

Entwicklung der Luftgüte in Deutschland

Abstract

The development of main air pollutants, such as sulphur dioxide, nitrogen dioxide, ozone and particulate matter in Germany within a time scale of approximately the last 20 years is presented and discussed. Sulphur dioxide, where continuous measurements date back until the early 70ies, has reached even in industrial areas low pollution levels meanwhile. Whereas for nitrogen dioxide, which main source has to be attributed to traffic, only a slight reduction can be detected. There is a stagnation, sometimes slight rises in the ozone levels to be observed. Particle deposition has reduced in a comparable portion as sulphur dioxide.

Die Luft und ihre Verunreinigungen

Über viele Jahrhunderte hinweg, von Empedokles gedanklich formuliert, galt die Luft als eines der vier Urelemente. Damit wurde die Bedeutung dieses Mediums für alles Irdische hervorgehoben, gleichzeitig jedoch deren Unteilbarkeit ausgedrückt. Mit der Entstehung der modernen Chemie, genauer gesagt seit der Entdeckung des Stickstoffs und Sauerstoffs Ende des 18. Jahrhunderts und den ersten Versuchen zur Luftanalyse durch Cavendish (1789),¹ ist die Luft als ein Gasgemisch bekannt, welches sogar Flüssigkeitströpfchen (Aerosole) oder Festkörperteilchen (Partikel) enthalten kann.

Wir wissen, daß die Zusammensetzung der Luft als Folge natürlicher Einflüsse Schwankungen unterliegt und daß es regionale Unterschiede gibt. Es ist auch bekannt, daß der Mensch, Tiere und Pflanzen, wie wir sie heute auf der Erde vorfinden, das Ergebnis einer langen Evolution sind, die sich stets an die veränderten Umgebungsbedingungen – auch die der Luft – anzupassen vermocht hatten. Doch auch die unbelebte, natürliche Umwelt ist in einem Prozeß begriffen, der aus der Wechselwirkung mit den jeweiligen Umweltbedingungen entspringt. Dessen Veränderungen allerdings erfolgen, wie die Genese von Mineralen, Gesteinen oder deren Formationen zeigen, außerordentlich langsam – sie finden in geologischen Zeiträumen statt.

Weil Stickstoff, Sauerstoff und Argon mehr als 99,9% der Luftbestandteile ausmachen, war man sich früher nicht der Tragweite der Einflüsse bewußt, die auch geringe Mengen, also Spurenstoffe, bewirken können. Das Quellenstudium zeigt zwar, daß bereits in der Antike so etwas wie Rauchgasschäden bekannt waren und daß man sich darüber Gedanken gemacht hatte, wie bestimmte Schäden einzudämmen sind.² Lange Zeit war man jedoch davon überzeugt, daß Verunreinigungen der Luft lediglich ein lokales Problem sind und daß negative Auswirkungen nur durch lokale Maßnahmen zu regeln sind. Die Antworten auf erste auftretende Probleme waren in der Regel daher keine echten Minderungen von Emissionen, sondern lediglich deren gleichmäßigere Verteilung. So wurde noch vor wenigen Jahren bei Punktquellen mit der als Politik der hohen Schornsteine be-

zeichneten Maßnahme, die eigentliche Quelle für Schäden nicht beseitigt, sondern durch entsprechende Verdünnung die lokale Belastung vermindert: Auf Kosten eines allgemeinen Anstiegs der Belastungen in bisher schadstoffarmen Regionen.

Die Erfassung von Luftverunreinigungen

Abgesehen von regional und zeitlich begrenzten Untersuchungen der Luftqualität, welchen seinerzeit auch begrenzte Meßinstrumentarien zur Verfügung standen, beginnt eine systematische und kontinuierliche Erfassung der Luftqualität erst in den 50er Jahren. Zunächst in den Vereinigten Staaten, dann auch in Deutschland. Die Meßverfahren der Komponenten, welche als luftverunreinigende Stoffe bezeichnet werden, war noch nicht sehr fortgeschritten. Am weitesten entwickelt waren die Verfahren für die Bestimmung des Schwefeldioxids. Weit weniger entwickelt oder harmonisiert (d. h. vergleichbar) waren Meßmethoden für die Stickstoffoxide oder Ozon. Für einige der als besonders stark schädigend, allerdings nur in sehr geringen Konzentrationen auftretenden Stoffe, wie z. B. die Salpetersäure, gibt es bis heute kaum kontinuierlich arbeitende preisgünstige Meßverfahren.

Wenn im Nachfolgenden über eine Entwicklung – hier die der Luftgüte in Deutschland – zu sprechen sein wird, dann ist es notwendig das Koordinatensystem festzulegen, in dem wir uns bewegen werden. So ist es bedeutsam zu wissen, welche Parameter grundsätzlich betrachtet werden und in welchen Bereichen einer Gütebetrachtung sich der Wertemaßstab, ob gut oder schlecht, bewegt. Selbstverständlich ist bei der Darstellung einer Entwicklung die Zeitdimension ein weiterer entscheidender Parameter.

Von welchen Stoffen sprechen wir im Zusammenhang mit Schäden an Metalloberflächen? Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid, Ozon und Staub sind Luftschadstoffe, welche in relativ hohen Konzentrationen vorkommen, deren Korrosionsrelevanz entweder erwiesen oder zumindest stark angenommen wird und zu denen auch mehrere Jahre zurückreichende Meßdaten vorliegen. Die folgenden Betrachtungen befassen sich fast ausschließlich mit ihnen. Inwieweit sich bei weiteren Luftverunreinigungen (Ammoniak, Salpetersäure, Schwefelsäure, Schwefelwasserstoff, Chloride, Fluoride etc.), die bei den Korrosionsprozessen eine gewiß wichtige Rolle spielen, Trends in ihrem zeitlichen Auftreten erkennen lassen, kann hier nicht dargestellt werden. Hierzu fehlt es an zuverlässigem und vergleichbarem Datenmaterial.

Schwefeldioxid

Die Quellen für Schwefeldioxid sind fast ausschließlich in der Verbrennung fossiler schwefelhaltiger Energiequellen, insbesondere von Kohle zu finden. Erdgas und raffiniertes Erdöl sind

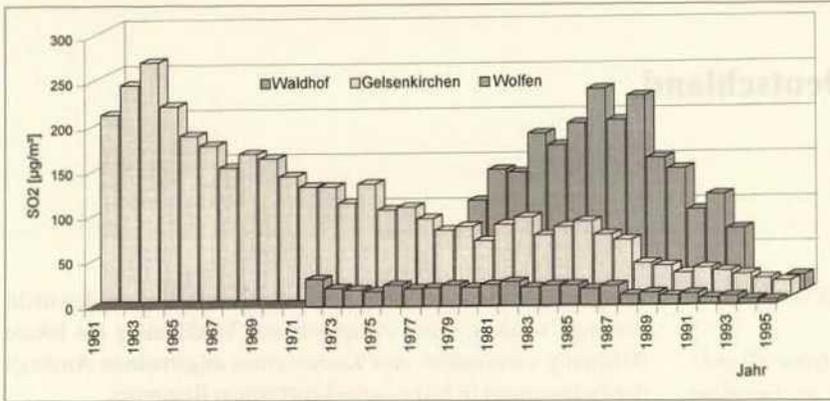


Abb. 1. Entwicklung der SO₂-Belastung (Jahresmittelwerte) an einem industriellen Standort in Westdeutschland (Gelsenkirchen) 1961-1995 und Ostdeutschland (Wolfen) 1979-1995 im Vergleich zur Hintergrundbelastung (Standort Waldhof) 1972-1995

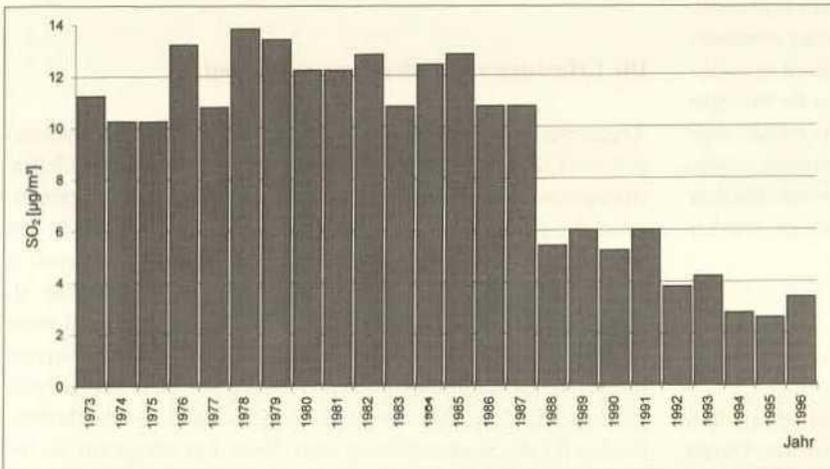


Abb. 2. Zeitreihe der Schwefeldioxid-Konzentration (Mittelwert UBA-Meßstationen); Jahresmittelwerte 1973-1996

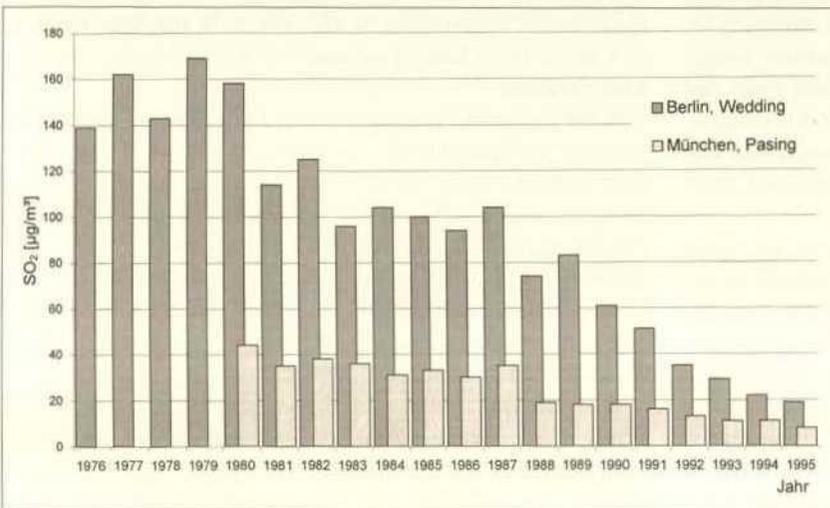


Abb. 3. Entwicklung der Schwefeldioxidkonzentration an den Standorten München-Pasing und Berlin-Wedding im Zeitraum 1976-1995

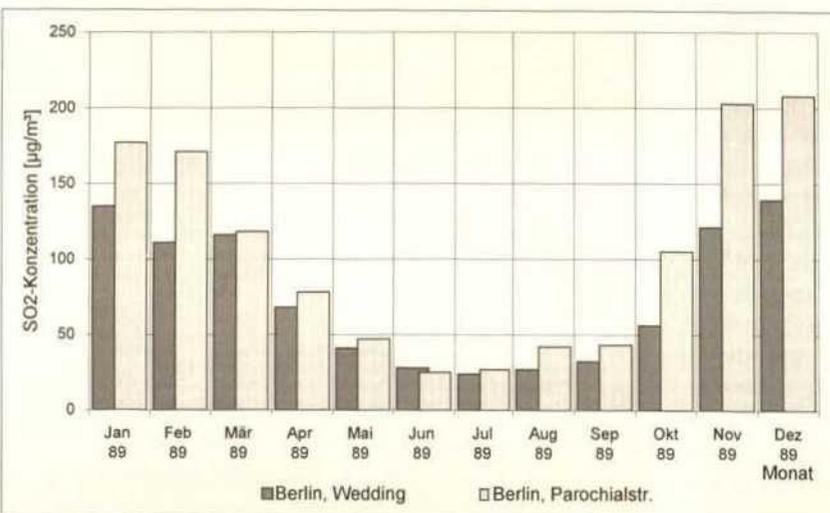


Abb. 4. Monatsgang der SO₂-Konzentration der Berliner Standorte Parochialstraße und Wedding im Jahre 1989

nahezu schwefelfrei. Natürliches SO_2 aus vulkanischen Quellen kann vernachlässigt werden. Als Hauptemittenten gelten daher industrielle Feuerungsanlagen (Kohlekraftwerke) und der Hausbrand. In den industriellen Ballungsgebieten lag in den 60er Jahren die Konzentration von Schwefeldioxid im Jahresdurchschnitt bei über $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Parallel mit der Einführung einer systematischen Luftüberwachung wurden – wenigstens in den Ländern der alten Bundesrepublik – auch die ersten Maßnahmen eingeleitet, um diese enormen Belastungen der Umwelt zu verringern (z. B. mit der Umsetzung der Verordnung über Großfeuerungsanlagen³). In der DDR waren bis zur Wende im Jahre 1989 kaum Veränderungen zum Besseren hin zu verzeichnen. Im Gegenteil, vielfach stieg der SO_2 -Anteil gegenüber den 60er Jahren sogar noch an. Erst mit der Wende des Jahres 1989 und dem Zusammenbruch vieler Industriebetriebe sowie der allmählichen Umrüstung der überlebenden Produktionsstätten hat sich die Belastungssituation auch im Osten der Bundesrepublik deutlich entspannt (Abb. 1 und Farbtafel I).

Für die Hintergrundbelastung, also die Schadstoffkonzentration aus emittentfernen Regionen, liegen kontinuierliche Messungen aus dem Meßnetz des Umweltbundesamtes seit 1973 vor. Wurden damals im Durchschnitt bis etwa zum Jahre 1987 als Jahresmittelwert $12 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{SO}_2$ gemessen, so sank dieser Wert nunmehr auf rund $3 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{SO}_2$ ab (Abb. 2).⁴

In den Ballungszentren ist eine tendenziell vergleichbare Minderung zu beobachten. Als Beispiel werden hier die städtischen Standorte Berlin-Wedding und München-Pasing verglichen (Abb. 3). In den 70er Jahren lagen in Berlin-Wedding die Belastungswerte bei etwa $140 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{SO}_2$, um sich dann in den Jahren bis 1987 auf immerhin noch städtische $100 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{SO}_2$ einzupendeln und erst in den vergangenen zehn Jahren auf rund $20 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{SO}_2$ abzusinken. In München (das gilt gleichermaßen aber auch z. B. für Aschaffenburg oder Regensburg) konnten zu Beginn der 80er Jahre durchschnittlich $35 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{SO}_2$ gemessen werden. Auch in den bayerischen Städten wird ab dem Jahr 1988 eine deutliche Absenkung der Schwefeldioxidbelastung beobachtet, die heute nur noch knapp $10 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{SO}_2$ im Jahresmittel beträgt.

Wenn hier von Jahresmittelwerten die Rede ist – und dies aus gutem Grunde, denn nach unseren Erkenntnissen ist eine feinere zeitliche Auflösung in Bezug auf die Korrosion von Metallen für die hier diskutierten Fragen nicht sinnvoll – so ist dennoch zur Kenntnis zu nehmen, daß episodisch sehr hohe Belastungen gemessen werden und darüberhinaus einen ausgeprägten Jahresgang aufweisen. Diese jahreszeitliche Abhängigkeit steht in engem Zusammenhang mit der in den Wintermonaten notwendigen höheren Energiegewinnung in Feuerungsanlagen. Der Vergleich eines derartigen Jahresganges für das Jahr 1989 an zwei Meßstationen in Berlin (Abb. 4) zeigt nicht nur, daß in den Wintermonaten der gewichtigste Beitrag zur Belastung der Luft mit Schwefeldioxid erfolgt, sondern macht auch noch deutlich, wie groß der Anteil von Kohlefeuerungen in den privaten Haushalten ist. Im westlichen Wedding ist ein großer Teil der Haushalte auf Gasheizung umgestellt, im östlichen Bezirk Mitte wurde noch weiterhin mit der schwefelhaltigen Lausitzer Braunkohle geheizt.

Stickstoffdioxid

Stickstoffoxide entstehen bei allen Verbrennungsprozessen, die bei sehr hohen Temperaturen ablaufen. Ihr natürliches Vorkom-

men ist vernachlässigbar, da ihre Entstehung auf Blitzentladungen bei Gewittern begrenzt bleibt. Neben den industriellen Verbrennungsanlagen sind Verbrennungsmotoren eine wesentliche Quelle der Entstehung von Stickstoffoxiden. Emittiert werden Stickstoffoxide überwiegend als Stickstoffmonoxid (NO), welches besonders durch Ozon (aber auch Sauerstoff) rasch zu Stickstoffdioxid (NO_2) oxidiert wird. Diese Reaktion ist dafür verantwortlich, daß es bei hohen Stickstoffoxidemissionen zu einer Minderung der Ozonkonzentration kommt. Während des Lufttransportes wird unter Einwirkung von UV(b)-Strahlung (also tagsüber) Stickstoffdioxid zersetzt. Die entstehenden hochreaktiven Radikale führen ihrerseits wieder zur Ozonbildung.

Nachdem der Kraftfahrzeugverkehr eine der Hauptquellen für Stickstoffoxide ist, wurde mit der Einführung des Katalysators eine Emissionsminderung erhofft. Ihre Wirksamkeit wird jedoch durch den Zuwachs an Kraftfahrzeugen nahezu aufgehoben.

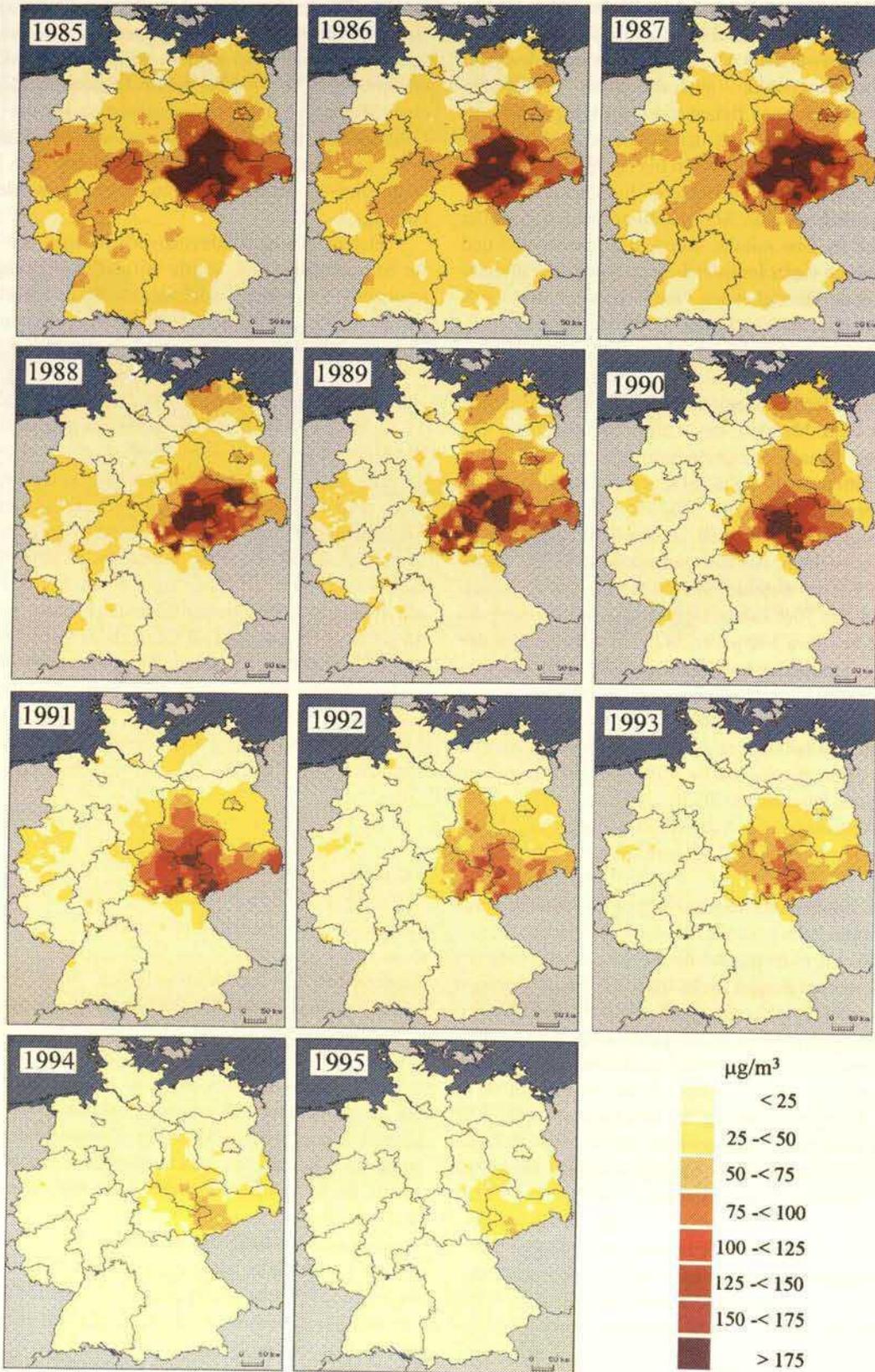
Wird die Stickstoffdioxidbelastung an den sog. Hintergrundstationen im UBA-Meßnetz betrachtet, so liegt sie bei etwa $11 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$, an den verkehrsfreien und -fernen Stationen der Höhenlagen bei durchschnittlich $5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ (Abb. 5). Trends sind für den Meßzeitraum von 1968 bis heute nicht erkennbar, wie auch in der räumlichen Verteilung kaum Veränderungen zu verzeichnen sind (Farbtafel II). Werden die Durchschnittswerte an Standorten in den städtischen Gebieten betrachtet, läßt sich im Zeitraum von 1982 bis 1995 ein Rückgang der Stickstoffdioxidbelastung von etwas über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ auf rund $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ feststellen. Die individuelle Betrachtung einzelner Standorte zeigt allerdings auch andere Tendenzen. So läßt sich in Berlin eine leichte Abnahme der Stickstoffdioxidbelastung erkennen (Abb. 6), in München-Pasing steht der deutlichen SO_2 -Abnahme eher eine Erhöhung der Stickstoffdioxid-Konzentrationen gegenüber (Abb. 7).

Ozon

Bodennahes Ozon enthält merkliche Anteile natürlich entstandenen Gases, das sich – vor allem in Höhenlagen – unter dem Einfluß von UV(b)-Strahlung bildet. So liegt das langjährige Mittel an der Meßstelle Schauinsland im Schwarzwald bei $81 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{O}_3$, in den niedrigeren Lagen, wie z. B. in der Lüneburger Heide nur bei $51 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{O}_3$. Zu der natürlichen Ozonbelastung, welche Schwankungen in Abhängigkeit vom Wetter – d. h. von der Sonnenscheindauer/Strahlungstärke – unterliegt, kommt eine anthropogen bedingte Komponente hinzu. Diese ist wegen der komplexen luftchemischen Prozesse, wie im Abschnitt zu Stickstoffoxiden oben kurz angerissen, nicht einfach darzustellen.

Auch wenn systematische Messungen von Ozon in Ballungsgebieten noch nicht lange zurückreichen, ist dennoch deutlich erkennbar, daß ein allgemeiner Trend zu einer eher höheren Ozonbelastung besteht (Abb. 8). Lediglich an Standorten, die unmittelbar und direkt von Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs betroffen sind, ist ein derartiger Trend nicht erkennbar, denn hier trägt die primär eintretende Reaktion des Stickstoffoxids zum Abbau des Ozons unter Bildung anderer äußerst reaktiver Spezies bei, um – allerdings nach kurzem Transport und an einem ein paar Kilometer entfernten Standort – erneut zur Ozonbildung beizutragen (Abb. 9).

SO₂-Jahresmittelwerte 1985-1995 in Deutschland

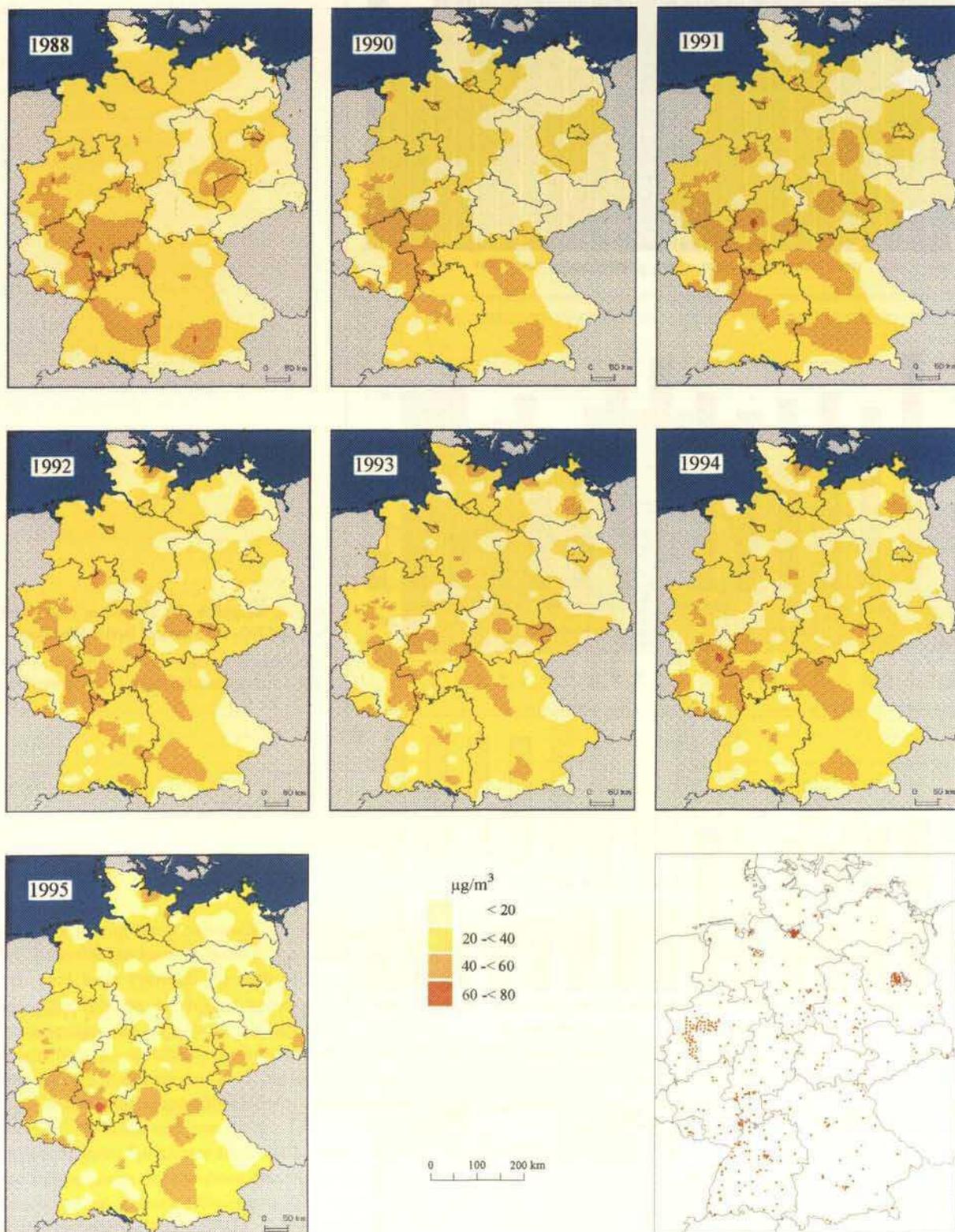


Daten: Meßnetze der Bundesländer und des Umweltbundesamtes

Aufgrund des verwendeten Interpolationsverfahrens ist eine kleinräumige Interpretation nicht zulässig

UBA II 4.3 (Bräuniger) C:\Cordat\Corrast\SO2\SO895D.edr

Farbtafel I. Schwefeldioxid-Immissionen in der Bundesrepublik Deutschland; Jahresmittelwerte 1985-1995

NO₂-Immissionen (Jahresmittelwerte 1988, 1990-1995)

Daten: Meßnetze der Bundesländer und des Umweltbundesamtes

Aufgrund des verwendeten Interpolationsverfahren
ist eine kleinräumige Interpretation nicht zulässig

UBA II 4.3 (Bräuniger) C:\Cordat\ZU\NO28895.cdr

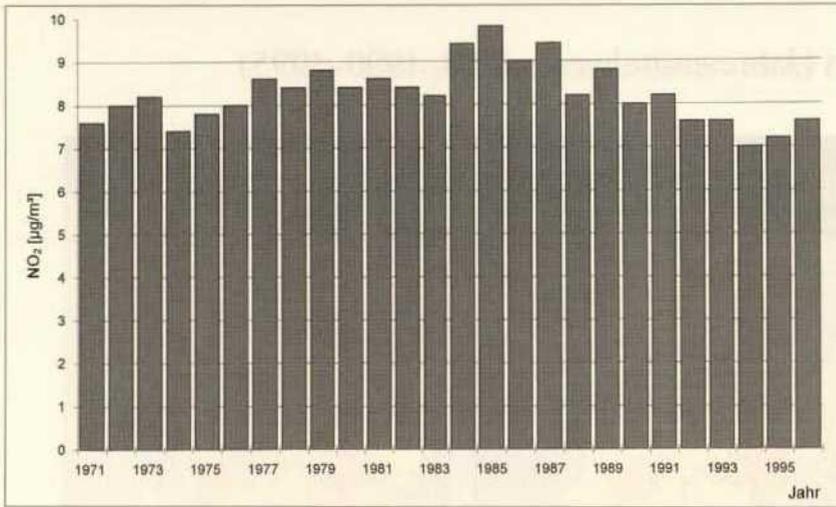


Abb. 5. Zeitreihe der Stickstoffdioxid-Konzentrationen (Jahresmittelwerte) 1971-1996 (Mittelwert der UBA-Meßstationen)

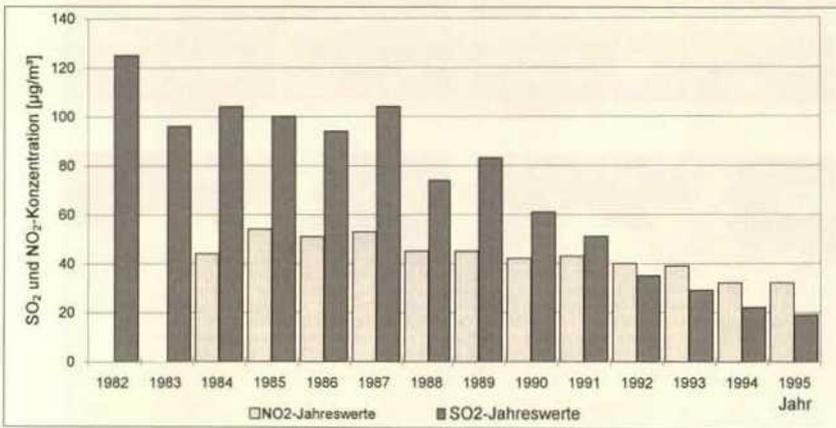


Abb. 6. Vergleich der Zeitreihen (1982-1995) für SO₂ und NO₂ am Standort Berlin-Wedding

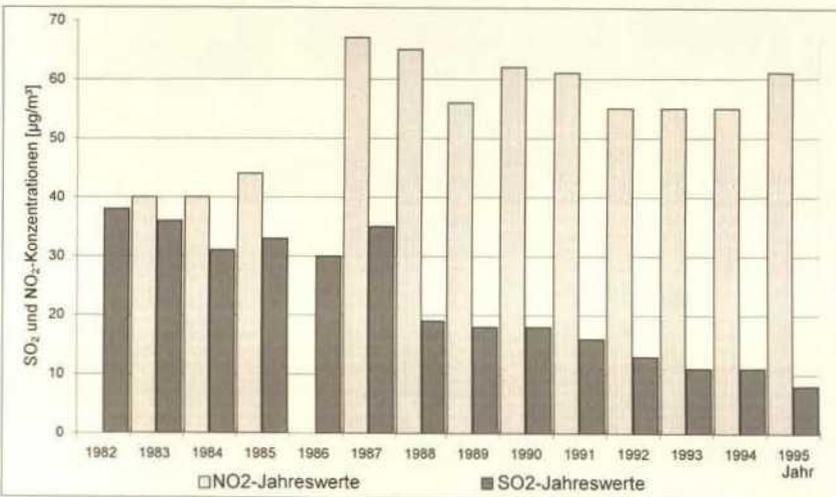


Abb. 7. Vergleich der Zeitreihen (1984-1995) für SO₂ und NO₂ am Standort München-Pasing

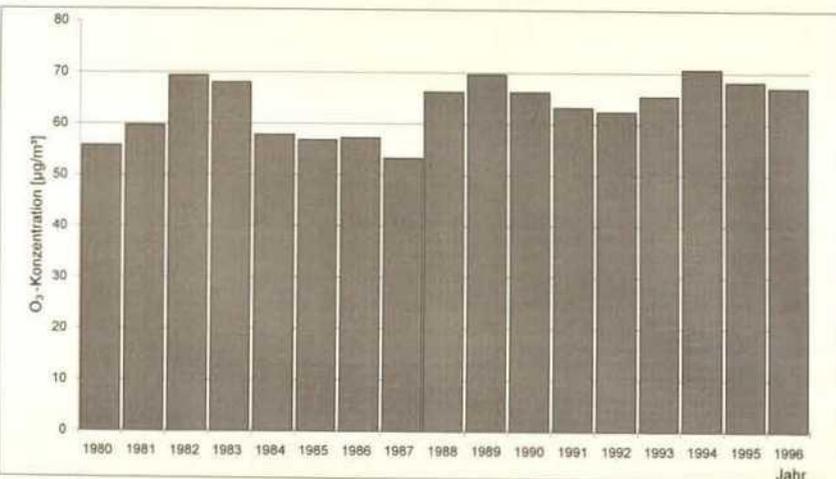


Abb. 8. Zeitreihe der Ozonkonzentration (Jahresmittelwert) 1980-1996 (Mittelwert der UBA-Meßstationen)

Abb. 9. Ozon: Zeitreihe an den Standorten Aschafenburg-Bussardweg und Berlin-Wedding im Zeitraum 1984-1996

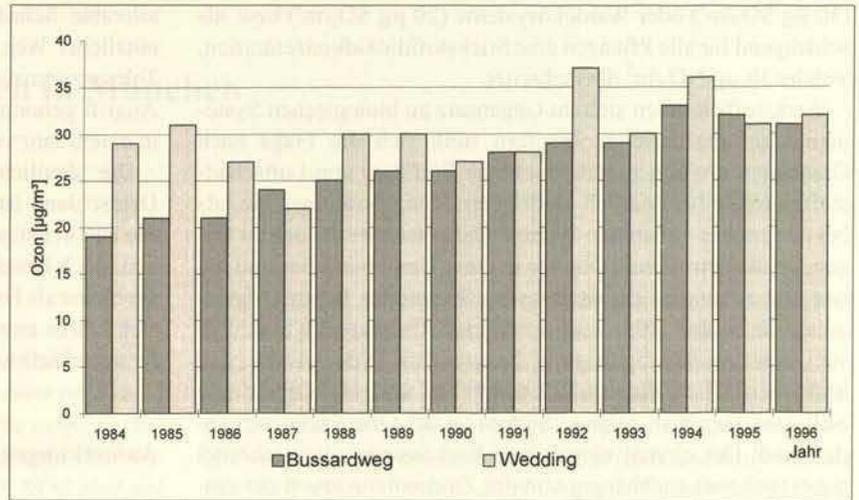
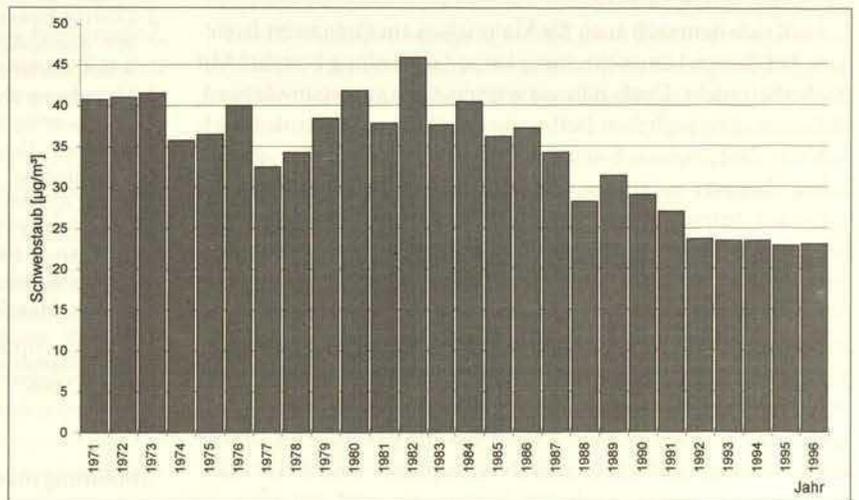


Abb. 10. Zeitreihe der Schwebstaubkonzentration (Jahresmittelwert) 1971-1995 (Mittelwert aus UBA-Meßnetz)



Staub

Eine direkte Wirkung durch chemische Umsetzungen von Staub auf Metalloberflächen kann so gut wie ausgeschlossen werden. Dennoch sind feste Partikel, die sich luftgetragen an Oberflächen niederschlagen, ein höchst aggressives Material, denn ihre große spezifische Oberfläche ist befrachtet mit Stoffen – Säuren oder Salzen – welche in Wechselwirkung mit den Metallen treten können. Zugleich sind auch die topochemischen Auswirkungen von Partikeldepositionen beim Entstehen und Aufbau von passivierenden und homogenen Oberflächenschichten zu berücksichtigen. Aus dieser Sicht ist es nicht unerheblich, auch die Entwicklung des Staubniederschlages zumindest kurz zu beleuchten und Trends aufzuzeigen. Sie lassen etwa vergleichbare Tendenzen erkennen, wie sie bei Schwefeldioxid beobachtet werden (Abb. 10). Das ist ein deutliches Indiz dafür, daß eine der wesentlichen Quellen von den Feinstäuben in den Feuerungsanlagen fossiler Brennstoffe zu suchen ist. Dennoch sind derartige Aussagen mit großen Unsicherheiten behaftet, denn bisher ist eine differenzierte Betrachtung der verschiedenen Stäube und Rußpartikel in ihrer zeitlichen Entwicklung und regionalen Verteilung noch nicht erfolgt, wenn auch erste Ansätze dafür bereits zu erkennen sind.

Grenzwerte und Toleranzwerte für Luftschadstoffe

Gegenüber dem Stand vor noch wenigen Jahren ist heute eine erhebliche Senkung der Schwefeldioxidkonzentrationen und des Staubanteils in der Luft festzustellen. Eine Stagnation, zum Teil eine leichte Absenkung bei Stickstoffdioxid und ein geringer Anstieg bei Ozon ist gleichfalls zu beobachten. Ist dieser Trend für den Materialschutz ausreichend oder muß weiterhin befürchtet werden, daß die beschleunigten Korrosionsprozesse ungemindert weitergehen?

Schadstoffkonzentrationen, die der menschlichen Gesundheit abträglich sind, liegen im allgemeinen der Festlegung von Grenzwerten zur Einhaltung der Luftqualität zugrunde. Dabei wird sinnvollerweise zwischen aus Mittelwerten gebildeten I1 Wert der langfristigen mittleren Belastung und dem aus kurzzeitigen Spitzenbelastungen gebildeten I2 Wert – der für Gesundheitsbelange große Bedeutung hat – unterschieden. Die in der TA-Luft⁵ genannten Grenzwerte für die I1 Werte liegen für Schwefeldioxid bei 140 µg/m³, für Staub bei 150 µg/m³ und für Stickstoffdioxid 80 µg/m³ und daher über den aktuell beobachteten Jahresmittelwerten. In die Größenordnung der zur Zeit gemessenen Schadstoffkonzentrationen fallen allerdings kritische Belastungswerte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen

(30 $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$) oder Waldökosysteme (20 $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$) bzw. als schädigend für alle Pflanzen eine Stickstoffdioxidkonzentration, welche 30 $\mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ überschreitet.

Werkstoffe können sich im Gegensatz zu biologischen Systemen nicht regenerieren. Insofern stellt sich die Frage nach Grenzwerten völlig anders, merkbare Einflüsse von Luftschadstoffen treten bei deutlich niedrigeren Konzentrationen ein, als bei den soeben genannten Werten. Daher ist eher danach zu fragen, ob die betroffenen Objekte in einer Umgebung Bestand haben, die zumindest ein weiteres beschleunigtes Korrosionsverhalten verhindert. Für einige der Werkstoffe, wie z. B. Stahl läßt sich dieses eindeutig negativ beantworten. Wir wissen, daß Stahloberflächen, die mit Sulfaten belegt sind, nicht mehr zum Stillstand kommen, solange Sulfate an der Oberfläche vorhanden sind. Der einmal eingeleitete Korrosionsprozess schreitet dabei (nahezu) unabhängig von der Zusammensetzung der umgebenden Gasphase voran.

Läßt sich demnach auch für Materialien ein Grenzwert festlegen, bei dessen Unterschreitung keine Gefährdung besteht? Mit Sicherheit nicht. Doch müssen wir uns stets vergegenwärtigen, daß auch ohne jeglichen Beitrag von luftverunreinigenden Stoffen ein Zerfallsprozeß stattfindet. Es geht daher eher darum, einen Zielwert zu finden, der aus unserer heutigen Sicht als tolerabel betrachtet werden kann. Expertendiskussionen der letzten Jahre haben die direkte Anbindung der akzeptablen Korrosionsraten an reale Hintergrundbelastungen als möglichen Weg zur Findung von Toleranzgrenzwerten empfohlen. Im Rahmen des repräsentativen Meßnetzes des UN-ECE-Materialexpositionsprogrammes wurde das untere zehnte Perzentil der beobachteten Korrosionsraten als Hintergrundkorrosionsrate festgelegt.⁶ Als Toleranzgrenzwert wird jeweils das 1,2- bis 2fache dieser Hintergrundkorrosionsrate akzeptiert. Dieser Denksatz, der von einer tatsächlichen Wirkung ausgeht und dann unter Einbeziehung der jeweiligen lokalen Klimabedingungen die

tolerale Schadstoffobergrenze berechnet, ist sicher ein sehr nützlicher Weg.⁷ Die Kartierung von Regionen in welchen die Toleranzgrenzen überschritten werden, ist in diesen Tagen in Angriff genommen worden. Die ersten Ergebnisse dürften etwa in einem Jahr vorliegen.

Die deutlich eingetretene Senkung der Immissionen in Deutschland ist eine außerordentlich erfreuliche Entwicklung. Sie läßt in einigen Bereichen zwar noch gewisse Defizite erkennen, doch besteht berechnete Aussicht, daß viele der aktuellen Probleme als Folge der zu hohen Belastung der Luft in den nächsten Jahren zwar nicht behoben, aber doch zumindest nicht weiter verschärft werden.

Anmerkungen

- 1 PAUL WALDEN, *Geschichte der Chemie*, Bonn 1947.
- 2 GÜNTER HERRMANN, *Beiträge zur Bestimmung von Schwefeldioxid in der Atmosphäre und Herstellung von Schwefeldioxid-Luft-Gemischen*, Berlin 1972, S. 11 ff.
- 3 Verordnung über Großfeuerungsanlagen vom 22. Juni 1983.
- 4 Mittelwert berechnet aus den Jahresmittelwerten der fünf UBA-Meßstationen Deuselbach, Waldhof, Westerland, Brotjacklriegel und Schauinsland.
- 5 Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) vom 27. Februar 1986; GMBL, 37, 1986, S. 95-144.
- 6 BRUNO STÖCKLE, *Ergebnisse aus dem UN/ECE-Bewitterungsprogramm*, München 1997, in diesem Arbeitsheft.
- 7 *Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas Where They are Exceeded*, Berlin 1996.

Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen vom Verfasser