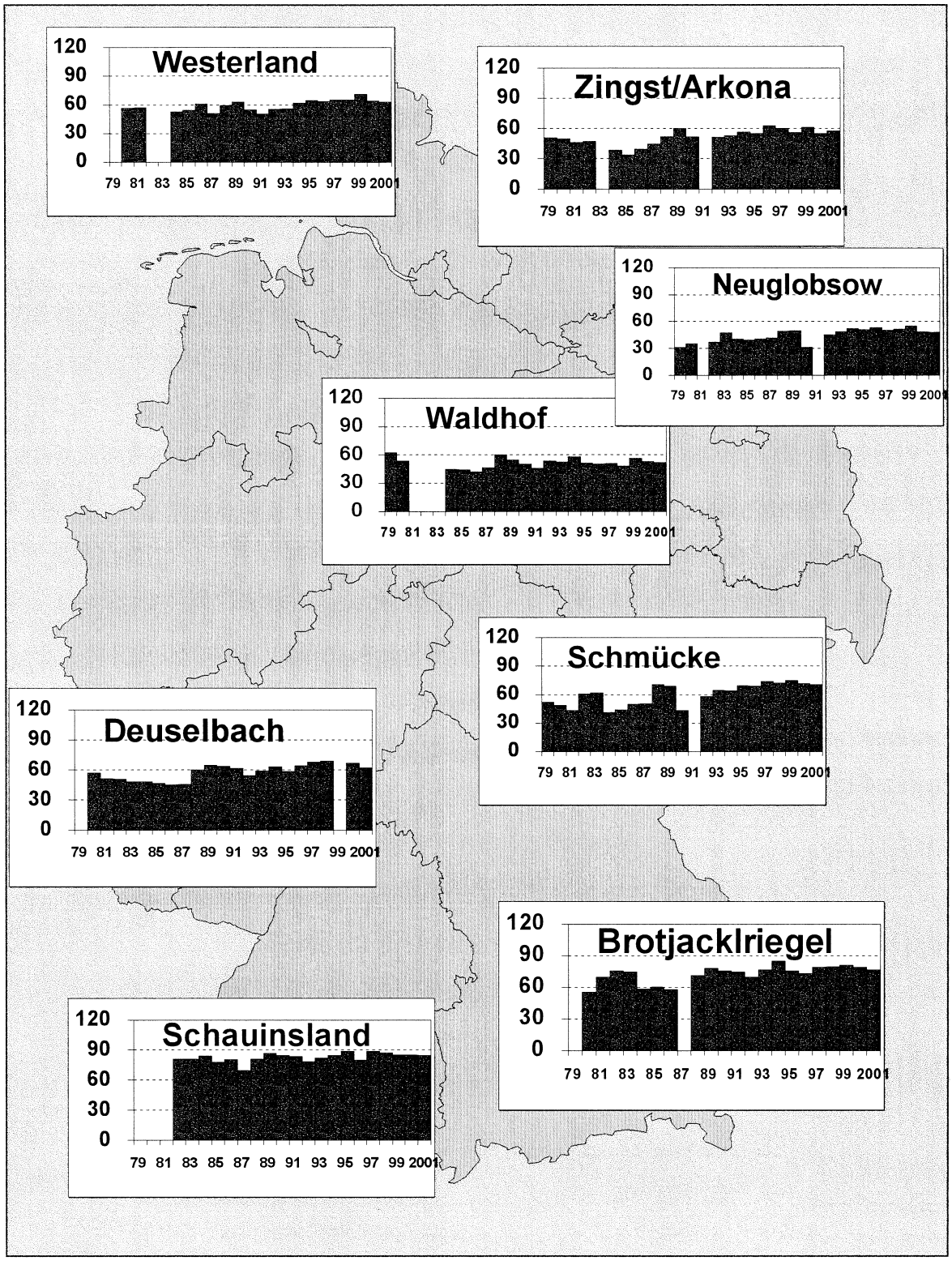



Abbildung 17: Jahresmittel von Ozon für 1969 bis 2001 in $\mu g/m^3$ an den personellen Messstellen des UBA

* *Zingst ab 1993, davor Messungen an der Station Arkona des Meteorologischen Dienstes*

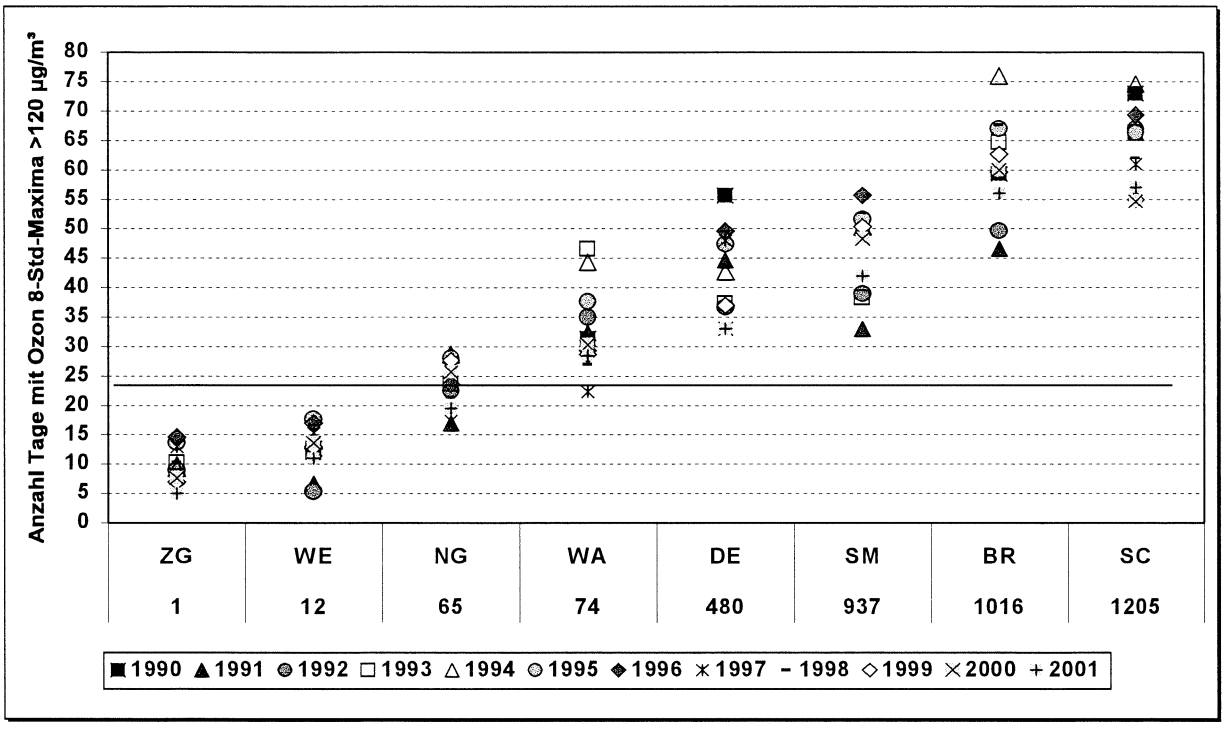



Abbildung 18: Anzahl der Tage/Jahr mit Überschreitungen von gleitenden 8-h-Mitteln >120 µg/m³ Ozon an den 8 personell besetzten Messstellen des Umweltbundesamtes zwischen 1990 und 2001, nach Stationshöhe sortiert (Höhenangaben über NN unter der Stationsbezeichnung).

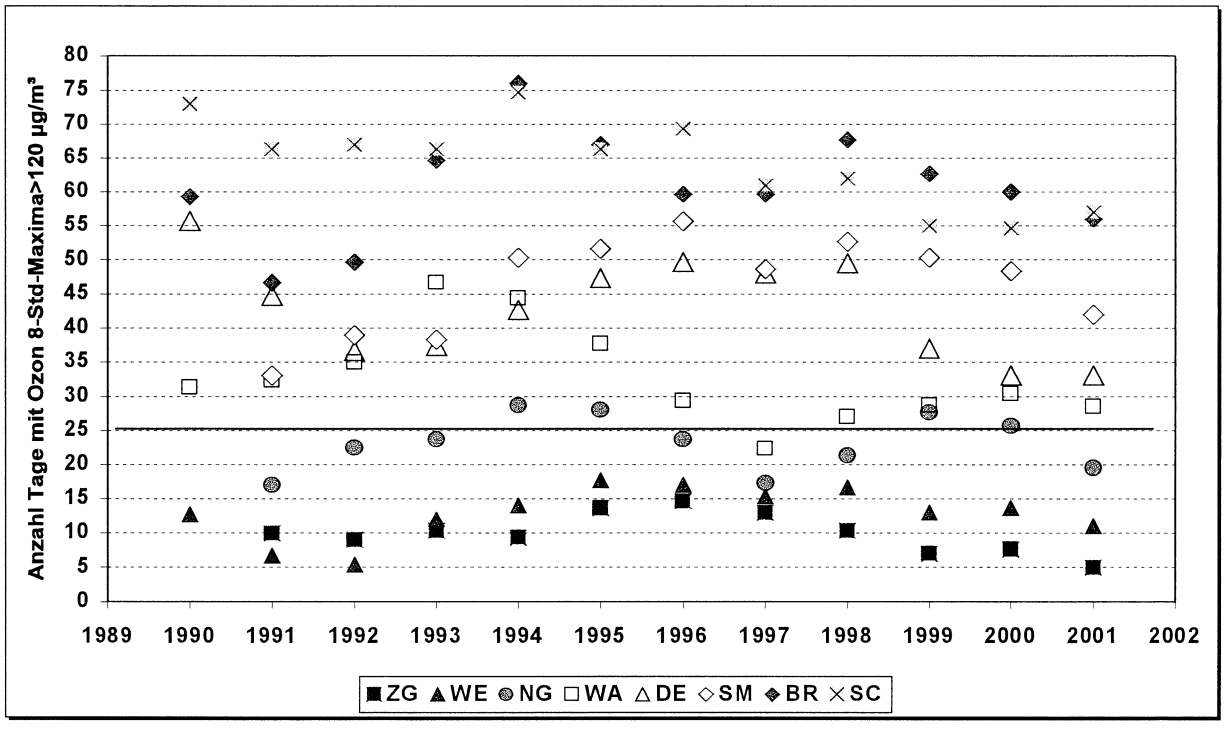



Abbildung 19: Anzahl der Tage/Jahr mit Überschreitungen von gleitenden 8-h-Mitteln >120 µg/m³ Ozon an den 8 personell besetzten Messstellen des Umweltbundesamtes zwischen 1990 und 2001, nach Jahren sortiert.

### 2.1.3.2 Zielwerte für den Schutz der Vegetation

Als Langfristzielwerte für die Schädigung der Vegetation werden oft sog. AOT40-Werte angegeben (AOT40: Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb). Zur Bestimmung dieses Wertes werden alle Überschreitungen eines Stundenmittels von 40 ppb (entspricht 80 $\mu g/m^3$) während der Hauptwachstumsphase von Mai bis Juli, in der Zeit zwischen 8:00 und 20:00 Uhr MEZ aufsummiert.

Die während des letzten Jahrzehnts im Messnetz des UBA ermittelten Zielwerte für den Schutz der Vegetation sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt. Bezüglich der Einhaltung des Zielwertes von 18000 $\mu g/m^3$ h (AOT40) bis 2010 ist festzustellen, dass dieser Wert an den höher gelegenen Stationen, vor allem am Schauinsland (1205 m), im vergangenen Jahrzehnt deutlich überschritten wurde. Dagegen wurde dieser Wert an den meisten anderen Stationen im gleichen Zeitraum nicht erreicht. Bezüglich der Einhaltung des Langfristziels von 6000 $\mu g/m^3$ h ist festzustellen, dass dieser Wert an fast allen UBA-Stationen noch mehr oder weniger deutlich überschritten wird.

Noch ausgeprägter als bei den Zielwerten für den Gesundheitsschutz (120 $\mu g/m^3$, gleitendes 8-h-Mittel) ist bei den Zielwerten für den Schutz der Vegetation (AOT40) eine sehr starke Variation von Jahr zu Jahr zu beobachten, die ebenso meteorologische Ursachen hat (z.B. warme oder kalte Sommer). In Abbildung 22 ist der Verlauf der kumulativen Beiträge zum AOT40-Wert für 1994 bis 2001 beispielhaft für die Station Westerland/Sylt und Schauinsland/Schwarzwald dargestellt. Während in Westerland wegen des dominierenden Beitrags des nordhemisphärischen Hintergrunds die AOT40-Werte während der Vegetationsperiode in der Regel gleichmäßig ansteigen, wird der entsprechende Anstieg auf dem Schauinsland mehr durch Episoden mit höheren Ozonwerten verursacht.

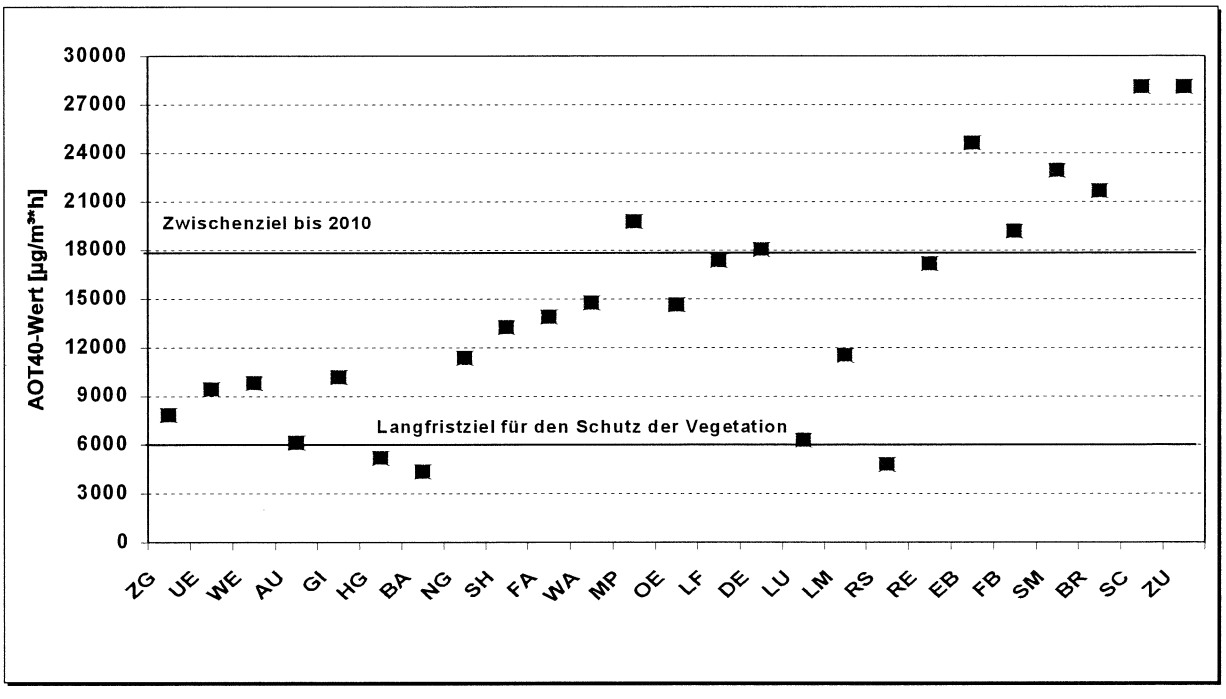



Abbildung 20: AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation an allen Stationen des UBA für 2001

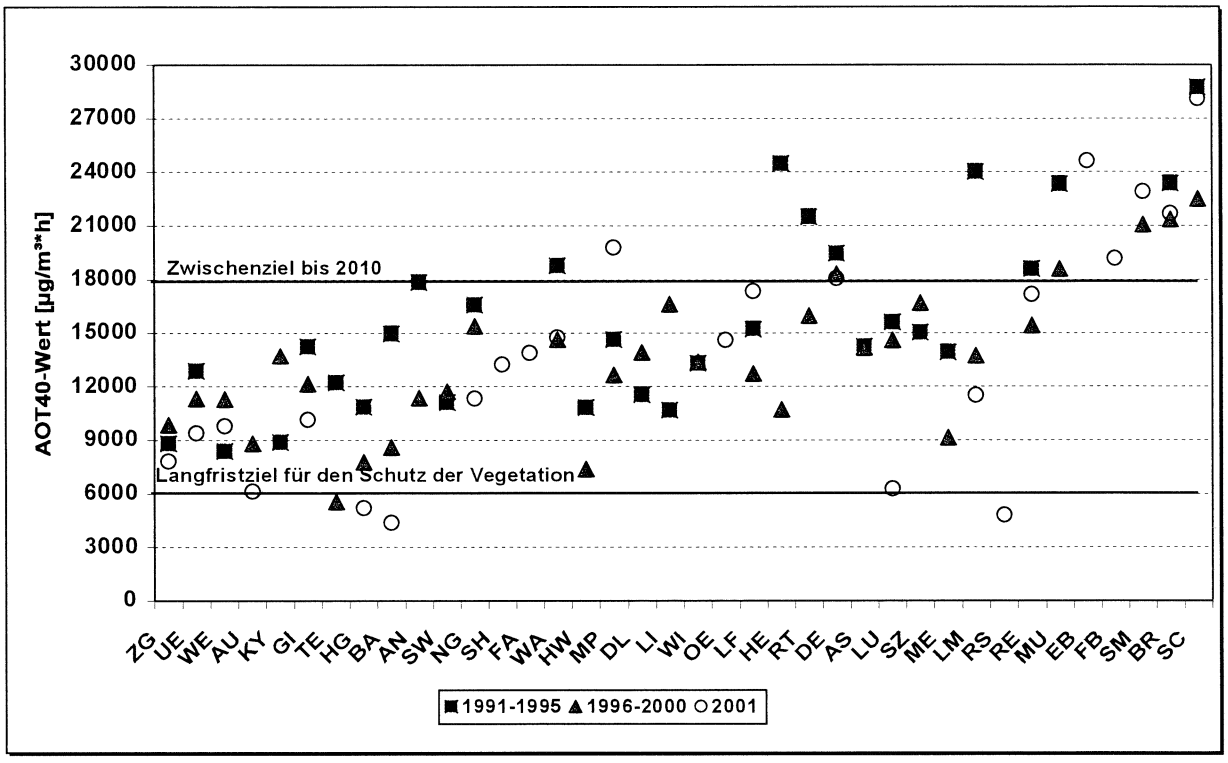



Abbildung 21: AOT40-Werte zum Schutz der Vegetation an allen Stationen des UBA, sortiert nach Stationshöhe

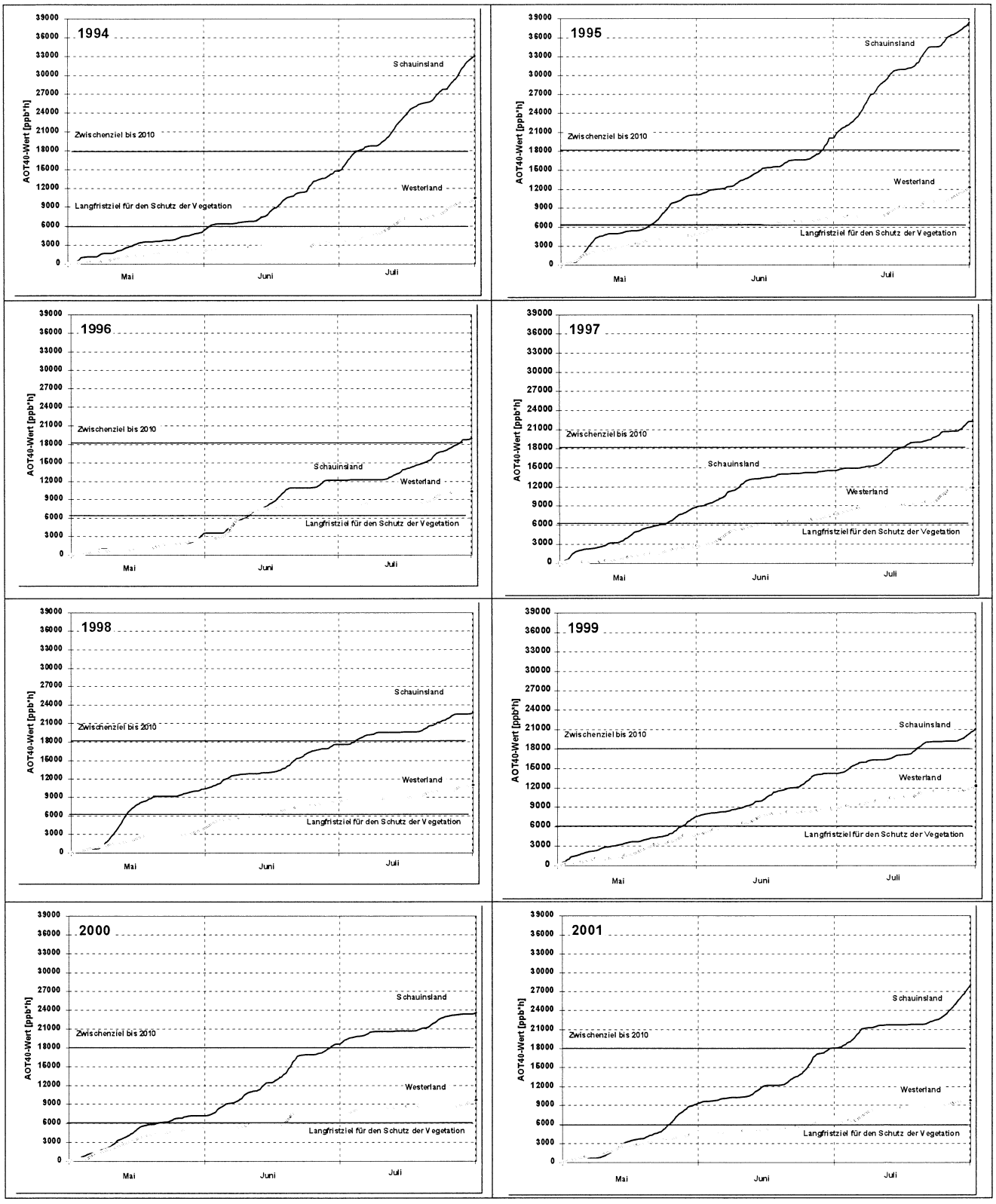



Abbildung 22: Verlauf der kumulativen Beiträge zum AOT40-Wert zum Schutz der Vegetation für 1994 bis 2001 in Westerland und auf dem Schauinsland

Tabelle 26: Monats- und Jahresmittel, Ozon für 2001 in $\mu g/m^3$, bez. auf 20 °C

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 35 | 53 | 64 | 76 | 86 | 81 | 79 | 70 | - | 47 | 56 | 46 | 63 |
| ZG | 32 | 55 | 71 | 70 | 76 | 72 | 73 | 62 | 47 | 41 | 50 | 44 | 58 |
| HG | 36 | 56 | 64 | 73 | 77 | 77 | 73 | 73 | 61 | 43 | 61 | 52 | 62 |
| AU | 23 | 37 | 48 | 57 | 62 | 63 | 62 | 56 | 37 | 32 | 35 | 26 | 45 |
| UE | 28 | 48 | 62 | 65 | 76 | 70 | 75 | 62 | 44 | 37 | 40 | 37 | 53 |
| NG | 23 | 44 | 51 | 56 | 73 | 62 | 65 | 55 | 36 | 29 | 42 | 44 | 48 |
| SH | 23 | 44 | 56 | 59 | 74 | 62 | 68 | 58 | 39 | 31 | 34 | 37 | 49 |
| BA | - | - | 48 | 57 | 59 | 57 | - | - | 34 | 28 | 25 | 29 | 44 |
| WA | 30 | 48 | 58 | 67 | 79 | 66 | 68 | 67 | 41 | 31 | 32 | 34 | 52 |
| GI | - | - | 43 | 59 | 64 | 57 | 57 | 51 | 33 | 25 | 18 | 25 | 43 |
| FA | 25 | 44 | 53 | 64 | 77 | 67 | 70 | 67 | 43 | 32 | 33 | 38 | 51 |
| MP | 30 | 45 | 52 | 63 | 69 | 63 | 70 | 57 | 41 | 28 | 27 | 31 | 48 |
| LF | - | - | - | - | 80 | 77 | 80 | 74 | 49 | 45 | - | 39 | 61 |
| LM | 39 | 48 | 63 | 64 | 72 | 68 | 73 | 72 | 45 | 37 | 32 | 40 | 54 |
| LU | 38 | 52 | 54 | 62 | 68 | 66 | 73 | 67 | 41 | 38 | 33 | 36 | 52 |
| SM | 52 | 58 | 63 | 82 | 94 | 91 | 98 | 97 | 59 | 60 | 48 | 47 | 71 |
| RE | - | - | 63 | 75 | 83 | 76 | 82 | 90 | 60 | 55 | 41 | 46 | 66 |
| DE | 45 | 53 | 63 | 76 | 84 | 84 | 84 | 80 | 52 | 50 | 35 | 40 | 62 |
| AS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | 59 | 71 | 60 | 65 | 68 | - | - | - | - | - |
| FB | 44 | - | 71 | 81 | 97 | 85 | 85 | 85 | 53 | 55 | 42 | 53 | 69 |
| BR | 68 | 65 | 80 | 91 | 107 | 94 | 94 | 96 | 62 | 65 | 45 | 55 | 77 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 60 | 43 | 32 | 35 | 41 | - |
| SC | 73 | 68 | 82 | 91 | 103 | 102 | 104 | 103 | 73 | 80 | 65 | 66 | 84 |

Tabelle 27: Monatsmaxima der Stundenwerte, Ozon für 2001 in $\mu g/m^3$, bezogen auf 20 °C

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 80 | 86 | 115 | 120 | 152 | 138 | 175 | 183 | - | 88 | 81 | 91 |
| ZG | 83 | 83 | 115 | 123 | 127 | 123 | 137 | 171 | 89 | 85 | 89 | 80 |
| HG | 78 | 86 | 96 | 116 | 124 | 135 | 164 | 203 | 96 | 84 | 83 | 85 |
| AU | 66 | 70 | 85 | 101 | 122 | 121 | 157 | 166 | 78 | 75 | 82 | 76 |
| UE | 59 | 86 | 103 | 128 | 125 | 131 | 157 | 172 | 96 | 83 | 77 | 74 |
| NG | 65 | 83 | 105 | 143 | 143 | 125 | 161 | 184 | 106 | 87 | 100 | 87 |
| SH | 61 | 83 | 114 | 132 | 143 | 137 | 169 | 186 | 101 | 81 | 70 | 70 |
| BA | - | - | 98 | 111 | 122 | 177 | - | - | 88 | 70 | 65 | 73 |
| WA | 62 | 83 | 106 | 129 | 166 | 174 | 175 | 175 | 93 | 75 | 72 | 78 |
| GI | - | - | 100 | 111 | 151 | 178 | 160 | 193 | 81 | 69 | 69 | 68 |
| FA | 64 | 82 | 112 | 132 | 154 | 148 | 145 | 185 | 107 | 74 | 78 | 77 |
| MP | 76 | 85 | 110 | 137 | 157 | 160 | 178 | 188 | 106 | 80 | 69 | 73 |
| LF | - | - | - | - | 146 | 161 | 184 | 178 | 104 | 96 | 74 | 79 |
| LM | 64 | 94 | 97 | 117 | 124 | 163 | 166 | 194 | 93 | 65 | 52 | 69 |
| LU | 79 | 95 | 98 | 112 | 117 | 122 | 161 | 131 | 83 | 90 | 67 | 72 |
| SM | 86 | 95 | 112 | 126 | 156 | 183 | 195 | 177 | 103 | 110 | 88 | 98 |
| RE | - | - | 117 | 128 | 156 | 168 | 193 | 185 | 114 | 114 | 89 | 94 |
| DE | 76 | 85 | 105 | 129 | 161 | 195 | 181 | 162 | 95 | 82 | 73 | 71 |
| AS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | 118 | 148 | 189 | 181 | 175 | - | - | - | - |
| FB | 90 | - | 113 | 133 | 158 | 159 | 158 | 162 | 102 | 95 | 83 | 92 |
| BR | 97 | 104 | 130 | 141 | 164 | 171 | 188 | 179 | 105 | 122 | 87 | 91 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 160 | 103 | 94 | 81 | 87 |
| SC | 90 | 97 | 111 | 135 | 176 | 236 | 194 | 176 | 110 | 104 | 96 | 89 |

Tabelle 28: Monatliche 50-Perzentile der Stundenwerte von Ozon für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 32 | 52 | 70 | 80 | 88 | 81 | 77 | 69 | - | 45 | 64 | 48 |
| ZG | 30 | 55 | 76 | 71 | 79 | 73 | 73 | 61 | 50 | 40 | 54 | 45 |
| HG | 35 | 56 | 71 | 77 | 82 | 78 | 70 | 69 | 64 | 44 | 70 | 58 |
| AU | 23 | 37 | 52 | 61 | 65 | 64 | 61 | 53 | 39 | 34 | 39 | 27 |
| UE | 27 | 47 | 64 | 65 | 77 | 69 | 77 | 60 | 44 | 36 | 40 | 37 |
| NG | 21 | 43 | 53 | 58 | 75 | 62 | 65 | 55 | 36 | 28 | 41 | 45 |
| SH | 21 | 44 | 61 | 62 | 76 | 64 | 70 | 57 | 39 | 31 | 36 | 38 |
| BA | - | - | 51 | 57 | 59 | 55 | - | - | 34 | 27 | 24 | 28 |
| WA | 31 | 46 | 60 | 67 | 80 | 67 | 64 | 61 | 42 | 31 | 32 | 33 |
| GI | - | - | 46 | 61 | 67 | 57 | 53 | 43 | 32 | 24 | 9 | 23 |
| FA | 24 | 43 | 53 | 65 | 75 | 64 | 69 | 63 | 42 | 32 | 33 | 39 |
| MP | 29 | 46 | 53 | 65 | 67 | 64 | 74 | 52 | 42 | 28 | 26 | 29 |
| LF | - | - | - | - | 79 | 73 | 77 | 67 | 49 | 46 | 42 | 41 |
| LM | 40 | 46 | 65 | 64 | 73 | 61 | 69 | 68 | 46 | 39 | 33 | 44 |
| LU | 38 | 53 | 55 | 60 | 70 | 62 | 71 | 63 | 40 | 37 | 35 | 39 |
| SM | 54 | 60 | 66 | 82 | 94 | 85 | 93 | 92 | 59 | 57 | 51 | 49 |
| RE | - | - | 66 | 75 | 81 | 73 | 79 | 86 | 60 | 54 | 43 | 47 |
| DE | 51 | 55 | 64 | 77 | 82 | 79 | 80 | 76 | 50 | 51 | 37 | 44 |
| AS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | 59 | 69 | 55 | 60 | 62 | - | - | - | - |
| FB | 41 | - | 73 | 81 | 99 | 82 | 84 | 85 | 52 | 57 | 43 | 57 |
| BR | 71 | 64 | 81 | 90 | 106 | 91 | 91 | 94 | 60 | 65 | 47 | 59 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 58 | 48 | 24 | 33 | 44 |
| SC | 74 | 72 | 85 | 91 | 105 | 96 | 96 | 103 | 72 | 80 | 65 | 67 |

Tabelle 29: Monatliche 98-Perzentile der Stundenwerte von Ozon für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 74 | 85 | 95 | 107 | 127 | 119 | 131 | 147 | - | 82 | 79 | 85 |
| ZG | 66 | 79 | 103 | 100 | 119 | 109 | 113 | 120 | 77 | 73 | 83 | 78 |
| HG | 74 | 83 | 90 | 101 | 108 | 109 | 130 | 152 | 86 | 78 | 81 | 80 |
| AU | 53 | 64 | 76 | 90 | 111 | 106 | 132 | 144 | 69 | 63 | 67 | 56 |
| UE | 50 | 78 | 96 | 110 | 115 | 113 | 134 | 140 | 77 | 65 | 67 | 66 |
| NG | 48 | 79 | 88 | 104 | 123 | 108 | 127 | 126 | 77 | 75 | 80 | 81 |
| SH | 53 | 80 | 96 | 110 | 131 | 114 | 136 | 142 | 85 | 67 | 67 | 64 |
| BA | - | - | 90 | 96 | 107 | 109 | - | - | 71 | 56 | 58 | 67 |
| WA | 56 | 81 | 94 | 111 | 139 | 131 | 145 | 160 | 84 | 64 | 66 | 71 |
| GI | - | - | 86 | 99 | 127 | 118 | 140 | 164 | 68 | 57 | 61 | 62 |
| FA | 59 | 73 | 92 | 116 | 129 | 128 | 129 | 153 | 89 | 66 | 65 | 71 |
| MP | 68 | 77 | 95 | 119 | 140 | 138 | 146 | 157 | 92 | 71 | 63 | 66 |
| LF | - | - | - | - | 131 | 136 | 157 | 160 | 89 | 82 | 67 | 71 |
| LM | 59 | 83 | 91 | 102 | 115 | 126 | 134 | 155 | 74 | 61 | 46 | 59 |
| LU | 65 | 81 | 89 | 102 | 110 | 114 | 121 | 122 | 74 | 68 | 61 | 64 |
| SM | 76 | 87 | 93 | 114 | 144 | 155 | 170 | 166 | 92 | 103 | 77 | 91 |
| RE | - | - | 104 | 116 | 132 | 135 | 143 | 173 | 103 | 94 | 80 | 83 |
| DE | 73 | 80 | 91 | 104 | 142 | 166 | 158 | 147 | 88 | 72 | 62 | 66 |
| AS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | 102 | 129 | 143 | 155 | 148 | - | - | - | - |
| FB | 83 | - | 104 | 123 | 145 | 135 | 139 | 134 | 86 | 85 | 72 | 88 |
| BR | 92 | 96 | 112 | 129 | 153 | 151 | 154 | 156 | 93 | 105 | 74 | 88 |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 143 | 87 | 84 | 73 | 80 |
| SC | 88 | 93 | 101 | 123 | 152 | 175 | 175 | 164 | 99 | 100 | 92 | 84 |

Tabelle 30: Jährliche Perzentile der Stundenwerte von Ozon für 2001 in µg/m³, bezogen auf 20 °C

| Station | Min | 2% | 5% | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% | 98% | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 1 | 4 | 15 | 25 | 45 | 67 | 82 | 92 | 100 | 112 | 183 |
| ZG | 1 | 12 | 19 | 25 | 41 | 59 | 74 | 87 | 95 | 103 | 171 |
| HG | 1 | 4 | 16 | 28 | 47 | 67 | 77 | 87 | 93 | 103 | 203 |
| AU | 1 | 1 | 2 | 8 | 27 | 45 | 62 | 77 | 88 | 105 | 166 |
| UE | 1 | 12 | 17 | 23 | 34 | 51 | 70 | 87 | 96 | 107 | 172 |
| NG | 1 | 4 | 9 | 14 | 27 | 47 | 67 | 83 | 96 | 109 | 184 |
| SH | 1 | 3 | 6 | 12 | 26 | 47 | 68 | 89 | 100 | 117 | 186 |
| BA | 1 | 2 | 4 | 10 | 24 | 42 | 60 | 78 | 90 | 103 | 178 |
| WA | 1 | 3 | 8 | 15 | 30 | 48 | 69 | 91 | 104 | 124 | 175 |
| GI | 1 | 1 | 1 | 4 | 19 | 40 | 62 | 81 | 95 | 115 | 193 |
| FA | 1 | 5 | 11 | 18 | 31 | 48 | 67 | 88 | 103 | 121 | 185 |
| MP | 1 | 1 | 3 | 10 | 24 | 45 | 66 | 91 | 109 | 129 | 188 |
| LF | 1 | 8 | 16 | 26 | 42 | 57 | 77 | 100 | 118 | 135 | 184 |
| LM | 1 | 14 | 21 | 27 | 38 | 51 | 67 | 86 | 102 | 117 | 194 |
| LU | 1 | 9 | 17 | 24 | 37 | 51 | 66 | 83 | 95 | 106 | 161 |
| SM | 1 | 19 | 30 | 40 | 53 | 67 | 85 | 109 | 125 | 147 | 195 |
| RE | 1 | 8 | 20 | 30 | 47 | 65 | 82 | 103 | 118 | 132 | 193 |
| DE | 1 | 8 | 21 | 31 | 45 | 59 | 77 | 97 | 116 | 136 | 195 |
| AS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| FB | 1 | 16 | 25 | 34 | 50 | 67 | 87 | 107 | 117 | 126 | 162 |
| BR | 3 | 24 | 35 | 45 | 59 | 74 | 93 | 115 | 126 | 138 | 188 |
| SC | 1 | 43 | 52 | 59 | 69 | 80 | 95 | 118 | 134 | 153 | 236 |

Tabelle 31: Jahresmittel von Ozon für 1982 bis 2001 in $\mu g/m^3$, bezogen auf 20 °C

| Stat. | WE | ZG | HG | AU | HW | TE | UE | SW | NG | AN | SH | KY | BA | WA | WI | GI | LI | FA | DL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1982 | - | - | - | - | - | - | - | - | 37 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1983 | - | - | - | - | - | - | - | - | 48 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1984 | 53 | - | - | - | - | - | - | - | 41 | - | - | - | - | 45 | - | - | 33 | - | - |
| 1985 | 54 | - | - | - | - | - | - | - | 40 | - | - | - | - | 44 | - | - | 31 | - | - |
| 1986 | 61 | - | - | - | - | - | - | - | 41 | - | - | - | - | 42 | - | - | 40 | - | - |
| 1987 | 51 | - | - | - | - | - | - | - | 42 | - | - | - | - | 46 | - | - | 36 | - | - |
| 1988 | 59 | - | - | - | 39 | - | - | - | 50 | - | - | - | - | 60 | - | 36 | 46 | - | - |
| 1989 | 63 | - | - | - | 48 | - | - | - | 50 | - | - | - | 43 | 55 | - | 32 | 48 | - | - |
| 1990 | 55 | - | - | - | 48 | - | - | - | 32 | - | - | - | 38 | 51 | - | 27 | 45 | - | - |
| 1991 | 51 | - | - | - | 44 | - | - | 40 | - | - | - | - | 41 | 47 | 51 | 28 | - | - | - |
| 1992 | 55 | 51 | - | - | 49 | 42 | 43 | 41 | 45 | 49 | - | 34 | 43 | 58 | 48 | 39 | - | - | 42 |
| 1993 | 56 | 53 | - | - | 54 | 44 | 44 | 45 | 49 | 45 | - | 38 | 45 | 53 | 46 | 42 | 50 | - | 48 |
| 1994 | 62 | 56 | - | - | - | 50 | 45 | 47 | 52 | 49 | - | 48 | 56 | 58 | - | - | 48 | - | 44 |
| 1995 | 65 | 55 | - | - | 52 | 52 | 55 | 53 | 51 | 53 | - | 49 | 44 | 52 | 51 | 44 | 52 | - | 53 |
| 1996 | 64 | 63 | - | - | 52 | 49 | 58 | 52 | 53 | 52 | - | 48 | 45 | - | 49 | 42 | 55 | - | 47 |
| 1997 | 65 | 60 | 64 | - | 52 | 52 | 58 | 52 | 50 | 50 | - | 53 | 45 | 51 | 52 | 42 | 57 | - | 48 |
| 1998 | 65 | 56 | 64 | - | - | - | 57 | - | 52 | 54 | - | - | 44 | 48 | 51 | 42 | - | - | 59 |
| 1999 | 71 | 61 | 64 | 53 | - | - | 56 | - | 45 | - | - | - | 51 | 56 | - | 46 | - | 54 | - |
| 2000 | 64 | 55 | - | 40 | - | - | 52 | - | 49 | - | 52 | - | 45 | 53 | - | 42 | - | 50 | - |
| 2001 | 63 | 58 | 62 | 45 | - | - | 53 | - | 48 | - | 49 | - | 44 | 52 | - | 43 | - | 51 | - |

| Stat. | MP | LF | ME | HE | LM | LU | SM | SZ | RE | DE | AS | OE | BR | FB | RT | SC | MU | RS | ZU |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1982 | - | - | - | - | - | - | 61 | - | - | 51 | - | - | 76 | - | - | 81 | - | - | - |
| 1983 | - | - | - | - | - | - | 62 | - | - | 48 | - | - | 75 | - | - | 81 | - | - | - |
| 1984 | - | - | - | - | - | - | 41 | - | - | 48 | - | - | 59 | - | - | 84 | - | - | - |
| 1985 | - | - | - | - | - | - | 44 | - | - | 47 | - | - | 61 | - | - | 78 | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | 50 | - | - | 45 | - | - | 58 | - | - | 80 | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | 51 | - | - | 46 | - | - | - | - | - | 70 | - | - | - |
| 1988 | - | - | 42 | - | - | - | 70 | - | 56 | 64 | - | - | 71 | - | 50 | 81 | - | - | - |
| 1989 | - | - | 40 | - | - | - | 69 | - | 50 | 65 | 39 | - | 78 | - | 49 | 87 | - | - | - |
| 1990 | - | - | 42 | 58 | - | - | 43 | - | 53 | 64 | 42 | - | 76 | - | 50 | 85 | - | - | - |
| 1991 | - | - | 42 | 54 | - | - | - | 42 | 52 | 61 | 38 | - | 75 | - | 49 | 83 | - | - | - |
| 1992 | - | 47 | 41 | 52 | - | 55 | 58 | 50 | 59 | 55 | 48 | - | 73 | - | 51 | 78 | - | - | - |
| 1993 | 37 | 49 | 47 | 57 | - | 60 | 65 | 51 | 59 | 59 | 59 | - | 77 | - | 58 | 82 | - | - | - |
| 1994 | 47 | 51 | - | - | 55 | 50 | 64 | 53 | - | 63 | - | - | 86 | - | 63 | 85 | - | - | - |
| 1995 | 52 | 54 | 55 | - | 59 | 60 | 70 | 56 | - | 59 | 52 | - | 74 | - | 52 | 89 | - | - | 101 |
| 1996 | 44 | 53 | 46 | 44 | 62 | 63 | 69 | 52 | 59 | 64 | 54 | - | 73 | - | 50 | 80 | 48 | - | 103 |
| 1997 | 47 | 51 | 47 | 53 | 61 | 61 | 74 | 57 | 63 | 68 | 43 | - | 79 | - | 56 | 89 | 41 | - | 102 |
| 1998 | 49 | 58 | - | 57 | 59 | 62 | 72 | 61 | 64 | 69 | 44 | - | 80 | - | - | 87 | 57 | - | 105 |
| 1999 | 50 | 60 | - | - | 62 | 64 | 75 | - | 63 | - | 52 | - | 81 | - | - | 85 | - | - | 103 |
| 2000 | 47 | 55 | - | - | 61 | 61 | 72 | - | 62 | 67 | 49 | - | 79 | 73 | - | 85 | - | - | - |
| 2001 | 48 | - | - | - | 54 | 52 | 71 | - | 66 | 62 | - | - | 77 | 69 | - | 84 | - | - | - |

## 2.1.4 Flüchtige Organische Substanzen (VOC)

Seit 1998 werden entsprechend dem EMEP-Programm zweimal pro Woche routinemäßig Messungen von 27 flüchtigen organischen Substanzen (siehe Tabelle 32) in Waldhof (Lüneburger Heide) und auf der Schmücke (Thüringer Wald) durchgeführt, seit Januar 2001 auch in Zingst und auf dem Brotjacklriegel. Die Messungen erfolgen jeweils am Montag und Donnerstag um 13 Uhr MEZ. Die Probenahmezeit beträgt ca. 20 Minuten. Die Probenahme erfolgt mit evakuierten Kanistern. Vor Einführung der Analytik auf der Schmücke wurde die Analytik beim NILU in Norwegen durchgeführt. Danach erfolgten über einen längeren Zeitraum Parallelmessungen mit Analysen beim NILU und auf der Schmücke. Zur Sicherstellung des Qualitätsstandards werden auch weiterhin von Zeit zu Zeit Parallelbestimmungen durchgeführt.

Darüber hinaus wird zur Bestimmung eines Tagesganges an der Schmücke jeweils von Donnerstag 14:00 Uhr bis Freitag 12:00 Uhr alle 2 Stunden gemessen. Folgende VOC werden gemessen:

Tabelle 32: VOC-Messprogramm:

| | | |
|---|---|---|
| **Ethan** | **i-Buten** | **Isopren** |
| **Ethen** | **cis-2-Buten** | **n-Hexan** |
| **Propan** | **i-Pentan** | **n-Heptan** |
| **Propen** | **n-Pentan** | **Benzol** |
| **Ethin** | **Butadien 1,3** | **Toluol** |
| **i-Butan** | **tr-2-Penten** | **Ethylbenzol** |
| **n-Butan** | **cis-2-Penten** | **m/p-Xylol** |
| **trans-2-Buten** | **2-Methylpentan** | **o-Xylol** |
| **1-Buten** | **3-Methylpentan** | **Σ Pentene** |

Einige der aufgelisteten VOC sind ausschließlich anthropogenen Ursprungs (z.B. Benzol), einige sind überwiegend natürlichen Ursprungs (z.B. Isopren) und wieder andere sind sowohl anthropogenen als auch natürlichen Ursprungs (z.B. Ethan, Ethen). Die hier aufgelisteten VOC sind insgesamt überwiegend anthropogenen Ursprungs.

In Tabelle 34 bis Tabelle 37 sind die Monats- und Jahresmittel der VOC und in Tabelle 38 bis Tabelle 41 die maximalen monatlichen Werte im Jahr 2001 für die Stationen Zingst, Waldhof, Schmücke und Brotjacklriegel aufgelistet. Für die Stationen Schmücke, Waldhof, Zingst und Brotjacklriegel sind die Konzentrationsmuster ähnlich, die Konzentrationen nehmen jedoch mit zunehmender Stationshöhe in der Regel etwas ab (Abbildung 23).

Wie aus Abbildung 24 bis Abbildung 25 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Standortpaare Zingst und Brotjacklriegel von Waldhof und Schmücke deutlich im Hinblick auf den Isoprengehalt im Sommer. Dies ist auf die unterschiedlichen Baumarten im Umfeld der Stationen zurückzuführen.

Abbildung 24 bis Abbildung 25 zeigen für die Stationen Zingst, Waldhof, Schmücke und Brotjacklriegel den gegenläufigen mittleren Jahresgang (1998-2001 bzw. 2000-2001) für die

überwiegend anthropogen emittierten VOC gesamt mit einem Maximum im Winter sowie für das überwiegend aus biogenen Quellen stammende Isopren mit einem Maximum im Sommer.

Bei der Interpretation der gemessenen VOC-Konzentrationen ist zu beachten, dass die beobachteten Konzentrationswerte wegen der sich um Größenordnungen unterscheidenden Reaktivitäten der einzelnen VOC keine Rückschlüsse auf die Emissionen der einzelnen VOC und deren Emissionsverhältnisse ziehen lassen.

Zwischen 1998 und 2001 wurden an den Stationen Zingst, Waldhof, Schmücke und Brotjacklriegel folgende Jahresmittel für VOC gesamt bestimmt:

Tabelle 33: Jahresmittel VOC gesamt

| Jahr | Zingst | Waldhof | Schmücke | Brotjacklriegel |
|---|---|---|---|---|
| 1998 | | 6908 ppt | 5946 ppt | |
| 1999 | | 6126 ppt | 5249 ppt | |
| 2000 | 5649 ppt | 5830 ppt | 5421 ppt | 5030 ppt |
| 2001 | 5886 ppt | 6008 ppt | 5150 ppt | 5164 ppt |

Die entsprechenden Monatsmittel aller Stationen für diesen Zeitraum sind in Abbildung 23 zu sehen. Für eine Trendaussage ist die Zeitspanne von nur 4 Jahren noch zu kurz.

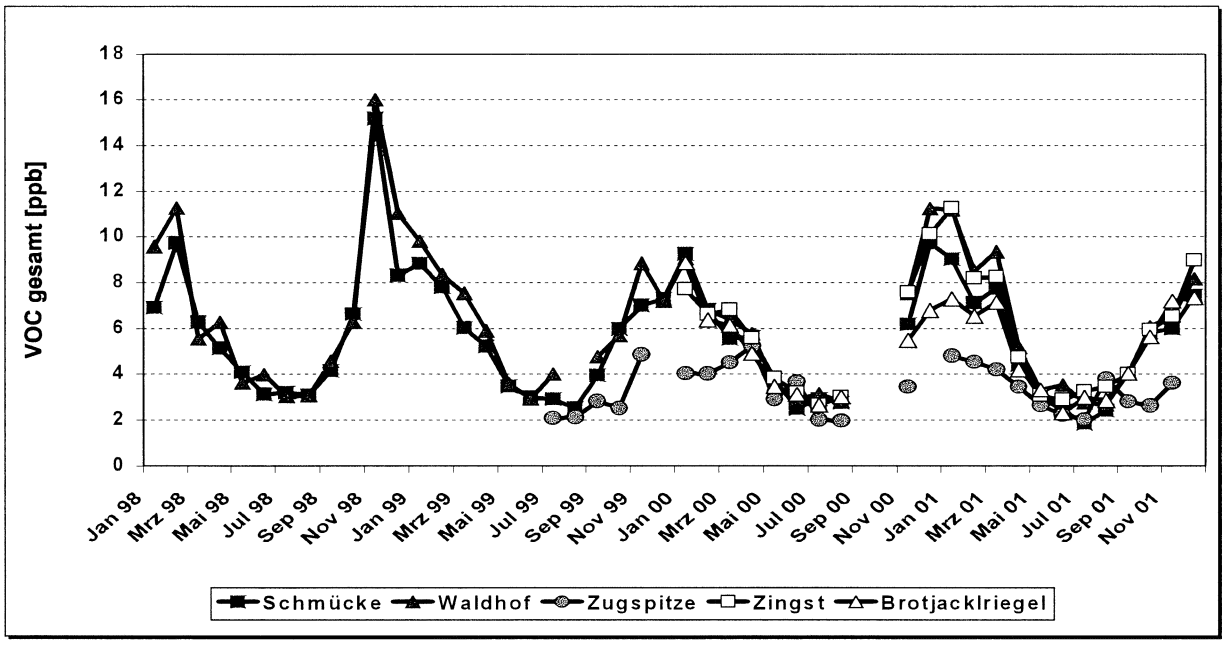



Abbildung 23: Monatsmittel VOC gesamt in Waldhof, Zingst, auf der Schmücke, dem Brotjacklriegel und der Zugspitze von 1998 bis 2001

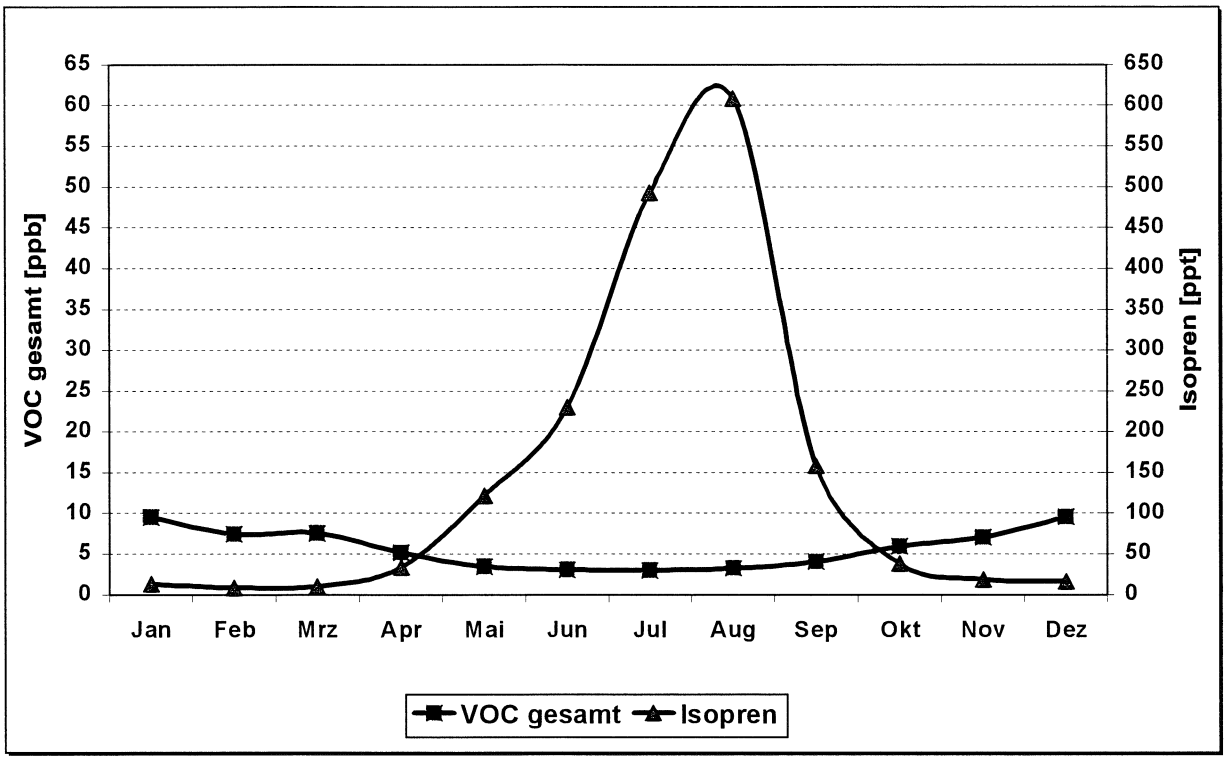



Abbildung 24: Mittlerer Jahresgang von VOC gesamt und Isopren in Zingst für 2000-2001.

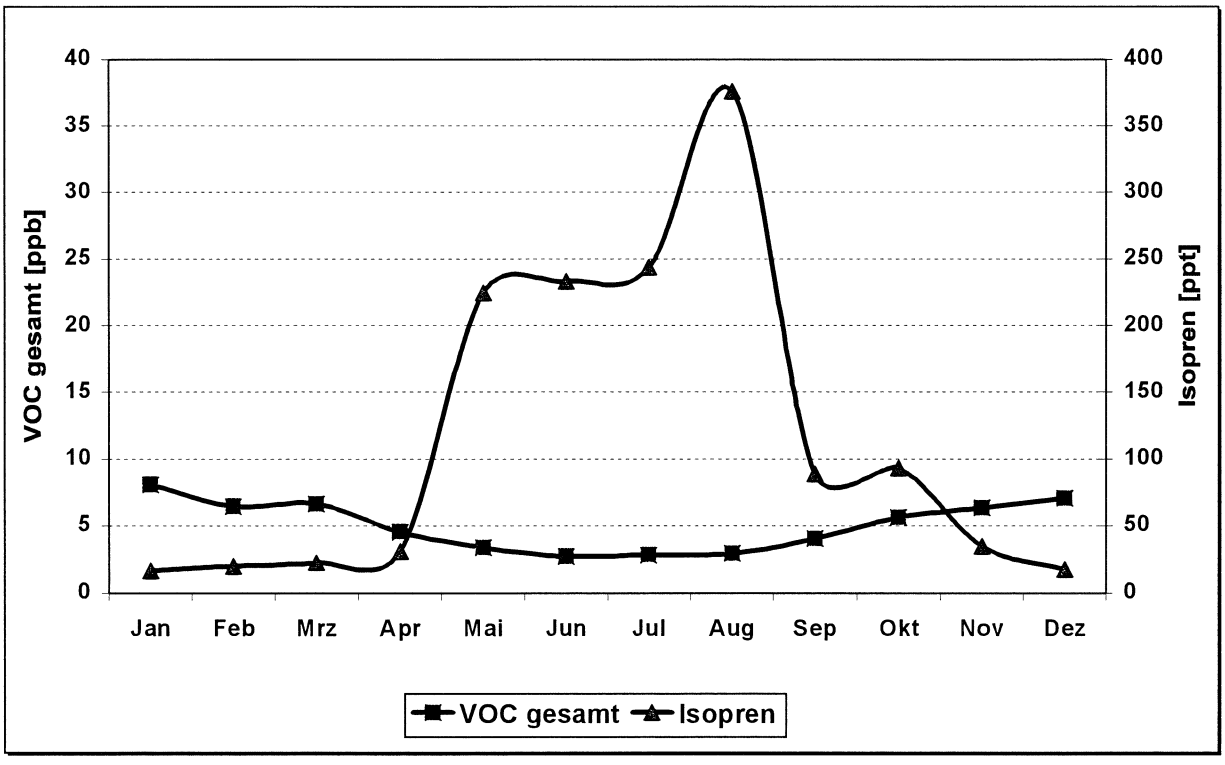



Abbildung 25: Mittlerer Jahresgang von VOC gesamt und Isopren auf dem Brotjacklriegel für 2000-2001.

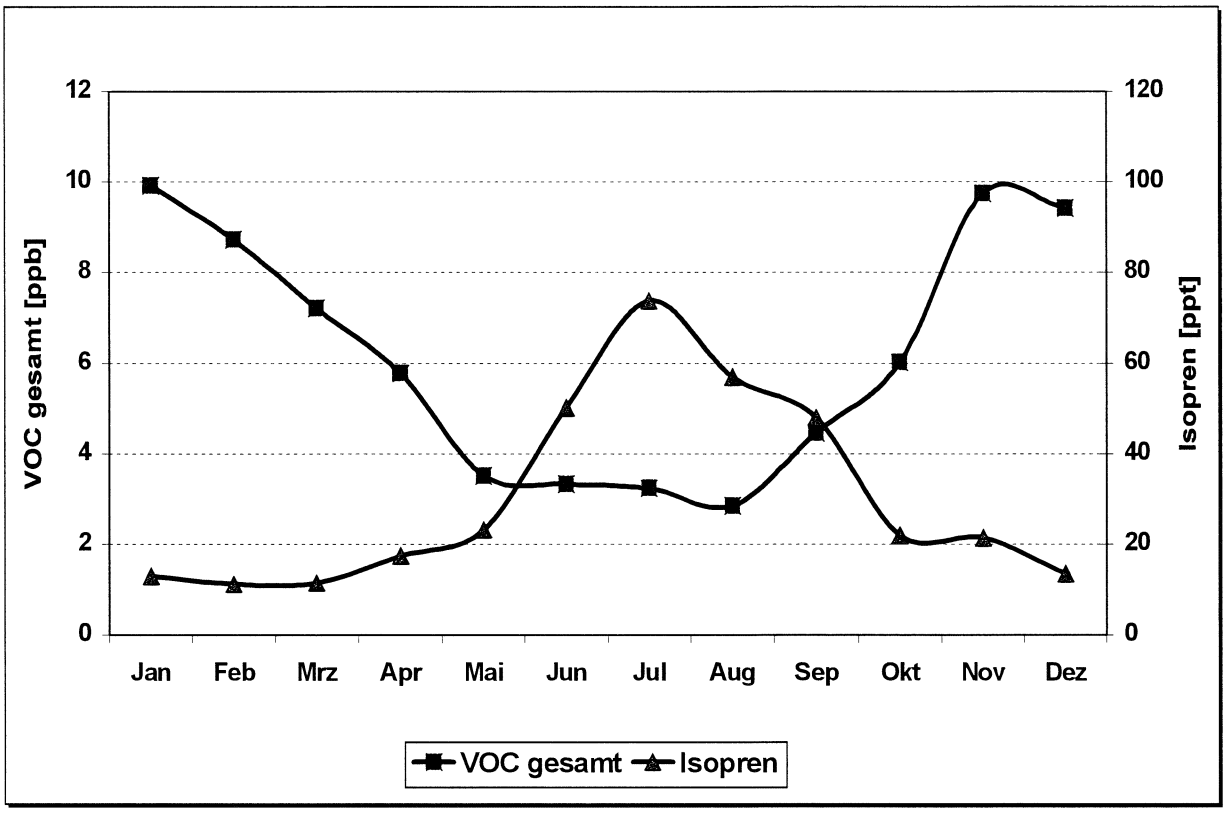



Abbildung 26: Mittlerer Jahresgang von VOC gesamt und Isopren in Waldhof für 1998-2001.

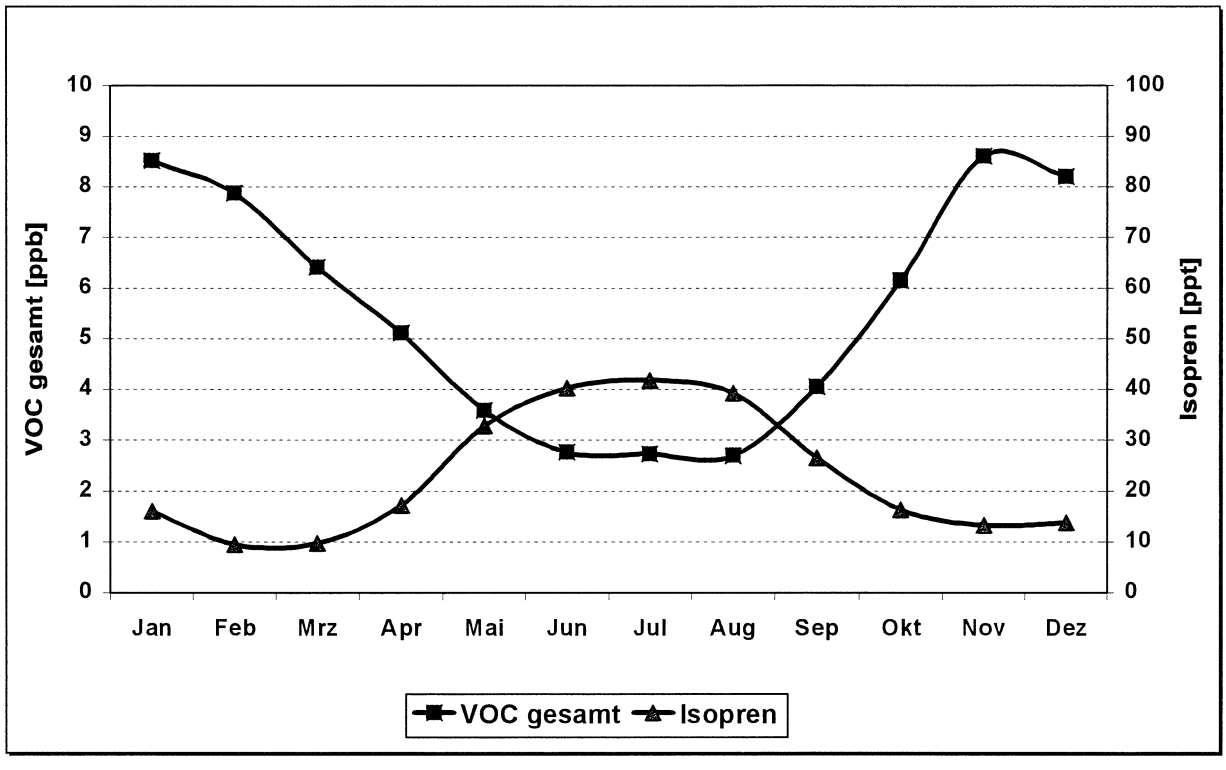



Abbildung 27: Mittlerer Jahresgang von VOC gesamt und Isopren auf der Schmücke für 1998-2001.

Tabelle 34: Monats- und Jahresmittel, VOC in Zingst für 2001 in ppt

| Komponente | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ethan** | 3182 | 2679 | 2643 | 1827 | 1213 | 1036 | 791 | 754 | 1216 | 1701 | 2014 | 2369 | 1784 |
| **Ethen** | 1802 | 1004 | 838 | 354 | 185 | 169 | 196 | 211 | 471 | 888 | 768 | 1088 | 664 |
| **Propan** | 1450 | 1249 | 1255 | 694 | 312 | 359 | 283 | 306 | 454 | 706 | 874 | 1423 | 777 |
| **Propen** | 212 | 121 | 94 | 64 | 55 | 53 | 53 | 61 | 81 | 118 | 145 | 189 | 103 |
| **Ethin** | 1630 | 1053 | 1406 | 680 | 369 | 188 | 187 | 225 | 451 | 713 | 700 | 1140 | 729 |
| **i-Butan** | 361 | 282 | 268 | 132 | 82 | 83 | 70 | 84 | 110 | 180 | 219 | 382 | 187 |
| **n-Butan** | 650 | 505 | 485 | 224 | 137 | 163 | 132 | 159 | 194 | 348 | 413 | 658 | 337 |
| **trans-2-Buten** | 7 | 7 | 8 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 5 | 8 | 5 | 6 |
| **1-Buten** | 47 | 30 | 25 | 21 | 20 | 19 | 18 | 20 | 28 | 26 | 35 | 38 | 27 |
| **i-Buten** | 137 | 114 | 103 | 89 | 103 | 88 | 90 | 75 | 89 | 76 | 102 | 99 | 97 |
| **cis-2-Buten** | 10 | 9 | 14 | 9 | 7 | 8 | 6 | 6 | 7 | 6 | 9 | 7 | 8 |
| **i-Pentan** | 336 | 219 | 200 | 113 | 126 | 131 | 217 | 157 | 143 | 239 | 221 | 316 | 201 |
| **n-Pentan** | 218 | 162 | 144 | 75 | 55 | 92 | 144 | 79 | 98 | 143 | 147 | 234 | 132 |
| **Butadien 1,3** | 29 | 13 | 9 | 7 | 11 | 5 | 5 | 5 | 9 | 10 | 18 | 22 | 12 |
| **tr-2-Penten** | 4 | 4 | 6 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| **cis-2-Penten** | 5 | 4 | 6 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| **2-Methylpentan** | 107 | 67 | 58 | 32 | 27 | 87 | 34 | 42 | 42 | 74 | 82 | 101 | 62 |
| **3-Methylpentan** | 61 | 38 | 32 | 17 | 13 | 45 | 19 | 22 | 22 | 40 | 47 | 56 | 34 |
| **Isopren** | 15 | 9 | 9 | 21 | 77 | 147 | 674 | 927 | 158 | 38 | 14 | 12 | 182 |
| **n-Hexan** | 80 | 55 | 50 | 26 | 55 | - | 34 | 41 | 26 | 47 | 76 | 98 | 54 |
| **n-Heptan** | 35 | 21 | 26 | 12 | 8 | 7 | 10 | 11 | 14 | 18 | 24 | 33 | 18 |
| **Benzol** | 391 | 260 | 328 | 159 | 74 | 63 | 82 | 72 | 197 | 195 | 189 | 309 | 193 |
| **Toluol** | 297 | 185 | 158 | 106 | 79 | 74 | 137 | 127 | 120 | 184 | 259 | 236 | 164 |
| **Ethylbenzol** | 45 | 22 | 21 | 14 | 13 | 5 | 22 | 13 | 14 | 35 | 27 | 31 | 22 |
| **m/p-Xylol** | 101 | 49 | 38 | 26 | 16 | 12 | 35 | 31 | 24 | 85 | 79 | 68 | 47 |
| **o-Xylol** | 33 | 14 | 13 | 5 | 4 | 0 | 12 | 9 | 8 | 32 | 22 | 24 | 15 |
| **Pentene** | 42 | 35 | 37 | 29 | 29 | 26 | 29 | 34 | 30 | 31 | 35 | 35 | 33 |
| **VOC gesamt** | 11276 | 8201 | 8263 | 4740 | 3079 | 2886 | 3275 | 3457 | 4013 | 5938 | 6528 | 8974 | 5881 |

Tabelle 35: Monats- und Jahresmittel, VOC in Waldhof für 2001 in ppt

| Komponente | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ethan** | 3106 | 2716 | 2527 | 1870 | 1284 | 1173 | 948 | 765 | 1105 | 1725 | 1861 | 2179 | 1786 |
| **Ethen** | 1734 | 799 | 1114 | 531 | 274 | 280 | 221 | 311 | 422 | 816 | 749 | 1064 | 708 |
| **Propan** | 1450 | 1498 | 1359 | 825 | 376 | 443 | 359 | 294 | 561 | 755 | 876 | 1184 | 839 |
| **Propen** | 215 | 125 | 185 | 84 | 77 | 70 | 51 | 87 | 109 | 147 | 157 | 198 | 128 |
| **Ethin** | 1565 | 892 | 1545 | 656 | 352 | 308 | 216 | 195 | 328 | 612 | 622 | 1069 | 710 |
| **i-Butan** | 360 | 314 | 322 | 159 | 92 | 116 | 114 | 78 | 135 | 223 | 232 | 296 | 206 |
| **n-Butan** | 655 | 629 | 570 | 273 | 157 | 219 | 162 | 139 | 242 | 387 | 427 | 574 | 374 |
| **trans-2-Buten** | 8 | 8 | 9 | 7 | 6 | 5 | 6 | 4 | 5 | 5 | 8 | 8 | 7 |
| **1-Buten** | 48 | 33 | 42 | 25 | 25 | 21 | 18 | 22 | 33 | 36 | 40 | 46 | 33 |
| **i-Buten** | 147 | 114 | 114 | 103 | 93 | 93 | 83 | 83 | 124 | 91 | 104 | 107 | 105 |
| **cis-2-Buten** | 11 | 12 | 14 | 8 | 7 | 6 | 6 | 4 | 5 | 6 | 10 | 9 | 8 |
| **i-Pentan** | 355 | 272 | 278 | 113 | 115 | 173 | 110 | 242 | 177 | 284 | 335 | 265 | 229 |
| **n-Pentan** | 250 | 219 | 215 | 89 | 72 | 120 | 67 | 72 | 161 | 172 | 202 | 193 | 153 |
| **Butadien 1,3** | 31 | 17 | 16 | 7 | 5 | 9 | 5 | 5 | 9 | 12 | 20 | 22 | 13 |
| **tr-2-Penten** | 6 | 5 | 7 | 5 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 6 | 5 | 4 |
| **cis-2-Penten** | 6 | 5 | 5 | 3 | 3 | 7 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 4 | 4 |
| **2-Methylpentan** | 120 | 89 | 90 | 32 | 36 | 52 | 29 | 33 | 54 | 85 | 84 | 92 | 67 |
| **3-Methylpentan** | 65 | 46 | 50 | 16 | 18 | 28 | 15 | 17 | 27 | 45 | 43 | 49 | 35 |
| **Isopren** | 17 | 12 | 10 | 21 | 23 | 61 | 65 | 70 | 44 | 24 | 15 | 9 | 30 |
| **n-Hexan** | 86 | 70 | 71 | 23 | 22 | - | 31 | 25 | 40 | 59 | 57 | 73 | 50 |
| **n-Heptan** | 38 | 30 | 29 | 13 | 12 | 14 | 9 | 12 | 19 | 24 | 33 | 32 | 22 |
| **Benzol** | 376 | 220 | 361 | 159 | 90 | 137 | 71 | 59 | 163 | 161 | 157 | 289 | 189 |
| **Toluol** | 316 | 203 | 246 | 103 | 113 | 122 | 113 | 108 | 166 | 256 | 309 | 239 | 194 |
| **Ethylbenzol** | 47 | 31 | 42 | 13 | 16 | 14 | 17 | 14 | 27 | 34 | 39 | 33 | 28 |
| **m/p-Xylol** | 114 | 84 | 84 | 21 | 29 | 22 | 22 | 21 | 53 | 73 | 102 | 80 | 60 |
| **o-Xylol** | 42 | 26 | 23 | 3 | 7 | 4 | 6 | 6 | 13 | 29 | 28 | 25 | 18 |
| **Pentene** | 47 | 39 | 43 | 31 | 32 | 29 | 24 | 24 | 32 | 29 | 40 | 38 | 34 |
| **VOC gesamt** | 11202 | 8497 | 9361 | 5185 | 3334 | 3541 | 2769 | 2690 | 4055 | 6089 | 6551 | 8174 | 6026 |

Tabelle 36: Monats- und Jahresmittel, VOC auf der Schmücke für 2001 in ppt

| Komponente | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ethan** | 2599 | 2470 | 2188 | 1693 | 1109 | 1037 | 712 | 798 | - | 1628 | 1983 | 1809 | 1648 |
| **Ethen** | 1292 | 764 | 858 | 242 | 166 | 192 | 116 | 170 | - | 732 | 794 | 646 | 548 |
| **Propan** | 1040 | 934 | 1060 | 656 | 331 | 347 | 166 | 272 | - | 637 | 735 | 1013 | 658 |
| **Propen** | 136 | 108 | 123 | 50 | 46 | 50 | 34 | 39 | - | 121 | 138 | 135 | 89 |
| **Ethin** | 1308 | 895 | 1321 | 654 | 344 | 316 | 151 | 248 | - | 738 | 648 | 808 | 682 |
| **i-Butan** | 277 | 224 | 250 | 122 | 89 | 84 | 42 | 66 | - | 196 | 177 | 304 | 167 |
| **n-Butan** | 516 | 450 | 476 | 233 | 157 | 152 | 83 | 133 | - | 350 | 342 | 586 | 316 |
| **trans-2-Buten** | 12 | 8 | 9 | 7 | 6 | 7 | 6 | 4 | - | 7 | 7 | 25 | 9 |
| **1-Buten** | 39 | 34 | 33 | 17 | 20 | 22 | 16 | 18 | - | 35 | 34 | 44 | 28 |
| **i-Buten** | 152 | 129 | 125 | 92 | 90 | 100 | 69 | 78 | - | 91 | 109 | 118 | 105 |
| **cis-2-Buten** | 16 | 13 | 14 | 8 | 9 | 9 | 5 | 4 | - | 10 | 9 | 23 | 11 |
| **i-Pentan** | 304 | 191 | 226 | 115 | 122 | 116 | 66 | 111 | - | 269 | 182 | 426 | 192 |
| **n-Pentan** | 171 | 128 | 148 | 71 | 78 | 68 | 58 | 65 | - | 145 | 121 | 261 | 119 |
| **Butadien 1,3** | 23 | 16 | 16 | 7 | 9 | 6 | 4 | 3 | - | 12 | 19 | 17 | 12 |
| **tr-2-Penten** | 12 | 6 | 7 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | - | 6 | 5 | 25 | 7 |
| **cis-2-Penten** | 7 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 2 | 2 | - | 5 | 5 | 15 | 5 |
| **2-Methylpentan** | 101 | 66 | 79 | 37 | 37 | 34 | 29 | 34 | - | 85 | 58 | 146 | 64 |
| **3-Methylpentan** | 57 | 36 | 43 | 20 | 19 | 18 | 15 | 18 | - | 43 | 32 | 75 | 34 |
| **Isopren** | 28 | 12 | 11 | 14 | 34 | 59 | 37 | 51 | - | 19 | 14 | 16 | 27 |
| **n-Hexan** | 62 | 43 | 49 | 20 | 23 | - | 21 | 19 | - | 45 | 39 | 82 | 39 |
| **n-Heptan** | 30 | 23 | 28 | 12 | 12 | 10 | 7 | 10 | - | 32 | 21 | 31 | 19 |
| **Benzol** | 315 | 208 | 297 | 148 | 94 | 81 | 49 | 90 | - | 196 | 169 | 293 | 177 |
| **Toluol** | 289 | 197 | 227 | 104 | 133 | 128 | 83 | 104 | - | 253 | 193 | 275 | 180 |
| **Ethylbenzol** | 50 | 29 | 38 | 15 | 18 | 16 | 18 | 17 | - | 36 | 33 | 42 | 28 |
| **m/p-Xylol** | 118 | 76 | 87 | 39 | 34 | 25 | 36 | 35 | - | 75 | 89 | 114 | 67 |
| **o-Xylol** | 42 | 19 | 21 | 13 | 11 | 4 | 11 | 14 | - | 26 | 25 | 37 | 20 |
| **Pentene** | 66 | 41 | 42 | 33 | 28 | 33 | 25 | 25 | - | 43 | 40 | 113 | 44 |
| **VOC gesamt** | 9040 | 7116 | 7769 | 4422 | 3016 | 2426 | 1858 | 2427 | - | 5825 | 6011 | 7439 | 5239 |

Tabelle 37: Monats- und Jahresmittel, VOC auf dem Brotjacklriegel für 2001 in ppt

| Komponente | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ethan | 2391 | 2340 | 2003 | 1667 | 1145 | 988 | 786 | 792 | 1182 | 1448 | 1905 | 1979 | 1555 |
| Ethen | 1093 | 736 | 925 | 283 | 230 | 249 | 238 | 227 | 497 | 826 | 1129 | 783 | 602 |
| Propan | 870 | 892 | 915 | 565 | 346 | 293 | 247 | 272 | 419 | 523 | 777 | 1091 | 603 |
| Propen | 119 | 97 | 127 | 54 | 57 | 58 | 53 | 46 | 77 | 124 | 171 | 119 | 92 |
| Ethin | 1077 | 867 | 1277 | 607 | 441 | 304 | 257 | 400 | 569 | 804 | 929 | 997 | 714 |
| i-Butan | 199 | 197 | 209 | 112 | 88 | 79 | 90 | 82 | 123 | 156 | 231 | 397 | 164 |
| n-Butan | 345 | 339 | 359 | 201 | 158 | 128 | 118 | 125 | 177 | 263 | 366 | 511 | 259 |
| trans-2-Buten | 7 | 9 | 8 | 7 | 6 | 6 | 7 | 4 | 8 | 9 | 12 | 7 | 7 |
| 1-Buten | 36 | 32 | 33 | 21 | 21 | 21 | 20 | 19 | 24 | 34 | 42 | 34 | 28 |
| i-Buten | 109 | 105 | 100 | 88 | 85 | 81 | 78 | 68 | 98 | 91 | 109 | 96 | 92 |
| cis-2-Buten | 9 | 9 | 11 | 9 | 8 | 6 | 8 | 4 | 9 | 9 | 13 | 8 | 9 |
| i-Pentan | 190 | 177 | 207 | 102 | 143 | 139 | 365 | 184 | 196 | 289 | 283 | 249 | 211 |
| n-Pentan | 119 | 109 | 128 | 69 | 71 | 78 | 171 | 99 | 117 | 144 | 160 | 175 | 120 |
| Butadien 1,3 | 13 | 10 | 14 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 6 | 12 | 20 | 15 | 9 |
| tr-2-Penten | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 10 | 4 | 7 | 6 | 10 | 7 | 6 |
| cis-2-Penten | 4 | 6 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 |
| 2-Methylpentan | 60 | 54 | 66 | 28 | 39 | 37 | 50 | 47 | 58 | 87 | 101 | 83 | 59 |
| 3-Methylpentan | 33 | 29 | 36 | 15 | 22 | 19 | 29 | 26 | 31 | 47 | 56 | 53 | 33 |
| Isopren | 12 | 21 | 19 | 30 | 200 | 127 | 322 | 462 | 89 | 93 | 23 | 12 | 116 |
| n-Hexan | 42 | 36 | 42 | 21 | 35 | - | 32 | 34 | 35 | 51 | 56 | 65 | 43 |
| n-Heptan | 21 | 18 | 22 | 10 | 13 | 11 | 13 | 11 | 19 | 24 | 36 | 27 | 19 |
| Benzol | 256 | 200 | 279 | 134 | 103 | 78 | 73 | 99 | 130 | 211 | 230 | 269 | 172 |
| Toluol | 177 | 153 | 206 | 99 | 115 | 117 | 148 | 124 | 174 | 217 | 317 | 211 | 172 |
| Ethylbenzol | 23 | 20 | 32 | 12 | 17 | 17 | 18 | 14 | 22 | 34 | 40 | 30 | 23 |
| m/p-Xylol | 44 | 48 | 71 | 23 | 32 | 23 | 34 | 27 | 52 | 72 | 107 | 61 | 50 |
| o-Xylol | 14 | 9 | 23 | 10 | 9 | 5 | 10 | 6 | 18 | 23 | 31 | 18 | 15 |
| Pentene | 40 | 39 | 35 | 30 | 30 | 36 | 50 | 29 | 41 | 40 | 53 | 42 | 39 |
| VOC gesamt | 7299 | 6545 | 7148 | 4203 | 3315 | 2308 | 2996 | 2860 | 4041 | 5632 | 7195 | 7332 | 5090 |

Tabelle 38: Monatsmaxima, VOC in Zingst für 2001 in ppt

| Komponente | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ethan** | 4832 | 4409 | 3809 | 2447 | 1452 | 1276 | 1361 | 966 | 2201 | 2415 | 2845 | 4654 |
| **Ethen** | 4074 | 3385 | 2081 | 645 | 336 | 324 | 287 | 438 | 776 | 2122 | 1738 | 2857 |
| **Propan** | 2143 | 2264 | 1780 | 834 | 471 | 624 | 686 | 571 | 887 | 1299 | 1513 | 2534 |
| **Propen** | 437 | 387 | 192 | 107 | 91 | 107 | 75 | 173 | 145 | 248 | 359 | 389 |
| **Ethin** | 3528 | 3012 | 2677 | 1117 | 623 | 294 | 353 | 469 | 917 | 1637 | 1425 | 2367 |
| **i-Butan** | 541 | 560 | 405 | 202 | 175 | 129 | 161 | 186 | 189 | 409 | 453 | 609 |
| **n-Butan** | 975 | 950 | 702 | 301 | 281 | 350 | 349 | 389 | 362 | 679 | 862 | 1081 |
| **trans-2-Buten** | 11 | 11 | 11 | 11 | 7 | 9 | 7 | 8 | 13 | 7 | 18 | 8 |
| **1-Buten** | 68 | 57 | 48 | 27 | 28 | 26 | 23 | 35 | 45 | 53 | 74 | 60 |
| **i-Buten** | 181 | 151 | 146 | 108 | 154 | 124 | 120 | 95 | 127 | 107 | 151 | 149 |
| **cis-2-Buten** | 20 | 16 | 19 | 14 | 12 | 15 | 15 | 12 | 13 | 7 | 15 | 14 |
| **i-Pentan** | 519 | 430 | 409 | 186 | 351 | 444 | 959 | 494 | 226 | 611 | 459 | 502 |
| **n-Pentan** | 366 | 343 | 252 | 102 | 98 | 366 | 780 | 235 | 171 | 302 | 315 | 406 |
| **Butadien 1,3** | 58 | 39 | 20 | 14 | 61 | 9 | 10 | 11 | 32 | 27 | 46 | 61 |
| **tr-2-Penten** | 5 | 7 | 9 | 5 | 5 | 6 | 7 | 11 | 6 | 6 | 8 | 6 |
| **cis-2-Penten** | 8 | 7 | 8 | 6 | 6 | 7 | 6 | 7 | 6 | 8 | 8 | 7 |
| **2-Methylpentan** | 170 | 138 | 130 | 51 | 58 | 541 | 91 | 143 | 66 | 183 | 214 | 154 |
| **3-Methylpentan** | 100 | 87 | 72 | 28 | 25 | 284 | 54 | 76 | 35 | 105 | 138 | 86 |
| **Isopren** | 23 | 16 | 14 | 71 | 164 | 246 | 1305 | 4611 | 511 | 73 | 21 | 21 |
| **n-Hexan** | 140 | 143 | 84 | 41 | 184 | - | 61 | 94 | 50 | 102 | 275 | 157 |
| **n-Heptan** | 61 | 49 | 68 | 19 | 16 | 12 | 21 | 33 | 22 | 31 | 63 | 49 |
| **Benzol** | 849 | 786 | 619 | 268 | 118 | 108 | 141 | 151 | 573 | 387 | 383 | 640 |
| **Toluol** | 489 | 370 | 342 | 153 | 139 | 156 | 344 | 448 | 212 | 350 | 659 | 347 |
| **Ethylbenzol** | 76 | 49 | 66 | 29 | 27 | 16 | 45 | 46 | 32 | 118 | 61 | 49 |
| **m/p-Xylol** | 167 | 97 | 98 | 53 | 43 | 45 | 92 | 114 | 93 | 362 | 193 | 130 |
| **o-Xylol** | 56 | 31 | 39 | 16 | 12 | 3 | 30 | 39 | 33 | 151 | 59 | 47 |
| **Pentene** | 52 | 51 | 54 | 41 | 47 | 42 | 45 | 70 | 52 | 54 | 64 | 49 |

Tabelle 39: Monatsmaxima, VOC in Waldhof für 2001 in ppt

| Komponente | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ethan** | 5082 | 3953 | 4058 | 2547 | 1632 | 1383 | 1999 | 1297 | 2405 | 2642 | 3242 | 3459 |
| **Ethen** | 3452 | 1255 | 2583 | 1310 | 734 | 441 | 438 | 711 | 1158 | 1559 | 2513 | 2853 |
| **Propan** | 2093 | 4236 | 2691 | 1206 | 719 | 822 | 1149 | 643 | 1125 | 1337 | 1773 | 1590 |
| **Propen** | 398 | 219 | 330 | 160 | 267 | 104 | 105 | 324 | 191 | 252 | 631 | 440 |
| **Ethin** | 3009 | 1341 | 2612 | 1196 | 632 | 524 | 392 | 280 | 1087 | 1219 | 1482 | 2228 |
| **i-Butan** | 508 | 690 | 662 | 240 | 247 | 212 | 492 | 198 | 254 | 457 | 578 | 439 |
| **n-Butan** | 906 | 1593 | 1295 | 369 | 399 | 429 | 557 | 288 | 457 | 795 | 1042 | 998 |
| **trans-2-Buten** | 10 | 13 | 12 | 9 | 8 | 7 | 12 | 7 | 8 | 7 | 30 | 16 |
| **1-Buten** | 79 | 53 | 63 | 39 | 53 | 24 | 33 | 50 | 54 | 58 | 136 | 76 |
| **i-Buten** | 189 | 175 | 134 | 232 | 132 | 110 | 124 | 139 | 179 | 158 | 242 | 162 |
| **cis-2-Buten** | 18 | 21 | 17 | 12 | 13 | 11 | 13 | 11 | 9 | 10 | 33 | 21 |
| **i-Pentan** | 549 | 658 | 674 | 169 | 337 | 396 | 290 | 1224 | 425 | 716 | 981 | 347 |
| **n-Pentan** | 337 | 777 | 510 | 156 | 209 | 246 | 157 | 164 | 547 | 393 | 650 | 287 |
| **Butadien 1,3** | 52 | 38 | 34 | 14 | 12 | 29 | 12 | 16 | 25 | 34 | 91 | 54 |
| **tr-2-Penten** | 11 | 9 | 11 | 8 | 6 | 5 | 6 | 4 | 5 | 5 | 24 | 7 |
| **cis-2-Penten** | 8 | 10 | 7 | 6 | 8 | 21 | 6 | 5 | 6 | 5 | 13 | 7 |
| **2-Methylpentan** | 189 | 225 | 240 | 50 | 113 | 126 | 68 | 84 | 119 | 189 | 234 | 132 |
| **3-Methylpentan** | 103 | 116 | 129 | 27 | 63 | 63 | 32 | 46 | 58 | 97 | 130 | 78 |
| **Isopren** | 32 | 20 | 16 | 47 | 40 | 158 | 178 | 123 | 57 | 38 | 44 | 16 |
| **n-Hexan** | 140 | 200 | 171 | 38 | 89 | - | 86 | 76 | 99 | 108 | 149 | 99 |
| **n-Heptan** | 59 | 81 | 77 | 24 | 29 | 23 | 23 | 25 | 37 | 44 | 116 | 42 |
| **Benzol** | 761 | 329 | 601 | 314 | 167 | 486 | 142 | 95 | 446 | 325 | 400 | 593 |
| **Toluol** | 495 | 351 | 537 | 211 | 255 | 225 | 325 | 200 | 349 | 538 | 851 | 372 |
| **Ethylbenzol** | 91 | 68 | 118 | 42 | 44 | 36 | 64 | 30 | 54 | 69 | 124 | 56 |
| **m/p-Xylol** | 205 | 194 | 234 | 67 | 87 | 66 | 75 | 70 | 121 | 118 | 329 | 124 |
| **o-Xylol** | 71 | 68 | 74 | 17 | 24 | 14 | 28 | 26 | 32 | 52 | 92 | 40 |
| **Pentene** | 65 | 63 | 63 | 36 | 48 | 40 | 46 | 33 | 51 | 36 | 114 | 50 |

Tabelle 40: Monatsmaxima, VOC auf der Schmücke für 2001 in ppt

| Komponente | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ethan** | 3522 | 3311 | 3605 | 2013 | 1407 | 1117 | 881 | 1469 | - | 2017 | 2919 | 2351 |
| **Ethen** | 3170 | 1771 | 2691 | 536 | 278 | 404 | 197 | 518 | - | 1134 | 2092 | 1197 |
| **Propan** | 1557 | 1585 | 1748 | 893 | 509 | 524 | 242 | 510 | - | 937 | 1301 | 1317 |
| **Propen** | 323 | 262 | 358 | 105 | 63 | 111 | 46 | 92 | - | 177 | 439 | 301 |
| **Ethin** | 3046 | 1696 | 2706 | 891 | 452 | 500 | 231 | 566 | - | 1505 | 1262 | 1240 |
| **i-Butan** | 447 | 448 | 569 | 154 | 158 | 135 | 63 | 126 | - | 375 | 345 | 407 |
| **n-Butan** | 875 | 1083 | 1170 | 308 | 264 | 224 | 123 | 273 | - | 656 | 670 | 908 |
| **trans-2-Buten** | 52 | 11 | 16 | 10 | 8 | 12 | 12 | 7 | - | 12 | 18 | 87 |
| **1-Buten** | 73 | 64 | 82 | 24 | 25 | 38 | 26 | 35 | - | 53 | 85 | 92 |
| **i-Buten** | 233 | 178 | 249 | 116 | 113 | 156 | 104 | 110 | - | 108 | 161 | 177 |
| **cis-2-Buten** | 48 | 17 | 25 | 12 | 18 | 17 | 10 | 13 | - | 16 | 17 | 76 |
| **i-Pentan** | 669 | 342 | 554 | 150 | 209 | 173 | 87 | 272 | - | 537 | 421 | 1238 |
| **n-Pentan** | 325 | 237 | 354 | 93 | 171 | 104 | 133 | 156 | - | 272 | 242 | 546 |
| **Butadien 1,3** | 44 | 32 | 43 | 10 | 33 | 19 | 5 | 5 | - | 24 | 66 | 33 |
| **tr-2-Penten** | 47 | 8 | 10 | 9 | 9 | 8 | 8 | 6 | - | 10 | 9 | 106 |
| **cis-2-Penten** | 26 | 9 | 8 | 8 | 7 | 9 | 6 | 6 | - | 10 | 9 | 57 |
| **2-Methylpentan** | 208 | 128 | 194 | 56 | 69 | 56 | 65 | 86 | - | 164 | 126 | 480 |
| **3-Methylpentan** | 111 | 75 | 105 | 30 | 39 | 29 | 28 | 47 | - | 81 | 76 | 243 |
| **Isopren** | 105 | 15 | 21 | 25 | 62 | 100 | 79 | 87 | - | 33 | 29 | 41 |
| **n-Hexan** | 120 | 95 | 112 | 33 | 45 | - | 43 | 46 | - | 79 | 95 | 199 |
| **n-Heptan** | 69 | 48 | 68 | 20 | 20 | 14 | 11 | 23 | - | 88 | 49 | 69 |
| **Benzol** | 664 | 377 | 615 | 190 | 111 | 121 | 84 | 166 | - | 347 | 341 | 561 |
| **Toluol** | 584 | 344 | 591 | 144 | 308 | 199 | 191 | 195 | - | 611 | 490 | 730 |
| **Ethylbenzol** | 88 | 51 | 99 | 27 | 30 | 39 | 44 | 34 | - | 67 | 74 | 109 |
| **m/p-Xylol** | 199 | 119 | 232 | 60 | 69 | 102 | 111 | 78 | - | 119 | 189 | 323 |
| **o-Xylol** | 78 | 38 | 69 | 22 | 20 | 34 | 43 | 31 | - | 43 | 59 | 114 |
| **Pentene** | 206 | 66 | 79 | 46 | 49 | 46 | 44 | 49 | - | 67 | 72 | 444 |

Tabelle 41: Monatsmaxima, VOC auf dem Brotjacklriegel für 2001 in ppt

| Komponente | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ethan** | 3393 | 2704 | 3086 | 2337 | 1519 | 1212 | 1025 | 1253 | 1814 | 2071 | 2608 | 3303 |
| **Ethen** | 2205 | 1084 | 1849 | 487 | 620 | 341 | 323 | 445 | 866 | 1134 | 2195 | 1139 |
| **Propan** | 1328 | 1124 | 1405 | 727 | 587 | 437 | 476 | 423 | 612 | 770 | 1337 | 2036 |
| **Propen** | 267 | 145 | 206 | 78 | 127 | 90 | 95 | 68 | 131 | 150 | 394 | 213 |
| **Ethin** | 1942 | 1183 | 2095 | 860 | 803 | 399 | 594 | 751 | 1299 | 1716 | 1552 | 1622 |
| **i-Butan** | 336 | 276 | 368 | 203 | 155 | 119 | 240 | 157 | 269 | 256 | 491 | 1210 |
| **n-Butan** | 561 | 467 | 618 | 437 | 276 | 191 | 207 | 239 | 237 | 424 | 786 | 841 |
| **trans-2-Buten** | 11 | 11 | 10 | 12 | 9 | 11 | 26 | 7 | 11 | 17 | 30 | 14 |
| **1-Buten** | 68 | 39 | 50 | 37 | 31 | 30 | 29 | 26 | 34 | 43 | 87 | 65 |
| **i-Buten** | 156 | 129 | 122 | 116 | 99 | 107 | 98 | 84 | 126 | 147 | 178 | 194 |
| **cis-2-Buten** | 13 | 17 | 24 | 13 | 12 | 14 | 26 | 6 | 14 | 16 | 31 | 16 |
| **i-Pentan** | 327 | 269 | 428 | 138 | 264 | 213 | 1238 | 465 | 283 | 409 | 680 | 372 |
| **n-Pentan** | 208 | 163 | 248 | 118 | 114 | 120 | 678 | 247 | 182 | 217 | 337 | 341 |
| **Butadien 1,3** | 35 | 19 | 29 | 10 | 9 | 8 | 11 | 8 | 10 | 21 | 49 | 44 |
| **tr-2-Penten** | 9 | 6 | 9 | 8 | 7 | 11 | 49 | 10 | 15 | 10 | 17 | 21 |
| **cis-2-Penten** | 7 | 9 | 7 | 5 | 6 | 8 | 27 | 6 | 9 | 8 | 11 | 11 |
| **2-Methylpentan** | 120 | 77 | 144 | 39 | 76 | 60 | 161 | 110 | 97 | 123 | 201 | 129 |
| **3-Methylpentan** | 63 | 41 | 76 | 21 | 47 | 31 | 99 | 62 | 50 | 77 | 117 | 109 |
| **Isopren** | 22 | 63 | 38 | 118 | 285 | 374 | 774 | 805 | 237 | 274 | 35 | 22 |
| **n-Hexan** | 76 | 50 | 75 | 29 | 58 | - | 56 | 61 | 54 | 78 | 125 | 128 |
| **n-Heptan** | 42 | 25 | 43 | 13 | 24 | 16 | 24 | 23 | 37 | 33 | 90 | 47 |
| **Benzol** | 468 | 267 | 492 | 193 | 209 | 93 | 129 | 160 | 272 | 327 | 389 | 438 |
| **Toluol** | 371 | 222 | 438 | 138 | 214 | 172 | 397 | 268 | 268 | 340 | 722 | 350 |
| **Ethylbenzol** | 55 | 28 | 72 | 28 | 48 | 31 | 42 | 40 | 39 | 49 | 78 | 54 |
| **m/p-Xylol** | 134 | 88 | 156 | 51 | 94 | 51 | 98 | 74 | 123 | 115 | 238 | 135 |
| **o-Xylol** | 41 | 17 | 62 | 30 | 38 | 19 | 33 | 30 | 66 | 39 | 72 | 39 |
| **Pentene** | 73 | 49 | 49 | 50 | 40 | 48 | 194 | 50 | 69 | 66 | 90 | 98 |

## 2.1.5 Kohlendioxid ($CO_2$)

Kohlendioxid ($CO_2$) ist derzeit mit etwa 50% für den zusätzlichen, anthropogen verursachten Treibhauseffekt verantwortlich. Die wichtigsten anthropogenen Quellen in Deutschland (1999) sind Kraft- und Fernheizwerke mit ca. 37%, gefolgt vom Straßenverkehr mit 19%, Industriefeuerungen (16%) und Haushalten (14%). Der deutsche Beitrag an den weltweiten anthropogenen $CO_2$-Emissionen beträgt gegenwärtig knapp 3%. Er wird in den kommenden Jahren noch weiter zurückgehen. Zwischen 1990 und 1999 haben die $CO_2$-Emissionen in Deutschland um etwa (15%) abgenommen (siehe Abbildung 28).

Seit 1972 werden an 5 Messstationen des UBA (Westerland, Waldhof, Deuselbach, Schauinsland und Brotjacklriegel) kontinuierliche Messungen der atmosphärischen $CO_2$-Konzentrationen durchgeführt, seit 1995 auch an den Stationen Zingst, Neuglobsow, Schmücke und auf der Zugspitze. Alle Werte sind auf die internationale NOAA-Scale bezogen. Abbildung 29 zeigt den Verlauf der $CO_2$-Monatsmittel an der UBA-Station Schauinsland im Vergleich zu globalen Hintergrundstationen von 1968 bis 2001.

In der Tabelle 42 sind die Monats- und Jahresmittel der $CO_2$-Konzentrationen und in Tabelle 43 die monatlichen Halbstundenmaxima zusammengestellt. Die monatlichen 50-Perzentilwerte, 98-Perzentilwerte sowie die jährlichen Perzentile sind in Tabelle 44 bis Tabelle 46 zusammengestellt. Generell sind die Konzentrationsunterschiede für die unterschiedlichen Perzentile wegen der sehr großen atmosphärischen Lebensdauer dieses Treibhausgases wesentlich geringer als für die reaktiven Gase $SO_2$, NO, $NO_2$, $O_3$, PAN und VOC. In Tabelle 47 und in Abbildung 30 sind die $CO_2$-Jahreswerte von 1972 bis 2001 zusammengestellt. Aus diesen Daten lässt sich eine mittlere Zunahme der $CO_2$-Konzentration von etwa 1.5 ppm/Jahr (entspricht etwa 0.4%/Jahr) ableiten.

Ein ausführlicher Beitrag über die atmosphärischen Kreisläufe der Treibhausgase $CO_2$, $CH_4$ und $N_2O$ ist im Messnetz-Jahresbericht 1999 des UBA enthalten *(Ref. 15)*.

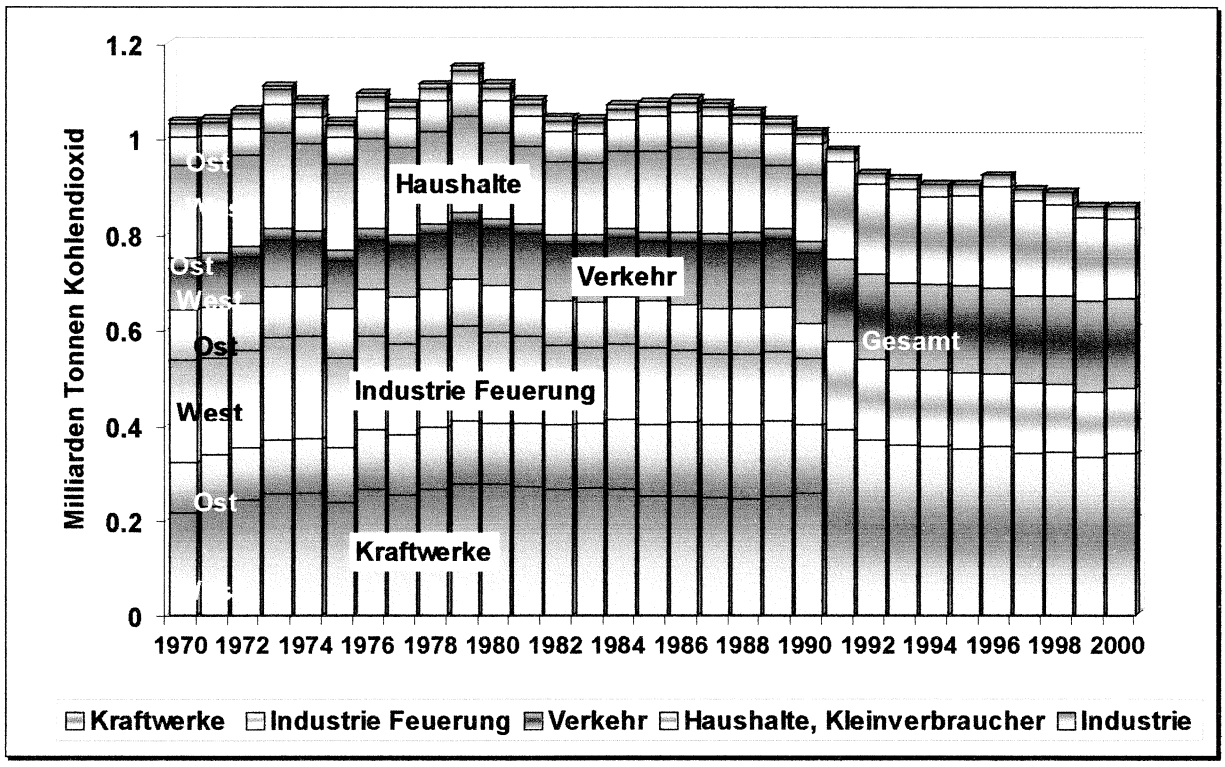



Abbildung 28: Jährliche Kohlendioxid-Emissionen in Deutschland von 1970 bis 2000 *(Ref. 1)*

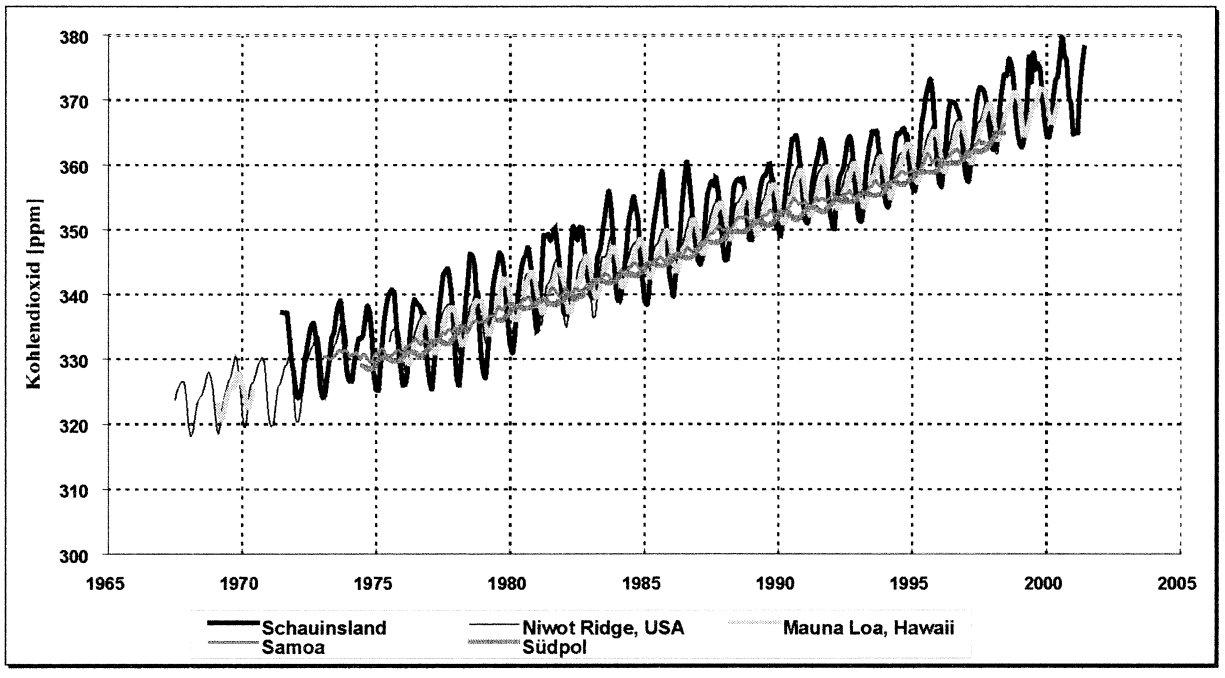



Abbildung 29: Langzeittrend der Monatsmittel der Kohlendioxidkonzentrationen vom Schauinsland im Vergleich zu Stationen auf Hawaii (Mauna Loa), in Niwot Ridge (USA), in Samoa und am Südpol zwischen 1968 bis 2001

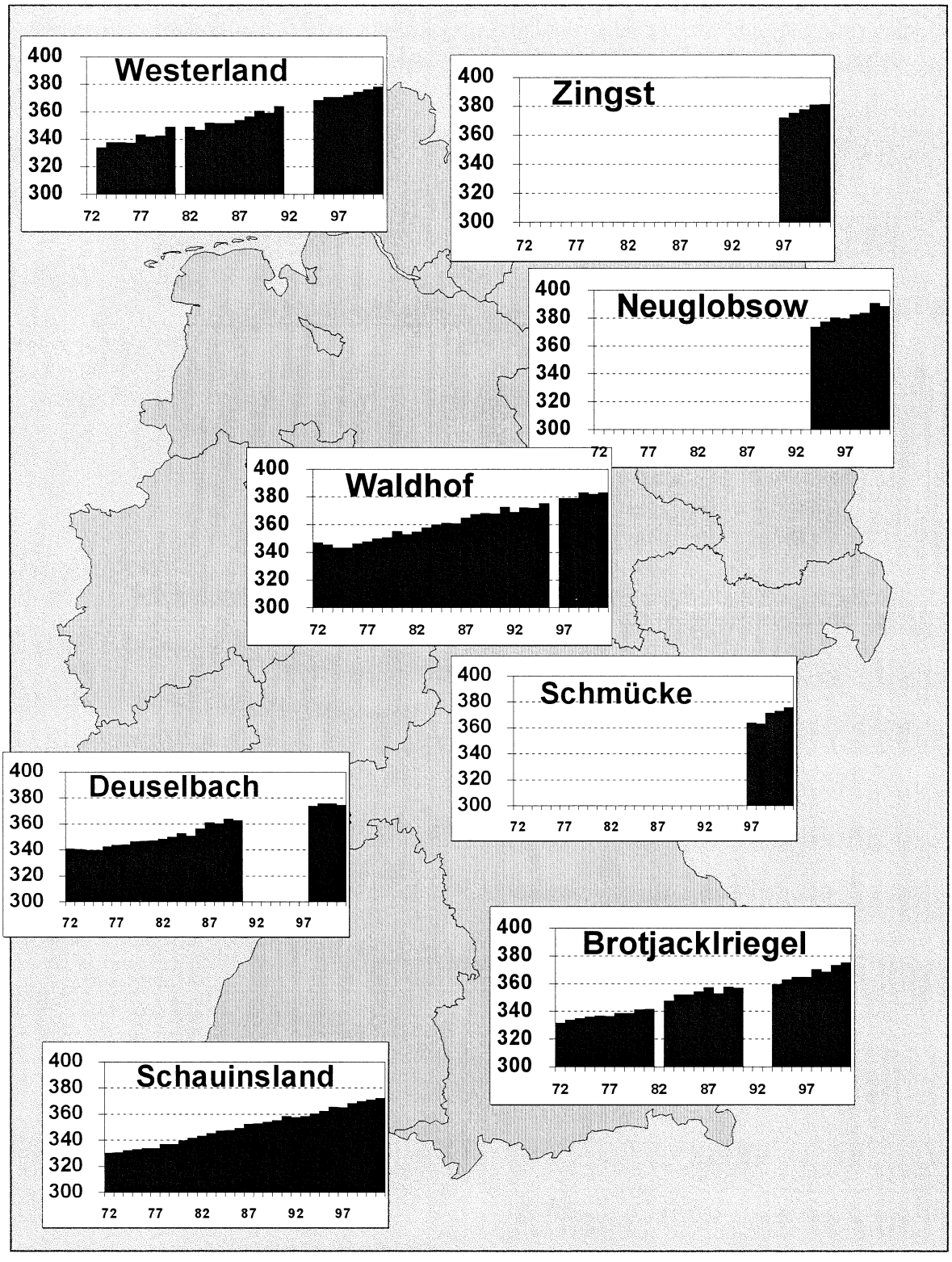



Abbildung 30: Jahresmittel von Kohlendioxid für 1972 bis 2001 in ppm (NOAA-Scale)

Tabelle 42: Monats- und Jahresmittel, Kohlendioxid für 2001 in ppm, kursive Werte: GC, andere Werte: IR

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 387 | 382 | 385 | 379 | - | 373 | 370 | 373 | 373 | - | 377 | 384 | 378 |
| *ZG* | *386* | *381* | *385* | *381* | *382* | *378* | *377* | *378* | *378* | *387* | *380* | *383* | *381* |
| *NG* | *-* | *386* | *389* | *389* | *386* | *386* | *388* | *392* | *385* | *402* | *385* | *386* | *389* |
| WA | 390 | - | 382 | 383 | 381 | 380 | 386 | - | - | - | - | - | - |
| *SM* | *382* | *383* | *384* | *377* | *373* | *370* | *368* | *370* | *373* | *379* | *-* | *-* | *376* |
| *DE* | *383* | *376* | *377* | *374* | *373* | *368* | *370* | *372* | *372* | *378* | *-* | *-* | *374* |
| BR | 380 | 381 | 381 | 377 | - | 369 | 366 | 367 | 369 | 376 | 380 | 382 | 375 |
| SC | 377 | 380 | 377 | 376 | 371 | 369 | 365 | 365 | 365 | 372 | 376 | 378 | 372 |

Tabelle 43: Monatsmaxima der Halbstundenwerte, Kohlendioxid für 2001 in ppm, kursive Werte: GC, andere Werte: IR

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 459 | 403 | 439 | 408 | - | 408 | 402 | 472 | 421 | - | 417 | 423 |
| *ZG* | *404* | *403* | *419* | *413* | *487* | *541* | *524* | *488* | *474* | *483* | *418* | *413* |
| *NG* | *-* | *423* | *423* | *446* | *476* | *509* | *506* | *530* | *484* | *508* | *408* | *415* |
| WA | 423 | - | 420 | 439 | 463 | 463 | 463 | - | - | - | - | - |
| *SM* | *418* | *401* | *408* | *392* | *393* | *388* | *385* | *397* | *408* | *399* | *-* | *-* |
| *DE* | *425* | *417* | *407* | *398* | *413* | *414* | *422* | *411* | *409* | *418* | *-* | *-* |
| BR | 395 | 405 | 402 | 391 | - | 386 | 393 | 408 | 390 | 402 | 402 | 397 |
| SC | 388 | 409 | 399 | 395 | 391 | 385 | 385 | 399 | 378 | 385 | 387 | 393 |

Tabelle 44: Monatliche 50-Perzentile der Halbstundenwerte von Kohlendioxid für 2001 in ppm, kursive Werte: GC, andere Werte: IR

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 386 | 381 | 382 | - | - | 374 | 368 | 367 | 369 | - | 374 | 381 |
| *ZG* | *386* | *380* | *383* | *379* | *377* | *372* | *370* | *373* | *374* | *383* | *378* | *382* |
| *NG* | *-* | *385* | *387* | *383* | *379* | *378* | *379* | *384* | *381* | *398* | *384* | *385* |
| WA | 385 | - | 381 | 381 | 375 | 374 | 378 | - | - | - | - | - |
| *SM* | *381* | *382* | *383* | *377* | *372* | *370* | *368* | *369* | *372* | *380* | *-* | *-* |
| *DE* | *381* | *378* | *377* | *373* | *373* | *368* | *367* | *371* | *372* | *378* | *-* | *-* |
| BR | 379 | 380 | 380 | 377 | - | 368 | 365 | 366 | 368 | 375 | 379 | 382 |
| SC | 376 | 379 | 376 | 376 | 371 | 369 | 365 | 365 | 365 | 371 | 375 | 378 |

Tabelle 45: Monatliche 98-Perzentile der Halbstundenwerte von Kohlendioxid für 2001 in ppm, kursive Werte: GC, andere Werte: IR

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 408 | 396 | 408 | - | - | 389 | 390 | 421 | 407 | - | 401 | 407 |
| *ZG* | *400* | *391* | *400* | *400* | *439* | *425* | *443* | *445* | *428* | *424* | *402* | *401* |
| *NG* | *-* | *404* | *412* | *427* | *444* | *455* | *462* | *487* | *450* | *470* | *403* | *403* |
| WA | 416 | - | 405 | 416 | 446 | 454 | 463 | - | - | - | - | - |
| *SM* | *398* | *394* | *398* | *385* | *387* | *383* | *382* | *385* | *389* | *394* | *-* | *-* |
| *DE* | *405* | *394* | *398* | *390* | *396* | *393* | *399* | *399* | *392* | *400* | *-* | *-* |
| BR | 392 | 398 | 392 | 386 | - | 382 | 383 | 388 | 383 | 389 | 396 | 394 |
| SC | 384 | 400 | 391 | 383 | 385 | 380 | 376 | 377 | 374 | 380 | 383 | 386 |

Tabelle 46: Jährliche Perzentile der Halbstundenwerte von Kohlendioxid für 2001 in ppm, kursive Werte: GC, andere Werte: IR

| Station | Min | 2% | 5% | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% | 98% | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 333 | 361 | 362 | 365 | 372 | 376 | 384 | 392 | 397 | 404 | 472 |
| *ZG* | *345* | *361* | *363* | *367* | *374* | *379* | *386* | *395* | *403* | *419* | *541* |
| *NG* | *356* | *361* | *364* | *368* | *377* | *384* | *395* | *413* | *428* | *450* | *530* |
| WA | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| *SM* | *353* | *361* | *363* | *365* | *370* | *376* | *381* | *386* | *390* | *394* | *418* |
| *DE* | *334* | *351* | *356* | *360* | *367* | *375* | *381* | *388* | *393* | *398* | *425* |
| BR | 347 | 358 | 361 | 363 | 369 | 376 | 380 | 385 | 388 | 392 | 408 |
| SC | 322 | 358 | 360 | 363 | 368 | 374 | 377 | 380 | 382 | 385 | 409 |

Tabelle 47: Jahresmittel von Kohlendioxid für 1972 bis 2001 in ppm, kursive Werte: GC, andere Werte: IR. Im Jahr 2000 war das $CO_2$-IR-Gerät von Neuglobsow zu Vergleichszwecken auf dem Feldberg (siehe Messnetz-Jahresbericht 2000, Kapitel 3.3), daher für dieses Jahr GC-Werte.

| Stationen | Wester-land | Zingst | Neuglob-sow | Waldhof | Schmücke | Deusel-bach | Brot-jacklr. | Schau-insland | Zug-spitze |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1972 | - | - | - | 347 | - | 341 | 332 | 330 | - |
| 1973 | 334 | - | - | 346 | - | 340 | 334 | 331 | - |
| 1974 | 338 | - | - | 343 | - | 340 | 335 | 332 | - |
| 1975 | 338 | - | - | 343 | - | 340 | 336 | 333 | - |
| 1976 | 337 | - | - | 346 | - | 342 | 337 | 334 | - |
| 1977 | 343 | - | - | 348 | - | 344 | 336 | 334 | - |
| 1978 | 342 | - | - | 350 | - | 344 | 339 | 337 | - |
| 1979 | 343 | - | - | 351 | - | 346 | 339 | 337 | - |
| 1980 | - | - | - | 355 | - | 347 | 341 | 340 | - |
| 1981 | - | - | - | 353 | - | 347 | 342 | 342 | - |
| 1982 | 349 | - | - | 355 | - | 348 | - | 343 | - |
| 1983 | 347 | - | - | 358 | - | 350 | - | 345 | - |
| 1984 | 352 | - | - | 360 | - | 353 | 352 | 347 | - |
| 1985 | 352 | - | - | 361 | - | 351 | 352 | 348 | - |
| 1986 | 352 | - | - | 361 | - | 356 | 354 | 349 | - |
| 1987 | 354 | - | - | 365 | - | 361 | 357 | 352 | - |
| 1988 | 357 | - | - | 368 | - | 360 | 353 | 353 | - |
| 1989 | 361 | - | - | 368 | - | 364 | - | 354 | - |
| 1990 | 359 | - | - | 368 | - | 363 | 357 | 355 | - |
| 1991 | 364 | - | - | 373 | - | - | - | 358 | - |
| 1992 | - | - | - | 369 | - | - | - | 357 | - |
| 1993 | - | - | - | 372 | - | - | - | 359 | - |
| 1994 | - | - | 374 | 372 | - | - | 359 | 360 | - |
| 1995 | 369 | - | 377 | 375 | - | - | 363 | 362 | 360 |
| 1996 | 371 | - | 380 | - | - | - | - | 366 | 361 |
| 1997 | 371 | *372* | 380 | 379 | *364* | *370* | 365 | 365 | 362 |
| 1998 | 372 | *375* | 382 | 379 | *363* | *374* | 370 | 368 | 368 |
| 1999 | 375 | *378* | 384 | 383 | *371* | *376* | 368 | 370 | 369 |
| 2000 | 376 | *381* | *391* | 382 | *373* | *376* | 373 | 371 | 370 |
| 2001 | 378 | *381* | 389 | 383 | *376* | *374* | 375 | 372 | - |

## 2.1.6 Methan ($CH_4$)

Methan ist derzeit mit etwa 20% für den zusätzlichen Treibhauseffekt verantwortlich. Ähnlich wie das $CO_2$ unterliegt Methan nur geringen räumlichen und zeitlichen Schwankungen.

Methan wird an 6 Stationen des UBA gemessen: Schauinsland (seit September 1991), Deuselbach (seit November 1993), Zingst (seit Februar 1994), Neuglobsow (seit August 1994), Schmücke (seit 1997) und Zugspitze (seit 1994).

In der Tabelle 48 sind die Monats- und Jahresmittel und in Tabelle 49 die Monatsmaxima der Halbstundenwerte für 2001 aufgelistet. Der höchste Jahreswert wurde mit 1891 ppb in Zingst, der niedrigste mit 1844 ppb am Schauinsland gemessen. Die $CH_4$-Konzentrationen sind im Sommer geringfügig (um 0.4%) niedriger als im Winter. In Abbildung 31 ist der zunehmende Trend der Monatsmittel für Methan, $CO_2$ und $N_2O$ an der Station Schauinsland dargestellt.

Die monatlichen 50-Perzentilwerte, 98-Perzentilwerte sowie die jährlichen Perzentile sind in Tabelle 50 bis Tabelle 52 zusammengestellt. Generell sind die Konzentrationsunterschiede für die verschiedenen Perzentile - ähnlich wie beim $CO_2$- wesentlich geringer als für die reaktiven Gase.

In Tabelle 53 sind die $CH_4$-Jahreswerte ab 1993 angegeben. Obwohl die Zeitreihen noch vergleichsweise kurz sind, lässt sich doch eine leichte Zunahme erkennen. Am Schauinsland betrug die Zunahme im Mittel 4 ppb/Jahr (0.2%/Jahr).

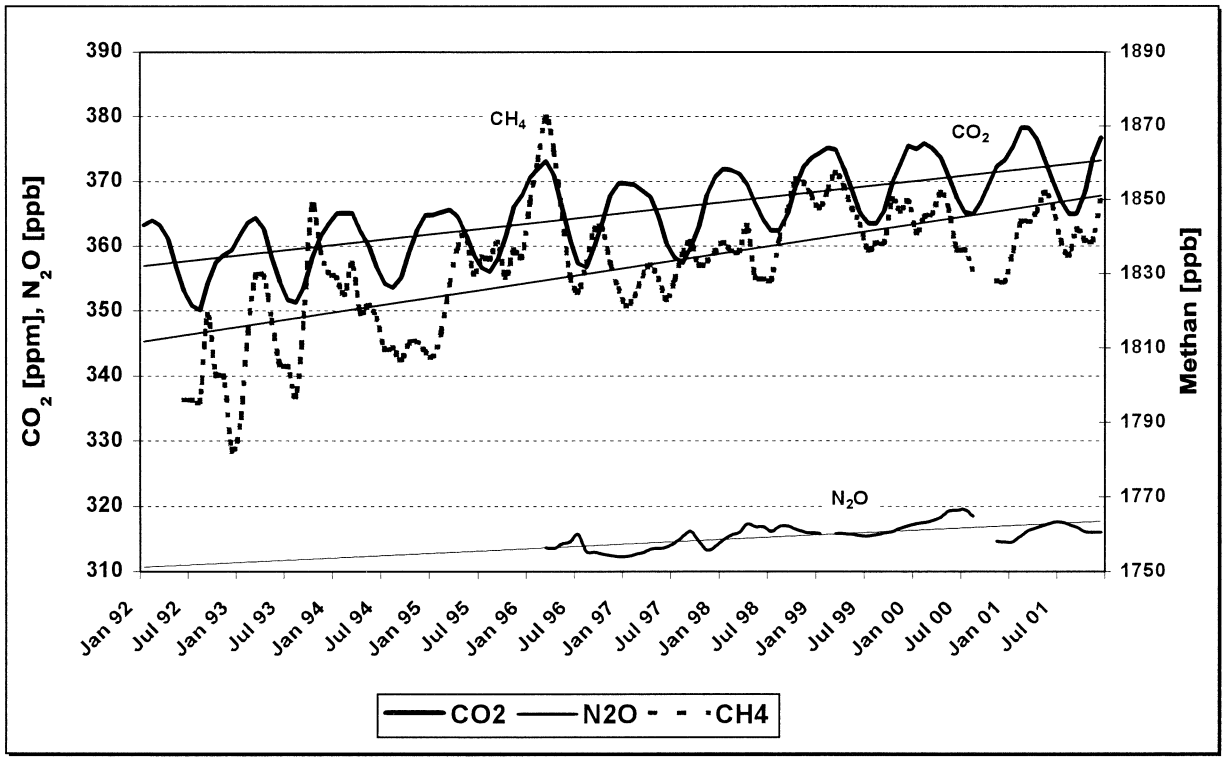



Abbildung 31: Monatsmittel der Methan-, Kohlendioxid- ($CO_2$) und Distickstoffoxid- ($N_2O$) Konzentrationen auf dem Schauinsland von 1992 bis 2001

Tabelle 48: Monats- und Jahresmittel, Methan für 2001 in ppb

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZG | 1908 | 1881 | 1903 | 1875 | 1854 | 1857 | 1878 | 1890 | 1924 | 1946 | 1887 | 1893 | 1756 |
| NG | - | 1869 | 1882 | 1852 | 1826 | 1830 | 1829 | 1842 | 1874 | 1901 | 1869 | 1891 | 1860 |
| SM | 1888 | 1878 | 1899 | 1864 | 1851 | 1854 | 1842 | 1847 | 1869 | - | - | - | 1865 |
| DE | 1905 | 1890 | 1886 | 1869 | 1869 | 1859 | 1862 | 1857 | 1874 | 1878 | - | - | 1875 |
| SC | 1844 | - | 1844 | 1850 | 1854 | 1842 | 1836 | 1834 | 1850 | 1828 | 1850 | 1851 | 1844 |

Tabelle 49: Monatsmaxima der Halbstundenwerte, Methan für 2001 in ppb

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZG | 1999 | 2068 | 2249 | 2041 | 1999 | 1999 | 2609 | 2466 | 2721 | 2471 | 2162 | 2182 |
| NG | - | 2044 | 2100 | 1980 | 1998 | 1981 | 1969 | 2000 | 2075 | 2105 | 2126 | 2033 |
| SM | 2088 | 2056 | 2048 | 1973 | 1998 | 1995 | 1919 | 1963 | 2027 | - | - | - |
| DE | 2252 | 2273 | 2105 | 1997 | 1999 | 2067 | 2103 | 1999 | 2054 | 2082 | - | - |
| SC | 2064 | - | 2065 | 1945 | 1952 | 1971 | 1984 | 1988 | 1951 | 1961 | 1983 | 2015 |

Tabelle 50: Monatliche 50-Perzentile der Halbstundenwerte von Methan für 2001

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZG | 1909 | 1877 | 1890 | 1869 | 1842 | 1841 | 1854 | 1878 | 1892 | 1924 | 1867 | 1877 |
| NG | - | 1866 | 1870 | 1847 | 1819 | 1824 | 1820 | 1833 | 1867 | 1893 | 1857 | 1881 |
| SM | 1876 | 1867 | 1892 | 1860 | 1845 | 1853 | 1838 | 1840 | 1865 | 1862 | - | - |
| DE | 1890 | 1882 | 1881 | 1862 | 1864 | 1855 | 1855 | 1851 | 1866 | 1864 | - | - |
| SC | 1838 | - | 1833 | 1850 | 1853 | 1839 | 1836 | 1827 | 1846 | 1826 | 1845 | 1851 |

Tabelle 51: Monatliche 98-Perzentile der Halbstundenwerte von Methan für 2001

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZG | 1992 | 1974 | 2031 | 1957 | 1958 | 1970 | 2152 | 2105 | 2274 | 2218 | 2048 | 2017 |
| NG | - | 1959 | 1996 | 1935 | 1918 | 1914 | 1939 | 1944 | 2013 | 2072 | 2000 | 1995 |
| SM | 2003 | 1979 | 1995 | 1931 | 1952 | 1906 | 1898 | 1919 | 1961 | 1989 | - | - |
| DE | 2035 | 2051 | 1984 | 1951 | 1971 | 1967 | 1985 | 1948 | 1990 | 2006 | - | - |
| SC | 1901 | - | 1968 | 1905 | 1913 | 1903 | 1899 | 1905 | 1918 | 1888 | 1929 | 1910 |

Tabelle 52: Jährliche Perzentile der Halbstundenwerte von Methan für 2001

| Station | Min | 2% | 5% | 10% | 25% | 50% | 75% | 90% | 95% | 98% | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZG | 1320 | 1816 | 1823 | 1830 | 1845 | 1875 | 1919 | 1967 | 2002 | 2094 | 2721 |
| NG | 1751 | 1792 | 1800 | 1808 | 1824 | 1849 | 1886 | 1930 | 1958 | 1993 | 2126 |
| SM | 1783 | 1811 | 1819 | 1826 | 1838 | 1857 | 1883 | 1917 | 1942 | 1970 | 2088 |
| DE | 1754 | 1809 | 1819 | 1828 | 1843 | 1865 | 1897 | 1939 | 1967 | 1993 | 2273 |
| SC | 1766 | 1795 | 1805 | 1812 | 1825 | 1839 | 1861 | 1882 | 1895 | 1918 | 2065 |

Tabelle 53: Jahresmittel von Methan für 1993 bis 2001 in ppb

| Stationen | Wester-land | Zingst | Neuglob-sow | Waldhof | Schmücke | Deusel-bach | Brot-jacklr. | Schau-insland | Zug-spitze |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1993** | - | - | - | - | - | - | - | **1819** | - |
| **1994** | - | **1846** | - | - | - | **1847** | - | **1816** | - |
| **1995** | - | **1867** | **1857** | - | **1843** | **1872** | - | **1829** | **1803** |
| **1996** | - | - | - | - | - | - | - | **1842** | **1814** |
| **1997** | - | - | **1877** | - | - | **1870** | - | **1831** | **1800** |
| **1998** | - | **1882** | **1880** | - | - | **1878** | - | **1840** | **1809** |
| **1999** | - | **1886** | **1882** | - | **1869** | **1877** | - | **1846** | **1815** |
| **2000** | - | **1748** | **1877** | - | **1867** | **1880** | - | **1842** | **1813** |
| **2001** | - | **1891** | **1860** | - | **1865** | **1875** | - | **1844** | - |

## 2.1.7 Distickstoffdioxid ($N_2O$)

Distickstoffdioxid trägt mit etwa 6% zum zusätzlichen Treibhauseffekt bei. Ähnlich wie $CO_2$ und $CH_4$ unterliegt $N_2O$ nur geringen räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Die wichtigsten Quellen in Deutschland (1999) sind die Land- und Abfallwirtschaft mit mehr als 50%, gefolgt vom Verkehrsbereich mit ca. 10%, Industrieprozessen sowie Kraft- und Fernheizwerken mit jeweils ca. 7% *(Ref. 2)*.

Zwischen 1990 und 1999 wurden die $N_2O$-Emissionen in Deutschland um knapp 30% reduziert. Im UBA-Messnetz wird $N_2O$ bisher nur auf dem Schauinsland seit 1996 gemessen. Die mittlere Zunahme zwischen 1996 und 2001 betrug ca. 0.6 ppb/Jahr (ca. 0.2%/Jahr) (siehe Abbildung 31 und Tabelle 54)

Tabelle 54: Monats- und Jahresmittel von $N_2O$ auf dem Schauinsland für 1996 bis 2001 in ppb

| | Jan | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1996** | - | - | | 313.8 | - | - | - | - | - | 313.1 | - | - | - |
| **1997** | - | - | 313.0 | - | 314.0 | 313.8 | | 316.2 | 318.8 | | 312.6 | 314.2 | 314.7 |
| **1998** | 315.1 | - | 316.5 | - | 317.1 | 315.0 | 316.4 | 317.5 | 317.3 | 316.7 | 315.9 | 315.8 | 316.3 |
| **1999** | - | - | - | - | 315.7 | 315.4 | 315.2 | 315.9 | 315.9 | 316.2 | 316.4 | 317.4 | 316.0 |
| **2000** | 317.5 | 317.4 | 317.7 | 318.2 | 319.0 | 320.5 | 318.4 | - | - | - | - | 314.6 | 317.9 |
| **2001** | 314.4 | | 316.5 | 316.0 | 317.6 | 317.5 | 317.4 | 317.8 | 316.5 | 316.0 | 315.8 | 316.3 | 316.5 |

## 2.1.8 Partikelförmige Luftverunreinigungen

Im Übersichtsartikel in Kapitel 3.1 wird ausführlich über die Messungen von Feinstaub im Messnetz des Umweltbundesamtes berichtet. Aus diesem Grund sollen hier nur die Ergebnisse aus dem Jahr 2001 dargestellt und interpretiert werden.

Ausgehend von der Erkenntnis, dass vor allem kleine Staubteilchen ein hohes Schädigungspotential im Hinblick auf die menschliche Gesundheit aufweisen, steht die Belastung durch Feinstaub mit der Partikelgröße $PM_{10}$ in der Luft im Vordergrund nationaler und internationaler Luftreinhaltepolitik (Englisch: PM = particulate matter). Unter $PM_{10}$ versteht man - etwas vereinfacht - die Gesamtmasse aller Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 $\mu$m ist.

Im UBA-Messnetz wird der Gesamtschwebstaub (Tagesproben) teilweise schon seit Ende der 1960er Jahre an den Stationen Westerland, Zingst, Neuglobsow, Waldhof, Schmücke, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland gemessen. Ab Beginn der 90er Jahre werden neben den Tagesproben auch kontinuierliche Messungen des Schwebstaubs durchgeführt. Ab 1999 wurde an 8 von 9 personell besetzten Messstellen von der täglichen Gesamtstaubmessung auf die Bestimmung der Partikelmasse für Teilchen unterhalb von 10 $\mu$m Durchmesser ($PM_{10}$) umgestellt. In Waldhof wurden die Gesamtstaubmessungen parallel in 1999 weitergeführt und seit 1999 auch die Partikelmasse für Teilchen unterhalb von 2.5 $\mu$m Durchmesser ($PM_{2.5}$) bestimmt (siehe Abbildung 33). Über alle Messwerte gemittelt ergab sich für Waldhof für 2001 bei einem Vergleich zwischen $PM_{10}$ und Gesamtschwebstaub (Digitel) ein Faktor von 0.85 und zwischen Gesamtschwebstaub und $PM_{2.5}$ ein Faktor von 0.66 bei Korrelationskoeffizienten von 0.94 und 0.86 (Abbildung 33). Allerdings ist die Benutzung solch konstanter Umrechnungsfaktoren zwischen $PM_{2.5}$ und $PM_{10}$ problematisch, da die entsprechenden Regressionsgeraden nicht durch den Koordinatenursprung gehen. Hinzu kommt, dass die gemittelten Faktoren auch von der Lage der Station abhängen (näheres hierzu in Kapitel 3.1).

In Tabelle 55 sind die Monats- und Jahresmittel des Schwebstaubs (kontinuierlich) zusammengestellt. In Tabelle 56 sind die Jahresmittel von Schwebstaub für den Zeitraum 1989 bis 2001 für das kontinuierliche Messverfahren und in Tabelle 57 die Messergebnisse der Digitel high volume Tagesproben für den Zeitraum 1968 bis 2001 aufgelistet.

Wie aus Tabelle 56 sowie aus Tabelle 57 zu entnehmen ist, wurden im Jahre 2001 ähnlich niedrige Jahresmittelwerte für Schwebstaub (Digitel-Tagesproben) beobachtet wie im Jahre 2000. Die Schwebstaubbelastung (Tagesproben) in ländlichen Gebieten Deutschlands ist während der letzten 20 bis 30 Jahre um mehr als die Hälfte zurückgegangen (Abbildung 37). Der stärkste Rückgang erfolgte zwischen 1990 und 2001.

In Abbildung 35 ist der über 7 personell besetzte Messstellen gemittelte Trend der monatlichen Maximalwerte sowie verschiedener Perzentile (98-, 95- und 50%) für Gesamtstaub (TSP, Total Suspended Particles), bzw. seit 2001 $PM_{10}$ zwischen Januar 1992 und Dezember 2001 dargestellt. Die Station Westerland wurde wegen des hohen Seesalzanteils nicht berücksichtigt. Man erkennt einen deutlichen Rückgang aller Perzentilwerte um 60 bis 70%.

Stationen zu erkennen. Wegen der schnellen Sedimentation von Partikeln über 10 µm sollte die Abnahme für $PM_{10}$ und vor allem für $PM_{2.5}$ langsamer erfolgt sein als für TSP. Entsprechende Untersuchungen an einer städtischen Hintergrundstation in Berlin zwischen 1990 und 1998 haben beispielsweise eine langsamere Abnahme von $PM_{2.5}$ gegenüber $PM_{10}$ und TSP ergeben *(Ref. 3)*.

Als Folge der drastischen Reduzierung der Feinstaubemissionen in Deutschland während der letzten zehn Jahre werden die entsprechenden Konzentrationen des Feinstaubes in der Luft an den UBA-Messstellen nur noch sehr langsam abnehmen, da sie in zunehmendem Maße durch die Beiträge des Ferntransportes und der natürlichen Emissionen bestimmt werden.

Bezüglich der Staubinhaltsstoffe (schwefel- und stickstoffhaltige Verbindungen sowie Schwermetalle) wird auf Kapitel 3.1 verwiesen.

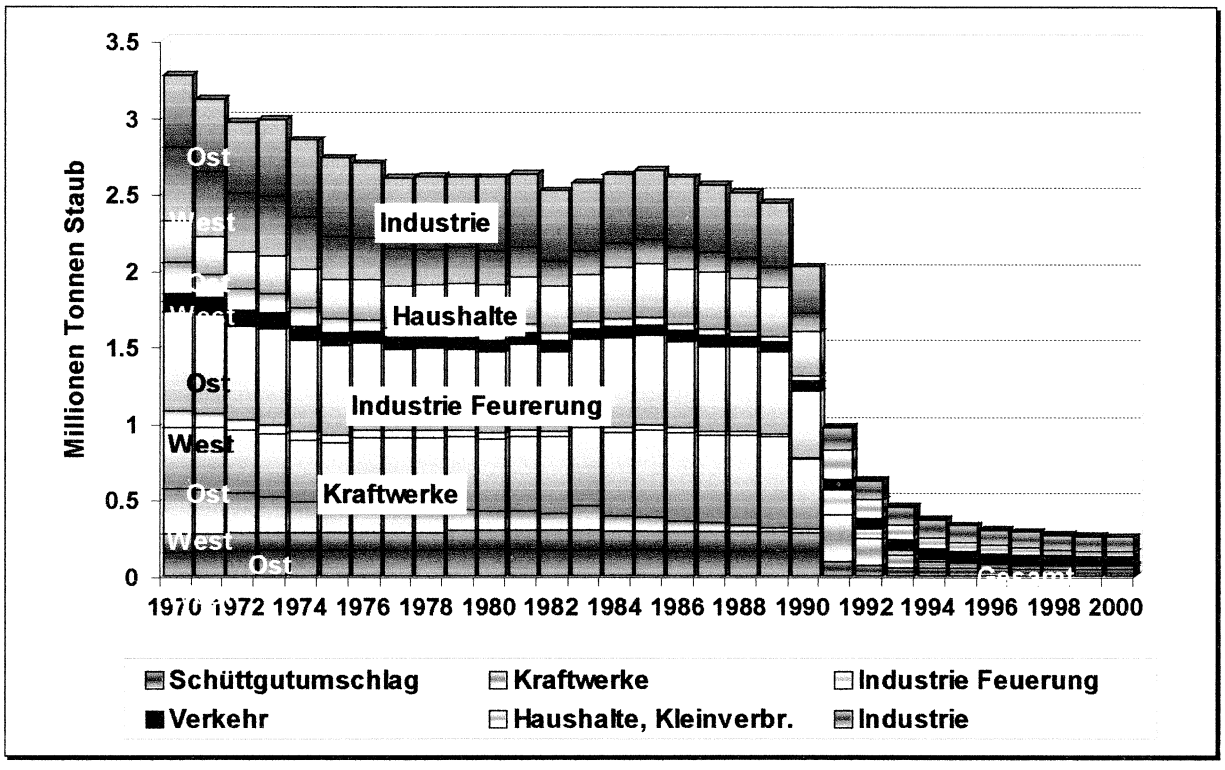



Abbildung 32: Jährliche Staub-Emissionen in Deutschland von 1970 bis 2000 *(Ref. 1)*

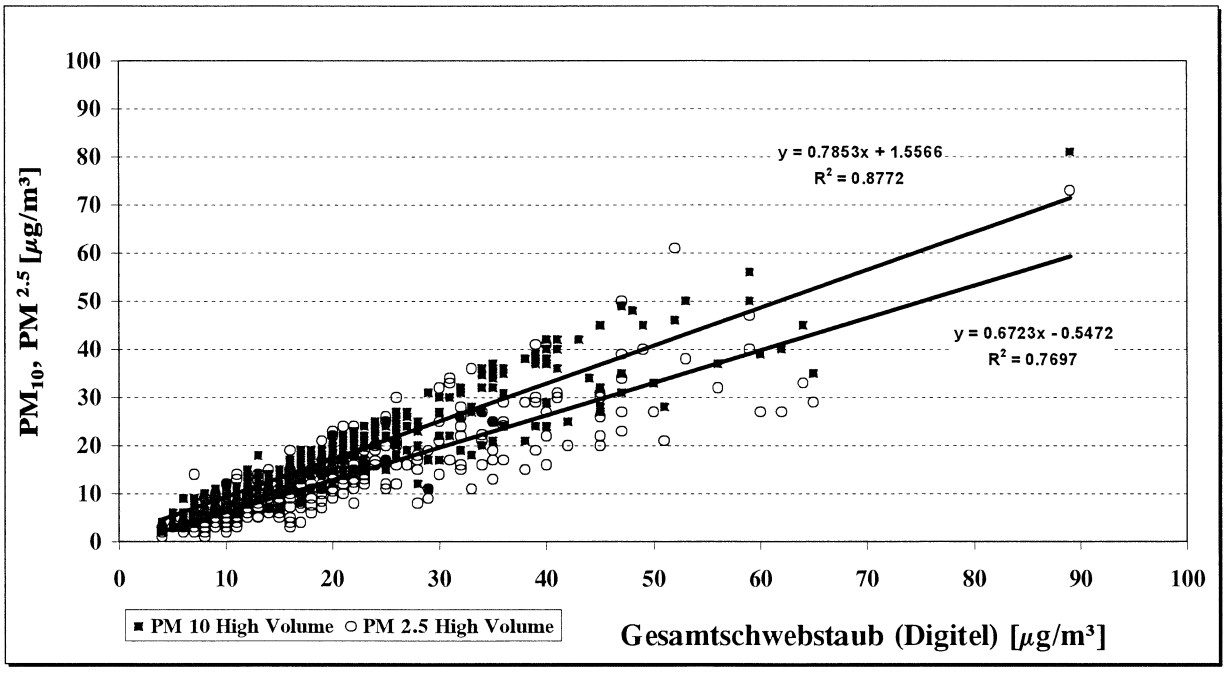



Abbildung 33: Vergleich von Staubmessungen in Waldhof von 1999 bis 2001 zwischen Gesamtstaub, $PM_{10}$ und $PM_{2.5}$

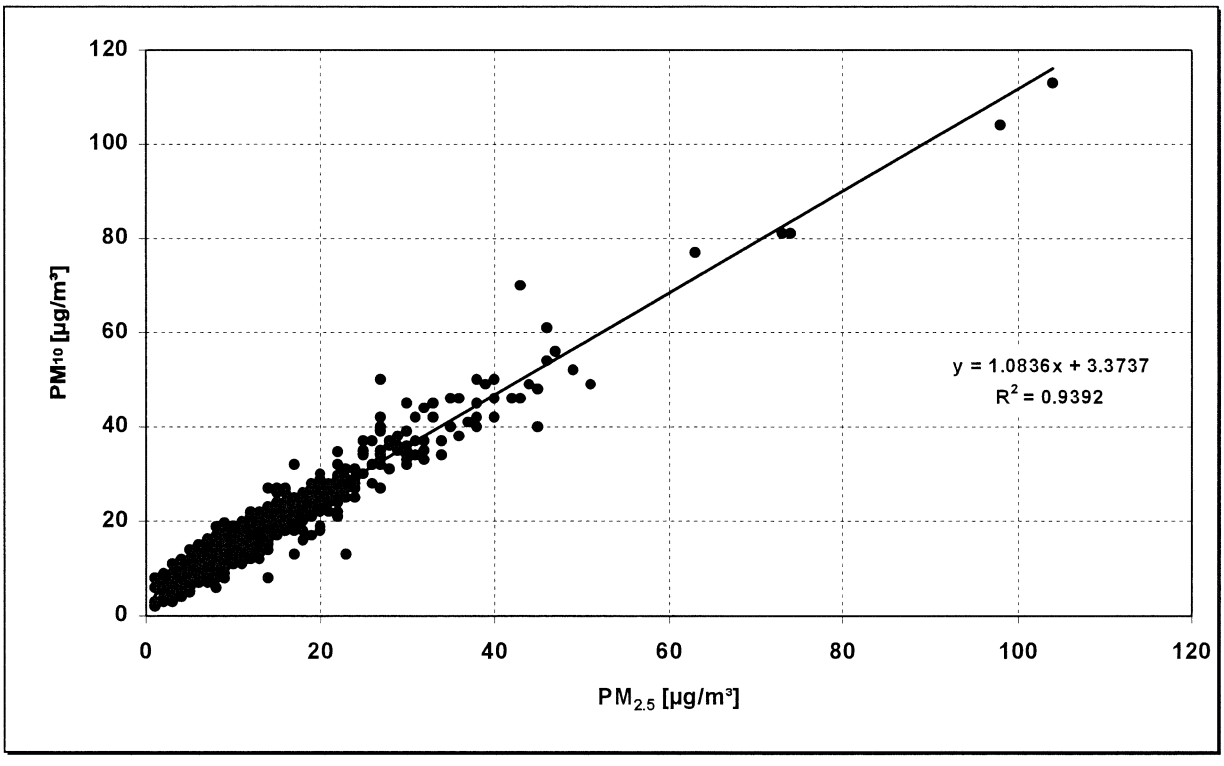



Abbildung 34: Vergleich von $PM_{10}$- und $PM_{2.5}$-Staubmessungen in Waldhof von 1999 bis 2001

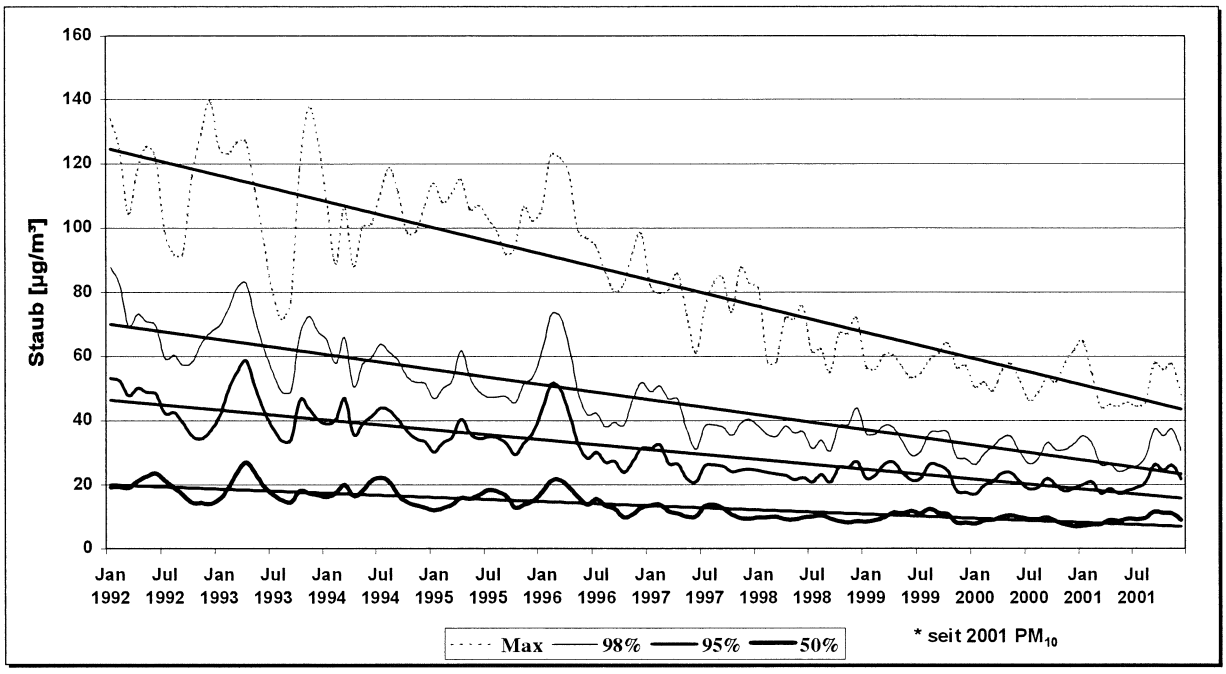



Abbildung 35: Trend der Monatsmaxima, 98-, 95- und 50-Perzentilwerte von Gesamtstaub bzw. $PM_{10}$ (seit 2001), gemittelt über 7 personell besetzte Messstellen, von Januar 1992 bis Dezember 2001, kontinuierliche ß-Staubgeräte

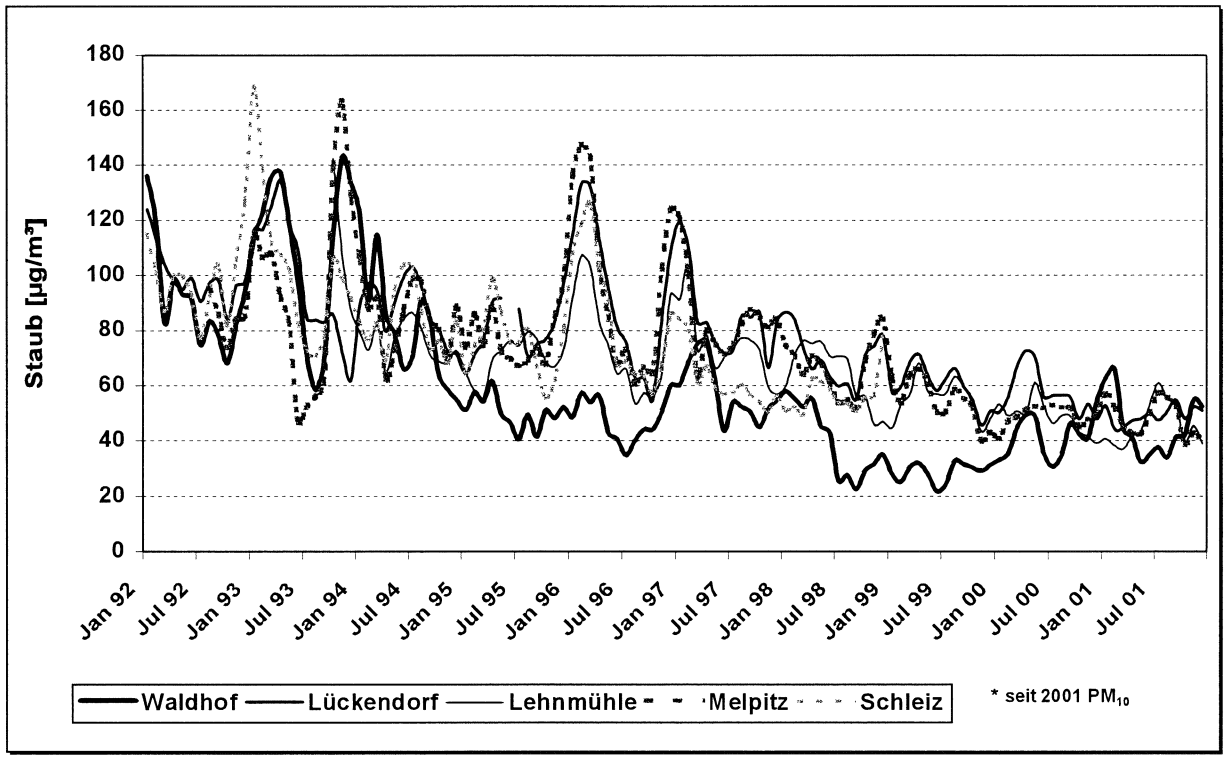



Abbildung 36: Trend der 98-Perzentilwerte der Staubkonzentrationen in Waldhof, Lückendorf, Lehnmühle, Melpitz und Schleiz zwischen 1992 und 2001, seit 2001 $PM_{10}$-Messungen, kontinuierliche ß-Staubgeräte

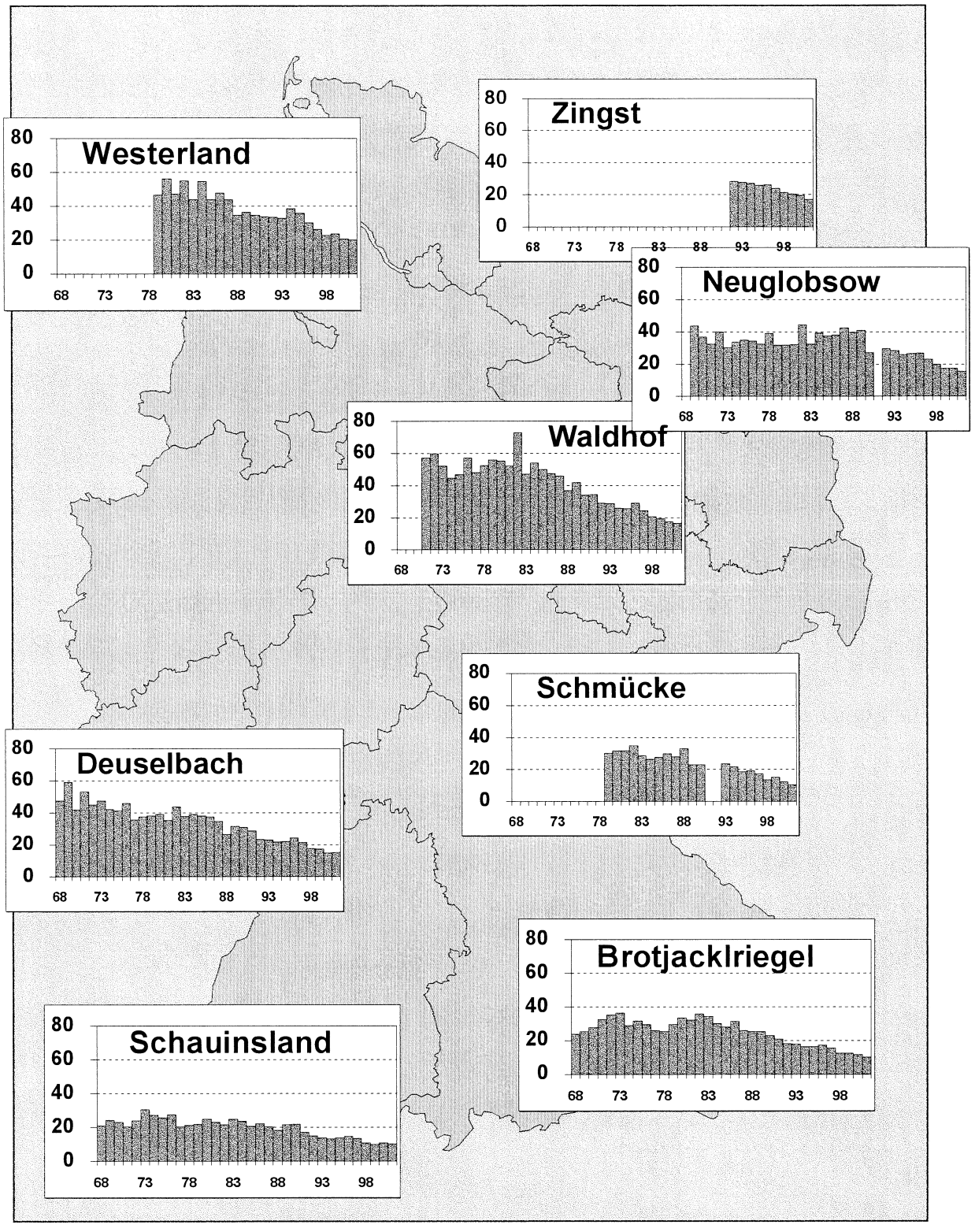



Abbildung 37: Jahresmittel von Schwebstaub für 1968 bis 2001 in $\mu g/m^3$, Digitel-Tagesproben, ab 1999 $PM_{10}$ -Messungen

Tabelle 55: Monats- und Jahresmittel, Schwebstaub für 2001 in $\mu g/m^3$, kontinuierliches Messverfahren

**: keine Messungen, kursive Werte: $PM_{10}$*

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE* | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| ZG | 16 | 8 | 11 | 8 | 8 | 7 | 10 | 10 | *10* | *15* | *11* | *11* | - |
| HG* | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| AU | 37 | - | 25 | 19 | 25 | 19 | 23 | - | *24* | *15* | *17* | - | - |
| UE | *25* | *13* | *19* | *12* | *15* | *12* | *19* | *18* | *11* | *23* | *11* | *14* | *16* |
| NG | - | - | 16 | 10 | 9 | 7 | 8 | 9 | *16* | *28* | *11* | *14* | - |
| SH | *27* | *14* | *19* | *12* | *16* | *13* | *16* | *18* | *11* | *21* | *11* | *13* | *16* |
| BA | 23 | - | 22 | 18 | 23 | 17 | 21 | - | - | *28* | *15* | *16* | - |
| WA | *22* | *13* | *19* | *11* | - | - | *16* | *16* | *10* | *19* | - | *17* | *16* |
| GI | 19 | 14 | 19 | 12 | 18 | 17 | 18 | *12* | *7* | *13* | *12* | *12* | - |
| FA | *27* | *15* | *20* | *13* | *18* | *16* | *18* | *19* | *13* | *22* | *12* | *16* | *17* |
| MP | *22* | *17* | *22* | *14* | *17* | *17* | *21* | *23* | *14* | *20* | *13* | *18* | *18* |
| LF | 20 | 16 | 19 | 16 | 24 | 19 | 25 | 31 | - | *23* | *16* | *15* | - |
| LM | *15* | *11* | *15* | *12* | *17* | *15* | *18* | *23* | *12* | *23* | *12* | *12* | *15* |
| LU | 22 | 19 | 20 | 16 | 23 | 19 | 19 | - | - | *25* | *15* | *16* | - |
| SM | 7 | 8 | 8 | 7 | 13 | 10 | 11 | 13 | 5 | 11 | 5 | - | 9 |
| RE | 16 | 13 | 15 | 13 | 21 | 18 | 21 | 22 | - | - | *11* | *13* | - |
| DE | 10 | 10 | 9 | 8 | 15 | 10 | 10 | 11 | *9* | *14* | *12* | *11* | - |
| AS | 16 | 12 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | - | - | - | - | - | - | *29* | *26* | *23* | - |
| FB* | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| BR | *11* | - | *13* | *13* | *21* | *15* | *16* | *21* | *13* | - | - | - | *15* |
| RS | - | - | - | - | - | - | - | 9 | - | *8* | *7* | *13* | - |
| SC | 5 | 9 | 5 | 7 | 15 | 10 | 10 | - | *7* | *13* | *7* | *6* | - |

Tabelle 56: Jahresmittel von Schwebstaub, 1989 bis 2001 in $\mu g/m^3$, kontinuierliches Messverfahren, kursive Werte: $PM_{10}$

| Station | WE | ZG | HG | AU | HW | TE | UE | SW | NG | AN | SH | KY | BA | WA | WI | GI | LI | FA | DL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1985 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1988 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1989 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 45 | - | - | - | - | - |
| 1990 | - | - | - | - | 19 | - | - | - | - | - | - | - | 23 | 30 | - | 22 | - | - | - |
| 1991 | - | - | - | - | 23 | - | - | 41 | - | - | - | - | 27 | 35 | 43 | 28 | - | - | 42 |
| 1992 | - | 19 | - | - | 19 | 31 | 33 | 33 | 23 | 36 | - | 35 | 25 | 29 | 38 | 25 | - | - | 38 |
| 1993 | - | 18 | - | - | 22 | 28 | 42 | 34 | 21 | 36 | - | 35 | - | 34 | 34 | 35 | 37 | - | 38 |
| 1994 | - | 16 | 22 | - | 21 | 28 | 29 | 31 | 20 | 32 | - | 31 | - | 27 | 23 | - | 31 | - | 33 |
| 1995 | - | 15 | 22 | - | - | - | 28 | 30 | 19 | 31 | - | 32 | - | 17 | 21 | - | 30 | - | 28 |
| 1996 | - | 16 | - | - | - | 28 | - | 36 | 21 | 32 | - | - | - | 17 | - | - | 34 | - | 31 |
| 1997 | - | 13 | - | - | - | 24 | - | 31 | 16 | 27 | - | 31 | - | 19 | 44 | - | 27 | - | 28 |
| 1998 | - | 12 | - | - | - | - | 20 | - | 15 | 25 | - | - | 25 | 12 | 30 | - | - | - | 22 |
| 1999 | - | 11 | - | 20 | - | - | 19 | - | 13 | - | - | - | 22 | 9 | - | 19 | - | 18 | - |
| 2000 | - | 10 | - | 19 | - | - | *17* | - | 14 | - | *16* | - | 21 | *12* | - | 14 | - | 17 | - |
| 2001 | - | *9* | - | *19* | - | - | *16* | - | *11* | - | *16* | - | *17* | *16* | - | *13* | - | *17* | - |

| Station | MP | LF | ME | HE | LM | LU | SM | SZ | RE | DE | AS | OE | BR | FB | RT | SC | MU | RS | ZU |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1985 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1988 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1989 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 27 | - | - | - | - | - | 23 | - | - | - |
| 1990 | - | - | 22 | 34 | - | - | - | - | 34 | 22 | 36 | - | - | - | 26 | 24 | - | - | - |
| 1991 | - | - | 26 | 28 | - | - | - | 35 | 40 | 22 | - | - | 30 | - | 29 | 23 | - | - | - |
| 1992 | - | - | 21 | 25 | - | 35 | 24 | 31 | 32 | 20 | - | - | - | - | 23 | 22 | - | - | - |
| 1993 | - | 36 | 20 | 27 | - | 36 | 22 | 30 | 33 | 18 | 39 | - | 29 | - | - | 20 | - | - | - |
| 1994 | 31 | 32 | 19 | 23 | 25 | 32 | 21 | 27 | 23 | 16 | 28 | - | 26 | - | - | 19 | - | - | - |
| 1995 | 29 | 27 | - | 20 | 23 | - | 18 | 26 | 20 | 22 | 19 | - | - | - | 22 | 12 | - | - | - |
| 1996 | 37 | - | 23 | - | 25 | 38 | 16 | 30 | - | 21 | 26 | - | - | - | 33 | 9 | - | - | - |
| 1997 | 30 | 27 | - | 32 | 22 | 30 | 14 | 22 | - | 16 | 26 | - | - | - | - | 6 | 17 | - | - |
| 1998 | 22 | 22 | - | - | - | 23 | 12 | 17 | - | 8 | 23 | - | - | - | - | 8 | 16 | - | - |
| 1999 | 20 | 22 | - | - | 20 | 21 | 11 | - | 17 | 11 | 13 | - | 16 | - | - | 10 | - | - | - |
| 2000 | *19* | 18 | - | - | *17* | 21 | 8 | - | 16 | 10 | 13 | - | 17 | - | - | 9 | - | - | - |
| 2001 | *18* | *18* | - | - | *15* | *17* | *7* | - | *14* | *10* | - | - | *15* | - | - | *8* | - | *8* | - |

Tabelle 57: Jahresmittel von Schwebstaub für 1968 bis 2001 in $\mu g/m^3$, Digitel-Tagesproben, ab 1999 $PM_{10}$

| Station | WE | ZG | HG | HW | SW | NG | AN | SH | BA | WA | LI | LF | ME | SM | DE | AS | BR | RT | SC | MU |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1968 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 48 | - | 24 | - | 21 | - |
| 1969 | - | - | - | - | - | 44 | - | - | - | - | - | - | - | - | 59 | - | 25 | - | 24 | - |
| 1970 | - | - | - | - | - | 37 | - | - | - | 57 | - | - | - | - | 42 | - | - | - | 23 | - |
| 1971 | - | - | - | - | - | 32 | - | - | - | 57 | - | - | - | - | 53 | - | - | - | 20 | - |
| 1972 | - | - | - | - | - | 40 | - | - | - | 60 | - | - | - | - | 45 | - | 35 | - | 24 | - |
| 1973 | - | - | - | - | - | 30 | - | - | - | 52 | - | - | - | - | 48 | - | 36 | - | 30 | - |
| 1974 | - | - | - | - | - | 34 | - | - | - | 45 | - | - | - | - | 42 | - | 29 | - | 27 | - |
| 1975 | - | - | - | - | - | 35 | - | - | - | 47 | - | - | - | - | 41 | - | 32 | - | 26 | - |
| 1976 | - | - | - | 47 | - | 34 | - | - | 62 | 57 | - | - | 52 | - | 46 | 49 | 30 | 45 | 27 | - |
| 1977 | - | - | - | 41 | - | 33 | - | - | 53 | 48 | - | - | 43 | - | 36 | 39 | 26 | 34 | 20 | - |
| 1978 | - | - | - | 43 | - | 39 | - | - | 57 | 52 | - | - | 44 | - | 38 | 43 | 26 | 37 | 21 | - |
| 1979 | - | - | - | 42 | - | 32 | - | - | 59 | 56 | - | - | 44 | 30 | 38 | 43 | 29 | 38 | 22 | - |
| 1980 | - | - | - | 43 | - | 32 | - | - | 54 | 55 | - | - | 44 | 32 | 39 | 42 | 34 | 38 | 25 | - |
| 1981 | - | - | - | 42 | - | 32 | - | - | 51 | 52 | - | - | 40 | 32 | 35 | 37 | 32 | 34 | 23 | - |
| 1982 | 55 | - | - | 48 | - | 44 | - | - | 59 | 73 | - | - | 42 | 35 | 44 | 44 | 36 | 39 | 21 | - |
| 1983 | 44 | - | - | 40 | - | 32 | - | - | 50 | 47 | - | 47 | 40 | 29 | 38 | 44 | 34 | 40 | 25 | - |
| 1984 | 55 | - | - | 46 | - | 39 | 54 | - | 57 | 54 | - | 57 | 41 | 26 | 39 | 43 | 30 | 40 | 24 | - |
| 1985 | 44 | - | - | 37 | - | 37 | 52 | - | 52 | 50 | 56 | 56 | 39 | 28 | 38 | 41 | 28 | 35 | 21 | - |
| 1986 | 48 | - | - | 36 | 39 | 38 | 51 | - | 49 | 48 | 53 | 59 | 42 | 30 | 37 | 44 | 31 | 36 | 22 | - |
| 1987 | 44 | - | - | - | 48 | 43 | 46 | - | 49 | 46 | 53 | 66 | 38 | 28 | 35 | 38 | 26 | 33 | 20 | - |
| 1988 | 35 | - | - | - | 35 | 40 | 40 | - | 36 | 37 | 46 | 41 | 32 | 33 | 26 | 31 | 25 | 25 | 18 | - |
| 1989 | 37 | - | - | - | 40 | 41 | 49 | - | 41 | 42 | 54 | 51 | 37 | 23 | 31 | 36 | 26 | 30 | 21 | - |
| 1990 | 35 | - | - | - | 31 | 28 | 39 | - | 37 | 34 | 37 | 34 | 35 | 24 | 31 | 34 | 23 | 25 | 22 | - |
| 1991 | 34 | - | - | - | - | - | - | - | 36 | 34 | - | - | 31 | - | 29 | 32 | 21 | 25 | 17 | - |
| 1992 | 33 | 28 | - | - | - | 30 | - | - | 33 | 29 | - | - | 26 | - | 23 | 26 | 18 | 22 | 15 | - |
| 1993 | 33 | 28 | - | - | - | 28 | - | - | 31 | 29 | - | - | 26 | 24 | 23 | 26 | 18 | 19 | 14 | - |
| 1994 | 39 | 27 | - | - | - | 26 | - | - | 31 | 26 | - | - | 24 | 22 | 22 | 22 | 17 | 17 | 13 | - |
| 1995 | 36 | 26 | - | - | - | 27 | - | - | 28 | 25 | - | - | 26 | 19 | 22 | 22 | 17 | 18 | 14 | - |
| 1996 | 30 | 26 | 30 | 26 | - | 27 | - | - | - | 29 | - | - | 28 | 19 | 24 | 24 | 17 | 20 | 15 | - |
| 1997 | 26 | 24 | 25 | - | - | 23 | - | - | - | 24 | - | - | - | 17 | 21 | - | 15 | - | 13 | 17 |
| 1998 | 23 | 21 | 23 | - | - | 20 | - | - | - | 20 | - | - | - | 14 | 18 | - | 13 | - | 11 | 16 |
| *1999* | *20* | *17* | *26* | - | - | *15* | - | - | - | *16* | - | - | - | *13* | *14* | - | *11* | - | *8* | - |
| *2000* | *21* | *20* | - | - | - | *17* | - | *19* | - | *17* | - | - | - | *12* | *15* | - | *12* | - | *11* | - |
| *2001* | *20* | *17* | *20* | - | - | *16* | - | *18* | - | *16* | - | - | - | *10* | *15* | - | *10* | - | *10* | - |

## 2.2 Ionen im Niederschlag

Neben der trockenen Deposition trägt die nasse Deposition durch Regen erheblich zur Beseitigung von Spurenstoffen aus der Atmosphäre bei *(Ref. 14)*. Der Eintrag von Spurenstoffen durch Niederschläge in Böden kann nützlich sein, wenn es sich bei den ausgewaschenen Substanzen um Nährstoffe für Pflanzen handelt. Der Eintrag kann aber auch eine Belastung für Wasser, Böden und Vegetation bedeuten, wenn der Eintrag zu groß ist (sog. Eutrophierung), oder wenn es sich bei den deponierten Stoffen um Substanzen handelt, von denen schädigende Wirkungen ausgehen. Die chemische Zusammensetzung des Regens wird durch eine Vielzahl von gas- und partikelförmigen Substanzen bestimmt. In Deutschland wird die chemische Zusammensetzung vor allem durch die Spurengase $NO_x$, $SO_2$, $NH_3$ sowie durch Aerosolteilchen bestimmt.

Vor dem Hintergrund der erheblichen Emissionsreduzierungen für diese Stoffe interessiert vor allem, welche Auswirkungen diese Minderungen auf die Konzentrationen und Depositionen der entsprechenden Ionen im Regenwasser gehabt haben.

Im UBA-Messnetz werden sowohl „daily-bulk"- als auch weekly (wöchentliche) „wet-only"-Probenahmen und Analysen durchgeführt. Die daily-bulk-Messungen werden jedoch nur noch in Deuselbach und Waldhof fortgeführt, in Westerland, Zingst, Neuglobsow, auf der Schmücke, dem Brotjacklriegel und dem Schauinsland wurden sie am 31.12.1999 eingestellt. In den Tabellen sind jedoch sowohl die Ergebnisse der daily-bulk-Messungen (Tabelle 58 bis Tabelle 63) als auch der weekly wet-only-Messungen (Tabelle 64 und Tabelle 65) dargestellt.

Die Konzentrationen und Depositionen der Ionen Ammonium ($NH_4^+$), Sulfat ($SO_4^=$), Nitrat ($NO_3^-$), Chlorid ($Cl^-$), Natrium ($Na^+$), Kalium ($K^+$), Calcium ($Ca^{++}$) und Magnesium ($Mg^{++}$) werden zusammen mit der Regenmenge und der spezifischen Leitfähigkeit als Monatswerte für die Stationen Waldhof und Deuselbach in Tabellenform für das Jahr 2001 zusammengestellt. Des Weiteren wird für jede der 2 weitergeführten „daily-bulk"-Stationen der mittlere Jahresgang der Monatswerte für die Konzentrationen und Depositionen sowie die Jahreswerte für den Zeitraum von 1982 bis 2001 tabellarisch dargestellt.

### 2.2.1 Konzentrationen der Ionen im Niederschlag - Daily-bulk

In Tabelle 58 sind die mittleren monatlichen Konzentrationen der Ionen im Niederschlag sowie die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert sowie die monatliche Regenmenge der daily-bulk-Messungen für die Messstellen Deuselbach und Waldhof für 2001 zusammengestellt.

In Tabelle 59 und Tabelle 60 sind der mittlere Jahresgang der Monatswerte sowie die Jahresmittel für die Ionen-Konzentrationen, die pH-Werte und die spezifische Leitfähigkeit sowie die Jahressummen für die Regenmengen für Deuselbach und Waldhof für die Jahre 1982 bis 2001 zusammengefasst.

Aus diesen Tabellen sowie aus den Abbildung 41 bis Abbildung 45 geht hervor, dass sich der seit 1982 beobachtete Rückgang der Ionenkonzentrationen einiger Ionen wie beispielsweise $H^+$, $SO_4^=$ und $NO_3^-$ auch im Jahre 2001 fortgesetzt hat. An beiden Stationen lagen die Ionenkonzentrationen ähnlich niedrig wie im Jahr 2000.

Wie aus Abbildung 41 zu ersehen ist, zeigen die pH-Werte an den 5 Stationen in den alten Ländern einen deutlichen Anstieg von ca.4.3-4.4 im Jahre 1982 auf Werte zwischen 4.8 und 4.95 im Jahre 2001. Ein Anstieg der pH-Werte entspricht einem Rückgang der Konzentration von Wasserstoffionen ($H^+$). Das heißt, der Regen ist heute deutlich weniger sauer als zu Beginn der 80er Jahre. Der Rückgang der Konzentrationen der Wasserstoffionen ($H^+$) von 1982 bis 2001 lag zwischen 73 und 81% in Waldhof und Deuselbach, der Rückgang von $SO_4^=$ zwischen 56 und 57% in Deuselbach und Waldhof, wenn man die 5-Jahreszeiträume 1982-1986 und 1997-2001 gegenüberstellt.

Parallel zum Anstieg der pH-Werte hat der Gesamtgehalt an Ionen im Niederschlag und damit dessen spezifische Leitfähigkeit zwischen 1982 und 2001 an den Stationen in den alten Ländern ebenfalls deutlich abgenommen (Abbildung 38, Abbildung 39 und Abbildung 45). Auch an den drei Stationen in den neuen Ländern ist eine Zunahme der pH-Werte nicht zu übersehen, trotz des relativ kurzen Zeitraums 1993-1999 (Abbildung 45). Eine Ausnahme ist Westerland, wo, bedingt durch den Einfluss von Seesalz, nur ein schwacher Rückgang beobachtet wurde.

Abbildung 40 zeigt zusammenfassend den Rückgang der Ionenkonzentrationen für $H^+$, Sulfat, Nitrat und Ammonium zwischen 1982 und 2001 im Mittel über die UBA-Stationen Deuselbach und Waldhof, normiert auf 1982.

Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen die jährliche Ionenverteilung im Niederschlag in Waldhof und Deuselbach für 1982 bis 2001. Die Abnahme des Gesamtgehaltes an Ionen im Regenwasser während der letzten zwei Jahrzehnte war verbunden mit einer Änderung der relativen Ionenverteilung. Im Jahre 2001 waren die prozentualen Anteile von $H^+$ und $SO_4^=$ geringer, die relativen Äquivalentkonzentrationen von $NO_3^-$ und $NH_4^+$ dagegen höher als 1984, wobei deren Absolutkonzentrationen ebenfalls abgenommen haben. Generell unterscheiden sich die Konzentrationen der Regeninhaltsstoffe Sulfat, Nitrat und Ammonium an den 8 Stationen nur wenig, d.h. die Konzentrationsverteilung dieser Ionen in den ländlichen Regionen ist recht homogen.

Der deutliche Rückgang der Konzentrationen und Depositionen (siehe Kapitel 2.2.2) von $H^+$ und $SO_4^=$ und der weniger ausgeprägte Rückgang bei $NO_3^-$ und vor allem bei $NH_4^+$ sowie der damit verbundene Rückgang beispielsweise des Sulfat/Nitrat-Verhältnisses während der letzten 20 Jahre spiegelt die unterschiedlichen Langzeittrends der Emissionen von Schwefeldioxid ($SO_2$) und Stickoxiden ($NO_x$) in Deutschland und den meisten Nachbarländern wider.

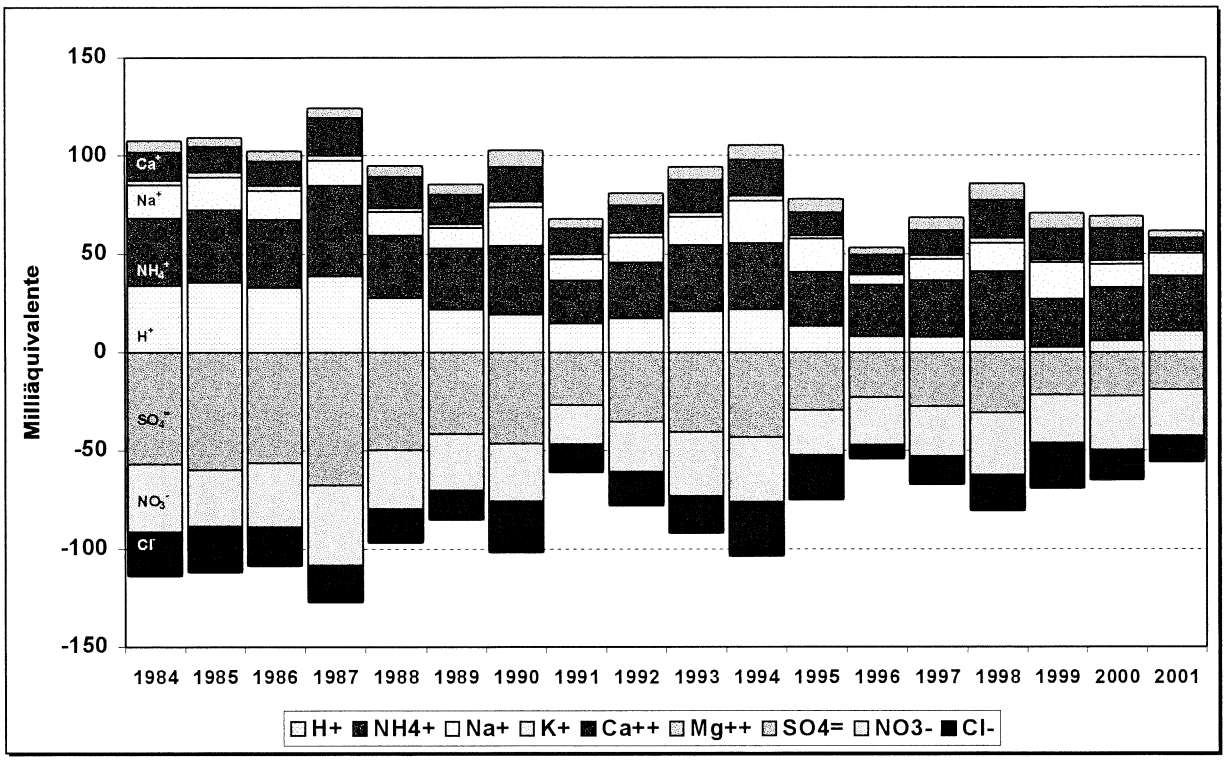



Abbildung 38: Jährliche Ionenverteilung im Niederschlag in Waldhof für 1984 bis 2001 (daily-bulk-Messungen)

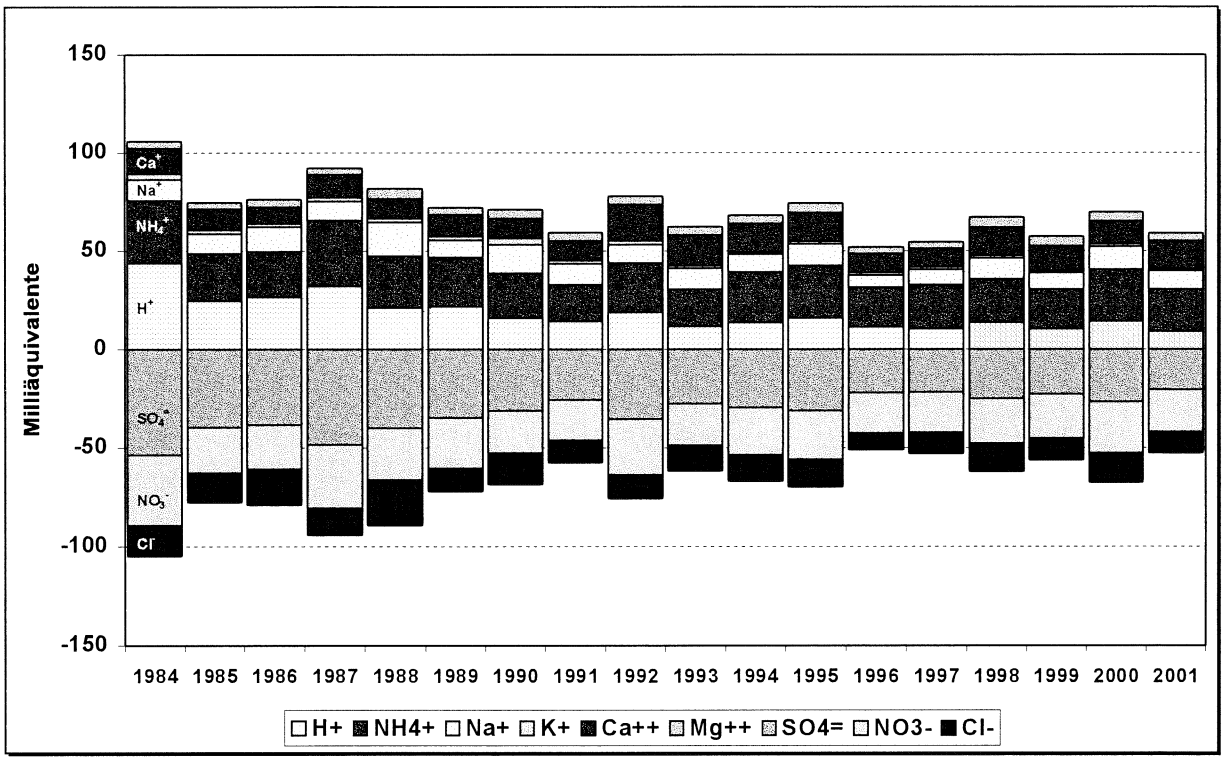



Abbildung 39: Jährliche Ionenverteilung im Niederschlag in Deuselbach für 1984 bis 2001(daily-bulk-Messungen)

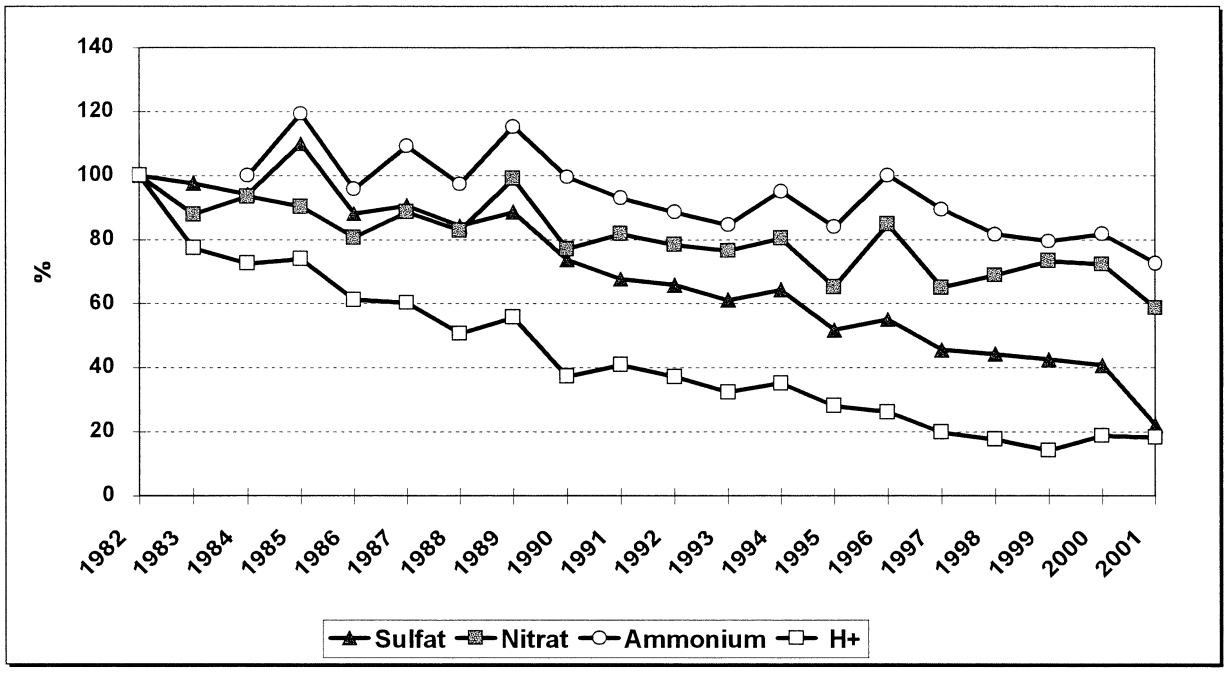



Abbildung 40: Rückgang der Ionenkonzentrationen für $H^+$, Sulfat, Nitrat und Ammonium zwischen 1982 und 2001 (daily-bulk) im Mittel über die UBA-Stationen Deuselbach und Waldhof, normiert auf 1982.

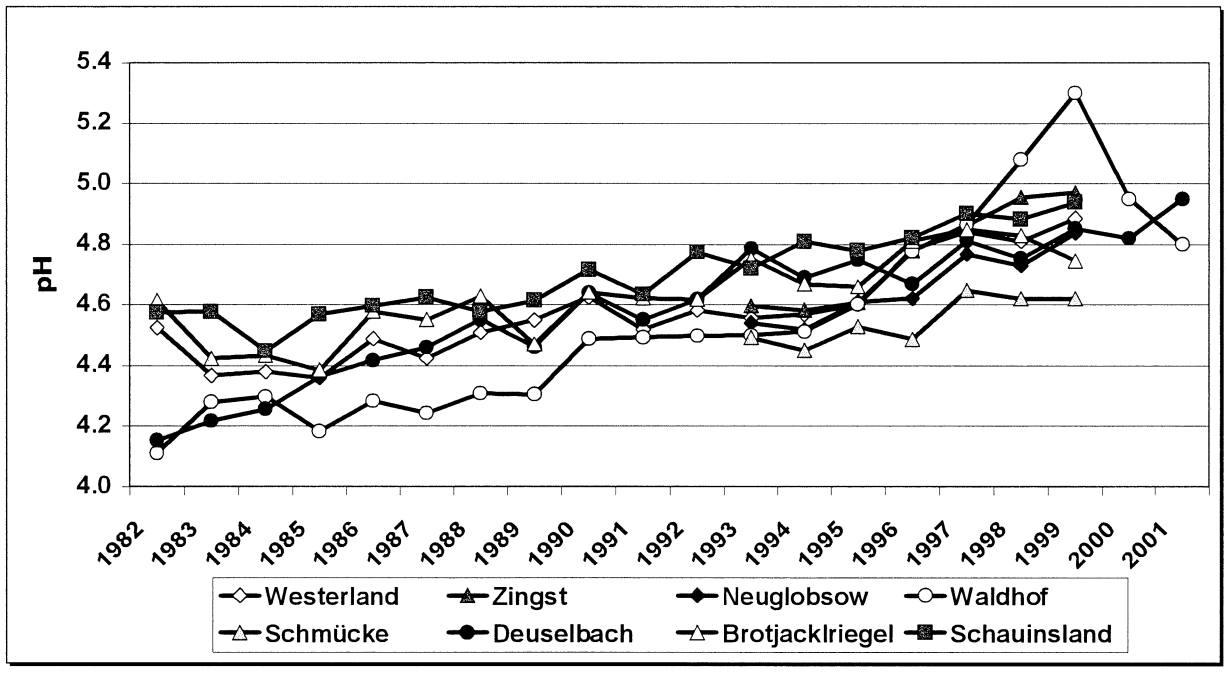



Abbildung 41: Jahresmittel pH-Wert im Niederschlag (daily-bulk) von 1982 bis 2001 für die personell besetzten UBA-Messstellen.

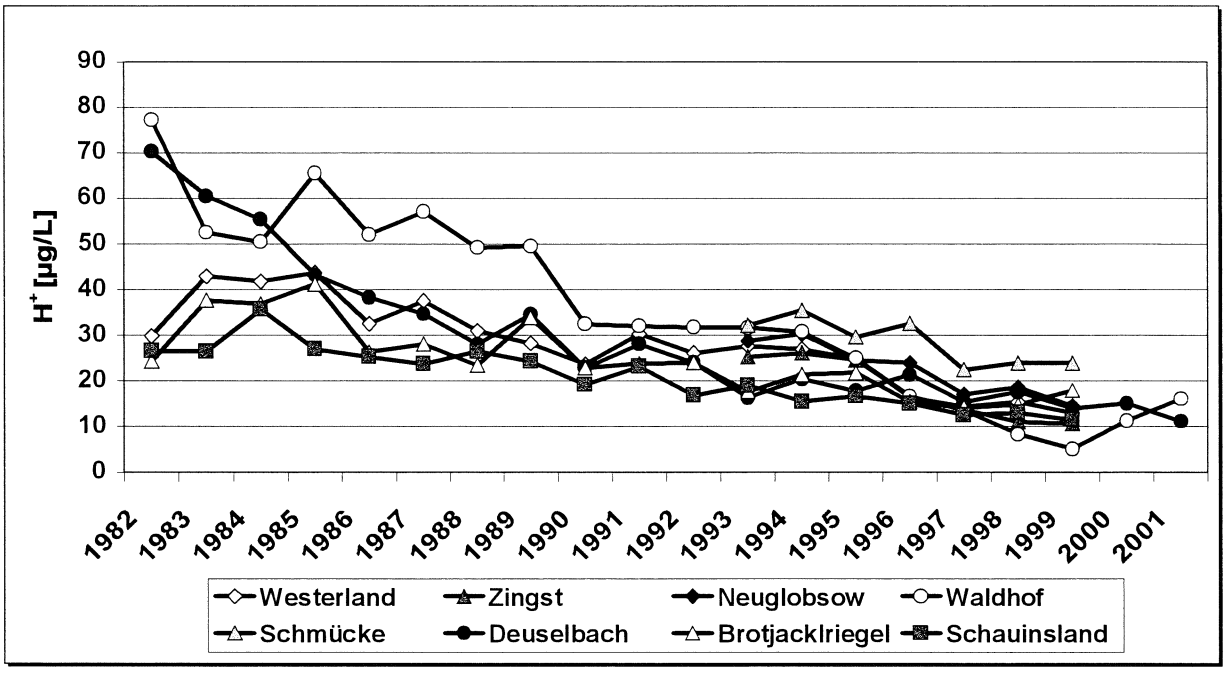



Abbildung 42: Jahresmittel $H^+$-Ionen-Konzentration im Niederschlag von 1982 bis 2001 für die personell besetzten UBA-Messstellen (daily-bulk-Messsungen).

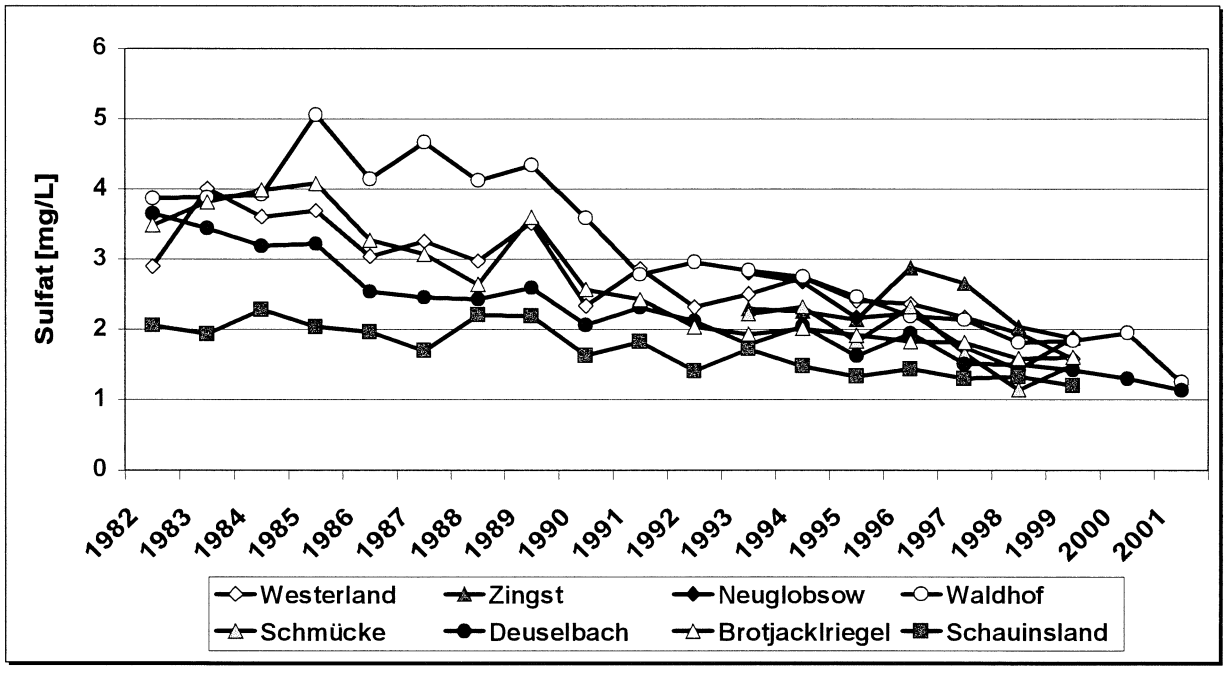



Abbildung 43: Jahresmittel $SO_4^=$-Ionen-Konzentration (seesalzkorrigiert) im Niederschlag (daily-bulk) von 1982 bis 2001 für die personell besetzten UBA-Messstellen.

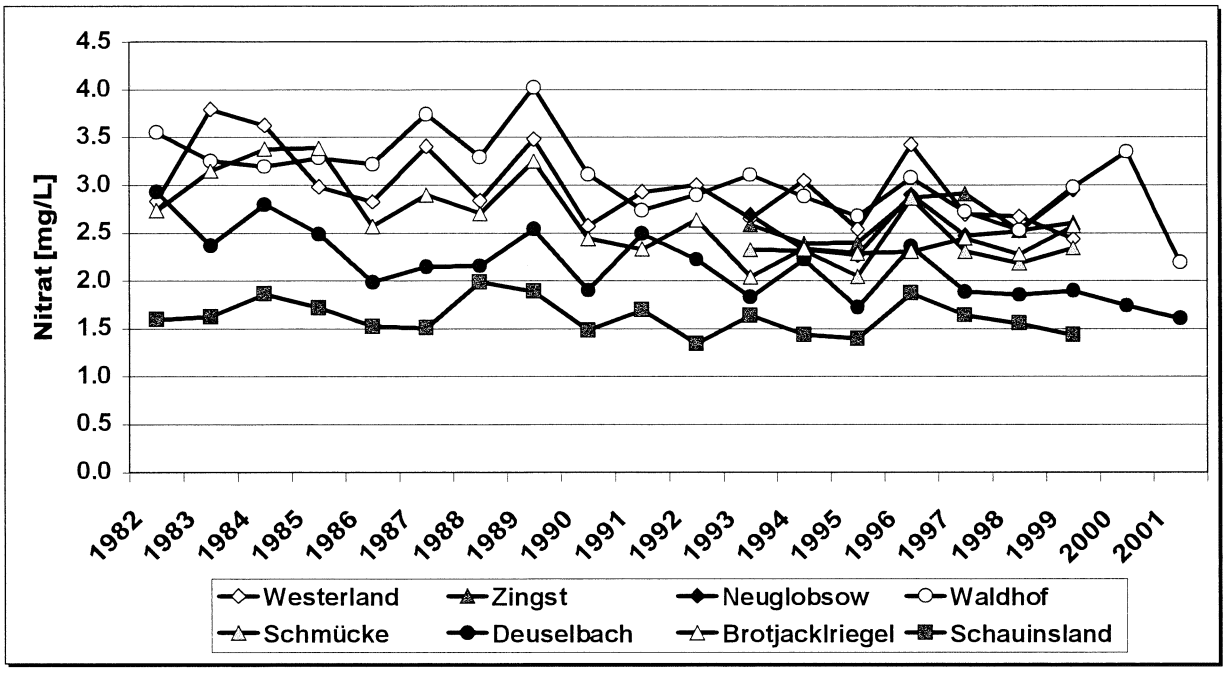



Abbildung 44: Jahresmittel $NO_3^-$-Ionen-Konzentration im Niederschlag (daily-bulk) von 1982 bis 2001 für die personell besetzten UBA-Messstellen.

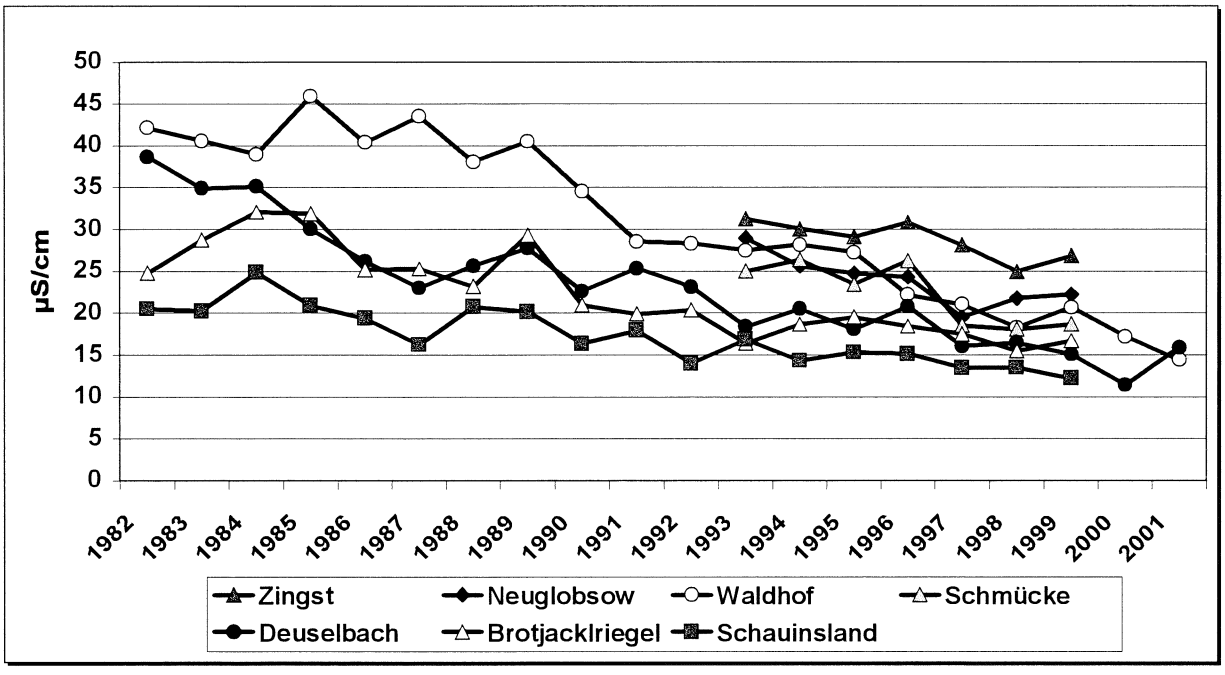



Abbildung 45: Jahresmittel der Leitfähigkeit des Niederschlag von 1982 bis 2001 (daily-bulk) für die personell besetzten UBA-Messstellen.

Tabelle 58: Mittlere monatliche Konzentrationen im Niederschlag für 2001, Waldhof und Deuselbach (daily-bulk)

| Zeit-raum | Regen l/m² | pH | Leitf. µS/cm | $NH_4^+$ mg/l | $Na^+$ mg/l | $K^+$ mg/l | $Ca^{++}$ mg/l | $Mg^{++}$ mg/l | $SO_4^=$ mg/l | $NO_3^-$ mg/l | $Cl^-$ mg/l |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | WALDHOF | | | | | | | | | | |
| Jan. | 36.8 | 5.00 | 11.4 | 0.41 | 0.07 | 0.03 | 0.25 | 0.04 | 0.76 | 1.92 | 0.16 |
| Feb. | 43.1 | 4.80 | 16.9 | 0.55 | 0.34 | 0.09 | 0.25 | 0.06 | 1.44 | 2.36 | 0.58 |
| Mär. | 46.1 | 4.54 | 23.2 | 0.89 | 0.13 | 0.07 | 0.21 | 0.04 | 1.96 | 3.43 | 0.28 |
| Apr. | 38.0 | 5.01 | 24.7 | 1.52 | 0.52 | 0.11 | 0.27 | 0.08 | 2.14 | 3.97 | 0.84 |
| Mai | 27.8 | 5.72 | 16.3 | 1.88 | 0.16 | 0.29 | 0.40 | 0.06 | 2.06 | 2.10 | 0.31 |
| Jun. | 82.3 | 4.86 | 17.3 | 1.00 | 0.28 | 0.05 | 0.18 | 0.05 | 1.57 | 2.49 | 0.47 |
| Jul. | 62.9 | 5.10 | 11.9 | 0.56 | 0.14 | 0.07 | 0.35 | 0.05 | 1.22 | 1.66 | 0.21 |
| Aug. | 56.3 | 5.26 | 16.8 | 0.84 | 0.15 | 0.09 | 0.21 | 0.03 | 1.24 | 1.51 | 0.27 |
| Sep. | 146.2 | 4.69 | 16.1 | 0.42 | 0.45 | 0.03 | 0.10 | 0.06 | 0.90 | 1.73 | 0.80 |
| Okt. | 28.8 | 4.71 | 23.8 | 0.64 | 1.01 | 0.07 | 0.20 | 0.13 | 1.46 | 1.97 | 1.80 |
| Nov. | 32.9 | 4.58 | 30.0 | 1.00 | 1.79 | 0.11 | 0.18 | 0.23 | 1.91 | 2.73 | 3.11 |
| Dez. | 69.1 | 4.62 | 18.9 | 0.49 | 0.42 | 0.04 | 0.08 | 0.05 | 1.08 | 1.97 | 0.71 |
| | DEUSELBACH | | | | | | | | | | |
| Jan. | 77.2 | 4.85 | 11.6 | 0.18 | 0.37 | 0.05 | 0.19 | 0.07 | 0.89 | 1.09 | 0.68 |
| Feb. | 48.0 | 4.76 | 14.2 | 0.44 | 0.21 | 0.05 | 0.25 | 0.05 | 1.12 | 2.16 | 0.38 |
| Mär. | 118.0 | 5.09 | 10.8 | 0.42 | 0.27 | 0.05 | 0.20 | 0.05 | 0.91 | 1.40 | 0.47 |
| Apr. | 78.0 | 5.06 | 13.9 | 0.66 | 0.31 | 0.09 | 0.24 | 0.07 | 1.41 | 1.72 | 0.54 |
| Mai | 6.6 | 5.26 | 9.5 | 0.46 | 0.08 | 0.08 | 0.40 | 0.06 | 1.27 | 1.42 | 0.29 |
| Jun. | 112.3 | 5.03 | 15.8 | 0.86 | 0.17 | 0.07 | 0.38 | 0.06 | 1.87 | 2.32 | 0.29 |
| Jul. | 88.1 | 4.95 | 16.5 | 0.49 | 0.20 | 0.06 | 1.09 | 0.07 | 1.47 | 1.49 | 0.37 |
| Aug. | 50.2 | 5.34 | 9.8 | 0.45 | 0.11 | 0.04 | 0.34 | 0.06 | 0.98 | 1.47 | 0.19 |
| Sep. | 96.5 | 4.90 | 13.2 | 0.38 | 0.33 | 0.03 | 0.15 | 0.05 | 1.01 | 1.41 | 0.58 |
| Okt. | 43.5 | 5.07 | 12.1 | 0.33 | 0.18 | 0.07 | 0.49 | 0.06 | 1.24 | 1.30 | 0.31 |
| Nov. | 77.0 | 4.75 | 13.9 | 0.29 | 0.30 | 0.04 | 0.17 | 0.05 | 0.96 | 1.56 | 0.51 |
| Dez. | 28.5 | 4.86 | 13.1 | 0.33 | 0.37 | 0.06 | 0.19 | 0.07 | 0.98 | 1.75 | 0.64 |

Tabelle 59: Mittlere Jahresgänge, Monatsmaxima, und -minima, Jahresmittel der Konzentrationen im Niederschlag sowie Summen der Niederschlagsmenge in Waldhof für 1982 bis 2001 (daily-bulk).

| Zeit-raum | Regen l/m² | pH | Leitf. µS/cm | $NH_4^+$ mg/l | $Na^+$ mg/l | $K^+$ mg/l | $Ca^{++}$ mg/l | $Mg^{++}$ mg/l | $SO_4^=$ mg/l | $NO_3^-$ mg/l | $Cl^-$ mg/l |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Größte Monatswerte | | | | | | | | | | |
| 82-01 | 151.4 | 5.96 | 99.2 | - | - | - | - | - | 15.66 | 11.45 | 8.90 |
| 84-01 | 151.4 | 5.96 | 91.5 | 4.21 | 4.06 | 0.52 | 2.47 | 0.48 | 15.66 | 11.45 | 8.90 |
| | Kleinste Monatswerte | | | | | | | | | | |
| 82-01 | 0.8 | 3.84 | 10.4 | - | - | - | - | - | 0.76 | 1.14 | 0.13 |
| 84-01 | 0.8 | 3.92 | 10.4 | 0.18 | 0.05 | 0.03 | 0.08 | 0.03 | 0.76 | 1.14 | 0.13 |
| | Mittlerer Jahresgang 1984-2001 | | | | | | | | | | |
| Jan. | 47.7 | 4.55 | 28.8 | 0.58 | 1.11 | 0.11 | 0.38 | 0.17 | 2.41 | 2.43 | 2.18 |
| Feb. | 39.8 | 4.57 | 30.9 | 0.72 | 1.34 | 0.13 | 0.44 | 0.19 | 2.64 | 2.55 | 2.57 |
| Mär. | 43.2 | 4.56 | 31.0 | 1.12 | 0.68 | 0.13 | 0.44 | 0.14 | 2.96 | 3.32 | 1.45 |
| Apr. | 34.1 | 4.56 | 34.4 | 1.67 | 0.43 | 0.18 | 0.68 | 0.12 | 4.07 | 4.34 | 0.90 |
| Mai | 45.7 | 4.33 | 38.6 | 1.50 | 0.23 | 0.21 | 0.68 | 0.11 | 4.74 | 4.02 | 0.54 |
| Jun. | 54.7 | 4.40 | 30.2 | 0.96 | 0.23 | 0.13 | 0.48 | 0.09 | 3.33 | 3.10 | 0.55 |
| Jul. | 67.7 | 4.45 | 27.9 | 0.99 | 0.18 | 0.12 | 0.48 | 0.08 | 3.20 | 3.00 | 0.40 |
| Aug. | 56.6 | 4.48 | 31.0 | 1.14 | 0.31 | 0.19 | 0.60 | 0.10 | 3.55 | 3.22 | 0.66 |
| Sep. | 54.7 | 4.46 | 31.0 | 0.93 | 0.55 | 0.13 | 0.50 | 0.12 | 3.42 | 3.08 | 1.11 |
| Okt. | 43.5 | 4.57 | 26.3 | 0.77 | 0.52 | 0.13 | 0.49 | 0.12 | 2.73 | 2.74 | 1.04 |
| Nov. | 46.0 | 4.58 | 27.3 | 0.73 | 0.77 | 0.13 | 0.49 | 0.17 | 2.72 | 2.68 | 1.55 |
| Dez. | 51.7 | 4.56 | 25.3 | 0.58 | 0.62 | 0.10 | 0.37 | 0.12 | 2.34 | 2.31 | 1.27 |
| | Jahreswerte | | | | | | | | | | |
| 1982 | 494.1 | 4.11 | 42.1 | - | - | - | - | - | 4.05 | 3.55 | 1.23 |
| 1983 | 627.5 | 4.28 | 40.5 | - | - | - | - | - | 4.03 | 3.25 | 1.10 |
| 1984 | 670.5 | 4.30 | 39.0 | 0.92 | 0.59 | 0.12 | 0.43 | 0.10 | 4.08 | 3.19 | 1.18 |
| 1985 | 545.1 | 4.18 | 45.9 | 1.21 | 0.69 | 0.20 | 0.47 | 0.10 | 5.25 | 3.28 | 1.53 |
| 1986 | 629.3 | 4.28 | 40.4 | 0.99 | 0.54 | 0.15 | 0.40 | 0.10 | 4.27 | 3.22 | 1.13 |
| 1987 | 678.0 | 4.24 | 43.5 | 1.22 | 0.44 | 0.14 | 0.57 | 0.09 | 4.77 | 3.74 | 0.98 |
| 1988 | 562.3 | 4.31 | 38.0 | 1.01 | 0.50 | 0.13 | 0.57 | 0.12 | 4.24 | 3.29 | 1.10 |
| 1989 | 443.6 | 4.31 | 40.5 | 1.26 | 0.54 | 0.17 | 0.67 | 0.14 | 4.47 | 4.02 | 1.19 |
| 1990 | 587.6 | 4.49 | 34.5 | 1.07 | 0.77 | 0.20 | 0.60 | 0.18 | 3.78 | 3.11 | 1.58 |
| 1991 | 454.5 | 4.49 | 28.5 | 0.87 | 0.55 | 0.22 | 0.57 | 0.14 | 2.82 | 2.74 | 1.11 |
| 1992 | 546.0 | 4.50 | 28.3 | 0.93 | 0.54 | 0.16 | 0.52 | 0.14 | 3.09 | 2.90 | 1.13 |
| 1993 | 652.7 | 4.50 | 27.5 | 0.93 | 0.50 | 0.15 | 0.51 | 0.12 | 2.97 | 3.11 | 1.04 |
| 1994 | 706.9 | 4.51 | 28.2 | 0.86 | 0.70 | 0.13 | 0.52 | 0.13 | 2.92 | 2.88 | 1.40 |
| 1995 | 531.8 | 4.60 | 27.2 | 0.93 | 0.73 | 0.12 | 0.45 | 0.15 | 2.65 | 2.67 | 1.51 |
| 1996 | 487.8 | 4.78 | 22.2 | 0.97 | 0.23 | 0.10 | 0.38 | 0.08 | 2.25 | 3.07 | 0.52 |
| 1997 | 584.7 | 4.87 | 21.0 | 0.87 | 0.43 | 0.12 | 0.44 | 0.13 | 2.24 | 2.72 | 0.87 |
| 1998 | 772.4 | 5.08 | 18.1 | 0.81 | 0.43 | 0.12 | 0.51 | 0.13 | 1.92 | 2.53 | 0.83 |
| 1999 | 506.0 | 5.30 | 20.7 | 0.87 | 0.84 | 0.11 | 0.62 | 0.19 | 2.05 | 2.98 | 1.63 |
| 2000 | 509.1 | 4.95 | 17.2 | 0.96 | 0.54 | 0.14 | 0.65 | 0.15 | 2.09 | 3.35 | 1.07 |
| 2001 | 670.3 | 4.79 | 14.4 | 0.75 | 0.40 | 0.07 | 0.20 | 0.06 | 1.35 | 2.19 | 0.70 |

Tabelle 60: Mittlere Jahresgänge, Monatsmaxima, und -minima, Jahresmittel der Konzentrationen im Niederschlag sowie Summen der Niederschlagsmenge in Deuselbach für 1982 bis 2001 (daily-bulk).

| Zeit-raum | Regen l/m² | pH | Leitf. µS/cm | $NH_4^+$ mg/l | $Na^+$ mg/l | $K^+$ mg/l | $Ca^{++}$ mg/l | $Mg^{++}$ mg/l | $SO_4^=$ mg/l | $NO_3^-$ mg/l | $Cl^-$ mg/l |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Größte Monatswerte | | | | | | | | | | |
| 82-01 | 197.7 | 5.76 | 72.5 | - | - | - | - | - | 8.75 | 9.01 | 6.05 |
| 84-01 | 197.7 | 5.76 | 72.5 | 3.52 | 3.23 | 0.56 | 1.43 | 0.41 | 8.75 | 9.01 | 6.05 |
| | Kleinste Monatswerte | | | | | | | | | | |
| 82-01 | 3.6 | 3.90 | 9.5 | - | - | - | - | - | 0.75 | 0.50 | 0.11 |
| 84-01 | 3.6 | 3.96 | 9.5 | 0.11 | 0.07 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.75 | 0.50 | 0.11 |
| | Mittlerer Jahresgang 1984-2001 | | | | | | | | | | |
| Jan. | 58.9 | 4.74 | 17.2 | 0.27 | 0.66 | 0.08 | 0.24 | 0.09 | 1.43 | 1.22 | 1.29 |
| Feb. | 49.6 | 4.64 | 20.5 | 0.46 | 0.60 | 0.10 | 0.29 | 0.09 | 1.75 | 1.76 | 1.14 |
| Mär. | 58.8 | 4.70 | 22.3 | 0.89 | 0.39 | 0.09 | 0.34 | 0.07 | 2.25 | 2.34 | 0.78 |
| Apr. | 48.6 | 4.47 | 29.5 | 1.01 | 0.31 | 0.10 | 0.41 | 0.08 | 3.01 | 3.21 | 0.68 |
| Mai | 56.2 | 4.37 | 31.5 | 1.01 | 0.16 | 0.13 | 0.41 | 0.07 | 3.27 | 3.32 | 0.36 |
| Jun. | 67.2 | 4.46 | 26.9 | 0.78 | 0.16 | 0.10 | 0.41 | 0.06 | 2.88 | 2.66 | 0.35 |
| Jul. | 69.0 | 4.56 | 22.8 | 0.67 | 0.16 | 0.09 | 0.45 | 0.05 | 2.49 | 2.20 | 0.35 |
| Aug. | 51.7 | 4.68 | 20.2 | 0.73 | 0.19 | 0.11 | 0.39 | 0.06 | 2.19 | 2.19 | 0.38 |
| Sep. | 74.3 | 4.61 | 19.8 | 0.52 | 0.24 | 0.07 | 0.34 | 0.05 | 1.88 | 1.96 | 0.49 |
| Okt. | 68.8 | 4.76 | 14.8 | 0.31 | 0.32 | 0.08 | 0.29 | 0.06 | 1.51 | 1.38 | 0.61 |
| Nov. | 59.6 | 4.63 | 18.4 | 0.40 | 0.39 | 0.06 | 0.27 | 0.07 | 1.59 | 1.67 | 0.77 |
| Dez. | 62.8 | 4.74 | 16.0 | 0.26 | 0.50 | 0.06 | 0.23 | 0.08 | 1.34 | 1.32 | 0.99 |
| | Jahreswerte | | | | | | | | | | |
| 1982 | 704.6 | 4.15 | 38.7 | - | - | - | - | - | 3.77 | 2.93 | 0.80 |
| 1983 | 657.6 | 4.22 | 34.9 | - | - | - | - | - | 3.54 | 2.37 | 0.67 |
| 1984 | 789.0 | 4.26 | 35.1 | 0.73 | 0.31 | 0.14 | 0.33 | 0.06 | 3.27 | 2.80 | 0.70 |
| 1985 | 572.1 | 4.36 | 30.0 | 0.75 | 0.41 | 0.14 | 0.38 | 0.07 | 3.33 | 2.49 | 0.94 |
| 1986 | 695.7 | 4.42 | 26.2 | 0.59 | 0.42 | 0.09 | 0.25 | 0.07 | 2.65 | 1.99 | 0.93 |
| 1987 | 923.4 | 4.46 | 23.0 | 0.65 | 0.24 | 0.09 | 0.25 | 0.04 | 2.52 | 2.15 | 0.53 |
| 1988 | 752.1 | 4.55 | 25.6 | 0.63 | 0.52 | 0.10 | 0.27 | 0.08 | 2.56 | 2.16 | 1.09 |
| 1989 | 625.7 | 4.46 | 27.7 | 0.72 | 0.33 | 0.12 | 0.35 | 0.07 | 2.68 | 2.54 | 0.66 |
| 1990 | 691.3 | 4.64 | 22.6 | 0.59 | 0.48 | 0.19 | 0.29 | 0.08 | 2.18 | 1.90 | 0.81 |
| 1991 | 506.4 | 4.55 | 25.3 | 0.66 | 0.49 | 0.12 | 0.40 | 0.10 | 2.43 | 2.49 | 0.81 |
| 1992 | 780.6 | 4.62 | 23.1 | 0.58 | 0.28 | 0.08 | 0.48 | 0.07 | 2.19 | 2.22 | 0.55 |
| 1993 | 716.0 | 4.79 | 18.3 | 0.47 | 0.34 | 0.08 | 0.43 | 0.07 | 1.84 | 1.83 | 0.65 |
| 1994 | 668.8 | 4.69 | 20.5 | 0.68 | 0.32 | 0.06 | 0.43 | 0.08 | 2.13 | 2.22 | 0.70 |
| 1995 | 885.7 | 4.75 | 18.1 | 0.54 | 0.29 | 0.05 | 0.33 | 0.07 | 1.70 | 1.72 | 0.56 |
| 1996 | 531.7 | 4.67 | 20.8 | 0.68 | 0.27 | 0.08 | 0.37 | 0.08 | 2.01 | 2.36 | 0.57 |
| 1997 | 670.2 | 4.81 | 16.1 | 0.60 | 0.27 | 0.06 | 0.28 | 0.06 | 1.58 | 1.89 | 0.56 |
| 1998 | 760.1 | 4.75 | 16.5 | 0.52 | 0.33 | 0.07 | 0.37 | 0.08 | 1.58 | 1.85 | 0.66 |
| 1999 | 733.9 | 4.85 | 15.1 | 0.49 | 0.26 | 0.05 | 0.35 | 0.08 | 1.49 | 1.90 | 0.53 |
| 2000 | 933.6 | 4.82 | 11.4 | 0.51 | 0.29 | 0.05 | 0.25 | 0.06 | 1.37 | 1.74 | 0.56 |
| 2001 | 823.9 | 4.95 | 15.9 | 0.47 | 0.26 | 0.06 | 0.34 | 0.06 | 1.20 | 1.61 | 0.45 |

## 2.2.2 Depositionen von Ionen mit dem Niederschlag - Daily-bulk

Die nasse Deposition D ist das Produkt aus der Niederschlagsmenge G und der Ionen-Konzentration c: $D = c\,G$

Heute wird die räumliche Variabilität der Deposition weitgehend durch die Variabilität der Niederschlagsmenge verursacht und weniger durch die Variabilität der Ionen-Konzentrationen. Die Niederschlagsmenge variiert auf Grund orographischer und klimatologischer Gegebenheiten räumlich sehr stark. Hohe Depositionen treten vor allem an den Bergstationen auf, da hier die jährlichen Regenmengen am größten sind. Das bedeutet, dass die räumliche Verteilung der nassen Deposition wesentlich inhomogener ist als die entsprechende Verteilung der Konzentrationen.

In Tabelle 61 sind die monatlichen Depositionen der Ionen im Niederschlag für Waldhof und Deuselbach für das Jahr 2001 zusammengestellt. Tabelle 62 und Tabelle 63 enthalten die mittleren Jahresgänge der Depositionen sowie deren Jahreswerte. In Abbildung 46 ist zusammenfassend die über die 2 Stationen Deuselbach und Waldhof gemittelte, auf 1982 normierte Deposition für die Ionen $H^+$, Sulfat, Nitrat und Ammonium zwischen 1982 und 2001 dargestellt.

Aus den Tabellen sowie aus der Abbildung 47 ist ersichtlich, dass die jährlichen Regenmengen zwar von Jahr zu Jahr erheblichen Schwankungen unterliegen, zwischen 1982 und 2001 aber keinen systematischen Trend aufweisen. Das bedeutet, dass die Langzeittrends der Deposition den entsprechenden Trends der Konzentrationen sehr ähnlich sind. Der stärkste Rückgang der nassen Deposition wurde bei den Ionen $H^+$ und $SO_4^=$ beobachtet.

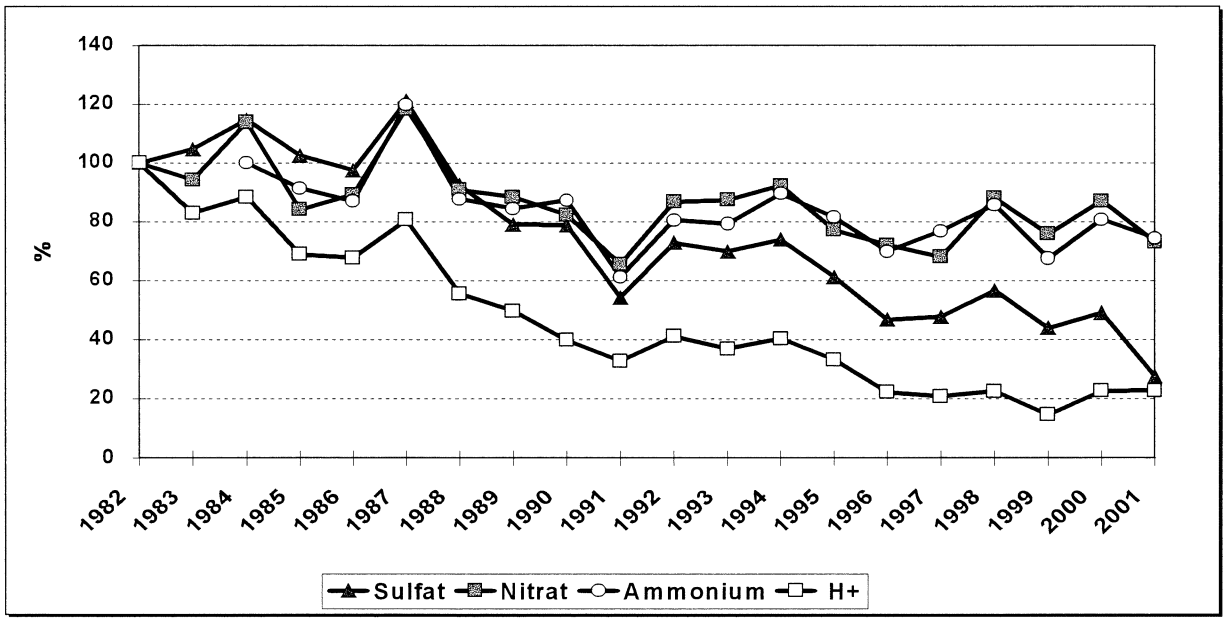



Abbildung 46: Rückgang der Ionendepositionen für $H^+$, Sulfat, Nitrat und Ammonium zwischen 1982 und 2001 im Mittel über die UBA-Stationen Deuselbach und Waldhof, normiert auf 1982 (daily-bulk-Messungen).

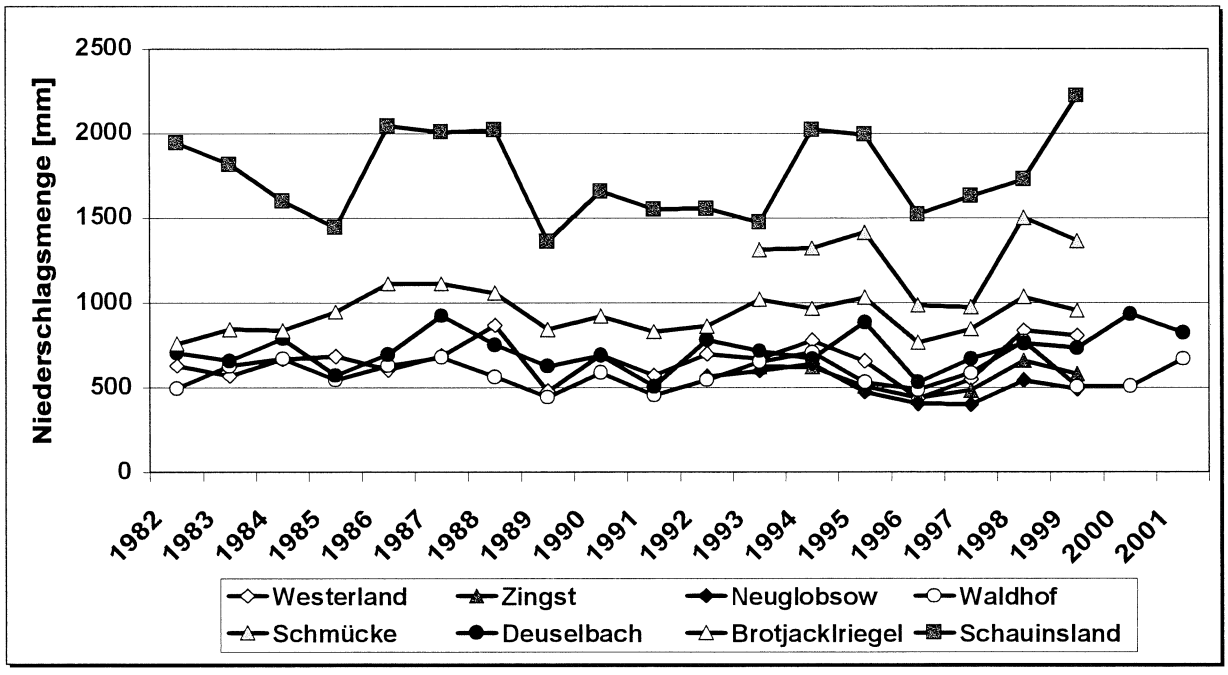



Abbildung 47: Jährliche Niederschlagsmengen an den UBA-Messstellen von 1982 bis 2001 (daily-bulk-Messungen).

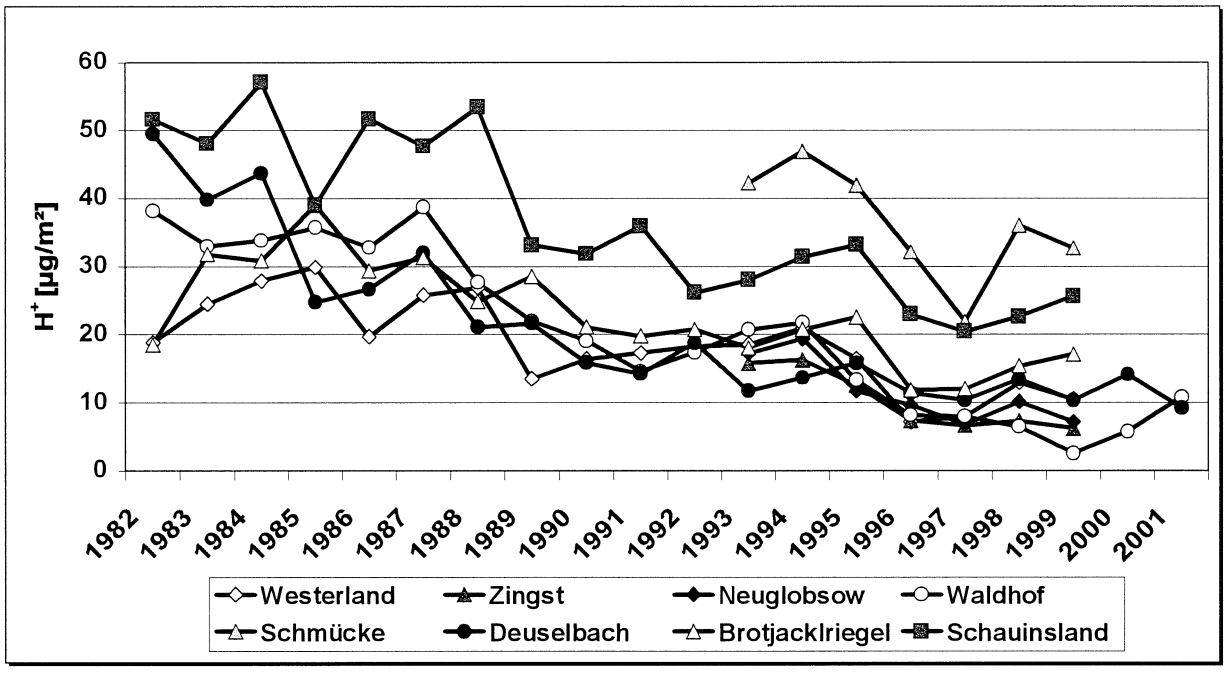



Abbildung 48: Jährliche Depositionen von $H^+$ an den Messstellen des UBA zwischen 1982 bis 2001 (daily-bulk-Messungen).

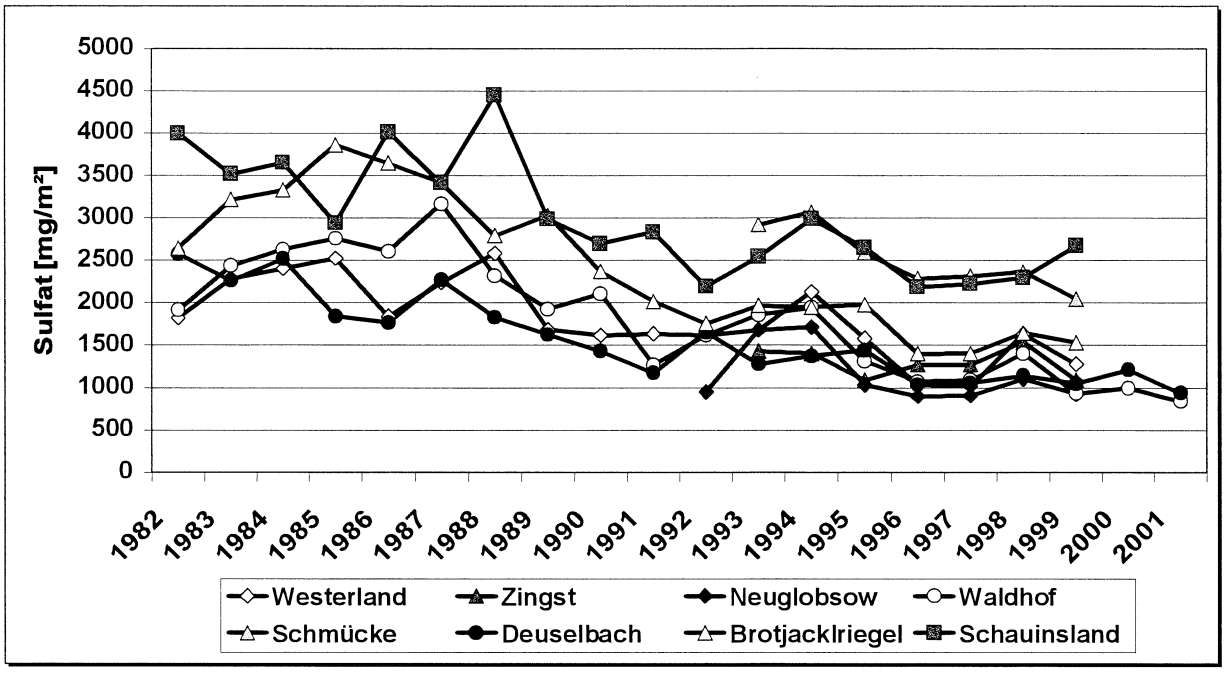



Abbildung 49: Jährliche Depositionen von $SO_4^{=}$ (seesalzkorrigiert) an den Messstellen des UBA zwischen 1982 bis 2001 (daily-bulk-Messungen).

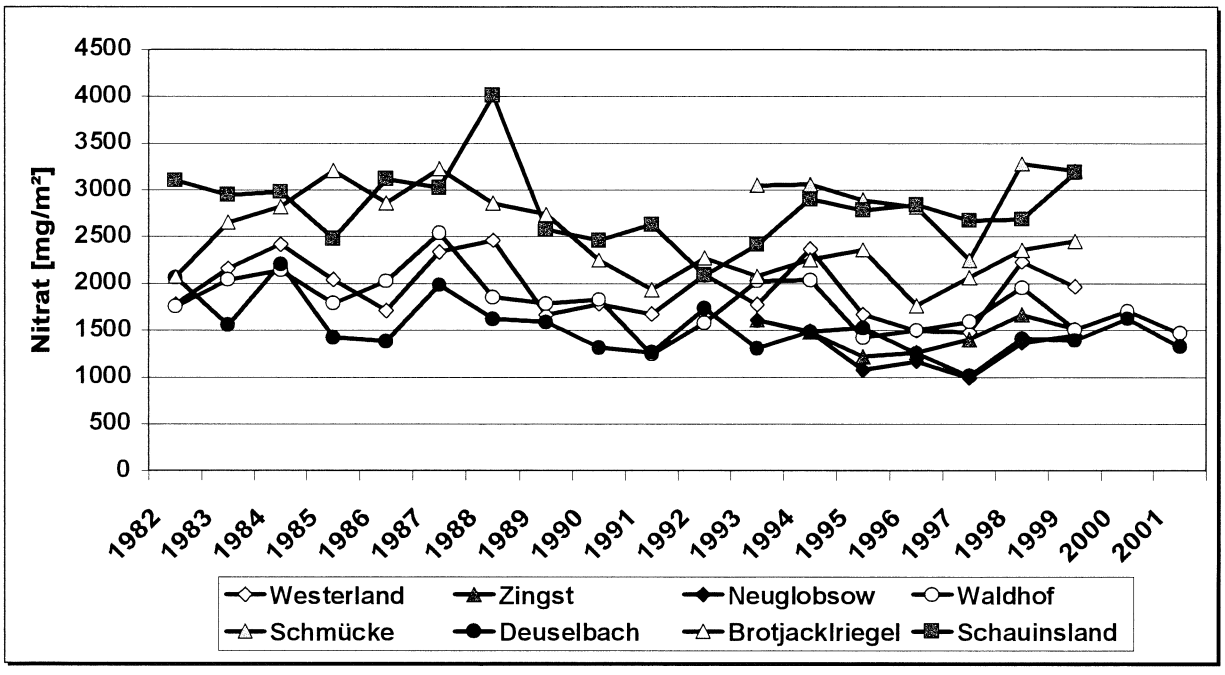



Abbildung 50: Jährliche Depositionen von $NO_3^-$ an den Messstellen des UBA zwischen 1982 bis 2001 (daily-bulk-Messungen).

Tabelle 61: Mittlere monatliche Depositionen im Niederschlag für 2001, Waldhof und Deuselbach, (daily-bulk-Messungen).

| Zeit-raum | $NH_4^+$ mg/m² | $Na^+$ mg/m² | $K^+$ mg/m² | $Ca^{++}$ mg/m² | $Mg^{++}$ mg/m² | $SO_4^=$ mg/m² | $NO_3^-$ mg/m² | $Cl^-$ mg/m² | $H^+$ mg/m² | Regen l/m² |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | WALDHOF | | | | | | | | | |
| Jan. | 37.2 | 63.0 | 5.9 | 26.7 | 6.0 | 80.8 | 123.1 | 124.3 | 0.23 | 39.5 |
| Feb. | 39.8 | 69.7 | 6.7 | 28.2 | 9.7 | 93.7 | 157.2 | 129.3 | 0.42 | 40.3 |
| Mär. | 70.7 | 54.8 | 9.1 | 42.7 | 14.0 | 164.0 | 228.1 | 105.8 | 0.55 | 79.5 |
| Apr. | 45.5 | 4.8 | 5.9 | 35.7 | 4.1 | 97.4 | 166.3 | 10.1 | 0.13 | 26.6 |
| Mai | 31.3 | 5.6 | 5.1 | 15.7 | 3.2 | 50.7 | 100.0 | 13.2 | 0.06 | 17.5 |
| Jun. | 29.3 | 5.8 | 10.6 | 24.8 | 4.2 | 74.4 | 97.5 | 10.6 | 0.09 | 32.4 |
| Jul. | 87.0 | 10.4 | 9.7 | 47.5 | 8.5 | 179.8 | 291.8 | 25.9 | 1.77 | 99.3 |
| Aug. | 55.9 | 9.4 | 9.0 | 25.2 | 6.2 | 110.9 | 203.2 | 19.7 | 1.22 | 63.3 |
| Sep. | 35.9 | 6.5 | 2.2 | 22.8 | 3.7 | 72.1 | 128.3 | 13.1 | 0.62 | 33.5 |
| Okt. | 24.6 | 6.5 | 4.4 | 18.2 | 4.8 | 53.9 | 78.5 | 18.3 | 0.15 | 25.5 |
| Nov. | 10.9 | 6.1 | 1.9 | 21.4 | 5.0 | 38.4 | 55.2 | 13.4 | 0.04 | 21.3 |
| Dez. | 19.8 | 31.1 | 2.2 | 19.8 | 5.7 | 47.3 | 74.3 | 61.1 | 0.49 | 30.4 |
| | DEUSELBACH | | | | | | | | | |
| Jan. | 14.0 | 28.8 | 3.8 | 14.6 | 5.3 | 68.4 | 83.9 | 52.8 | 1.09 | 77.2 |
| Feb. | 21.1 | 9.9 | 2.3 | 12.0 | 2.6 | 53.7 | 103.8 | 18.4 | 0.83 | 48.0 |
| Mär. | 49.6 | 32.1 | 5.4 | 23.4 | 6.4 | 107.6 | 165.2 | 55.5 | 0.95 | 118.0 |
| Apr. | 51.6 | 24.5 | 7.3 | 18.8 | 5.5 | 109.7 | 134.5 | 42.5 | 0.68 | 78.0 |
| Mai | 3.0 | 0.6 | 0.5 | 2.6 | 0.4 | 8.4 | 9.4 | 1.9 | 0.04 | 6.6 |
| Jun. | 96.9 | 18.6 | 7.3 | 42.4 | 6.3 | 209.8 | 261.0 | 32.2 | 1.05 | 112.3 |
| Jul. | 42.8 | 18.1 | 5.6 | 95.7 | 6.5 | 129.9 | 131.3 | 32.7 | 0.98 | 88.1 |
| Aug. | 22.7 | 5.7 | 2.1 | 16.9 | 2.8 | 49.4 | 73.8 | 9.5 | 0.23 | 50.2 |
| Sep. | 36.8 | 31.4 | 3.4 | 14.5 | 5.0 | 97.9 | 136.5 | 56.2 | 1.21 | 96.5 |
| Okt. | 14.2 | 7.7 | 2.8 | 21.4 | 2.5 | 53.9 | 56.6 | 13.6 | 0.37 | 43.5 |
| Nov. | 22.7 | 23.0 | 3.1 | 13.0 | 4.1 | 73.8 | 120.2 | 39.0 | 1.38 | 77.0 |
| Dez. | 9.5 | 10.5 | 1.7 | 5.4 | 1.9 | 27.8 | 49.9 | 18.2 | 0.39 | 28.5 |

Tabelle 62: Mittlere Jahresgänge, Monatsmaxima, und -minima, Jahresmittel der Depositionen im Niederschlag sowie Summen der Niederschlagsmenge in Waldhof für 1982 bis 2001 (daily-bulk).

| Zeit-raum | $NH_4^+$ mg/m² | $Na^+$ mg/m² | $K^+$ mg/m² | $Ca^{++}$ mg/m² | $Mg^{++}$ mg/m² | $SO_4^=$ mg/m² | $NO_3^-$ mg/m² | $Cl^-$ mg/m² | $H^+$ mg/m² | Regen l/m² |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Größte Monatswerte | | | | | | | | | |
| 82-01 | - | - | - | - | - | 667 | 549 | 451.2 | 11.68 | 151.4 |
| 84-01 | 151.9 | 240.8 | 26.4 | 72.8 | 31.9 | 667 | 426 | 451.2 | 8.87 | 151.4 |
| | Kleinste Monatswerte | | | | | | | | | |
| 82-01 | - | - | - | - | - | 22 | 27 | 2.7 | 0.02 | 0.8 |
| 84-01 | 3.2 | 0.8 | 0.6 | 3.4 | 0.5 | 22 | 31 | 2.7 | 0.02 | 0.8 |
| | Mittlerer Jahresgang 1984-2001 | | | | | | | | | |
| Jan. | 35.4 | 84.7 | 7.9 | 23.8 | 12.3 | 159 | 150 | 163.6 | 1.34 | 47.7 |
| Feb. | 34.1 | 72.3 | 6.1 | 21.9 | 9.9 | 126 | 120 | 136.2 | 1.08 | 39.8 |
| Mär. | 58.2 | 42.2 | 7.4 | 25.3 | 8.5 | 164 | 178 | 88.4 | 1.19 | 43.2 |
| Apr. | 69.5 | 18.8 | 8.3 | 25.4 | 5.1 | 166 | 181 | 38.8 | 0.95 | 34.1 |
| Mai | 87.5 | 12.0 | 12.5 | 39.0 | 5.9 | 280 | 242 | 28.4 | 2.15 | 45.7 |
| Jun. | 62.5 | 15.2 | 7.7 | 30.2 | 6.0 | 216 | 199 | 34.9 | 2.16 | 54.7 |
| Jul. | 77.3 | 13.7 | 9.0 | 36.9 | 5.9 | 247 | 238 | 31.2 | 2.39 | 67.7 |
| Aug. | 73.6 | 18.7 | 12.1 | 37.5 | 6.3 | 222 | 205 | 40.3 | 1.87 | 56.6 |
| Sep. | 57.6 | 39.3 | 8.1 | 28.1 | 7.6 | 212 | 198 | 78.9 | 1.89 | 54.7 |
| Okt. | 41.8 | 30.5 | 7.3 | 29.2 | 7.0 | 150 | 156 | 60.3 | 1.17 | 43.5 |
| Nov. | 37.5 | 36.9 | 6.9 | 25.0 | 8.7 | 139 | 140 | 75.3 | 1.21 | 46.0 |
| Dez. | 34.1 | 40.2 | 6.9 | 22.9 | 7.4 | 145 | 143 | 81.9 | 1.43 | 51.7 |
| | Jahreswerte | | | | | | | | | |
| 1982 | - | - | - | - | - | 2000 | 1755 | 605.3 | 38.17 | 494.1 |
| 1983 | - | - | - | - | - | 2526 | 2042 | 692.7 | 32.96 | 627.5 |
| 1984 | 616.0 | 395.2 | 82.8 | 288.8 | 69.1 | 2733 | 2142 | 792.7 | 33.82 | 670.5 |
| 1985 | 660.5 | 378.0 | 110.2 | 258.8 | 57.1 | 2860 | 1789 | 833.3 | 35.71 | 545.1 |
| 1986 | 623.8 | 340.0 | 95.5 | 252.7 | 60.9 | 2689 | 2026 | 712.3 | 32.77 | 629.3 |
| 1987 | 826.5 | 296.8 | 95.9 | 385.7 | 59.6 | 3237 | 2537 | 667.0 | 38.70 | 678.0 |
| 1988 | 568.6 | 280.7 | 75.2 | 322.9 | 65.3 | 2386 | 1852 | 618.6 | 27.66 | 562.3 |
| 1989 | 558.1 | 239.5 | 74.5 | 298.4 | 63.0 | 1984 | 1785 | 529.7 | 21.97 | 443.6 |
| 1990 | 630.1 | 450.8 | 115.5 | 351.8 | 103.7 | 2220 | 1828 | 928.8 | 19.08 | 587.6 |
| 1991 | 394.5 | 250.4 | 101.7 | 257.2 | 62.7 | 1284 | 1244 | 506.6 | 14.58 | 454.5 |
| 1992 | 508.7 | 294.6 | 84.9 | 283.2 | 74.8 | 1688 | 1581 | 617.6 | 17.35 | 546.0 |
| 1993 | 607.8 | 328.2 | 96.1 | 334.1 | 77.8 | 1938 | 2029 | 676.6 | 20.69 | 652.7 |
| 1994 | 608.7 | 494.2 | 94.4 | 369.3 | 91.2 | 2067 | 2038 | 988.0 | 21.75 | 706.9 |
| 1995 | 492.7 | 390.3 | 64.8 | 238.0 | 80.1 | 1408 | 1422 | 802.6 | 13.31 | 531.8 |
| 1996 | 471.9 | 114.4 | 47.4 | 183.4 | 41.3 | 1098 | 1500 | 255.2 | 8.13 | 487.8 |
| 1997 | 511.3 | 253.3 | 71.3 | 257.9 | 77.5 | 1311 | 1591 | 509.6 | 7.95 | 584.7 |
| 1998 | 623.5 | 332.9 | 90.4 | 390.8 | 102.1 | 1483 | 1955 | 641.8 | 6.43 | 772.4 |
| 1999 | 442.6 | 426.5 | 53.1 | 312.9 | 96.9 | 1038 | 1506 | 826.2 | 2.56 | 506.0 |
| 2000 | 487.9 | 273.8 | 72.7 | 328.9 | 75.1 | 1063 | 1703 | 544.8 | 5.75 | 509.1 |
| 2001 | 500.9 | 270.1 | 47.1 | 131.7 | 43.4 | 907 | 1470 | 471.1 | 10.80 | 670.3 |

Tabelle 63: Mittlere Jahresgänge, Monatsmaxima, und -minima, Jahresmittel der Depositionen im Niederschlag sowie Summen der Niederschlagsmenge in Deuselbach für 1982 bis 2001 (daily-bulk).

| Zeit-raum | $NH_4^+$ mg/m² | $Na^+$ mg/m² | $K^+$ mg/m² | $Ca^{++}$ mg/m² | $Mg^{++}$ mg/m² | $SO_4^=$ mg/m² | $NO_3^-$ mg/m² | $Cl^-$ mg/m² | $H^+$ mg/m² | Regen l/m² |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Größte Monatswerte | | | | | | | | | |
| 82-01 | - | - | - | - | - | 721 | 645 | 265.7 | 13.56 | 197.7 |
| 84-01 | 155.1 | 155.1 | 23.5 | 95.7 | 16.9 | 721 | 645 | 265.7 | 13.56 | 197.7 |
| | Kleinste Monatswerte | | | | | | | | | |
| 82-01 | - | - | - | - | - | 6 | 8 | 1.2 | 0.03 | 3.6 |
| 84-01 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 1.8 | 0.2 | 6 | 8 | 1.2 | 0.03 | 3.6 |
| | Mittlerer Jahresgang 1984-2001 | | | | | | | | | |
| Jan. | 18.7 | 57.2 | 6.4 | 19.5 | 8.5 | 113 | 88 | 114.1 | 1.08 | 58.9 |
| Feb. | 26.7 | 39.6 | 6.5 | 19.2 | 5.9 | 106 | 100 | 75.2 | 1.14 | 49.6 |
| Mär. | 53.5 | 24.4 | 6.0 | 23.0 | 5.2 | 153 | 162 | 56.7 | 1.19 | 58.8 |
| Apr. | 50.7 | 14.3 | 5.6 | 23.4 | 4.5 | 175 | 186 | 37.0 | 1.64 | 48.6 |
| Mai | 73.9 | 11.8 | 9.4 | 27.7 | 4.6 | 259 | 259 | 26.3 | 2.37 | 56.2 |
| Jun. | 49.9 | 10.5 | 7.0 | 30.6 | 4.5 | 215 | 202 | 26.3 | 2.31 | 67.2 |
| Jul. | 51.5 | 10.3 | 6.6 | 32.8 | 4.0 | 199 | 173 | 26.5 | 1.90 | 69.0 |
| Aug. | 41.0 | 11.1 | 6.7 | 21.9 | 3.2 | 128 | 127 | 22.1 | 1.09 | 51.7 |
| Sep. | 42.8 | 17.0 | 6.3 | 28.9 | 4.3 | 165 | 177 | 41.1 | 1.81 | 74.3 |
| Okt. | 23.8 | 26.5 | 6.1 | 23.0 | 4.9 | 120 | 110 | 51.3 | 1.20 | 68.8 |
| Nov. | 24.1 | 26.5 | 4.3 | 18.1 | 4.9 | 105 | 111 | 54.6 | 1.39 | 59.6 |
| Dez. | 19.1 | 42.5 | 5.2 | 19.0 | 6.6 | 106 | 105 | 82.6 | 1.13 | 62.8 |
| | Jahreswerte | | | | | | | | | |
| 1982 | - | - | - | - | - | 2654 | 2065 | 565.3 | 49.54 | 704.6 |
| 1983 | - | - | - | - | - | 2328 | 1557 | 441.2 | 39.80 | 657.6 |
| 1984 | 574.2 | 243.7 | 111.2 | 263.9 | 43.7 | 2581 | 2208 | 551.9 | 43.72 | 789.0 |
| 1985 | 427.7 | 233.7 | 77.6 | 214.8 | 37.9 | 1907 | 1424 | 535.6 | 24.74 | 572.1 |
| 1986 | 412.3 | 292.9 | 59.7 | 170.9 | 47.1 | 1843 | 1383 | 645.6 | 26.65 | 695.7 |
| 1987 | 600.8 | 225.7 | 80.5 | 230.7 | 41.2 | 2327 | 1985 | 493.5 | 32.01 | 923.4 |
| 1988 | 475.0 | 392.0 | 76.0 | 202.8 | 63.2 | 1925 | 1622 | 817.8 | 21.08 | 752.1 |
| 1989 | 447.9 | 207.8 | 74.5 | 217.7 | 42.8 | 1675 | 1589 | 412.8 | 21.63 | 625.7 |
| 1990 | 408.9 | 333.4 | 131.6 | 200.6 | 55.4 | 1510 | 1315 | 560.9 | 15.84 | 691.3 |
| 1991 | 334.4 | 245.8 | 63.1 | 203.6 | 49.0 | 1232 | 1263 | 412.0 | 14.23 | 506.4 |
| 1992 | 449.5 | 218.0 | 65.5 | 371.6 | 51.7 | 1708 | 1735 | 427.7 | 18.78 | 780.6 |
| 1993 | 336.4 | 245.4 | 58.2 | 308.2 | 51.9 | 1320 | 1309 | 464.6 | 11.70 | 716.0 |
| 1994 | 457.7 | 212.0 | 39.3 | 289.4 | 51.6 | 1425 | 1486 | 469.9 | 13.65 | 668.8 |
| 1995 | 478.3 | 260.0 | 48.2 | 292.3 | 57.8 | 1503 | 1524 | 494.6 | 15.79 | 885.7 |
| 1996 | 360.5 | 142.5 | 43.9 | 194.9 | 40.8 | 1070 | 1255 | 302.7 | 11.40 | 531.7 |
| 1997 | 404.5 | 178.1 | 42.3 | 188.1 | 42.3 | 1056 | 1012 | 1264.6 | 10.33 | 670.2 |
| 1998 | 397.6 | 252.0 | 50.4 | 283.6 | 61.8 | 1204 | 1410 | 501.0 | 13.42 | 760.1 |
| 1999 | 361.7 | 193.7 | 39.7 | 255.7 | 59.6 | 1093 | 1392 | 385.9 | 10.32 | 733.9 |
| 2000 | 474.2 | 272.1 | 51.0 | 233.6 | 54.7 | 1279 | 1623 | 526.1 | 14.11 | 933.6 |
| 2001 | 384.9 | 210.9 | 45.3 | 280.8 | 49.2 | 990 | 1326 | 372.4 | 9.21 | 823.9 |

## 2.2.3 Weekly wet-only-Messungen

In Tabelle 64 sind die Jahresmittel der Konzentrationen im Niederschlag für die weekly wet-only-Messstellen für 2001 und in Tabelle 65 sind die jeweiligen Depositionen für den gleichen Zeitraum dargestellt.

Ein Vergleich der daily-bulk-Messungen mit den weeklywet-only-Messungen für die 8 personell besetzten Messstellen des UBA, an denen zwischen 1994/95 bis 1999 Parallelmessungen durchgeführt wurden, zeigte, dass sowohl die Niederschlagsmengen als auch die Hauptionen wie $SO_4^{=}$, $NO_3^{-}$ und $NH_4^{+}$ sowie die Leitfähigkeit eine gute Übereinstimmung beim Median und nur eine geringe Streuung zeigen. Für $H^+$ sind die Messergebnisse bei weekly-wet-only (vgl. Abbildung 51 mit Abbildung 41 bzw. Tabelle 59 und Tabelle 60 mit Tabelle 64) niedriger – d.h. die pH-Werte höher. Die Werte weisen auch eine größere Streuung auf. Vergleiche bei $Na^+$ und $Cl^-$ zeigen eine gute Übereinstimmung aber eine große Streuung, bei $Ca^{++}$, $Mg^{++}$ und $K^+$ sind die Abweichungen und die Streuungen z.T. recht erheblich. Insgesamt zeigen die Werte der daily-bulk-Messungen eine Tendenz zu höheren Werten. Für diese vergleichenden Berechnungen wurden aus den daily-bulk-Werten gewichtete Wochenmittel berechnet, so dass sie mit den Ergebnissen der weekly wet-only-Messungen verglichen werden konnten *(Ref. 13, sowie neuere Auswertungen 1999)*.

In Abbildung 51 sind die Jahresmittel des ph-Wertes im Niederschlag für die Jahre 1994 bis 2001 an einigen wet-only-Standorten in ihrer räumlichen Verteilung in Deutschland dargestellt. Wie auch bei den daily-bulk-Messungen ist an allen Stationen ein Anstieg des pH-Wertes zu finden. Abbildung 52 zeigt den an allen Stationen abfallenden Trend der Jahresmittel der Sulfatkonzentrationen im Niederschlag zwischen 1994 und 2001. Abbildung 53 zeigt die räumliche und zeitliche Verteilung der Ammoniumkonzentrationen im Niederschlag. In Abbildung 54 ist die nasse Gesamt-Stickstoffdeposition für 1994 bis 2001 an diesen Standorten dargestellt. Weder bei den Ammoniumkonzentrationen noch bei der Stickstoffdepostion lässt sich ein klarer Trend erkennen.

Das wet-only-Messnetz hat einige Probenahmestellen, die nicht zu den Standorten des UBA-Messnetz gehören. Die geographischen Koordinaten, Stationskennung und Messbeginn lauten wie folgt:

| Stationsname | Stations-Kennung | geographische Koordinaten | | Höhe ü NN in m | Messbeginn |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Nord | Ost | | |
| **Dunum** | DU | 53°28'28" | 07°35'15" | 3 | Apr 98 |
| **Solling** | SG | 51°45'39" | 09°34'46" | 500 | Jan 94 |
| **Hilchenbach** | HI | 50°55'54" | 08°11'36" | 635 | Jan 95 |
| **Kehl** | KL | 48°34'31" | 07°49'15" | 135 | Jan 98 |

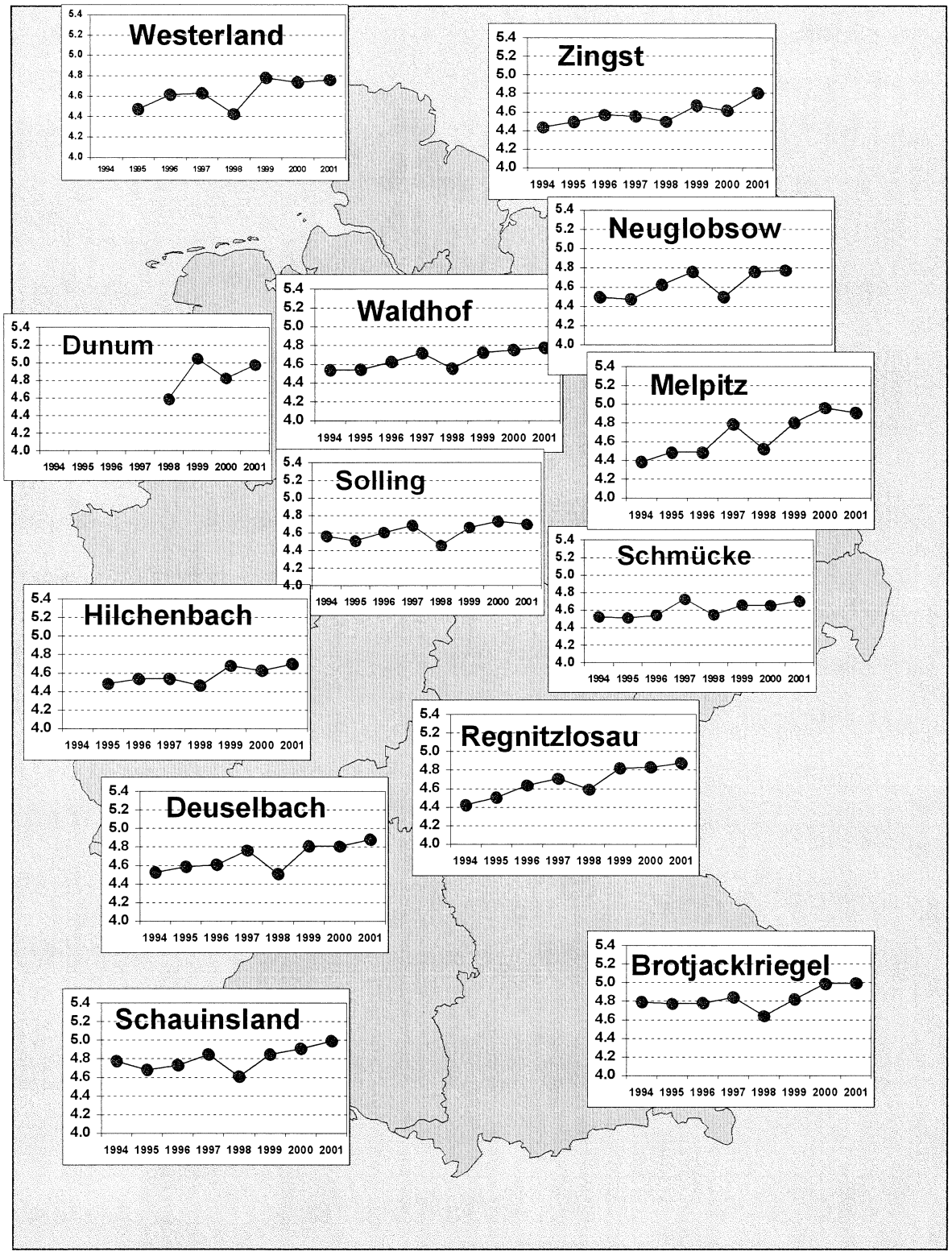



Abbildung 51: Jahresmittel pH-Wert im Niederschlag 1994 bis 2001, wet-only-Messungen

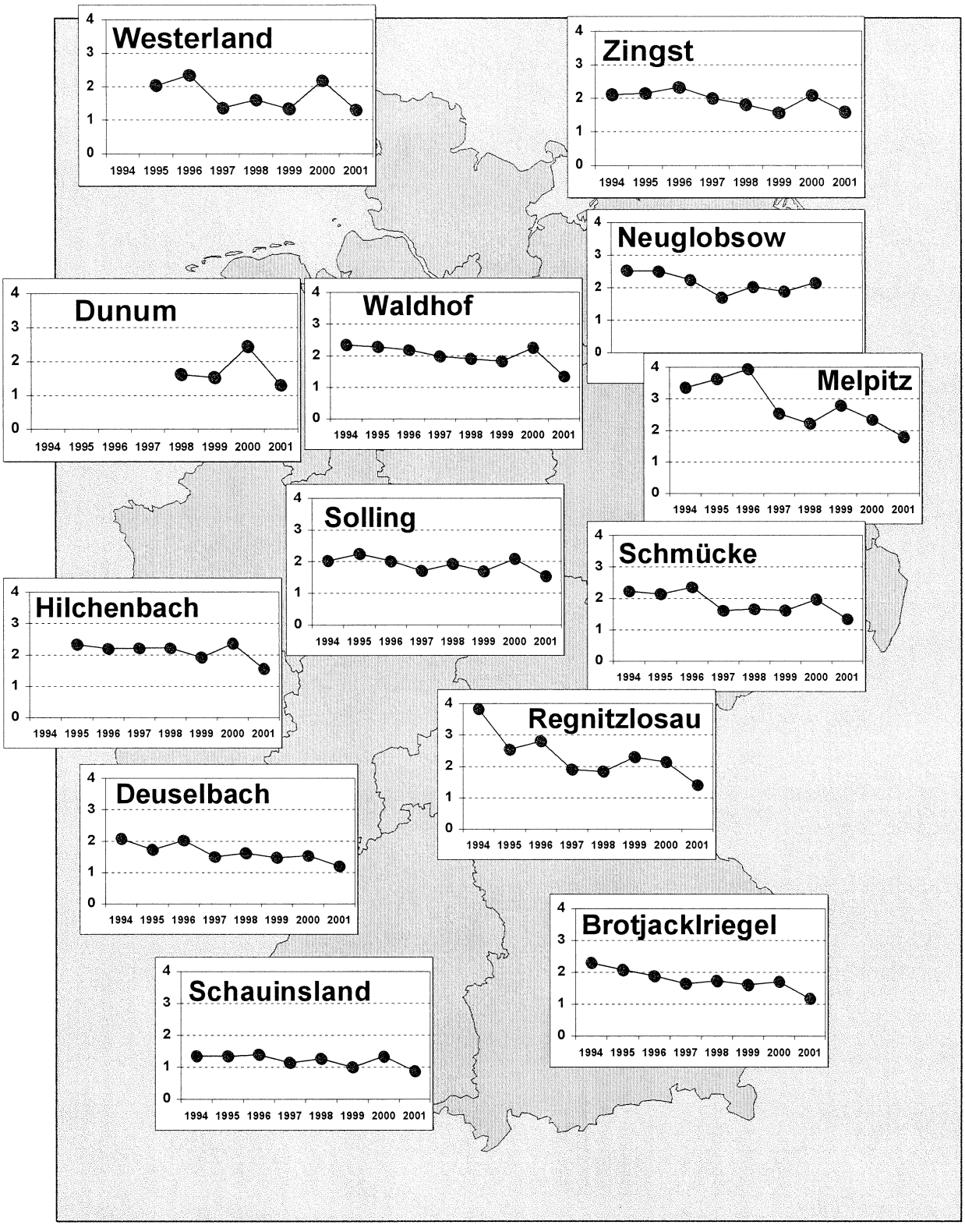



Abbildung 52: Jahresmittel Sulfat im Niederschlag 1994 bis 2001 in mg/l, wet-only-Messungen, seesalzkorrigiert

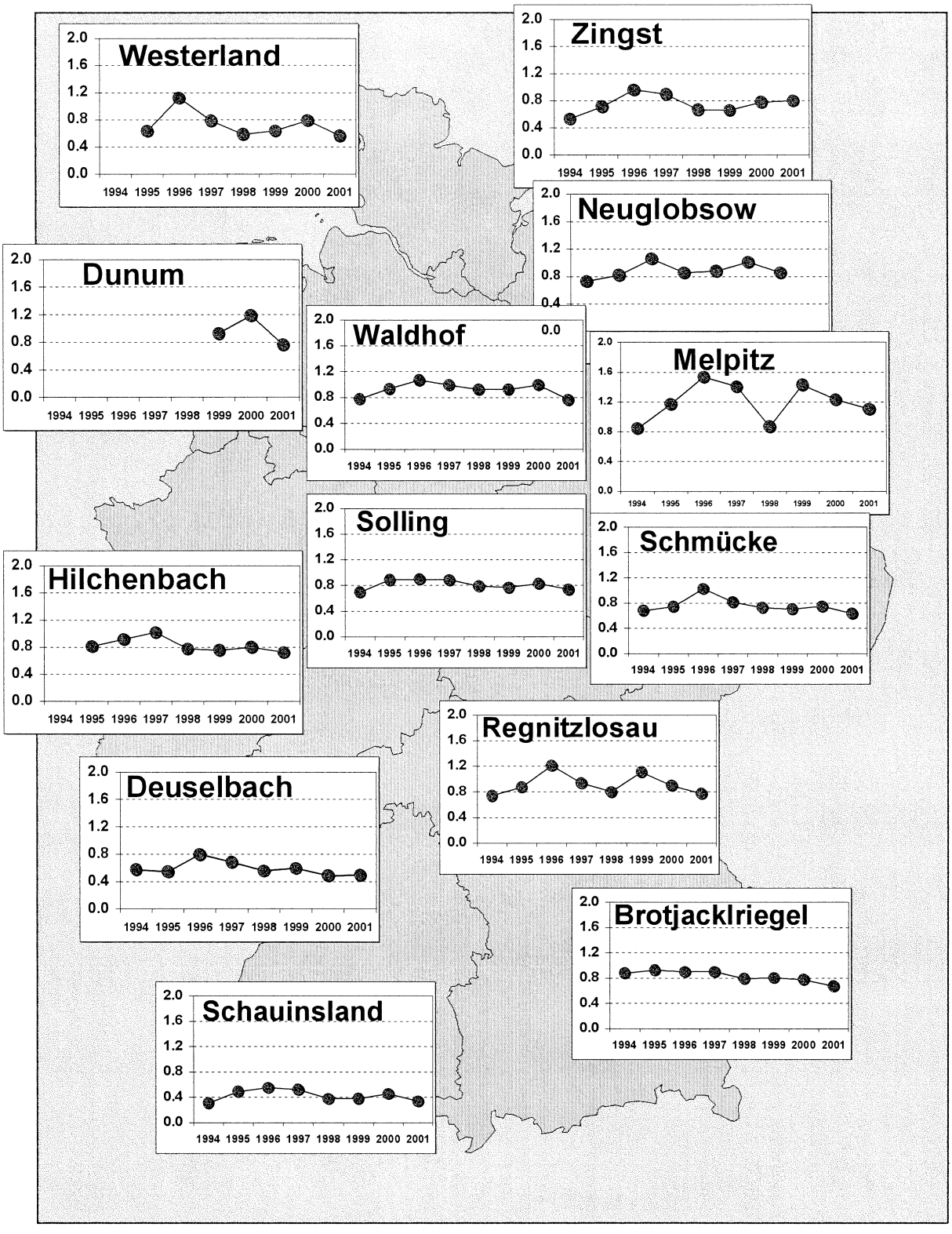



Abbildung 53: Jahresmittel Ammonium im Niederschlag 1994 bis 2001 in mg/l, wet-only-Messungen

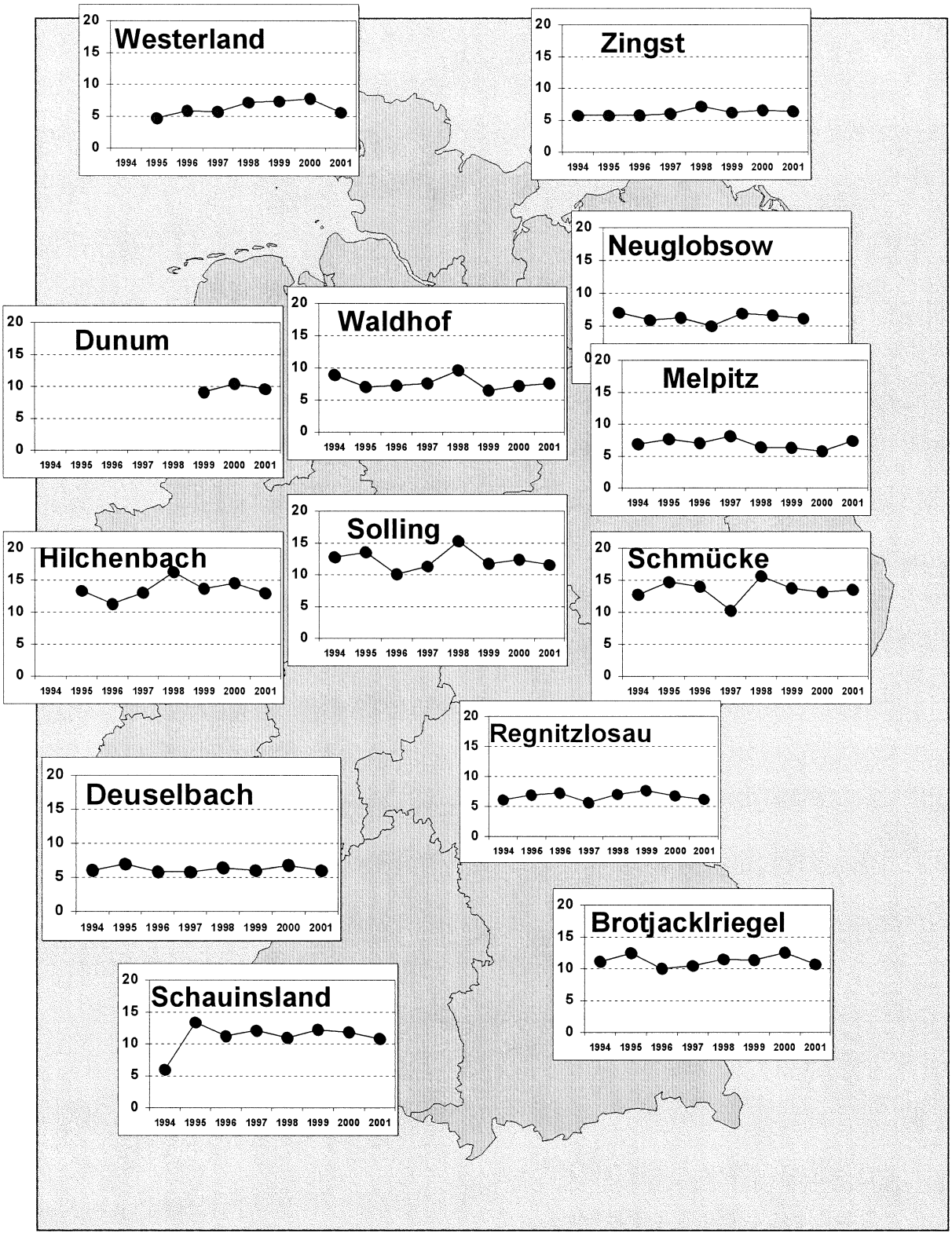



Abbildung 54: Jahresmittel der Stickstoff-Deposition aus dem Niederschlag, 1994 bis 2001 in kg/ha, wet-only-Messungen

Tabelle 64: Jahresmittel der Konzentrationen im Niederschlag für 2001, weekly wet-only-Messnetz. $XSO_4^=$ = seesalzkorrigiertes Sulfat

| Stat. | Regen [mm] | pH-Wert | Leitf. [µS/cm] | $NH_4^+$ [mg/m²] | $Na^+$ [mg/m²] | $K^+$ [mg/m²] | $Ca^{++}$ [mg/m²] | $Mg^{++}$ [mg/m²] | $SO_4^=$ [mg/m²] | $XSO_4^=$ [mg/m²] | $NO_3^-$ [mg/m²] | $Cl^-$ [mg/m²] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BR | 1115.8 | 5.00 | 11.01 | 0.67 | 0.13 | 0.05 | 0.27 | 0.04 | 1.20 | 1.17 | 1.93 | 0.19 |
| DE | 837.8 | 4.88 | 11.93 | 0.49 | 0.26 | 0.05 | 0.19 | 0.05 | 1.26 | 1.20 | 1.47 | 0.45 |
| DU | 913.7 | 4.98 | 28.98 | 0.76 | 2.90 | 0.16 | 0.28 | 0.38 | 2.02 | 1.30 | 2.02 | 5.13 |
| FA | 416.9 | 4.77 | 20.70 | 1.61 | 0.25 | 0.21 | 0.26 | 0.08 | 2.09 | 2.03 | 2.93 | 0.44 |
| HI | 1262.9 | 4.70 | 16.33 | 0.72 | 0.45 | 0.06 | 0.16 | 0.07 | 1.66 | 1.55 | 2.08 | 0.74 |
| KL | 892.6 | 4.91 | 11.35 | 0.50 | 0.21 | 0.07 | 0.38 | 0.04 | 1.35 | 1.30 | 1.47 | 0.36 |
| LM | 900.7 | 4.80 | 15.92 | 1.06 | 0.24 | 0.12 | 0.24 | 0.05 | 1.76 | 1.70 | 2.37 | 0.39 |
| MP | 517.3 | 4.91 | 17.23 | 1.11 | 0.38 | 0.22 | 0.38 | 0.06 | 1.89 | 1.79 | 2.51 | 0.54 |
| NG | 520.2 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| RE | 563.3 | 4.88 | 13.46 | 0.77 | 0.18 | 0.05 | 0.28 | 0.04 | 1.45 | 1.40 | 2.23 | 0.31 |
| SC | 2213.9 | 4.99 | 8.15 | 0.34 | 0.17 | 0.04 | 0.13 | 0.03 | 0.92 | 0.87 | 1.00 | 0.22 |
| SG | 1097.9 | 4.70 | 16.40 | 0.74 | 0.44 | 0.09 | 0.16 | 0.07 | 1.65 | 1.54 | 2.13 | 0.75 |
| SM | 1409.0 | 4.70 | 14.26 | 0.63 | 0.22 | 0.05 | 0.18 | 0.03 | 1.39 | 1.34 | 2.07 | 0.34 |
| WA | 714.6 | 4.78 | 15.44 | 0.77 | 0.43 | 0.05 | 0.17 | 0.07 | 1.44 | 1.34 | 2.08 | 0.76 |
| WE | 636.7 | 4.76 | 38.50 | 0.57 | 4.52 | 0.18 | 0.30 | 0.57 | 2.43 | 1.30 | 1.93 | 7.82 |
| ZG | 543.7 | 4.81 | 18.52 | 0.80 | 0.88 | 0.08 | 0.34 | 0.14 | 1.83 | 1.61 | 2.46 | 1.50 |

* kein Wert wegen lokaler Beeinflussung

Tabelle 65: Jahresmittel der Depositionen im Niederschlag für 2001, weekly wet-only-Messnetz. $XSO_4^=$ = seesalzkorrigiertes Sulfat

| Stat. | Regen [mm] | $H^+$ [mg/m²] | $NH_4^+$ [mg/m²] | $Na^+$ [mg/m²] | $K^+$ [mg/m²] | $Ca^{++}$ [mg/m²] | $Mg^{++}$ [mg/m²] | $SO_4^=$ [mg/m²] | $XSO_4^=$ [mg/m²] | $NO_3^-$ [mg/m²] | $Cl^-$ [mg/m²] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BR | 1115.8 | 11.28 | 749.0 | 146.1 | 60.6 | 304.9 | 42.0 | 1340.4 | 1303.5 | 2153.6 | 208.1 |
| DE | 837.8 | 11.05 | 413.5 | 214.8 | 39.6 | 157.8 | 45.6 | 1058.8 | 1004.9 | 1231.6 | 373.1 |
| DU | 913.7 | 9.62 | 697.6 | 2650.6 | 145.2 | 252.9 | 342.7 | 1848.5 | 1183.3 | 1848.5 | 4689.7 |
| FA | 416.9 | 7.13 | 671.37 | 102.5 | 89.39 | 109.7 | 32.66 | 869.0 | 844.5 | 1220.6 | 185.0 |
| HI | 1262.9 | 25.26 | 911.5 | 565.3 | 79.7 | 195.5 | 90.7 | 2099.8 | 1956.1 | 2626.3 | 928.6 |
| KL | 892.6 | 11.06 | 445.0 | 184.1 | 63.3 | 340.0 | 34.5 | 1208.1 | 1161.0 | 1308.4 | 318.7 |
| LM | 900.7 | 14.34 | 957.5 | 214.8 | 109.3 | 215.9 | 47.3 | 1584.7 | 1529.3 | 2132.8 | 347.9 |
| MP | 517.3 | 6.39 | 572.3 | 194.0 | 111.87 | 195.9 | 31.4 | 975.2 | 927.0 | 1300.7 | 278.2 |
| NG | 520.2 | * | * | * | * | * | * | * | * | * | * |
| RE | 563.3 | 7.51 | 433.6 | 99.2 | 28.2 | 158.4 | 20.6 | 815.2 | 791.0 | 1255.7 | 174.1 |
| SC | 2213.9 | 22.63 | 745.8 | 368.4 | 85.3 | 291.6 | 63.2 | 2025.5 | 1929.4 | 2218.1 | 482.8 |
| SG | 1097.9 | 21.98 | 810.5 | 485.3 | 94.2 | 175.9 | 77.2 | 1812.4 | 1690.9 | 2335.9 | 821.2 |
| SM | 1409.0 | 27.92 | 894.0 | 308.8 | 67.5 | 254.0 | 46.6 | 1964.0 | 1885.7 | 2916.6 | 476.3 |
| WA | 714.6 | 11.94 | 547.0 | 305.1 | 32.0 | 123.6 | 49.7 | 1032.1 | 955.9 | 1483.2 | 545.1 |
| WE | 636.7 | 11.08 | 360.2 | 2876.6 | 111.4 | 191.4 | 364.7 | 1549.1 | 826.7 | 1226.5 | 4981.5 |
| ZG | 543.7 | 8.53 | 437.4 | 475.9 | 44.0 | 186.9 | 74.1 | 993.5 | 874.8 | 1336.5 | 816.4 |

* kein Wert wegen lokaler Beeinflussung

## 2.3 Meteorologischer Überblick 2001

Im Jahre 2001 entsprachen die Jahresmittel der Lufttemperaturen jenen Werten, die in dem Zeitraum seit 1982 (siehe Tabelle 69) am häufigsten vorkamen. So wurden z.B. in Westerland, Waldhof und Deuselbach Jahreswerte von 9 °C, auf den Bergstationen Brotjacklriegel und Schauinsland von 6 °C gemessen. Während die Monatsmittel der Lufttemperatur nur unbedeutend von den langjährigen Mitteln abwichen, traten deutlich niedrigere Temperaturen im September witterungsbedingt auf – besonders im süddeutschen Raum. Frostperioden in Verbindung mit niedrigen Mischungsschichthöhen, die zu erhöhter Schadstoffbelastung führten, traten zeitweise in den Monaten Januar bis einschließlich April sowie im November und Dezember auf, wobei im Dezember der strengste Frost zu beobachten war (siehe Tabelle 68). Frostverschärfend wirkte sich dabei einerseits das Vorhandensein von Schneedecken aus, die sich in den Wintermonaten mehrmals auch im Flachland gebildet hatten. Andererseits sanken die Temperaturen gerade in den klaren Nächten sehr stark, was wiederum die Bildung kräftiger Bodeninversionen zur Folge hatte. In diesen Fällen kam der Vertikalaustausch völlig zum Erliegen. Unter dem Einfluss von Hochdruckwetterlagen über Mitteleuropa, Südwest- und Südostlagen waren vor allem im Januar die höchsten Monatsmittel registriert worden, und zwar in erster Linie bei Schwefeldioxid und Staub. Wegen den vorherrschenden Nordwestlagen im November kamen dagegen aufgrund guten horizontalen und vertikalen Luftaustausches im Vergleich zu den anderen Wintermonaten keine hohen Monatsmittel bei $SO_2$ bzw. Staub zustande. Bei Stickstoffdioxid wirkte sich der Witterungseffekt nicht so deutlich aus, so dass an einigen Stationen ähnlich hohe Monatsmittel wie in den übrigen Wintermonaten auftraten. Wegen der besseren Durchmischungsverhältnisse im Sommerhalbjahr blieben die Konzentrationen der drei erwähnten Luftschadstoffe naturgemäß darunter.

Sonnige Tage mit sommerlichen Temperaturen, die eine deutliche Zunahme der Ozonkonzentrationen zur Folge hatten, gab es im April und Mai. Die wärmsten Perioden (hochsommerlich) traten im Juni örtlich, im Juli und August weiträumig auf (siehe Tabelle 67). In allen drei Monaten stiegen dabei die Ozonkonzentrationen teilweise weit über den Konzentrationswert (180 $\mu g/m^3$), ab dem die Öffentlichkeit informiert wird, an (siehe Kap. 3.2). Die Sommermonate waren charakterisiert durch ein häufiges Wechseln der Wetterlagen, so dass keine Smogepisoden von längerer Dauer entstehen konnten. Während im Juni deutlich mehr trübe Tage (Tagesmittel der Bewölkung $>80\%$) als heitere Tage ($<20\%$) auftraten, fiel in den anderen Sommermonaten das Verhältnis ausgeglichener aus.

Die Abbildung 55 spiegelt den mittleren Jahresgang der Temperatur an einer Küstenstation (Westerland), an einer im norddeutschen Binnentiefland gelegenen Station (Waldhof), an einer im Mittelgebirgsraum befindlichen Station (Deuselbach) und an zwei im höheren Bergland gelegenen Bergstationen (Brotjacklriegel und Schauinsland) wider. An allen Stationen ist der Januar der kälteste Monat, der August der wärmste (Ausnahme Waldhof im Juli). Zu Jahresbeginn (Januar und Februar) ist es zunächst an der Küste am wärmsten. Im Frühjahr schreitet dann die Erwärmung im Binnenland am raschesten fort, so dass ab März bis Juli die Kurve der Binnenlandstationen über der der Küstenstation verläuft. Im Herbst kühlt das Binnenland schneller ab als das Küstengebiet und so kehren sich die Verhältnisse wieder um. Anhand des Kurvenverlaufes der beiden Bergstationen sind die Auswirkungen ihrer unterschiedlichen geographischen Lage zu erkennen. In den Wintermonaten (November bis Februar) ist es an der stärker vom Ozean beeinflussten Station Schauinsland wärmer und im Sommer kühler als an der stärker kontinental beeinflussten Station Brotjacklriegel. Der Höhenunterschied zwischen beiden Stationen von etwa 200 m spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle.

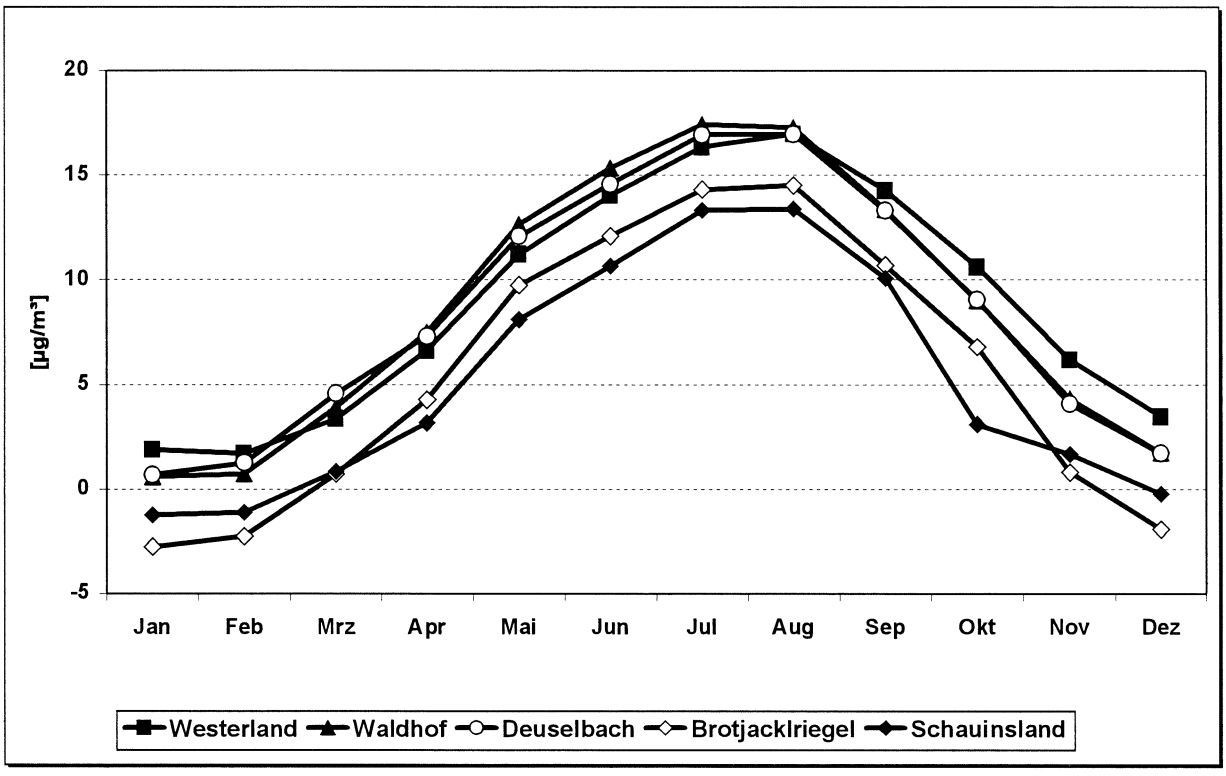



Abbildung 55: Mittlerer Jahresgang der Temperatur von 1974 bis 2001

Tabelle 66: Monats- und Jahresmittel der Temperatur für 2001 in °C

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jahr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 2 | 1 | 2 | 6 | 11 | 13 | 18 | 18 | - | 13 | 8 | 3 | 9 |
| ZG | 2 | 2 | 3 | 7 | 13 | 15 | 19 | 18 | 13 | 13 | 6 | 1 | 9 |
| HG | 3 | 2 | 2 | 6 | 10 | 13 | 17 | 18 | 14 | 14 | 9 | 4 | 9 |
| AU | 2 | 2 | 3 | 7 | 13 | 14 | 18 | 18 | 13 | 13 | 6 | 1 | 9 |
| UE | 1 | 2 | 3 | 8 | 14 | 15 | 20 | 19 | 13 | 12 | 5 | 0 | 9 |
| NG | 0 | 1 | 2 | 7 | 14 | 15 | 19 | 18 | 13 | 12 | 4 | 0 | 9 |
| SH | 0 | 1 | 2 | 7 | 14 | 14 | 19 | 19 | 13 | 12 | 4 | 0 | 9 |
| BA | 1 | 3 | 3 | 7 | 13 | 14 | 19 | 18 | 12 | 13 | 5 | 1 | 9 |
| WA | 0 | 2 | 3 | 8 | 14 | 14 | 19 | 19 | 12 | 12 | 5 | 0 | 9 |
| GI | 3 | 5 | 5 | 9 | 15 | 16 | 20 | 20 | 13 | 14 | 7 | 3 | 11 |
| FA | 1 | 2 | 3 | 8 | 15 | 15 | 20 | 20 | 13 | 13 | 4 | 0 | 10 |
| MP | 2 | 2 | 4 | 8 | 15 | 15 | 19 | 20 | 13 | 13 | 5 | 0 | 10 |
| LF | 0 | 2 | 3 | 7 | 14 | 14 | 18 | 19 | 11 | 12 | 5 | -1 | 9 |
| LM | -1 | 0 | 2 | 5 | 12 | 12 | 16 | 17 | 10 | 11 | 2 | -3 | 7 |
| LU | -2 | -1 | 1 | 6 | 13 | 13 | 17 | 17 | 10 | 11 | 1 | -4 | 7 |
| SM | -3 | -2 | 0 | 3 | 11 | 10 | 15 | 15 | 7 | 10 | 0 | -4 | 5 |
| RE | -2 | 1 | 3 | - | - | 13 | 17 | 18 | 10 | 12 | 2 | -3 | 7 |
| DE | 2 | 3 | 5 | 6 | 14 | 14 | 18 | 18 | 11 | 13 | 4 | 0 | 9 |
| AS | 0 | 2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | 8 | 16 | 15 | 19 | 20 | 12 | 13 | 3 | 0 | 12 |
| FB | -1 | 0 | 3 | 4 | 14 | 12 | 16 | 17 | 9 | 11 | 0 | -4 | 7 |
| BR | -2 | 0 | 2 | 4 | 13 | 11 | 16 | 16 | 8 | 11 | -1 | -4 | 6 |
| RS | - | - | - | - | - | - | 18 | 18 | 11 | 12 | 2 | -1 | - |
| SC | -1 | -1 | 3 | 2 | 11 | 11 | 14 | 15 | 7 | 11 | 0 | -4 | 6 |

Tabelle 67: Monatliche maximale Halbstundenwerte der Temperatur für 2001 in °C

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | 8 | 7 | 9 | 17 | 21 | 25 | 29 | 30 | - | 20 | 13 | 9 |
| ZG | 7 | 13 | 13 | 17 | 23 | 25 | 30 | 33 | 21 | 21 | 13 | 8 |
| HG | 8 | 8 | 10 | 17 | 17 | 22 | 26 | 27 | 18 | 19 | 13 | 10 |
| AU | 9 | 12 | 12 | 20 | 25 | 27 | 30 | 33 | 20 | 22 | 13 | 8 |
| UE | 9 | 13 | 14 | 26 | 26 | 27 | 31 | 35 | 21 | 21 | 12 | 8 |
| NG | 8 | 12 | 13 | 26 | 28 | 28 | 33 | 34 | 24 | 21 | 12 | 7 |
| SH | 9 | 14 | 15 | 21 | 27 | 27 | 31 | 34 | 22 | 21 | 12 | 8 |
| BA | 10 | 13 | 13 | 21 | 26 | 29 | 30 | 34 | 20 | 23 | 13 | 11 |
| WA | 10 | 15 | 15 | 25 | 28 | 31 | 32 | 35 | 21 | 24 | 12 | 8 |
| GI | 13 | 15 | 15 | 23 | 26 | 29 | 33 | 35 | 23 | 24 | 14 | 13 |
| FA | 11 | 12 | 15 | 25 | 28 | 29 | 32 | 34 | 21 | 22 | 11 | 8 |
| MP | 12 | 14 | 16 | 24 | 28 | 29 | 32 | 34 | 21 | 24 | 11 | 8 |
| LF | 10 | 14 | 13 | 22 | 25 | 27 | 30 | 33 | 19 | 23 | 10 | 7 |
| LM | 9 | 13 | 14 | 22 | 25 | 26 | 27 | 31 | 20 | 24 | 10 | 5 |
| LU | 6 | 9 | 13 | 23 | 25 | 27 | 28 | 29 | 19 | 22 | 8 | 2 |
| SM | 5 | 10 | 11 | 18 | 22 | 26 | 26 | 29 | 16 | 20 | 8 | 6 |
| RE | 9 | 13 | 12 | - | - | 31 | 30 | 32 | 18 | 22 | 10 | 7 |
| DE | 9 | 12 | 14 | 20 | 24 | 28 | 30 | 32 | 20 | 25 | 15 | 10 |
| AS | 8 | 14 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | 22 | 26 | 29 | 31 | 34 | 22 | 26 | 14 | 11 |
| FB | 11 | 13 | 15 | 21 | 22 | 27 | 28 | 28 | 18 | 22 | 10 | 7 |
| BR | 7 | 13 | 12 | 20 | 23 | 26 | 28 | 27 | 17 | 22 | 9 | 5 |
| RS | - | - | - | - | - | - | 33 | 31 | 22 | 26 | 14 | 10 |
| SC | 9 | 11 | 13 | 15 | 20 | 23 | 23 | 26 | 16 | 23 | 10 | 6 |

Tabelle 68: Monatliche minimale Halbstundenwerte der Temperatur für 2001 in °C

| Station | Jan | Feb | Mär | Apr | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| WE | -4 | -6 | -5 | 0 | 6 | 8 | 12 | 13 | - | 8 | 1 | -7 |
| ZG | -4 | -7 | -7 | -2 | 5 | 6 | 11 | 10 | 4 | 6 | -3 | -6 |
| HG | -2 | -5 | -3 | 1 | 6 | 8 | 11 | 13 | 10 | 9 | 4 | -3 |
| AU | -7 | -12 | -12 | -3 | 2 | 4 | 8 | 8 | 7 | 5 | -5 | -9 |
| UE | -5 | -12 | -6 | -2 | 4 | 5 | 11 | 9 | 7 | 1 | -3 | -10 |
| NG | -8 | -13 | -8 | -3 | 4 | 3 | 9 | 9 | 6 | 2 | -5 | -11 |
| SH | -10 | -14 | -10 | -3 | 2 | 1 | 6 | 6 | 6 | 4 | -7 | -13 |
| BA | -8 | -9 | -5 | -4 | 2 | 4 | 10 | 9 | 4 | 7 | -4 | -14 |
| WA | -9 | -14 | -6 | -3 | 1 | 0 | 7 | 5 | 1 | 3 | -6 | -12 |
| GI | -8 | -4 | -2 | -3 | 5 | 5 | 9 | 9 | 5 | 6 | -4 | -9 |
| FA | -8 | -12 | -7 | -1 | 4 | 5 | 9 | 9 | 6 | 5 | -4 | -12 |
| MP | -9 | -13 | -7 | -2 | 3 | 4 | 7 | 6 | 5 | 4 | -4 | -12 |
| LF | -10 | -9 | -5 | -3 | 3 | 5 | 9 | 8 | 2 | 5 | -2 | -12 |
| LM | -9 | -19 | -10 | -4 | 2 | 3 | 5 | 4 | 2 | 4 | -5 | -16 |
| LU | -8 | -13 | -7 | -4 | 4 | 5 | 8 | 7 | 5 | 4 | -6 | -16 |
| SM | -10 | -12 | -9 | -6 | 2 | 1 | 6 | 5 | 3 | 2 | -7 | -16 |
| RE | -10 | -13 | -6 | - | - | 4 | 9 | 7 | 5 | 5 | -5 | -15 |
| DE | -8 | -9 | -4 | -5 | 4 | 5 | 9 | 8 | 5 | 5 | -6 | -12 |
| AS | -9 | -8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| OE | - | - | - | -3 | 5 | 6 | 10 | 7 | 3 | 5 | -5 | -17 |
| FB | -9 | -11 | -5 | -5 | 3 | 2 | 7 | 6 | 3 | 2 | -7 | -18 |
| BR | -10 | -10 | -6 | -7 | 3 | 1 | 8 | 7 | 3 | 3 | -6 | -19 |
| RS | - | - | - | - | - | - | 7 | 6 | 0 | 1 | -5 | -18 |
| SC | -11 | -11 | -6 | -7 | 2 | 0 | 6 | 7 | 1 | 3 | -7 | -18 |

Tabelle 69: Jahresmittel der Temperatur für 1982 bis 2001 in °C

| Stat. | WE | ZG | HG | AU | HW | TE | UE | SW | NG | AN | SH | KY | BA | WA | WI | GI | LI | FA | DL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1982 | 9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 9 | - | - | - | - | - |
| 1983 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 9 | - | - | - | - | - |
| 1984 | 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 8 | - | - | - | - | - |
| 1985 | 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 8 | - | - | - | - | - |
| 1986 | 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 8 | - | - | - | - | - |
| 1987 | 7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 7 | - | - | - | - | - |
| 1988 | 10 | - | - | - | 9 | - | - | - | - | - | - | - | 9 | 9 | - | 10 | - | - | - |
| 1989 | 11 | - | - | - | 9 | - | - | - | - | - | - | - | 10 | 10 | - | 11 | - | - | - |
| 1990 | 10 | - | - | - | 9 | - | - | - | - | - | - | - | 10 | 10 | - | 11 | - | - | - |
| 1991 | 9 | - | - | - | 9 | - | - | - | - | - | - | - | 9 | 9 | - | 9 | - | - | - |
| 1992 | 10 | - | - | - | 10 | - | - | - | - | - | - | - | 9 | 10 | - | 11 | - | - | - |
| 1993 | 9 | 8 | - | - | 8 | - | - | - | - | - | - | - | 7 | 9 | - | 10 | - | - | - |
| 1994 | 10 | 9 | 8 | - | 9 | - | - | - | 12 | - | - | - | 8 | 10 | 9 | 10 | - | - | - |
| 1995 | 9 | 9 | 9 | - | 9 | - | - | - | 9 | - | - | - | 8 | 9 | 9 | 10 | - | - | - |
| 1996 | 7 | 7 | 7 | - | 7 | 7 | 8 | 7 | 7 | 7 | - | - | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | - | 7 |
| 1997 | 9 | 9 | 9 | - | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | - | - | 9 | 9 | 10 | 10 | 9 | - | 9 |
| 1998 | 9 | 9 | 9 | - | - | 11 | 9 | - | 9 | 10 | - | - | 9 | 9 | 10 | 10 | 12 | - | 12 |
| 1999 | 10 | 10 | 9 | 10 | - | - | 10 | - | 9 | - | 12 | - | 10 | 10 | - | 11 | - | 10 | - |
| 2000 | 10 | 10 | - | 10 | - | - | 10 | - | 10 | - | 10 | - | 10 | 10 | - | 12 | - | 10 | - |
| 2001 | 9 | 9 | 9 | 9 | - | - | 9 | - | 9 | - | 9 | - | 9 | 9 | - | 11 | - | 10 | - |

| Stat. | MP | LF | ME | HE | LM | LU | SM | SZ | RE | DE | AS | OE | BR | FB | RT | SC | MU | RS | ZU |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1982 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 9 | - | - | 7 | - | - | 6 | - | - | - |
| 1983 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 9 | - | - | 6 | - | - | 6 | - | - | - |
| 1984 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 5 | - | - | 5 | - | - | - |
| 1985 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 7 | - | - | 5 | - | - | 5 | - | - | - |
| 1986 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 8 | - | - | 6 | - | - | 5 | - | - | - |
| 1987 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 7 | - | - | 5 | - | - | 5 | - | - | - |
| 1988 | - | - | 8 | - | - | - | - | - | 7 | 10 | 9 | - | 6 | - | 10 | 6 | - | - | - |
| 1989 | - | - | 9 | 11 | - | - | - | - | 8 | 10 | 9 | - | 6 | - | 10 | 7 | - | - | - |
| 1990 | - | - | 9 | 9 | - | - | - | - | 8 | 10 | 9 | - | 6 | - | 10 | 6 | - | - | - |
| 1991 | - | - | 9 | 6 | - | - | 8 | - | 5 | 9 | 8 | - | 5 | - | 9 | 6 | - | - | - |
| 1992 | - | - | 10 | 7 | - | - | - | - | 8 | 9 | 9 | - | 6 | - | 10 | 6 | - | - | - |
| 1993 | 11 | - | 9 | 6 | - | - | - | - | 7 | 8 | 8 | - | 5 | - | 10 | 6 | - | - | - |
| 1994 | - | - | 10 | 7 | - | - | 9 | - | 7 | 10 | 10 | - | 6 | - | 11 | 6 | - | - | - |
| 1995 | - | - | 7 | 6 | - | - | 5 | - | 7 | 9 | 9 | - | 5 | - | 10 | 6 | 6 | - | - |
| 1996 | 7 | 7 | - | 4 | - | - | 3 | 6 | 6 | 7 | 5 | - | 4 | - | 8 | 5 | 5 | - | -5 |
| 1997 | 10 | 9 | 10 | 6 | - | - | 5 | 8 | 8 | 9 | 8 | - | 5 | - | 10 | 6 | 8 | - | -4 |
| 1998 | 10 | - | - | 6 | - | - | 5 | 9 | 8 | 9 | 9 | - | 6 | - | 10 | 6 | 8 | - | -4 |
| 1999 | 10 | 9 | - | - | 8 | 8 | 5 | - | 10 | 9 | 9 | - | 7 | - | - | 6 | - | - | -3 |
| 2000 | 11 | 9 | - | - | 7 | 8 | 6 | - | 9 | 10 | 10 | - | 7 | 8 | - | 7 | - | - | - |
| 2001 | 10 | 9 | - | - | 7 | 7 | 5 | - | 7 | 9 | - | 12 | 6 | 7 | - | 6 | - | - | - |

## 2.4 Literatur zu Kapitel 2

*(1) UBA (1998)*
*Emissionen nach Emittentengruppen in der ehemaligen DDR/den neuen Ländern 1970 bis 1995, Strogies, Umweltbundesamt II 6.4, Februar 1998*

*(2) UBA (2000)*
*Emissionsdaten für Deutschland 1990 bis 1999, Strogies, Umweltbundesamt II 6.4, Dez. 2000*

*(3) Abraham, J. et al, (2000)*
*Common Report on Air Quality in the Black Triangle Region 2000, Jelenia Gora, Polen, 2001, pp 41-44*

*(4) Beilke S. und M. Wallasch (2000)*
*Die Ozonbelastung in Deutschland nach 1990 und Prognose der zukünftigen Entwicklung. Immissionsschutz 4, 5. Jahrgang. Dezember 2000, S. 149-155.*

*(5) UBA Jahresbericht 1999, Berlin 2000*

*(6) Lutz, M. (2000)*
*Europäische Minderungsstrategie und Ozon-Tochterrichtlinie. Tagungsband: Symposium Troposphärisches Ozon, Braunschweig, 8.-10. Februar 2000, Schriftenreihe des KRdL im VDI und DIN, Band 32, S. 281-298*

*(7) EU (2000), EU-ENV/00/86, Brüssel*

*(8) UBA (1999)*
*Staub- und Feinstaubemissionen in Deutschland, Strogies, Umweltbundeamt II 6.4*

*(9) Fricke, W. and S. Beilke (1993)*
*Changing concentrations and deposition of sulfur and nitrogen compounds in Central Europe between 1980 and 1992. In: Proceedings Joint Workshop CEC/BIATEX of EUROTRAC, Aveiro, Portugal, May 4-7 1993, pp. 9-30. CEC Air Pollution Research Report 47, Editors: J. Slanina, G. Angeletti and S. Beilke*

*(10) Müller, J. (1986)*
*Invariant properties of atmospheric aerosol. J. Aerosol Science, Vol. 17, No. 3, pp. 277-282*

*(11) Jahresbericht 1998 aus dem Messnetz des UBA, UBA Texte 66/99, Langen, Okt. 1999*

*(12) Fricke et al. (1997)*
*Ergebnisse täglicher Niederschlagsanalysen in Deutschland von 1982 bis 1995, UBA-Texte, Berlin, 1997*

*(13) Wallasch, M., K. Uhse, E. Bieber and D. Kallweit (1997)*
*Precipitation analysis at German EMEP stations: Comparison between bulk and wet-only sampling. In: Proceddings EMEP-WMO Workshop on data analysis, validation and reporting, Usti nad Labem, Czech Republic, April 27-30, 1997, pp. 89-93. EMEP/CCC-Report 6/97, Editor: J. Schaug*

*(14) Uhse, K. (1997)*
*Influence of Periods without Rainfall on the Concentration Levels of Ions in Precipitation. In: Proceddings EMEP-WMO Workshop on data analysis, validation and reporting, Usti nad Labem, Czech Republic, April 27-30, 1997, pp. 89-93. EMEP/CCC-Report 6/97, Editor: J. Schaug*

*(15) Jahresbericht 1999 aus dem Messnetz des UBA, UBA Texte 58/00, S. 117-132, Langen, 12/2000*

# 3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME

## 3.1 Messungen von Feinstaub im Messnetz des Umweltbundesamtes

*S. Beilke, R. Berg, E. Bieber, K. Uhse und M. Wallasch*

### 3.1.1 Einleitung

Atmosphärische Aerosolteilchen umfassen einen Partikelgrößenbereich zwischen einigen Nanometern (1 nm = $10^{-9}$ m) bis hin zu einigen hundert Mikrometern (1$\mu$m = $10^{-6}$ m). Dieser Gesamtstaub kann in Feinstaub und Grobstaub unterteilt werden. Ausgehend von der Erkenntnis, dass vor allem kleine Staubteilchen (Feinstaub) ein hohes Schädigungspotential im Hinblick auf die menschliche Gesundheit aufweisen (Ref.1), steht die Belastung durch Feinstaub mit der Partikelgröße $PM_{10}$ und $PM_{2.5}$ (PM = Particulate Matter) in der Luft im Vordergrund nationaler und internationaler Luftreinhaltepolitik. Unter $PM_{10}$ bzw. $PM_{2.5}$ versteht man die Gesamtmasse aller Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 $\mu$m bzw. 2.5 $\mu$m ist.

Neuere Erkenntnisse über die Feinstaub-Wirkungen deuten darauf hin, dass ultrafeine Partikel (Durchmesser $<100$ nm = 0.1 $\mu$m), sog. Nanopartikel, als Schadstoffe aufzufassen sind, die weitgehend unabhängig vom sonstigen Feinstaub ($PM_{10}$, $PM_{2.5}$) wirken *(Ref. 1)*. Ein Teil der in Deutschland gemessenen Feinstaubmasse wird durch anthropogene und natürliche Quellen an der Erdoberfläche direkt in die Atmosphäre emittiert (sog. Primärpartikel, Radius $>0.1$ $\mu$m), ein anderer Teil wird im luftgetragenen Zustand aus Spurengasen wie z.B. NOx, $NH_3$, VOC und $SO_2$ gebildet (sog. Sekundärpartikel, Radius $<$ 1 $\mu$m, *Ref. 2*).

Die wichtigsten direkten anthropogenen Feinstaubemissionen werden bei Verbrennungsprozessen aus stationären und mobilen Quellen (Industrie, Haushalte, Verkehr) erzeugt. Die wichtigsten direkten natürlichen Quellen sind die Ozeane (ein Teil des Seesalzaerosols ist Feinstaub), biogene Quellen (Sporen, Pollen, Bakterien, Viren), Emissionen aus Böden sowie Vulkane (von geringerer Bedeutung in Deutschland). Entgegen früheren Annahmen wird neben dem Grobstaub auch ein erheblicher Teil von Feinstaub mit Teilchenradien größer als 0.1 $\mu$m hauptsächlich in Form löslicher mineralischer Substanzen aus Böden emittiert *(Ref. 3)*.

Im luftgetragenen Zustand können Feinstaubpartikel (Sekundärpartikel) durch Reaktionen von Gasen in wolkenfreier Luft (sog. gas to particle conversion, (GPC)) sowie durch chemische Reaktionen in Wolken und anschließende Verdampfung der Wolkentröpfchen gebildet werden. Die GPC führt zur Neubildung von Partikeln (Cluster bestehend aus wenigen Molekülen) und/oder zur Anlagerung dieser Cluster bzw. der gasförmigen Reaktionsprodukte von NOx, $NH_3$, VOC und $SO_2$ an das schon existierende Aerosol hauptsächlich im Größenbereich zwischen 0.1 – 1 $\mu$m Radius (größte Aerosoloberfläche). In der bodennahen Atmosphäre Mitteleuropas mit ihrem vergleichsweise hohen

Aerosolkonzentrationen lagern sich die Reaktionsprodukte dieser Spurengase in sehr kurzer Zeit überwiegend an das schon existierende Aerosol an, weshalb diese Reaktionsprodukte nur in unmittelbarer Nähe ihrer Quellen beobachtet werden können (siehe auch Kapitel 3.1.5 Herkunft des Feinstaubes). In der Regel ist die durch GPC-Prozesse neu gebildete Teilchenmasse gering, die Anzahl neu gebildeter Aerosolteilchen im Nanobereich aber erheblich (Abbildung 63 und Abbildung 64), wodurch die Anzahlverteilung der Aerosolteilchen in erheblichem Maße verändert werden kann *(Ref. 4)*.

Das Verdampfen nichtregnender Wolken ist global der wichtigste Prozess für die Bildung von sekundärem Feinstaub und die Hauptquelle des natürlichen Aerosols mit Radien größer 0.1 $\mu$m. In Deutschland ist der Beitrag dieses Prozesses sowie generell der Beitrag globaler außereuropäischer Aerosolquellen zum Feinstaubgehalt in Bodennähe wahrscheinlich vernachlässigbar gering, d.h. die Feinstaubbelastung an den UBA-Messstellen wird im Wesentlichen durch Emissionsquellen in Deutschland sowie in anderen europäischen Staaten verursacht.

Feinstaubteilchen werden durch trockene und nasse Deposition wieder aus der Atmosphäre entfernt. Die Wirksamkeit der verschiedenen Depositionsprozesse und damit auch die atmosphärische Aufenthaltsdauer dieser Partikel hängt stark von der Teilchengröße ab, wie dies beispielhaft in Abbildung 1 für ein Aerosol für zwei unterschiedliche Höhen (untere und obere Troposphäre) dargestellt ist *(Ref. 5)*. Die Teilchengröße wird als sog. aerodynamischer Durchmesser angegeben. Der aerodynamische Durchmesser entspricht dem Durchmesser, den ein kugelförmiges Partikel mit der Dichte 1 g/cm$^3$ haben müsste, damit es die gleiche Sinkgeschwindigkeit aufweisen würde wie ein Teilchen anderer Form und Dichte.

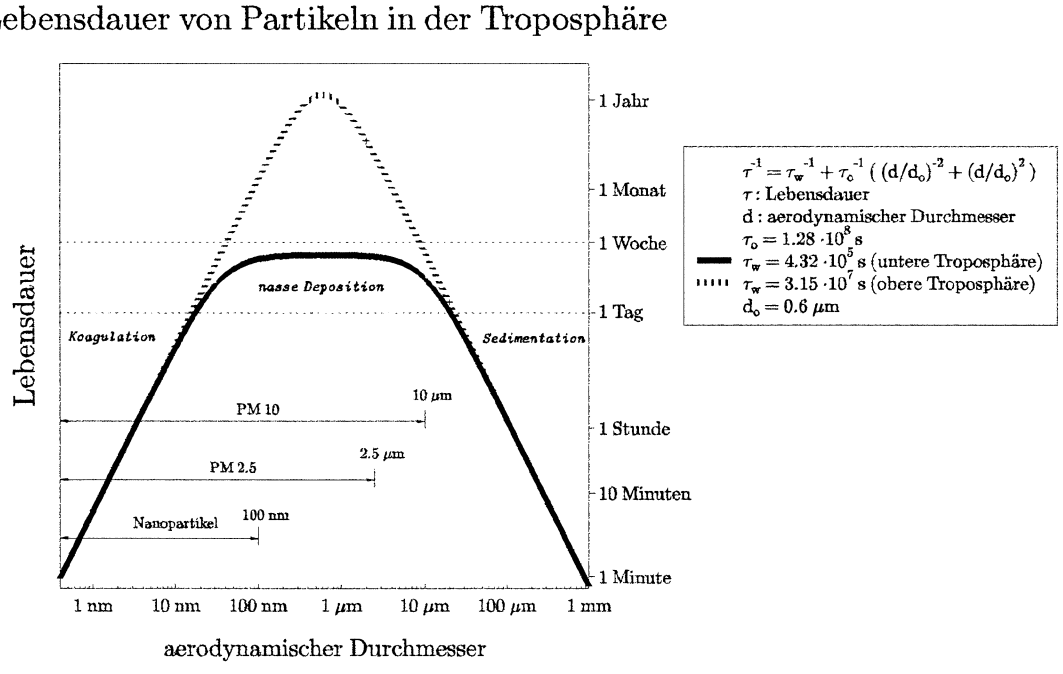



Abbildung 56: Lebensdauer von Partikeln in der Troposphäre in Abhängigkeit von der Partikelgröße *(nach Jaenicke, Ref. 5)*

Wie die Abbildung 56 zeigt, ist die atmosphärische Lebensdauer im Bereich sehr kleiner und sehr großer Teilchen kurz. Die sehr kleinen Teilchen können aufgrund ihrer hohen diffusiven

Eigenbeweglichkeit miteinander koagulieren, die sehr großen Partikel sedimentieren sehr rasch aufgrund der Erdanziehung. Beide Prozesse sind dagegen im dazwischen liegenden Größenbereich zwischen 0.1 - 5 $\mu$m Partikeldurchmesser wenig wirkungsvoll. Die Beseitigung durch die Sedimentation spielt also für den Feinstaub nur eine untergeordnete Rolle.

Im Bereich der Partikelgrößen zwischen etwa 0.1 - 5 $\mu$m Durchmesser liegt die Hauptmasse des Feinstaubes. In diesem Bereich, vor allem zwischen 0.1 und 1 $\mu$m, ist die Deposition durch Niederschläge die wirkungsvollste Senke. Die Lebensdauer der Teilchen in diesem Größenbereich beträgt in der bodennahen Atmosphäre bis zu 10 Tagen. Das bedeutet, dass diese Partikel und damit auch die Hauptmasse des Feinstaubes für $PM_{10}$ und $PM_{2,.5}$ eine sehr stabile Komponente des atmosphärischen Aerosols darstellen. Der Feinstaub unterliegt damit in hohem Maße dem Ferntransport wie beispielsweise Episoden mit hohen Saharastaubkonzentration auf den Kanarischen Inseln und abgeschwächt auch in Deutschland und sogar auf karibischen Inseln eindrucksvoll gezeigt haben.

Die Abbildung zeigt weiter die ständige Anwesenheit sehr kleiner Teilchen (sog. Nanopartikel) mit Partikeldurchmessern kleiner als 0.1 $\mu$m (entspricht 100 nm) bis hin zu winzigen Teilchen mit Durchmessern von wenigen Nanometern. Die Existenz dieser sehr kurzlebigen winzigen Teilchen fernab von Städten und Ballungsgebieten (in Städten werden Nanopartikel durch Verbrennungsprozesse z.T. direkt in die Atmosphäre emittiert) ist nur möglich bei ständiger Produktion dieser Partikel aus Gasen wie beispielsweise $SO_2$, NOx, $NH_3$ und VOC innerhalb der Atmosphäre.

Messungen von luftgetragenen Aerosolteilchen waren im Rahmen der Luftreinhaltung bis 1999 auf den Gesamtschwebstaub (TSP = total suspended particulate matter) bezogen. Aufgrund neuer epidemiologischer Untersuchungen (Ref. 6), die zeigen, dass insbesondere feinere Stäube mit gesundheitlichen Effekten korrelieren, wurden neue Definitionen und Grenzwerte für Schwebstaub eingeführt. Die in Europa am 22. April 1999 erlassene Richtlinie des europäischen Rates über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (1999/30/EG) setzt neue Standards in Bezug auf luftgetragene $PM_{10}$-Partikel (Tabelle 70). Diese Tochterrichtlinie zur Luftqualitätsrahmenrichtlinie der EU (1999/30/EG) trat im Juli 1999 in Kraft. Sie wurde von den Mitgliedsstaaten im Juli 2001 in nationales Recht umgesetzt.

Tabelle 70: Anforderungen der 1.Tochterrichtlinie 1999/30/EG für Partikel ($PM_{10}$) in der Luft *(Ref. 1)*.

| | **Mittelungs-zeitraum** | **Grenzwert** | **Zeitpunkt, bis zu dem der Grenzwert zu erreichen ist** |
|---|---|---|---|
| <u>**Stufe 1**</u><br>**24-Stundengrenzwert** für den Schutz der menschliche Gesundheit<br>**Jahresgrenzwert** für den Schutz der menschliche Gesundheit | <br>24 Stunden<br><br>Kalenderjahr | **50 $\mu$g/m³** $PM_{10}$ dürfen nicht öfter als 35 mal/Jahr überschritten werden<br>**40 $\mu$g/m³** $PM_{10}$ | 1. Januar 2005 |
| <u>**Stufe 2**</u><br>**24-Stundengrenzwert** für den Schutz der menschliche Gesundheit<br>**Jahresgrenzwert** für den Schutz der menschliche Gesundheit | <br>24 Stunden<br><br>Kalenderjahr | **50 $\mu$g/m³** $PM_{10}$ dürfen nicht öfter als 7 mal/Jahr überschritten werden<br>**20 $\mu$g/m³** $PM_{10}$ | 1 Januar 2010 |

## 3.1.2 Messungen von Feinstaub im Messnetz des UBA

### 3.1.2.1 Grundlagen

Im UBA-Messnetz sowie in der UBA-Pilotstation werden folgende Staubmessungen durchgeführt (Tabelle 71):

Tabelle 71: Staubmessungen im Messnetz des UBA

| Komponente | Sammel-Methode | Mess-Methode | Anzahl Stat. | Mess-intervall |
|---|---|---|---|---|
| **Gesamtstaub/$PM_{10}$** | Kontinuierl. Ansaugung | Beta-Absorption | 21 | Halbstunde |
| **Gesamtstaub/$PM_{10}$** | High-Volume Sampler | Gravimetrisch | 8 | Tag |
| **$PM_{2.5}$** | High-Volume Sampler | Gravimetrisch | 3 | Tag |
| **$SO_4^=$ im Staub** | Filterpack/Imprägnierte Fil. | Ionenchromatographie | 5 | Tag |
| **$HNO_3+NO_3^-$ in Gas/Staub** | Filterpack/Imprägnierte Fil. | Ionenchromatographie | 5 | Tag |
| **$NH_3+NH_4^+$ in Gas/Staub** | Filterpack/Imprägnierte Fil. | Fließinjektionsanalyse | 5 | Tag |
| **Schwermetalle im Staub** | High-Volume Sampler | ICP/MS | 8 | Monat |
| **Partikelgrößenverteilung von Nanopartikeln (8-250 nm Durchmesser)** | Online-Sampler | SMPS | 1 | > 3 Minuten |

Die Messung der Partikel erfolgt entweder durch Angabe der Masse oder durch die Bestimmung der Anzahl. Während die Partikelanzahl hauptsächlich von den ultrafeinen Nanopartikeln (< 100 nm Durchmesser) dominiert wird, wird die Partikelmasse durch die Teilchen oberhalb von 100 nm bestimmt. Im Messnetz des Umweltbundesamtes wurde bisher fast ausschließlich die Masse von Grob -und Feinstaub zusammen als TSP gemessen, seit 1999 auch die des Feinstaubes. Seit 2000 wird vom UBA auch die Anzahl der Partikel im Größenbereich zwischen 8 und 250 nm Teilchendurchmesser (im Wesentlichen Nanopartikel) gemessen, wenn auch bisher mehr orientierend.

Im Messnetz des Umweltbundesamtes wird der Gesamtschwebstaub (Tagesproben) teilweise schon seit Ende der 1960er Jahre an den Stationen, Neuglobsow, Waldhof, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland gemessen, seit Anfang der 80er Jahre auch in Westerland und Schmücke und seit 1992 in Zingst. Ab Beginn der 90er Jahre werden neben den Tagesproben auch kontinuierliche Messungen des Schwebstaubes durchgeführt. An den oben genannten personell besetzten Messstellen wurde ab 1999 von der täglichen Gesamtstaubmessung auf die Bestimmung der Partikelmasse für Teilchen unterhalb von 10 $\mu$m Durchmesser ($PM_{10}$) umgestellt. Nur in Waldhof wird die Gesamtstaubmessung parallel seit 1999 weitergeführt und seit 1999 neben $PM_{10}$ auch die Partikelmasse für Teilchen unterhalb von 2.5 $\mu$m Durchmesser ($PM_{2.5}$) bestimmt. In Deuselbach und Schauinsland werden $PM_{2.5}$-Messungen seit 2000 durchgeführt.

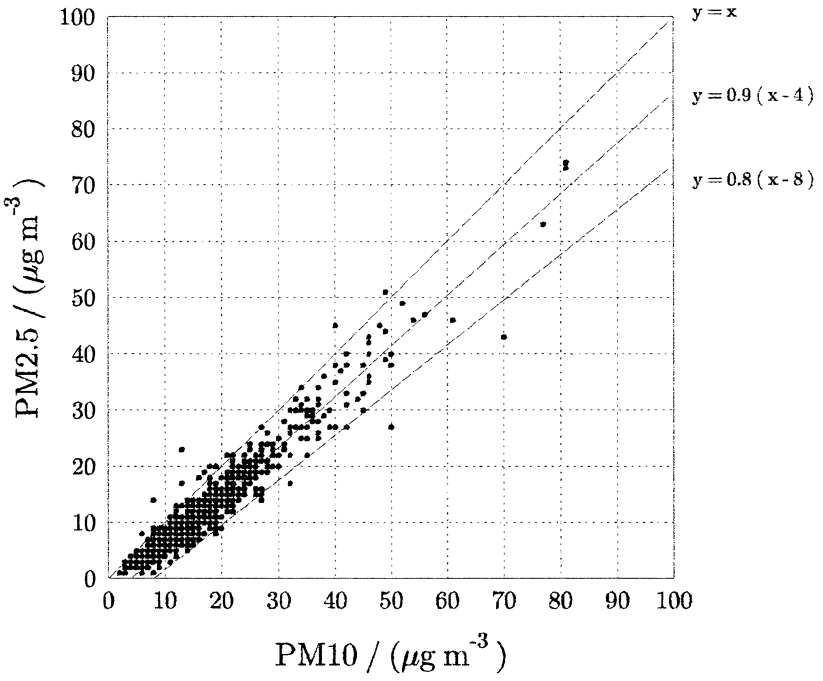



Abbildung 57: Korrelation der Tagesmittel von $PM_{10}$ und $PM_{2.5}$ in Waldhof für März 1999 bis Dezember 2001

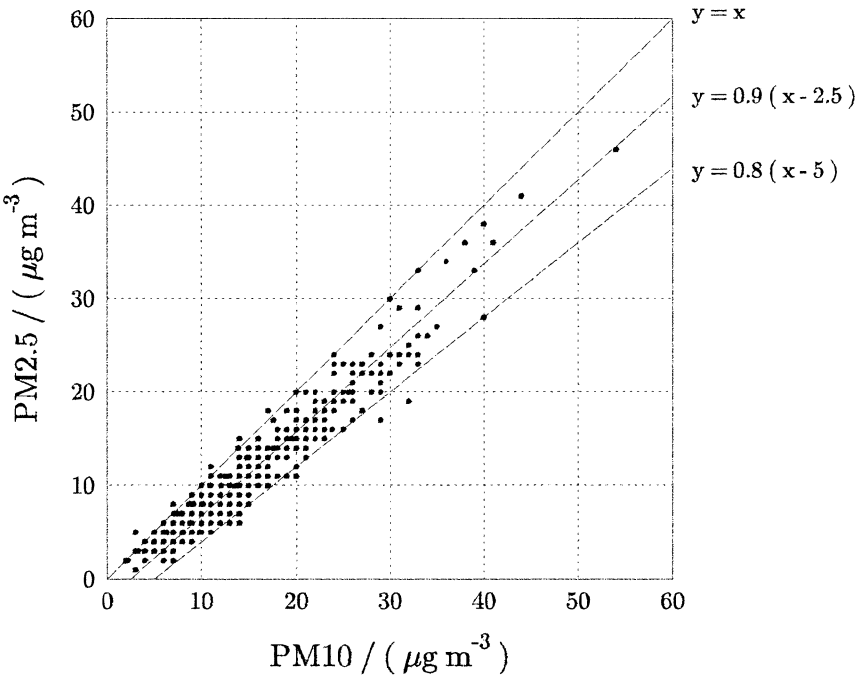



Abbildung 58: Korrelation der Tagesmittel von $PM_{10}$ und $PM_{2.5}$ in Deuselbach für Juli 2000 bis Dezember 2001

Abbildung 57 und Abbildung 58 zeigen beispielhaft die Ergebnisse des $PM_{2.5}$- $PM_{10}$-Staubvergleichs für Waldhof (1999-2001) und Deuselbach (2000-2001). Die über alle Messpunkte gemittelten Regressionsgeraden können durch folgende Gleichungen beschrieben werden (Konzentrationen in $\mu g/m^3$) :

Waldhof $PM_{2.5} = 0.9 (PM_{10} - 4 )$
Deuselbach: $PM_{2.5} = 0.9 ( PM_{10} - 2.5)$
Schauinsland: $PM_{2.5} = 0.9 ( PM_{10} - 2 )$

Wegen des Offsets von 2 $\mu g/m^3$ bis 4 $\mu g/m^3$ macht die Angabe eines mittleren Verhältnisses $PM_{2.5}/PM_{10}$ für die UBA-Stationen streng genommen keinen Sinn . Auf die Berechnung mittlerer Faktoren für die Umrechnung von $PM_{10}$ in $PM_{2.5}$ sollte deshalb verzichtet werden. Der Massenanteil von $PM_{2,5}$ an $PM_{10}$ hängt außerdem von der Lage der Stationen ab. So weisen die höher gelegenen Stationen in der Regel höhere $PM_{2.5}$-Anteile auf als die tiefer gelegenen Stationen.

Seit 2000 wird mit einem hochauflösenden Teilchenzahlmessgerät (SMPS: Scanning Mobility Particle Sizer) auch die Partikelgrößenverteilung von Teilchen mit Durchmessern zwischen 8 und 250 nm gemessen. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um ultrafeine Nanopartikel (d $<$ 100 nm), die in Stadtluft hauptsächlich durch Verbrennungsprozesse (Verkehr und Feuerungen) erzeugt werden. An den in ländlichen Gebieten gelegenen UBA-Stationen werden Nanopartikel dagegen hauptsächlich durch die Kondensation der gasförmigen Reaktionsprodukte von NOx, $NH_3$, $SO_2$ und VOC gebildet.

## 3.1.2.2 Messergebnisse

### 3.1.2.2.1 Massenkonzentrationen und Teilchenanzahlen

Abbildung 59 zeigt die Jahresmittel des Gesamtschwebstaubes an 7 von 8 personell besetzten UBA-Messstellen (Westerland wurde wegen des hohen Seesalzanteils herausgenommen) zwischen 1974 und 2001 (Digitel Tagesproben, ab 1999 $PM_{10}$). Die gestrichelten Kurven grenzen den Bereich zwischen den höchsten (Waldhof) und niedrigsten Konzentrationen (Schauinsland) ein. Die Gesamtstaubkonzentrationen in ländlichen Gebieten Deutschlands abseits von städtischen Ballungsgebieten sollten innerhalb des durch beide Kurven definierten Bereichs liegen.

Die niedrigsten Staubkonzentrationen treten erwartungsgemäß an den Bergstationen Schauinsland (1205 m), Brotjacklriegel (1016 m) und Schmücke (937 m) auf. Man erkennt einen deutlichen Rückgang der Jahresmittel nach 1985 an den Stationen in den alten Ländern und seit 1990 an allen Stationen hervorgerufen vor allem durch die drastische Senkung der Staubemissionen in Deutschland.

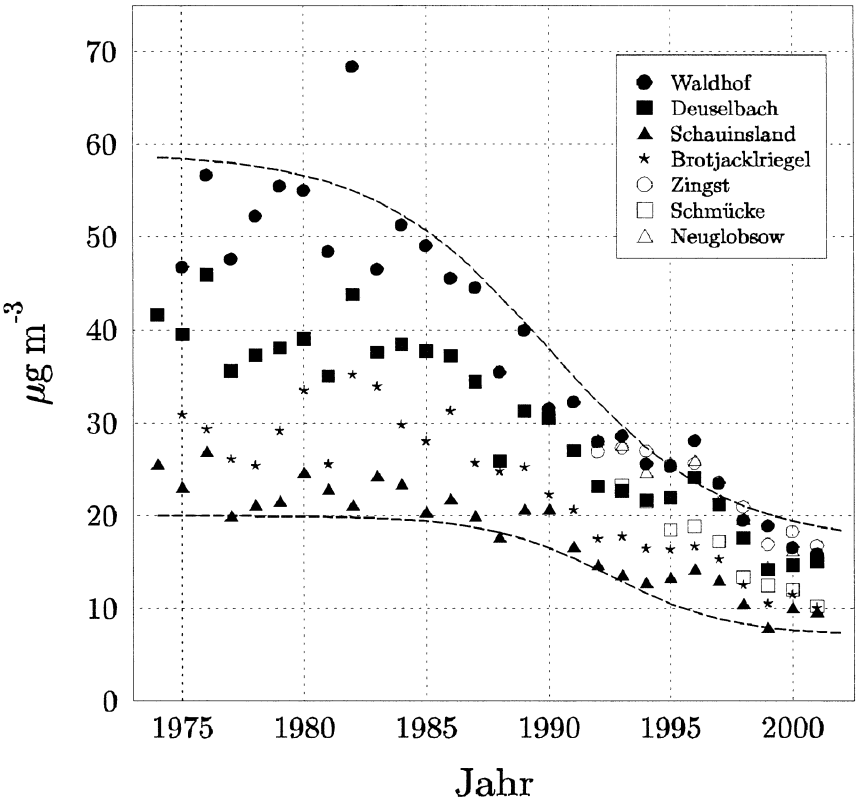



Abbildung 59: Jahresmittel des Gesamtschwebstaubs zwischen 1974 und 2001 an 7 UBA-Stationen

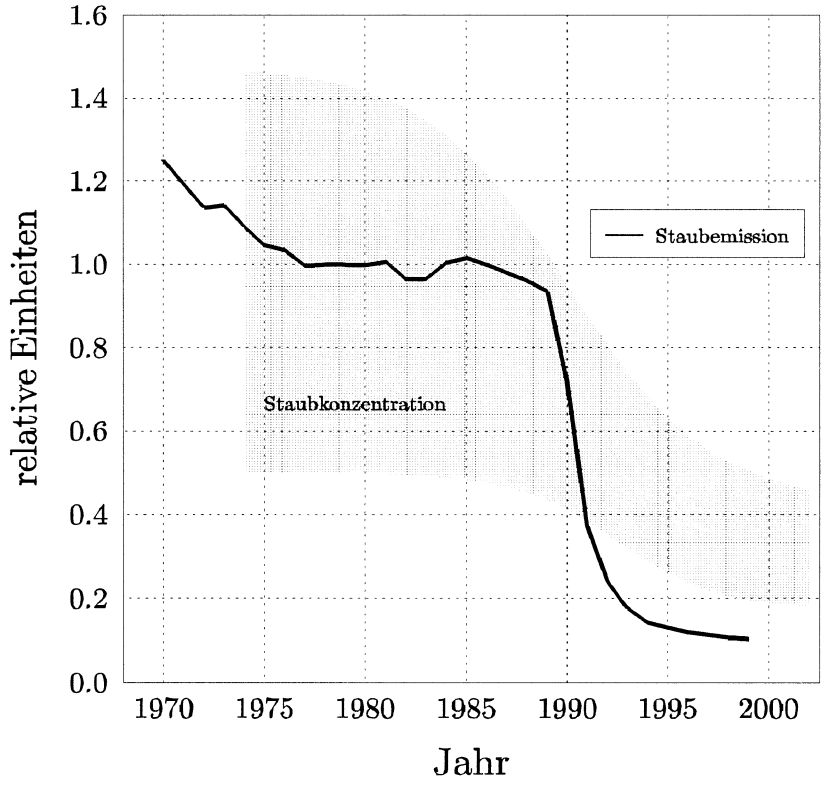



Abbildung 60: Bereich der Staubkonzentrationen von 1974 bis 2001 im Messnetz des UBA, normiert auf das Jahr 1977 (schraffiert), Kurve: normierter Verlauf der Staubemissionen in Deuschland

Abbildung 60 zeigt den in Abbildung 59 dargestellten Bereich der Staubkonzentrationen von 1974 bis 2001 (schraffierte Fläche) normiert auf das Jahr 1977. Mit eingezeichnet ist der ebenfalls auf das Jahr 1977 normierte Verlauf der Staubemissionen in Deutschland (Ost und West) bis einschließlich 1999 (vorläufige Werte für 1998 und 1999). Man erkennt, dass der Abfall der Staubkonzentrationen nach 1988 wesentlich langsamer erfolgt ist als der starke Rückgang der Emissionen in Deutschland.

Als Folge der drastischen Reduzierung der Staub (Feinstaub)-Emissionen in Deutschland werden die Feinstaub-Massenkonzentrationen in den kommenden Jahren nur noch sehr langsam abnehmen, da sie in zunehmenden Maße durch die Beiträge des Ferntransportes (vor allem von sekundären Aerosolen) und der natürlichen Emissionen bestimmt werden.

In Abbildung 61 sind mittlere Jahresgänge für die Stationen Neuglobsow, Waldhof, Schmücke, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland für den Zeitraum zwischen 1995 und 2001 dargestellt. Die höchsten Schwebstaubkonzentrationen traten an den Flachland-stationen Neuglobsow und Waldhof im Winter auf, auf dem Schauinsland dagegen im Sommer. Das winterliche Maximum an den Flachlandstationen dürfte im Wesentlichen auf die niedrigen winterlichen Mischungsschichthöhen zurückzuführen sein. Der Grund für das Sommermaximum am Schauinsland und den anderen Bergstationen liegt darin, dass diese Stationen im Sommer sehr häufig innerhalb der mit Partikeln angereicherten Mischungs-schicht, im Winter dagegen oft oberhalb der Mischungsschicht in der freien Troposphäre liegen *(siehe auch Messnetz-Jahresbericht 1998, S.73)*.

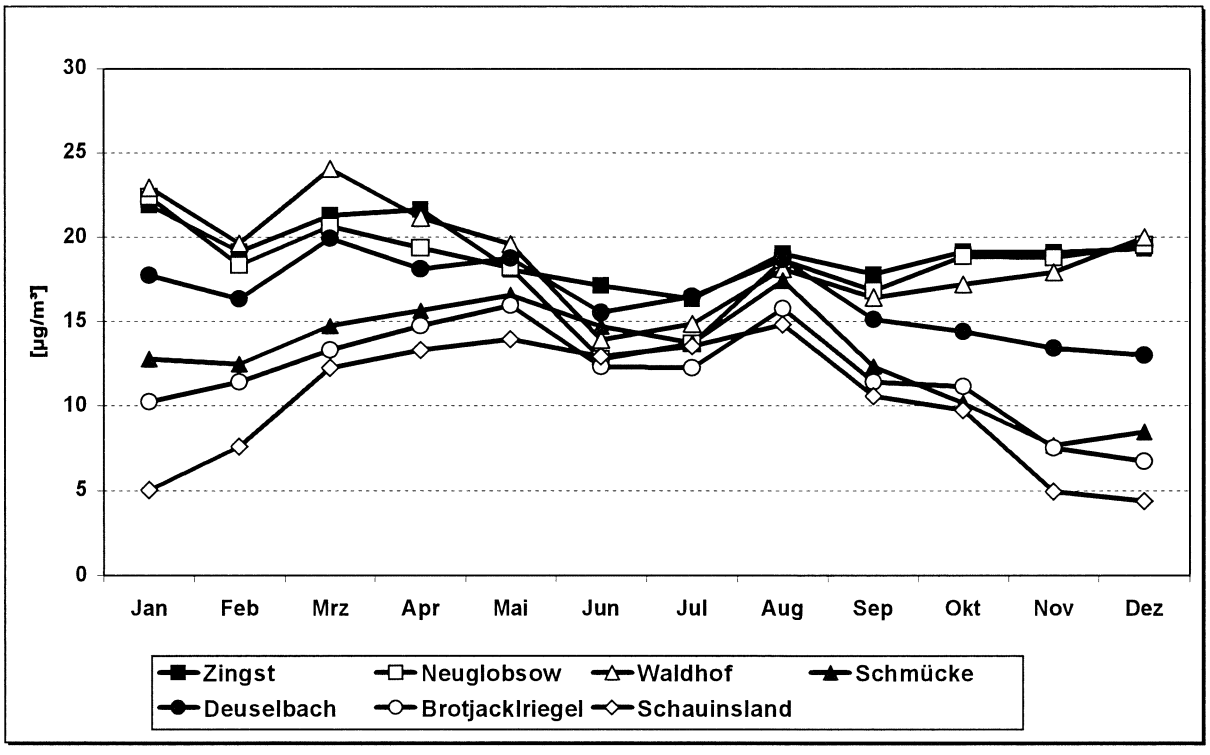



Abbildung 61: Mittlere Jahregänge für $PM_{10}$ berechnet für 1995 bis 2001. Die Werte von 1995 bis 1998 wurden von Gesamtschwebstaub umgerechnet

Erste, mehr orientierende Messungen der Korngrößenverteilung von ultrafeinen Partikeln mit Teilchendurchmessern zwischen 8 und 250 nm wurden in unterschiedlich mit Luftverunreinigungen belasteten Gebieten durchgeführt. Aufgrund dieser orientierenden Messungen sowie Literaturveröffentlichungen *(Ref. 7)* können folgende Anzahlkonzentrationen für Gebiete mit unterschiedlicher Luftqualität angegeben werden (Tabelle 72):

Tabelle 72: Anzahlkonzentrationen ultrafeiner Partikel (8 - 250 nm) in Gebieten mit unterschiedlicher Luftqualität *(Quelle: UBA sowie Ref. 7)*.

| **Standort** | **Partikelzahl pro cm³ Luft** |
|---|---|
| Großstadt Frankfurt/Main-City | 100 000 - 200 000 |
| Kleinstadt Langen | 50 000 - 100 000 |
| Mittelgebirge Kl. Feldberg (Taunus, 820 m ü.N.) | 10 000 - 50 000 |
| Schauinsland (Schwarzwald, 1205 m ü. N.) | 5 000 - 10 000 |
| Maritime Reinluft (Nordatlantik) | 100 - 1 000 |

Die Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen den mittleren Tagesgang verschiedener Größenklassen in Außenluft am UBA-Dienstgebäude Langen sowie die Anzahlgrößenverteilungen der ultrafeinen Partikel (8-250 nm) (Mittelwert über einen Messzeitraum von 49 Tagen zwischen August 2000 und Januar 2001). Abbildung 64 zeigt zum Vergleich die Anzahlgrößenverteilung der Nanopartikel gemessen auf dem Kleinen Feldberg/Taunus (820 m. ü. N.).

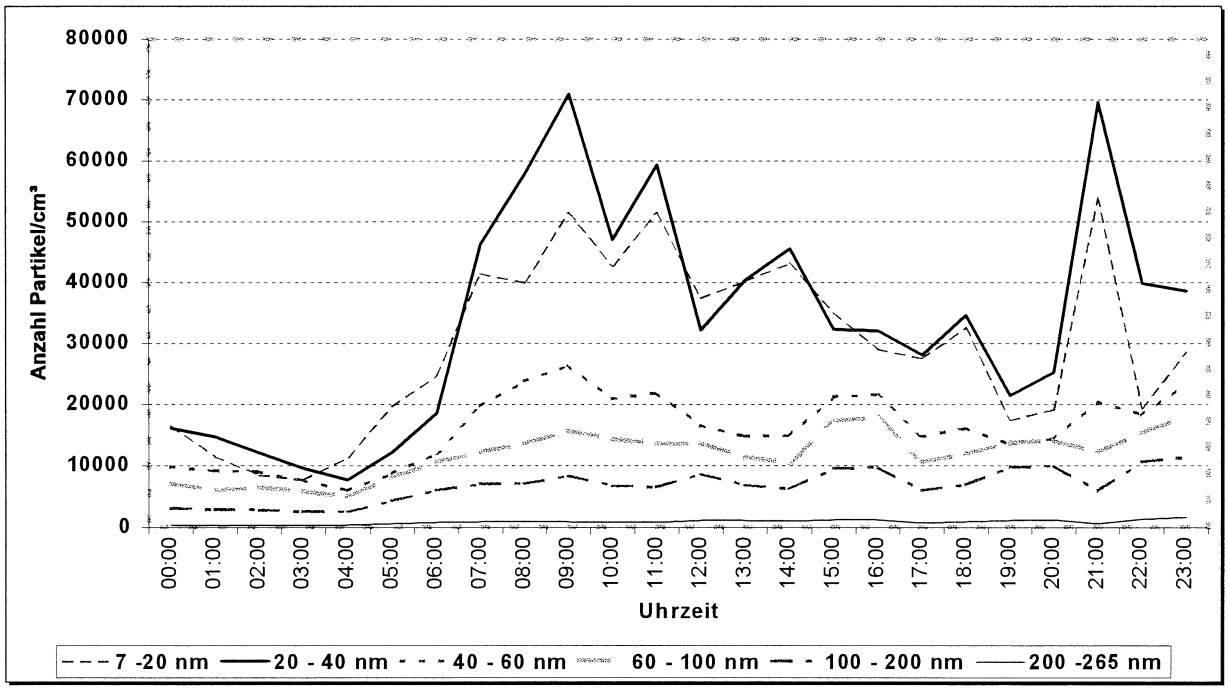



Abbildung 62: Mittlerer Tagesgang verschiedener Größenklassen von ultrafeinen Partikeln (8-250 nm) in der Außenluft am UBA-Dienstgebäude in Langen

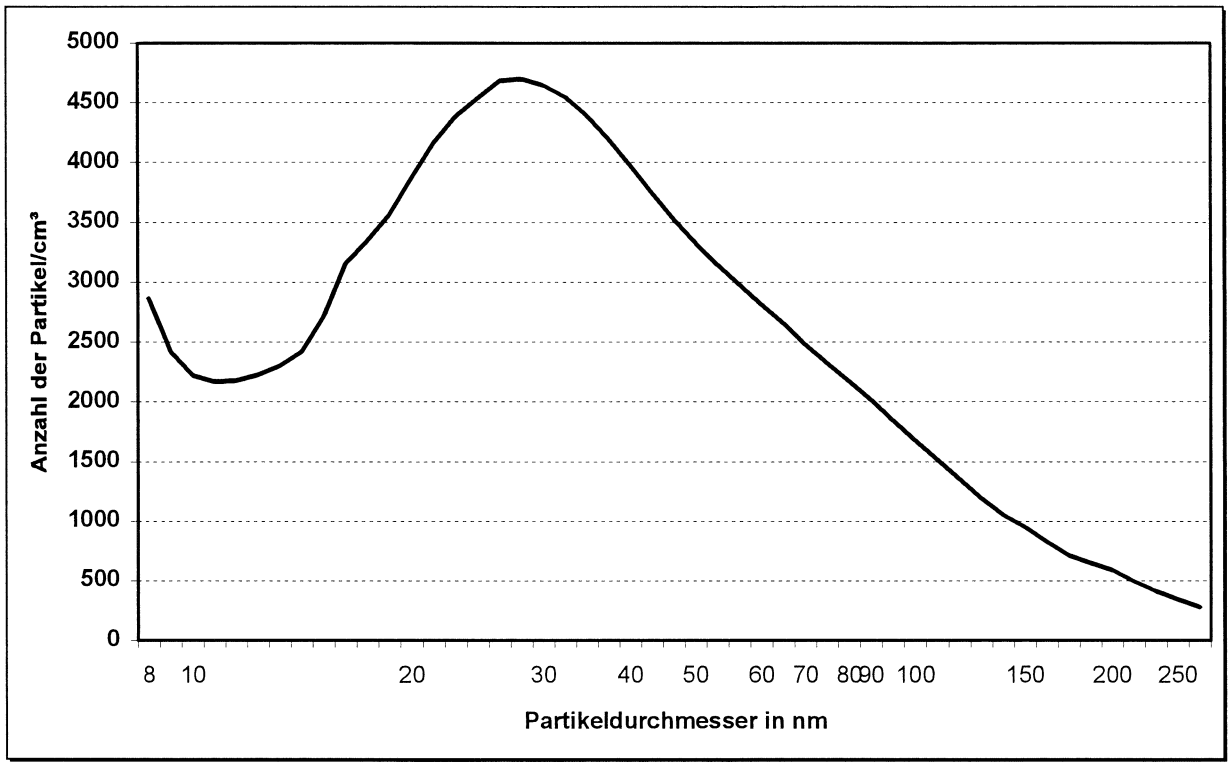



Abbildung 63: Anzahl-Größen-Verteilungen der ultrafeinen Partikel (8-250 nm) in der Außenluft am UBA-Dienstgebäude in Langen (Mittelwert über einen Messzeitraum von 49 Tagen zwischen August 2000 und Januar 2001).

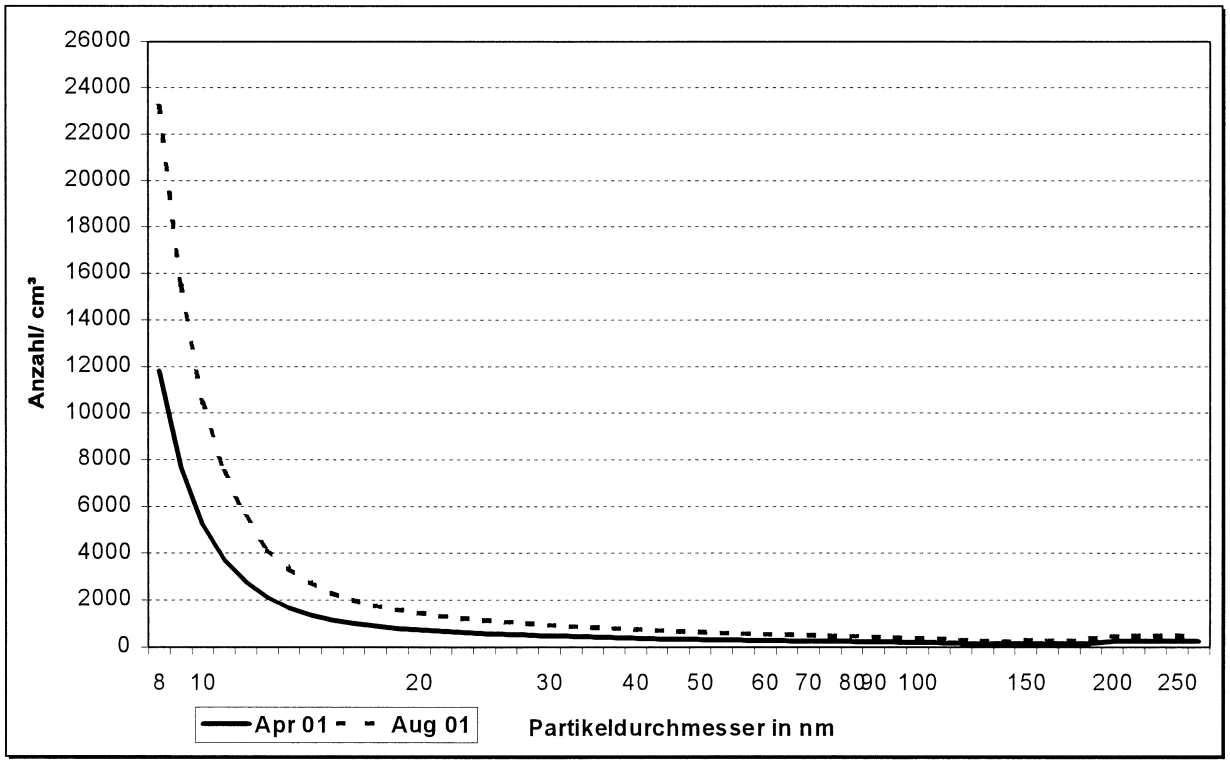



Abbildung 64: Anzahl-Größen-Verteilung der Nanopartikel auf dem Kleinen Feldberg/ Taunus (820 m ü. NN)

Während auf dem Kleinen Feldberg die maximale Anzahl der Nanopartikel bei sehr kleinen Teilchendurchmessern (< 10 nm) auftritt (Abbildung 64), werden in Langen Maxima der Anzahldichte sowohl bei den sehr kleinen Teilchen (< 10 nm) als auch bei Teilchengrößen zwischen 20 und 40 nm beobachtet (Abbildung 62 und Abbildung 63). Das sekundäre Maximum bei ca. 30 nm in Langen ist sehr wahrscheinlich auf die Emissionen von Rußpartikeln aus Verbrennungsprozessen (Autoverkehr) zurückzuführen, während das Maximum unterhalb von 10 nm sehr wahrscheinlich aus Partikelneubildung aus Gasen resultiert (GPC). Eine solche Verteilung wurde auch in Städten beobachtet. Entsprechend den Verkehrsspitzen traten die Maxima in Langen morgens zwischen 8:00 und 9:00 Uhr sowie abends zwischen 21:00 und 22:00 Uhr auf (Schichtwechsel bei der Flugsicherung?)

Die Anzahl der Nanopartikel auf dem Kleinen Feldberg ist deutlich geringer als in Langen und Frankfurt/Main, da am Messort kaum Verbrennungsquellen vorhanden sind, die in beiden Städten für das sekundäre Maximum im Größenbereich zwischen 20 und 40 nm verantwortlich sind. Hinzu kommt, dass die Konzentrationen der Vorläufergase auf dem Kleinen Feldberg geringer sind als in Langen und Frankfurt.

Die auf dem Kleinen Feldberg vor allem bei den sehr kleinen Nanopartikeln beobachteten höheren Teilchenzahlen im August gegenüber April 2001 (Abbildung 64) sind wahrscheinlich auf eine erhöhte photochemischer Aktivität und damit eine stärkere Teilchenbildung aus Gasen (GPC) im August gegenüber April zurückzuführen. Hinzu kommt, dass der Kleine Feldberg im August öfter als im April innerhalb der mit Luftschadstoffen angereicherten Mischungsschicht liegt. Demgegenüber dürfte der direkte Transport von Nanopartikeln aus dem Frankfurter Ballungsraum wegen der extrem kurzen Lebensdauer dieser winzigen Teilchen kaum eine Rolle für die im August beobachteten höheren Konzentrationen spielen.

Wegen der wenigen, bisher mehr episodenhaft durchgeführten Messungen von Nanopartikeln können - im Gegensatz zu dem abnehmenden Trend der Feinstaub-Massenkonzentrationen - noch keine generellen Aussagen über einen Trend der Anzahlkonzentrationen in Deutschland gemacht werden. Erste Messungen in den Wintermonaten zwischen 1991 und 1999 in Erfurt haben ergeben, dass die von den Nanopartikeln dominierten Partikelzahlen praktisch gleichgeblieben bzw. sogar angestiegen sind, während die Partikelmasse (als $PM_{10}$ oder $PM_{2.5}$ gemessen) deutlich abgenommen hat *(Ref. 8)*

#### 3.1.2.2.2 Messung von Staubinhaltsstoffen im Messnetz des Umweltbundesamtes:

Im Messnetz des Umweltbundesamtes werden die anorganischen Feinstaubinhaltsstoffe Sulfat-S, Nitrat-N, Ammonium-N sowie eine Reihe von Metallen bestimmt.

Wie Abbildung 65 zeigt, hat der Massenanteil der im UBA-Messnetz analysierten anorganischen Staubinhaltsstoffe (Sulfat, Nitrat, Chlorid, Ammonium, Kalzium, Natrium, Kalium) zwischen 1990 und 1999 von etwa 50% auf etwa 35% abgenommen, der nicht analysierte organische Anteil sollte entsprechend zugenommen haben (von 50% auf ca. 65%). Neben der erheblichen Streuung der monatlichen anorganischen Massenanteile erkennt man auch einen Jahresgang mit maximalen anorganischen Anteilen im Winter und einem Minimum im Sommer.

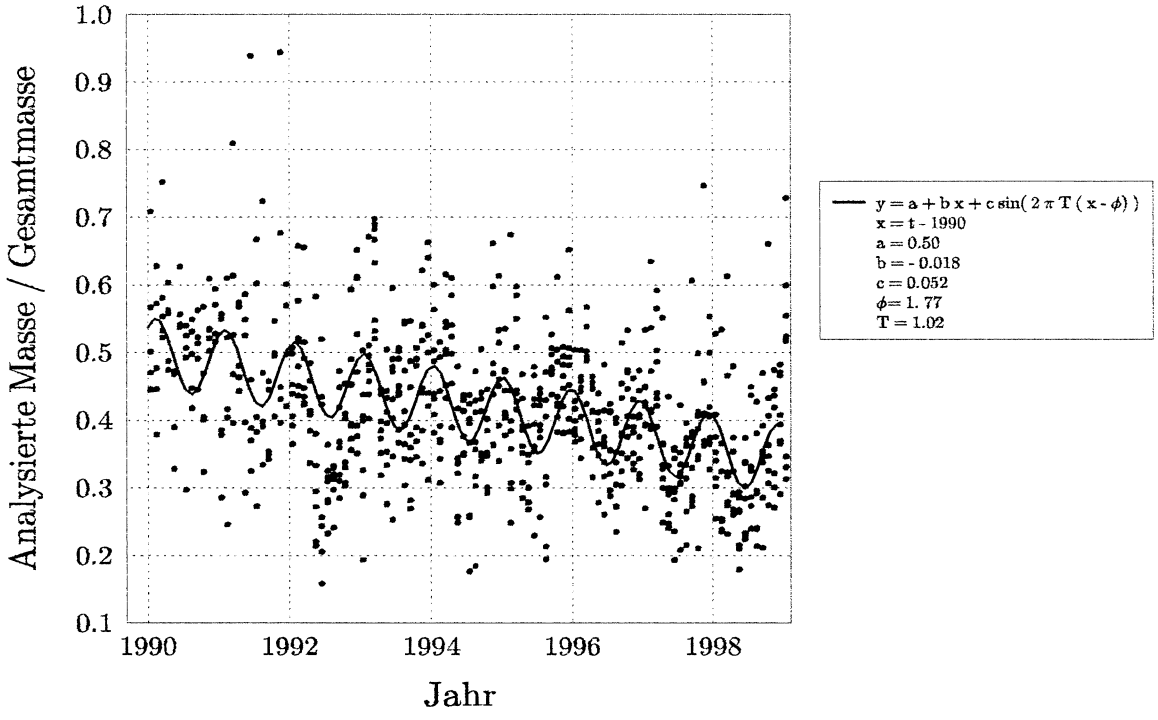



Abbildung 65: Massenanteil der im UBA-Messnetz an 8 Stationen analysierten anorganischen Staubinhaltsstoffe

**Schwefel im Schwebstaub:**

Abbildung 66 zeigt den mit RFA gemessenen Verlauf der Jahresmittel von Schwefel im Staub (Feinstaub) von 1974 bis 1999 an den 5 Stationen Westerland, Waldhof, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland sowie für die Stationen Zingst, Neuglobsow und Schmücke zwischen 1992 und 1999. Die mittels RFA gewonnenen Werte wurden mit einem Faktor von 1.5 nach oben korrigiert. Die höchsten absoluten Schwefelkonzentrationen wurden an den Stationen Waldhof und Deuselbach, die niedrigsten an den Bergstationen Schauinsland, Brotjacklriegel und Schmücke beobachtet. Ähnlich wie die Konzentrationen des Gesamtstaubes haben in den letzten Jahrzehnten auch die Konzentrationen des Schwefels abgenommen.

Zwischen 1974 und 1999 wurde der Schwefelgehalt im Schwebstaub mittels Röntgenfluoreszenz (RFA) bestimmt. Von 1990 erfolgte parallel dazu die Bestimmung von Monatswerten mittels Ionenchromatographie. Beide Verfahren wurden 2000 durch die Filterpack-Messungen abgelöst (siehe Kap. 3.3).

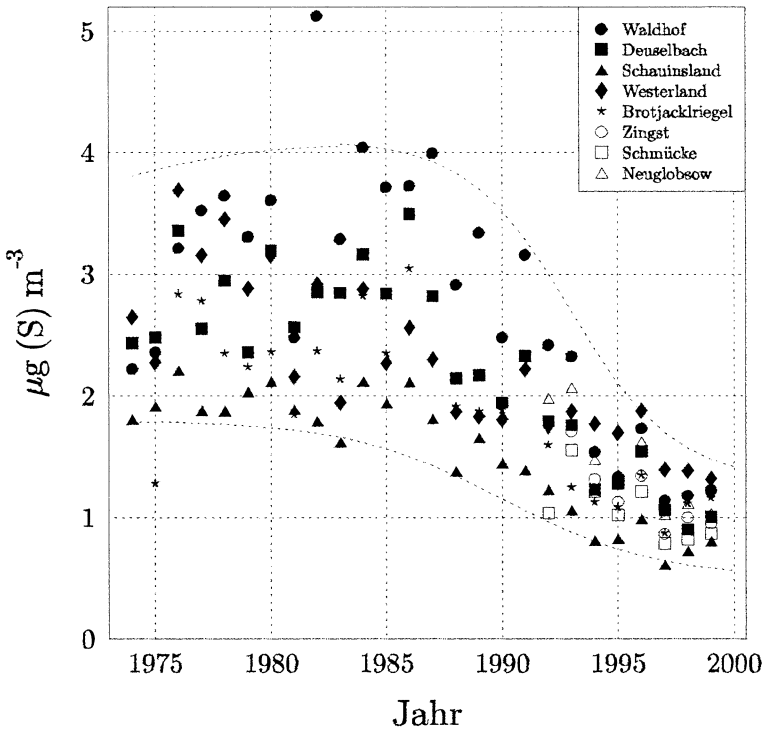



Abbildung 66: Verlauf der Jahresmittel von Schwefel im Staub (Feinstaub) von 1974 bis 1999 an den 5 Stationen Westerland, Waldhof, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland sowie für die Stationen Zingst, Neuglobsow und Schmücke zwischen 1992 und 1999

In Tabelle 73 sind die mittleren Massenanteile für Sulfat, Nitrat und Ammonium für die UBA-Stationen zusammengestellt. Diese Massenanteile sind mittlere Werte zwischen 1995 und 1999.

Tabelle 73: Mittlere Massenanteile von Sulfat, Nitrat und Ammonium im Messnetz des UBA

| | **Massenanteile in %** | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Station** | **Sulfat** | **Nitrat** | **Ammonium** | **Bemerkungen** |
| **Westerland** | 14.9 | 11.7 | 3.7 | mittlere Werte zwischen 1995 und 1999 |
| **Waldhof** | 21.2 | 11.6 | 5.2 | |
| **Deuselbach** | 21.3 | 11.8 | 5.2 | |
| **Brotjacklriegel** | 23.0 | 12.5 | 5.5 | |
| **Schauinsland** | 23.8 | 14.5 | 3.6 | |
| **Zingst** | 17.3 | 11.3 | 5.1 | |
| **Neuglobsow** | 19.5 | 6.7 | 4.9 | |
| **Schmücke** | 20.0 | 7.9 | 5.0 | |

### N-Verbindungen im Schwebstaub

Ammonium-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff werden ab dem Jahr 1990 im UBA-Messnetz mittels Ionenchromatographie bestimmt: seit 1990 in Westerland, Waldhof, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland sowie seit 1992 auch an den Stationen Zingst, Neuglobsow und Schmücke.

Die Abbildung 67 und Abbildung 68 zeigen den Verlauf der mittleren Jahreskonzentrationen für Nitrat-N und Ammonium-N zwischen 1990 und 1999 an den personell besetzten UBA-Stationen. Wie zu erwarten wurden die niedrigsten Konzentrationen an den Bergstationen Schauinsland, Brotjacklriegel und Schmücke beobachtet. Die Konzentrationen schwanken von Jahr zu Jahr erheblich, vor allem für Ammonium-N, ein abnehmender Trend ist aber nur sehr schwach ausgeprägt. Der größte Teil des im Aerosol enthaltenen Nitrat- bzw. Ammonium-Stickstoffs scheint sekundäres Aerosol zu sein, das aus den Gasen $NO_x$ bzw. $NH_3$ gebildet worden ist. Die Emissionen dieser Gase sind zwischen 1990 und 1999 in Deutschland um ca. 40% ($NO_x$) bzw. ca. 20% ($NH_3$) zurückgegangen, während die Emissionen des Gesamtstaubes um etwa 85% zurückgegangen sind.

Die vergleichsweise sehr niedrigen Jahreskonzentrationen in den Jahren 1998 und 1999 sind möglicherweise auf die Verwendung eines anderen Filtermaterials zurückzuführen. Dies wird z.Z. untersucht.

Die mittleren Nitrat- und Ammoniumanteile an der Gesamtmasse des Schwebstaubs sind zusammen mit dem Sulfatanteil in Tabelle 73 zusammengestellt.

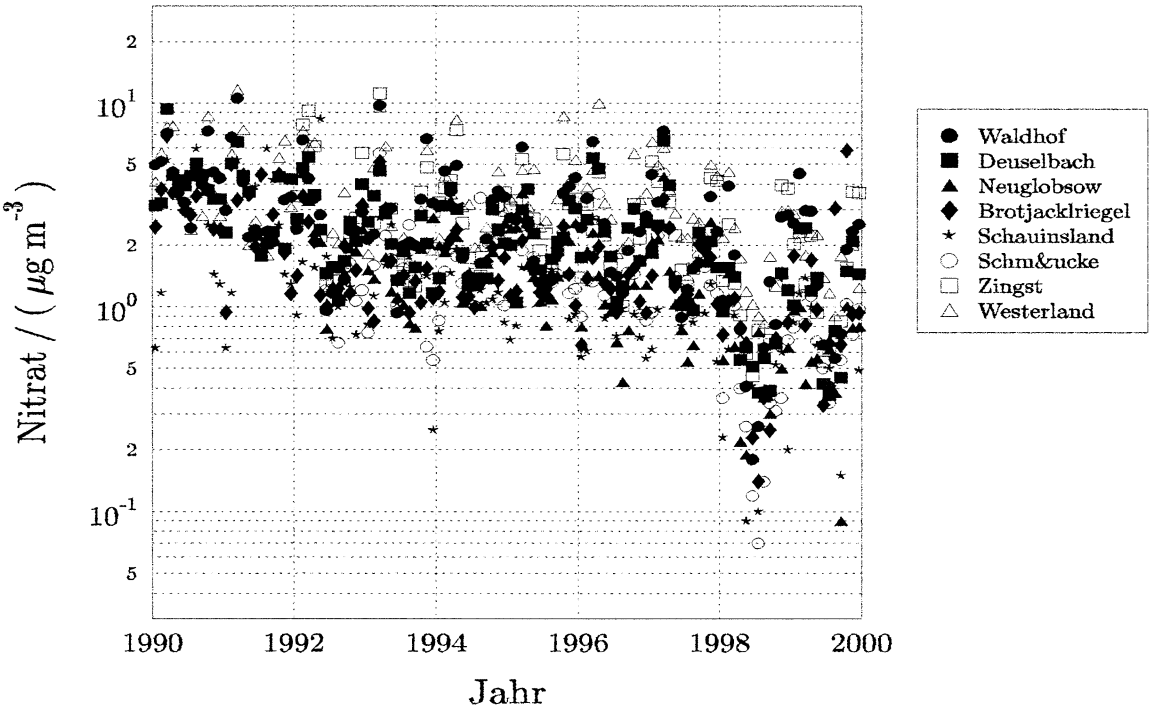



Abbildung 67: Verlauf der mittleren Jahreskonzentrationen für Nitrat-N zwischen 1990 und 1999 an den personell besetzten UBA-Stationen

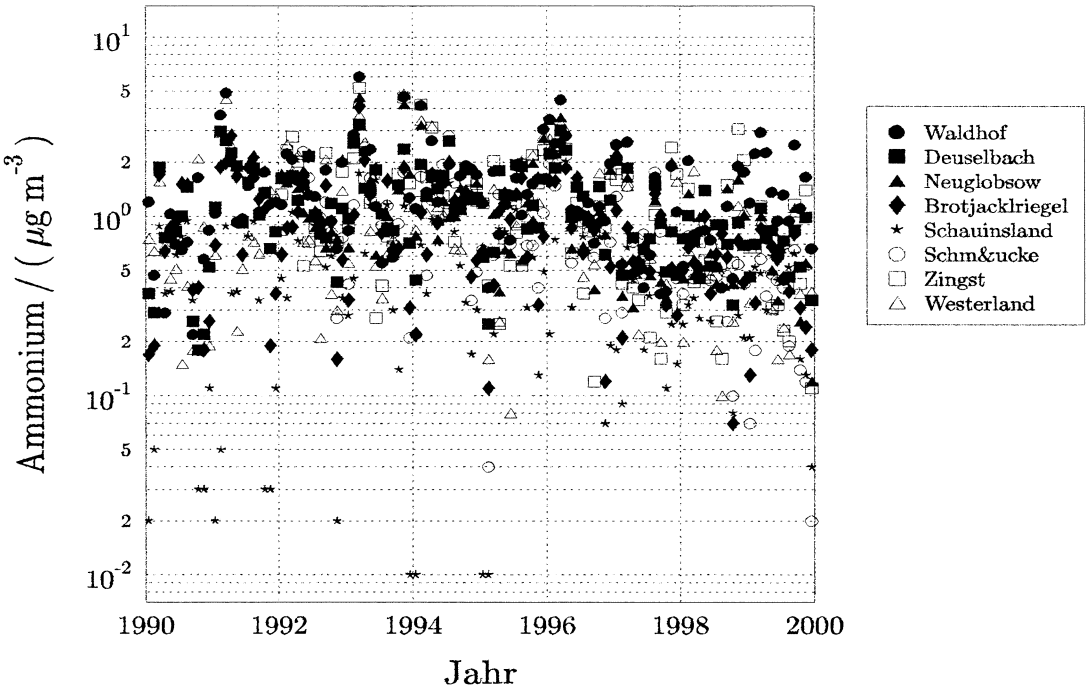



Abbildung 68: Verlauf der mittleren Jahreskonzentrationen für Ammonium-N zwischen 1990 und 1999 an den personell besetzten UBA-Stationen

### Schwermetalle im Schwebstaub

Schwermetalle werden in Deutschland hauptsächlich durch anthropogene Quellen (Feuerungsanlagen, Eisen -und Stahlindustrie, Nichteisen-Metallindustrie, Müllverbrennungsanlagen, Zementindustrie , Kraftfahrzeugverkehr) in die Atmosphäre emittiert. Natürliche Emissionen (z.B. aus Bodenmaterial oder Vulkanen) spielen in Deutschland eine untergeordnete Rolle. Durch Kondensationsprozesse und chemische Reaktionen werden die meisten Schwermetalle in Partikelform überführt bzw. an Staubpartikel angelagert.

In Tabelle 74 sind typische Konzentrationsbereiche von Schwermetallen für ländliche und städtische Gebiete Deutschlands dargestellt *(Ref. 10, 11)*.

Tabelle 74: Heutige typische Konzentrationen von Schwermetallen in ländlichen und städtischen Gebieten Deutschlands *(Ref. 10, 11)*.

| **Element** | | **Massenkonzentrationen in ng/m³** | |
|---|---|---|---|
| | | **ländliches Gebiet** | **städtisches Gebiet** |
| **Blei** | **Pb** | 20 bis 100 | 50 bis 800 |
| **Cadmium** | **Cd** | 0.2 bis 2 | 2 bis 20 |
| **Kupfer** | **Cu** | 1 bis 10 | 10 bis 100 |
| **Mangan** | **Mn** | 10 bis 50 | 20 bis 100 |
| **Nickel** | **Ni** | 1 bis 5 | 1 bis 20 |

Aerosolgebundene Schwermetalle (Blei, Cadmium, Kupfer, Mangan, Nickel) werden an den 8 personell besetzten Messstellen (Westerland, Zingst, Waldhof, Neuglobsow, Deuselbach, Schmücke, Brotjacklriegel und Schauinsland) teilweise schon ab 1970 gemessen.

Die Messergebnisse sind in Abbildung 69 bis Abbildung 72 zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils die mittleren Jahreskonzentrationen der Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer, Mangan und Nickel, die deutschen Emissionen (Balken) und die mittlere Trendlinie für die 5 UBA-Messstellen Westerland, Waldhof, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland. Für Nickel sind wegen des kurzen Messzeitraums (1995 - 2000) nur die mittleren Jahreskonzentrationen dargestellt. Die Schwermetallemissionen der Jahre 1985, 1990 und 1995 sind offizielle Daten des Umweltbundesamtes *(Ref. 12)*, die entsprechenden Daten für die Jahre 1970, 1975 und 1982 sind Schätzwerte aus der Literatur *(Ref. 13, 14)*.

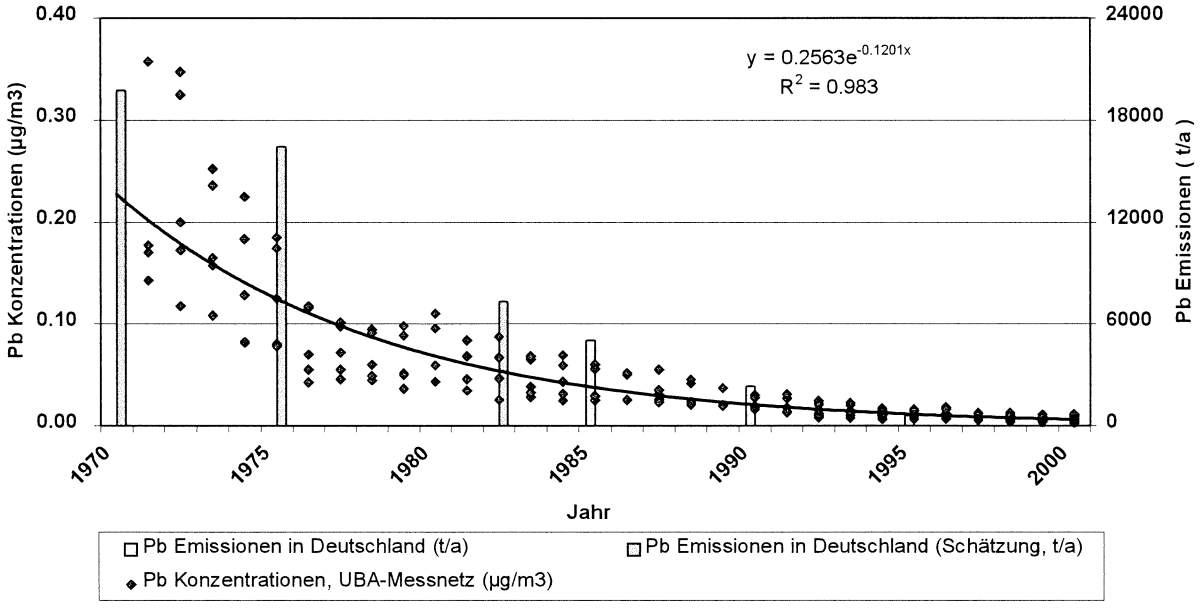



Abbildung 69: Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Blei (1970 - 2000), mittlere Jahreskonzentrationen an den UBA-Stationen und Jahresemissionen in Deutschland

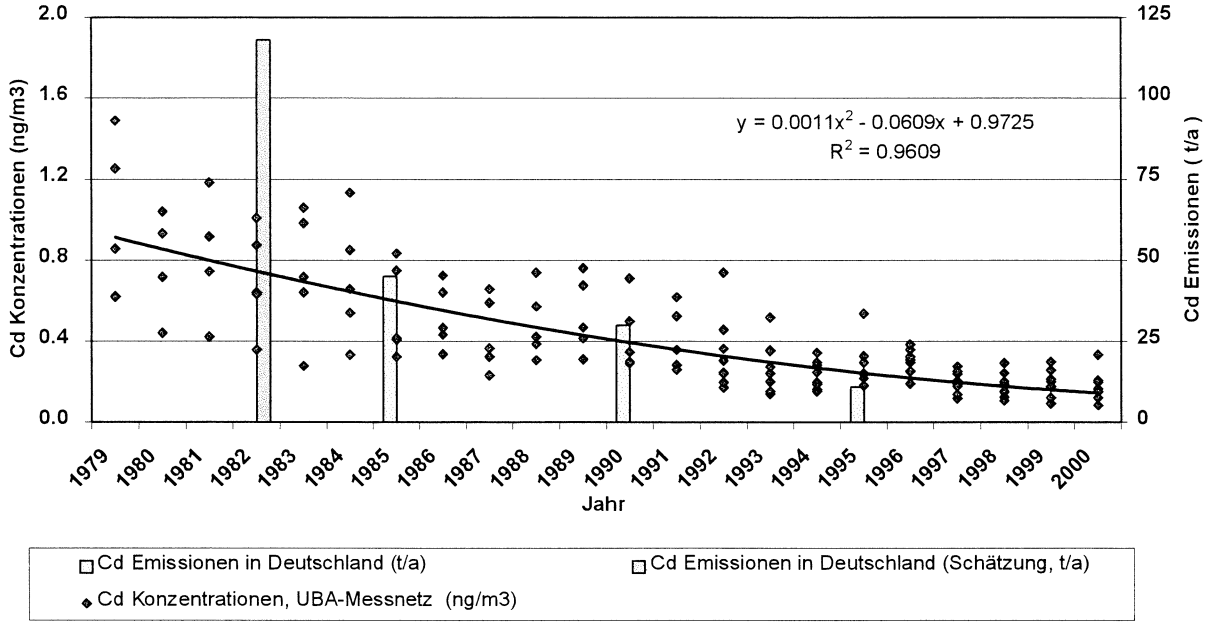



Abbildung 70: Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Cadmium (1979 - 2000), mittlere Jahreskonzentrationen an den UBA-Stationen und Jahresemissionen in Deutschland

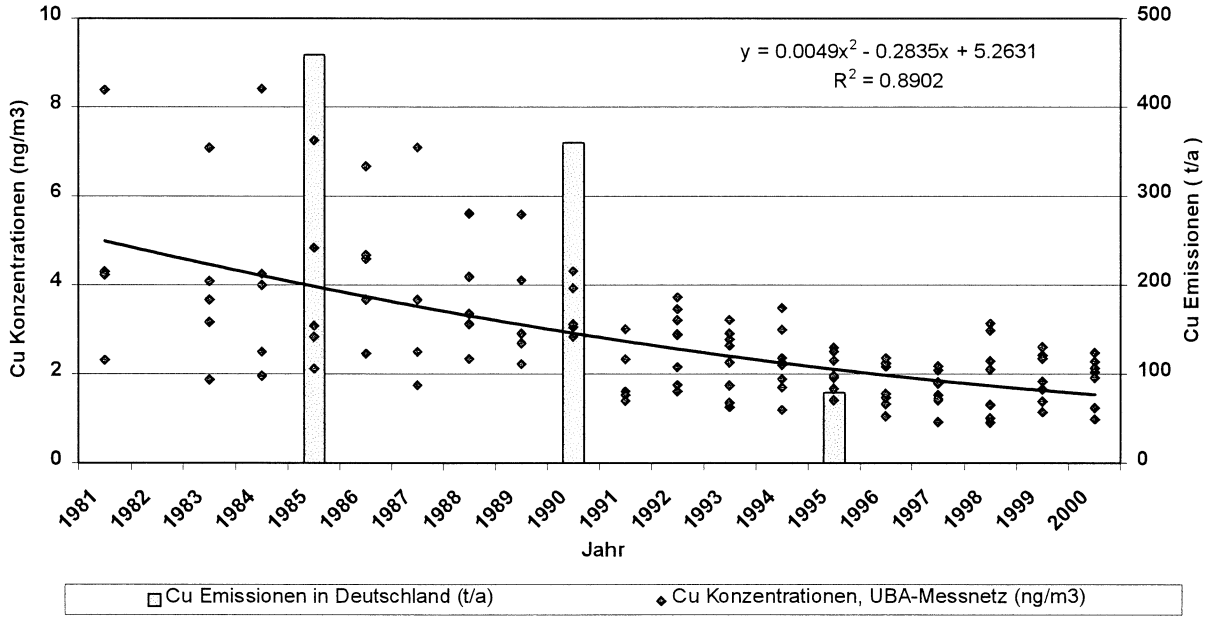



Abbildung 71: Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Kupfer (1981 - 2000), mittlere Jahreskonzentrationen an den UBA-Stationen und Jahresemissionen in Deutschland

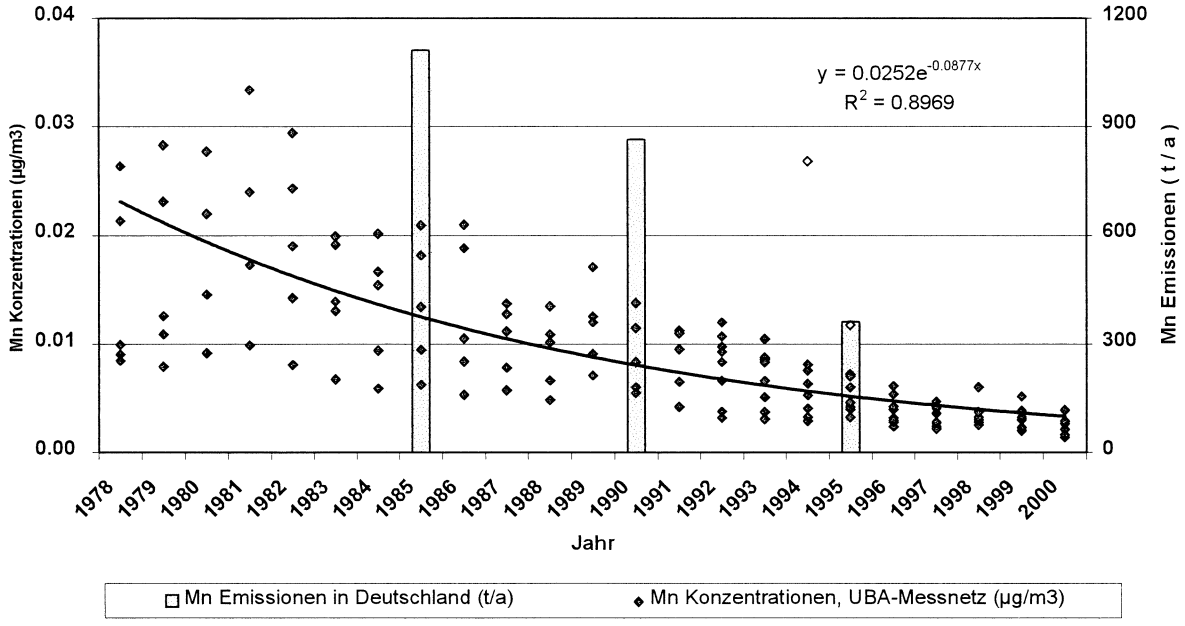



Abbildung 72: Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Mangan (1978 - 2000), mittlere Jahreskonzentrationen an den UBA-Stationen und Jahresemissionen in Deutschland

Die Abbildung 69 und Abbildung 72 zeigen den Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Blei (1970 - 2000), Cadmium (1979 - 2000), Kupfer (1981 - 2000) und Mangan (1978 - 2000).

Die Messwerte zeigen z.T. deutliche regionale Unterschiede, z.B. wurden an den Messstellen Deuselbach und Waldhof sowie auch in Neuglobsow deutlich höhere Konzentrationen von Blei, Cadmium und Kupfer gemessen als an den anderen UBA-Messstellen. Diese Unterschiede sind einerseits auf meteorologisch-klimatologische und orographische Faktoren (z.B. weisen die Bergstationen Brotjacklriegel und Schauinsland generell niedrigere Konzentrationen auf als Flachlandstationen), andererseits spielt auch die unterschiedliche Beeinflussung der Stationen durch Emissionsquellen aus Industrie- und Ballungsräumen eine Rolle.

Bei den aerosolgebundenen Schwermetallen (Blei, Cadmium, Kupfer, Mangan) ist ein deutlicher Rückgang der Konzentrationen während der letzten 20 bis 30 Jahre zu beobachten.

### 3.1.2.3 Überschreitung von $PM_{10}$-Grenzwerten im Messnetz des Umweltbundesamtes

In Tabelle 75 und Tabelle 76 sind die Anzahl der Überschreitungen der Grenzwerte im Hinblick auf die Anforderungen der 1. EG-Tochterrichtlinie 1999/30/EG für Partikel ($PM_{10}$) für die 8 personell besetzten UBA-Messstellen von 1970 bis 2001 zusammengestellt. Da von 1970 bis 1998 im Messnetz des UBA Gesamtstaub und erst ab 1999 $PM_{10}$ gemessen wurden, wurde die Werte vor 1999 mit dem Faktor 0.83 von Gesamtstaub auf $PM_{10}$ umgerechnet. In den meisten Ländern wird zur Umrechnung ein Faktor zwischen 0.8 und 0.83 verwendet. Der Faktor wird teils durch Parallelmessungen selbst bestimmt, teils werden Literaturdaten verwendet. Der von uns verwendete Faktor von 0.83 beruht auf Parallelmessungen im UBA-Messnetz.

In Tabelle 75 ist die Zahl der Überschreitungen der Tagesmittel vom $PM_{10}$ $>50$ $\mu g/m^3$ für Stufe 1 (bis 35 Überschreitungen pro Jahr und Station (dunkelgrau hinterlegt) ab 2005 zulässig) sowie für Stufe 2 bis 7 Überschreitungen pro Jahr und Station (grau hinterlegt) ab 2010 zulässig) aufgelistet. Die entsprechenden Überschreitungen der Jahresmittel für Stufe 1 (40 $\mu g/m^3$ ab 2005, dunkelgrau hinterlegt) sowie für Stufe 2 (20 $\mu g/m^3$ ab 2010, hellgrau hinterlegt) sind in Tabelle 76 zusammengestellt.

Mit Ausnahme der Station Westerland, wo das Seesalz erheblich zu den $PM_{10}$-Werten beitragen kann, wurden die Tagesmittel von 50 $\mu g/m^3$ für Stufe 1 seit 1992 an keiner UBA-Station mehr als 35 mal pro Jahr überschritten. In 2001 lagen an 3 von 8 UBA-Stationen die Tagesmittel von 50 $\mu g/m^3$ noch über Stufe 2 (bis 7 Überschreitungen pro Jahr) (Tabelle 75).

Besser als bei den Tagesmitteln sieht die Situation bei den Jahresmitteln aus (Tabelle 76). Der Grenzwert von 40 $\mu g/m^3$ (Stufe 1) wurde seit 1986 an keiner der 8 UBA-Stationen mehr erreicht, der verschärfte Grenzwert von 20 $\mu g/m^3$ (Stufe 2) mit Ausnahme von Westerland ab 1997 auch nicht mehr. Während zukünftige $PM_{10}$-Jahresmittel die Grenzwerte wahrscheinlich nur noch selten überschreiten werden, wird der 24-Stunden-Grenzwert auch im Jahr 2005 an einzelnen Emissionsschwerpunkten noch deutlich überschritten werden.

Tabelle 75: Anzahl der Tagesmittel von $PM_{10}$ >50 $\mu g/m^3$ pro Jahr für die 8 personell besetzten Messstellen des UBA. Die Werte vor 1999 wurden von Gesamtstaub in $PM_{10}$ umgerechnet. Die fetten kursiven Zahlen (dunkelgrau hinterlegt) überschreiten Stufe 1, die kursiven Zahlen (hellgrau hinterlegt) Stufe 2 der Tochterrichtlinie

| | WE | ZG | NG | WA | SM | DE | BR | SC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1970** | | | ***59*** | ***80*** | | ***48*** | | *11* |
| **1971** | | | ***37*** | ***130*** | | ***115*** | | *7* |
| **1972** | | | ***67*** | ***140*** | | ***62*** | ***36*** | *16* |
| **1973** | | | ***43*** | ***106*** | | ***86*** | ***46*** | *30* |
| **1974** | | | ***53*** | ***79*** | | ***68*** | *17* | *27* |
| **1975** | | | ***50*** | ***89*** | | ***57*** | *27* | *16* |
| **1976** | | | ***54*** | ***117*** | | ***95*** | *21* | *25* |
| **1977** | | | ***46*** | ***94*** | | ***43*** | *13* | *9* |
| **1978** | | | ***75*** | ***119*** | | ***42*** | *8* | *7* |
| **1979** | ***58*** | | ***40*** | ***123*** | ***36*** | ***49*** | *22* | 6 |
| **1980** | ***44*** | | ***56*** | ***95*** | ***53*** | ***63*** | *29* | *19* |
| **1981** | ***37*** | | ***46*** | ***107*** | ***49*** | ***43*** | *21* | *21* |
| **1982** | ***106*** | | ***84*** | ***123*** | ***62*** | ***86*** | ***48*** | *10* |
| **1983** | ***78*** | | ***49*** | ***84*** | ***40*** | ***54*** | ***48*** | *26* |
| **1984** | ***115*** | | ***70*** | ***118*** | *31* | ***51*** | *22* | *18* |
| **1985** | ***72*** | | ***63*** | ***89*** | *31* | ***51*** | *19* | 6 |
| **1986** | ***86*** | | ***68*** | ***81*** | ***52*** | ***63*** | *34* | *14* |
| **1987** | ***76*** | | ***78*** | ***79*** | *28* | ***42*** | *13* | *16* |
| **1988** | *30* | | ***71*** | ***56*** | ***48*** | *12* | *18* | 2 |
| **1989** | ***41*** | | ***68*** | ***70*** | *14* | *23* | *9* | 5 |
| **1990** | ***42*** | | *29* | ***45*** | *17* | *21* | 6 | *8* |
| **1991** | ***47*** | | *19* | ***41*** | | *13* | 2 | 0 |
| **1992** | ***47*** | *24* | *26* | *23* | 4 | 4 | 0 | 1 |
| **1993** | ***37*** | *30* | *31* | *35* | *9* | 3 | 0 | 1 |
| **1994** | ***73*** | *18* | *15* | *15* | *8* | 2 | 0 | 0 |
| **1995** | ***48*** | *16* | *13* | *15* | 2 | 5 | 1 | 1 |
| **1996** | *26* | *22* | *21* | *24* | 1 | *12* | 2 | 4 |
| **1997** | *8* | *10* | *12* | *11* | 4 | *8* | 1 | 1 |
| **1998** | *14* | *21* | *18* | *9* | 0 | 5 | 1 | 0 |
| **1999** | *9* | *7* | 2 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **2000** | 2 | *7* | 3 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| **2001** | *12* | *10* | *9* | 5 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Tabelle 76: Jahresmittel von $PM_{10}$ in $\mu g/m^3$ für die 8 personell besetzten Messstellen des UBA. Die Werte vor 1999 wurden von Gesamtstaub in $PM_{10}$ umgerechnet. Die fetten kursiven Zahlen (dunkelgrau hinterlegt) überschreiten Stufe 1, die kursiven Zahlen (hellgrau hinterlegt) Stufe 2 der Tochterrichtlinie

| | WE | ZG | NG | WA | SM | DE | BR | SC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1970** | | | *30.9* | ***47.5*** | | *34.8* | | 18.9 |
| **1971** | | | *26.9* | ***47.4*** | | ***44.1*** | | 16.9 |
| **1972** | | | *33.2* | ***49.2*** | | *37.4* | *29.2* | 19.7 |
| **1973** | | | *25.2* | ***43.5*** | | *39.5* | *30.2* | *25.3* |
| **1974** | | | *28.1* | *37.2* | | *35.1* | *24.0* | *22.5* |
| **1975** | | | *29.1* | *39.0* | | *34.1* | *26.3* | *21.3* |
| **1976** | | | *28.3* | ***47.4*** | | *38.2* | *24.5* | *22.7* |
| **1977** | | | *27.0* | *39.9* | | *29.6* | *21.7* | 16.7 |
| **1978** | | | *32.3* | ***43.6*** | | *31.1* | *21.2* | 17.6 |
| **1979** | *38.8* | | *26.5* | ***46.4*** | *25.1* | *31.7* | *24.4* | 18.1 |
| **1980** | ***46.7*** | | *26.5* | ***46.0*** | *26.4* | *32.4* | *27.8* | *20.6* |
| **1981** | *39.0* | | *26.6* | ***43.2*** | *26.3* | *29.3* | *26.7* | 19.2 |
| **1982** | ***45.6*** | | *36.7* | ***60.6*** | *28.9* | *36.4* | *29.7* | 17.7 |
| **1983** | *36.5* | | *26.9* | *39.3* | *23.7* | *31.2* | *28.4* | *20.4* |
| **1984** | ***45.4*** | | *32.6* | ***44.9*** | *21.8* | *32.5* | *24.8* | 19.6 |
| **1985** | *36.5* | | *30.6* | ***41.5*** | *23.0* | *31.4* | *23.3* | 17.1 |
| **1986** | *39.8* | | *31.6* | *39.6* | *24.9* | *31.0* | *26.0* | 18.4 |
| **1987** | *36.6* | | *35.4* | *38.0* | *23.3* | *28.8* | *21.5* | 16.7 |
| **1988** | *28.6* | | *33.0* | *30.5* | *27.3* | *21.9* | *21.1* | 15.0 |
| **1989** | *30.3* | | *33.9* | *34.4* | 18.9 | *26.1* | *21.2* | 17.8 |
| **1990** | *28.7* | | *23.1* | *28.3* | *20.2* | *25.8* | 19.1 | 18.0 |
| **1991** | *28.0* | | *27.4* | *28.4* | | *23.8* | 17.3 | 14.0 |
| **1992** | *27.6* | *23.5* | *24.6* | *24.0* | 18.1 | 19.3 | 15.0 | 12.4 |
| **1993** | *27.2* | *23.0* | *23.5* | *23.9* | 19.6 | 19.0 | 14.8 | 11.4 |
| **1994** | *32.0* | *22.5* | *21.6* | *21.4* | 17.9 | 18.1 | 13.7 | 10.7 |
| **1995** | *29.7* | *21.5* | *21.9* | *21.1* | 15.4 | 18.3 | 13.7 | 11.3 |
| **1996** | *25.1* | *21.6* | *22.2* | *24.0* | 15.7 | *20.2* | 14.3 | 12.1 |
| **1997** | *21.7* | 19.7 | 19.2 | *20.2* | 14.4 | 17.7 | 12.8 | 11.0 |
| **1998** | *22.8* | *21.2* | 19.8 | 16.3 | 13.5 | 17.7 | 12.7 | 10.7 |
| **1999** | 19.7 | 17.0 | 14.6 | 16.5 | 12.5 | 14.4 | 10.5 | 8.1 |
| **2000** | *20.5* | 19.6 | 17.4 | 17.3 | 12.1 | 14.8 | 11.5 | 10.5 |
| **2001** | *20.1* | 16.9 | 15.6 | 16.3 | 10.3 | 15.2 | 10.1 | 9.8 |

## 3.1.3 Herkunft des Feinstaubes

Wie in Kapitel 3.1.2.3 beschrieben, wurden die heutigen EU-Grenzwerte (siehe Tabelle 75 und Tabelle 76) früher z.T. großflächig überschritten, insbesondere die Tagesmittelwerte (Tabelle 75). Im Falle von Grenzwertüberschreitungen besteht die Auflage, Aktionspläne zu erstellen, die sicherstellen müssen, dass weitere Überschreitungen in Zukunft vermieden werden. Zur Erstellung der Aktionspläne ist es notwendig, die Ursachen, d.h. die Quellen und Transportwege zu identifizieren und zu quantifizieren.

Eine Zuordnung der Partikelimmissionen zu bestimmten Quellen wurde in Deutschland in den letzten Jahren für einige städtische Gebiete wie beispielsweise für Berlin versucht *(Ref. 15)*.

Ausgehend von Luftmassen-Trajektorienanalysen sowie von gemessenen mittleren Konzentrationsdifferenzen zwischen Hintergrundstationen im Umfeld von Berlin (z.B. auch die UBA-Messstelle Neuglobsow, ca. 100 km nordöstlich von Berlin), einem innerstädtischen Wohngebiet (innerstädtischer Hintergrund) sowie innerstädtischen Verkehrsmessstellen (Nahquellen) wurden die Beiträge der 3 Quellgruppen großräumige Quellen, Quellen im Ballungsgebiet sowie Nahquellen zu den an einer verkehrsreichen Straße gemessenen $PM_{10}$-Konzentrationen abgeschätzt.

Tabelle 77: Beiträge verschiedener Quellgruppen zum $PM_{10}$-Wert an einer verkehrsreichen Straße von 50.3 $\mu g/m^3$ *(Ref. 16, 17)*

| | | |
|---|---|---|
| Großräumige Quelle außerhalb von Berlin: | 18.6 $\mu g/m^3$ | ca. 37% |
| Quellen im Ballungsgebiet Berlin | 17.0 $\mu g/m^3$ | ca. 34% |
| Quellen im Nahbereich (verkehrsreiche Straße) | 14.7 $\mu g/m^3$ | ca. 29% |

Ein Vergleich der Anteile in Tabelle 77 zeigt, dass für Berlin etwa 50% der städtischen Hintergrund-$PM_{10}$-Konzentrationen und mehr als ein Drittel der an der verkehrreichen Straße gemessenen $PM_{10}$-Konzentration durch großräumige Quellen verursacht werden, die außerhalb von Berlin liegen. Eine genauere Quellenzuordnung (z.B. Anteil der deutschen, europäischen und außereuropäischen Quellen) ist aber derzeit noch nicht möglich. Ein nicht unerheblicher Anteil des durch Ferntransport nach Berlin verfrachteten Aerosols scheint sekundäres Aerosol zu sein, das aus $NH_3$, NOx, $SO_2$ und VOC gebildet worden ist. Allerdings ist der Anteil des sekundären Aerosols am Gesamt-$PM_{10}$-Aerosol ebenfalls noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Der Anteil des natürlichen (sekundär und primär) Aerosols an der $PM_{10}$-Masse der städtischen Hintergrundkonzentrationen liegt nach *(Ref. 16)* zwischen 10 und 15%, der Anteil steigt auf ca. 20% beim außerhalb von Berlin gemessenen regionalen Hintergrund.

Eine Bestimmung der verschiedenen Anteile des Staubgehaltes an den UBA-Messstellen aus primären und sekundären natürlichen und anthropogenen Aerosolquellen sowie aus lokalen gegenüber regionalen und überregionalen Quellen aus dem Ferntransport ist ungleich schwieriger als für Städte wie z.B. Berlin, da neben den weitgehend fehlenden Konzentrationsunterschieden gegenüber dem Umland der Messstellen auch wesentliche Parameter, die zu einer solchen Abschätzung erforderlich sind, im Messnetz des UBA nicht gemessen

werden. So kann beispielsweise der Anteil der sekundären Aerosolbildung nur dann mit hinreichender Genauigkeit abgeschätzt werden, wenn die Partikelkonzentrationen und die größenabhängige chemische Zusammensetzung in hoher zeitlicher Auflösung (Minuten bis maximal Stunden) verfolgt werden kann *(Ref. 17)*. Hinzu kommt, dass die Messung einiger dominierender sekundärer Aerosolkomponenten (z.B. Ammoniumnitrat, organische Kohlenstoffverbindungen) wegen der semi-flüchtigen Eigenschaften dieser Stoffe erheblich erschwert ist. *(Ref. 17)*. Eine detaillierte Abschätzung der Beiträge verschiedener Quellen und Quellgruppen für die Stationen im UBA-Messnetz wird deshalb an dieser Stelle nicht versucht.

## 3.1.4 Literatur


*(1) UBA (2000)*
*Wirkungen und Bewertung von Feinstaub. Proceedings: Feinstaub – Die Situation in Deutschland nach der EU–Richtlinie, Bericht über Symposium am 26.und 27. Juni 2000, Berlin, WaBoLu - Hefte 2/00, S. 15 – 96, Redaktion: N. Englert und H.-G. Mücke.*

*(2) Remus, R. (2000)*
*Entstehung und Quellen der Feinstaub-Emissionen. Proceedings: Feinstaub – Die Situation in Deutschland nach der EU-Richtlinie, Symposium am 26. und 27. Juni 2000, Berlin, WaBoLu-Hefte 2/00, S.99 – 108.*

*(3) Schütz, L. and Sebert, M. (1987)*
*Mineral aerosols and source identification. Journal Aerosol Science, 18, 1, pp. 1-10*

*(4) EMEP (1999)*
*Long-range transport of Aerosol Particles: A Literature Review by M. Lazaridis, A. Semb and O. Hov, EMEP/CCC-Report 8/99.*

*(5) Jaenicke, R. (1978)*
*Über die Dynamik atmosphärischer Aitkenteilchen. Ber. Bunsengesellschaft. Phys. Chem.* 82 (1978), S.1198 – 1202.

*(6) Kuhlbusch, T. (2001)*
*PMX-Massenkonzentrationen, chemische Zusammensetzung und Quellenzuordnung. In: Proceedings Workshop Herausforderung Aerosole vor dem Hintergrund der europäischen Umweltgesetzgebung, S. 85-96 (Literatur zu epidemiologischen Untersuchungen in dieser Arbeit). DECHEMA, Frankfurt/M., 30./31. Mai 2001.*

*(7) Harrison,R. et al. (1999)*
*Atm.Env. 33, pp.303 – 321*

*(8) Wichmann, H.E. (2000)*
*S.43 – 75 in Ref.1*

*(9) BUWAL (2001)*
*$PM_{10}$: Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen und Maßnahmen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 29. März 2001, 39 Seiten*

*(10) KRdL im VDI und DIN (1999)*
*VDI Richtlinie 2267, Blatt 1, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4, Beuth-Verlag, Berlin.*

*(11) UBA (2000)*
*Jahresbericht 1999 aus dem Messnetz des UBA, Texte 58/00, S.137 – 152.*

*(12) UBA (1997)*
*Daten zur Umwelt, 1997, Erich – Schmidt Verlag, Berlin.*

*(13) Mylona, S. (1999)*
*EMEP Emission Data Status Report 1999, EMEP/MSC–W Report 1/99.*

*(14) Olendrzynski et al. (1996)*
*Atmospheric emissions and depositions of cadmium, lead and zinc in Europe during the period 1955 – 1987, Env. Reviews, Vol.4, pp.300 – 320, 1996.*

*(15) Lenschow, P. und Pesch, M. (2000)*
*Zuordnung von Immissionen zu Quellen, WaBoLu–Hefte 2/00: Feinstaub – Die Situation in Deutschland nach der EU–Tochterrichtlinie. Bericht über ein Symposium am 26./27. Juni 2000, S. 135 – 150.*

*(16) Abraham, H.J. et al. (2000)*
*Some ideas about sources of $PM_{10}$, WaBoLu–Hefte 2/2000, Bericht Symposium 26./27. Juni 2000, S. 195 – 203.*

*(17) EUROTRAC 2, Annual Report (2000)*
*Aerosol, Composition and Size Evaluation of the Secondary Aerosol. The complete report can be found at the following website: http://aerosol.web.psi.ch*

# 3.2 Die Ozon-Episoden in Deutschland im Juli und August 2001

*Siegfried Beilke, Manfred Jäschke, Karin Uhse und Markus Wallasch, Umweltbundesamt, FG II 6.6, Außenstelle Langen*

*Ute Dauert, Susanne Grittner, Wolfgang Bräuniger und Angela Weikinn, Umweltbundesamt, FG II 6.2, Berlin*

*Andreas Klein, Barbara Fay, Ingo Jacobsen und Volker Vent-Schmidt, Deutscher Wetterdienst, Offenbach*

## 3.2.1 Einleitung

In Deutschland haben die Ozon-Spitzenkonzentrationen zwischen 1990 und 2001 deutlich abgenommen (siehe Abbildung 73 bis Abbildung 77), während die Mittelwerte angestiegen sind *(Ref. 1, 2)*. Die Abnahme der Spitzenwerte ist im Wesentlichen auf die erhebliche Reduzierung der Emissionen der Ozonvorläufer (NOx und VOC) in Deutschland als auch in den europäischen Nachbarstaaten und nicht auf meteorologische Einflüsse zurückzuführen *(Ref. 1, 3)*. Die scheinbar paradoxe, gleichzeitige Zunahme der mittleren Ozon-Konzentrationen, wie zum Beispiel der Jahresmittelwerte, ist neben dem zunehmenden Beitrag aus dem nordhemisphärischen Ozon-Hintergrund zu einem nicht unerheblichen Teil auf die Reduzierung der Emission von Stickoxiden zurückzuführen, die Ozon sowohl bilden als auch abbauen können. Eine Abnahme der Stickoxid-Konzentrationen (werden als NO hauptsächlich durch den Straßenverkehr emittiert) führt in Emittentennähe zu einer Verminderung des sog. Titrationseffektes“ (Verbrauch von Ozon durch NO unter Bildung von $NO_2$), der zum Anstieg der mittleren Ozonkonzentrationen führen kann.

Eine ähnliche Entwicklung, nämlich ein Rückgang der Ozon-Spitzenwerte und eine Zunahme der Mittelwerte, wurde beispielsweise auch in Österreich, der Schweiz *(Ref. 4, 5)* sowie in Großbritannien *(Ref. 6)* beobachtet.

Abbildung 73 bis Abbildung 77 zeigen den generellen Rückgang der Ozon-Spitzenwerte in Deutschland zwischen 1990 und 2001, gemessen an allen deutschen Ozonstationen von Bund und Ländern (ca. 200 in 1990 und ca. 370 in 2001).

Abbildung 73 zeigt als Beispiel den Verlauf der maximalen Ozon-Stundenwerte in Deutschland zwischen 1990 und 2001. Ozonkonzentrationen über 300 $\mu g/m^3$ wurden seit 1994 in Deutschland nicht mehr beobachtet. Die maximalen Ozonwerte (1-h-Mittel) lagen nach 1994 zwischen 200 $\mu g/m^3$ und 300 $\mu g/m^3$.

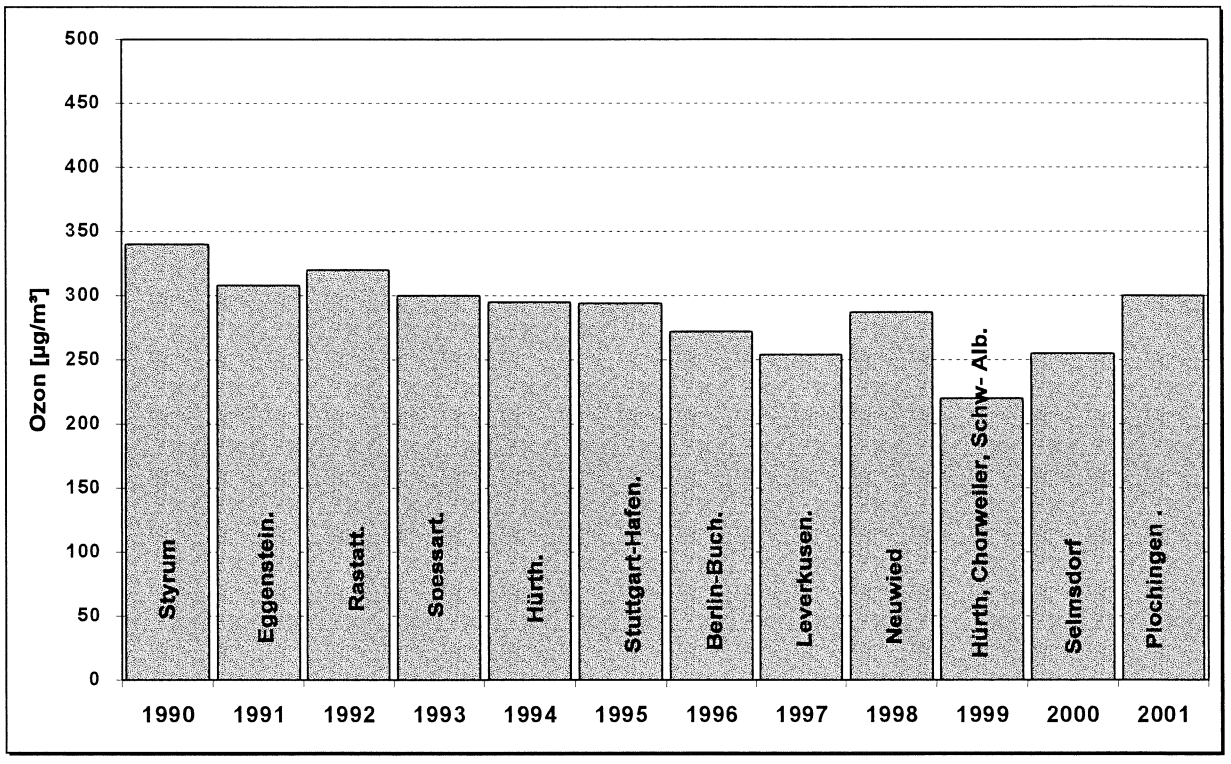



Abbildung 73: Jährliche maximale Ozonkonzentrationen in $\mu g/m^3$ mit Angabe der registrierenden Messstelle

Wesentlich deutlicher sichtbar ist die Abnahme des Auftretens von Ozonspitzenwerten in Abbildung 74 bis Abbildung 77.

Abbildung 74 zeigt die Zahl der Stunden mit Ozonwerten $>240$ $\mu g/m^3$ (1-h-Mittel) im Mittel über die jeweils in Deutschland betriebenen Messstellen, die in der Untersuchungsperiode zwischen 194 und 392 schwankte. In Abbildung 75 ist die Zahl der Tage angegeben, an denen an mindestens einer der deutschen Ozonmessstellen die Ozon-Schwellenwerte für den Schutz der menschlichen Gesundheit *(Ref. 7)* von 240 $\mu g/m^3$ überschritten worden sind. Man erkennt eine deutliche Abnahme der Überschreitungen von 240 $\mu g/m^3$ insbesondere bei den über alle Messstellen gemittelten Stundenzahlen (Abbildung 74).

Abbildung 76 und Abbildung 77 zeigen den entsprechenden Rückgang der Überschreitungen von 180 $\mu g/m^3$. Man erkennt ebenfalls einen Abfall der Überschreitungen, der allerdings schwächer ausgeprägt ist als bei den Überschreitungen von 240 $\mu g/m^3$.

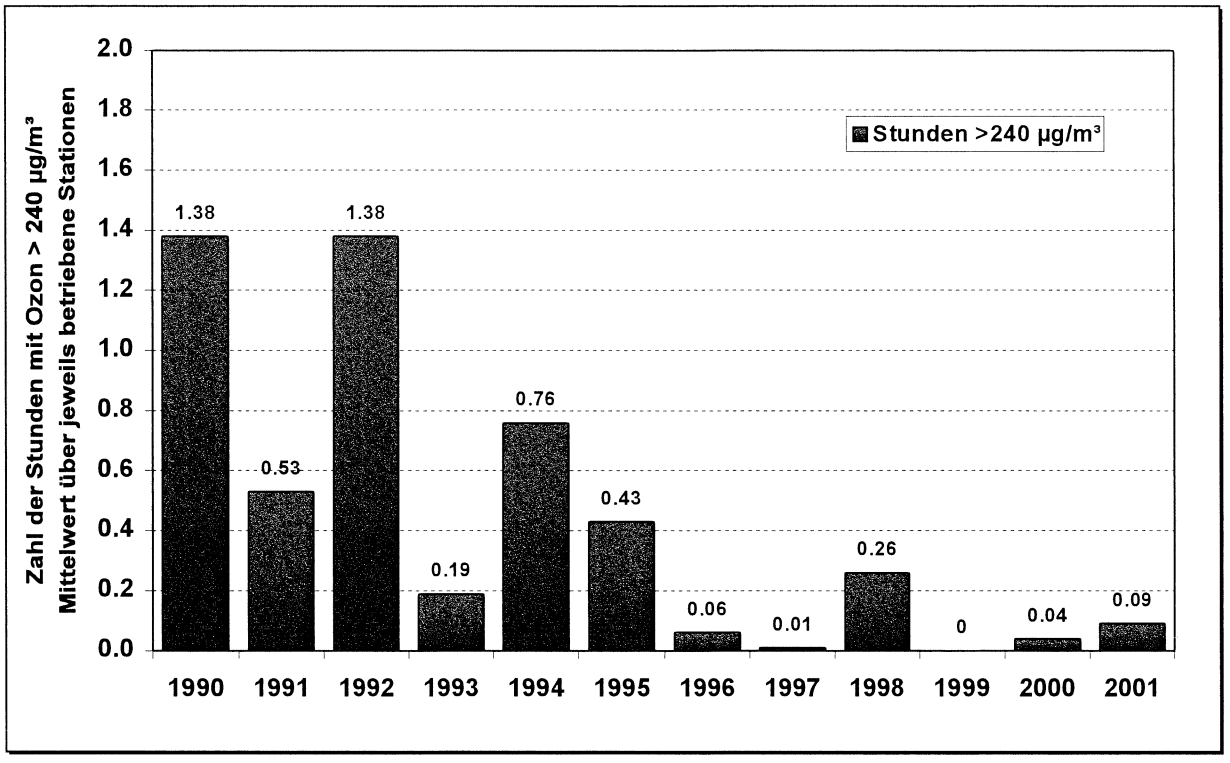



Abbildung 74: Zahl der Stunden mit Ozonwerten > 240 $\mu$g/m³, im Mittel über die jeweils betriebenen Messstellen

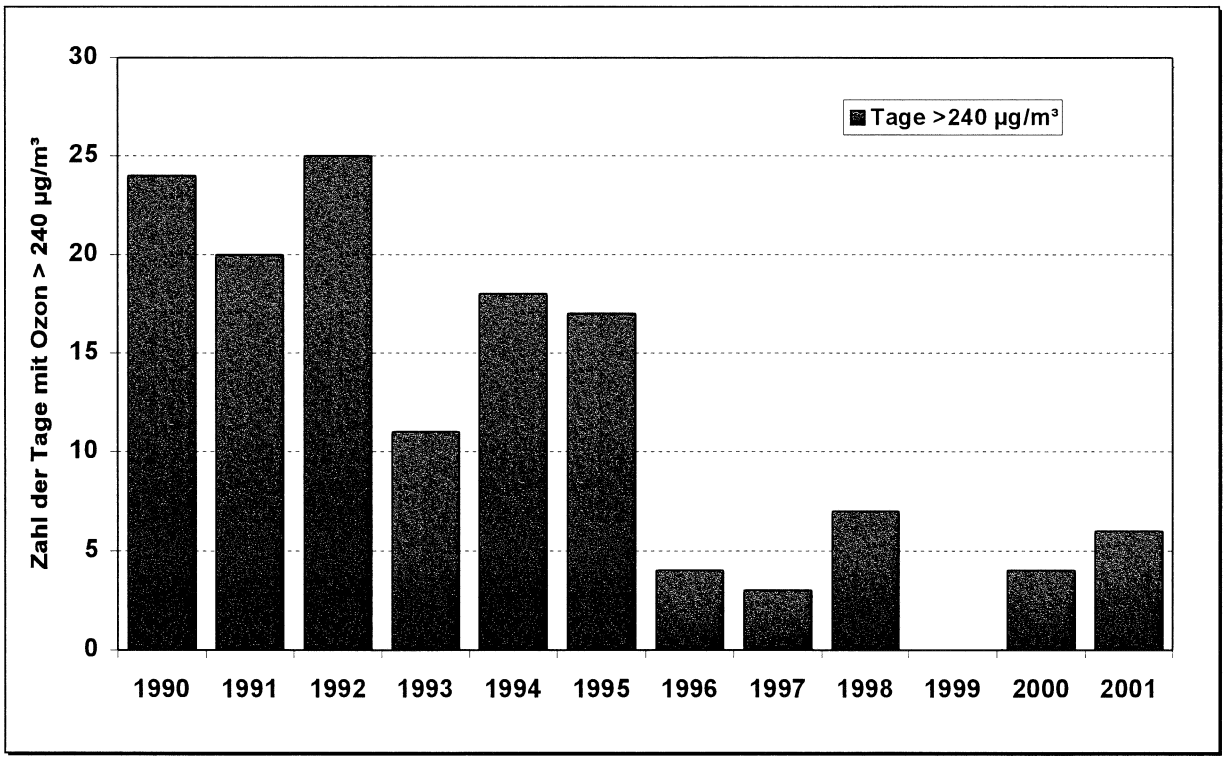



Abbildung 75: Zahl der Tage mit Ozonwerten > 240 $\mu$g/m³

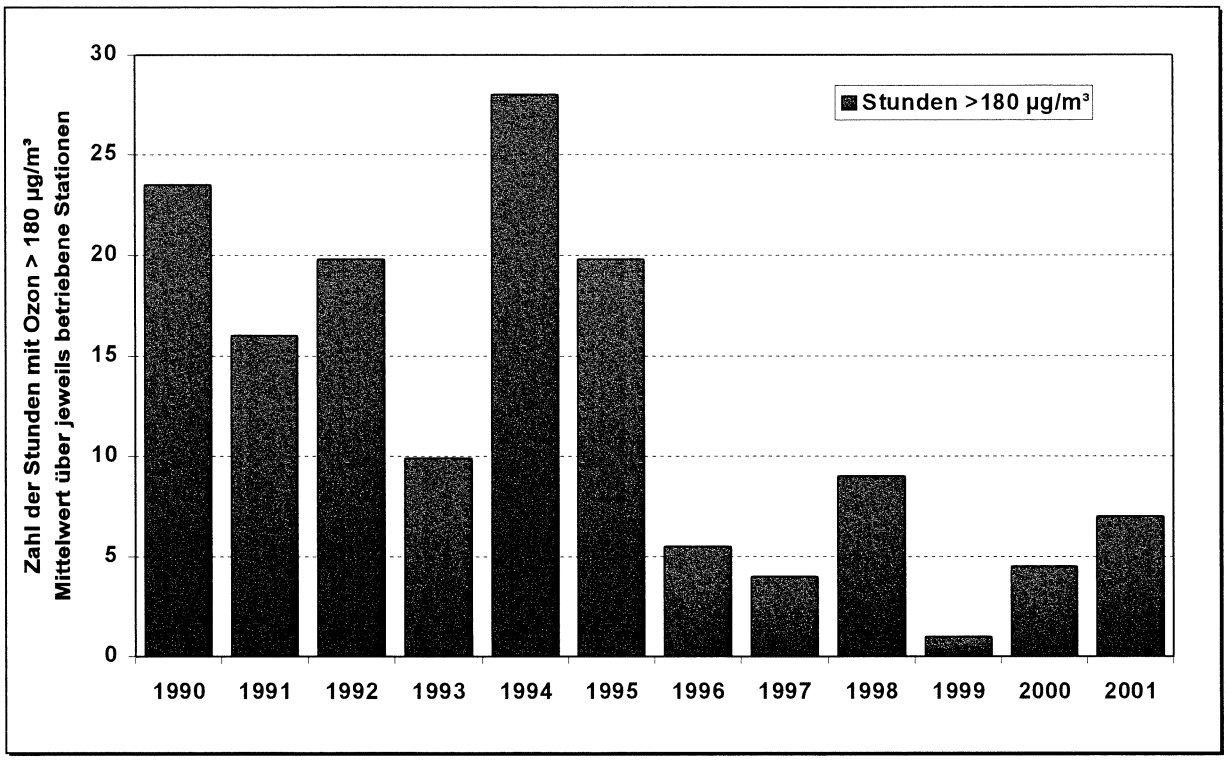



Abbildung 76: Zahl der Stunden mit Ozonwerten > 180 $\mu g/m^3$, im Mittel über die jeweils betriebenen Messstellen

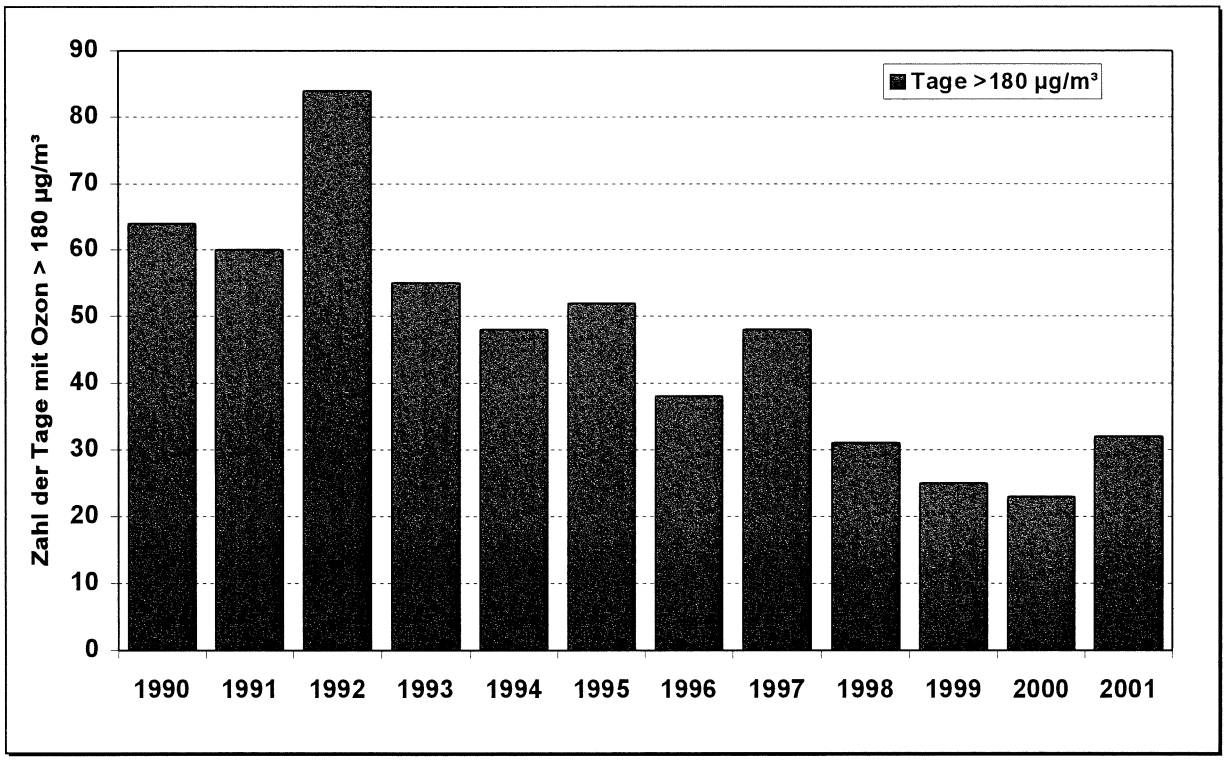



Abbildung 77: Zahl der Tage mit Ozonwerten > 180 $\mu g/m^3$

Der in Abbildung 73 bis Abbildung 77 gezeigte, im Wesentlichen auf die Emissionsminderung von $NO_x$ und VOC zurückzuführenden Rückgang der Ozon-Spitzenkonzentrationen ist durch meteorologisch bedingte Schwankungen überlagert, die zu erheblichen Fluktuationen der Ozon-Spitzenwerte von Jahr zu Jahr führen können.

Während im Jahre 1999 der niedrigste maximale Stundenwert (219 $\mu g/m^3$) seit 1990 beobachtet wurde, traten in den Jahren 2000 (253 $\mu g/m^3$) und 2001 (299 $\mu g/m^3$) erneut relativ hohe Spitzenwerte auf, die neben noch immer hohen Emissionen im lokalen bis regionalen Maßstab auch auf extreme Wetterbedingungen zurückzuführen sind. Die Ozon-Episode im Jahre 2000 wurde ausführlich in *Ref. 8* beschrieben.

In diesem Bericht werden die Ozon-Episoden in Deutschland im Jahre 2001 näher untersucht.

## 3.2.2 Analyse der Ozonepisoden im Juli und August 2001

### 3.2.2.1 Zeitliche und räumliche Verteilung der Ozonkonzentrationen

Im Jahr 2001 gab es in Deutschland im Vergleich zu 1999 und 2000 wieder häufiger hohe Ozonwerte über 240 $\mu g/m^3$ (1-h-Mittel). Die Überschreitungen von 240 $\mu g/m^3$ traten Ende Juli vor allem in Baden-Württemberg sowie zwischen dem 24. und 26. August 2001 in Nordrhein-Westfalen während mehrerer Hitzeperioden auf. Der maximale Ozonwert wurde am 31. Juli 2001 mit 299 $\mu g/m^3$ in Plochingen (bei Stuttgart) gemessen (Tabelle 78).

Abbildung 78 zeigt die zeitliche Verteilung der Häufigkeit der Schwellenwert-überschreitungen von 180 $\mu g/m^3$, Abbildung 79 zeigt die entsprechende Verteilung der Überschreitungen von 240 $\mu g/m^3$. Angegeben ist die Zahl der Stunden mit Überschreitungen von 180 $\mu g/m^3$ bzw. 240 $\mu g/m^3$.

Der Schwellenwert von 180 $\mu g/m^3$ wurde 2001 an insgesamt 33 Tagen, der Wert von 240 $\mu g/m^3$ an insgesamt 7 Tagen überschritten.

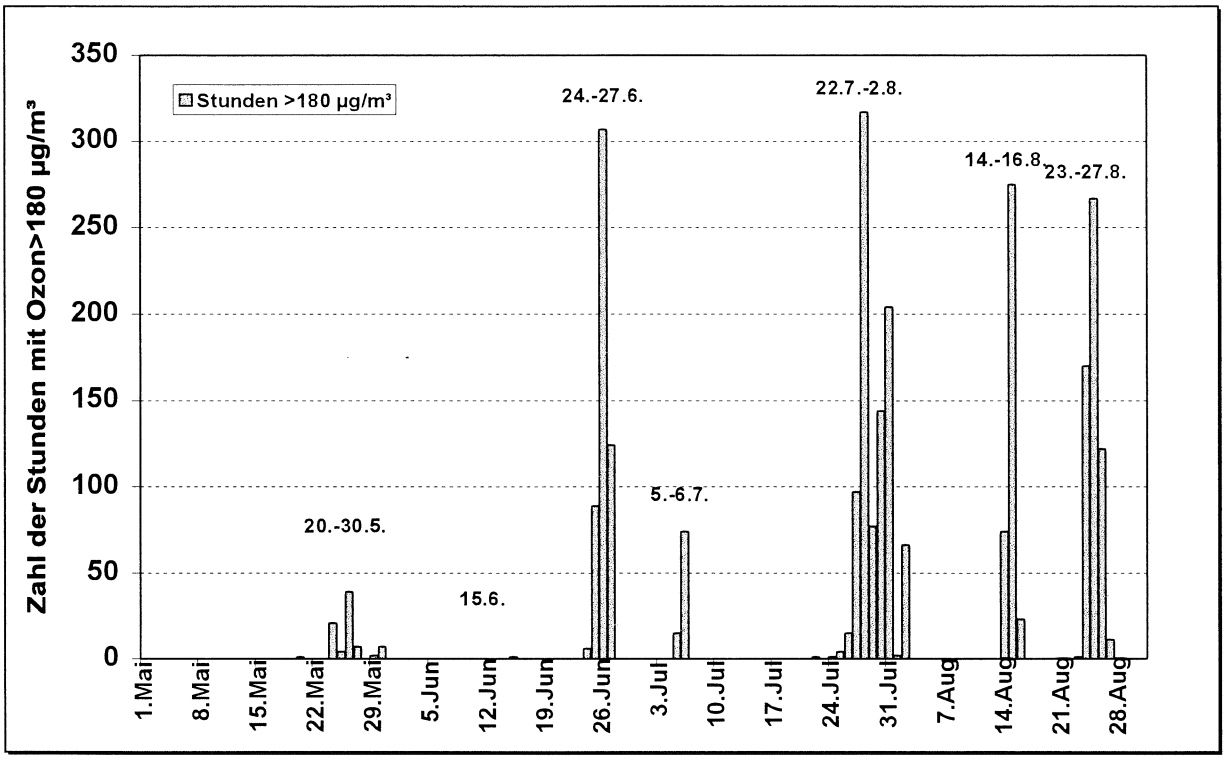



Abbildung 78: Zeitliche Verteilung der Häufigkeit der Schwellenwertüberschreitungen (Stunden) von 180 $\mu$g/m³

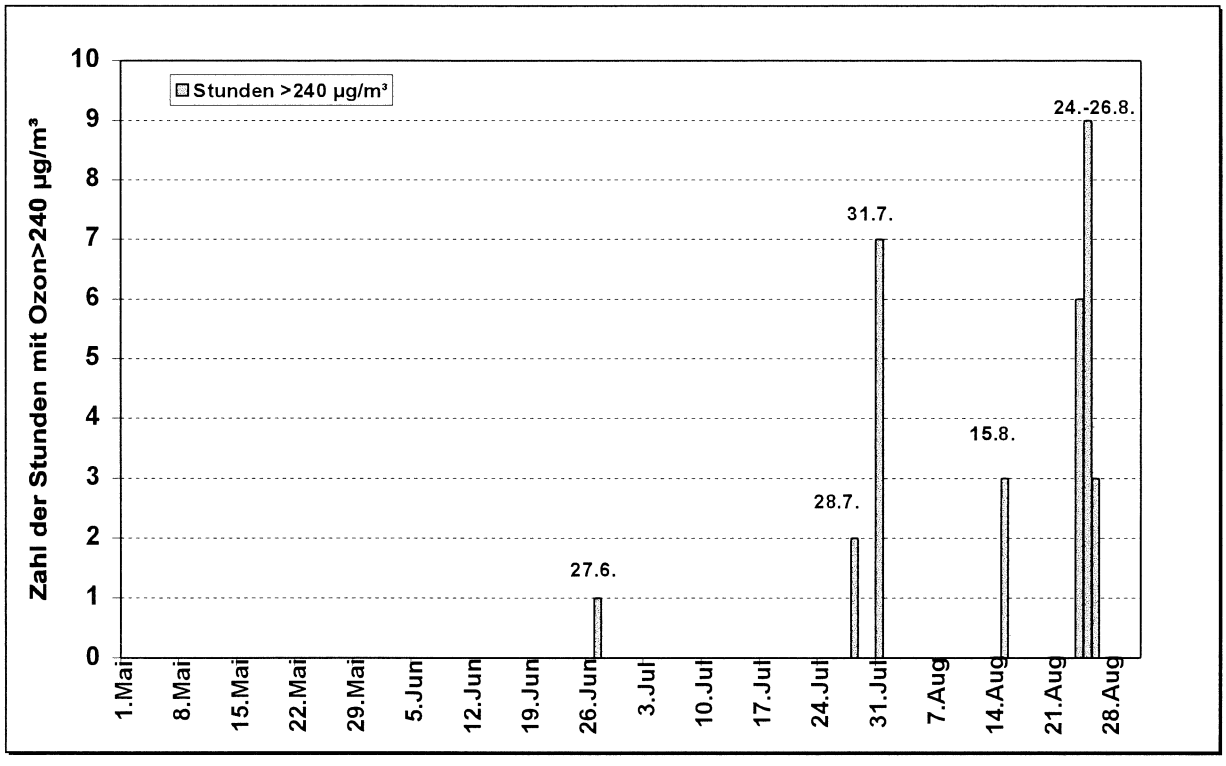



Abbildung 79: Zeitliche Verteilung der Häufigkeit der Schwellenwertüberschreitungen (Stunden) von 240 $\mu$g/m³

Die höchsten Stundenwerte wurden an folgenden Orten und Tagen beobachtet (Tabelle 78):

Tabelle 78: Maximale Ozon-Stundenwerte in Deutschland im Jahre 2001 BW: Baden-Württemberg, PR: Rheinland-Pfalz, NW: Nordrhein-Westfalen

| **Station** | **Bundesland** | **Datum** | **1-Std-Maximalwert** |
|---|---|---|---|
| Plochingen | Baden-Württemberg | 31.7.2001 | 299 $\mu g/m^3$ |
| Wesel-Feldmark | Nordrhein-Westfalen | 25.8.2001 | 289 $\mu g/m^3$ |
| Westerwald-N. | Rheinlandpfalz | 28.7.2001 | 265 $\mu g/m^3$ |
| Solingen-Wald | Nordrhein-Westfalen | 24.8.2001 | 258 $\mu g/m^3$ |
| Moers-Meerbeck | Nordrhein-Westfalen | 25.8.2001 | 258 $\mu g/m^3$ |
| Hürth | Nordrhein-Westfalen | 25.8.2001 | 254 $\mu g/m^3$ |
| Köln-Chorweiler | Nordrhein-Westfalen | 26.8.2001 | 253 $\mu g/m^3$ |
| Borken-Gemen | Nordrhein-Westfalen | 15.8.2001 | 252 $\mu g/m^3$ |
| Hürth | Nordrhein-Westfalen | 24.8.2001 | 250 $\mu g/m^3$ |
| Göppingen | Baden-Württemberg | 31.7.2001 | 250 $\mu g/m^3$ |
| Kehl-Hafen | Baden-Württemberg | 26.8.2001 | 248 $\mu g/m^3$ |
| Dormagen-Horrem | Nordrhein-Westfalen | 26.8.2001 | 248 $\mu g/m^3$ |
| Kehl-Hafen | Baden-Württemberg | 28.7.2001 | 245 $\mu g/m^3$ |
| Plochigen | Baden-Württemberg | 27.6.2001 | 244 $\mu g/m^3$ |
| Bernhausen | Baden-Württemberg | 31.7.2001 | 243 $\mu g/m^3$ |
| Langenfeld-R. | Nordrhein-Westfalen | 24.8.2001 | 243 $\mu g/m^3$ |
| Leverkusen-M. | Nordrhein-Westfalen | 24.8.2001 | 242 $\mu g/m^3$ |
| Köln-Rodenkirchen | Nordrhein-Westfalen | 24.8.2001 | 242 $\mu g/m^3$ |

In Abbildung 80 bis Abbildung 83 ist die räumliche Verteilung der Ozonüberschreitungen für die Sommersmogepisoden am 31.Juli (Abbildung 80) sowie für den 24. bis 26. August 2001 (Abbildung 81 bis Abbildung 83) dargestellt.

# Ozonüberschreitungen am 31.7.2001 in Deutschland

(Meßnetze der Bundesländer und des Umweltbundesamtes)

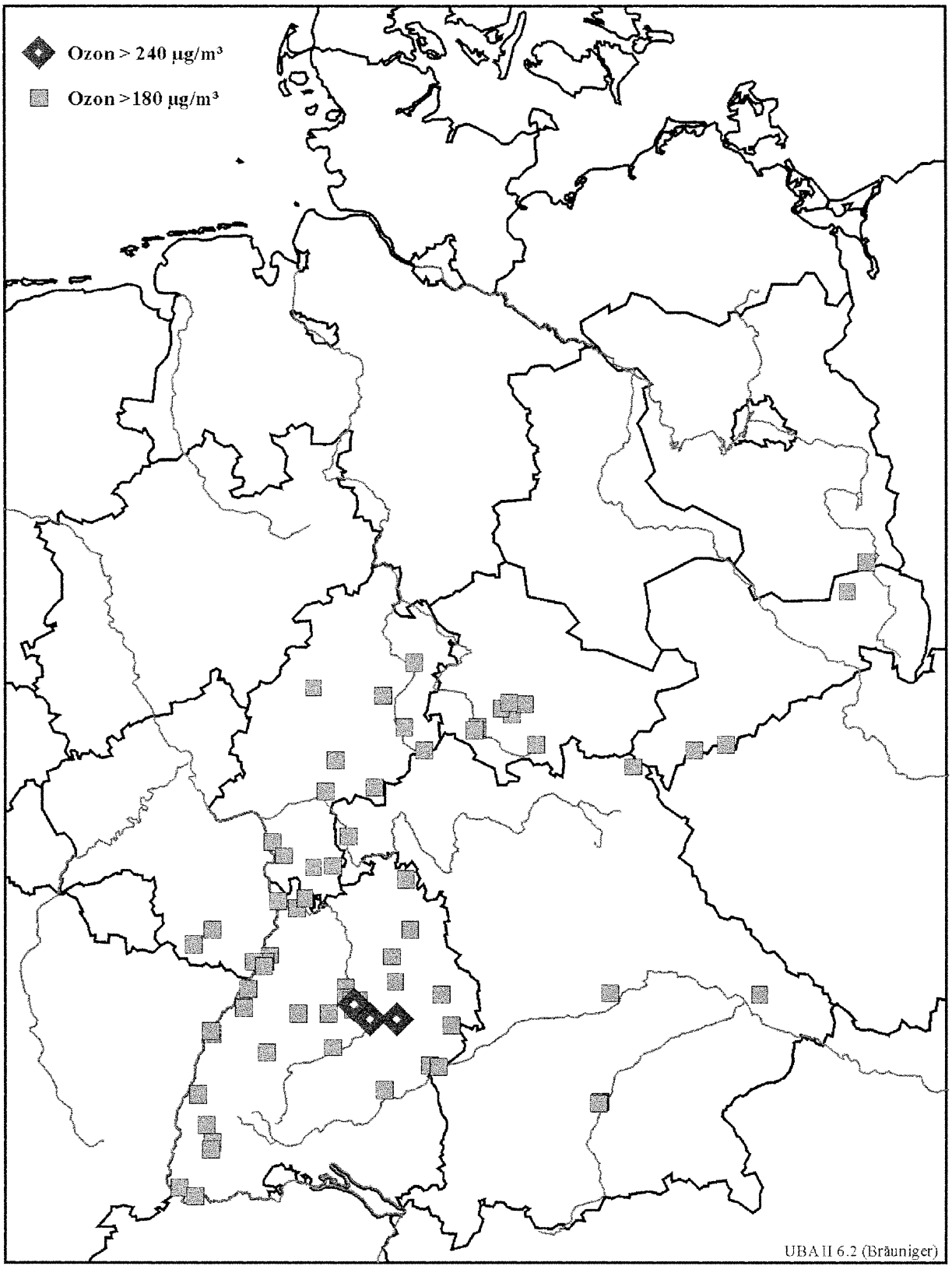



Abbildung 80: Ozonschwellenwert-Überschreitungen an deutschen Ozon-Messstellen am 31. Juli 2001.

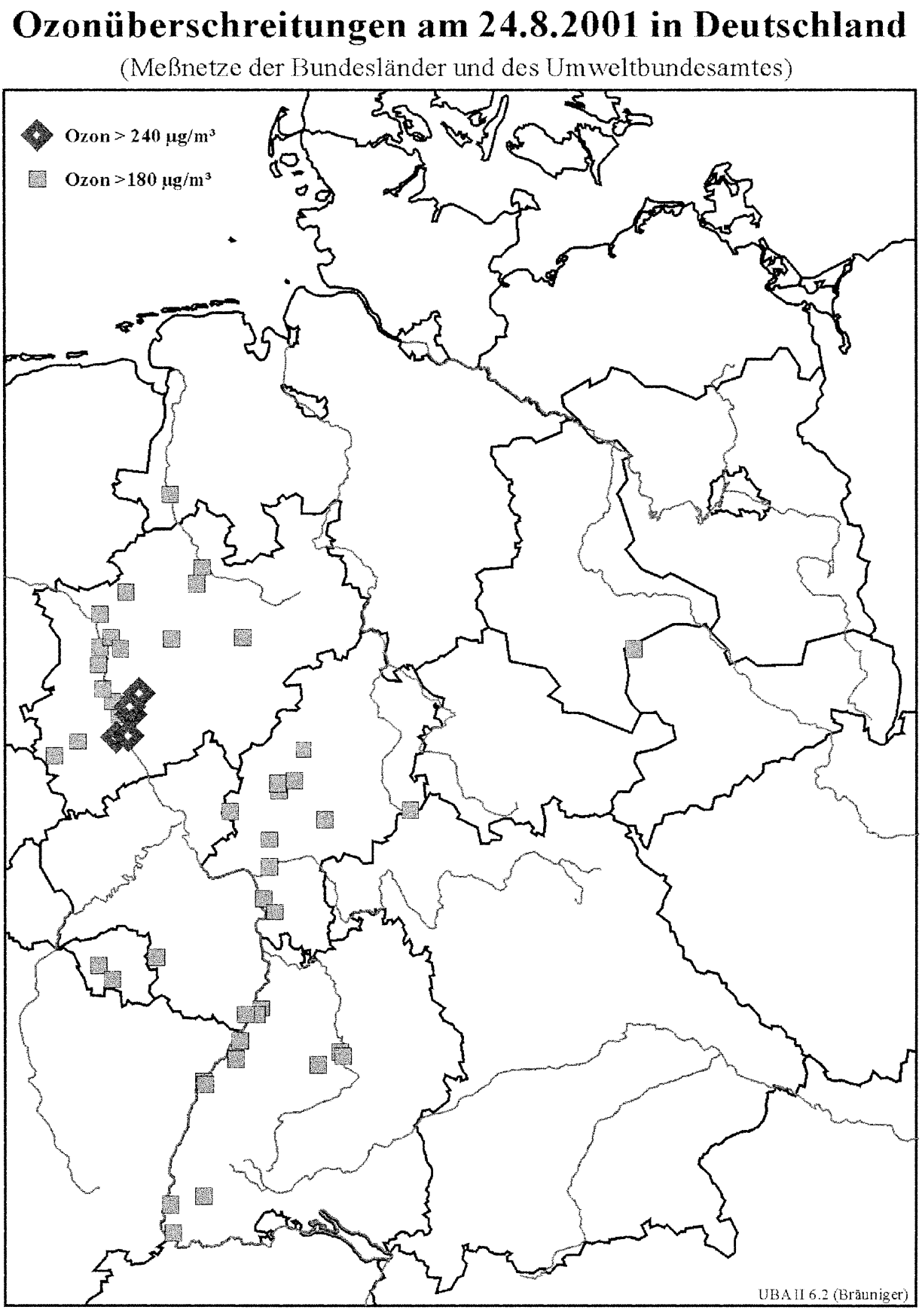



Abbildung 81: Ozonschwellenwert-Überschreitungen an deutschen Ozon-Messstellen am 24. August 2001.

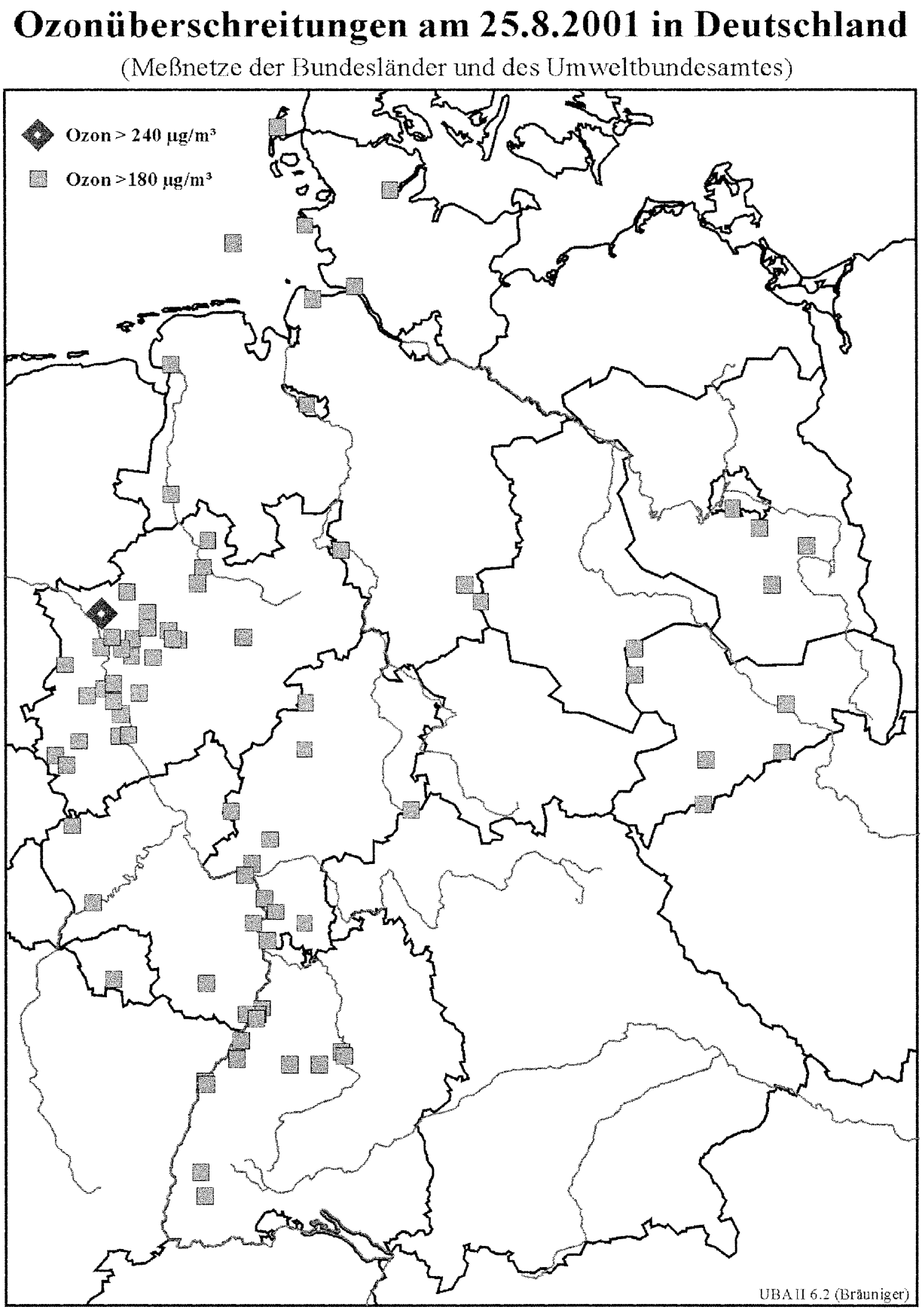



Abbildung 82: Ozonschwellenwert-Überschreitungen an deutschen Ozon-Messstellen am 25. August 2001.

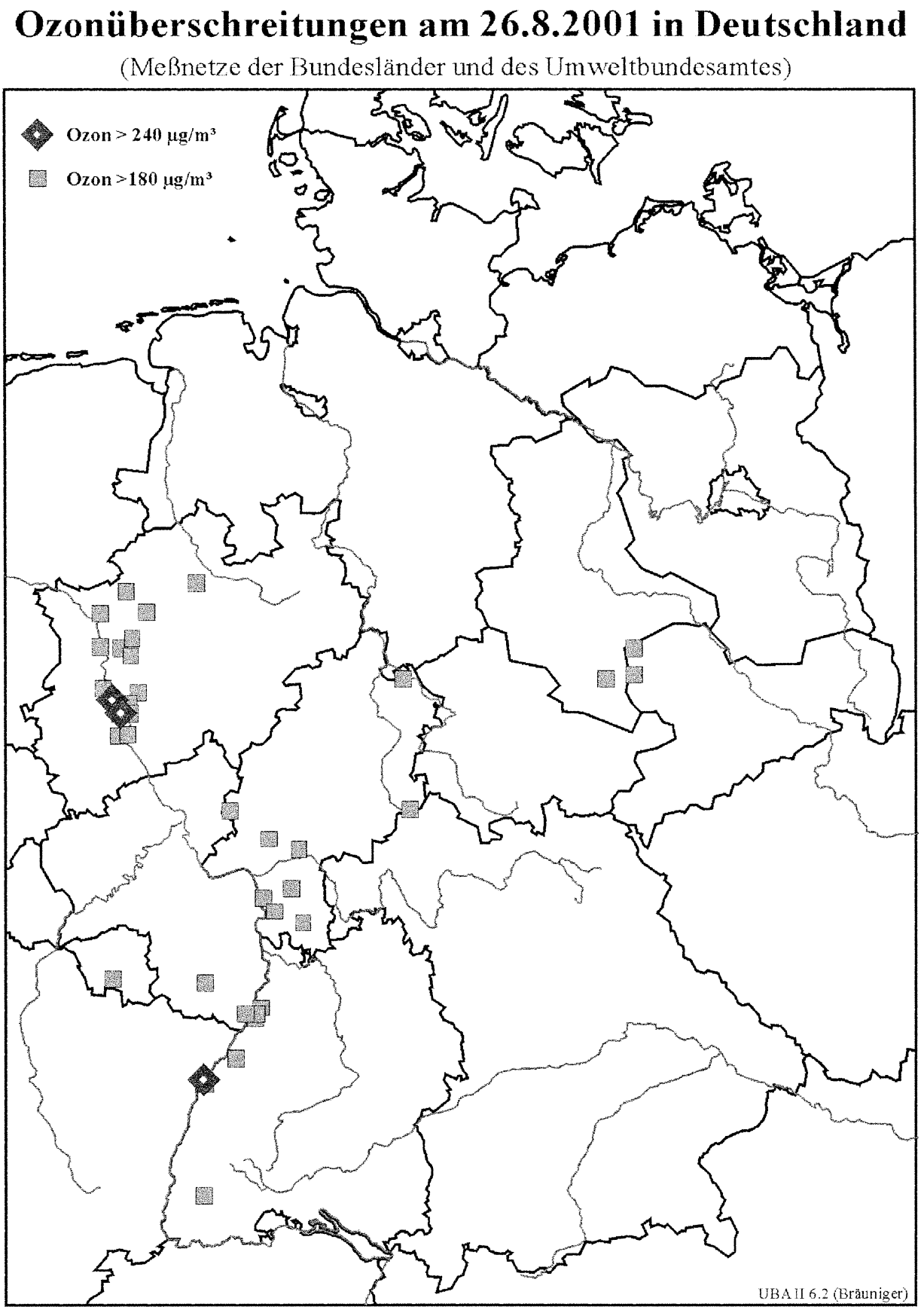



Abbildung 83: Ozonschwellenwert-Überschreitungen an deutschen Ozon-Messstellen am 26. August 2001.

Man erkennt deutlich zwei Zentren mit Überschreitungen von 240 $\mu g/m^3$:

- am 31. Juli. 2001 östlich des Großraums Stuttgart (Plochingen, Bernhausen, Göppingen)

- am 24./25./26. August 2001 in der näheren Umgebung von Köln (Köln-Chorweiler, Köln-Rodenkirchen, Hürth, Dormagen-Horrem, Langenfeld-Reusrath, Leverkusen-Manford, Solingen-Wald).

Im Gegensatz zur höchsten gemessenen Ozonkonzentration im Jahre 2000 (253 $\mu g/m^3$ in Selmsdorf, Mecklenburg-Vorpommern), bei der neben lokal/regionalen Effekten auch der Ferntransport erheblich zu den hohen Ozonspitzen beigetragen hat, handelt es sich bei den Maximalwerten im Jahr 2001 im Wesentlichen um quasi-lokale Effekte, die zu den hohen Ozonwerten geführt haben (vgl. hierzu Abschnitt 3.2.2.3).

### 3.2.2.2 Meteorologische Situation

Im Jahre 2001 wurde zum ersten Mal der Schwellenwert von 240 $\mu g/m^3$ am 27. Juni in Baden-Württemberg (Plochingen) überschritten. Unter vorübergehendem Hochdruckeinfluss über Mitteleuropa kam es im Südwesten Deutschlands aufgrund mehrtägiger ungehinderter Sonneneinstrahlung gerade zum Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes zu einer kräftigen Erwärmung der unteren Troposphäre. Stellenweise traten Tageshöchsttemperaturen von etwas über 30 °C auf. Damit waren jene meteorologischen Bedingungen vorhanden, die für die Bildung hoher Ozonkonzentrationen notwendig sind. Mit dem Durchzug einer flachen Tiefdruckrinne vom 27. zum 28. Juni wurde aber diese Wetterlage wieder rasch beendet.

Mit dem Aufbau einer Hochdruckbrücke ab dem 21. Juli stellte sich über Deutschland eine sonnenscheinreiche Witterungsphase mit kräftiger Erwärmung ein. In den südlichen und westlichen Gebieten Deutschlands herrschten ab dem 22. Juli sommerliche bis hochsommerliche Temperaturen vor, die am Monatsende ihren Höhepunkt fanden (Tageshöchsttemperaturen bis 32 °C). Entsprechend dieser Entwicklung konnte sich eine Ozonepisode ausbilden. Die Ozonkonzentrationen stiegen von Tag zu Tag an, wobei schließlich in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz gebietsweise der Schwellenwert von 240 $\mu g/m^3$ überschritten wurde. Mit dem Vordringen atlantischer Tiefausläufer nach Mitteleuropa ging diese Ozonepisode am 3. August zu Ende.

Im August kam es noch zweimal zu Entwicklungen von Wetterlagen, die kräftige Anstiege der Ozonkonzentrationen mit Überschreitungen des Schwellenwertes von 240 $\mu g/m^3$ zur Folge hatten. Mitte des Monats strömten kurzzeitig maritime tropische Luftmassen nach Mitteleuropa. In weiten Teilen Deutschlands – bis hinauf nach Schleswig-Holstein – wurden Tageshöchsttemperaturen zwischen 30 °C und 35 °C gemessen. Sie stellten die Höchstwerte des Jahres dar. Die warme Südströmung mit gleichzeitig sonnigem Wetter hielt aber nicht lange an, so dass nur an einem Tag und an einer Station in Nordrhein-Westfalen (Borken-Gemen) ein 1-Std.-Ozonwert von 252 $\mu g/m^3$ zustande kam.

Eine echte Ozonepisode war zwischen dem 24. und 26. August zu beobachten. Ein Hochdruckgebiet über Skandinavien weitete seinen Schwerpunkt in Richtung Schwarzes Meer aus. Damit gelangte Deutschland in den Zustrom kontinentaler Warmluft mit reichlich

Sonnenschein und bis über 30 °C ansteigenden Temperaturen. In Nordrhein-Westfalen kam es dabei mehrfach und in Baden-Württemberg zu Überschreitungen des Schwellenwertes von 240 $\mu g/m^3$. Mit der Umstellung der Wetterlage und dem Einfließen von Nordseeluft nach Deutschland fand diese Ozonepisode am 27. August ihr abruptes Ende.

### 3.2.2.3 Interpretation der hohen Ozonwerte

Die Bildung hoher Ozonkonzentrationen erfordert die Erfüllung besonderer emissionsseitiger und meteorologischer Voraussetzungen: Das Vorhandensein der beiden Ozonvorläufer $NO_x$ und VOC in ausreichend hohen Konzentrationen, eine intensive Sonneneinstrahlung (UV-Strahlung) und eine mehrere Tage andauernde stabile sommerliche Schönwetterperiode, die zu einer Speicherung von Ozon innerhalb der atmosphärischen Mischungsschicht führt. *(Ref. 1)*.

Dass Ozonspitzenwerte über 240 $\mu g/m^3$ während der Sommersmog-Episoden im Jahr 2001 häufiger als in den Vorjahren auftraten, war im Wesentlichen eine Folge der für die Ozonbildung günstigeren meteorologischen Bedingungen im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren. Die meteorologische Situation während der Ozonepisoden war überwiegend durch schwachwindige, mehrere stabile Hochdruckwetterlagen mit Temperaturen großräumig über 30 °C und Mischungsschichthöhen zwischen 1.5 km und 2 km geprägt (siehe Abschnitt 3.2.2.2).

Um Aussagen über die Herkunft der Ozonbelastung machen zu können, wurden die Zugbahnen der Luftmassen über einen Zeitraum von 3 Tagen vor Eintreffen an den Stationen anhand sog. Rückwärtstrajektorien zurückverfolgt. Die Ankunftszeiten der Trajektorien wurden so gewählt, dass die Luftmassen etwa zum Zeitpunkt der maximalen Ozonkonzentrationen die Stationen erreichten.

In Abbildung 84 bis Abbildung 87 ist der Verlauf der Rückwärtstrajektorien beispielhaft für die Stationen Plochingen (Ankunft der Trajektorie am 31.7.2001, 15:00 UTC) sowie für Rodenkirchen (Ankunft am 24.8.2001, 15:00 UTC), Meerbeck (Ankunft am 25.8.2001, 18:00 UTC) und für Köln-Chorweiler (Ankunft am 26.8.2001, 15:00 UTC) für unterschiedliche Höhenniveaus dargestellt (Boden, 950 hPa (540 m), 900 hPa (1000 m) und 850 hPa (1500 m).

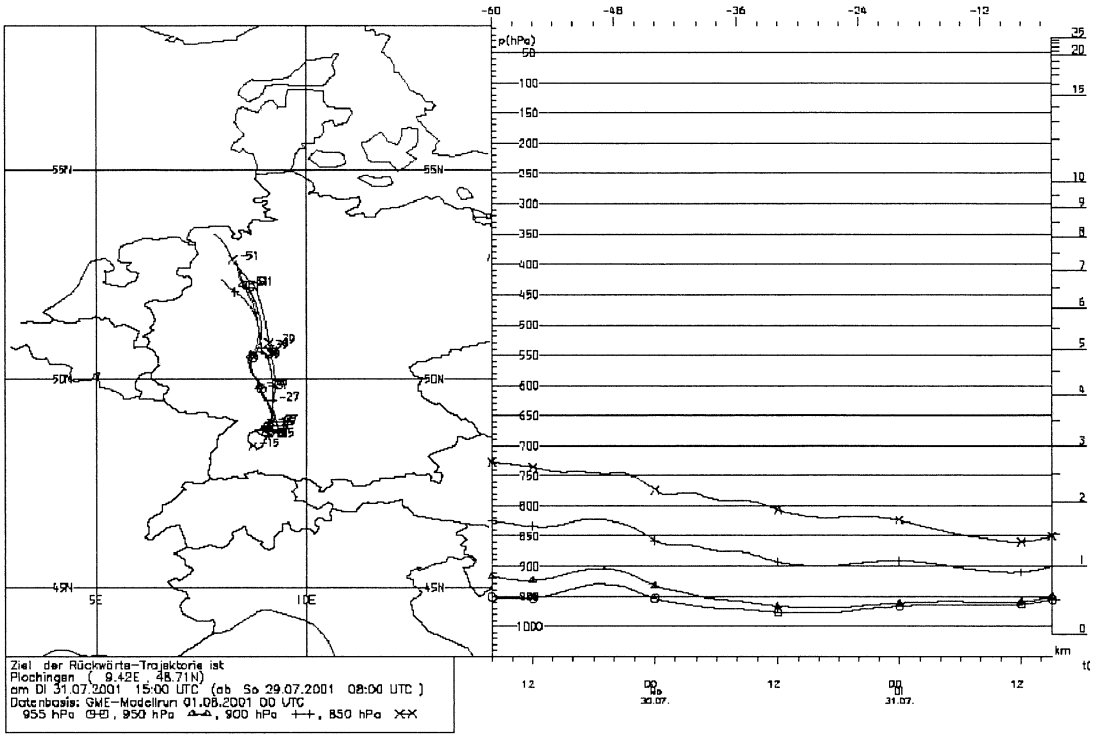



Abbildung 84: Rückwärtstrajektorien nach Plochingen am 31.7.2001, 15:00 Uhr UTC in unterschiedlichen Höhenniveaus. Linke Abbildung.: horizontaler Verlauf der Trajektorien, rechte Abbildung: vertikaler Verlauf der Trajektorien

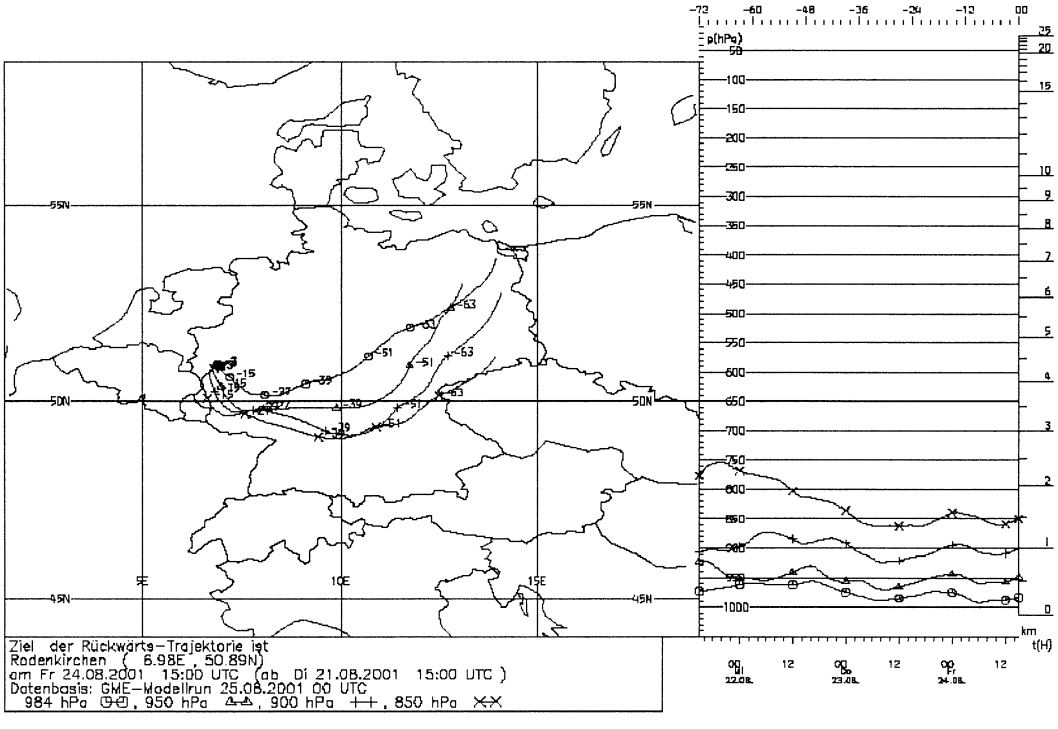



Abbildung 85: Rückwärtstrajektorien nach Rodenkirchen am 24.8.2001, 15:00 Uhr UTC in unterschiedlichen Höhenniveaus. Linke Abbildung.: horizontaler Verlauf der Trajektorien, rechte Abbildung: vertikaler Verlauf der Trajektorien

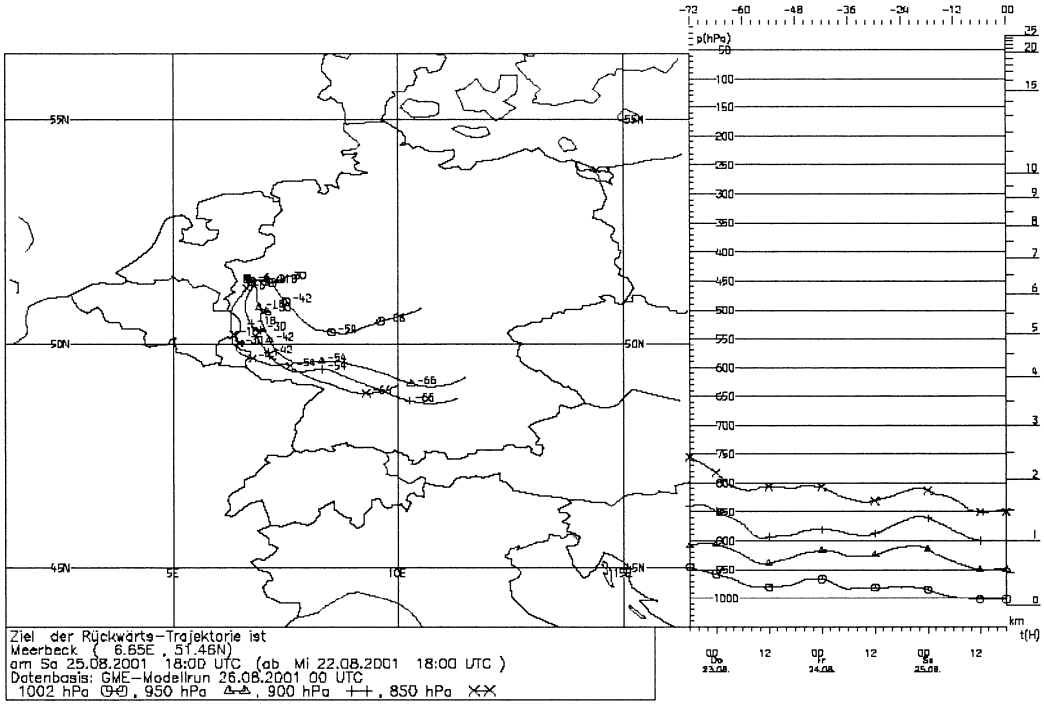



Abbildung 86: Rückwärtstrajektorien nach Meerbeck am 26.8.2001, 18:00 Uhr UTC in unterschiedlichen Höhenniveaus. Linke Abbildung.: horizontaler Verlauf der Trajektorien, rechte Abbildung: vertikaler Verlauf der Trajektorien

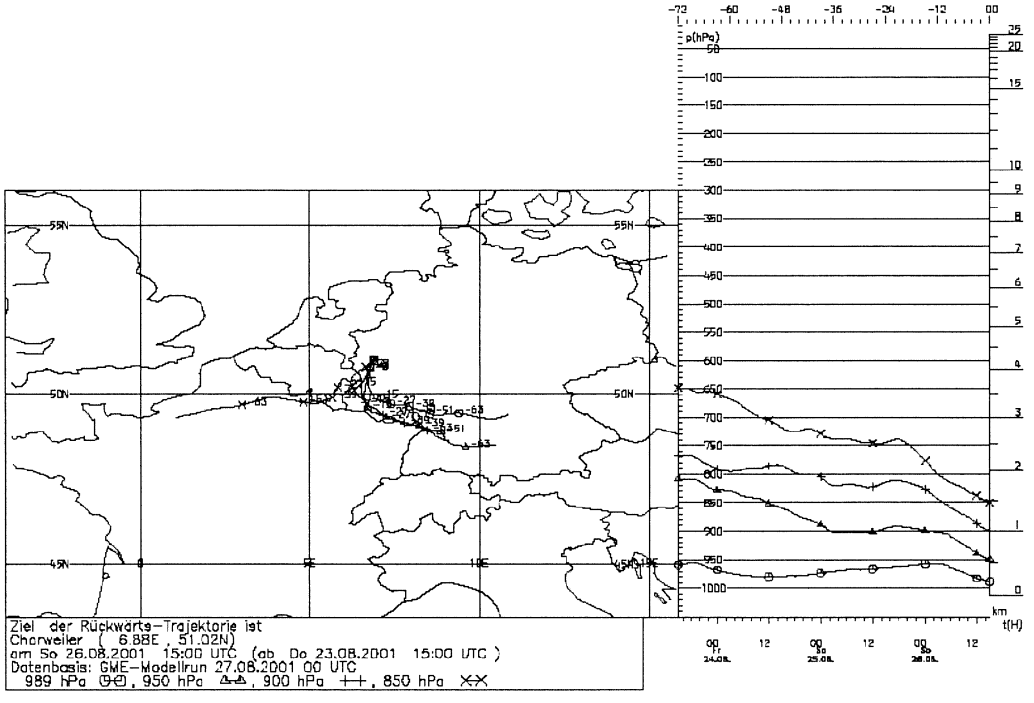



Abbildung 87: Rückwärtstrajektorien nach Köln-Chorweiler am 24.8.2001, 15:00 Uhr UTC in unterschiedlichen Höhenniveaus. Linke Abbildung.: horizontaler Verlauf der Trajektorien, rechte Abbildung: vertikaler Verlauf der Trajektorien

Wie der Verlauf der Trajektorien zeigt, sind die Luftmassen bis etwa 24 Stunden vor Erreichen der Stationen relativ rasch, danach aber sehr langsam und bisweilen mehrmals über Gebiete mit einer hohen Emissionsdichte der Ozonvorläufer vagabundiert, wodurch sich innerhalb der Mischungsschicht ein hoher Ozonsockel aufgebaut hat, auf dem dann über Gebieten mit hoher Emissionsdichte der Vorläufer oder im Lee dieser Gebiete (z.B. im Lee von Stuttgart oder im Kölner Raum) Ozonspitzen aufgesetzt wurden.

Der vertikale Verlauf der Trajektorien für 850 hPa - und zum Teil auch für 900 hPa - zeigt ein schwaches Absinken der Luftmassen während der 3 Tage vor Eintreffen an den Stationen. Der höhenabhängige Verlauf der Trajektorien in den bodennahen Druckniveaus (vom Boden bis etwa 900 hPa (ca. 1000 m)) zeigt aber auch deutlich, dass die hohen bodennahen Ozonkonzentrationen nicht durch Transport aus großen Höhen verursacht worden sind, sondern im Wesentlichen photochemisch innerhalb der Mischungsschicht aus den Ozonvorläufern $NO_x$ und VOC gebildet worden sind.

Die meteorologischen Voraussetzungen für sehr hohe Ozonwerte waren großräumig sehr günstig (siehe Abschnitt 3.2.2.2), die gemessenen Ozonspitzen traten aber wesentlich kleinräumiger nur in solchen Gebieten auf, die neben den günstigen meteorologischen Bedingungen auch eine hohe Emissionsdichte der Ozon-Vorläufer aufwiesen wie beispielsweise im Großraum Köln und Stuttgart.

Bei vergleichbaren meteorologischen Situationen wie im Sommer 2001 hätten die Ozonspitzenwerte vor 10 bis 15 Jahren bei den damals wesentlich höheren Vorläuferemissionen sehr wahrscheinlich nicht zwischen 200 und 300 $\mu g/m^3$, sondern wesentlich höher gelegen. Insbesondere wäre vor 10 bis 15 Jahren bei vergleichbaren meteorologischen Gegebenheiten die Flächenausdehnung der von sehr hohen Ozonwerten betroffenen Gebieten in Deutschland deutlich größer gewesen als heute.

Die Zahl der Überschreitungen von 180 bzw. 240 $\mu g/m^3$ entspricht im Wesentlichen der Zahl der Überschreitungen in den Jahren 1997 und 1998. Verglichen mit diesen Jahren sind die Emissionen von $NO_x$ und VOC in Deutschland bis heute um etwa 10 bis 15% zurückgegangen (Daten von Strogies sowie eigene Schätzungen für 2001). Der daraus zu erwartende geringe Rückgang der Ozonspitzenwerte wird aber von den erheblichen meteorologisch bedingten Schwankungen überlagert und ist deshalb kaum zu beobachten.

Das gehäufte Auftreten von Ozon-Spitzenwerten während der photochemischen Episoden im Jahr 2001 war in erster Linie eine Folge der für die Ozonbildung günstigeren meteorologischen Bedingungen im Vergleich zu den vorangegangenen Sommern.

Die im Jahr 2001 gehäuft auftretenden hohen Ozonwerte lagen im normalen Schwankungsbereich bei den heutigen Vorläuferemissionen und ändern nichts Grundlegendes an dem klar abfallenden Trend der Ozonspitzenwerte in Deutschland zwischen 1990 und 2001, der im Wesentlichen auf die Emissionsminderungen der Ozonvorläuferstoffe in Deutschland als auch in den europäischen Nachbarstaaten zurückzuführen ist.

## 3.2.3 Zukünftige Entwicklung der Ozonbelastung in Deutschland

Die Ozonspitzenwerte in Deutschland werden angesichts der weiteren Emissionsminderung in Deutschland und Europa in den kommenden Jahren weiter sinken, wenn auch langsamer als zwischen 1990 und 2001 *(Ref. 1)*. Insbesondere werden die Flächen, auf denen hohe Ozonwerte beobachtet werden, zunehmend schrumpfen.

Die Wahrscheinlichkeit von Überschreitungen der EU-Schwellenwerte für die Information der Bevölkerung (1-h-Mittel von 180 $\mu g/m^3$) und besonders für den Schutz der menschlichen Gesundheit (1-h-Mittel von 240 $\mu g/m^3$) wird nach dem Jahr 2010 nur noch gering sein, vollständig ausschließen kann man diese Überschreitungen bei extremen Wetterlagen jedoch nicht *(Ref. 1)*.

Im Gegensatz zu der erfreulichen Entwicklung und Prognose der Ozon-Spitzenkonzentrationen werden die mittleren Ozonkonzentrationen in Deutschland auch in den kommenden Jahren kaum zurückgehen. Das bedeutet, dass die in der neuen Ozonrichtlinie der EU *(Ref. 7)* definierten Schwellenwerte für den Schutz der Vegetation (z.B. AOT40-Werte) – im Gegensatz zu den entsprechenden Ozonwerten für den Schutz der menschlichen Gesundheit - in den kommenden Jahrzehnten kaum eingehalten werden können. Die AOT40-Werte (AOT40: Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb) werden im Wesentlichen durch die mittleren Ozonkonzentrationen (40 bis 85 ppb) bestimmt und nur in geringem Maße durch die Spitzenkonzentrationen (> 90 ppb). *(Ref. 10)*

## 3.2.4 Literatur zu Kapitel 3.2


*(1) Beilke, S. und Wallasch, M. (2000)*
*Die Ozonbelastung in Deutschland seit 1990 und Prognose der zukünftigen Entwicklung. Immissionsschutz 4, 5.Jahrgang, Dezember 2000, S.149-155.*

*(2) Umweltbundesamt (2001)*
*Ozonsituation 2001 in der Bundesrepublik Deutschland, Kurzbericht, November 2001 (Verfasser: U. Dauert und S. Grittner)*

*(3) Enke, W. (2000)*
*Analyse historischer Ozonzeitreihen und Entwicklung einer Methode zur quasi-Wetterbereinigten Trendanalyse von bodennahem Ozon. Abschlussbericht UBA-Forschungsvorhaben Nr.297 42 848.*

*(4) Schneider, (2002)*
*Erkenntnisse zum bodennahen Ozon aus Untersuchungen in Österreich. Vortrag Fachgespräch „Bodennahes Ozon", UBA, Berlin-Spandau, 29./30.April 2002.*

(5) *Neftel, A. (2002)*
*Erkenntnisse zum bodennahen Ozon aus Untersuchungen in der Schweiz. Vortrag: Fachgespräch „Bodennahes Ozon", UBA, Berlin–Spandau, 29./30.April 2002.*

(6) *NEGTAP (2001)*
*Report on Transboundary Air Pollution:Acidification, Eutrophication and Ground-Level Ozone in the UK .Prepared by the National Expert Group on Transboundary Air Pollution (NEGTAP).Chairman: David Fowler.:*

(7) *EU (2002)*
*Richtlinie 2002/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Februar 2002 über den Ozongehalt der Luft, Amtsblatt der EG vom 9.3.2002 (L 67/14).*

(8) *UBA (2001)*
*Jahresbericht 2000 des Messnetzes, Texte 77/01 ,Nov. 2001, S. 122-136.*

(9) *Emissionsdaten Strogies sowie eigene Schätzung bis 2001.*

(10) *UBA (1997)*
*Jahresbericht 1997 Umweltbundesamt , S.158-160.*

(11) *Beilke, S. (1991)*
*Meteorologische Voraussetzungen für die Bildung von Ozon und Sommersmog, Proceedings Ozon-Symposium München, 2.-4. Juli 1991, Herausgeber: TÜV Akademie Bayern/Hessen GmbH München, S. 116-131.*

# 3.3 Einführung von Filterpack-Messungen im UBA-Messnetz

*Karin Uhse, Rolf Graul, Frank Meinhardt und Jutta Fehrenbach*

## 3.3.1 Einleitung

Im Januar 2000 wurde im Messnetz des Umweltbundesamtes die Filterpack-Methode mit Messungen mit Hilfe von imprägnierten Filtern eingeführt. Entsprechend des ECE-Luftreinhalteübereinkommen von 1979, des $SO_2$-Protokoll: United Nations von 1994 und der Verpflichtung Deutschlands und 12 weiterer Staaten zur Reduzierung der $NO_x$-Emissionen im Rahmen der UN-ECE (Sofia-Protokoll von 1988) über die Versauerung durch Luftverunreinigungen wird international gefordert, zur Erfolgskontrolle für das EMEP-Basisprogramm (European Monitoring and Evaluation Programme) u.a. die Schwefelkomponenten Schwefeldioxid ($SO_2$) und Sulfat ($SO_4^{2-}$) und die Stickstoffkomponenten als Summen von Ammoniak und Ammonium ($\sum NH_3+NH_4^+$) sowie Salpetersäure und Nitrat ($\sum HNO_3+NO_3^-$) in Luft und Schwebstaub sowie $NO_2$ in der Luft mit hohen Qualitätsvorgaben zu messen. Dazu empfiehlt EMEP die Filterpack-Methode (siehe Abbildung 88) und für $NO_2$ die Fritten-Methode. Daher werden diese beiden Messmethoden nach umfangreichen Tests seit 2000/2001 auch im Messnetz des UBA eingesetzt. Mit Hilfe der Filterpacks werden in Zingst, Neuglobsow und auf dem Schauinsland seit dem 1.1.2000 und in Westerland und Deuselbach seit dem 1.7.2001 Proben genommen und im Zentrallabor auf dem Schauinsland analysiert. Mit dieser Methode können neben $SO_2$ und $SO_4^=$ zusätzlich die Summen von $NH_3+ NH_4^+$ und $HNO_3+NO_3^-$ bestimmt werden. Die Frittenmethode zur $NO_2$-Messung wurde am 1.1.2001 an allen 8 Messstellen eingeführt. Die zentrale Analyse hierfür erfolgt an der Messstelle Brotjacklriegel.

Bis Ende 1999 wurden im Messnetz die nasschemischen Analysen des Schwefeldioxidgehaltes der Luft mit Hilfe des TCM-Verfahrens durchgeführt. Dieses Messverfahren war seit 1973 ununterbrochen an den personell besetzten Messstellen und von 1980 bis 1993 auch an 10 Probenahme- bzw. Containerstandorten eingesetzt worden. Mit Hilfe dieser fast 30-jährigen Messreihen konnte der drastische Rückgang der Schwefeldioxid-Konzentrationen Mitte/Ende der 80er Jahre in den alten und Anfang der 90er Jahre auch in den neuen Ländern nachgewiesen werden. Der Sulfatgehalt des Schwebstaubes wurde von 1974 bis 1999 an den Messstellen bzw. von 1976 bis 1994 an den Probenahme-/Containerstationen mittels Röntgenfluoreszenz-Messungen bestimmt. Die Messergebnisse der Schwefeldioxid- sowie der Schwefelkonzentrationen im Schwebstaub wurden zusammen mit anderen Komponenten wie z.B. die Niederschlagsinhaltsstoffe, regelmäßig gemäß internationaler Absprachen an EMEP zum NILU (Norwegian Institute for Air Research) in Norwegen gemeldet. Da sowohl das TCM- als auch das Röntgenfluoreszenzverfahren inzwischen nicht mehr dem Stand der Technik entsprachen, wurden beide Methoden im Jahre 2000/2001 von den Messungen mit imprägnierten Filter (Filterpack-Methode) abgelöst. Dies bedeutet einen weiteren Schritt zur Verbesserung der Datenqualität und Erfüllung des EMEP-Programmes.

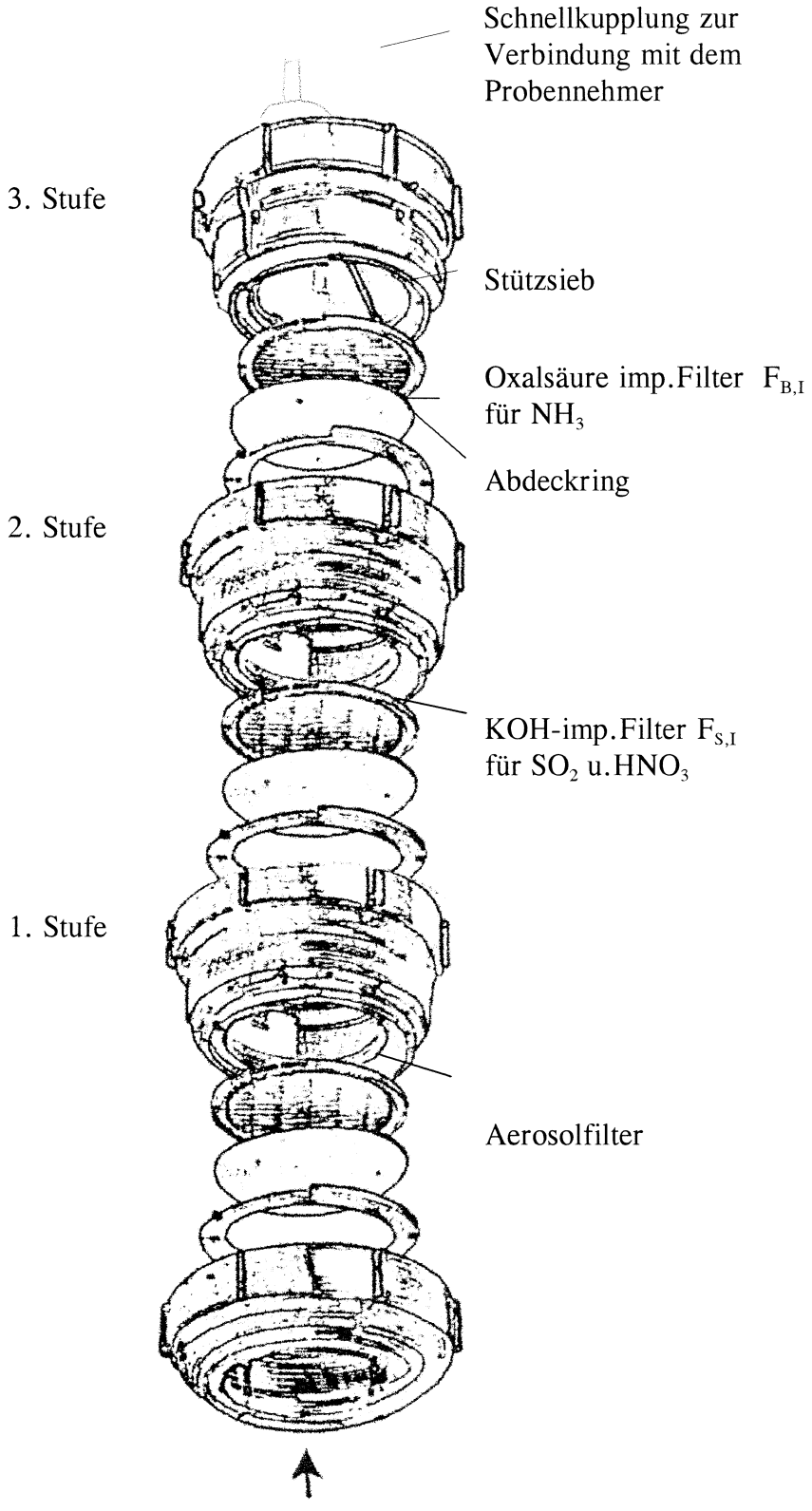



Abbildung 88: 3-Stufenfilterhalter mit einem Membran-Filter und zwei imprägnierten Filtern für Gase

## 3.3.2 Probenahme

Durch in geeigneter Weise alkalisch bzw. mit Säure imprägnierte Cellulosefilter lassen sich in Kombination mit einem Membranfilter sowohl die partikelgebundenen als auch die gas- und dampfförmigen sauren bzw. basischen Komponenten von Luftverunreinigungen bestimmen.

Bei dem im Messnetz zur Anwendung kommenden Verfahren, das im EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis *(Ref. 1, 2)* als verbindliche Methode zur Bestimmung entsprechender Luftschadstoffkomponenten festgeschrieben ist, wird nach der sogenannten Filterpackmethode gearbeitet. Dabei wird die zu analysierende Luft zunächst durch ein Partikelfilter (Membranfilter aus Teflon, Porengröße 2 $\mu$m) gesaugt, an dem sich die partikelgebundenen Komponenten wie Sulfat ($SO_4^{2-}$), Nitrat ($NO_3^-$), Ammonium ($NH_4^+$ ) abscheiden (siehe Abbildung 88). Das sich daran anschließende zweite Filter, ein alkalisch imprägniertes Cellulosefilter, bildet eine Senke für Salpetersäure ($HNO_3$) und Schwefeldioxid ($SO_2$). An dem dritten Filter, einem mit Säure imprägniertem Cellulosefilter, wird Ammoniak ($NH_3$) gebunden.

Die Probenahme wird mit dem SPF4-Staub- und Gasprobennehmer durchgeführt *(Ref. 4)*. Durch die in dem 3-stufigen Filterhalter hintereinander angeordneten Filter (Filterpack) wird ein Luftvolumen von ca. 20 $m^3$ pro Tag gesaugt. Das Gerät ist für den ganzjährigen Betrieb im Freien geeignet und muss so aufgestellt werden, dass eine freie Anströmung von allen Seiten gewährleistet ist.

Das Probenahmesystem wird i. d. R. mit 4 Filterhaltern bestückt (siehe Abbildung 89), die, durch einen Mikrocontroller gesteuert, nacheinander beaufschlagt werden. Der Volumenstrom wird über einen Schwebekörperdurchflussmesser mit Gabellichtschranke überwacht und über die drehzahlgeregelte Drehschieberpumpe konstant gehalten.

Die Gabellichtschranke am Schwebekörperdurchflussmesser ist auf 15 Liter pro Minute eingestellt, damit sich ein Gesamtvolumen von ca. 22 $m^3$ pro 24 Stunden ergibt. Die Temperatur und der Luftdruck werden am Ausgang des Luftstromes gemessen, so dass eine genaue Umrechnung durch den Mikrocontroller von Betriebs-$m^3$ ($Bm^3$) auf Norm-$m^3$ ($Nm^3$) möglich ist. Um das Abscheiden von Partikeln größer 10 $\mu$m zu vermindern, sind die Filterhalter von Einlasshauben umgeben. Diese sind mit Exzenterverschlüssen befestigt und leicht abnehmbar.

Die Filter werden anschließend extrahiert und mittels Ionenchromatographie auf $SO_2$, $SO_4^=$, $HNO_3$, $NO_3^-$ bzw. mittels Fließinjektionsanalyse (FIA) auf $NH_3$ und $NH_4^+$ im Zentrallabor auf dem Schauinsland analysiert.

Die Nachweisgrenzen dieser Methode liegen für $SO_2$ und $SO_4^=$ bei 0.01 $\mu$g S/$m^3$, für $NH_3$ und $NH_4^+$ bei 0.02 $\mu$g N/$m^3$ und für $HNO_3$ und $NO_3^-$ bei 0.01 $\mu$g N/$m^3$ .

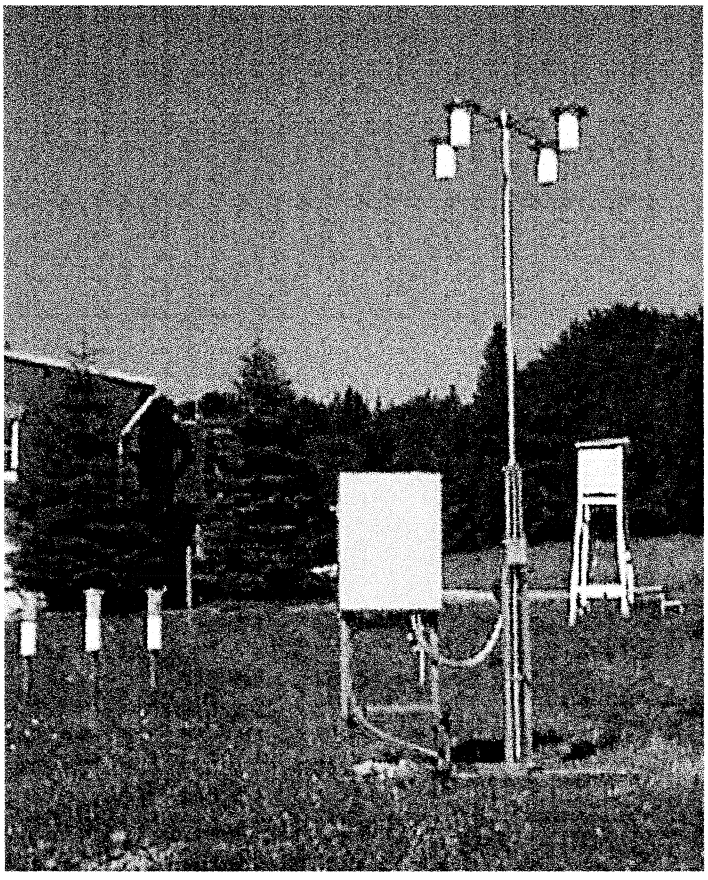


Abbildung 89: Filterhalter mit vier 3-Stufen-Filterhaltern auf dem Schauinsland

### 3.3.3 Vorversuche mit NILU-Vergleichsmessungen

Vor der Einführung dieser Messmethode wurden auf dem Schauinsland umfangreiche Tests, vor allem zur Entwicklung einer für das UBA-Messnetz geeigneten Sammelapparatur durchgeführt.

Vom 5.2.1998 bis 21.12.1998 wurden vom NILU auf dem Schauinsland knapp 100 Parallelmessungen für $SO_2$, $SO_4^=$ sowie $HNO_3$ und $NO_3$ durchgeführt *(Ref. 2)*. Dazu wurde dort vom NILU eine Filterpack-Probenahme-Apparatur aufgebaut. Die Filter wurden nach Norwegen geschickt und beim NILU analysiert. Parallel dazu wurde die Filterpack-Sammel-Apparatur mit dem 3-Stufen-Filterhaltern des UBA aufgestellt und diese Proben auf dem Schauinsland analysiert. Mit Hilfe dieser Parallelmessungen konnte die Probenahme-Apparatur des UBA soweit verbessert und weiter entwickelt werden, dass im Anschluss daran mit den Routinemessungen im UBA-Messnetz begonnen werden konnte. Um eine Beeinflussung des Bodens – vor allem bei den $NH_3$-Messungen - zu vermeiden und um für freie Anströmbarkeit zu sorgen, wurde der Filterhalter in einer Höhe von 3.80 m über dem Boden installiert.

Zwischen den Messergebnissen des NILU und des UBA wurden durchweg gute bis sehr gute Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten r von 0.96 für $SO_2$, 0.94 für $SO_4^=$, 0.92 für $NO_3^-$ und 0.86 für $HNO_3$ erzielt (siehe Abbildung 90a bis d). Insgesamt waren die Messergebnisse des Schauinsländer Labors für alle Komponenten höher als die vom NILU gemessenen Werte. So lagen die $SO_2$-Werte, die vom Schauinsland gemessen wurden, 12.3% über den Ergebnissen des NILUs, bei $SO_4^=$ um 6.1%, bei $NO_3^-$ um 32% und bei $HNO_3$ um 45%. Diese auf den ersten Blick z.T. recht hohen Abweichungen relativieren sich jedoch, wenn sie auf das besonders niedrige Konzentrationsniveau auf dem Schauinsland bezogen werden. Für $SO_2$ und $SO_4^=$ wurden fast nur Werte zwischen 0.017 und 2 $\mu$g S/m³ gefunden und für $NO_3^-$ und $HNO_3$ lag kein Wert über 1.2 $\mu$g N/m³. Das bedeutet, dass eine Abweichung von beispielsweise 12.3% für $SO_2$ bedeutet, dass die Werte nur um durchschnittlich 0.05 $\mu$g S/m³ zu hoch lagen.

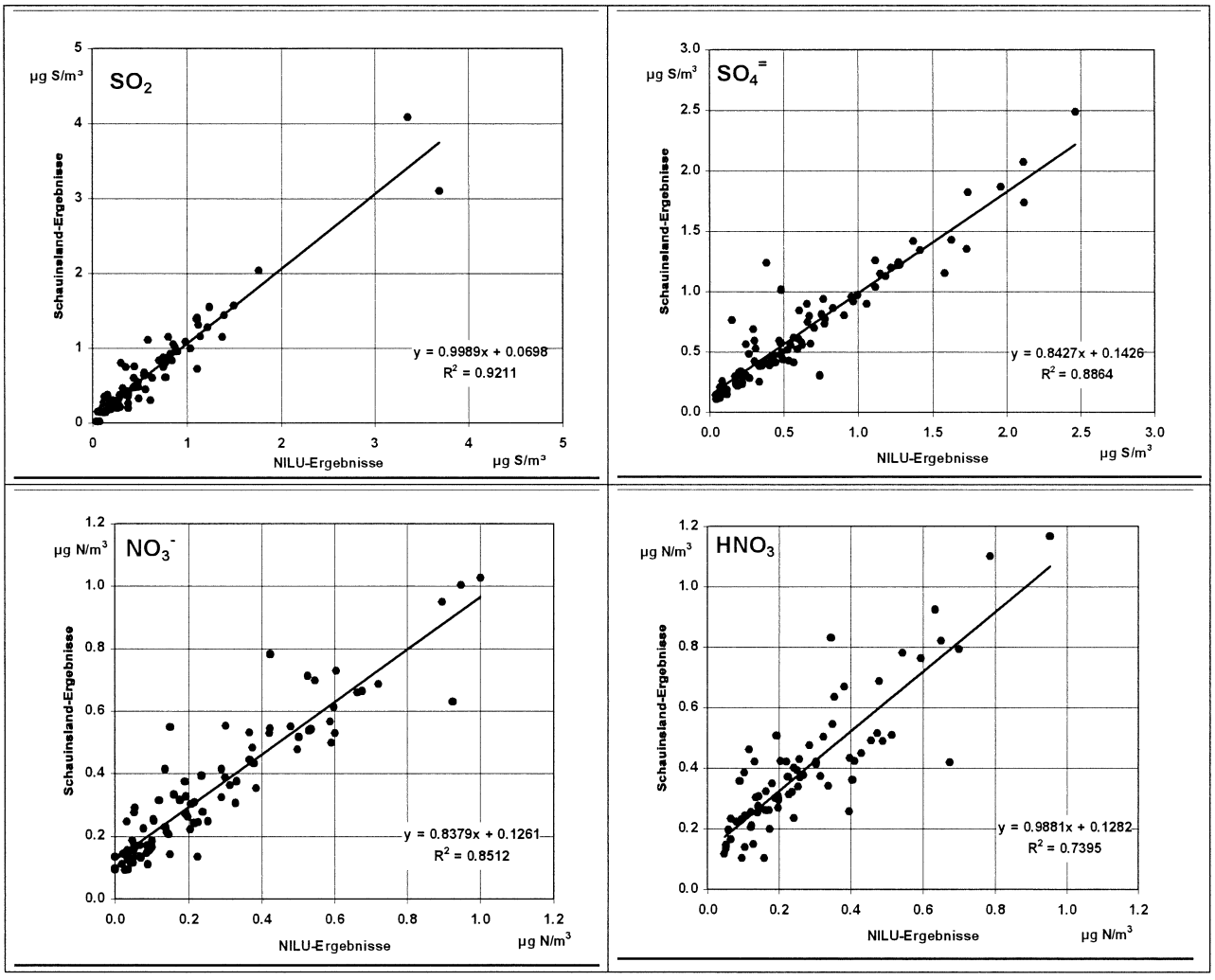



Abbildung 90a bis d: Vergleichsmessungen zwischen NILU und Schauinsland für Schwefeldioxid ($SO_2$) (a), Sulfat im Schwebstaub ($SO_4^=$) (b), Nitrat ($NO_3^-$)(c) und Salpetersäure ($HNO_3$) (d) mittels Filterpackmethode

Da in der Zeit während des Feldversuches mit dem NILU auf dem Schauinsland gleichzeitig auch noch die bisherigen $SO_2$-Messungen mittels TCM-Methode fortgeführt wurden, konnte zusätzlich mit diesen Messergebnissen verglichen werden. Diese $SO_2$-Parallel-Messungen ergaben, dass mit dem alten TCM-Verfahren Werte unterhalb von 0.5 $\mu g/m^3$ nicht nachgewiesen werden können. Insgesamt war die Korrelation mit einem Faktor von 0.87 schlechter als für die Vergleichsmessungen zwischen den beiden Filterpack-Messungen, der Mittelwert für die Werte nach der TCM-Methode lag jedoch nur um 10.6% über den Filterpack-Werten (siehe Abbildung 91a). Für generelle Aussagen zum drastischen Konzentrationsrückgang der $SO_2$-Konzentrationen von ca. 80% gegenüber den 70er Jahren können die TCM-Messergebnisse jedoch herangezogen werden.

Ein Vergleich der Sulfat-Messungen im Staub zwischen der bisherigen Röntgenfluoreszenz-Methode, die ebenfalls noch auf dem Schauinsland durchgeführt wurde, mit der NILU-Methode mittel imprägnierter Filter ergab einen Minderbefund von durchschnittlich ca. 40% bei der Röntgenfluoreszenz (siehe Abbildung 91b).

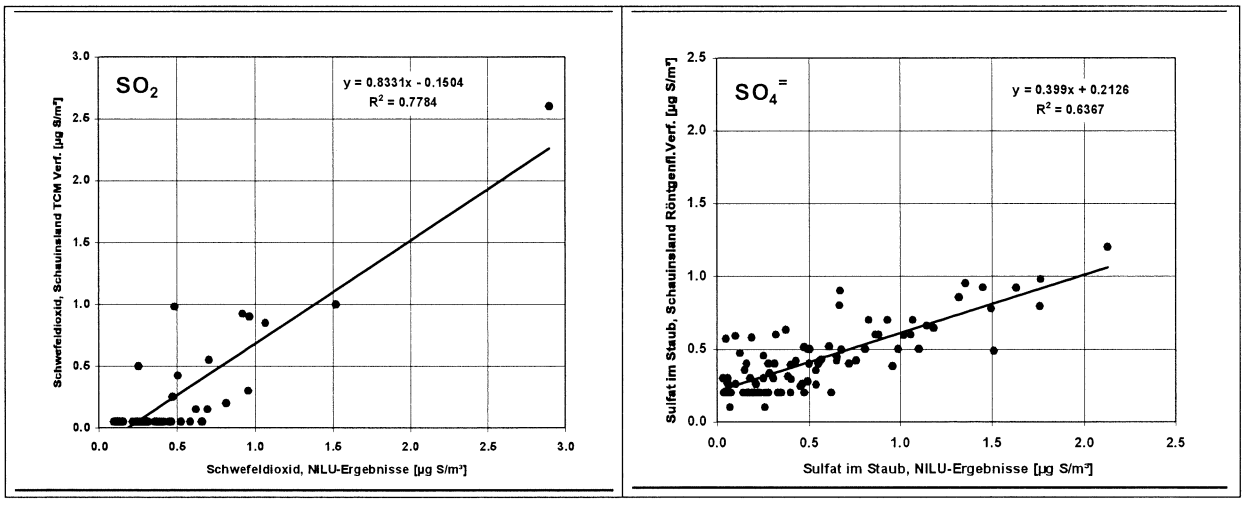



Abbildung 91a und b: Vergleichsmessung für $SO_2$ zwischen TCM-Verfahren gegenüber NILU-Filterpackmethode (a links) und für Sulfat im Schwebstaub zwischen Röntgenfluorezenzverfahren (Schauinsland) gegenüber NILU-Filterpack-methode (b rechts)

## 3.3.4 Vergleiche der $SO_2$-Messergebnisse für 2001

Seit die $SO_2$-Konzentrationen in den alten Ländern Ende der achtziger Jahre und in den neuen Ländern ab Beginn der neunziger Jahre drastisch zurückgingen, wurde es immer schwieriger, in den niedrigen Konzentrationsniveaus, die an den Hintergrundstationen des UBA-Messnetzes registriert wurden, noch mit ausreichender Genauigkeit zu messen. Die von 1986 bis März 2001 automatisch registrierenden $SO_2$-Analysatoren (ML 8850) zeigten an den Messstellen des Umweltbundesamt es in 50% der Fälle - vor allem im Sommer - Werte unterhalb der Nachweisgrenze von 3 $\mu g/m^3$ an. Seit April 2001 werden daher im Messnetz Trace Level Geräte (Thermo Environment Instruments 43C) mit einer Nachweisgrenze von 0.2 $\mu g/m^3$ eingesetzt. Diese hoch empfindlichen Analysatoren sind in der Lage, auch diese niedrigen Konzentrationen zu erfassen.

Ähnliches gilt für die nasschemischen/chemischen Tagesproben-Messungen. Das bis 1999 eingesetzte TCM-Verfahren konnte nur Werte bis 0.5 $\mu g/m^3$ nachweisen, die neue Filterpack-Methode besitzt eine Nachweisgrenze von 0.1 $\mu g/m^3$ (siehe Abbildung 91a). Auch kann die Messgenauigkeit und Empfindlichkeit der alten TCM-Methode den heutigen Qualitätsstandards nicht mehr genügen.

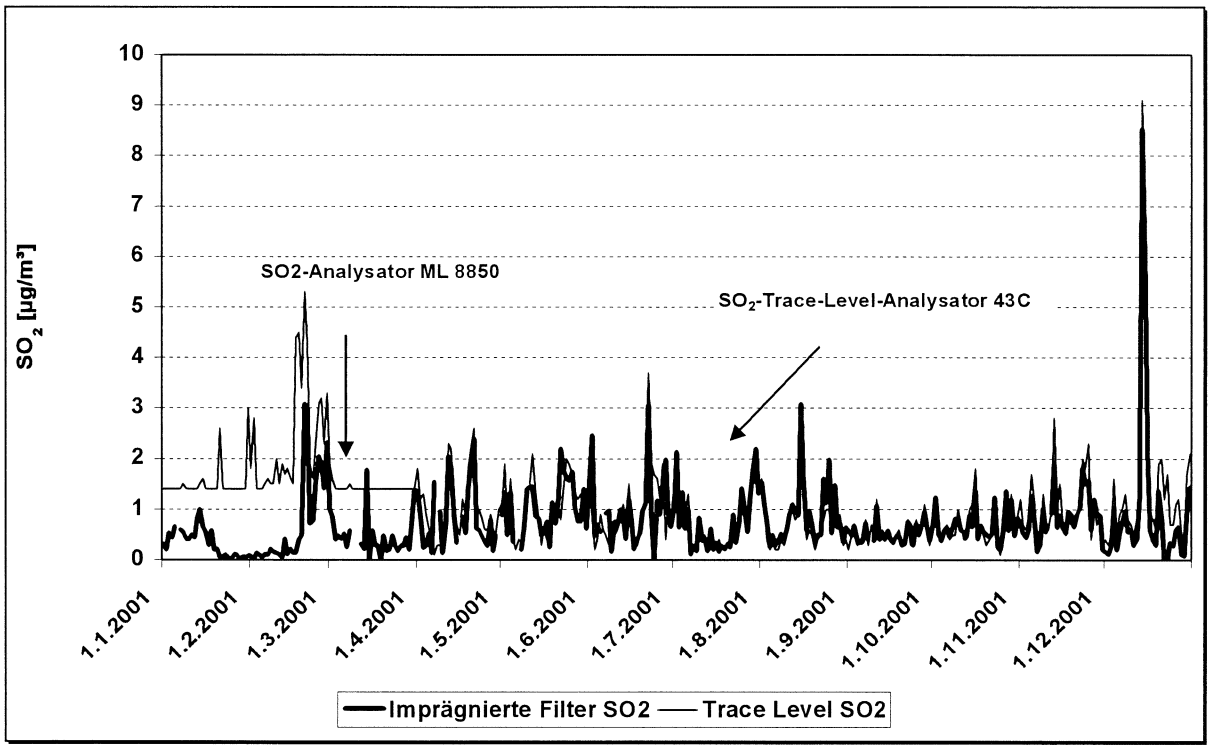



Abbildung 92: Tagesmittel der $SO_2$-Parallelmessungen auf dem Schauinsland für Januar bis Dezember 2001

Vergleiche der beiden neuen, im UBA-Messnetz eingesetzten $SO_2$-Messmethoden ergaben sehr gute Übereinstimmungen zwischen beiden Methoden. In Abbildung 92, in der die Tagesmittel der Schwefeldioxid-Konzentrationen auf dem Schauinsland für Januar bis Dezember 2001 darstellt sind, ist von Januar bis April deutlich der Offset von 1.4 $\mu g/m^3$ zu erkennen, der auf die wesentlich höhere Nachweisgrenze des alten ML-Gerätes zurückzuführen ist. Insgesamt ist das Konzentrationsniveau der mit dem Monitor Labs Gerät

gemessenen Werte mehr als 3 mal so hoch wie das der Filterpack Messungen. Ab Mai, dem Zeitpunkt, ab dem das neue Trace-Level Gerät eingesetzt wurde, korreliert diese Messreihe sehr gut mit den Ergebnissen der Imprägnierten Filter. und das Konzentrationsniveau weicht nur noch geringfügig ab.

Die Korrelationsfaktoren zwischen diesen beiden Messreihen (jeweils ab Einsatz des Trace-Level Gerätes) liegen bei 0.95 für Deuselbach und Neuglobsow, bei 0.93 für Zingst, bei 0.88 für den Schauinsland und bei 0.71 für Westerland (siehe Abbildung 92). Die schlechteren Korrelationsfaktoren für Westerland und Schauinsland werden z.T. durch die noch niedrigeren Konzentrationsniveaus bedingt. Erste Auswertungen für 2002 ergaben aber auch für Westerland einen verbesserten Faktor von 0.87. Diese sehr guten Übereinstimmungen sind besonders beachtenswert, da die Konzentrationsniveaus meist nur zwischen 0.1 und 4 $\mu g/m^3$ liegen.

Dies ist auch bei den prozentualen Abweichungen der Trace-Level-Werte gegenüber den Filterpack-Werten zu beachten (Tabelle 79). Abweichungen von 4 bis 18% bedeuten bei mittleren Konzentrationen von 0.8 bis 2.2 $\mu g/m^3$ nur eine Abweichung von ca. 0.1 $\mu g/m^3$, was im Bereich der Nachweisgrenze des Trace-Level-Gerätes liegt. Betrachtet man sich die Maxima, sind diese prozentualen Abweichungen meist bereits deutlich geringer.

Tabelle 79: Prozentuale Abweichungen der Messergebnisse für $SO_2$ der Trace-Level Gerät gegenüber den Filterpack-Messungen für Mittelwert, Median und Maxima

| | | Westerland | Zingst | Neuglobs. | Deuselb. | Schauinsl. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zeitraum | 2001 | 1.9.-31.12. | 1.6.-31.12. | 1.6.-31.12. | 1.7.-31.12. | 1.5.-31.12. |
| Mittel-werte [µg/m³] | Filterpack | 0.96 | 1.28 | 1.04 | 1.99 | 0.84 |
| | Trace-Level | 0.81 | 1.23 | 0.85 | 2.19 | 0.92 |
| | Abweichung | -16.1% | -4.0% | -18.2% | 10.0% | 9.6% |
| Median [µg/m³] | Filterpack | 0.80 | 0.92 | 0.59 | 1.55 | 0.66 |
| | Trace-Level | 0.60 | 0.90 | 0.40 | 1.85 | 0.75 |
| | Abweichung | -25.0% | -2.2% | -32.2% | 19.4% | 13.6% |
| Maxima [µg/m³] | Filterpack | 2.86 | 10.60 | 8.38 | 9.62 | 8.54 |
| | Trace-Level | 3.00 | 9.80 | 6.90 | 9.20 | 9.10 |
| | Abweichung | 4.9% | -7.5% | -17.7% | -4.4% | 6.6% |

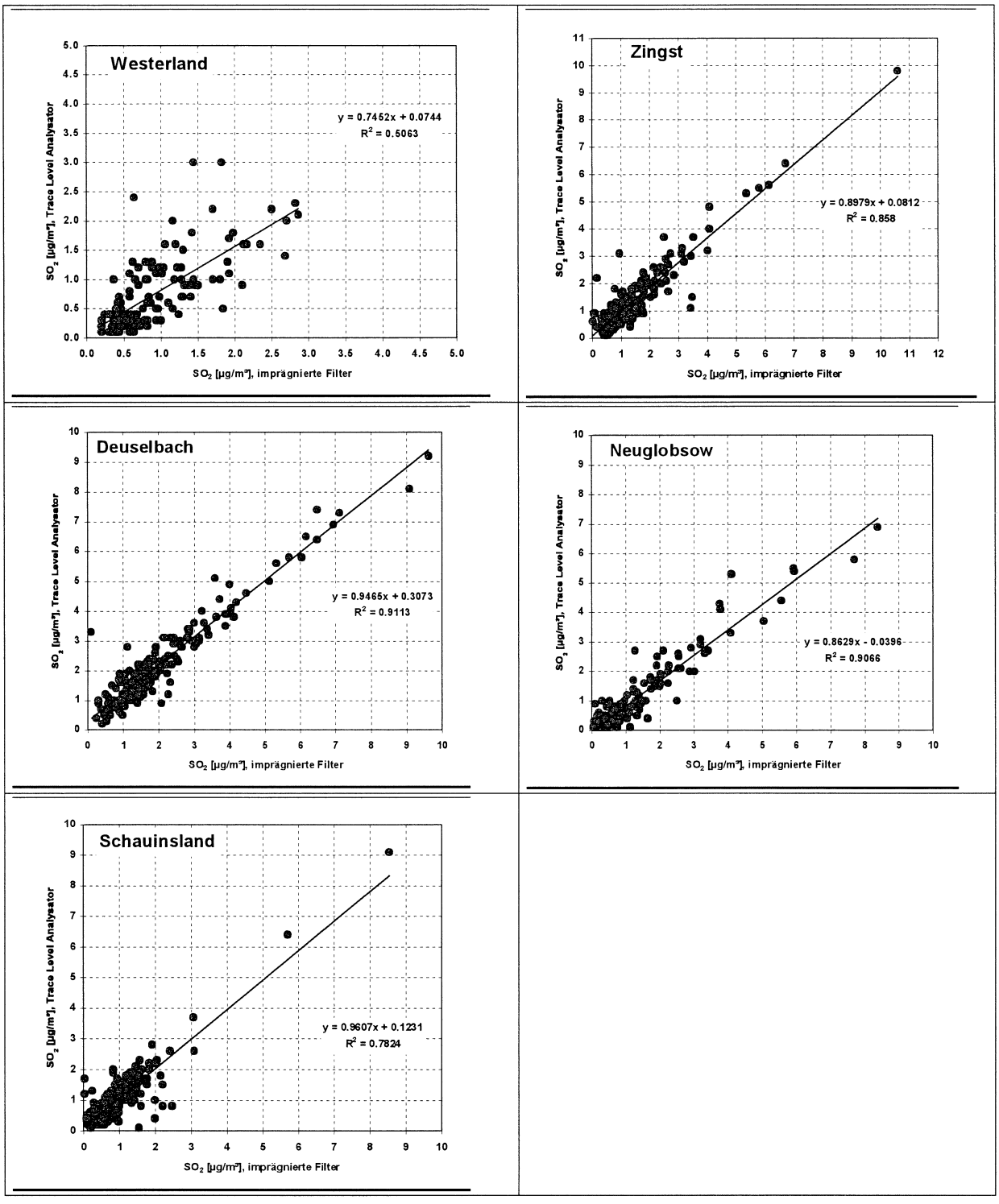



Abbildung 93: Vergleich der $SO_2$ -Tagesmittel zwischen Filtepack-Methode und Trace-Level Geräten an 5 Messstellen des UBA für 2001.

## 3.3.5 Erste Messergebnisse für 2000 bis 2001

Im folgenden werden die ersten Ergebnisse, die seit Beginn der Routinemessungen mit diesem Verfahren im Januar 2000 an den 5 UBA-Messstellen gemessen wurden, miteinander verglichen. Dazu wurden zuerst auf Tageswertbasis jeweils für jede Station die Tagessummen für $\sum NH_3+NH_4^+$ und $\sum HNO_3+NO_3^-$, ausgedrückt als $\mu$g N/m³, gebildet. Von diesen Tagessummen für Stickstoff sowie den Tageswerten von $SO_2$ und $SO_4^=$ wurden Monatsmittel und -maxima berechnet. Abbildung 94 zeigt die Monatsmittel von $SO_2$ und $SO_4^=$ für die Messstelle Neuglobsow im direkten Vergleich. Beide Komponenten zeigen einen ähnlichen Verlauf auf sehr niedrigem Konzentrationsniveau. Ein ausgeprägter Jahresgang, wie er bei $SO_2$ früher zu finden war, ist nicht mehr zu sehen. In Abbildung 95 und Abbildung 96 sind die Monatsmittel für $SO_2$ und $SO_4^{2-}$ separat - jedoch für alle 5 Messstellen - dargestellt. Die Konzentrationen für Zingst, Neuglobsow und Westerland sind höher als auf dem Schauinsland und zeigen Maxima in den Wintermonaten. Im Gegensatz dazu tritt aufgrund des Jahresganges der Mischungsschichthöhe auf dem Schauinsland das Maximum im Sommer auf. Insgesamt ist das Konzentrationsniveau auf dieser Bergstation noch niedriger als an den übrigen. Ähnlich sieht es für die Monatsmaxima aus. Die Monatsmittel und -maxima sind Tabelle 80 und Tabelle 81 zu entnehmen.

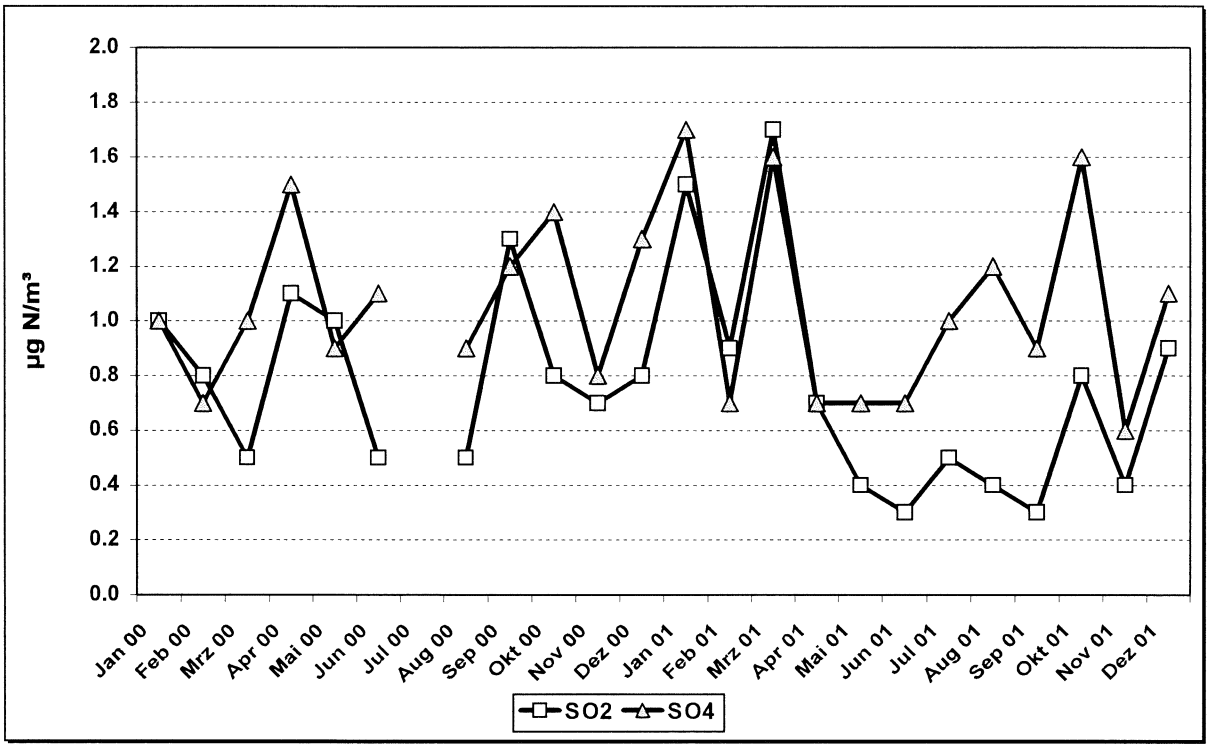



Abbildung 94: Monatsmittel von $SO_2$ und $SO_4^=$ in $\mu$g S/m³ im direkten Vergleich für Januar 2000 bis Dezember 2001 in Neuglobsow.

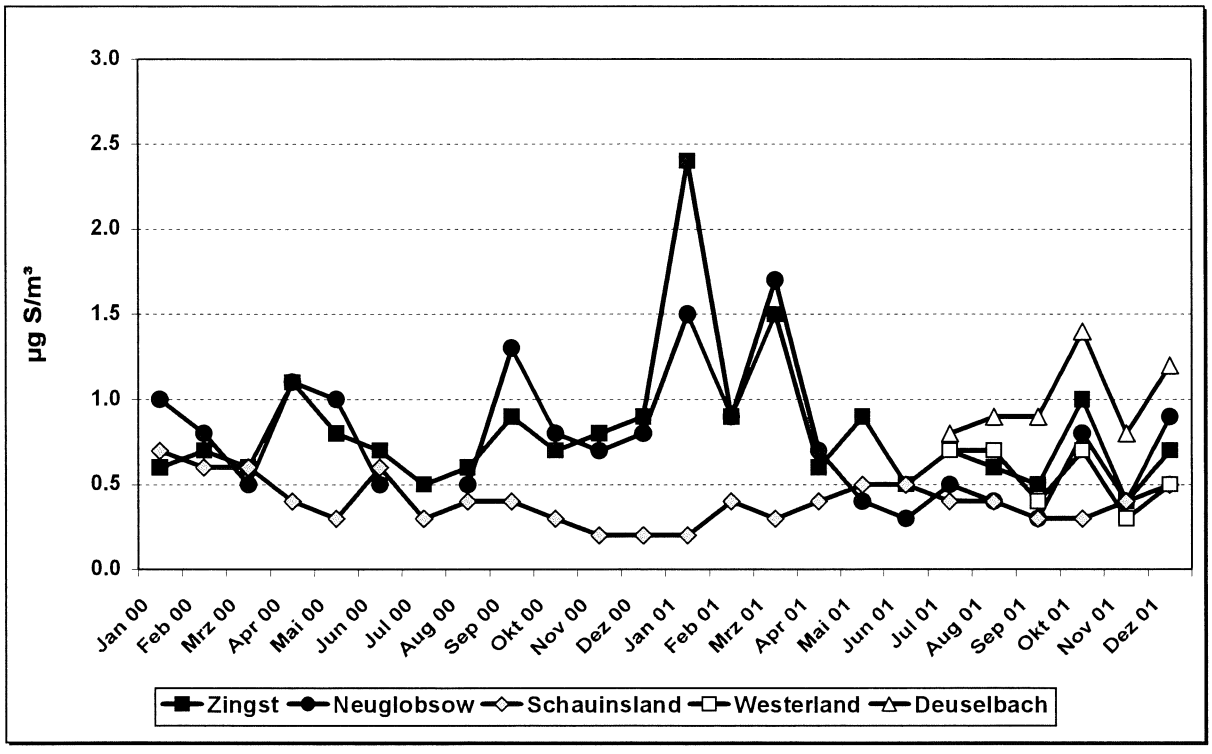



Abbildung 95: Monatsmittel von $SO_2$ in $\mu$g S/m³ für Januar 2000 bis Dezember 2001 an den 5 Messstellen im Vergleich

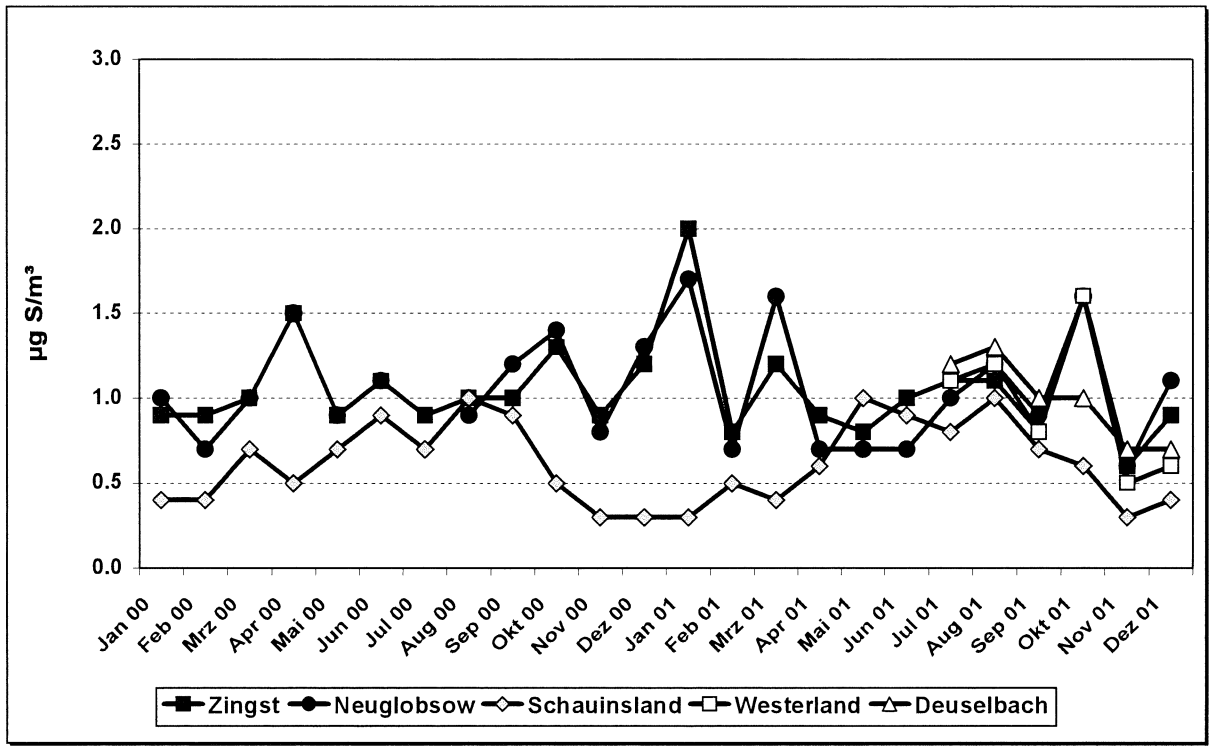



Abbildung 96: Monatsmittel von $SO_4^=$ in $\mu$g S/m³ für Januar 2000 bis Dezember 2001 an den 5 Messstellen im Vergleich

Tabelle 80: Monatsmittel und -maxima von $SO_2$ in $\mu g\ S/m^3$ für Jan 2000 bis Dez 2001

| | $SO_2$ Monatsmittel [$\mu g\ S/m^3$] | | | | | $SO_2$ Monatsmaxima [$\mu g\ S/m^3$] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | WE | ZG | NG | DE | SC | WE | ZG | NG | DE | SC |
| Jan 2000 | | 0.6 | 1.0 | | 0.7 | | 1.5 | 4.9 | | 1.8 |
| Feb 2000 | | 0.7 | 0.8 | | 0.6 | | 3.3 | 3.2 | | 1.7 |
| Mrz 2000 | | 0.6 | 0.5 | | 0.6 | | 1.7 | 1.7 | | 2.1 |
| Apr 2000 | | 1.1 | 1.1 | | 0.4 | | 3.0 | 4.7 | | 0.9 |
| Mai 2000 | | 0.8 | 1.0 | | 0.3 | | 2.8 | 3.8 | | 0.8 |
| Jun 2000 | | 0.7 | 0.5 | | 0.6 | | 3.0 | 2.8 | | 1.6 |
| Jul 2000 | | 0.5 | | | 0.3 | | 1.0 | | | 1.3 |
| Aug 2000 | | 0.6 | 0.5 | | 0.4 | | 2.1 | 1.2 | | 1.1 |
| Sep 2000 | | 0.9 | 1.3 | | 0.4 | | 3.8 | 4.0 | | 0.9 |
| Okt 2000 | | 0.7 | 0.8 | | 0.3 | | 2.3 | 3.6 | | 1.2 |
| Nov 2000 | | 0.8 | 0.7 | | 0.2 | | 2.5 | 1.3 | | 0.5 |
| Dez 2000 | | 0.9 | 0.8 | | 0.2 | | 9.7 | 3.7 | | 0.4 |
| Jan 2001 | | 2.4 | 1.5 | | 0.2 | | 12.3 | 8.8 | | 0.5 |
| Feb 2001 | | 0.9 | 0.9 | | 0.4 | | 6.0 | 9.7 | | 1.5 |
| Mrz 2001 | | 1.5 | 1.7 | | 0.3 | | 7.4 | 6.5 | | 0.9 |
| Apr 2001 | | 0.6 | 0.7 | | 0.4 | | 1.3 | 2.5 | | 1.2 |
| Mai 2001 | | 0.9 | 0.4 | | 0.5 | | 2.0 | 2.2 | | 1.1 |
| Jun 2001 | | 0.5 | 0.3 | | 0.5 | | 1.3 | 1.7 | | 1.5 |
| Jul 2001 | 0.7 | 0.7 | 0.5 | 0.8 | 0.4 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 1.6 | 1.1 |
| Aug 2001 | 0.7 | 0.6 | 0.4 | 0.9 | 0.4 | 2.3 | 1.7 | 1.7 | 3.6 | 1.5 |
| Sep 2001 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.9 | 0.3 | 1.0 | 2.0 | 0.8 | 4.8 | 0.5 |
| Okt 2001 | 0.7 | 1.0 | 0.8 | 1.4 | 0.3 | 1.4 | 5.3 | 3.8 | 3.5 | 0.7 |
| Nov 2001 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.8 | 0.4 | 0.6 | 1.6 | 1.6 | 2.0 | 0.9 |
| Dez 2001 | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 1.2 | 0.5 | 1.1 | 3.4 | 4.2 | 4.5 | 4.3 |

Tabelle 81: Monatsmittel und -maxima von $SO_4^=$ in $\mu g\ S/m^3$ für Jan 2000 bis Dez2001

| | $SO_4$ Monatsmittel [$\mu g\ S/m^3$] | | | | | $SO_4$ Monatsmaxima [$\mu g\ S/m^3$] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | WE | ZG | NG | DE | SC | WE | ZG | NG | DE | SC |
| Jan 2000 | | 0.9 | 1.0 | | 0.4 | | 2.0 | 4.5 | | 1.0 |
| Feb 2000 | | 0.9 | 0.7 | | 0.4 | | 2.8 | 2.1 | | 0.9 |
| Mrz 2000 | | 1.0 | 1.0 | | 0.7 | | 3.2 | 3.4 | | 1.5 |
| Apr 2000 | | 1.5 | 1.5 | | 0.5 | | 3.0 | 3.3 | | 1.0 |
| Mai 2000 | | 0.9 | 0.9 | | 0.7 | | 1.5 | 2.3 | | 1.8 |
| Jun 2000 | | 1.1 | 1.1 | | 0.9 | | 2.7 | 2.9 | | 1.8 |
| Jul 2000 | | 0.9 | | | 0.7 | | 2.2 | | | 2.1 |
| Aug 2000 | | 1.0 | 0.9 | | 1.0 | | 2.4 | 2.2 | | 2.6 |
| Sep 2000 | | 1.0 | 1.2 | | 0.9 | | 4.0 | 4.0 | | 2.6 |
| Okt 2000 | | 1.3 | 1.4 | | 0.5 | | 4.1 | 3.9 | | 1.7 |
| Nov 2000 | | 0.9 | 0.8 | | 0.3 | | 2.5 | 2.0 | | 0.6 |
| Dez 2000 | | 1.2 | 1.3 | | 0.3 | | 5.0 | 5.4 | | 0.5 |
| Jan 2001 | | 2.0 | 1.7 | | 0.3 | | 7.3 | 6.1 | | 1.0 |
| Feb 2001 | | 0.8 | 0.7 | | 0.5 | | 2.3 | 1.5 | | 1.2 |
| Mrz 2001 | | 1.2 | 1.6 | | 0.4 | | 2.5 | 3.1 | | 1.2 |
| Apr 2001 | | 0.9 | 0.7 | | 0.6 | | 2.2 | 1.7 | | 1.1 |
| Mai 2001 | | 0.8 | 0.7 | | 1.0 | | 2.1 | 2.0 | | 2.1 |
| Jun 2001 | | 1.0 | 0.7 | | 0.9 | | 2.6 | 1.4 | | 2.4 |
| Jul 2001 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.2 | 0.8 | 2.7 | 2.7 | 3.2 | 2.8 | 1.7 |
| Aug 2001 | 1.2 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.0 | 3.5 | 3.4 | 4.1 | 2.9 | 2.3 |
| Sep 2001 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 0.7 | 2.9 | 2.2 | 2.2 | 2.3 | 1.4 |
| Okt 2001 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.0 | 0.6 | 5.0 | 5.4 | 5.4 | 2.5 | 2.0 |
| Nov 2001 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 1.1 | 1.7 | 1.7 | 2.2 | 1.1 |
| Dez 2001 | 0.6 | 0.9 | 1.1 | 0.7 | 0.4 | 1.4 | 2.6 | 3.8 | 2.5 | 1.5 |

Auch für die Summen von $NH_3$ und $NH_4^+$ zeigen die Messergebnisse vom Schauinsland als Bergstation meist deutlich niedrigere Werten. Der Verlauf aller übrigen Stationen ist ähnlich, die Konzentrationsniveaus weichen jedoch stärker als bei den Schwefelkomponenten voneinander ab (siehe Abbildung 97). Die Verläufe der Monatsmaxima zeigen ein ähnliches Bild mit Spitzenkonzentrationen zwischen 8 und 12 $\mu$g N/m³. Die Werte der Monatsmittel und -maxima sind Tabelle 82 zu entnehmen.

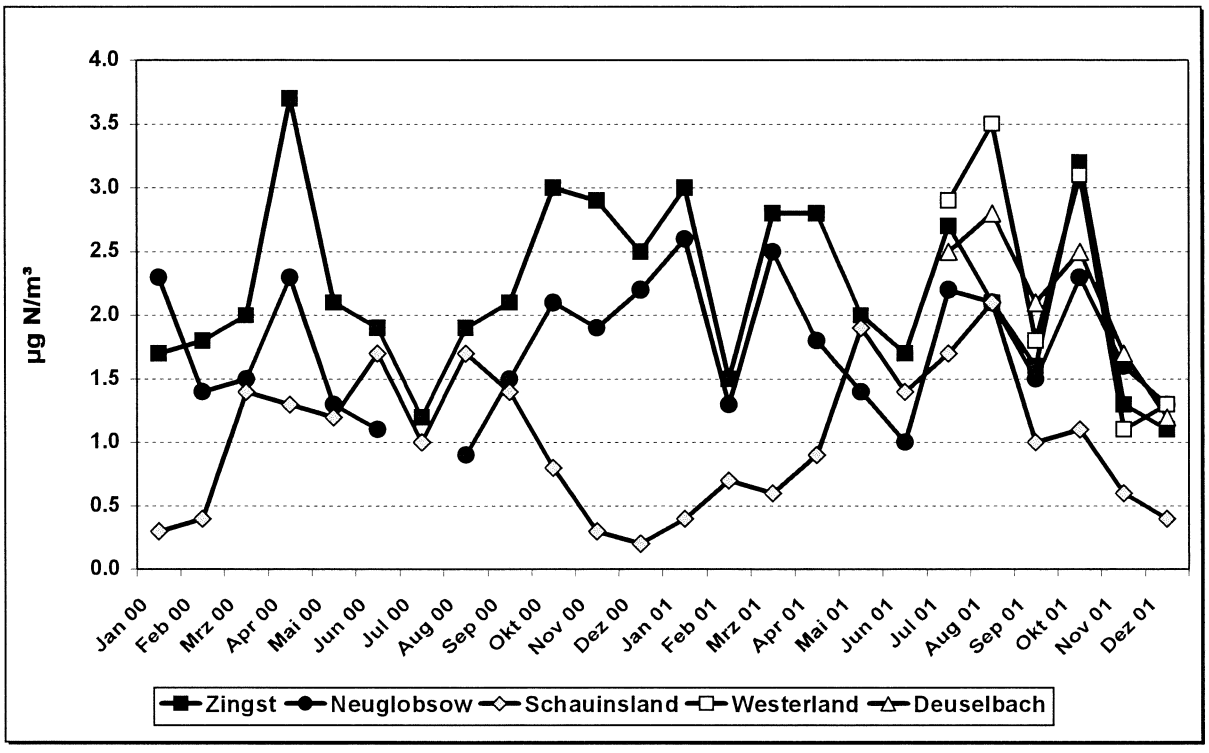



Abbildung 97: Monatsmittel der Summen von $NH_3$ und $NH_4^+$ in $\mu$g N/m³ für Januar 2000 bis Dezember 2001 an den 5 Messstellen im Vergleich

Tabelle 82: Monatsmittel und -maxima von $NH_3$ und $NH_4^+$ in $\mu$g N/m³ für 1/00 - 12/ 01

| | $\sum NH_3+NH_4^+$ Monatsmittel [µg N/m³] | | | | | $\sum NH_3+NH_4^+$ Monatsmax. µg N/m³] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | WE | ZG | NG | DE | SC | WE | ZG | NG | DE | SC |
| Jan 2000 | | 1.7 | 2.3 | | 0.3 | | 6.4 | 10.0 | | 1.4 |
| Feb 2000 | | 1.8 | 1.4 | | 0.4 | | 8.6 | 3.4 | | 1.3 |
| Mrz 2000 | | 2.0 | 1.5 | | 1.4 | | 12.1 | 5.7 | | 3.2 |
| Apr 2000 | | 3.7 | 2.3 | | 1.3 | | 7.4 | 7.1 | | 3.5 |
| Mai 2000 | | 2.1 | 1.3 | | 1.2 | | 4.3 | 3.5 | | 3.0 |
| Jun 2000 | | 1.9 | 1.1 | | 1.7 | | 4.9 | 3.1 | | 3.1 |
| Jul 2000 | | 1.2 | | | 1.0 | | 2.4 | | | 2.3 |
| Aug 2000 | | 1.9 | 0.9 | | 1.7 | | 4.6 | 3.0 | | 3.2 |
| Sep 2000 | | 2.1 | 1.5 | | 1.4 | | 6.6 | 3.7 | | 3.5 |
| Okt 2000 | | 3.0 | 2.1 | | 0.8 | | 6.2 | 5.4 | | 2.2 |
| Nov 2000 | | 2.9 | 1.9 | | 0.3 | | 5.2 | 4.2 | | 0.6 |
| Dez 2000 | | 2.5 | 2.2 | | 0.2 | | 5.6 | 5.3 | | 0.5 |
| Jan 2001 | | 3.0 | 2.6 | | 0.4 | | 7.0 | 6.3 | | 1.3 |
| Feb 2001 | | 1.5 | 1.3 | | 0.7 | | 5.6 | 3.3 | | 2.8 |
| Mrz 2001 | | 2.8 | 2.5 | | 0.6 | | 9.4 | 4.6 | | 2.1 |
| Apr 2001 | | 2.8 | 1.8 | | 0.9 | | 7.4 | 3.2 | | 3.2 |
| Mai 2001 | | 2.0 | 1.4 | | 1.9 | | 4.3 | 4.5 | | 3.7 |
| Jun 2001 | | 1.7 | 1.0 | | 1.4 | | 3.7 | 1.9 | | 3.1 |
| Jul 2001 | 2.9 | 2.7 | 2.2 | 2.5 | 1.7 | 6.5 | 4.3 | 4.3 | 4.8 | 3.7 |
| Aug 2001 | 3.5 | 2.1 | 2.1 | 2.8 | 2.1 | 7.6 | 3.9 | 4.9 | 4.6 | 4.1 |
| Sep 2001 | 1.8 | 1.6 | 1.5 | 2.1 | 1.0 | 4.1 | 3.7 | 3.3 | 4.0 | 2.2 |
| Okt 2001 | 3.1 | 3.2 | 2.3 | 2.5 | 1.1 | 6.0 | 5.8 | 3.6 | 4.2 | 2.7 |
| Nov 2001 | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 1.7 | 0.6 | 2.7 | 3.4 | 3.8 | 3.7 | 1.8 |
| Dez 2001 | 1.3 | 1.1 | 1.3 | 1.2 | 0.4 | 2.6 | 2.8 | 3.1 | 2.5 | 1.2 |

Tabelle 83: Monatsmittel u. -maxima von $HNO_3$ und $NO_3^-$ in $\mu$g N/m³ für 1/00 - 12/ 01

| | $\sum HNO_3+NO_3^-$ Monatsmittel [µg N/m³] | | | | | $\sum HNO_3+NO_3^-$ Monatsmax. [µg N/m³] | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | WE | ZG | NG | DE | SC | WE | ZG | NG | DE | SC |
| Jan 2000 | | 1.3 | 1.2 | | 0.4 | | 2.9 | 3.6 | | 1.2 |
| Feb 2000 | | 1.4 | 1.2 | | 0.4 | | 3.8 | 2.8 | | 1.1 |
| Mrz 2000 | | 1.0 | 0.9 | | 0.9 | | 3.6 | 2.5 | | 2.4 |
| Apr 2000 | | 1.6 | 1.1 | | 0.8 | | 3.9 | 3.7 | | 1.7 |
| Mai 2000 | | 0.8 | 0.5 | | 0.7 | | 1.8 | 1.1 | | 1.8 |
| Jun 2000 | | 0.8 | 0.7 | | 0.8 | | 1.9 | 1.8 | | 1.7 |
| Jul 2000 | | 0.6 | | | 0.5 | | 1.1 | | | 1.7 |
| Aug 2000 | | 0.8 | 0.5 | | 0.7 | | 2.0 | 0.9 | | 1.4 |
| Sep 2000 | | 1.0 | 0.7 | | 0.9 | | 2.7 | 1.7 | | 2.1 |
| Okt 2000 | | 1.5 | 0.9 | | 0.5 | | 3.5 | 2.2 | | 1.8 |
| Nov 2000 | | 1.5 | 1.1 | | 0.3 | | 3.2 | 2.3 | | 0.5 |
| Dez 2000 | | 1.2 | 1.1 | | 0.2 | | 2.6 | 2.7 | | 0.4 |
| Jan 2001 | | 1.6 | 1.4 | | 0.4 | | 3.7 | 2.8 | | 1.4 |
| Feb 2001 | | 0.8 | 0.8 | | 0.7 | | 2.6 | 2.2 | | 2.4 |
| Mrz 2001 | | 1.3 | 1.3 | | 0.5 | | 3.7 | 3.1 | | 1.5 |
| Apr 2001 | | 1.3 | 0.8 | | 0.6 | | 2.5 | 1.6 | | 1.3 |
| Mai 2001 | | 1.0 | 0.6 | | 0.8 | | 3.1 | 2.3 | | 1.8 |
| Jun 2001 | | 0.8 | 0.4 | | 0.8 | | 1.5 | 0.7 | | 1.9 |
| Jul 2001 | 0.9 | 0.8 | 0.5 | 0.8 | 0.7 | 1.7 | 1.4 | 1.1 | 1.7 | 1.5 |
| Aug 2001 | 1.3 | 0.7 | 0.6 | 1.0 | 0.7 | 5.6 | 1.6 | 1.7 | 3.2 | 1.6 |
| Sep 2001 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 0.5 | 4.8 | 3.2 | 1.4 | 1.6 | 1.3 |
| Okt 2001 | 1.7 | 1.6 | 1.1 | 1.1 | 0.5 | 3.6 | 4.3 | 2.0 | 4.0 | 1.4 |
| Nov 2001 | 0.4 | 0.8 | 1.0 | 1.1 | 0.4 | 1.5 | 2.4 | 3.2 | 3.3 | 1.4 |
| Dez 2001 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.3 | 1.3 | 2.5 | 2.3 | 1.8 | 0.6 |

Die Konzentrationsverläufe der Monatsmittel von $HNO_3$ + $NO_3^-$ entsprechen meist denen der von $NH_3$ + $NH_4^+$, jedoch auf noch niedrigerem Konzentrationsniveau (siehe Abbildung 98). Auch bei diesen Komponenten liegen die Werte vom Schauinsland meist unterhalb der anderen Stationen. In Abbildung 99 sind die Monatsmittel aller Stickstoffkomponenten für Zingst im direkten Vergleich dargestellt. Deutlich ist der meist ähnliche Verlauf und das etwa doppelt so hohe Konzentrationsniveau der Summen von $NH_3$ und $NH_4^+$ gegenüber den Summen von $HNO_3$ und $NO_3^-$ zu erkennen. Wie schon bei den Schwefelkomponenten lässt sich auch bei den Stickstoffkomponenten kein ausgeprägter Jahresgang finden.

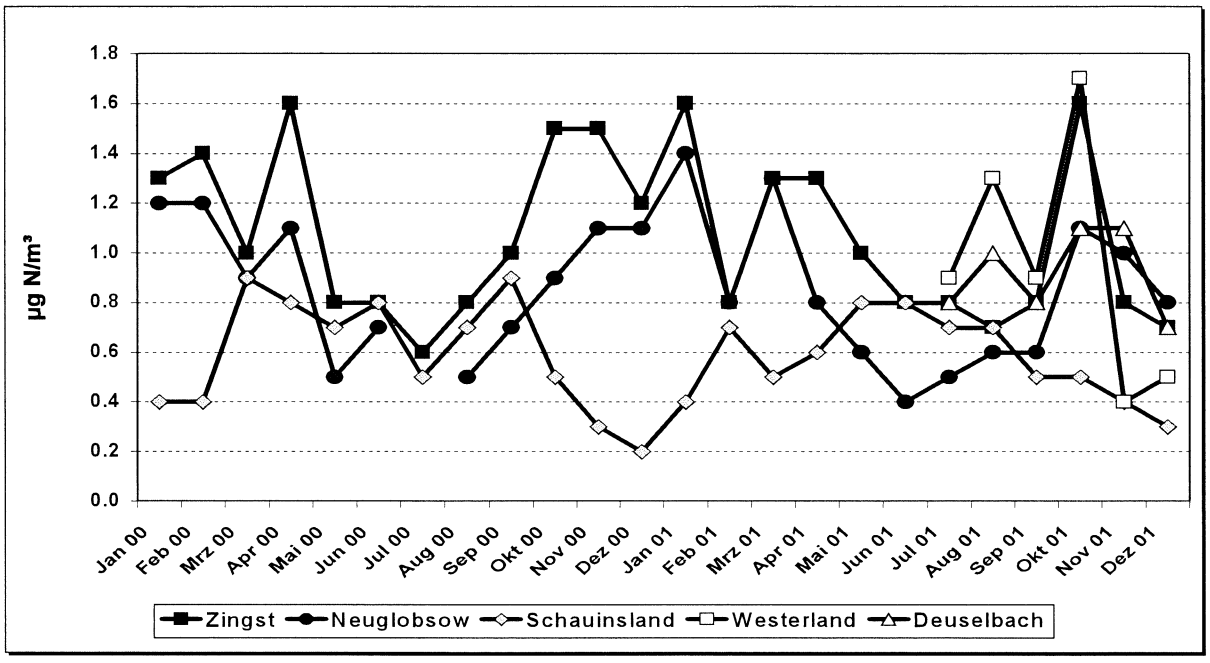



Abbildung 98: Monatsmittel der Summen von $HNO_3$ und $NO_3^-$ in $\mu$g N/m³ für Januar 2000 bis Dezember 2001 an den 5 Messstellen im Vergleich

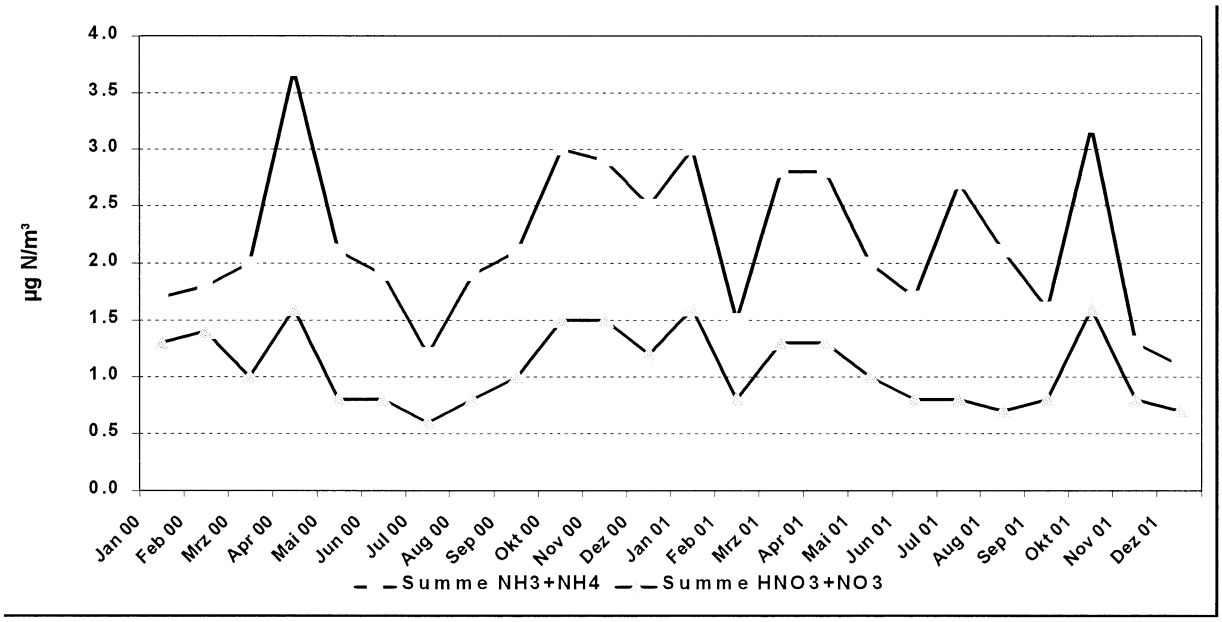



Abbildung 99: Monatsmittel der Summen von $NH_3$ und $NH_4^+$ und $HNO_3$ und $NO_3^-$ in $\mu$g N/m³ für Januar 2000 bis Dezember 2001 in Zingst.

## 3.3.6 Literatur zu Kapitel 3.3

*(1) NILU (1996)*
*EMEP Manual for sampling and chemical analysis, EMEP/CCC-Report, S. 3-13 -, 3-22, 3-30 - 3-50, Kjeller, Norwegen, March 1996*

*(2) Umweltbundesamt (2002)*
*Qualitätssicherungshandbuch II des Immissionsmessnetzes, Kapitel 3.21a bis 3.21c, Berlin, Mai 2002*

*(3) Aas, Wenche (2001)*
*Intercomparisons at Schauinsland*

*(4) Riemer (1999)*
*SPF4-Staub- und Gasprobennehmer, Herstellerinformationen, Riemer Messtechnik, Hausen*

# 4 ZUSAMMENFASSUNG

1. Im vorliegenden Jahresbericht werden die Ergebnisse aus dem Luftmessnetz des Umweltbundesamtes für das Jahr 2001 vorgestellt und mit den Ergebnissen aus früheren Jahren verglichen. Daneben enthält der Bericht längere Übersichtsartikel zu speziellen Umweltproblemen von aktuellem Interesse wie beispielsweise zu den Feinstaubmessungen im UBA-Messnetz sowie zu den Ozonepisoden im Jahre 2001. Das Messnetz besteht heute aus 22 in ländlichen Gebieten gelegenen Stationen, wovon 9 personell besetzt und 13 automatisch arbeitende Containerstationen sind.

2. Die Datensätze sind in sich homogen, d.h. es wurden im Verlauf der Jahre keine Veränderungen an den Messbedingungen vorgenommen. Außerdem wurden die Daten einer eingehenden Qualitätsprüfung unterzogen, sowohl intern als auch bei internationalen Vergleichen der Analysenverfahren.

## 4.1 Gas- und partikelförmige Luftverunreinigungen

3. An den meisten UBA-Stationen wurden in den Jahren 2000 und 2001 die niedrigsten $SO_2$- und Staubkonzentrationen ($PM_{10}$) seit Beginn der Messungen Ende der 60er Jahre (Staub) bzw. seit Anfang der 70er Jahre ($SO_2$) beobachtet. Der stärkste Abfall erfolgte während der letzten 2 Jahrzehnte. So haben beispielsweise zwischen Mitte der 80er Jahre und 2001 die Jahresmittel der $SO_2$–Konzentrationen um mehr als einen Faktor 10 abgenommen, der entsprechende Rückgang der Staubkonzentrationen lag etwa bei einem Faktor 2. Auffallend ist vor allem der Rückgang der Spitzenkonzentrationen seit Beginn der 90er Jahre an einigen früher sehr stark belasteten Stationen in den neuen Ländern. Diese erfreuliche Entwicklung ist neben den drastischen Emissionsminderungen in Deutschland auch auf die erheblichen Minderungen in unseren Nachbarstaaten zurückzuführen. Als Folge dieser Emissionsminderungen werden die Konzentrationen von $SO_2$ und Feinstaub an den ländlichen Stationen im UBA-Messnetz nur noch langsam zurückgehen, da sie in zunehmendem Maße durch den Ferntransport bzw. durch natürliche Emissionen bestimmt werden.

4. Im Gegensatz zu $SO_2$ ist die $NO_x$–Belastung an den UBA-Stationen während der letzten 2 Jahrzehnte nur leicht zurückgegangen. Der Rückgang der $NO_2$-Konzentrationen ($NO_x$ liegt an den UBA- Messstellen weitgehend als $NO_2$ vor) verläuft insgesamt langsamer als die erhebliche Reduzierung der $NO_x$–Emissionen in Deutschland um mehr als 40% zwischen Mitte der 80er Jahre und 2001. Wesentliche Gründe für die gegenüber den Emissionen relativ langsamere Abnahme der Konzentrationen dürften hohe Beiträge aus dem Ferntransport sowie die Nichtberücksichtigung der $NO_x$–Emissionen aus gedüngten und ungedüngten Böden in den UBA-Emissionsinventaren sein.

5. Seit 1998 werden zweimal pro Woche 27 flüchtige organische Substanzen (VOC) in Waldhof (Lüneburger Heide) und auf der Schmücke (Thüringer Wald) gemessen, seit

Januar 2000 auch in Zingst und auf dem Brotjacklriegel. Für diese 4 Stationen ergaben sich ähnliche Konzentrationsmuster, während die Konzentrationen in der Regel mit zunehmender Höhe der Stationen abnehmen. Während die überwiegend aus anthropogenen Quellen stammenden VOC maximale Konzentrationen im Winter aufweisen, zeigt das aus biogenen Quellen stammende Isopren ein ausgeprägtes Maximum im Sommer.

6. Im Jahre 2001 wurden die höchsten Ozon-Stundenwerte im UBA-Messnetz an den Stationen Schauinsland (236 $\mu g/m^3$), Schmücke (195 $\mu g/m^3$) und Deuselbach (195 $\mu g/m^3$) im Juni bzw. Juli beobachtet. Zum Vergleich: Der höchste Ozonwert in Deutschland wurde mit 299 $\mu g/m^3$ an der Station Plochingen (bei Stuttgart) gemessen. Diese hohen Ozonwerte während mehrerer Episoden sind neben den gebietsweise noch immer hohen Vorläuferemissionen auch auf extreme meteorologische Gegebenheiten mit maximalen Temperaturen und sehr hoher UV-Einstrahlung zurückzuführen (vgl. auch Kapitel 3.2). Trotz der episodenhaft auch im Jahre 2001 aufgetretenen hohen Ozonwerte sind die Ozonspitzenwerte insgesamt an den Stationen im UBA-Messnetz zwischen 1990 und 2001 deutlich zurückgegangen, ähnlich wie auch an den Stationen der Länder. Dagegen haben die Jahresmittelkonzentrationen im gleichen Zeitraum zugenommen (Näheres zu den Ursachen für diese Ozontrends in Kap.3.2). Angesichts der Zunahme der Ozon-Mittelwerte verwundert es nicht, dass im Gegensatz zu der erfreulichen Entwicklung bei den gesundheitsrelevanten Ozon-Spitzenwerten bei den dosisbezogenen Langfristzielwerten für den Schutz von Vegetation (AOT40) und Gesundheit in den letzten Jahren keine Verbesserung der Situation eingetreten ist, da diese dosisbezogenen Werte vor allem durch die mittleren Ozonkonzentrationen bestimmt werden und nicht durch die Spitzenwerte. Auch im Jahre 2001 wurde an fast allen UBA-Stationen der EU-Langfristzielwert zum Schutz der Vegetation von 3000 ppb h (entspricht 6000 $\mu g/m^3$ h, sog. AOT40-Wert: Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb) mehr oder weniger deutlich überschritten. Bezüglich des Langfristziels für den Schutz der menschlichen Gesundheit (120 $\mu g/m^3$, 8-h-Mittel) ist festzustellen, dass dieser Wert an den UBA-Stationen im Jahr 2001 an 4 (Aukrug) bis 57 (Schauinsland) Tagen überschritten worden ist.

7. Bei den Treibhausgasen Kohlendioxid ($CO_2$), Methan ($CH_4$) und Distickstoffoxid ($N_2O$) sind die deutschen Emissionen zwischen 1990 und 2001 zwar zurückgegangen, der zunehmende Trend der Konzentrationen hat sich aber erwartungsgemäß fortgesetzt. Beim Kohlendioxid betrug die Zunahme zwischen 1972 bis 2001 etwa 1.5 ppm/Jahr (0.4%/Jahr, Mittel über 5 Stationen ). Am Schauinsland betrug die Zunahme für Methan zwischen 1992 und 2001 im Mittel etwa 4 ppb/Jahr (0.2%/Jahr), für $N_2O$ zwischen 1996 und 2001 etwa 0.6 ppb/Jahr (ca.0.2 %/Jahr).

## 4.2 Ionen im Niederschlag

8. Im UBA-Messnetz werden sowohl „daily-bulk“ – als auch wöchentliche „wet-only“-Probenahmen und Analysen durchgeführt. Die seit 1982 durchgeführten „daily-bulk“ Messungen werden seit 1. Januar 2000 nur noch an 2 (Deuselbach und Waldhof) von ehemals 8 Stationen fortgeführt, an allen 8 personellen Messstellen sowie an weiteren 11 Standorten werden seit 1993/1995 wöchentliche wet-only Niederschlagsmessungen durchgeführt.

9. Auch im Jahre 2001 hat sich der seit 1982 beobachtete Rückgang der Ionenkonzentrationen einiger Ionen wie beispielsweise $H^+$, $SO_4$ und $NO_3$ fortgesetzt. Zwischen 1982 und 2001 sind im Mittel über die Stationen Deuselbach und Waldhof die Konzentrationen von $H^+$ um ca. 80% zurückgegangen, Sulfat um mehr als 60% sowie Nitrat um knapp 40%. Der Rückgang der Konzentrationen von Ammoniumionen betrug zwischen 1984 und 2001 etwa 20%. Bezüglich der Langzeittrends von Kalium, Magnesium, Natrium und Chlorid wurden nur geringe und nicht einheitliche Konzentrationsänderungen beobachtet.

10. Die Abnahme des Gesamtgehaltes an Ionen im Regenwasser während der letzten zwei Jahrzehnte war verbunden mit einer Änderung der relativen Ionenverteilung. Im Jahre 2001 waren die prozentualen Anteile von $H^+$ und $SO_4$ geringer, die relativen Ionenäquivalente von $NO_3$ und $NH_4$ dagegen höher als 1984.

11. Generell unterscheiden sich die Konzentrationen der Regeninhaltsstoffe Sulfat, Nitrat und Ammonium an den UBA–Regenstationen nur geringfügig, d.h. die Konzentrationsverteilung dieser Ionen in ländlichen Gebieten ist recht homogen. Die erheblichen Unterschiede, die bei der nassen Deposition dieser Ionen beobachtet werden, sind im Wesentlichen auf die meist orographisch bedingten unterschiedlichen Niederschlagsmengen zurückzuführen und weniger auf Konzentrationsunterschiede.

## 4.3 Spezielle Umweltprobleme (Kapitel 3)

### 4.3.1 Messungen von Feinstaub im Messnetz des UBA

12. Ausgehend von der Erkenntnis, dass vor allem Feinstaub ein hohes Schädigungspotential im Hinblick auf die menschliche Gesundheit aufweist, steht die Belastung durch Feinstaub mit Partikelgrößen $PM_{10}$ und $PM_{2.5}$ in der Luft im Vordergrund der Luftreinhaltepolitik. Unter $PM_{10}$ bzw. $PM_{2.5}$ versteht man die Gesamtmasse aller Partikel, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 $\mu$m bzw. 2.5 $\mu$m ist.

13. Im Messnetz des UBA wurde bisher fast ausschließlich die Masse von Grob- und Feinstaub zusammen als Gesamtschwebstaub (TSP) gemessen, seit 1999 auch die des Feinstaubes. In Waldhof werden $PM_{2.5}$–Messungen seit 1999 und in Deuselbach und Schauinsland seit 2000 durchgeführt. Seit 2000 wird vom UBA auch die Anzahl der

ultrafeinen Nanopartikel gemessen (Durchmesser < 100 nm = 0.1 $\mu$m), die nach neueren Untersuchungen ebenfalls als Schadstoffe aufzufassen sind.

14. Die $PM_{10}$-Konzentrationen zeigen einen ausgeprägten Jahresgang mit maximalen Konzentrationen im Winter an den Flachlandstationen Neuglobsow, Waldhof und Zingst und maximalen Konzentrationen im Sommer an den Bergstationen Schauinsland, Brotjacklriegel und Schmücke. Der Grund für das Sommermaximum liegt darin, dass die Bergstationen im Sommer häufig innerhalb der mit Partikeln angereicherten Mischungsschicht liegen, im Winter dagegen oft oberhalb dieser Schicht innerhalb der freien Troposphäre.

15. Die Anzahlgrößenverteilung der ultrafeinen Nanopartikel (Durchmesser < 100 nm ) am Dienstort Langen zeigt ein ausgeprägtes Maximum der Teilchenzahlen im Bereich zwischen 20 und 40 nm (wahrscheinlich Rußpartikel aus Verbrennungsprozessen, Autoverkehr) sowie ein weiteres Maximum unterhalb von 10 nm (wahrscheinlich Partikelneubildung aus Gasen). Dagegen fehlt auf dem Kleinen Feldberg (Taunus) das Maximum zwischen 20 und 40 nm.

16. Der Massenanteil der im UBA-Messnetz analysierten anorganischen Staubinhaltsstoffe (Sulfat, Nitrat, Chlorid, Ammonium, Kalzium, Natrium, Kalium) hat zwischen 1990 und 1999 von etwa 50% auf etwa 35% abgenommen.

17. Die mittleren Massenanteile an den 8 Stationen lagen im Mittel zwischen 1995 und 1999 bei etwa 20% bei Sulfat, 12% bei Nitrat und 5% bei Ammonium. Der Sulfat- und Nitratanteil nimmt in der Regel mit steigender Stationshöhe zu. Entsprechend wurden die höchsten Sulfat- und Nitratanteile auf den Bergstationen Schauinsland und Brotjacklriegel gemessen.

18. Bei den aerosolgebundenen Schwermetallen Blei, Cadmium, Kupfer und Mangan haben die mittleren Jahreskonzentrationen während der letzten 20 bis 30 Jahre deutlich abgenommen. Dieser Rückgang ist auf Minderungen der Staubemissionen sowie auf zusätzliche Maßnahmen zur Reduzierung der Schwermetallemissionen vor allem in Deutschland zurückzuführen.

19. Eine Auswertung der Anzahl der Überschreitungen von $PM_{10}$-Grenzwerten im Hinblick auf die Anforderungen der 1. EG-Tochterrichtlinie 1999/30/EG hat für die 8 personell besetzten Messstellen ergeben, dass die Tagesmittel von 50 $\mu$g/m3 seit 1992 an keiner UBA-Station mehr als 35 mal pro Jahre - mit Ausnahme der Station Westerland, wo das Seesalz erheblich zu den $PM_{10}$-Werten beitragen kann - überschritten worden sind (Stufe 1, ab 2005). Bezüglich der Überschreitungen von Stufe 2 (ab 2010) lagen in 2001 an 3 von 8 UBA-Stationen die Tagesmittel von 50 $\mu g/m^3$ noch über den Grenzwerten für Stufe 2 (bis 7 Überschreitungen pro Jahr zulässig). Noch besser als bei den Tagesmitteln sieht die Situation bei den Jahresmitteln aus. Der Grenzwert von 40 $\mu g/m^3$ (Stufe 1 bis 2005) wurde seit 1985 an keiner der 8 Stationen mehr erreicht, der verschärfte Grenzwert von 20 $\mu g/m^3$ (Stufe 2 ab 2010) - mit Ausnahe von Westerland - ab 1997 auch nicht mehr. Während zukünftige $PM_{10}$-Jahresmittel die Grenzwerte nur noch selten überschreiten werden, wird der 24-Stunden-Grenzwert auch im Jahre 2005 an einzelnen Emissionsschwerpunkten sehr wahrscheinlich noch deutlich überschritten.

20. Im Falle von Grenzwertüberschreitungen (siehe Punkt 19) besteht die Auflage, Aktionspläne zu entwickeln, die sicherstellen müssen, dass weitere Überschreitungen in Zukunft vermieden werden. Zur Erstellung der Aktionspläne ist es notwendig, die Ursachen, d.h. die Quellen und Transportwege zu identifizieren und zu quantifizieren. Eine detaillierte Abschätzung der Beiträge verschiedener Quellen zu den an den UBA-Stationen gemessenen $PM_{10}$-Konzentrationen ist derzeit noch nicht möglich, da wesentliche Parameter, die zu einer solchen Abschätzung benötigt werden, im Messnetz des UBA bisher nicht gemessen werden.

## 4.3.2 Die Ozonepisoden in Deutschland im Juli und August 2001

21. Im Jahre 2001 gab es in Deutschland im Vergleich zu 1999 und 2000 wieder häufiger hohe Ozonwerte über 240 $\mu g/m^3$ (1-h-Mittel). Die Überschreitungen traten Ende Juli vor allem in Baden-Württemberg sowie zwischen dem 24. und 26. August in Nordrhein-Westfalen während zweier Hitzeperioden auf.

22. Im Vergleich zur höchsten gemessenen Ozonkonzentration im Jahre 2000 (253 $\mu g/m^3$ in Selmsdorf, Mecklenburg-Vorpommern), bei der neben lokal/regionalen Effekten auch der Ferntransport erheblich zu den Ozonspitzen beigetragen hat, handelt es sich bei den Maximalwerten im Jahr 2001 im Wesentlichen um quasi-lokale Effekte, die zu den hohen Ozonwerten geführt haben.

23. Luftmassen-Trajektorienanalysen haben gezeigt, dass die Luftmassen etwa 24 Stunden vor Erreichen der Stationen sehr langsam, bisweilen mehrmals über Gebiete mit einer hohen Emissionsdichte der Ozonvorläufer vagabundiert sind, wodurch sich ein hoher Ozonsockel aufgebaut hat, auf dem dann über Gebieten mit hoher Emissionsdichte oder im Lee dieser Gebiete Ozonspitzen aufgesetzt wurden.

24. Die meteorologischen Voraussetzungen für sehr hohe Ozonwerte waren großräumig sehr günstig, die gemessenen Ozonspitzen traten aber wesentlich kleinräumiger nur in solchen Gebieten auf, die auch eine hohe Emissionsdichte der Vorläufer aufwiesen.

25. Das gehäufte Auftreten von Ozon-Spitzenwerten im Jahr 2001 war in erster Linie eine Folge der für die Ozonbildung günstigeren meteorologischen Bedingungen im Vergleich zu den Jahren vorher.

26. Die im Jahr 2001 gehäuft aufgetretenen hohen Ozonwerte lagen im normalen Schwankungsbereich bei den heutigen Vorläuferemissionen und ändern nichts Grundlegendes an dem klar abfallenden Trend der Ozonspitzenwerte in Deutschland zwischen 1990 und 2001, der im Wesentlichen auf die Emissionsminderungen der Ozonvorläufer in Deutschland als auch in den deutschen Nachbarstaaten zurückzuführen ist.

## 4.3.3 Einführung von Filterpack-Messungen im UBA-Messnetz

27. Nach Empfehlungen von EMEP wurde im Messnetz des UBA im Jahre 2000 die Filterpack-Methode (imprägnierte Filter) in Verbindung mit Ionenchromatographie bzw. Fließinjektionsanalyse zur Messung der Schwefelkomponenten Schwefeldioxid ($SO_2$) und Sulfat ($SO_4$) sowie von Stickstoffverbindungen als Summen von $HNO_3$ + $NO_3^-$ bzw. $NH_3$ + $NH_4^+$ in Luft und Schwebstaub eingeführt. Die Filterpack-Methode ersetzt die seit 1973 benutzte nasschemische TCM-Methode für $SO_2$ sowie die seit 1974 eingesetzte Röntgenfluoreszenz-Methode für Sulfat.

28. Die Einführung der Filterpack–Methode wurde zwecks Erhöhung der Messgenauigkeit und Empfindlichkeit notwendig. So konnten beispielsweise die aufgrund der starken Emissionsminderungen stark zurückgegangenen Konzentrationen von $SO_2$ mit den herkömmlichen Verfahren (TCM sowie automatisch registrierender $SO_2$-Analysator ML 8850) an den meisten UBA-Stationen nicht mehr nachgewiesen werden.

29. Die Nachweisgrenzen der Filterpack-Methode liegen für $SO_2$ und $SO_4$ bei 0.01 $\mu$g $S/m^3$ , für $NH_3$ und $NH_4^+$ bei 0.02 $\mu$g N $/m^3$ und für $HNO_3$ und $NO_3^-$ bei 0.01 $\mu$g $N/m^3$.

30. Vergleichsmessungen mittels Filterpack-Methode zwischen NILU und UBA auf dem Schauinsland zeigten durchweg gute bis sehr gute Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten von 0.96 für $SO_2$, 0.94 für Sulfat, 0.93 für $NO_3^{--}$ und 0.86 für $HNO_3$. Insgesamt lagen die vom UBA gemessenen Werte höher als die von NILU gemessenen, vor allem für $NO_3^-$ und $HNO_3$. Ein Vergleich zwischen den mittels TCM-Methode vom UBA gemessenen $SO_2$-Konzentrationen mit den von NILU mittels Filterpack gemessenen ergab naturgemäß eine schlechtere Korrelation (Faktor 0.87) als die entsprechenden Vergleichsmessungen mittels Filterpack. Am Schauinsland relativ häufig vorkommende Werte unterhalb von 0.5 $\mu$g $SO_2$ $/m^3$ konnten mittels TCM nicht mehr nachgewiesen werden. Entsprechende Vergleichsmessungen für Sulfat im Schwebstaub zwischen Röntgenfluoreszenz (UBA) und Filterpack (NILU) erbrachten einen durchschnittlichen Minderbefund von ca. 40% bei der Röntgenfluoreszenz.

# 5 EXECUTIVE SUMMARY

1. In this annual report the results of the air pollution monitoring network of the German Federal Environmental Agency (FEA) are presented for 2001 and compared with results of previous years. Furthermore, the report contains review articles on specific environmental topics of common interest (for example measurements fine particulate matter in the FEA-network, ozone episodes in Germany during July and August 2001). The network consists of 22 stations (9 stations with personnel and 13 automatically working containers) which are situated in rural areas.

2. Special care was taken to produce an internally consistent and homogeneous data set. Measurement apparatus as well as conditions of measurements have not been changed over the years. All data were subject to a comprehensive internal quality control and the analytical techniques were validated by external international intercomparisions.

## 5.1 Gaseous pollutants and particulate matter

3. Annual concentrations of $SO_2$ and fine particulate matter ($PM_{10}$) were lowest in 2000 and 2001 at most stations since the beginning of measurements in the late 1960s (particles) and the beginning of the 1970s ($SO_2$), respectively. The strongest decline was observed over the last two decades mainly as a result of emission reduction in Germany. As an example, $SO_2$-concentrations have declined by more than 90 % between the mid 1980s and 2001. The corresponding decrease of $PM_{10}$-concentrations was about 50 %. $SO_2$ peak concentrations decreased drastically between 1992 and 2001 at some of the previously very polluted sites in eastern Germany. The decline of peak concentrations was caused by drastic emission reductions in east Germany, Poland and the Czech Republic. As the potential for further emission reductions is largely exhausted (at least in Germany) concentrations of $SO_2$ and $PM_{10}$ will only slightly decrease in the near future because concentrations at the rural sites of our monitoring network are determined to an increasing extent by long-range transport and natural emissions.

4. In contrast to $SO_2$ and $PM_{10}$ concentrations of $NO_x$ have only slightly decreased over the past two decades. $NO_x$ consists to an overwhelming extent of $NO_2$ at the measuring sites of the FEA. In general, the decline of $NO_2$ concentrations was smaller than the considerable emission reduction in Germany by more than 40% between the mid 1980s and 2001.

5. Since 1998 27 VOCs have been measured in Waldhof (Lüneburg Heath) and Schmücke (Thuringian Forest), since January 2000 also at Zingst (Baltic Sea) and Brotjacklriegel (Bavarian Forest). Concentration pattern of the 27 VOCs were quite similar for the 4 stations in 2000 and 2001. For naturally emitted VOCs (for example isoprene) concentrations were highest in summer whereas VOCs of mainly anthropogenic origin showed maximum concentrations in winter.

6. In 2001 highest ozone peak concentrations (1-h-means) in the FEA network were observed at Schauinsland (236 $\mu g/m^3$), Schmücke (195 $\mu g/m^3$) und Deuselbach (195 $\mu g/m^3$). For comparision: the highest hourly ozone concentration in Germany was 299 $\mu g/m^3$ in 2001 (Plochingen near Stuttgart). These high ozone peak concentrations were caused by high precursor emissions in some regions in connection with extreme meteorological conditions characterized by very high temperatures and stagnant air masses. In spite of the observed peak values during two ozone episodes in 2001 ozone peak concentrations in Germany have generally declined between 1990 and 2001. In contrast to the decreasing trend of peak values, annual ozone mean concentrations have increased over this time period (more details: see chapter 3.3.2). Against this different trend development for ozone peak values versus mean concentrations it is not surprising that only little improvement could be reached over the last decade in order to meet the stringent air quality standards for the protection of human health (120 $\mu g/m^3$ , 8-h-mean) and especially for vegetation (AOT40: 3000 ppb h or 6000 $\mu g/m^3$ h) defined under the ozone daughter directive of the European Union. This is due to the fact that these stringent standards are mainly determined by ozone mean values and not by peak concentrations. Concerning the long-term objective for the protection of human health (120 $\mu g/m^3$, 8-h-mean) this value was exceeded in 2001 between 4 (Aukrug) and 57 (Schauinsland) days. As in previous years the long-term objective for protection of vegetation (3000 ppb h) was also exceeded in 2001 at almost all stations.

7. As expected concentrations of the greehouse gases $CO_2$, $CH_4$ and $N_2O$ have continued to rise in spite of emission reductions in Germany between 1990 and 2001. The mean $CO_2$ increase rate was ca. 1.5 ppm/year (0.4%/year, mean rate for 5 stations) between 1972 and 2001. At Schauinsland the increase rate was ca. 4 ppb/year (0.2%/year) for methane (1992 - 2001) and ca. 0.6 ppb/year (ca. 0.2%/year) for $N_2O$ (1996 - 2001).

## 5.2 Ions in precipitation

8. In the FEA network both "daily - bulk" and weekly "wet -only" measurements are carried out. Between 1982 and 1999 daily-bulk measurements were performed at 8 stations. Since 1 January 2000 daily-bulk measurements have been continued only at Deuselbach and Waldhof. Since 1993 - 1995 weekly wet-only measurements have been carried out at all 8 personal sites as well as at 11 additional sites.

9. In 2001 the declining trend of the concentrations of some ions in rainwater (for example $H^+$, sulfate, nitrate) has continued. Between 1982 and 2001 the average concentrations (mean values for Deuselbach and Waldhof) of $H^+$ has declined by ca. 80%, the corresponding decrease of sulfate was more than 60% and that of nitrate was nearly 40%. For ammonium the decline was ca. 20% between 1984 and 2001. Concerning long-term trends of potassium, calcium, magnesium, sodium and chloride only small changes were observed.

10. The decrease of total ion content in rainwater over the last two decades was accompanied by a shift of the relative ion distribution. At the two stations Deuselbach and Waldhof the percent fractions of $H^+$ and $SO_4$ were lower in 2001 as compared to 1984. On the other hand, the relative equivalent concentrations of $NO_3$ and $NH_4$ were higher in 2001 than in 1984 although their absolute concentrations have also decreased.

11. In general today's ion concentration differences at the UBA monitoring sites are only small, i.e. there is a relatively homogeneous ion concentration pattern in rural areas in Germany. Therefore, the considerable spatial differences of wet ion deposition are mainly caused by the different amounts of precipitation depending to a large extent on orographic influences.

## 5.3 Specific environmental topics

### 5.3.1. Measurements of fine particulate matter in the FEA network

12. There is recent evidence that both fine particulate matter ($PM_{10}$ and $PM_{2.5}$) and ultrafine particles (so-called nano-particles, diameter $< 0.1$ $\mu$m) are of high relevance to health effects.
$PM_{10}$: Particle mass with an aerodynamic diameter $< 10$ $\mu$m.
$PM_{2.5}$: Particle mass with an aerodynamic diameter $< 2.5$ $\mu$m.

13. Until 1999 only TSP (total Suspended Particulate matter) has been measured in the FEA network, since 1999 only $PM_{10}$ . In Deuselbach and Schauinsland $PM_{2.5}$ measurements have been carried out since 2000. Since 2000 number concentrations of nano-particles (diameter $< 100$ nm $= 0.1$ $\mu$m) have been detected at different sites by the FEA.

14. $PM_{10}$ mass concentrations reveal a pronounced annual course with maximum concentrations at the low altitude sites in winter and maximum values at the mountain stations in summer. The reason for the summer maximum at the mountain sites is the high vertical extension of the polluted mixing layer whereas in winter the mountains are frequently situated above this layer within the free troposphere

15. The number concentration of ultrafine nano-particles at the small city of Langen (30 km south of Frankfurt) shows a pronounced maximum for particle sizes between 20 and 40 nm (most likely black carbon from traffic) and another maximum below 10 nm (most likely particle formation from gas to particle conversion). On Mt. Kleiner Feldberg (820 m above NN, Taunus) a maximum between 20 and 40 nm could not be observed (no traffic).

16. The mass ratio of the chemically analysed inorganic aerosol compounds (sulfate, nitrate, chloride, ammonium, calcium, sodium, potassium) has decreased between 1990 and 1999 from ca.50% to ca. 35%.

17. The mean (1995-1999, 8 stations) mass fraction of sulfate/$PM_{10}$ was ca. 20%. The corresponding fractions of nitrate and ammonium were 12% and 5%, respectively. The highest sulfate- and nitrate fractions were observed at Schauinsland (1205 m) and Brotjacklriegel (1016 m).

18. Over the last 20 to 30 years a pronounced decrease of annual concentrations of particle-bound lead, cadmium, copper and manganese was observed. This decline is the result of emission reductions of total particulate matter in combination with additional measures to specifically reduce heavy metals (for example reduction of lead content in gasoline).

19. Regarding the stringent air quality standards with respect to $PM_{10}$ defined under the first European Union Daughter Directive 1999/30/EC a data analysis for the 8 personal stations has given the following results: Since 1992 daily $PM_{10}$ means of 50 $\mu g/m^3$ have not been exceeded more than 35 times per year (stage 1, from 2005) at any station (exception: Westerland, high contribution of sea salt to $PM_{10}$). Regarding exceedances of limit values in stage 2 (7 exceedances per year are permitted, from 2010) at 3 of 8 stations daily means of 50 $\mu g/m^3$ have been exceeded in 2001. Concerning annual mean concentrations the situation is even better than for daily means. The limit value of 40 $\mu g/m^3$ (stage 1, from 2005) has not been exceeded at any station since 1985. The more stringent limit value of 20 $\mu g/m^3$ (stage 2, from 2010) has not been exceeded since 1997 (exception: Westerland, high sea salt contribution).

20. In case of exceedances the EC member states are committed to develop action plans which have to secure that future exceedances be avoided.To establish such action plans requires the identification and quatification of the $PM_{10}$ sources and transportation paths. A detailed assessment of the contributions of different sources to the $PM_{10}$ levels observed at the FEAs monitoring network is not possible yet because some of the necessary parameters are not measured.

## 5.3.2 Ozone episodes in Germany during July and August 2001

21. In 2001 high ozone concentrations above 240 $\mu g/m^3$ (1-h-mean) have occurred more frequently as compared with 1999 and 2000. Exceedances of 240 $\mu g/m^3$ have been observed mainly in Baden-Württemberg at the end of July as well as in Nordrhein-Westfalen between 24-26 August during two meteorological situations characterized by extreme temperatures and high stability of the lower troposphere.

22. In contrast to maximum ozone concentrations in 2000 (253 $\mu g/m^3$ in Selmsdorf, Mecklemburg-Vorpommern, 1-h-mean) ozone peaks in 2001 were mainly caused by

quasi-local sources whereas the highest ozone concentrations in 2000 were caused by local/regional effects in combination with contributions from medium and long-range transport.

23. Backward trajectory analyses have shown that air masses have remained over high emission areas for more than 24 hours before reaching the ozone monitoring stations. Another result of the trajectory analysis was that the high surface peak ozone values have originated from photochemical ozone formation processes within the mixing layer.

24. The meteorological preconditions during the ozone episodes were favourable for the occurrence of high ozone peak concentrations on a large scale. In reality, however, ozone peak values were observed only in areas with high emission densities of ozone precursors i.e. ozone peaks were observed on a much smaller scale.

25. The very high ozone peak concentrations (maximum: 299 $\mu g/m^3$) observed during the episodes in summer 2001 have not affected the generally declining trend of peak concentrations in Germany between 1990 and 2001 which is the result of emission reductions. Taking into account further emission reductions in Germany and Europe by 2010 ozone peak values will continue to decrease but at a slower rate than between 1990 und 2001.

### 5.3.3 Installation of filterpack method in the FEA network

26. Following the recommendations of EMEP the filterpack method (impregnated filters) was installed in 2000 in the UBA monitoring network for detecting sulfur compounds ($SO_2$, sulfate) and nitrogen compounds (sum of $HNO_3$ and $NO_3^-$, sum of $NH_3$ and $NH_4^+$) in air and dust particles. By the filterpack method both the wet chemical TCM method ($SO_2$, since 1973) and the x-ray fluorescence method (sulfate, since 1974) were replaced.

27. The introduction of the filterpack method was necessary in order to improve the accuracy and sensitivity of measurements. For example, $SO_2$ concentrations could not by detected any longer at most UBA stations using the old methods (TCM and automatically monitoring $SO_2$ analyser ML 8850) due to the very low concentrations observed today as a result of the strongly decreasing emissions over the last 2 decades.

28. Detection limits of the filterpack method are: 0.01 $\mu g$ S / $m^3$ for $SO_2$ and $SO_4$, 0.02 $\mu g$ N / $m^3$ for $NH_3$ and $NH_4^+$ and 0.01 $\mu g$ N / $m^3$ for $HNO_3$ and $NO_3^-$.

29. A comparision of measurements at the UBA station Schauinsland between NILU and UBA using the filterpack method showed good to very good correlations with correlation coefficients of 0.96 for $SO_2$, 0.94 for sulfate, 0.93 for nitrate and 0.86 for nitric acid. In general, values measured by UBA were higher than by NILU especially for $NO_3^-$ and $HNO_3$.