

# Entwicklung der Luftqualität in Deutschland



## IMPRESSUM

Stand:  
Oktober 2009

Titelbild:  
M. Isler / [www.metair.ch](http://www.metair.ch)

Fotos:  
S. 3 W. Opolka  
S. 4 [www.imageafter.com](http://www.imageafter.com)  
S. 9 UBA / A. Eggert  
S.14 [www.imageafter.com](http://www.imageafter.com)

Herausgeber:  
Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
[www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

Redaktion:  
Umweltbundesamt  
Fachgebiet II 4.2 „Beurteilung der Luftqualität“  
E-Mail: [II4.2@uba.de](mailto:II4.2@uba.de)

## Einleitung

Die Belastung der Luft mit Schadstoffen nahm in den vergangenen 20 Jahren deutlich ab. Durch die Einführung von Filter- und Rauchgasreinigungsanlagen in Kraftwerken und Industrieanlagen, den Einsatz emissionsärmerer Brennstoffe, moderner Katalysatoren und Kraftstoffe werden heute deutlich weniger Schadstoffe in die Luft freigesetzt. Mittlerweile gibt es in Deutschland keine Überschreitungen der europaweit geltenden Grenzwerte für Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Benzol und Blei mehr.

An rund 650 Messstationen in Deutschland überwachen die Länder und der Bund die Qualität der Außenluft. Neben Feinstaub (PM<sub>10</sub>), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Ozon (O<sub>3</sub>) gehört noch eine Vielzahl weiterer Stoffe, z.B. organische Verbindungen und Schwermetalle im Feinstaub, zum Messumfang an diesen Stationen.



Auf ihrem Weg von der Emissionsquelle (z.B. Schornstein, Auspuff) zum Rezeptor (Mensch, Pflanzen und Tiere) unterliegen Schadstoffemissionen meteorologischen Transport- und Durchmischungsvorgängen sowie chemischen Umwandlungen. Aus der freigesetzten Schadstoffmenge (angegeben z.B. in Tonnen pro Jahr) kann deshalb nicht direkt auf die Schadstoffkonzentration in der Luft (angegeben z.B. in Mikrogramm pro Kubikmeter Luft) geschlossen werden. Grundsätzlich lassen deutlich verminderte Schadstoffemissionen aber erwarten, dass auch die Schadstoffkonzentration in der Luft abnimmt. Seit Anfang dieses Jahrzehnts stellen wir jedoch fest, dass die Belastung der Luft durch Feinstaub, Stickstoffdioxid und Ozon in Deutschland trotz kontinuierlich verminderter Emissionen keinen eindeutigen Trend mehr aufweist, sondern vornehmlich zwischenjährlichen Schwankungen unterliegt.

Die bereits 1999 festgelegten und seit dem Jahr 2005 einzuhaltenden Grenzwerte für Feinstaub werden vielerorts in Deutschland überschritten. Gleiches gilt auch für die ab dem 1.1.2010 einzuhaltenden Grenzwerte

für Stickstoffdioxid in Deutschland. In städtischen Gebieten – und dort vor allem an stark vom Verkehr geprägten Orten – ist die Belastung der Luft mit Feinstaub und Stickstoffdioxid besonders hoch. Anders als bei Feinstaub und Stickstoffdioxid tritt die höchste Ozonbelastung im ländlichen Raum auf. Seit einigen Jahren ist im städtischen Bereich eine Tendenz zu höheren Werten erkennbar.

Mit dieser Broschüre stellen wir die Entwicklung der Luftbelastung durch Feinstaub, Stickstoffoxide und Ozon dar und erläutern deren Zusammenhang mit den Veränderungen der Schadstoffemissionen.



Foto: www.imageafter.com

## Die Belastungsregimes

Um eine räumlich differenzierte Entwicklung der Luftbelastung nachvollziehen zu können, ist es erforderlich, die an den einzelnen Luftmessstationen erhobenen Konzentrationswerte so zusammenzufassen, dass sie bestimmte Belastungsregimes charakterisieren. Das Regime *ländlicher Hintergrund* (grüne Fläche in der schematischen Darstellung) steht dabei stellvertretend für Gebiete, in denen die Luftqualität weitgehend unbeeinflusst von lokalen Emissionen ist. Stationen in diesem Regime repräsentieren somit das großräumige Belastungsniveau, auch als großräumiger Hintergrund bezeichnet. Das Regime *städtischer Hintergrund* (gelbe Fläche in der schematischen Darstellung) ist charakteristisch für Gebiete, in denen die gemessenen Schadstoffkonzentrationen als typisch für die Luftqualität in der Stadt angesehen werden können. Sie beschreibt die Belastung, die sich aus städtischen Emissionen (Straßenverkehr, Hausbrand etc.) und dem großräumigen Hintergrund ergibt. Stationen des Regimes *städtisch verkehrsnah* (rote Spitzen in der schematischen Darstellung) befinden sich typischerweise in stark befahrenen Straßen. Dadurch addiert sich zur städtischen Hintergrundbelastung ein Beitrag, der durch die direkten Emissionen des Straßenverkehrs entsteht.

Die in dieser Broschüre dargestellten Verlaufskurven der Luftqualität reflektieren die zeitliche Entwicklung der mittleren Konzentrationen in den jeweiligen Belastungsregimes. Zur Beurteilung im Hinblick auf die Überschreitung oder Einhaltung von Grenzwerten einzelner Messstationen sind diese Verlaufskurven daher nicht geeignet.

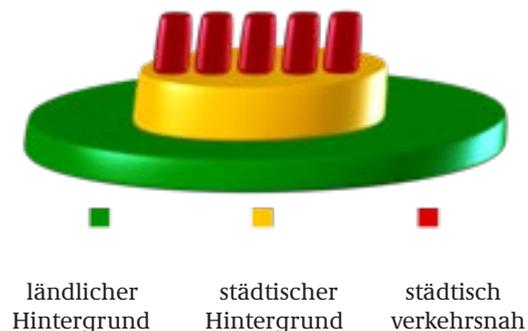
## Stickstoffoxide

$\text{NO}_x$  ist eine Sammelbezeichnung für Stickstoffoxide und fasst als Summenparameter Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) zusammen. Stickstoffoxide werden überwiegend als Stickstoffmonoxid emittiert. Stickstoffdioxid wird sowohl direkt emittiert als auch indirekt durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre gebildet. Verbrennungsmotoren und Verbrennungsprozesse in Industrie- und Energieerzeugungsanlagen sind die Hauptquellen von Stickstoffoxiden.

Ausgehend vom Jahr 1995 nahmen die  $\text{NO}_x$ -Emissionen aller Verursachergruppen bis zum Jahr 2000 um 15% ab (Abbildung 1).

Von den Stickstoffverbindungen hat gasförmiges Stickstoffdioxid in der Umgebungsluft für die menschliche Gesundheit die größte Bedeutung. Als starkes Oxidationsmittel führt es zu Entzündungsreaktionen in den Atemwegen und verstärkt die Reizwirkung anderer Luftschadstoffe.

Schematische Darstellung der Belastungsregimes:



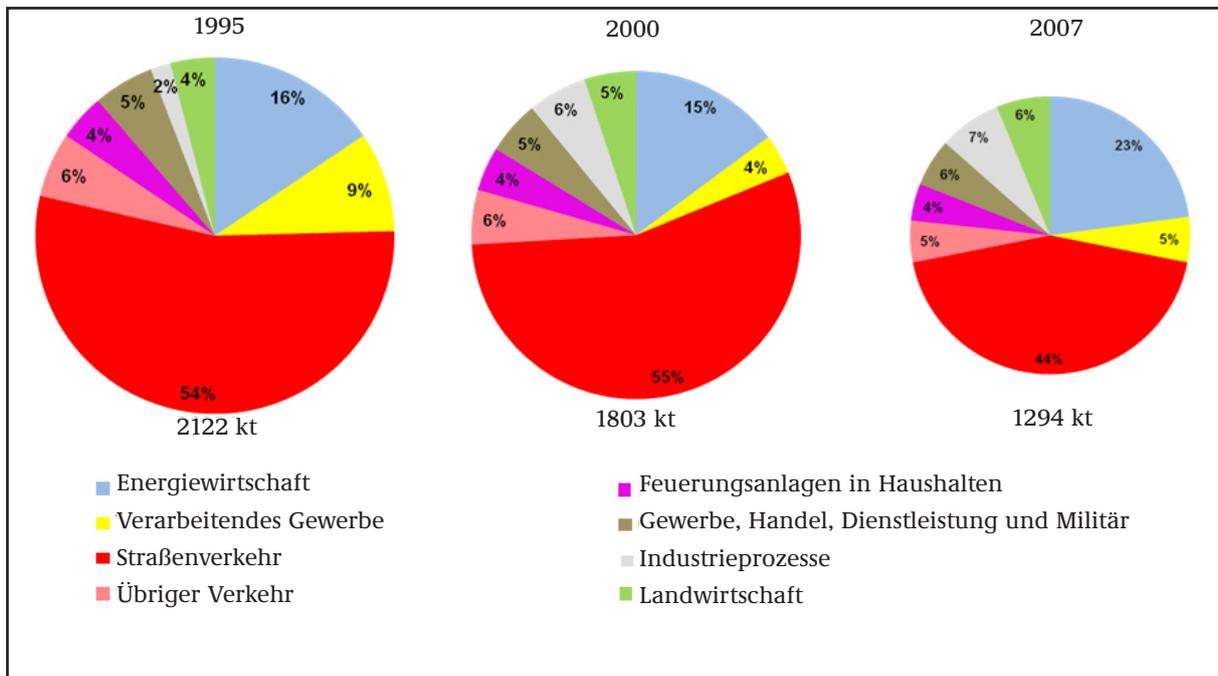


Abbildung 1: Prozentualer Anteil der Verursachergruppen an den NO<sub>x</sub>-Emissionen in den Jahren 1995, 2000 und 2007.

Bis 2007 sanken sie um weitere 24 Prozentpunkte. Betrachtet man nur die Emissionen des Straßenverkehrs, so ist festzustellen, dass hier mit einer Halbierung der Emissionen die stärkste Minderung erzielt wurde. Ungeachtet dessen hat der Straßenverkehr nach wie vor den größten Anteil (44%) an den gesamten Stickstoffoxidemissionen.

Der Effekt der NO<sub>x</sub>-Emissionsminderung ist in der Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Jahresmittelwertkonzentrationen gut erkennbar: Im Zeitraum von 1995 bis 2007 nahmen diese im städtisch verkehrsgeprägten Belastungsregime (Abbildung 2, rote Kurve) und im städtischen Hintergrund (Abbildung 2, orange Kurve) ab.

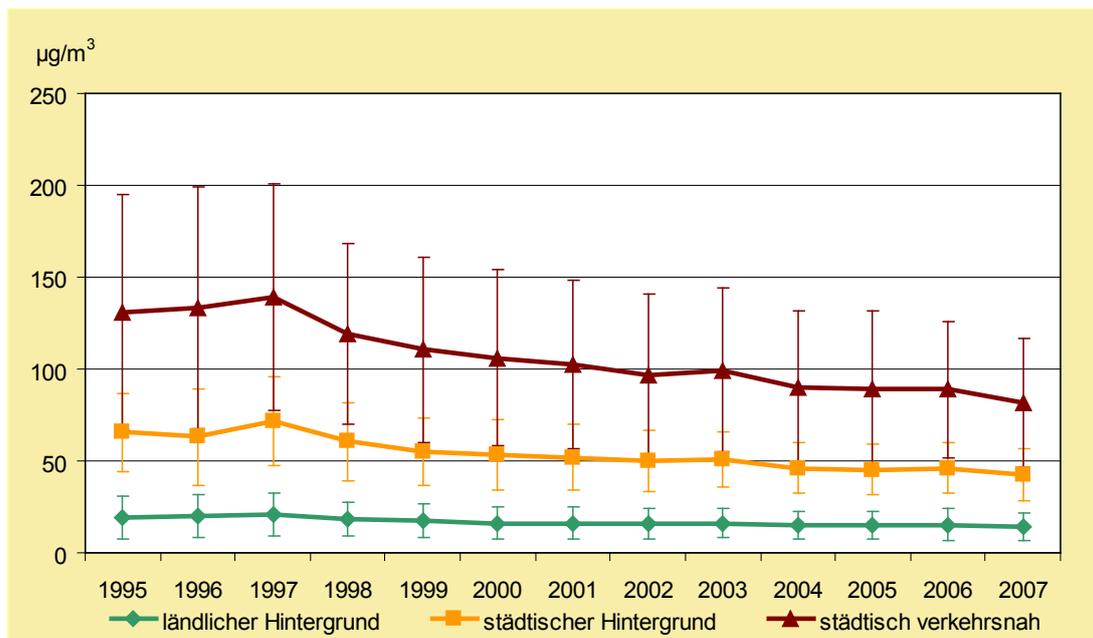


Abbildung 2: Entwicklung der Jahresmittelwerte der NO<sub>x</sub>-Konzentration im Mittel über die Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im Zeitraum 1995 bis 2007 (mit Standardabweichung).

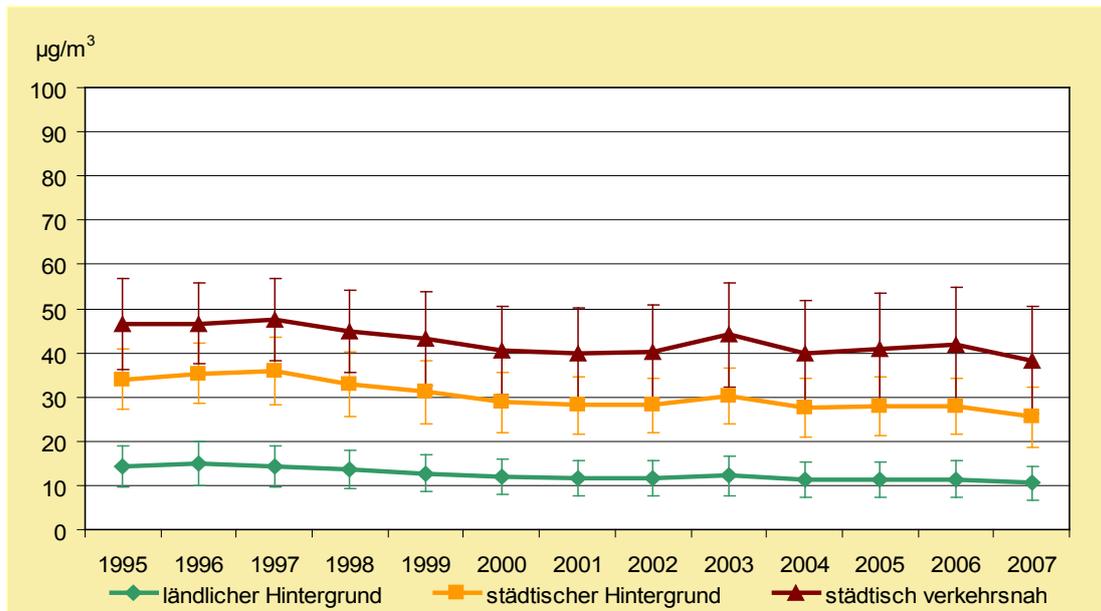


Abbildung 3: Entwicklung der Jahresmittelwerte der NO<sub>2</sub>-Konzentration im Mittel über die Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im Zeitraum 1995 bis 2007 (mit Standardabweichung).

Die Darstellung der Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Konzentrationswerte im gleichen Zeitraum zeigt allerdings: Die deutliche Minderung der NO<sub>x</sub>-Emissionen seit 1995 spiegelt sich in der NO<sub>2</sub>-Belastungssituation (Abbildung 3) nicht wider. Seit 2000 haben sich die NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte in städtisch verkehrsnahen Gebieten (Abbildung 3, rote Kurve) und im städtischen Hintergrund (Abbildung 3, orange Kurve) kaum verändert.

Die erkennbaren zwischenjährlichen Schwankungen sind vor allem auf witterungsbedingte Einflüsse zurückzuführen. Aus der angegebenen Standardabweichung lässt sich die Bandbreite der Jahresmittelwerte der einzelnen Messstationen schätzen. Dabei wird deutlich: Im städtisch verkehrsnahen Belastungsregime treten Jahresmittelwerte auf, die deutlich über dem ab 2010 einzuhaltenden Grenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup> liegen.

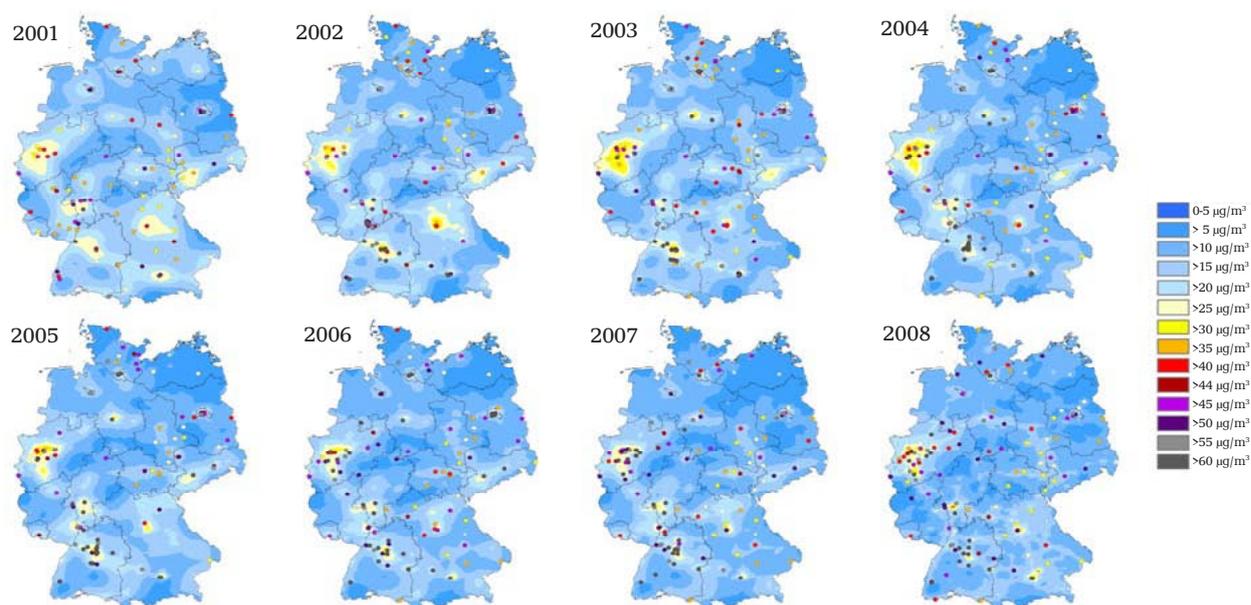


Abbildung 4: Mittlere NO<sub>2</sub>-Immissionsbelastung in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2008 mit „Spots“.

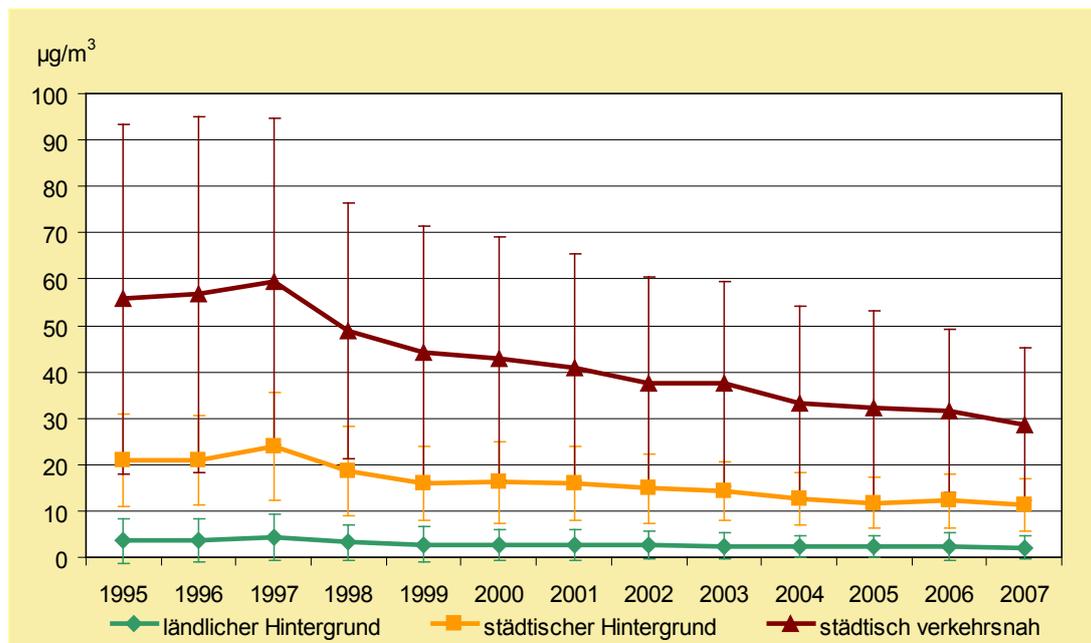


Abbildung 5: Entwicklung der Jahresmittelwerte der NO-Konzentration im Mittel über die Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im Zeitraum 1995 bis 2007 (mit Standardabweichung).

Die mittlere NO<sub>2</sub>-Immissionsbelastung in Deutschland weist einen stark ausgeprägten Gradienten von den Ballungsräumen hin zum Land auf (vgl. Abbildung 4). An mit NO<sub>2</sub> hoch belasteten Orten beträgt der Anteil der Hintergrundbelastung etwa 20%.

Messergebnisse, die im Einflussbereich stark befahrener Straßen erhoben wurden, sind als Punkte – so genannte Spots – eingetragen, da sie die lokale, kleinräumige Belastung vor Ort charakterisieren und somit für eine großräumige Interpolation nicht geeignet sind.

Da die NO<sub>2</sub>-Konzentration im Betrachtungszeitraum seit 1995 keine Abnahme zeigt, muss der Rückgang der NO<sub>x</sub>-Konzentration auf eine abnehmende NO-Konzentration zurückzuführen sein. Im städtischen Hintergrund (Abbildung 5, orange Kurve) und stärker noch an stark verkehrsbelasteten Orten (Abbildung 5, rote Kurve) ist seit 1995 ein rückläufiger Trend der NO-Jahresmittelwerte gut zu erkennen.

### Grenzwerte für NO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>

Bezeichnung	Mittelungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, bis zu dem der Grenzwert zu erreichen ist
Stundengrenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	1 Stunde	200 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub> dürfen nicht öfter als 18mal im Kalenderjahr überschritten werden	1. Januar 2010*
Jahresgrenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	1 Kalenderjahr	40 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>2</sub>	1. Januar 2010*
Jahresgrenzwert für den Schutz der Vegetation	1 Kalenderjahr	30 µg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub>	19. Juli 2001*

\* Fristverlängerung nach EU-Richtlinie 2008/50/EG möglich (siehe Textbox S. 8)

Messungen an städtischen, stark verkehrsbelasteten Orten weisen hohe  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen mit einem hohen Anteil an  $\text{NO}$  (Abbildung 5, rote Kurve) auf, weil die Transportzeit der  $\text{NO}_x$ -Emissionen vom Auspuff bis zum verkehrsnahen Messort, verglichen mit der Reaktionszeit für die Umwandlung von  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$ , kurz ist. Mit zunehmender Transportzeit wird  $\text{NO}$  weitgehend zu  $\text{NO}_2$  umgewandelt. Dies erklärt auch das niedrige  $\text{NO}$ -Belastungsniveau im ländlichen Bereich (Abbildung 5, grüne Kurve), welches über den gesamten Beobachtungszeitraum nahezu konstant geblieben ist.

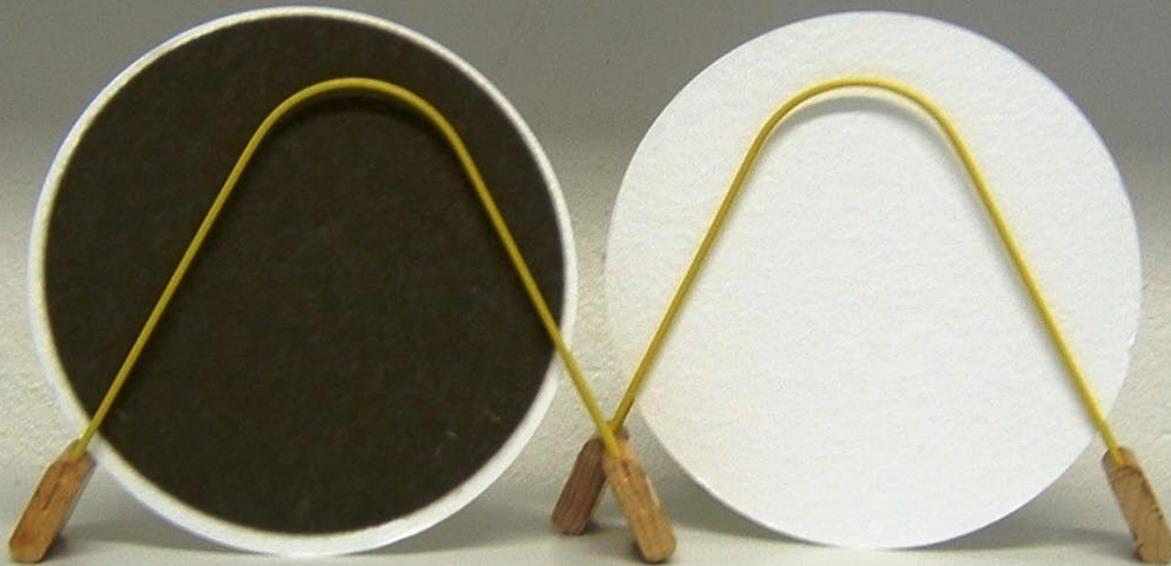
#### **Zur „Fristverlängerung“ gemäß Artikel 22 und 23 der Richtlinie 2008/50/EG:**

Eine Besonderheit der neuen Richtlinie 2008/50/EG ist die Möglichkeit, die für die Einhaltung der Luftqualitätsgrenzwerte gesetzten Fristen per Mitteilung an die Kommission zu verlängern. Diese eingeräumte Flexibilität geht mit strengen Maßnahmen zur Durchsetzung der Richtlinie einher: Die Flexibilisierung ist ein gewollt starres Instrument. Zur Verlängerung müssen bestimmte Bedingungen erfüllt sein, für die der Mitgliedstaat Belege vorlegt. Für  $\text{PM}_{10}$  ist ein Aufschub von drei Jahren ab Erscheinen der Richtlinie, also bis zum 11. Juni 2011, möglich. Für  $\text{NO}_2$  endet die maximal mögliche Fristverlängerung 2015.

Der Mitteilung der Fristverlängerung sind umfangreiche Unterlagen beizufügen, warum die Grenzwerte trotz Maßnahmen der Luftreinhalte- und Aktionspläne nicht eingehalten werden konnten und wie und mit welchen zusätzlichen Maßnahmen der Mitgliedstaat die Grenzwerte bis zum neuen Stichtag einhalten will. Die Kommission hat nach Eingang der Mitteilung neun Monate Zeit zur Prüfung der Unterlagen. Hat sie in dieser Frist keine Einwände erhoben, gilt die Fristverlängerung als akzeptiert.

#### **Zusammenfassung:**

Die Entwicklung der  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen reflektiert die Minderung der  $\text{NO}_x$ -Emissionen eindrucklich. In Bezug auf  $\text{NO}_2$  verbesserte sich die Luftqualität hingegen nicht in dem Maße, wie dies die  $\text{NO}_x$ -Emissionsentwicklung erwarten ließe. Die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen sind seit 2000 nahezu unverändert und weisen in allen drei Belastungsregimes lediglich zwischenjährliche Schwankungen auf. In Ballungsräumen und hier insbesondere im verkehrsnahen Belastungsregime treten  $\text{NO}_2$ -Jahresmittelwerte auf, die über dem ab 2010 einzuhaltenden Grenzwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  liegen.



Staubfilter – links bestaubt, rechts unbestaubt

Foto: UBA / A. Eggert

## Feinstaub

Als Feinstaub, Schwebstaub oder englisch „Particulate Matter“ (PM) bezeichnet man Teilchen in der Luft, die nicht sofort zu Boden sinken, sondern eine gewisse Zeit in der Atmosphäre verweilen. Die Feinstaubteilchen werden je nach Korngröße in so genannte Fraktionen unterteilt. Unter  $PM_{10}$  versteht man alle Staubteilchen, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer ist. Eine Teilmenge der  $PM_{10}$ -Fraktion sind die noch feineren  $PM_{2,5}$ -Teilchen, deren aerodynamischer Durchmesser weniger als 2,5 Mikrometer beträgt. Nachfolgend wird  $PM_{10}$  betrachtet.

Die Feinstaubkonzentrationen in der Luft stammen zum Teil aus direkten  $PM_{10}$ -Emissionen (z.B. Verkehr, Industrieanlagen) und entstehen auch durch sekundär gebildetes  $PM_{10}$ . Letzteres bildet sich durch chemische Reaktion der anorganischen und organischen Vorläuferstoffe Ammoniak ( $NH_3$ ), Stickstoffoxide ( $NO_x$ ), Schwefeldioxid ( $SO_2$ ) und flüchtigen Nichtmethan-Kohlenwasserstoffen (NMVOC) während des Transports über größere Entfernungen. Als Summe beider Komponenten (primär plus sekundär) resultiert die gesamte Feinstaubbelastung. Wichtige anthropogene Feinstaubquellen sind Kraftfahrzeuge, Kraft- und Fernheizwerke, Öfen und Heizungen in Wohnhäusern, der Schüttgutumschlag sowie bestimmte Industrieprozesse. In Ballungsgebieten ist vor allem der Straßenverkehr eine bedeutende Feinstaub-

Eingeatmeter Feinstaub hat schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Die Palette der möglichen Erkrankungen reicht von entzündlichen Veränderungen im Atemtrakt bis hin zur Beeinträchtigung von Herz und Kreislauf. Je kleiner die Staubpartikel sind und je tiefer sie in den Atemtrakt eindringen, desto größer ist das Risiko zu erkranken. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat in epidemiologischen Studien festgestellt: Eine Konzentrationsschwelle in der Umgebungsluft, unterhalb derer keine schädigende Wirkung zu erwarten ist, gibt es für Feinstaub nicht. Nicht nur kurzzeitig erhöhte Konzentrationen führen zu gesundheitlich negativen Wirkungen; auch längerfristige, geringere Konzentrationen leisten einen deutlichen Beitrag zur Gesamtwirkung.

quelle. Dabei gelangt Feinstaub nicht nur aus Motoren – vorrangig aus Dieselmotoren – in die Luft, sondern auch durch Bremsen- und Reifenabrieb sowie durch die Aufwirbelung des Staubes von der Straßenoberfläche. Eine weitere wichtige Quelle ist die Landwirtschaft: Die Emissionen gasförmiger Vorläuferstoffe, insbesondere die Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung tragen zur sekundären Aerosolbildung bei. Natürliche Beiträge zur Feinstaubbelastung entstehen beispielsweise durch Seesalz, Saharastaub und Waldbrände.

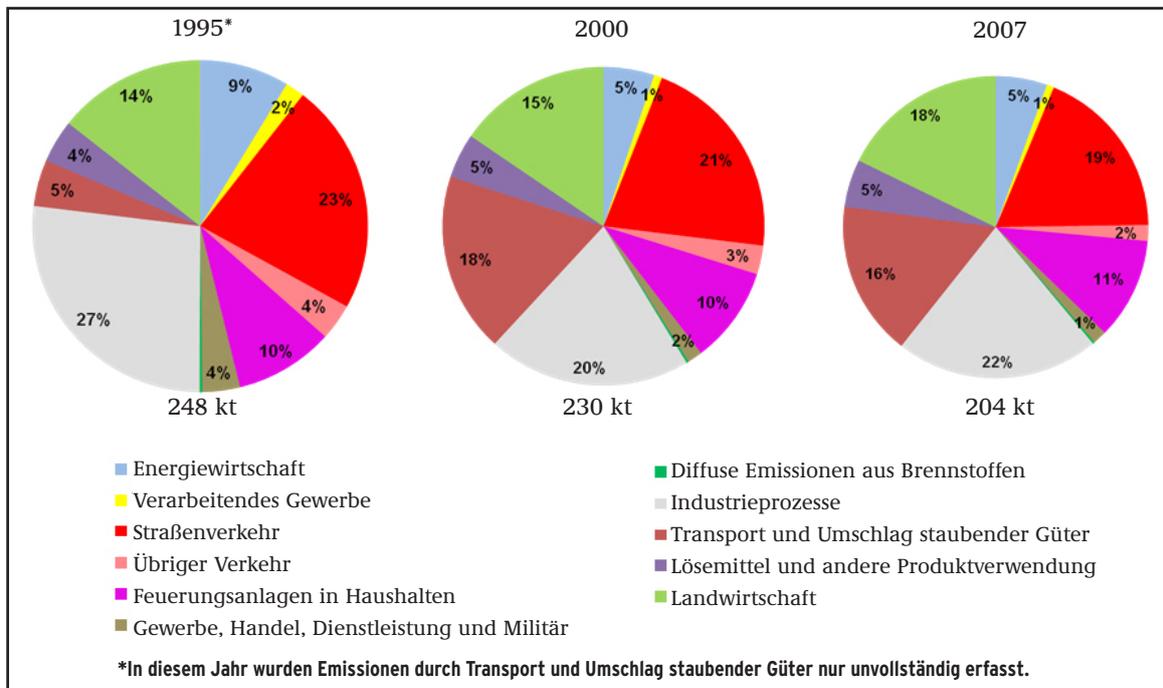


Abbildung 6: Prozentualer Anteil der Verursachergruppen an den PM<sub>10</sub>-Emissionen in den Jahren 1995, 2000 und 2007.

Ausgehend vom Jahr 1995 nahmen die primären PM<sub>10</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2000 um 7% ab (vgl. Abbildung 6); bis zum Jahr 2007 verringerten sie sich um weitere 10 Prozentpunkte. Dabei waren die absoluten Abnahmen in den Bereichen Industrieprozesse und Straßenverkehr am stärksten. Mit Ausnahme der Landwirtschaft haben sich die Anteile der einzelnen Verursacher an den Emissionen im gesamten Zeitraum jedoch kaum verändert.

Die Emissionen der PM<sub>10</sub>-Vorläuferstoffe – Schwefeldioxid, Stickstoffoxide und flüchtige Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe – sind seit 1995 erheblich verringert worden. Im Unterschied dazu nahmen die zu 95% aus der Landwirtschaft (Abbildung 7) stammenden Ammoniak-Emissionen (NH<sub>3</sub>) seit 1995 kaum ab.

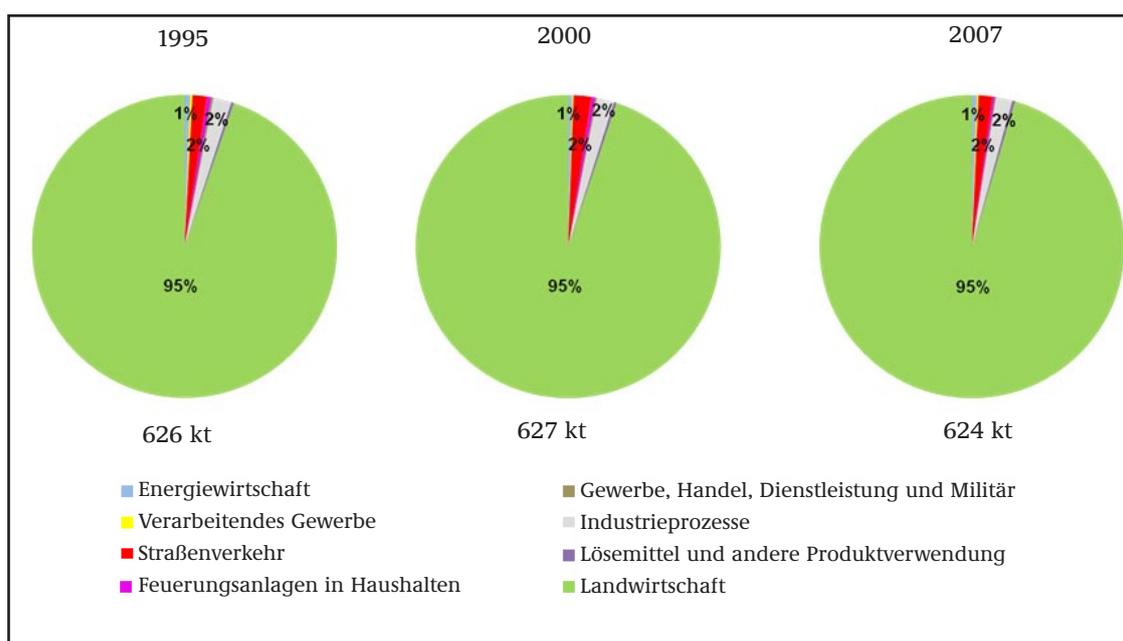


Abbildung 7: Prozentualer Anteil der Verursachergruppen an den NH<sub>3</sub>-Emissionen in den Jahren 1995, 2000 und 2007.

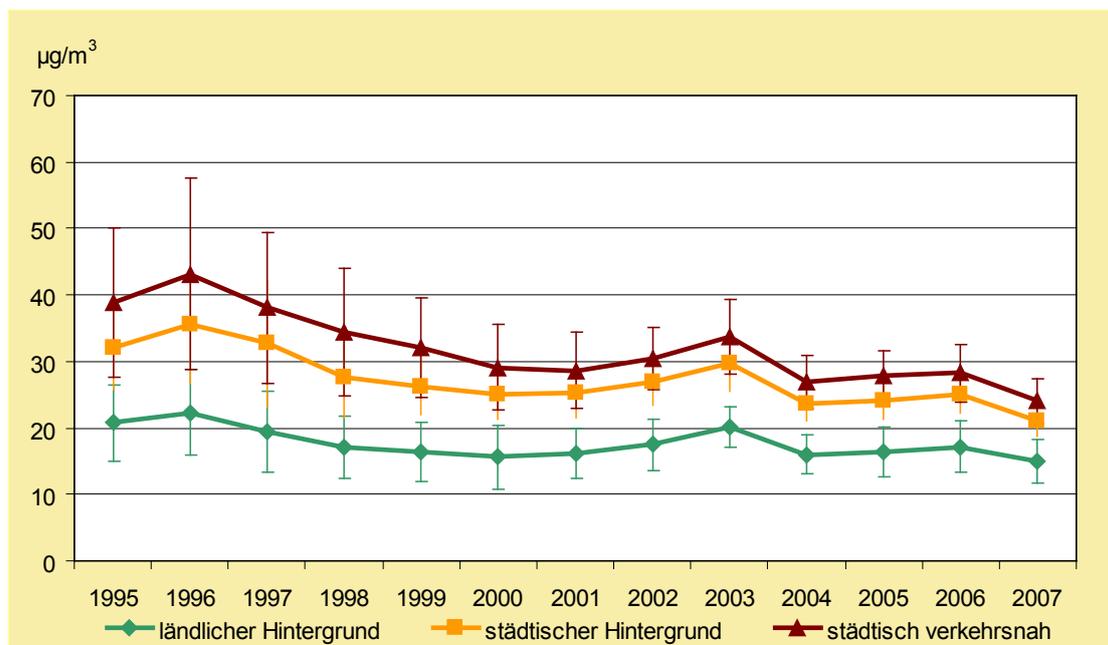


Abbildung 8: Entwicklung der Jahresmittelwerte der PM<sub>10</sub>-Konzentration im Mittel über die Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im Zeitraum 1995 bis 2007 (mit Standardabweichung).

Einhergehend mit der starken Abnahme der SO<sub>2</sub>-Emissionen und dem Rückgang der primären PM<sub>10</sub>-Emissionen im Zeitraum 1995 bis 2000 sanken im gleichen Zeitraum auch die PM<sub>10</sub>-Konzentrationen in allen Belastungsregimes (vgl. Abbildung 8). Seitdem ist kein klar abnehmender Trend des Konzentrationsverlaufs mehr zu beobachten. Dass das PM<sub>10</sub>-Konzentrationsniveau in Ballungsräumen sowohl im städtischen Hintergrund als auch im städtisch verkehrsnahen Belastungsregime seit dem Jahr 2000 stagniert, ist auf die immer noch hohen verkehrsbedingten PM<sub>10</sub>-Emissionen und die nur gering abnehmenden Emissionen der Feuerungsanlagen in Haushalten zurückzuführen. Die seit 2000 nahezu auf unverändertem Niveau verharrende PM<sub>10</sub>-Belastung im emittentenfernen, ländlichen Hintergrund lässt darauf schließen, dass sich der sekundäre PM<sub>10</sub>-Anteil an

der PM<sub>10</sub>-Gesamtbelastung nicht verringerte. Während die Emissionen der PM<sub>10</sub>-Vorläuferstoffe NMVOC und NO<sub>x</sub> deutlich um jeweils ca. 40% sanken, nahmen die NH<sub>3</sub>-Emissionen kaum ab. NH<sub>3</sub>-Emissionen sind ein limitierender Faktor bei der Bildung sekundärer Partikel im ländlichen Raum. Da die Landwirtschaft mit über 90% Anteil Hauptverursacher von NH<sub>3</sub>-Emissionen ist und diese in den Jahren seit 1995 kaum abnahmen, leistete diese Verursachergruppe auch keinen Beitrag zur Verminderung der Feinstaubbelastung.

Die zeitliche Entwicklung der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen wird von witterungsbedingten Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren überlagert – gut erkennbar z.B. an der „Spitze“ in allen drei Kurven im Jahr 2003.

### Grenzwerte für PM<sub>10</sub>

Bezeichnung	Mittelungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, bis zu dem der Grenzwert zu erreichen ist
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	24 Stunden	50 µg/m <sup>3</sup> PM <sub>10</sub> dürfen nicht öfter als 35mal im Jahr überschritten werden	1. Januar 2005*
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	1 Kalenderjahr	40 µg/m <sup>3</sup> PM <sub>10</sub>	1. Januar 2005*

\* Fristverlängerung nach EU-Richtlinie 2008/50/EG möglich (siehe Textbox S. 8)

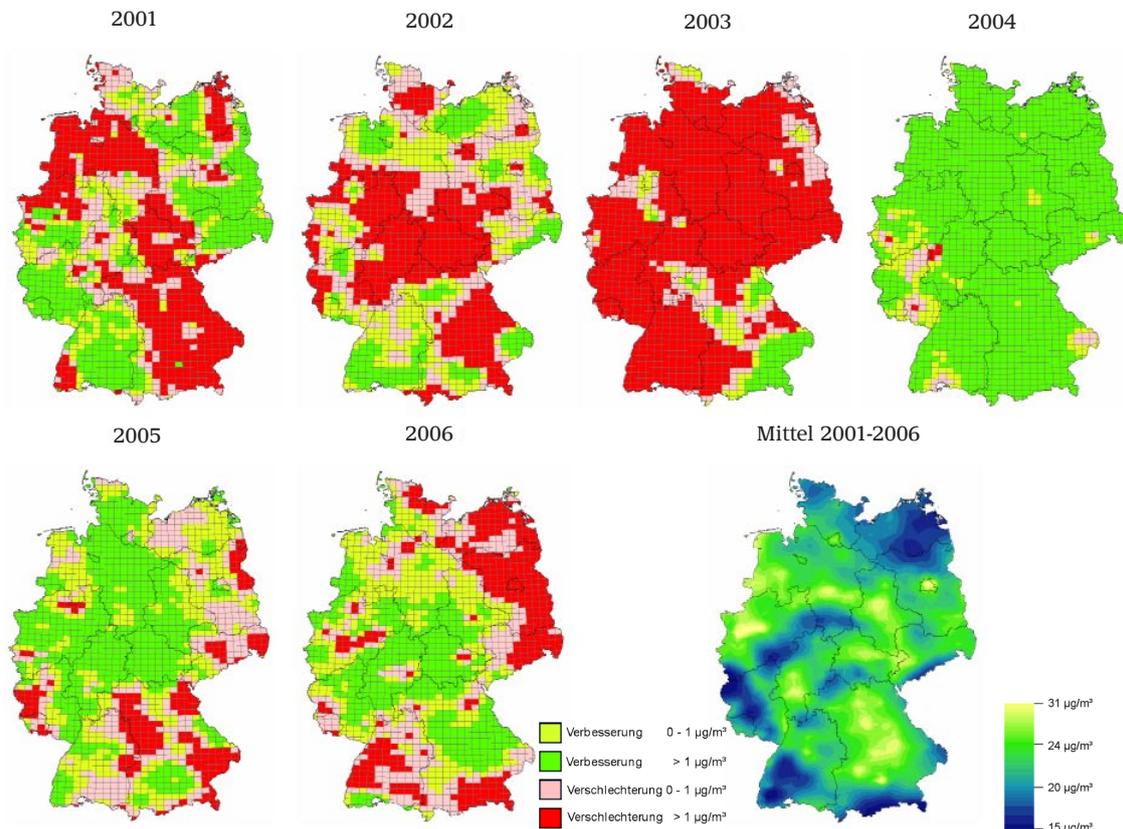


Abbildung 9: Mittlere jährliche Abweichung der  $PM_{10}$ -Jahresmittelwerte in den Jahren 2001 bis 2006 gegenüber dem  $PM_{10}$ -Mittelwert des Zeitraumes 2001-2006.

In Abbildung 9 ist die mittlere Abweichung der  $PM_{10}$ -Jahresmittelwerte für die Jahre 2001 bis 2006 im Vergleich zum  $PM_{10}$ -Mittelwert über den 6-Jahreszeitraum 2001 bis 2006 dargestellt. Rot eingefärbt sind Gebiete, die im betrachteten Jahr höhere  $PM_{10}$ -Jahresmittelwerte im Vergleich zum 6-Jahresmittel aufweisen. Grün eingefärbte Regionen sind solche, die im Vergleich zum 6-Jahresmittel durch geringere  $PM_{10}$ -Jahresmittelwerte charakterisiert sind. Das Jahr 2003 sticht auch hier wegen der deutlich höheren  $PM_{10}$ -Belastung gegenüber dem Mehrjahresmittel klar hervor.

Auch in der flächenhaften Darstellung der Zahl der Tage mit  $PM_{10}$ -Tagesmittelwerten über  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die einzelnen Jahre von 2001 bis 2008 (Abbildung 10) sind zwischenjährliche Schwankungen gut erkennbar. Es besteht ein deutlicher Gradient der  $PM_{10}$ -Belastung von den Ballungsräumen hin zum Land, der jedoch schwächer als bei  $\text{NO}_2$  ausgeprägt ist.

### **Einfluss der Witterungsbedingungen auf die Schadstoffbelastung:**

Ursache der Luftschadstoffbelastungen sind Emissionen aus den unterschiedlichsten Quellen. Der Transport und die Verteilung von Schadstoffen in der Atmosphäre erfolgt in Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen. So führen winterliche Hochdruckwetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten, in denen der vertikale Luftaustausch auf wenige hundert Meter eingeschränkt ist, zur Anreicherung von Schadstoffen in den unteren Luftschichten. Andererseits tragen Wetterlagen mit guten Durchmischungsbedingungen zu einer Ausbreitung und damit zu einer Verdünnung von Schadstoffen in der Luft bei. Darüber hinaus spielen Niederschlagsprozesse eine Rolle. So prägen die von Jahr zu Jahr unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen deutlich die zwischenjährlichen Schwankungen in der Luftbelastung.

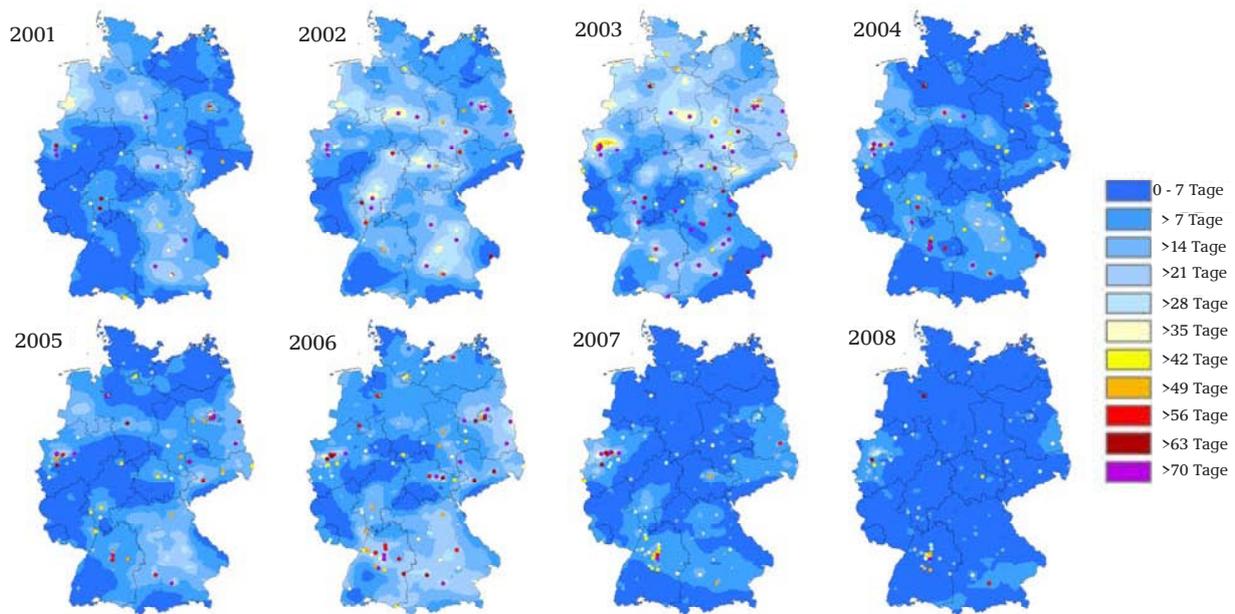


Abbildung 10: PM<sub>10</sub>-Immissionsbelastung – Zahl der Tage mit PM<sub>10</sub>-Tagesmittelwerten über 50 µg/m<sup>3</sup> – in Deutschland 2001 bis 2008 mit „Spots“.

### Zusammenfassung:

Die Abnahmen der primären PM<sub>10</sub>-Emissionen und der Vorläuferstoffe spiegeln sich im zeitlichen Verlauf der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen nicht wider. Ab dem Jahr 2000 prägen lediglich zwischenjährliche Schwankungen die PM<sub>10</sub>-Konzentrationen in allen drei Belastungsregimes. Die seit 2005 einzuhaltenden Feinstaub-Grenzwerte werden selbst in Jahren mit vergleichsweise geringer Feinstaubbelastung im städtischen verkehrsnahen Bereich überschritten.

## Ozon und seine Vorläuferstoffe

Bodennahes Ozon – dreiatomiger Sauerstoff,  $O_3$  – wird nicht direkt freigesetzt, sondern bei intensiver Sonneneinstrahlung durch komplexe photochemische Prozesse aus Vorläuferschadstoffen – überwiegend Stickstoffoxiden und flüchtigen Nichtmethan-Kohlenwasserstoffen (NMVOC) – sekundär gebildet. Hohe Lufttemperaturen und starke Sonneneinstrahlung begünstigen die Entstehung von bodennahem Ozon in der Atmosphäre. Dies ist typisch für die meteorologischen Bedingungen während sommerlicher Hochdruckwetterlagen.

Die Ozonvorläuferstoffe haben sowohl natürliche als auch anthropogene Quellen. 44% der Stickstoffoxide stammen aus dem Verkehrsbereich, vornehmlich dem Straßen-

verkehr (s. Kapitel Stickstoffoxide). Mehr als die Hälfte (56%) der flüchtigen organischen Stoffe werden bei der Verwendung von Lösemitteln freigesetzt. Lösemittel finden sich in vielen Produkten, wie Farben und Lacke, Klebstoffe und Reinigungsmittel. Verglichen mit dem Jahr 1995 sind die NMVOC- und  $NO_x$ -Emissionen in Deutschland bis 2007 um 39% zurückgegangen. Die absolut größten Minderungen der NMVOC-Emissionen stammen aus dem Verkehrsbereich, der Lösemittelanwendung und den diffusen Emissionen aus Brennstoffen.

Obwohl die Emissionen der Ozonvorläuferstoffe erheblich zurückgingen, weisen die Ozon-Jahresmittelwerte seit 1990 einen deutlich zunehmenden Trend auf.

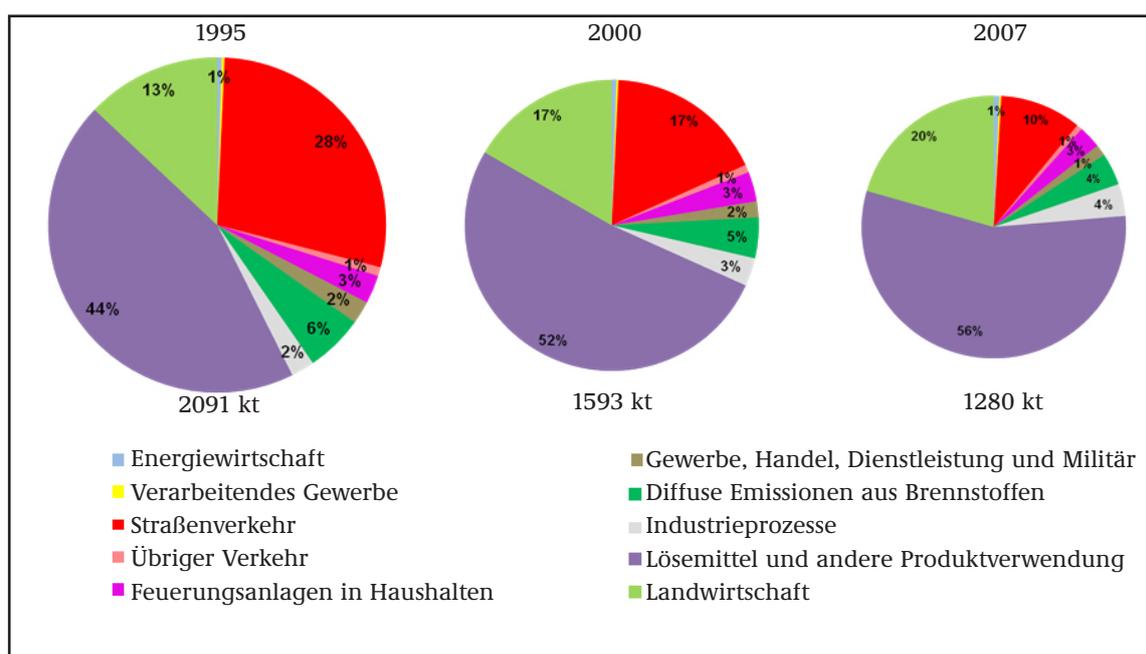


Abbildung 11: Prozentualer Anteil der Verursachergruppen an den NMVOC-Emissionen in den Jahren 1995, 2000 und 2007.

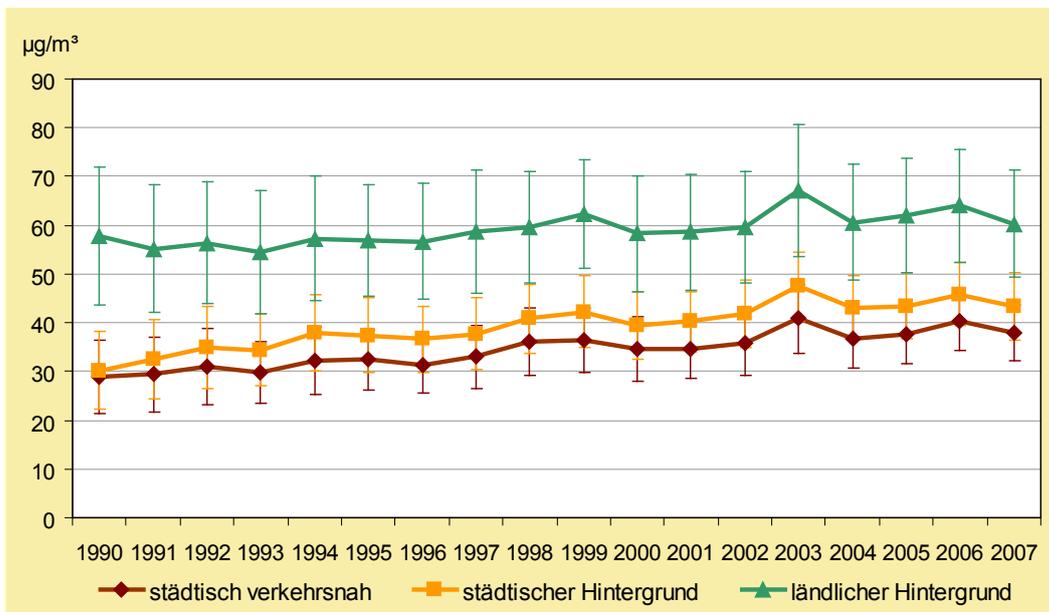


Abbildung 12: Entwicklung der Ozon-Jahresmittelwerte im Mittel über die Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im Zeitraum 1990 bis 2007 (mit Standardabweichung).

Mit  $0,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und Jahr ist der Anstieg im städtischen Hintergrund (Abbildung 12, orange Kurve) am stärksten ausgeprägt. Die Wertedifferenz zwischen den städtischen Stationen (Abbildung 12, rote und orange Kurven) und denen im ländlichen Hintergrund (Abbildung 12, grüne Kurve) hat sich von 1990 bis 2007 nahezu stetig verringert.

Dieser Trend lässt sich mittels der Häufigkeitsverteilung der einstündigen Ozonmittelwerte im Belastungsregime des städtischen Hintergrunds weiter verdeutlichen (vgl. Abbildung 13).

Ozon ist ein sehr reaktives Gas. Aufgrund seiner oxidierenden Wirkung können erhöhte Ozonkonzentrationen beim Menschen Reizungen der Atemwege, Husten, Kopfschmerzen und Atembeschwerden bis hin zu Einschränkungen der Lungenfunktion hervorrufen. Das Ausmaß der Beeinträchtigung wird durch die Aufenthaltsdauer in ozonbelasteter Luft mitbestimmt. Befindlichkeitsstörungen wie Reizerscheinungen an Augen und Schleimhäuten werden vor allem durch Begleitstoffe des Ozons (Photooxidantien) hervorgerufen.

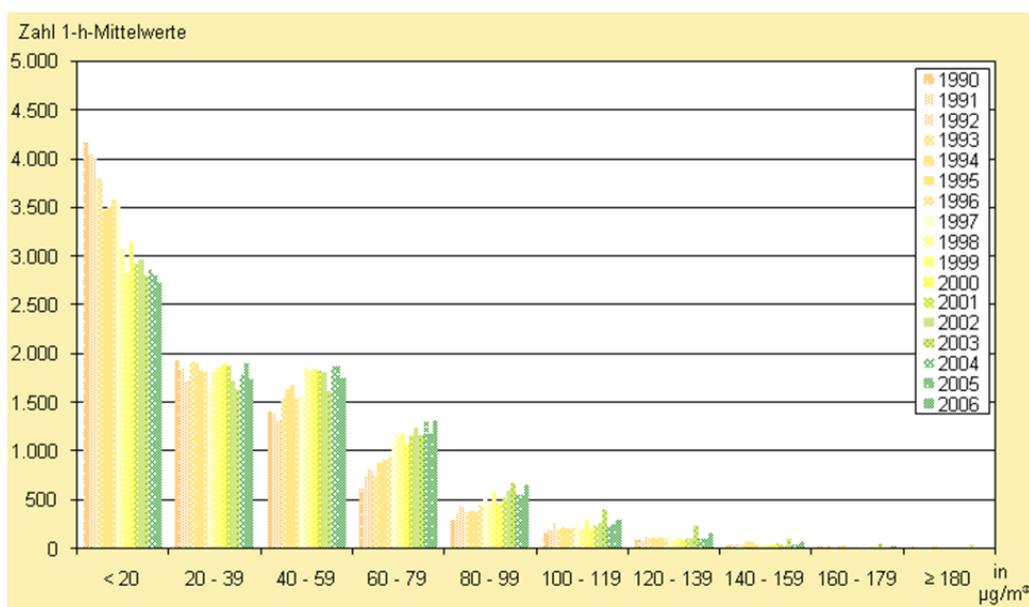


Abbildung 13: Entwicklung der 1-Stunden-Mittelwerte der Ozonkonzentration nach Konzentrationsklassen in den Jahren 1990 bis 2006 für die Stationsklasse „städtischer Hintergrund“.

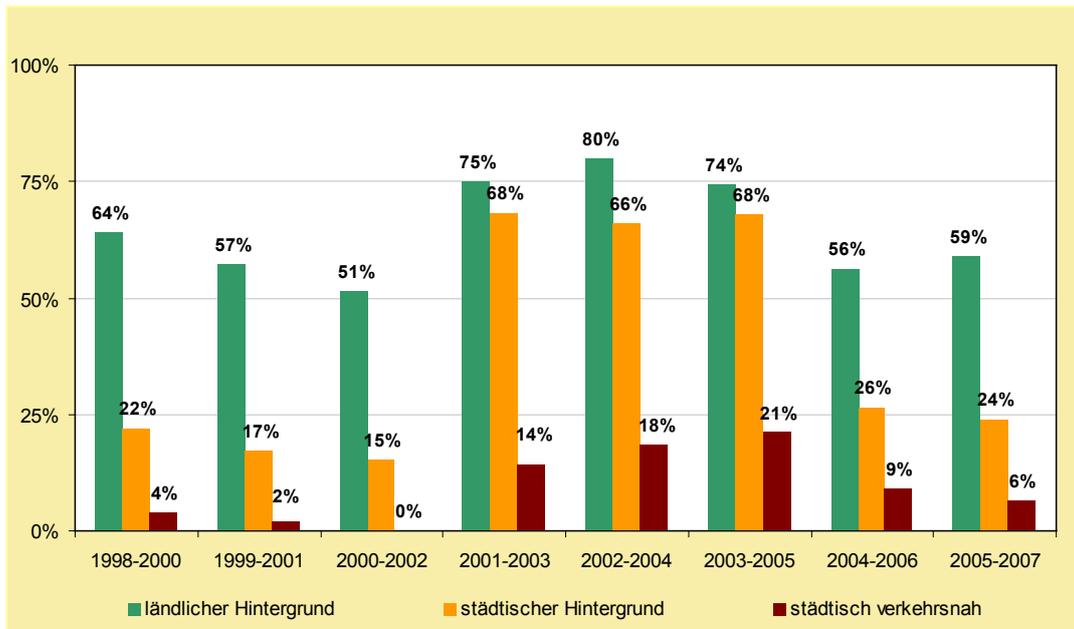


Abbildung 14: Prozentualer Anteil der Messstationen mit Überschreitung des Ozon-Zielwertes in den Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im gleitenden Mittel über 3 Jahre.

Hierzu sind die einstündigen Ozonwerte in Konzentrationsklassen von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für den Zeitraum 1990 (Balken ganz links in der jeweiligen Klasse) bis 2006 (Balken ganz rechts in der jeweiligen Klasse) aufgetragen.

Die Zahl der niedrigen Ozonwerte bis  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nimmt von 1990 bis 2006 stark ab. Im mittleren Konzentrationsbereich von 40 bis  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ist hingegen ein deutlicher Anstieg zu erkennen. Am größten ist dieser in der Klasse 60 bis  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , in der sich die Zahl der Werte von 1990 bis 2006 verdoppelte. Konzentrationen bis hin zu  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wurden seit 1990 immer häufiger beobachtet, oberhalb ist kein eindeutiger Trend erkennbar. Im Betrachtungszeitraum von 1990 bis 2006 hat eine Verschiebung vom niedrigen zum mittleren Konzentra-

tionswertebereich stattgefunden. Ursache hierfür ist die Minderung der Stickstoffoxidemissionen: Da  $\text{NO}_x$  überwiegend als  $\text{NO}$  emittiert wird, bewirkt die  $\text{NO}$ -Reduktion eine Schwächung des Titrationseffektes, bei dem bereits gebildetes Ozon aufgrund einer Reaktion mit lokal emittiertem  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  oxidiert und somit abgebaut wird. Das führt zu einer erhöhten Lebensdauer des Ozons. Die sinkende Zahl niedriger Ozonwerte bei gleichzeitigem Anstieg der Zahl mittelhoher Ozonwerte bewirkt so den Anstieg der Ozonjahresmittelwerte. Die Zunahme der Jahresmittelwerte im ländlichen Hintergrund ist überwiegend mit dem Anstieg des Anteils an der Ozonbelastung zu erklären, der mit dem nordhemisphärischen Transport entsteht. Auf die Häufigkeit der Überschreitung der Ozon-Zielwerte zum Schutz der menschlichen

### Zielwerte und langfristige Ziele für $\text{O}_3$

Bezeichnung	Mittelungszeitraum	Zielwert für 2010	Langfristiges Ziel
Schutz der menschlichen Gesundheit	Höchster 8-Stunden-Mittelwert eines Tages	$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , darf an höchstens 25 Tagen pro Kalenderjahr überschritten werden, gemittelt über 3 Jahre	$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ während eines Kalenderjahres
Schutz der Vegetation	AOT 40, berechnet aus 1-Stunden-Mittelwerten von Mai bis Juli	$18.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ , gemittelt über 5 Jahre	$6.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ , während eines Kalenderjahres

Gesundheit wirkt sich diese Verschiebung nicht erkennbar aus (vgl. Abbildung 14), da die Abnahme der Zahl der niedrigen 1-Stunden-Mittelwerte zugunsten mittelhoher Konzentrationen erfolgt und der zielwertrelevante Bereich hoher Konzentrationen davon nicht betroffen ist. Lediglich das Jahr 2003 führt in allen drei Belastungsregimes aufgrund der besonderen meteorologischen Bedingungen zu einer erhöhten Zahl der Zielwertüberschreitungen.

### **Zusammenfassung:**

Die Höhe der Ozonspitzenkonzentrationen und die Häufigkeit sehr hoher Ozonwerte haben seit 1990 deutlich abgenommen. Die Emissionsminderungsmaßnahmen, die in den 1990er Jahren eingeleitet wurden, um den „Somersmog“ zu bekämpfen, haben sich als wirksam erwiesen. Im Unterschied zu der Entwicklung der Spitzenwerte nahmen die Ozonjahresmittelwerte im gleichen Zeitraum zu. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Anstieg im städtischen Hintergrund, der auf die Schwächung des Titrationseffektes wegen geringerer Stickstoffmonoxidemissionen zurückzuführen ist. Der Zielwert für 2010 für den Schutz der menschlichen Gesundheit wird weiterhin überschritten.

### **Schlussfolgerungen und Konsequenzen für zukünftige Maßnahmen**

Die zeitliche Entwicklung der Luftschadstoffkonzentrationen von  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{O}_3$  macht deutlich, dass es für eine kausale Betrachtung nicht ausreicht, aus dem Abnehmen der Emissionen direkt auf die Verbesserung der Luftqualität zu schließen. Hierauf muss zukünftig auch bei der Ableitung von Indikatoren geachtet werden. Darüber hinaus wird offensichtlich, dass einige auf einen spezifischen Schadstoff bezogene Maßnahmen indirekt auch eine Auswirkung auf andere Schadstoffe hatten. So hat sich durch das überproportionale Ansteigen der Anteile von Dieselfahrzeugen an der Gesamtfahrzeugflotte und durch technische Minderung der fahrzeugbedingten Feinstaubemissionen das  $\text{NO}/\text{NO}_2$ -Emissionsverhältnis verschoben und zu einer Erhöhung der  $\text{NO}_2$ -Belastung beigetragen. Dies ist ein klares Argument für die beschleunigte Einführung der EURO 5- und vor allem der EURO 6-Norm für Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge. Ein weiteres Beispiel ist die grundsätzlich zu begrüßende Abnahme der verkehrsbedingten  $\text{NO}$ -Emissionen, die jedoch mit einer Abschwächung des Titrationseffektes einhergehen, was erhöhte Ozonkonzentrationen in Ballungsräumen zur Folge hat. Daher bleibt die Notwendigkeit bestehen, erhöhte Anstrengungen zur Minderung von Emissionen flüchtiger organischer Kohlenwasserstoffe vorzunehmen, insbesondere im Bereich Lösemittel- und Produktgebrauch.

Die Betrachtungen zeigen auch, dass mit dem Rückgang der industriellen und verkehrsbedingten Emissionen die relative Bedeutung anderer Sektoren für die Immissionsbelastung wächst. Minderungsmaßnahmen im Agrarsektor wurden bisher nicht mit dem notwendigen Nachdruck verfolgt, wodurch die Abnahme der Feinstaubkonzentrationen im ländlichen Hintergrund und damit auch in Ballungsräumen hinter dem erforderlichen und auch kosteneffizienten Maß zurückgeblieben ist.

Da sich die Feinstaubgrenzwerte trotz verbesserter Abgasreinigung im Verkehrsbereich im städtisch verkehrsnahen Belastungsregime nicht einhalten lassen, bleiben zusätzliche nichttechnische Maßnahmen erforderlich.

Im Vordergrund stehen Verkehrsvermeidung und Tempolimit, die gleichzeitig zu einer lebenswerten Innenstadt beitragen.

Emissionen aus bisher randständigen Sektoren wie der Einzelfeuerung mit Festbrennstoffen gewinnen im Zusammenhang mit der Klimapolitik gleichfalls an Bedeutung. Die Festlegung anspruchsvoller Regelungen für Kleinf Feuerungsanlagen und deren Brennstoffe ist eine Maßnahme, mit der u.a. die Feinstaubemissionen wirkungsvoll begrenzt werden.

Gleichzeitig dürfen aber auch in Zukunft die Anstrengungen bei der technischen Emissionsminderung nicht nachlassen. Größere stationäre Anlagen müssen kontinuierlich an den Stand der Technik angepasst werden, um Stickstoffoxide sowie Ozon- und Feinstaubvorläuferstoffe soweit möglich zu minimieren. Neben dem Straßenverkehr sind auch Flug- und Schiffsverkehr in Emissionsminderungskonzepte einzubinden. Um die zur Verfügung stehenden Maßnahmen gegeneinander abzuwägen und kostenoptimierte Entscheidungen zu treffen hat sich die Festlegung nationaler Emissionshöchst-mengen durch internationale Vereinbarungen bewährt. Die für 2010 festgesetzten Werte sind dringend fortzuschreiben und um eine Regelung für Feinstaubemissionen zu ergänzen.

Obwohl nach wie vor Überschreitungen von Grenz- und Zielwerten bei einigen Luftschadstoffen vorkommen, verzeichnete der Immissionsschutz der vergangenen 30 Jahre in Deutschland auch viele Erfolge: Mit dem Bundes-Immissionsschutzgesetz von 1974 kam es erstmalig zu einer systematischen Regelung, insbesondere der Emissionsbegrenzung nach dem Stand der Technik für Neuanlagen und für bestehende Anlagen in Belastungsgebieten. Die 80er Jahre waren gekennzeichnet durch umfassende Sanierungsprogramme für alle Kraftwerke und größere Industrieanlagen. In den 90er Jahren wurden die Emissionsquellen in den neuen Ländern grundlegend saniert oder stillgelegt und durch moderne Anlagen mit Emissionsminderungseinrichtungen nach dem Stand der Technik ersetzt. Die Anstrengungen zur Verminderung der Luftschadstoffemissionen setzten sich in den letzten Jahren weiter fort. Zu nennen sind dabei das Nationale Pro-

gramm zur Einhaltung von Emissionshöchst-mengen für Schwefeldioxid, Stickstoffoxid, Ammoniak und flüchtige organische Verbindungen nach der Richtlinie 2001/81/EG (NEC-RL), die Novellierung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), die Novellierung der Großfeuerungs- und Müllverbrennungsanlagen-Verordnung (13. und 17. BImSchV) sowie die Fortschreibung der Euro-Normen für Kraftfahrzeuge. Schadstoffe wie Ruß und grober Staub, Schwefeldioxid und sommerlicher Photosmog mit der Leitsubstanz Ozon machen uns daher heute keine Probleme mehr; dies gilt ebenso für Kohlenmonoxid, Benzol und Blei.

Der Schutz von Mensch und Umwelt vor schädlichen Umwelteinwirkungen und das Vorbeugen dagegen bleibt aber nach wie vor eine wichtige Aufgabe der deutschen und der internationalen Luftreinhaltepolitik auf dem Weg zu einer sauberen Luft in Deutschland.