

03.01 Schwefeldioxid - Emissionen und Immissionen (Ausgabe 1997)

Problemstellung

Wirkung von Schwefeldioxid

Schwefeldioxid (SO₂) ist ein farbloses, in hohen Konzentrationen stechend riechendes Gas. Es entsteht bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle und Erdöl. Außerdem fällt es bei der Verhüttung von Erzen an und wird vielfach in industriellen Prozessen verwendet.

In der Atmosphäre wird es mit einer Geschwindigkeit von der Größenordnung ein Prozent pro Stunde in Schwefeltrioxid und später in Schwefelsäure und Sulfatpartikel umgewandelt.

Schwefeldioxid beeinträchtigt die menschliche Gesundheit. Aufgrund seiner leichten Löslichkeit wirkt es vor allem auf die Schleimhäute der Augen und der oberen Atemwege (vgl. Kühling 1986). Bei hoher Konzentration oder intensiver Atmung kann es zu Auswirkungen auf die tiefen Atemwege kommen (vgl. BMUNR 1987). Asthmatiker sind dabei gegenüber Gesunden einem deutlich höheren gesundheitlichen Risiko ausgesetzt (vgl. Nowak et al. 1994).

Auf Pflanzen wirkt SO₂ in komplexer Weise. Direkte Schäden entstehen an Blättern und Nadeln über die gasförmige oder wässrige Phase. Indirekte Schäden werden über Sulfateinträge in den Boden bewirkt, die zu Nährstoffmangel und Säurestress führen. In Waldökosystemen sind vielfältige Wirkungen von SO₂ und dessen Folgeprodukten bekannt, insbesondere Veränderungen der abiotischen und biotischen Bodenverhältnisse. Dies betrifft beispielsweise auch die Versauerung von Gewässern. Ferner führt SO₂ zu Schäden an Materialien und Bauwerken.

Grenzwerte

Das Gas kann mit verschiedenen Methoden gut gemessen werden und gilt seit Jahren als Leitkomponente für die Verschmutzung der Luft mit Feuerungsabgasen. Schon früh wurden Grenzwerte für die Belastung der Luft mit Schwefeldioxid festgelegt und versucht, seine Konzentration in der Luft zu vermindern.

Bereits die erste Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft) aus dem Jahre 1964 enthält für Schwefeldioxid Immissionswerte für die Langzeitbelastung (Jahresmittelwert) von 400 µg/m³ und für die Kurzzeitbelastung (97,5 %-Summenwert aller Halbstundenwerte eines Jahres) von 750 µg/m³.

In Deutschland gelten zur Zeit die Immissionswerte der TA-Luft aus dem Jahr 1986 und die Grenzwerte der EG-Richtlinie 80/779/EWG von 1980, zuletzt geändert durch die Richtlinie 89/427/EWG. Diese wurde mit der 22. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 1993 in nationales Recht überführt (vgl. Tab. 1).

Zur langfristigen Sicherung der Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes müssen Immissionswerte eingehalten werden, die die Empfindlichkeit von Ökosystemen berücksichtigen. Grenzwerte, bei deren Einhaltung keine Veränderungen in Struktur und Funktion von Ökosystemen zu erwarten sind, wurden von der UN-ECE 1988 aufgestellt (critical levels, critical loads). Die Bundesrepublik Deutschland gehört zu den Erstunterzeichnern und Mitinitiatoren des Übereinkommens und hat die Beschlüsse über neue Strategien in der europäischen Luftreinhaltung ratifiziert.

Die EG-Richtlinie bzw. die entsprechende 22. BImSchV schreiben vor, daß der Schwefeldioxidgehalt der Luft den 98 %-Wert von 250 µg/m³ bzw. 350 µg/m³ an nicht mehr als drei Tagen hintereinander überschreiten darf (vgl. Tab. 1). Diese Bedingung wurde bis 1991 in Berlin fast in jedem Jahr bei austauscharen Wetterlagen überschritten, seit 1991 jedoch nicht mehr. Zusätzlich gibt es in den genannten Vorschriften spezielle Grenzwerte für die Schwefeldioxid-Konzentration im Winter, die in den letzten Jahren stets eingehalten wurden.

Tab. 1: Grenz-, Richtwerte und Empfehlungen zur Immission von Schwefeldioxid und Schwebstaub in der Luft		
TA-Luft-Immissionswerte (1986)	140 µg/m ³ 400 µg/m ³	als Jahresmittelwert (M _V) als 98 %-Wert der Summenhäufigkeit aller Halbstundenmeßwerte eines Jahres (M _Z)
EG-Richtlinie 89/427/EWG bzw. 22. BImSchV	80 µg/m ³ 120 µg/m ³ 250 µg/m ³ 350 µg/m ³	als Median der während des Jahres gemessenen Tagesmittelwerte, wenn gleichzeitig mehr als 150 µg/m ³ Schwebstaub gemessen werden als Median der während des Jahres gemessenen Tagesmittelwerte, wenn gleichzeitig gleich oder weniger als 150 µg/m ³ Schwebstaub gemessen werden als 98 %-Wert aller Tagesmittelwerte, wenn gleichzeitig mehr als 350 µg/m ³ Schwebstaub gemessen werden als 98 %-Wert aller Tagesmittelwerte, wenn gleichzeitig gleich oder weniger als 350 µg/m ³ Schwebstaub gemessen werden
Maximale Immissionswerte des VDI (zum Schutz der Gesundheit) – Richtlinie 2310 Bl. 11 ¹⁾	300 µg/m ³ 1 000 µg/m ³	als Mittelwert über 24 Stunden als Mittelwert über eine halbe Stunde
Maximale Immissionswerte des VDI (zum Schutz der Vegetation) – Richtlinie 2310 Bl. 2 ¹⁾	50 µg/m ³ 80 µg/m ³ 120 µg/m ³	als Mittelwert über die Vegetationsperiode (7 Monate): für sehr empfindliche Pflanzen für empfindliche Pflanzen für weniger empfindliche Pflanzen
	250 µg/m ³ 400 µg/m ³ 600 µg/m ³	als 97,5 %-Wert für Halbstundenmittel über die Vegetationsperiode (7 Monate): für sehr empfindliche Pflanzen für empfindliche Pflanzen für weniger empfindliche Pflanzen
WHO Air Quality Guidelines (zum Schutz der Gesundheit) ²⁾	500 µg/m ³ 350 µg/m ³ 125 µg/m ³ 50 µg/m ³	als Mittelwert über 10 Minuten als Mittelwert über eine Stunde als Mittelwert über 24 Stunden als Jahresmittelwert
WHO Air Quality Guidelines (zum Schutz der Vegetation) ²⁾	100 µg/m ³ 30 µg/m ³	als Mittelwert über 24 Stunden als Jahresmittelwert
ECE-Richtwerte 1988 (zum Schutz der Vegetation) ³⁾	70 µg/m ³ 20 – 30 µg/m ³	als Mittelwert über 24 Stunden als Jahresmittelwert

¹⁾ Als Grundlage für die Festlegung von begrenzenden Immissionswerten dienen "Maximale Immissions-Werte", die darauf abzielen, eine Gesundheitsschädigung des Menschen, insbesondere auch von Kindern, Alten und Kranken, selbst bei langfristiger Einwirkung zu vermeiden und einen Schutz vor Schädigungen von Tieren, Pflanzen und Sachgütern zu gewährleisten. Die "Maximalen Immissions-Werte" sind rein wirkungsbezogene, wissenschaftlich begründete und aus praktischer Erfahrung abgeleitete Werte mit medizinischer oder naturwissenschaftlicher Indikation. Sie berücksichtigen nicht die technische Realisierbarkeit.

²⁾ Die Luftqualitätsleitlinien der WHO wurden auf der Grundlage toxikologischer und ökologischer Befunde entwickelt. Sie haben empfehlenden Charakter bei der Festlegung gesetzlicher Normen.

³⁾ Diese Werte basieren auf den Maßnahmenbeschlüssen der UN-ECE-Mitgliedsländer im Rahmen des Genfer Luftreinhalteabkommens von 1979 zur Verminderung der grenzüberschreitenden Luftverunreinigungen in Europa (SO₂- und NO_x-Protokolle von 1985 und 1988) (vgl. Köble et al. 1992).

Tab. 1: Grenz-, Richtwerte und Empfehlungen zur Immission von Schwefeldioxid und Schwebstaub in der Luft

Überschreitungen der Immissionswerte der TA-Luft bzw. der 22. BImSchV ziehen Maßnahmen an Anlagen nach sich, die als Verursacher identifiziert werden. Wenn die Überschreitung nicht einem speziellen Verursacher zugeordnet werden kann, müssen die zuständigen Behörden einen Luftreinhalteplan aufstellen und bei der Genehmigung neuer Anlagen verschärfte Anforderungen bezüglich der zulässigen Emissionen stellen. Dementsprechend wurden 1981, 1986 und 1994 Luftreinhaltepläne aufgestellt, in denen der jeweilige Stand der Luftverschmutzung sowie Maßnahmen zu ihrer Verminderung dargestellt sind (vgl. SenStadtUm 1994).

Verursacher und Mengen von Schwefeldioxidemissionen

In Berlin werden die **Schwefeldioxidemissionen** überwiegend durch Verbrennung von Kohle und Öl zur Erzeugung von Wärme und Strom verursacht. Schwefeldioxid wird dabei als Bestandteil von Rauchgasen in die Atmosphäre abgegeben. Es entsteht aus Schwefel, der mit Anteilen bis zu 3 % in

den Brennstoffen enthalten ist. Wegen seiner Verbrennungseigenschaften ist es möglich, die Schwefeldioxidemission sehr genau aus dem Schwefelgehalt der Brennstoffe abzuleiten.

Erste Daten über die Schwefeldioxidemission sind in Berlin für das Jahr 1892 aus dem Brennstoffverbrauch ermittelt worden. Damals lag der Ausstoß bereits bei 43 700 Tonnen pro Jahr (t/a). Die Emission stieg mit kriegsbedingten Unterbrechungen bis zum Jahr 1970 kontinuierlich auf mehr als 80 000 t/a allein für West-Berlin. Seit 1970 sinkt dort die SO₂-Emission (vgl. Karte 03.01, SenStadtUm 1985).

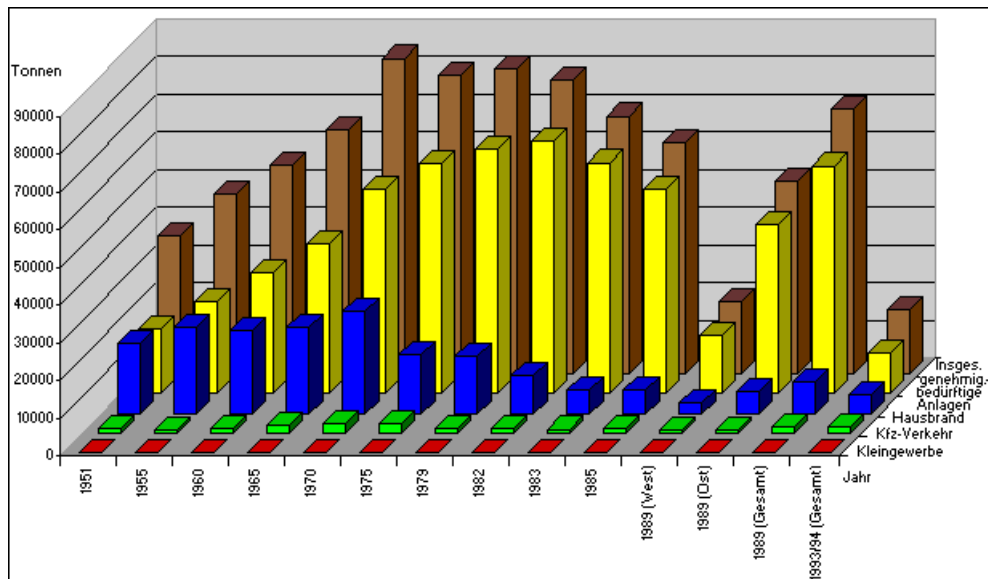


Abb. 1: Schwefeldioxid-Emissionen der einzelnen Verursacherguppen in Berlin 1951 - 1994. (Für die Jahre 1951 - 1985 nur für West-Berlin, ab 1989 für West- und Ost-Berlin) (Tonnen pro Jahr)

Abbildung 1 läßt einen starken Rückgang der Emissionen im Westteil der Stadt und für 1989 im Vergleich der beiden Stadthälften sehr hohe Emissionen im Ostteil erkennen. Seitdem werden die Emissionen, die insgesamt weiter erheblich zurückgegangen sind, nicht mehr nach den Stadthälften gesondert ermittelt. Den größten Anteil an den Gesamt-Emissionen von 17 200 t hatten im Jahr 1994 mit 63 % die genehmigungsbedürftigen Anlagen (10 900 t), vorrangig mit weitem Abstand die Kraft-, Heizkraft- und Heizwerke. An zweiter Stelle stand mit 4 900 t der Hausbrand mit 29 %, gefolgt vom Kraftfahrzeugverkehr (1 400 t) mit etwas mehr als 8 %.

Die unterschiedlich hohen Emissionsmengen in den beiden Stadthälften waren auf den sehr unterschiedlichen Brennstoffeinsatz zurückzuführen. Im Ostteil wurde bis 1989 neben Gas sowohl in genehmigungsbedürftigen Anlagen als auch im Hausbrand zum überwiegenden Teil noch Braunkohle eingesetzt. Im Gegensatz zum Westteil der Stadt gab es für den Schwefelgehalt der Brennstoffe im Ostteil noch keine Begrenzungen, so daß in erheblichen Mengen Braunkohle mit sehr hohen Schwefelgehalten (bis zu 3 %) aus dem Leipzig/Bornaer Revier verwendet wurde. Im Westteil war dagegen der Schwefelgehalt in der Braunkohle durch die Braunkohleverordnung vom 15.1. 1981 auf 1 % begrenzt worden. Es wurde seit dieser Zeit nur noch Braunkohle aus der Niederlausitz und aus dem Rheinland mit einem Schwefelgehalt von etwa 0,6 % verfeuert, der sich in Folge der Einbindung von Schwefel in die Asche auf 0,3 % reduziert. Außerdem wurde in West-Berlin im Hausbrand überwiegend leichtes Heizöl mit einem Schwefelgehalt von weniger als 0,3 % verbrannt, und in mehreren Heizkraftwerken waren seit 1988 schon Rauchgasentschwefelungsanlagen in Betrieb (vgl. Tab. 2).

Nach der Vereinigung wurde die Geltung der Braunkohlenverordnung auf den Ostteil der Stadt ausgedehnt, und auch die anderen Maßnahmen sowie die zahlreichen Betriebsstillegungen zogen erhebliche Emissionsminderungen nach sich. 1996 wurde im gesamten Stadtgebiet die Umstellung der Gasversorgung auf Erdgas abgeschlossen, so daß immer mehr Hausheizungen von Kohle und Öl auf Gasversorgung umgestellt werden, die dann kein Schwefeldioxid mehr emittieren.

Tab. 2: Inbetriebnahme von Entschwefelungs- und Entstickungsanlagen in den Berliner Heizkraft- und Kraftwerken (Stand August 1996)				
Kraftwerk	Block	Rauchgas-entschwefelung	Entstickung (DeNOx)	Bemerkung
HKW Lichterfelde	1	1983	Februar 1992	(1a)
	2	nicht erforderlich	nicht erforderlich	
	3	1983	Dezember 1991	
KW Oberhavel	1	Juni 1988	Februar 1992	
	2	Mai 1988	Februar 1992	
HKW Reuter	1	Mai 1988	Februar 1994	
	2	Juni 1988	Februar 1994	
	C	August 1988	Februar 1994	
HKW Rudow	1	Januar 1989	Februar 1994	
	2	November 1988	Dezember 1993	
HKW Charlottenburg	1	Juni 1989	März 1994	
	2	Juli 1989	März 1994	
	3	Mai 1989	März 1994	
HKW Reuter West	D	Juni 1988	Januar 1989	
	E	März 1989	Januar 1989	
HKW Wilmersdorf		nicht erforderlich	nicht erforderlich	Gasturbine
HKW Steglitz		nicht erforderlich	nicht erforderlich	Gasturbine
HKW Moabit		nicht erforderlich	nicht erforderlich	Wirbelschichtverfahren
HKW Rummelsburg/ Klingenberg	1	ohne	ohne	(1b)
	2	ohne	ohne	(1b)
	3	ohne	ohne	(1b)
	4	ohne	ohne	(1b)
	5	Juni 1990	ohne	Elektrofilter
	6	Juni 1990	ohne	Elektrofilter
HKW Mitte		ohne	ohne	(1b) (2)
HKW Lichtenberg		ohne	ohne	(1b) (3)

(1a) Erdgasbetrieb
(1b) Erdgas und andere Brennstoffe
(2) 1996 Fertigstellung einer Gas- und Dampfturbinenanlage
(3) Umbau der Feuerungsanlagen zur Einhaltung der 13. BImSchV

Tab. 2: Inbetriebnahme von Entschwefelungs- und Entstickungsanlagen in den Berliner Heizkraft- und Kraftwerken (Stand: August 1996)

Entwicklung der Schwefeldioxidimmissionen

In den Jahren 1968 und 1969 hat das Institut für Wasser- Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamts mit kontinuierlichen **Messungen der Schwefeldioxidkonzentration** an drei Meßstellen in Berlin begonnen. Im Jahr 1975 wurde von der damaligen Senatsverwaltung für Gesundheit und Umweltschutz das Berliner Luftgüte-Meßnetz (BLUME) in Betrieb genommen. An 31 Meßstationen wurden im Westteil der Stadt in einem 4 x 4 km-Raster flächendeckend Schwefeldioxidimmissionen gemessen.

Die zusammengefaßten Jahresmittelwerte der jeweils verfügbaren Stationen seit 1970 zeigt die Abbildung 2.

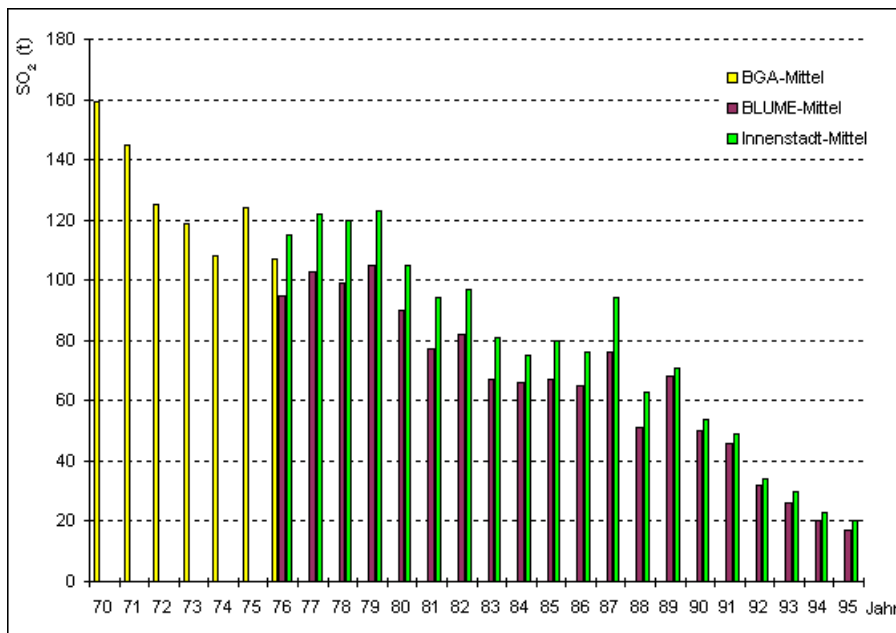


Abb. 2: Verlauf der Jahresmittelwerte von Schwefeldioxid 1970 - 1995

BGA-Mittel = Mittel der drei Stationen des Bundesgesundheitsamtes in Steglitz, Jungfernhöhe und Dahlem.

BLUME-Mittel = Mittel von 6 BLUME-Meßstationen in der westlichen Innenstadt

Innenstadt-Mittel = Mittel der Meßstationen in der Innenstadt.

Insgesamt hat die Schwefeldioxidkonzentration in Berlin von 1970 bis 1995 um mehr als 85 % abgenommen. Die Abnahme verlief in mehreren Stufen. Sehr starke Rückgänge waren von 1970 bis 1974, von 1979 bis 1983 und seit 1989 zu verzeichnen. Dazwischen zeigt Abbildung 2 zwei Stagnationsphasen, die von 1974 bis 1979 und von 1983 bis 1989 anhielten.

Die verschiedenen Phasen des Rückgangs haben ihre spezifischen Gründe. Anfang der 70er Jahre wurden verstärkt Heizungsanlagen von Kohle auf leichtes Heizöl umgestellt. Ende des Jahrzehnts erfolgte eine Herabsetzung des Schwefelgehalts im leichten Heizöl und in der Braunkohle. In den letzten Jahren wirkte sich die Einführung von Rauchgasentschwefelungsanlagen in Kraftwerken im Zusammenhang mit der Umsetzung der Großfeuerungsanlagenverordnung und die Einführung der Braunkohlenverordnung im Ostteil Berlins aus (vgl. Tab. 2). Damit konnte der Schwefeldioxidausstoß erneut verringert werden. Nicht zuletzt hat sich die Emission auch in Folge des Zusammenbruchs der DDR und der damit verbundenen Betriebsstillegungen erheblich vermindert.

Daneben haben sich die kontinuierliche Ausweitung von Fern- und Gasheizung sowie verstärkte Anstrengungen zur Wärmedämmung und Energieeinsparung, unter anderem durch technisch verbesserte Heizungsanlagen, immisionsmindernd ausgewirkt. Die Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen. Durch das starke Absinken der Schwefeldioxidkonzentration in der Luft wird dieser Schadstoff voraussichtlich seine Leitkomponentenfunktion für den Grad der Luftverschmutzung verlieren.

Wirkungen langjähriger Belastungen auf Waldökosysteme

Der Filtereffekt durch die Oberflächenstruktur von Wäldern bewirkt eine hohe Schadstoffeinwirkung und -akkumulation. Mit dem Schadgas Schwefeldioxid und seinem Folgeprodukt Sulfat sind entsprechend vielfältige Wirkungen auf Waldökosysteme verbunden. Die seit Anfang der 80er Jahre auf internationaler Ebene intensiv betriebene Waldschadensforschung hat auf dem Gebiet der Immissionswirkungen ganz neue Erkenntnisse geliefert, die zu sehr kritischer Grenzwertfestlegung führten.

Direkte Schadeinwirkungen der ehemals hohen SO_2 -Konzentrationen machten sich in der Vergangenheit in Berlin vor allem in der Verarmung der Flechtenflora (vgl. Karte 03.07, SenStadtUmTech 1996a) und in **Nadelschäden** bemerkbar. In den langjährigen Untersuchungen des Monitoringprogramms wurde eine spezielle Methodik entwickelt, um die makroskopisch erkennbaren Nadelschäden zu erfassen und zu bewerten (vgl. Meyer u. Kalhoff 1996). Die Schadbilder wurden zu

Schadtypen zusammengefaßt, von denen der Schadtyp 3 (Nadeln mit scharf abgesetzten band- und fleckenförmigen Chlorosen und Nekrosen) sich recht sicher als SO₂-Schaden deuten läßt. Die Abbildung 3 zeigt die Entwicklung dieses Schadtyps seit 1986: parallel zur abnehmenden SO₂-Belastung traten weniger Nadelschäden des Schadtyps 3 auf. Die positive Korrelation mit der mittleren SO₂-Konzentration der Jahre 1986-94 bestätigt den Zusammenhang. Die in Berlin abnehmenden Nadelschäden dieses Schadtyps stimmen mit den Beobachtungen von Korsch und Jäger (1993) überein, die im Raum Bitterfeld ebenfalls eine deutliche Reduzierung der Nadelnekrosen in den letzten Jahren konstatieren.

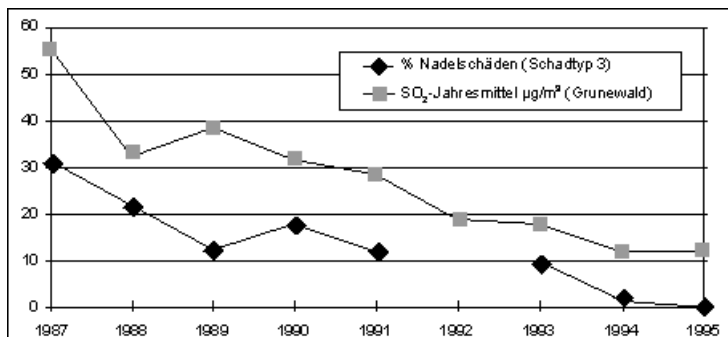


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung von Nadelschäden des Schadtyps 3 in drei Untersuchungsflächen der im Westteil Berlins gelegenen Wälder und die mittlere SO₂-Konzentration im Grunewald. Dargestellt ist für den Schadtyp das Mittel aller Probestämme (nach Meyer u. Kalhoff 1996). Für 1992 liegt kein Wert zu Nadelschäden vor.

Trotz dieses geringen Konzentrationsniveaus von Schwefeldioxid in 1995 ist eine **Säurebelastung der Berliner Wälder**, die zu ca. zwei Drittel durch SO₂ verursacht wird, nach wie vor vorhanden. Zwar reduzierte sich infolge der umfangreichen Immissionsminderungsmaßnahmen die Menge der eingetragenen Säure, aber nicht in dem Maße, wie sich die SO₂-Konzentrationen verminderten. Dies liegt an den ebenfalls sinkenden Calciumeinträgen, wodurch sich die atmosphärische Pufferung der Säuren reduziert hat (vgl. Abb. 4). Zudem sind die Stickoxidimmissionen, die zu einem Drittel an der Säurebildung beteiligt sind, nur wenig gesenkt worden (vgl. Karte 03.03, SenStadtUmTech 1997). Die Folge war ein leichter Anstieg des Säureeintrags von 1991 bis 1994.

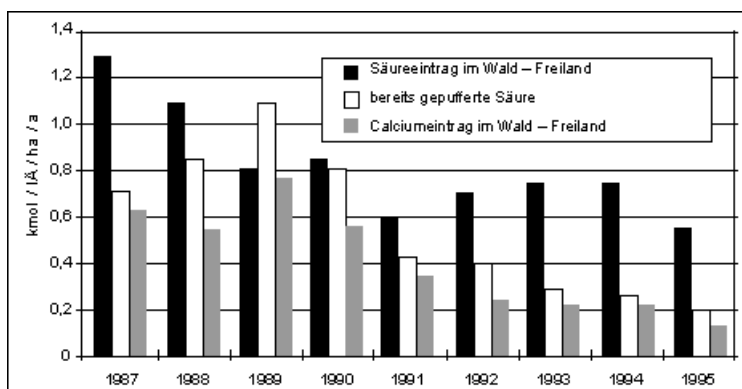


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung des Säureeintrags, der atmosphärisch bereits gepufferten Säure und des Calciumeintrags in kmol Ionenäquivalenten pro Hektar und Jahr im Freiland innerhalb des Grunewaldes (nach Fischer 1996)

Diese aktuell gemessenen Säureeinträge liegen noch über dem **Wert tolerierbarer Säureeinträge** für die Berliner Wälder, der sich nach dem auf **nachhaltige Sicherung des Naturhaushalts** ausgerichteten UN ECE-Konzept der "Critical Loads" bestimmen läßt (vgl. Abb. 5). Der Wert errechnet sich danach, wieviel der Waldboden langfristig durch seine Säureneutralisationskapazität abfangen kann. Die Säureneutralisationskapazität wird bestimmt durch die Möglichkeit des Bodens, durch Verwitterung basische Kationen (Ca, Mg, K) nachzuliefern. Die gleiche Funktion üben aber auch die mit dem Staub eingetragenen basischen Kationen aus, die somit zu einer Entlastung führen können. Durch die bereits erwähnte erhebliche Reduzierung der Calciumeinträge verringert sich diese Entlastung.

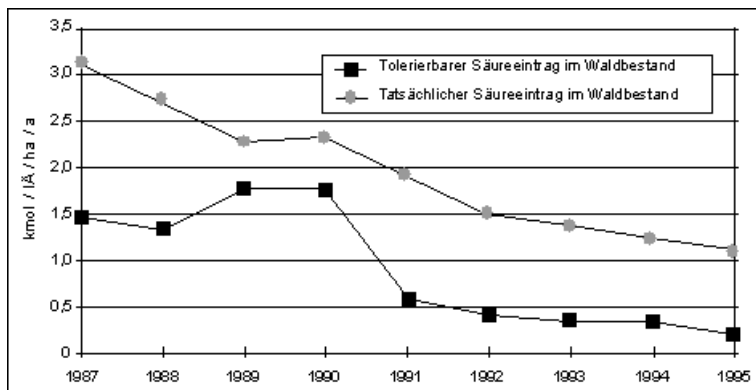


Abb. 5: Entwicklung des tatsächlichen und des nach UN ECE-Konzept tolerierbaren Säureeintrages (Critical Loads) in Ionenäquivalenten pro Hektar und Jahr von 1987 - 95 (Beispiel Grunewald). Tatsächlicher Säureeintrag: berechnete Eintragswerte in den Waldbestand

Bedingt durch diese abnehmende atmosphärische Säurepufferung wird auch ein Absinken des **pH-Wertes im Regen** (1984 - '94 von 4,7 auf 3,9) (vgl. Pelz 1995) festgestellt (vgl. Abb. 6). Der hohe Säuregrad von Regen und Nebel ist wiederum für Wälder problematisch, so können vermehrt Säureschäden auf Nadeloberflächen (frühzeitige Alterung der Wachsschicht) und ein erhöhtes Auswaschen von Nährstoffen auftreten.

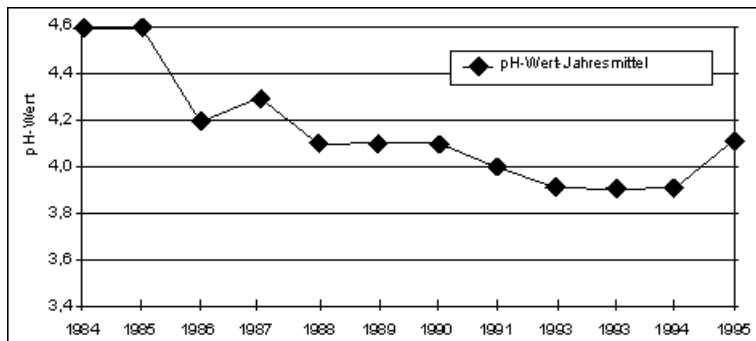


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf des pH-Wertes des Niederschlages in Berlin-Dahlem 1984 - 1995 (Pelz 1995, Pelz 1996)

Im **Waldboden** können die langjährigen Säure-Einträge in der **Bodenlösung** nachgewiesen werden, die einen **sensiblen Indikator** für den bodenchemischen Zustand darstellt. Auf den Walddauerbeobachtungsflächen im Grunewald ist die Bodenlösung durch hohe Sulfat (SO_4)-Konzentrationen geprägt, die mit 85 % an der Anionensumme auch die Ionenstärke der Bodenlösung entscheidend bestimmen (vgl. Schlenther et al. 1995). Damit stellen die hohen SO_4 -Einträge der Vergangenheit eine wichtige Steuerungsgröße für den Stoffhaushalt im Boden dar. Aufgrund der anhaltenden Pufferung dieser durch Sulfat bedingten Versauerung werden vermehrt die für Wurzeln toxischen Aluminiumionen freigesetzt. Nur wegen der immissionsbedingten Calciumvorräte im Boden kommt es trotzdem nicht zu Wurzelschäden. Aber die aktuellen Säureeinträge zehren diese Vorräte allmählich auf. Das auf langfristigen Erhalt der Bodenqualität zielende Konzept der Critical Loads berücksichtigt diese sich aufbrauchenden Bodenvorräte nicht und bewertet deshalb den aktuellen Säureeintrag unter dem Aspekt der nachhaltigen Sicherung der Waldböden als nicht tolerierbar.

Datengrundlage

Emissionen

Um die Ursachen der Schwefeldioxidbelastung differenziert beurteilen und zu deren Beseitigung beitragen zu können, werden bei der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie für die Hauptverursachergruppen **Emissionskataster** geführt.

Zur Erstellung des **Emissionskatasters Industrie 1994** werden die Daten der großen Einzelmittenten, wie Kraft-, Heizkraft- und Heizwerke sowie Industrieanlagen, den

Emissionserklärungen entnommen, die von den Betreibern entsprechend den Vorschriften des Bundes-Immissionsschutzgesetzes im Abstand von zwei Jahren den Immissionsschutzbehörden vorgelegt werden müssen.

Das **Emissionskataster Hausbrand 1994** für die Vielzahl kleiner Heizungsanlagen im Stadtgebiet ist statistisch angelegt. Für sämtliche Wohnhäuser werden aus dem umbauten Raum der Wärmebedarf und die Anteile der Heizungsarten ermittelt, z.B. Kohle-Einzelöfen, Öl-Sammelheizungen, Gas-Etagenheizungen, Elektro- und Fernheizungen. Mit Hilfe spezifischer Faktoren für die unterschiedlichen Heizungsarten wird die Emission jedes einzelnen Häuserblocks bestimmt. Der mit Elektroheizungen und Fernwärme befriedigte Wärmebedarf wird hierbei nicht berücksichtigt, wenn die Wärme in genehmigungsbedürftigen Anlagen produziert wird. Für Gasheizungen sind die Emissionsfaktoren erheblich geringer als für Kohle und Ölfeuerungen, so daß diese Feuerungsart kaum zur Schwefeldioxidbelastung beiträgt.

Das **Emissionskataster Verkehr 1993** für den Anteil des Kraftfahrzeugverkehrs an der Schwefeldioxidemission basiert auf Verkehrszählungen seitens der Verkehrsverwaltung sowie auf Angaben über den Kraftfahrzeugbestand und die mittlere Fahrleistung der Kraftfahrzeuge. Die Emission wird mit Hilfe von Faktoren berechnet, die für verschiedene Fahrzeugklassen festgelegt sind. Zur Schwefeldioxidemission tragen im wesentlichen nur die Dieselfahrzeuge bei.

Alle Abschätzungen und Berechnungen werden mit der Energiebilanz abgeglichen, in der der gesamte Verbrauch an Brenn- und Kraftstoffen in Berlin zusammengestellt ist.

Berechnete Immissionen

Die **Immissionsberechnungen** werden mit Hilfe eines computergestützten meteorologischen Ausbreitungsmodells für große Einzelmittenten und die Verursachergruppen Hausbrand und Verkehr getrennt vorgenommen (vgl. Fath et al. 1991).

Für die **Ausbreitungsrechnungen** werden die Hausbrand- und Verkehrsemissionen auf Rasterflächen von 1 x 1 km verteilt. Ihnen werden bestimmte Emissionshöhen zugewiesen, während die großen Einzelmittenten mit dem jeweiligen Schornsteinstandort und der Schornsteinhöhe in die Berechnungen eingehen.

Für die Berechnungen wird angenommen, daß die in den Rauchfahnen enthaltenen Schadstoffpartikel mit dem Wind transportiert werden und sich senkrecht zur mittleren Transportrichtung vertikal und horizontal in Form von Gaußverteilungen ausbreiten. In die Höhe können sie sich nur so weit verteilen, bis eine Temperaturinversion die weitere Ausbreitung verhindert. Miteinbezogen werden Windrichtung, Windgeschwindigkeit, turbulente Ausbreitungskapazität der Atmosphäre und eine variable Inversionshöhe. Außerdem wird berücksichtigt, daß der Wärmebedarf und damit auch die Schadstoffemissionen im Winter mit abnehmender Temperatur stark ansteigen.

Weil bei den Modellrechnungen von einer unbehinderten Ausbreitung der Schadstoffe ausgegangen wird und weil die Zuordnung der Hausbrand- und der Verkehrsemissionen pauschal zu Rasterflächen von 1 x 1 km erfolgt, repräsentieren die Rechenergebnisse Meßstellen, die in größerem Abstand von Schadstoffquellen, insbesondere Straßen, angeordnet sind. Die Schadstoffkonzentration wird für etwa 100 Aufpunkte berechnet, die über das gesamte Stadtgebiet verteilt sind.

Gemessene Immissionen

In Berlin wurde 1995 für die **Immissionsmessungen** an 36 Stationen des BLUME Schwefeldioxid kontinuierlich gemessen. 20 Stationen lagen im Westteil der Stadt und 16 im Ostteil. In allen Stationen sind automatische Meßgeräte in Betrieb, die über Telefonstandleitungen mit einem Zentralrechner verbunden sind, an den die Werte im 3-Minuten-Takt übermittelt werden. Alle Meßgeräte arbeiten nach der UV-Fluoreszenzmethode.

Weil seit dem Beginn der intensiven Messungen im Jahr 1975 regelmäßig Überschreitungen von Immissionswerten der TA-Luft und von Grenzwerten der EG-Richtlinie für Schwefeldioxid und Schwebstaub festgestellt wurden, waren die Meßstationen bis 1989 im Westteil der Stadt in einem regelmäßigen 4 x 4 km-Raster angeordnet, das das bebaute Stadtgebiet bis zu den Stadträndern flächendeckend überzog. Nach der Wende in der DDR sind zunächst im Ostteil die vorhandenen fünf Stationen durch sechs neue ersetzt worden, an denen auch Schwebstaub gemessen wurde (vgl. Karte 03.04, SenStadtUm 1994c). Da in Ost-Berlin höhere Konzentrationen von Schwefeldioxid und Schwebstaub festgestellt wurden und im Westteil nach der Wende Immissionswertüberschreitungen

nur noch an den Innenstadtstationen zu erwarten waren, wurden weitere Stationen vom West- in den Ostteil verlagert. Die Umstellung wurde 1993 abgeschlossen.

In vier Stationen wird unter direktem Einfluß des Straßenverkehrs gemessen. Eine Station (14, Charlottenburg) liegt in unmittelbarer Nähe der Stadtautobahn, die zweite Station (74, Friedrichshain) an der stark frequentierten Kreuzung Frankfurter Allee/Warschauer Straße und zwei weitere (117, Steglitz und 174, Friedrichshain) an ebenfalls stark befahrenen Straßen mit geschlossener Fahrbahnrandbebauung (Straßenschlucht). Entsprechend den allgemeinen Vorschriften des Bundes-Immissionsschutzgesetzes zur Messung und Beurteilung der Schadstoffbelastung sind die übrigen Stationen in mehr als 20 m Abstand von Schadstoffquellen angeordnet. Um die überregional verursachte Belastung der Luft mit Schwefeldioxid ermitteln zu können, ist ein Meßgerät auf dem Funkturm Frohnau am nördlichen Stadtrand in etwa 300 m Höhe über dem Boden installiert (vgl. Karten 03.01.8 und 03.01.9).

Bis 1996 sind die Konzentrationen auch im Ostteil so weit zurückgegangen, daß im ganzen Stadtgebiet keine Grenzwertüberschreitungen mehr auftreten. Da auch nicht mehr mit Überschreitungen der Kriterien der Verordnung zur Verminderung schädlicher Umwelteinwirkungen bei austauscharmen Wetterlagen (Smog-Verordnung 1990) gerechnet werden muß, wurde sie Ende 1995 aufgehoben. Dementsprechend wird auch die Zahl der Meßstationen seit 1994 schrittweise reduziert.

Methoden

Die Daten der **berechneten 1 x 1 km-Emissionen** von Schwefeldioxid werden sowohl als Farbraster als auch als absoluter Wert dargestellt. Die Einteilung der insgesamt elf Emissionsklassen kann wie in der Ausgabe 1994 des Umweltatlasses in gleichen Abstufungen erfolgen, da die Schwefeldioxid-Emissionen als Folge der umwelttechnischen Maßnahmen (bis 1989 nur bezogen auf West-Berlin) stark abgenommen haben. So entfällt für diesen Schadstoff die Notwendigkeit einer besonderen Einteilung der Emissionsmengenwerte.

Bei den flächenhaften Darstellungen der **gemessenen Immissionen** 1995 von Schwefeldioxid wurden die Grenzwerte IW_1 und IW_2 der TA-Luft 1986 als Klassenwerte für die Abgrenzung der höchsten Klasse gewählt. Ihnen wurden die Kenngrößen I_1 (Jahresmittel) und I_2 (98 %-Wert) gegenübergestellt.

Die Interpolationen der Isolinien erfolgten per Hand. Zusätzlich sind die jeweiligen Werte der BLUME-Meßstationen, unterschieden nach Art der Stationen, dargestellt.

Kartenbeschreibung

Emissionen und berechnete Immissionen

In den drei Karten 03.01.1, 03.01.2 und 03.01.3 sind die Emissionen der Hauptemittentengruppen Verkehr 1993 sowie Industrie und Hausbrand 1994 jeweils in 1 x 1 km-Rasterflächen dargestellt. Die Karten 03.01.4, 03.01.5 und 03.01.6 geben jeweils die berechneten Jahresmittelwerte von 1993 bzw. 1994 der genannten Hauptverursachergruppen für die Schwefeldioxidbelastung der Berliner Luft an.

Industrie 1994

Die Karte der **Industrieemissionen** (03.01.1) zeigt ein sehr uneinheitliches Bild. 1994 wurden von den genehmigungsbedürftigen Anlagen 10 900 t/a Schwefeldioxid emittiert. In der Karte treten deutlich die Standorte der Kraft-, Heizkraft- und Heizwerke hervor. Dabei erreicht das Heizkraftwerk Reuter in Ruhleben den Maximalwert mit 1 700 t/a. Das Heizkraftwerk Klingenberg, das 1989 noch 22 800 t emittierte, ist in der Karte nur noch mit 680 t/a ausgewiesen. Auch auf den anderen Rasterflächen sind die Emissionen zum Teil drastisch zurückgegangen.

Während im größten Teil des Stadtgebietes die Kraft- und Heizwerke als isolierte Maxima in Erscheinung treten, gibt es im Ost- und Südostteil der Stadt eine Konzentrierung von Industriestandorten, auf denen erhöhte Emissionen von 100 bis 500 t/a auftreten. So sind die Industrie- und Gewerbegebiete in Treptow und Lichtenberg sowie in Köpenick, Weißensee und Pankow in der Karte deutlich auszumachen.

Im Vergleich zu den Darstellungen aus den Jahren 1985 und 1994 sind die Emissionsmengen der Verursachergruppe Industrie deutlich gesunken (vgl. Karten 03.01.1 und 03.01.8, SenStadtUm 1985 und 1994).

Da die Industrieschornsteine nach den Vorschriften der TA-Luft um so höher sein müssen, je höher die Schadstoffemissionen sind, werden die Schadstoffe dieser Anlagen in großer Höhe emittiert und gleichmäßig über das ganze Stadtgebiet und das Umland verteilt. Deshalb werden in der näheren Umgebung der Anlagen erhöhte Konzentrationen in der Regel weder gemessen, wie Karte 03.01.8 zeigt, noch berechnet, wie die Karte 03.01.4 dokumentiert.

Die Karte der berechneten **Immissionen** der Verursachergruppe Industrie (03.01.4) zeigt dementsprechend ein ausgeglichenes Immissionsfeld. Zwei Maxima werden mit Werten bis $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Charlottenburg/Wedding sowie mit Werten bis $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Neukölln/Treptow berechnet.

Hausbrand 1994

Die Schwefeldioxidemissionen aus dem **Hausbrand** lagen 1994 bei 4 900 t. In der Karte 03.01.2 ist die zunehmende Emissionsdichte in Richtung Innenstadt gut erkennbar. Während in den Stadtrandgebieten Werte bis $5 \text{ t}/\text{km}^2$ und Jahr Schwefeldioxid angegeben sind, werden in Kreuzberg Werte bis $40 \text{ t}/\text{km}^2$ und Jahr und in den am dichtesten besiedelten Bezirken Prenzlauer Berg und Friedrichshain mit hoher Bebauungsdichte und noch größerem Anteil an Einzelofenbeheizung Emissionen von $66 \text{ t}/\text{km}^2$ und Jahr erreicht (vgl. Karten 08.01 und 08.02, SenStadtUmTech 1996b und 1996c).

Im Bereich des Hausbrands ist die Verringerung der Schwefeldioxidemissionen innerhalb der letzten zwanzig Jahre sehr deutlich zu erkennen, wenn man die oben genannten Zahlen mit denen der Angaben in den Umweltatlanten von 1985 und 1994 vergleicht, die die Emissionen der Jahre 1974 und 1983 für den Westteil Berlins und 1989 für die gesamte Stadt in getrennten Karten aufführen. Wurden 1974 auch im Westteil noch vereinzelt Emissionsmengen von mehr als $200 \text{ t}/\text{km}^2$ und Jahr erreicht, hatte sich der Ausstoß dort 1983 bereits auf maximal $75 \text{ t}/\text{km}^2$ und Jahr reduziert. 1989 wurden im Westteil noch maximal $50 \text{ t}/\text{km}^2$ und im Ostteil noch bis zu $200 \text{ t}/\text{km}^2$ und Jahr ermittelt.

Die Ergebnisse der **Ausbreitungsrechnungen im Bereich Hausbrand** (Karte 03.01.5) zeigen im wesentlichen die gleiche Struktur wie das Emissionsfeld. Das Maximum der Immissionen liegt mit $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im am dichtesten besiedelten Gebiet (Prenzlauer Berg).

Auch auf dieser Karte ist der Unterschied zur entsprechenden Umweltatlas-Karte von 1985 sehr augenfällig. In dem für die berechneten Immissionen beim Hausbrand am stärksten belasteten Gebiet im nördlichen Schöneberg wurden 1974 Werte von mehr als $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ermittelt, die sich 1983 auf knapp unter $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ reduziert hatten; 1995 fielen hier die Werte auf $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Verkehr 1993

Die **Emissionen im Bereich Verkehr** sind vergleichsweise gering. Wegen des erheblichen Rückgangs bei den anderen Verursachergruppen, der bei den Verkehrsemissionen nicht eingetreten ist, hat sich der relative Anteil aber vervierfacht. Er lag 1993 mit 1 400 t/a bei etwa 8 % der Gesamtemissionen von Schwefeldioxid. In der Karte 03.01.3 ist erkennbar, daß die Stadtautobahn im Westen Berlins eine Linie höherer Emissionen mit Mengen bis $10 \text{ t}/\text{km}^2$ und Jahr bildet. Diese Werte haben die gleiche Größenordnung wie die Emissionen des Hausbrands und der kleineren Industrieanlagen in diesem Gebiet.

In den Meßwerten der verkehrsnahen Meßstellen (Karte 03.01.8) treten die durch den Kraftfahrzeugverkehr verursachten Emissionen deutlicher hervor als in der Karte der **berechneten Immissionen für den Verkehrsbereich** (Karte 03.01.6), weil die Ausbreitungsrechnungen nicht punkt-, sondern flächenbezogen sind und Mittelwerte im 1 x 1-km-Raster wiedergeben, während bei den gemessenen Werten die Einzelwerte als solche in die Karte eingehen.

Die Schadstoffbelastung der Stadtluft wird nicht nur durch Emissionen im Stadtgebiet und im unmittelbaren Umland verursacht, sondern es gibt einen **überregionalen Belastungspegel**, der durch eine Vielzahl von Schadstoffquellen in Europa hervorgerufen wird. Nach der deutschen Vereinigung hat das Umweltbundesamt sein Meßnetz, mit dessen Hilfe dieser Hintergrundpegel bestimmt wird, auf die neuen Bundesländer ausgeweitet. In der Umgebung Berlins befinden sich die Stationen Kyritz, Neuglobsow und Angermünde nordwestlich bis nordöstlich der Stadt sowie

Wiesenburg und Lindenberg südwestlich und südöstlich der Stadt. Für das Jahr 1994 stehen Jahresmittelwerte der Schwefeldioxidkonzentration zur Verfügung, die als Hintergrundwerte für Berlin herangezogen werden können (vgl. Umweltbundesamt 1996).

Die Werte liegen bei 7 bis 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, wobei die höheren Werte südlich und die geringeren nördlich von Berlin gemessen wurden. Sie decken sich mit dem Wert von 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, der in 300 m Höhe am Funkturm Frohnau ermittelt wurde. Aufgrund der Messungen wird für Berlin unter der Berücksichtigung der Höhenverteilung der Konzentration mit einem Wert von 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gerechnet.

Summe der berechneten Immissionen 1993/94

Die Karte 03.01.7 gibt die Summe der berechneten Immissionen der drei Hauptverursacherguppen Industrie, Hausbrand und Verkehr wieder und zwar als **Jahresmittelwerte** des Jahres 1994 bzw. 1993. Sie zeigt ein flaches Maximum bis 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, das sich von Prenzlauer Berg über Friedrichshain bis zum Nordrand von Neukölln hinzieht. Zu den Stadträndern hin nehmen die Konzentrationen ab, wobei die Abnahme nach Westen stärker ausfällt als nach Osten. Diese Asymmetrie ist auf die vorherrschenden Westwinde zurückzuführen, die die Emissionen des Stadtgebietes häufiger nach Osten transportieren.

Die Ursachen der Schwefeldioxidbelastung gelten als ausreichend genau bestimmt, wenn die Summe der für die Verursacherguppen berechneten Konzentrationen und der überregionalen Hintergrundbelastung mit den erzielten Meßergebnissen übereinstimmt.

Unter Berücksichtigung der überregionalen Hintergrundbelastung von ca. 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und eines weiteren leichten Rückgangs bis 1995 zeigt die Karte der Summe der berechneten Immissionen (03.01.7) nur geringfügig höhere Werte als die Messung an den vergleichbaren Standorten des Luftgüte-Meßnetzes. Die Unterschiede der Maxima liegen im Unsicherheitsbereich der Messung und Rechnung.

Wie der in Abbildung 2 dargestellte Trend zeigt, hat sich die Belastung in dem Zeitraum von 1989 bis 1995 im Mittel über das Stadtgebiet um etwa 60 % vermindert. Im Bereich des innerstädtischen Maximums wurde 1994 mit 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nur noch etwa ein Drittel der Werte von 1989 gemessen.

	Konzentration $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anteil %
Messung 1994 insgesamt	22	
Rechnung 1994 insgesamt	27	100
Industrie, genehmigungsbedürftige Anlagen	4	15
Hausbrand	8	30
Verkehr	3	10
Überregionaler Hintergrund	12	45

Tab. 3: Anteile der Verursacherguppen an der Schwefeldioxidimmission in der Innenstadt von Berlin

Gemessene Immissionen 1995

Die Karte für die **Jahresmittelwerte** (03.01.8) zeigt im gesamten Stadtgebiet nur noch geringe Konzentrationsunterschiede bei insgesamt sehr geringen Werten. Die höchsten Belastungen wurden mit 25 bis 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ an den straßennahen Meßstellen registriert, an denen sich der Schwefelgehalt im Dieselmotorkraftstoff bemerkbar macht. Im nicht unmittelbar vom Kraftfahrzeugverkehr betroffenen Wohngebiet lag die Konzentration im Stadtrandbereich bei 11 bis 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und in der Innenstadt bei etwa 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Wenn man diese Werte mit denen aus dem Zeitraum 1976 bis 1980 vergleicht, wo noch bis zu 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurden (vgl. SenStadtUm 1985), bedeutet dies, daß eine erhebliche Dauerbelastung der Berliner Luft mit Schwefeldioxid aus Feuerungsanlagen nicht mehr festgestellt werden kann.

In der Karte für die **98 %-Werte** (03.01.9) ist noch etwas deutlicher als in der Karte für die Jahresmittelwerte eine rauchfahnenähnliche Struktur zu erkennen, die sich über die Innenstadt hinweg von Südosten nach Nordwesten erstreckt. Das Maximum liegt nicht mehr, wie noch 1991 (vgl.

SenStadtUm 1994a), über der östlichen Stadthälfte, sondern ist wie in der Karte der Jahresmittelwerte nach Westen verschoben. Der höchste Wert liegt nur noch bei $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nach $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Zeitraum 1976 bis 1980 und ca. $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 1991. Es ist bemerkenswert, daß am Stadtrand auf dem Funkturm Frohnau in 300 m Höhe mit $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ der zweithöchste 98 %-Wert und mit $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auch ein verhältnismäßig hoher Jahresmittelwert gemessen wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich in dieser Höhe immer noch Rauchfahnen von Großemittenten stärker bemerkbar machen, die am Boden zwar auch zur Ausbildung der rauchfahnenähnlichen Struktur der Verteilung der 98 %-Werte beitragen, die Schadstoffbelastung insgesamt aber nur noch wenig erhöhen.

Literatur

- [1] **BMUNR (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (Hrsg.) 1987:**
Auswirkungen der Luftverunreinigungen auf die menschliche Gesundheit, Bericht für die Umweltministerkonferenz, Bonn.
- [2] **Fath, J.U., Stern, R. (GEOS Angewandte Umweltforschung GmbH) 1991:**
Verursacherspezifische Ausbreitungsrechnungen für die Region Berlin, im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Berlin.
- [3] **Fischer, U. 1996:**
Depositionsmessungen in Waldökosystemen Berlins, AFZ/Der Wald, 13/1996, S. 747-749.
- [4] **Köble, R., Nagel, H.-D., Smiatek, G., Werner, B., Werner, L. 1992:**
Luftreinhaltung, Erfassung immissionsempfindlicher Biotope in der Bundesrepublik Deutschland und in anderen ECE-Ländern, Endbericht des F+E-Vorhabens 108 02 080, gefördert durch das Umweltbundesamt, Berlin und Stuttgart.
- [5] **Korsch, H., Jäger, E. 1993:**
Auswirkungen einer verringerten Schadstoffbelastung der Luft auf morphologische Parameter der Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.), Arch. Nature Conservation and Landscape Res.
- [6] **Kühling, W. 1986:**
Planungsrichtwerte für die Luftqualität, in: Schriftenreihe Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Materialien, Band 4.045, Hrsg.: Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung des Landes Nordrhein-Westfalen im Auftrag des Ministers für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW, Dortmund.
- [7] **Meyer, G., Kalhoff, M. 1996:**
Schaddiagnostik an Kiefernbeständen in Berlin und Brandenburg 1995 - 1997, Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin.
- [8] **Nowak, D., Jörres, R., Magnussen, H. 1994:**
Luftverschmutzung - Asthma - Atemwegsallergien, Zwischenergebnisse deutsch-deutscher epidemiologischer Studien, in: Deutsches Ärzteblatt 91, Heft 1/2, Köln.
- [9] **Pelz, J. 1995:**
Zur Neuberechnung des mittleren pH-Wertes des Niederschlages in Berlin-Dahlem, Beilage zur Wetterkarte, 27/95.
- [10] **Pelz., J. 1996:**
mündliche Mitteilung.
- [11] **Schlenker, L., Marschner, B., Wessolek, G., Renger, M. 1995:**
Wasser-, Nährstoff- und Schadstoffdynamik im Bodenraum immissionsbelasteter Waldökosysteme in Berlin, Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin.
- [12] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1991:**
Informationsreihe zur Luftreinhaltung in Berlin, Nr. 12: Luftverunreinigungen in Berlin, Berlin.
- [13] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1994:**
Luftreinhaltungsplan für die Jahre 1994 - 2000 (in Vorbereitung), Berlin.
- [14] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1996:**

Informationsreihe zur Luftreinhaltung in Berlin: Luftverunreinigungen in Berlin 1995 (in Vorbereitung), Berlin.

- [15] **Umweltbundesamt 1996:**
Monatsberichte aus dem Meßnetz, Berlin.

Gesetze und Verordnungen

- [16] **Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA-Luft) 1964, GmBl, Bonn.**
- [17] **Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA-Luft) in der Fassung vom 27.2. 1986, GmBl, S. 95, Bonn.**
- [18] **Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.) 1993:**
VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft Band 1, Nr. 2310 Bl. 2 E, Ausg. 08.78, Maximale Immissions-Werte zum Schutze der Vegetation, Maximale Immissions-Werte für Schwefeldioxid; Nr. 2310 Bl. 11, Ausg. 08.84, Maximale Immissions-Werte zum Schutze des Menschen, Maximale Immissions-Konzentrationen für Schwefeldioxid, Beuth-Verlag, Berlin.
- [19] **Richtlinie des Rates der Europäischen Gemeinschaften über Grenzwerte und Leitwerte für Schwefeldioxid und Schwebestaub 80/779/EWG, Anhang IV vom 15.7. 1980, zuletzt geändert durch die Richtlinie 89/427/EWG vom 21.6. 1989, Brüssel.**
- [20] **Verordnung über den Schwefelgehalt von Braunkohle für Heizzwecke im Land Berlin 1981, GVBL Nr. 7 vom 15.1.1981, Berlin.**
- [21] **Verordnung zur Vermeidung schädlicher Umwelteinwirkungen bei austauscharmen Wetterlagen - Smog-Verordnung - vom 30. Oktober 1990, GVBl. 9, 2236, Berlin.**
- [22] **World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe (Hrsg.) 1987:**
Die Luftleitlinien der WHO, Air Quality Guidelines for Europe, WHO Regional Publications, European Series No. 23, Kopenhagen.
- [23] **Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte - 22. BImSchV) vom 26.10.1993, BGBl. Nr. 58/I, S. 1819f, Bonn.**

Karten

- [24] **SenStadtUm (Der Senator für Stadtentwicklung und Umweltschutz) (Hrsg.) 1985:**
Umweltatlas für Berlin, Bd. 1, Karte 03.01 Schwefeldioxid - Emissionen und Immissionen, 1 : 200 000 / 1 : 300 000, Berlin.
- [25] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1994a:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe, Bd. 2, Karte 03.01 Schwefeldioxid - Emissionen und Immissionen, 1 : 200 000 / 1 : 300 000, Berlin.
- [26] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1994b:**
Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe, Bd. 2, Karte 03.03 Stickoxide - Emissionen und Immissionen, 1 : 200 000 / 1 : 300 000, Berlin.
- [27] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1994c:**
Umweltatlas Berlin, Ausgabe 1994, Bd. 2, Karte 03.04 Stäube, Emissionen und Immissionen - 1 : 200 000 / 1 : 300 000, Berlin.
- [28] **SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (Hrsg.) 1994d:**
Umweltatlas Berlin, Ausgabe 1994, Bd. 2, Karte 03.08 Organische Gase und Dämpfe - Emissionen und Immissionen, 1 : 200 000 / 1 : 300 000, Berlin.
- [29] **SenStadtUmTech (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1996a:**

Umweltatlas Berlin, Ausgabe 1996, Bd. 2, Karte 03.07 Bioindikatoren, 1 : 500 000 / 1 : 200 000, Berlin.

[30] SenStadtUmTech (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1996b:

Umweltatlas Berlin, Ausgabe 1996, Bd. 3, Karte 08.01 Versorgungsbereiche Gebäudewärme, 1 : 125 000, Berlin.

[31] SenStadtUmTech (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1996c:

Umweltatlas Berlin, Ausgabe 1996, Bd. 3, Karte 08.02 Überwiegende Heizungsarten, 1 : 50 000, Berlin.

[32] SenStadtUmTech (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin) (Hrsg.) 1997:

Umweltatlas Berlin, aktualisierte und erweiterte Ausgabe, Bd. 2, Karte 03.03 Stickoxide - Emissionen und Immissionen, 1 : 200 000 / 1 : 300 000, Berlin.