



Jahresbericht 2001 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes

3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME

3.1 Messungen von Feinstaub im Messnetz des Umweltbundesamtes

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

Inhalt:

3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME.....	1
3.1 Messungen von Feinstaub im Messnetz des Umweltbundesamtes.....	1
3.1.1 Einleitung.....	3
3.1.2 Messungen von Feinstaub im Messnetz des UBA.....	6
3.1.2.1 Grundlagen.....	6
3.1.2.2 Messergebnisse.....	8
3.1.2.3 Überschreitung von PM₁₀-Grenzwerten im Messnetz des UBA.....	21
3.1.3 Herkunft des Feinstaubes.....	24
3.1.4 Literatur.....	25

3. SPEZIELLE UMWELTPROBLEME

3.1 Messungen von Feinstaub im Messnetz des Umweltbundesamtes

3.1.1 Einleitung

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

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

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

Im luftgetragenen Zustand können Feinstaubpartikel (Sekundärpartikel) durch Reaktionen von Gasen in wolkenfreier Luft (sog. gas to particle conversion, (GPC)) sowie durch chemische Reaktionen in Wolken und anschließende Verdampfung der Wolkentröpfchen gebildet werden. Die GPC führt zur Neubildung von Partikeln (Cluster bestehend aus wenigen Molekülen) und/oder zur Anlagerung dieser Cluster bzw. der gasförmigen Reaktionsprodukte von NO_x , NH_3 , VOC und SO_2 an das schon existierende Aerosol hauptsächlich im Größenbereich zwischen $0.1 - 1 \mu\text{m}$ Radius (größte Aerosoloberfläche). In der bodennahen Atmosphäre Mitteleuropas mit ihrem vergleichsweise hohen Aerosolkonzentrationen lagern sich die Reaktionsprodukte dieser Spurengase in sehr kurzer Zeit überwiegend an das schon existierende Aerosol an, weshalb diese Reaktionsprodukte nur in unmittelbarer Nähe ihrer Quellen beobachtet werden können (siehe auch Kapitel 3.1.5 Herkunft des Feinstaubes). In der Regel ist die durch GPC-Prozesse neu gebildete Teilchenmasse gering, die Anzahl neu gebildeter Aerosolteilchen im Nanobereich aber erheblich (Abbildung 8 und Abbildung 9), wodurch die Anzahlverteilung der Aerosolteilchen in erheblichem Maße verändert werden kann (Ref. 4).

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

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

Lebensdauer von Partikeln in der Troposphäre

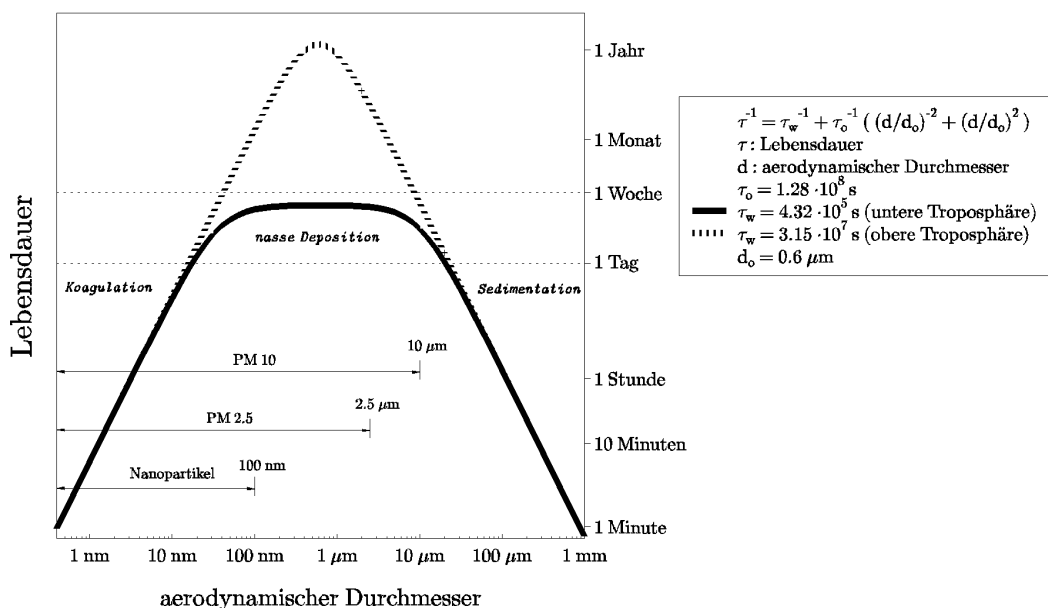


Abbildung 1: Lebensdauer von Partikeln in der Troposphäre in Abhängigkeit von der Partikelgröße (nach Jaenicke, Ref. 5)

Wie die Abbildung 1 zeigt, ist die atmosphärische Lebensdauer im Bereich sehr kleiner und sehr großer Teilchen kurz. Die sehr kleinen Teilchen können aufgrund ihrer hohen diffusiven Eigenbeweglichkeit miteinander koagulieren, die sehr großen Partikel sedimentieren sehr rasch aufgrund der Erdanziehung. Beide Prozesse sind dagegen im dazwischen liegenden Größenbereich zwischen 0.1 – 5 μm Partikeldurchmesser wenig wirkungsvoll. Die Beseitigung durch die Sedimentation spielt also für den Feinstaub nur eine untergeordnete Rolle.

Im Bereich der Partikelgrößen zwischen etwa 0.1 – 5 μm Durchmesser liegt die Hauptmasse des Feinstaubes. In diesem Bereich, vor allem zwischen 0.1 und 1 μm , ist die Deposition durch Niederschläge die wirkungsvollste Senke. Die Lebensdauer der Teilchen in diesem

Größenbereich beträgt in der bodennahen Atmosphäre bis zu 10 Tagen. Das bedeutet, dass diese Partikel und damit auch die Hauptmasse des Feinstaubes für PM_{10} und $PM_{2,5}$ eine sehr stabile Komponente des atmosphärischen Aerosols darstellen. Der Feinstaub unterliegt damit in hohem Maße dem Ferntransport wie beispielsweise Episoden mit hohen Saharastaubkonzentration auf den Kanarischen Inseln und abgeschwächt auch in Deutschland und sogar auf karibischen Inseln eindrucksvoll gezeigt haben.

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

Messungen von luftgetragenen Aerosolteilchen waren im Rahmen der Luftreinhaltung bis 1999 auf den Gesamtschwebstaub (TSP = total suspended particulate matter) bezogen. Aufgrund neuer epidemiologischer Untersuchungen (Ref. 6), die zeigen, dass insbesondere feinere Stäube mit gesundheitlichen Effekten korrelieren, wurden neue Definitionen und Grenzwerte für Schwebstaub eingeführt. Die in Europa am 22. April 1999 erlassene Richtlinie des europäischen Rates über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (1999/30/EG) setzt neue Standards in Bezug auf luftgetragene PM_{10} -Partikel (Tabelle 1). Diese Tochtrichtlinie zur Luftqualitätsrahmenrichtlinie der EU (1999/30/EG) trat im Juli 1999 in Kraft. Sie wurde von den Mitgliedsstaaten im Juli 2001 in nationales Recht umgesetzt.

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

	Mittelungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, bis zu dem der Grenzwert zu erreichen ist
Stufe 1 24-Stundengrenzwert für den Schutz der menschliche Gesundheit Jahresgrenzwert für den Schutz der menschliche Gesundheit	24 Stunden Kalenderjahr	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} dürfen nicht öfter als 35 mal/Jahr überschritten werden 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10}	1. Januar 2005
Stufe 2 24-Stundengrenzwert für den Schutz der menschliche Gesundheit Jahresgrenzwert für den Schutz der menschliche Gesundheit	24 Stunden Kalenderjahr	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} dürfen nicht öfter als 7 mal/Jahr überschritten werden 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10}	1 Januar 2010

3.1.2 Messungen von Feinstaub im Messnetz des UBA

3.1.2.1 Grundlagen

Im UBA-Messnetz sowie in der UBA-Pilotstation werden folgende Staubmessungen durchgeführt (Tabelle 2):

Tabelle 2: Staubmessungen im Messnetz des UBA

Komponente	Sammel-Methode	Mess-Methode	Anzahl Stat.	Mess-intervall
Gesamtstaub/PM ₁₀	Kontinuierl. Ansaugung	Beta-Absorption	21	Halbstunde
Gesamtstaub/PM ₁₀	High-Volume Sampler	Gravimetrisch	8	Tag
PM _{2,5}	High-Volume Sampler	Gravimetrisch	3	Tag
SO ₄ ⁼ im Staub	Filterpack/Imprägnierte Fil.	Ionenchromatographie	5	Tag
∑HNO ₃ +NO ₃ ⁻ in Gas/Staub	Filterpack/Imprägnierte Fil.	Ionenchromatographie	5	Tag
∑NH ₃ +NH ₄ ⁺ in Gas/Staub	Filterpack/Imprägnierte Fil.	Fließinjektionsanalyse	5	Tag
Schwermetalle im Staub	High-Volume Sampler	ICP/MS	8	Monat
Partikelgrößenverteilung von Nanopartikeln (8-250 nm Durchmesser)	Online-Sampler	SMPS	1	> 3 Minuten

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

Im Messnetz des Umweltbundesamtes wird der Gesamtschwebstaub (Tagesproben) teilweise schon seit Ende der 1960er Jahre an den Stationen, Neuglobsow, Waldhof, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland gemessen, seit Anfang der 80er Jahre auch in Westerland und Schmücke und seit 1992 in Zingst. Ab Beginn der 90er Jahre werden neben den Tagesproben auch kontinuierliche Messungen des Schwebstaubes durchgeführt. An den oben genannten personell besetzten Messstellen wurde ab 1999 von der täglichen Gesamtstaubmessung auf die Bestimmung der Partikelmasse für Teilchen unterhalb von 10 µm Durchmesser (PM₁₀) umgestellt. Nur in Waldhof wird die Gesamtstaubmessung parallel seit 1999 weitergeführt und seit 1999 neben PM₁₀ auch die Partikelmasse für Teilchen unterhalb von 2,5 µm Durchmesser (PM_{2,5}) bestimmt. In Deuselbach und Schauinsland werden PM_{2,5}-Messungen seit 2000 durchgeführt.

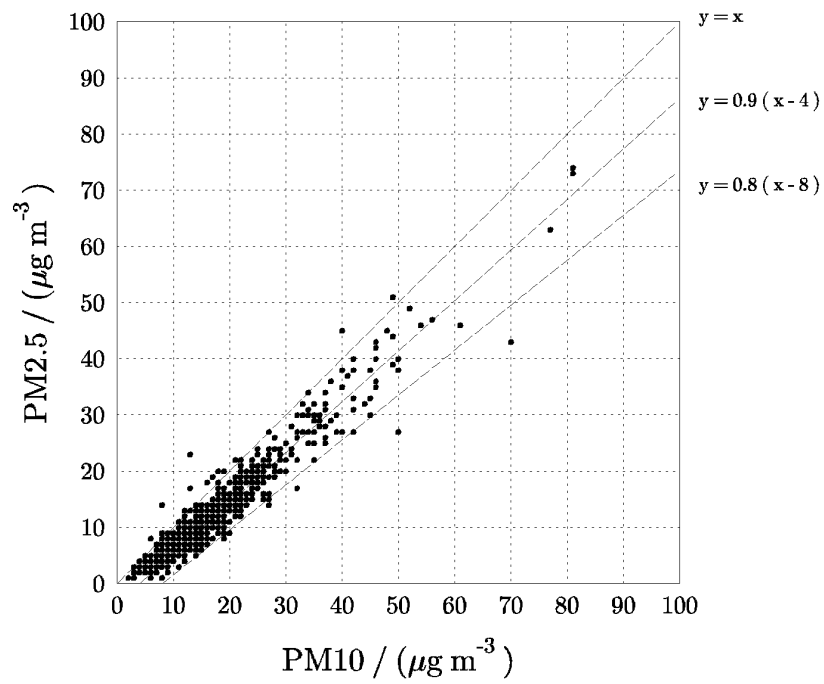


Abbildung 2: Korrelation der Tagesmittel von PM₁₀ und PM_{2.5} in Waldhof für März 1999 bis Dezember 2001

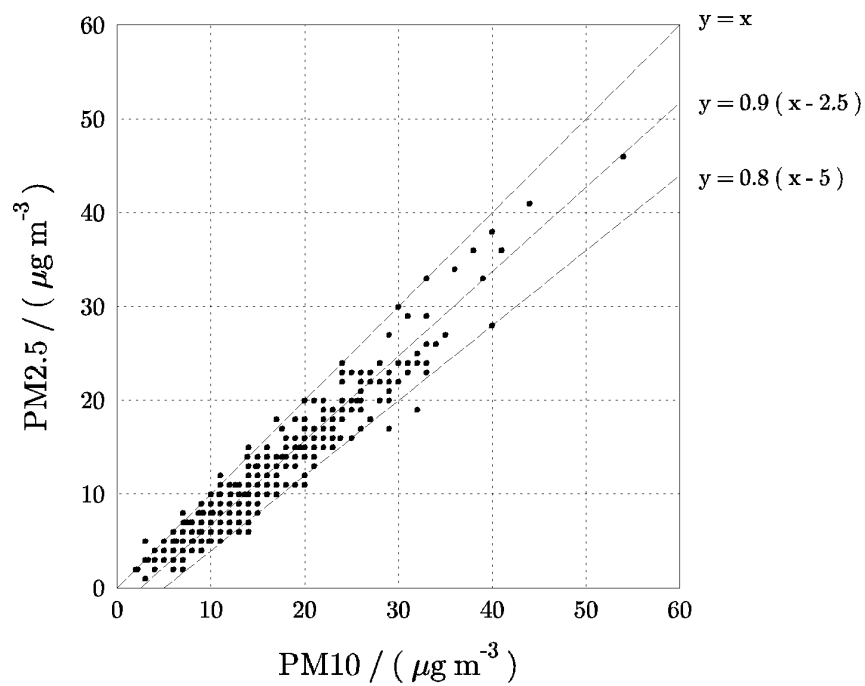


Abbildung 3: Korrelation der Tagesmittel von PM₁₀ und PM_{2.5} in Deuselbach für Juli 2000 bis Dezember 2001

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen beispielhaft die Ergebnisse des $PM_{2.5}$ - PM_{10} -Staubvergleichs für Waldhof (1999-2001) und Deuselbach (2000-2001). Die über alle Messpunkte gemittelten Regressionsgeraden können durch folgende Gleichungen beschrieben werden (Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$):

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

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

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

3.1.2.2 Messergebnisse

3.1.2.2.1 Massenkonzentrationen und Teilchenanzahlen

Abbildung 4 zeigt die Jahresmittel des Gesamtschwebstaubes an 7 von 8 personell besetzten UBA-Messstellen (Westerland wurde wegen des hohen Seesalzanteils herausgenommen) zwischen 1974 und 2001 (Digital Tagesproben, ab 1999 PM_{10}). Die gestrichelten Kurven grenzen den Bereich zwischen den höchsten (Waldhof) und niedrigsten Konzentrationen (Schauinsland) ein. Die Gesamtstaubkonzentrationen in ländlichen Gebieten Deutschlands abseits von städtischen Ballungsgebieten sollten innerhalb des durch beide Kurven definierten Bereichs liegen.

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

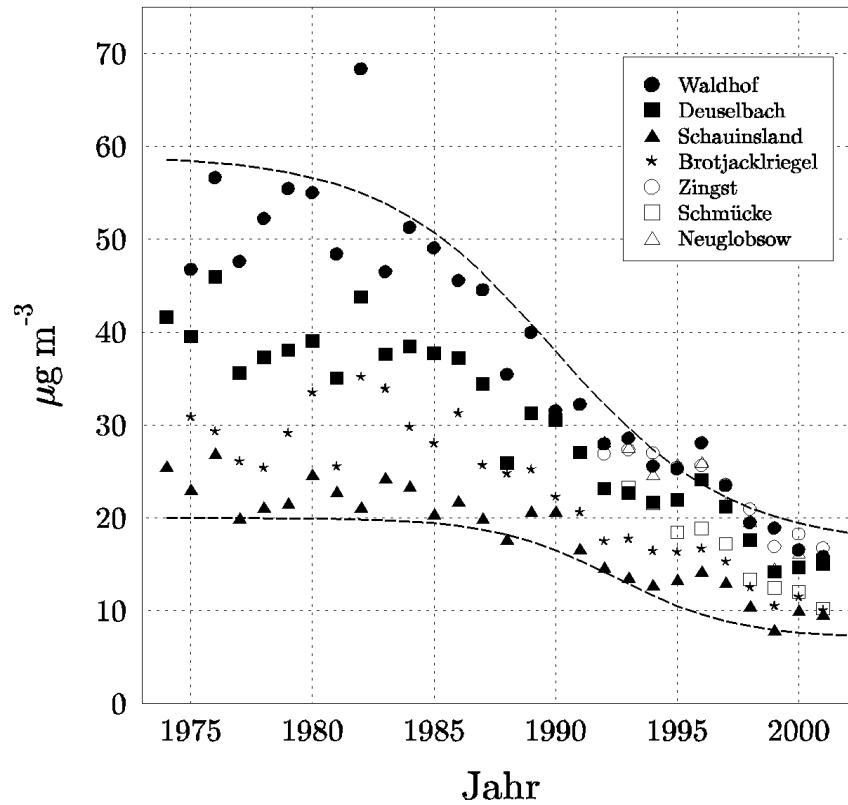


Abbildung 4: Jahresmittel des Gesamtschwebstaubs zwischen 1974 und 2001 an 7 UBA-Stationen

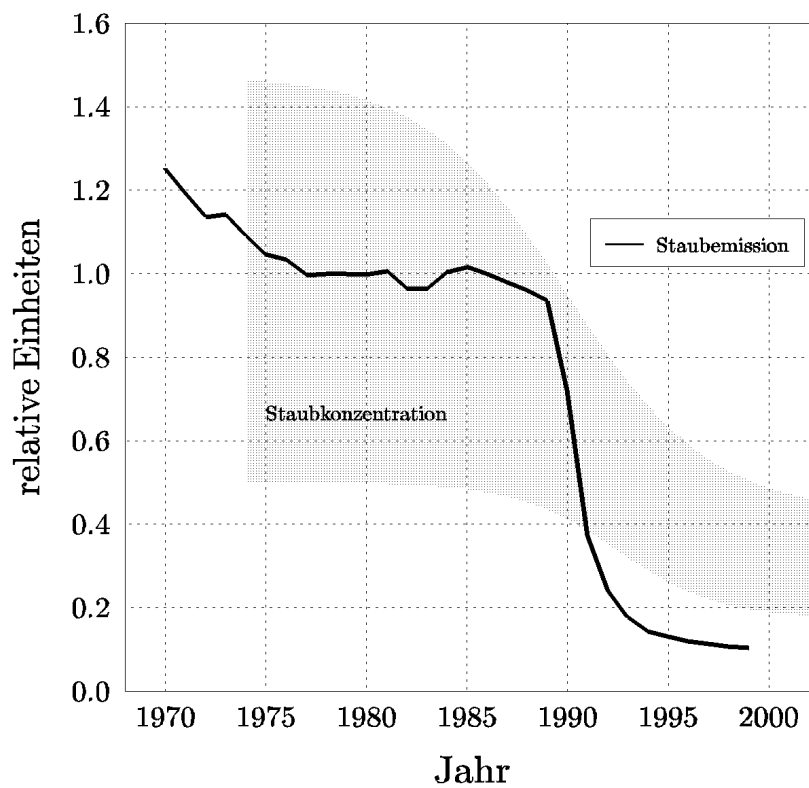


Abbildung 5: Bereich der Staubkonzentrationen von 1974 bis 2001 im Messnetz des UBA, normiert auf das Jahr 1977 (schraffiert), Kurve: normierter Verlauf der Staubemissionen in Deutschland

Abbildung 5 zeigt den in Abbildung 4 dargestellten Bereich der Staubkonzentrationen von 1974 bis 2001 (schraffierte Fläche) normiert auf das Jahr 1977. Mit eingezeichnet ist der ebenfalls auf das Jahr 1977 normierte Verlauf der Staubemissionen in Deutschland (Ost und West) bis einschließlich 1999 (vorläufige Werte für 1998 und 1999). Man erkennt, dass der Abfall der Staubkonzentrationen nach 1988 wesentlich langsamer erfolgt ist als der starke Rückgang der Emissionen in Deutschland.

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

In Abbildung 6 sind mittlere Jahrgänge für die Stationen Neuglobsow, Waldhof, Schmücke, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland für den Zeitraum zwischen 1995 und 2001 dargestellt. Die höchsten Schwebstaubkonzentrationen traten an den Flachlandstationen Neuglobsow und Waldhof im Winter auf, auf dem Schauinsland dagegen im Sommer. Das winterliche Maximum an den Flachlandstationen dürfte im Wesentlichen auf die niedrigen winterlichen Mischungsschichthöhen zurückzuführen sein. Der Grund für das Sommermaximum am Schauinsland und den anderen Bergstationen liegt darin, dass diese Stationen im Sommer sehr häufig innerhalb der mit Partikeln angereicherten Mischungsschicht, im Winter dagegen oft oberhalb der Mischungsschicht in der freien Troposphäre liegen (siehe auch Messnetz-Jahresbericht 1998, S.73).

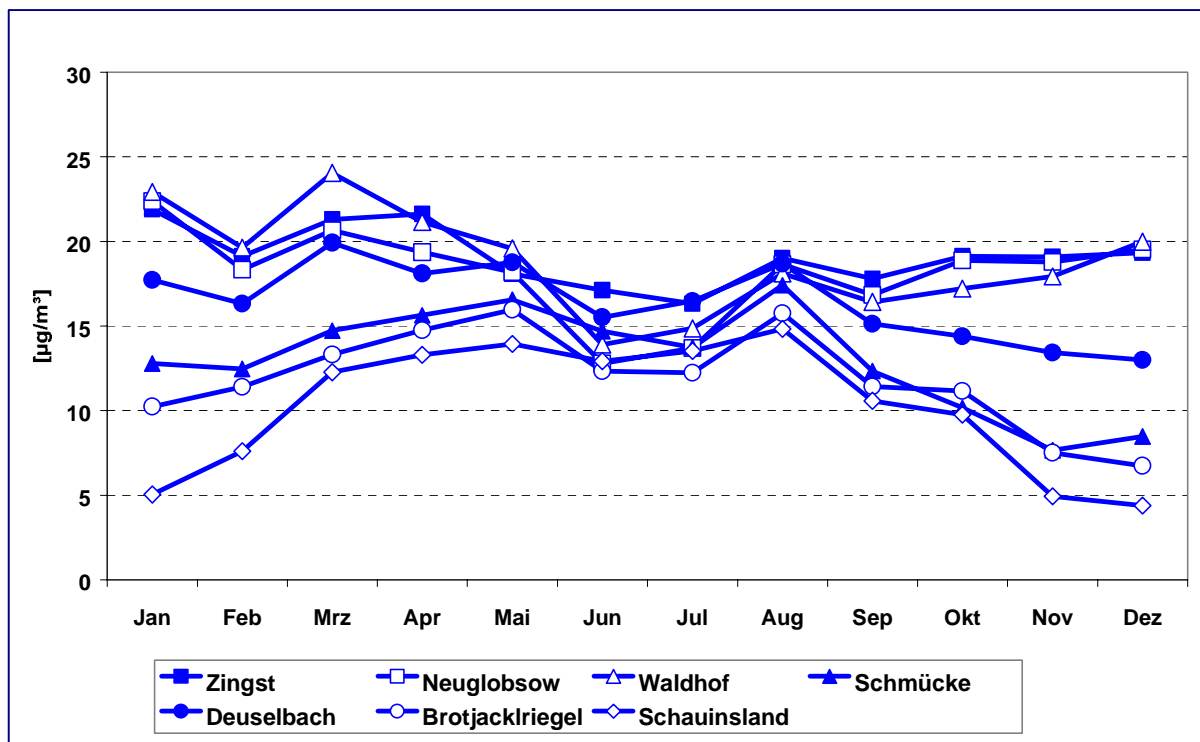


Abbildung 6: Mittlere Jahrgänge für PM_{10} berechnet für 1995 bis 2001. Die Werte von 1995 bis 1998 wurden von Gesamtschwebstaub umgerechnet

Erste, mehr orientierende Messungen der Korngrößenverteilung von ultrafeinen Partikeln mit Teilchendurchmessern zwischen 8 und 250 nm wurden in unterschiedlich mit Luftverunreinigungen belasteten Gebieten durchgeführt. Aufgrund dieser orientierenden Messungen sowie Literaturveröffentlichungen (*Ref. 7*) können folgende Anzahlkonzentrationen für Gebiete mit unterschiedlicher Luftqualität angegeben werden (Tabelle 3):

Tabelle 3: Anzahlkonzentrationen ultrafeiner Partikel (8 – 250 nm) in Gebieten mit unterschiedlicher Luftqualität (*Quelle: UBA sowie Ref. 7*).

Standort	Partikelzahl pro cm ³ Luft
Großstadt Frankfurt/Main-City	100 000 – 200 000
Kleinstadt Langen	50 000 – 100 000
Mittelgebirge Kl. Feldberg (Taunus, 820 m ü.N.)	10 000 – 50 000
Schauinsland (Schwarzwald, 1205 m ü. N.)	5 000 – 10 000
Maritime Reinluft (Nordatlantik)	100 – 1 000

Die Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen den mittleren Tagesgang verschiedener Größenklassen in Außenluft am UBA-Dienstgebäude Langen sowie die Anzahlgrößenverteilungen der ultrafeinen Partikel (8-250 nm) (Mittelwert über einen Messzeitraum von 49 Tagen zwischen August 2000 und Januar 2001). Abbildung 9 zeigt zum Vergleich die Anzahlgrößenverteilung der Nanopartikel gemessen auf dem Kleinen Feldberg/Taunus (820 m. ü. N.).

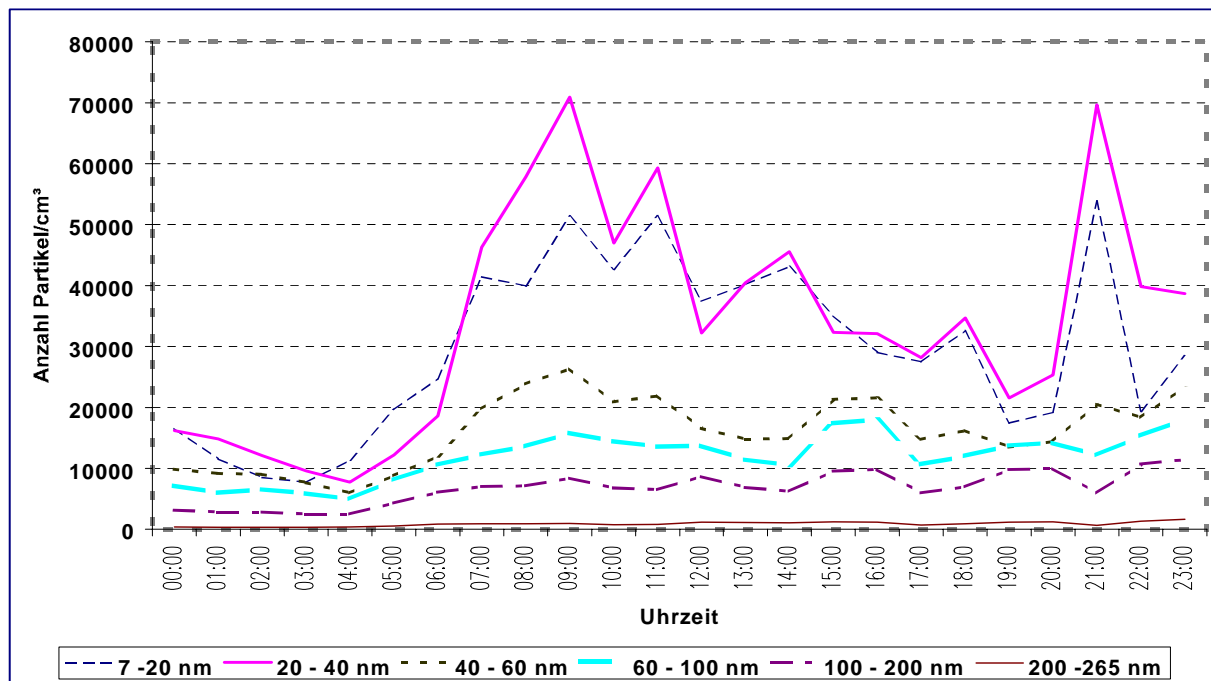


Abbildung 7: Mittlerer Tagesgang verschiedener Größenklassen von ultrafeinen Partikeln (8-250 nm) in der Außenluft am UBA-Dienstgebäude in Langen

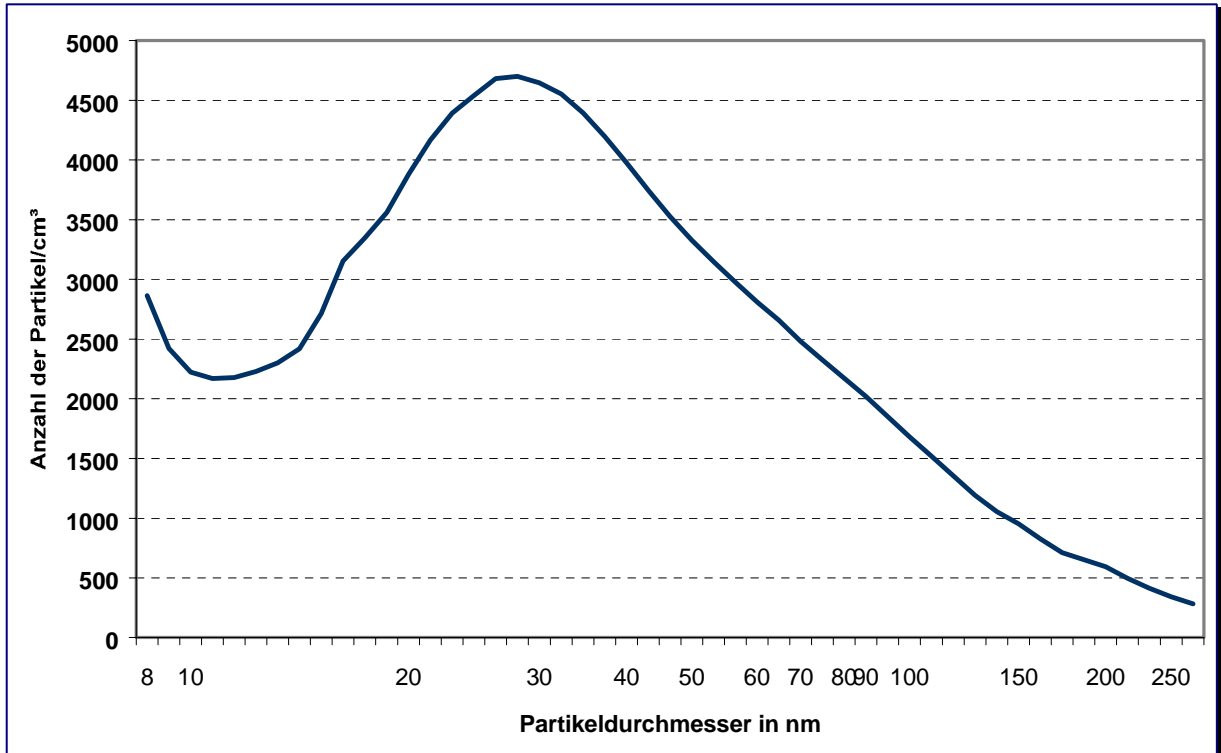


Abbildung 8: Anzahl-Größen-Verteilungen der ultrafeinen Partikel (8-250 nm) in der Außenluft am UBA-Dienstgebäude in Langen (Mittelwert über einen Messzeitraum von 49 Tagen zwischen August 2000 und Januar 2001).

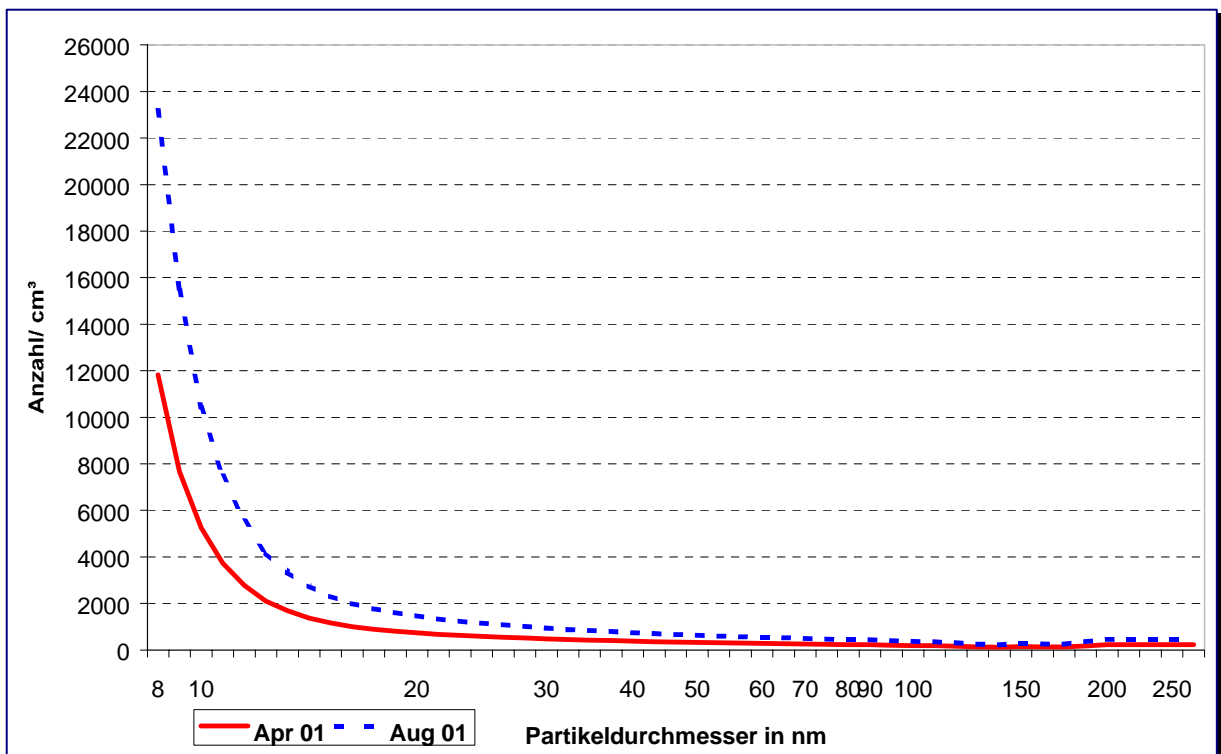


Abbildung 9: Anzahl-Größen-Verteilung der Nanopartikel auf dem Kleinen Feldberg/ Taunus (820 m ü. NN)

Während auf dem Kleinen Feldberg die maximale Anzahl der Nanopartikel bei sehr kleinen Teilchendurchmessern (< 10 nm) auftritt (Abbildung 9), werden in Langen Maxima der Anzahldichte sowohl bei den sehr kleinen Teilchen (< 10 nm) als auch bei Teilchengrößen zwischen 20 und 40 nm beobachtet (Abbildung 7 und Abbildung 8). Das sekundäre Maximum bei ca. 30 nm in Langen ist sehr wahrscheinlich auf die Emissionen von Rußpartikeln aus Verbrennungsprozessen (Autoverkehr) zurückzuführen, während das Maximum unterhalb von 10 nm sehr wahrscheinlich aus Partikelneubildung aus Gasen resultiert (GPC). Eine solche Verteilung wurde auch in Städten beobachtet. Entsprechend den Verkehrsspitzen traten die Maxima in Langen morgens zwischen 8:00 und 9:00 Uhr sowie abends zwischen 21:00 und 22:00 Uhr auf (Schichtwechsel bei der Flugsicherung?)

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

Die auf dem Kleinen Feldberg vor allem bei den sehr kleinen Nanopartikeln beobachteten höheren Teilchenzahlen im August gegenüber April 2001 (Abbildung 9) sind wahrscheinlich auf eine erhöhte photochemischer Aktivität und damit eine stärkere Teilchenbildung aus Gasen (GPC) im August gegenüber April zurückzuführen. Hinzu kommt, dass der Kleine Feldberg im August öfter als im April innerhalb der mit Luftschadstoffen angereicherten Mischungsschicht liegt. Demgegenüber dürfte der direkte Transport von Nanopartikeln aus dem Frankfurter Ballungsraum wegen der extrem kurzen Lebensdauer dieser winzigen Teilchen kaum eine Rolle für die im August beobachteten höheren Konzentrationen spielen.

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

3.1.2.2.2 Messung von Staubinhaltsstoffen im Messnetz des Umweltbundesamtes:

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

Wie Abbildung 10 zeigt, hat der Massenanteil der im UBA-Messnetz analysierten anorganischen Staubinhaltsstoffe (Sulfat, Nitrat, Chlorid, Ammonium, Kalzium, Natrium, Kalium) zwischen 1990 und 1999 von etwa 50% auf etwa 35% abgenommen, der nicht analysierte organische Anteil sollte entsprechend zugenommen haben (von 50% auf ca. 65%). Neben der erheblichen Streuung der monatlichen anorganischen Massenanteile erkennt man auch einen Jahresgang mit maximalen anorganischen Anteilen im Winter und einem Minimum im Sommer.

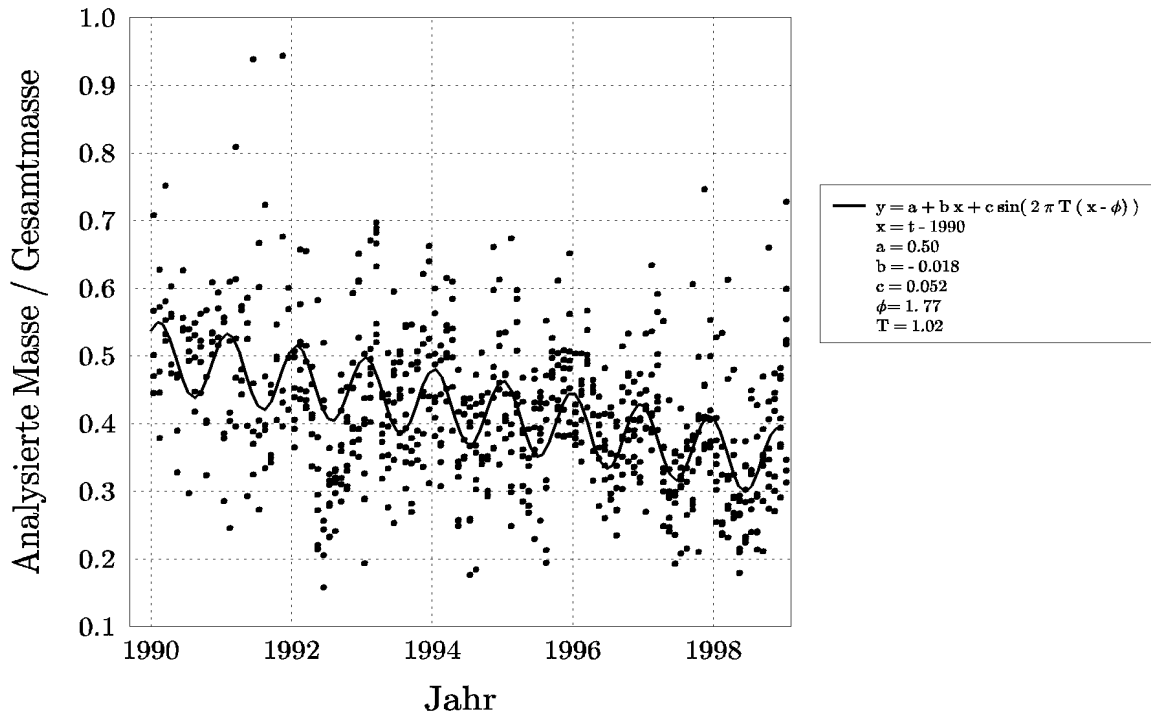


Abbildung 10: Massenanteil der im UBA-Messnetz an 8 Stationen analysierten anorganischen Staubinhaltsstoffe

Schwefel im Schwebstaub:

Abbildung 11 zeigt den mit RFA gemessenen Verlauf der Jahresmittel von Schwefel im Staub (Feinstaub) von 1974 bis 1999 an den 5 Stationen Westerland, Waldhof, Deuselbach, Brotjackriegel und Schauinsland sowie für die Stationen Zingst, Neuglobsow und Schmücke zwischen 1992 und 1999. Die mittels RFA gewonnenen Werte wurden mit einem Faktor von 1.5 nach oben korrigiert. Die höchsten absoluten Schwefelkonzentrationen wurden an den Stationen Waldhof und Deuselbach, die niedrigsten an den Bergstationen Schauinsland, Brotjackriegel und Schmücke beobachtet. Ähnlich wie die Konzentrationen des Gesamtstaubes haben in den letzten Jahrzehnten auch die Konzentrationen des Schwefels abgenommen.

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

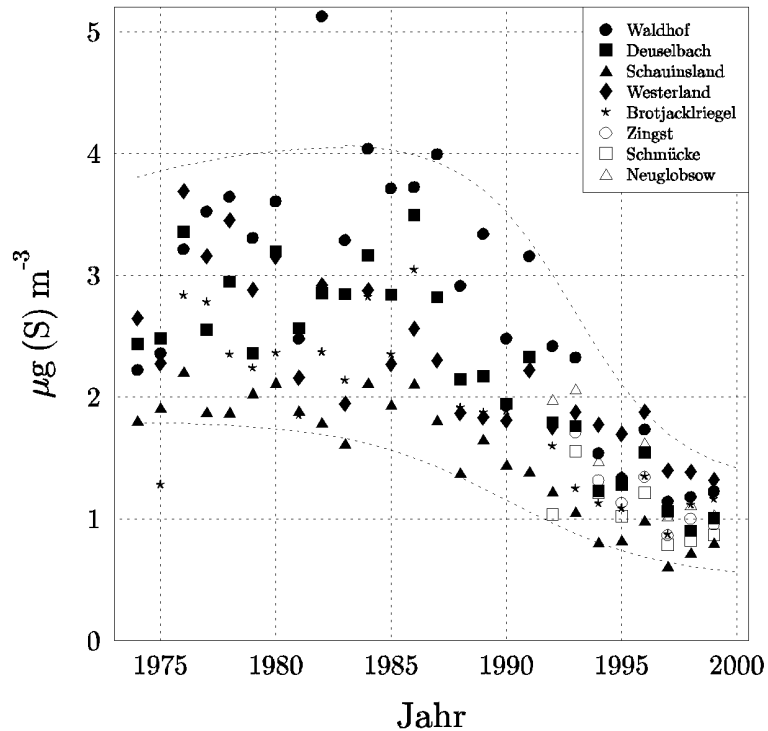


Abbildung 11: Verlauf der Jahresmittel von Schwefel im Staub (Feinstaub) von 1974 bis 1999 an den 5 Stationen Westerland, Waldhof, Deuselbach, Brotjacklriegel und Schauinsland sowie für die Stationen Zingst, Neuglobsow und Schmücke zwischen 1992 und 1999

In Tabelle 4 sind die mittleren Massenanteile für Sulfat, Nitrat und Ammonium für die UBA-Stationen zusammengestellt. Diese Massenanteile sind mittlere Werte zwischen 1995 und 1999.

Tabelle 4: Mittlere Massenanteile von Sulfat, Nitrat und Ammonium im Messnetz des UBA

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

N-Verbindungen im Schwebstaub

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

Die Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen den Verlauf der mittleren Jahreskonzentrationen für Nitrat-N und Ammonium-N zwischen 1990 und 1999 an den personell besetzten UBA-Stationen. Wie zu erwarten wurden die niedrigsten Konzentrationen an den Bergstationen Schauinsland, Brotjacklriegel und Schmücke beobachtet. Die Konzentrationen schwanken von Jahr zu Jahr erheblich, vor allem für Ammonium-N, ein abnehmender Trend ist aber nur sehr schwach ausgeprägt. Der größte Teil des im Aerosol enthaltenen Nitrat- bzw. Ammonium-Stickstoffs scheint sekundäres Aerosol zu sein, das aus den Gasen NO_x bzw. NH_3 gebildet worden ist. Die Emissionen dieser Gase sind zwischen 1990 und 1999 in Deutschland um ca. 40% (NO_x) bzw. ca. 20% (NH_3) zurückgegangen, während die Emissionen des Gesamtstaubes um etwa 85% zurückgegangen sind.

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

Die mittleren Nitrat- und Ammoniumanteile an der Gesamtmasse des Schwebstaubs sind zusammen mit dem Sulfatanteil in Tabelle 4 zusammengestellt.

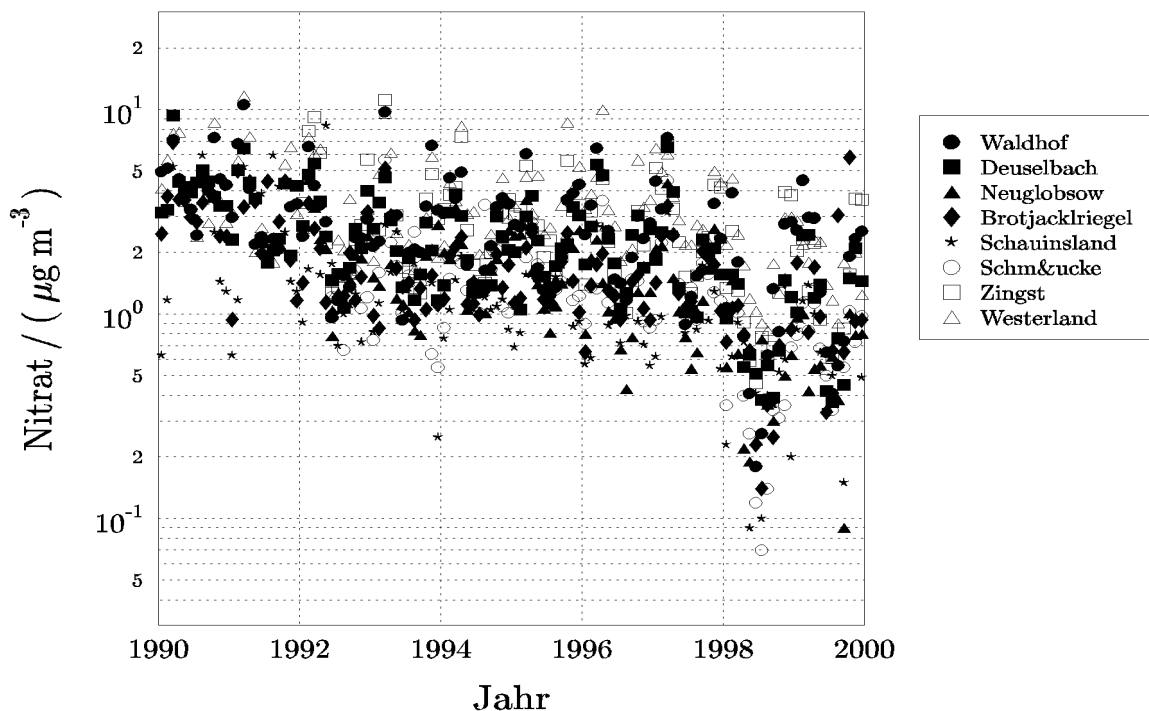


Abbildung 12: Verlauf der mittleren Jahreskonzentrationen für Nitrat-N zwischen 1990 und 1999 an den personell besetzten UBA-Stationen

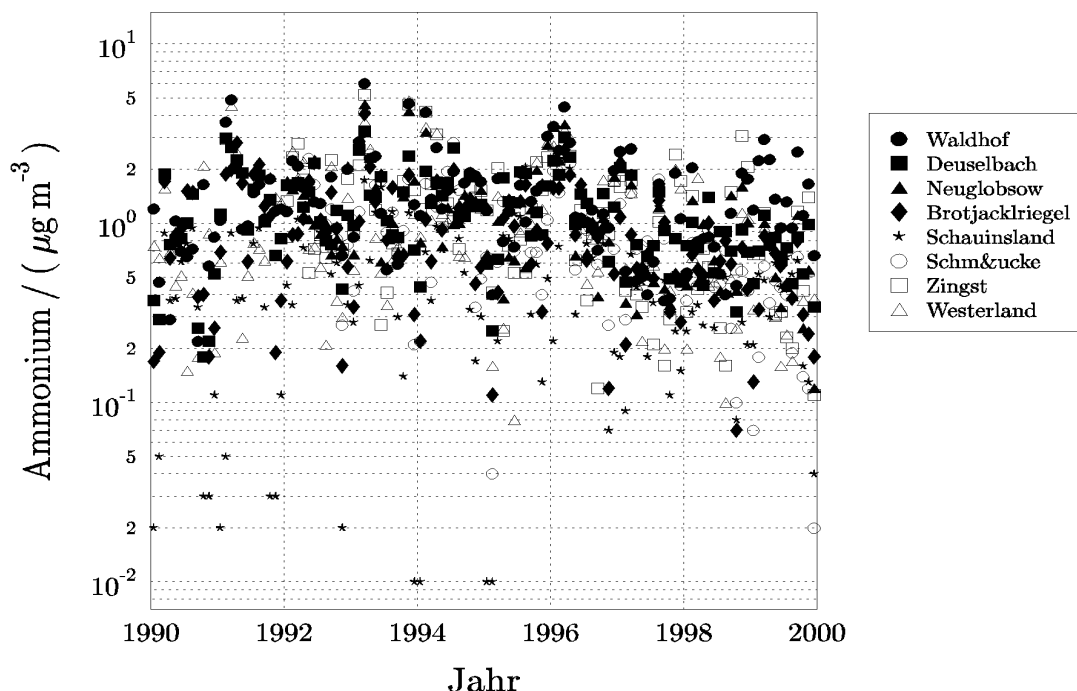


Abbildung 13: Verlauf der mittleren Jahreskonzentrationen für Ammonium-N zwischen 1990 und 1999 an den personell besetzten UBA-Stationen

Schwermetalle im Schwebstaub

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

In Tabelle 5 sind typische Konzentrationsbereiche von Schwermetallen für ländliche und städtische Gebiete Deutschlands dargestellt (Ref. 10, 11).

Tabelle 5: Heutige typische Konzentrationen von Schwermetallen in ländlichen und städtischen Gebieten Deutschlands (Ref. 10, 11).

Element	Massenkonzentrationen in ng/m ³	
	ländliches Gebiet	städtisches Gebiet
Blei Pb	20 bis 100	50 bis 800
Cadmium Cd	0.2 bis 2	2 bis 20
Kupfer Cu	1 bis 10	10 bis 100
Mangan Mn	10 bis 50	20 bis 100
Nickel Ni	1 bis 5	1 bis 20

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

Die Messergebnisse sind in Abbildung 14 bis Abbildung 17 zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils die mittleren Jahreskonzentrationen der Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer, Mangan und Nickel, die deutschen Emissionen (Balken) und die mittlere Trendlinie für die 5 UBA-Messstellen Westerland, Waldhof, Deuselbach, Brotjackriegel und Schauinsland. Für Nickel sind wegen des kurzen Messzeitraums (1995 – 2000) nur die mittleren Jahreskonzentrationen dargestellt. Die Schwermetallemissionen der Jahre 1985, 1990 und 1995 sind offizielle Daten des Umweltbundesamtes (*Ref. 12*), die entsprechenden Daten für die Jahre 1970, 1975 und 1982 sind Schätzwerte aus der Literatur (*Ref. 13, 14*).

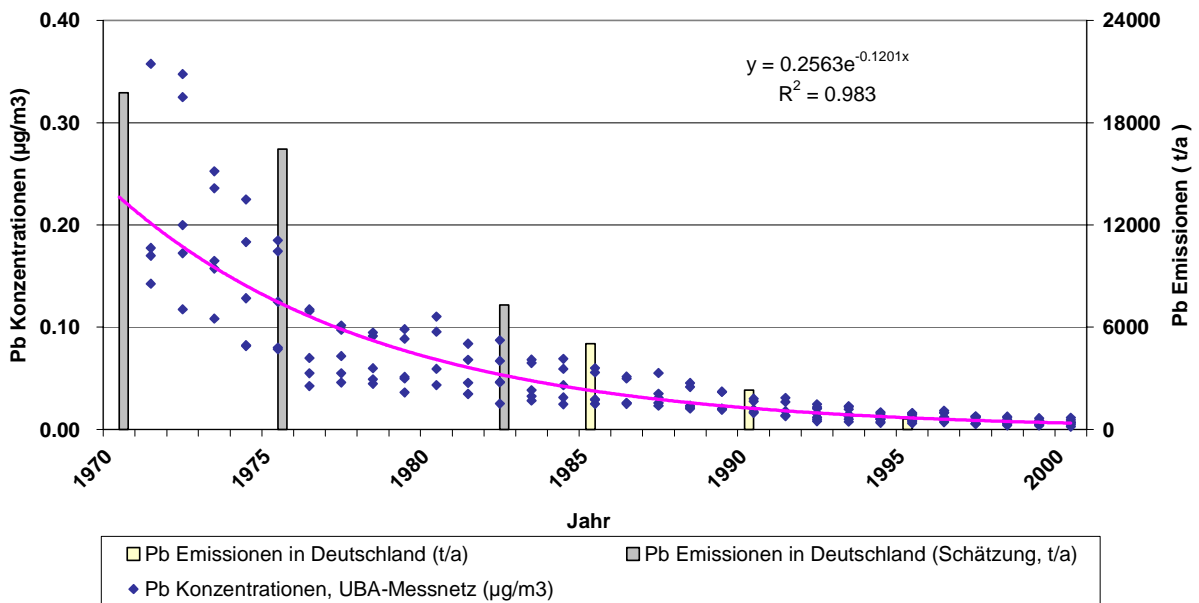


Abbildung 14: Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Blei (1970 – 2000), mittlere Jahreskonzentrationen an den UBA-Stationen und Jahresemissionen in Deutschland

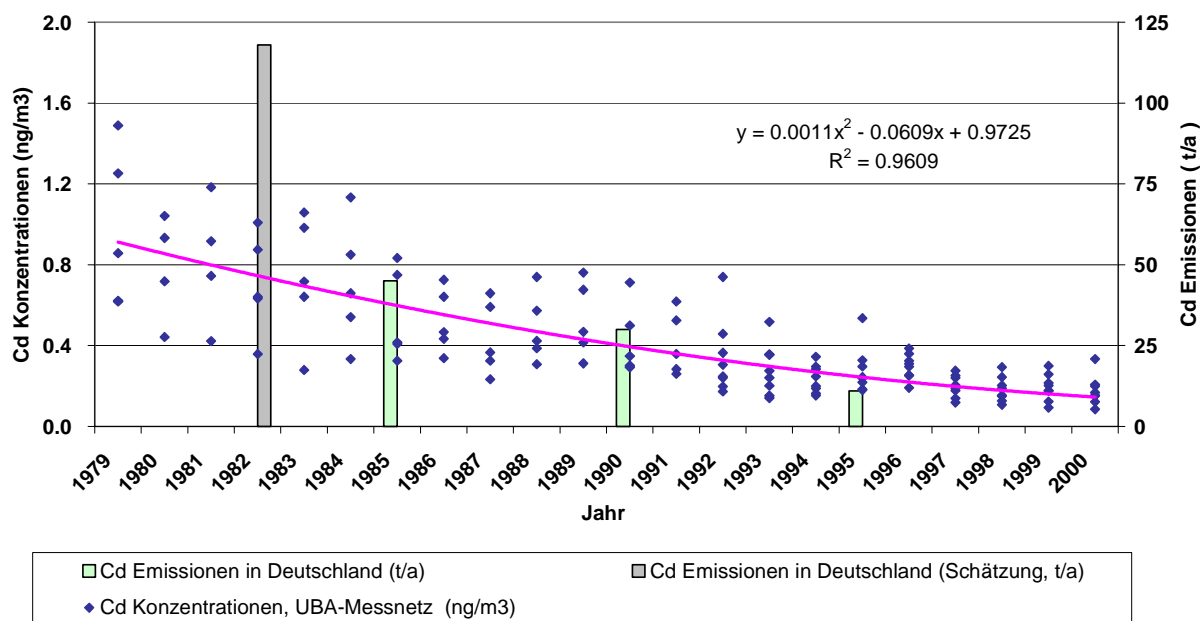


Abbildung 15: Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Cadmium (1979 – 2000), mittlere Jahreskonzentrationen an den UBA-Stationen und Jahresemissionen in Deutschland

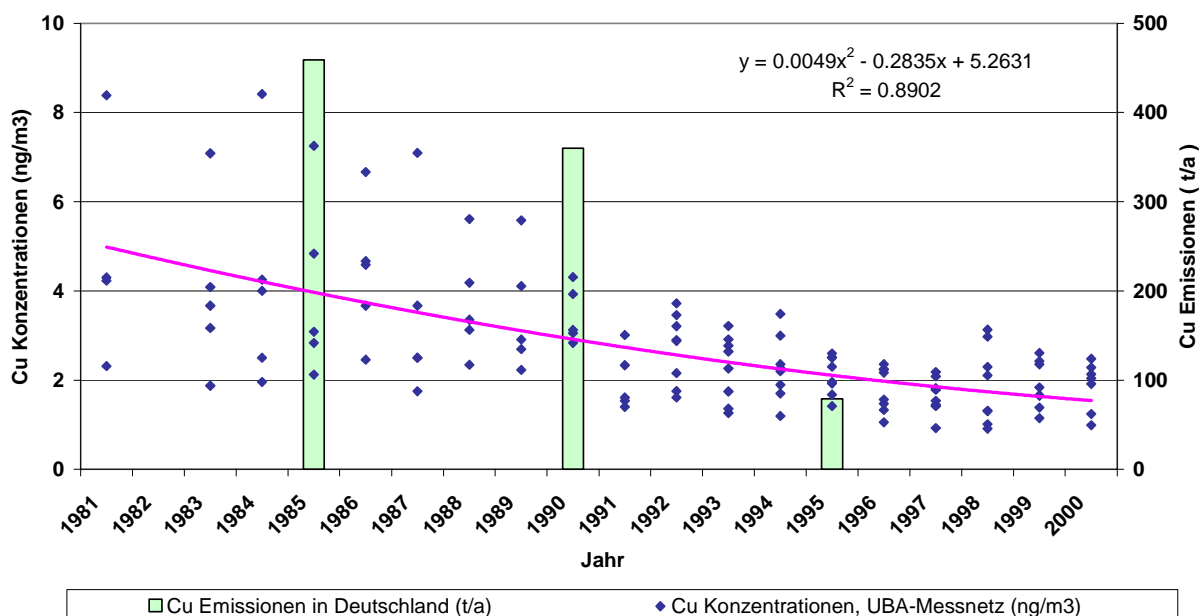


Abbildung 16: Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Kupfer (1981 – 2000), mittlere Jahreskonzentrationen an den UBA-Stationen und Jahresemissionen in Deutschland

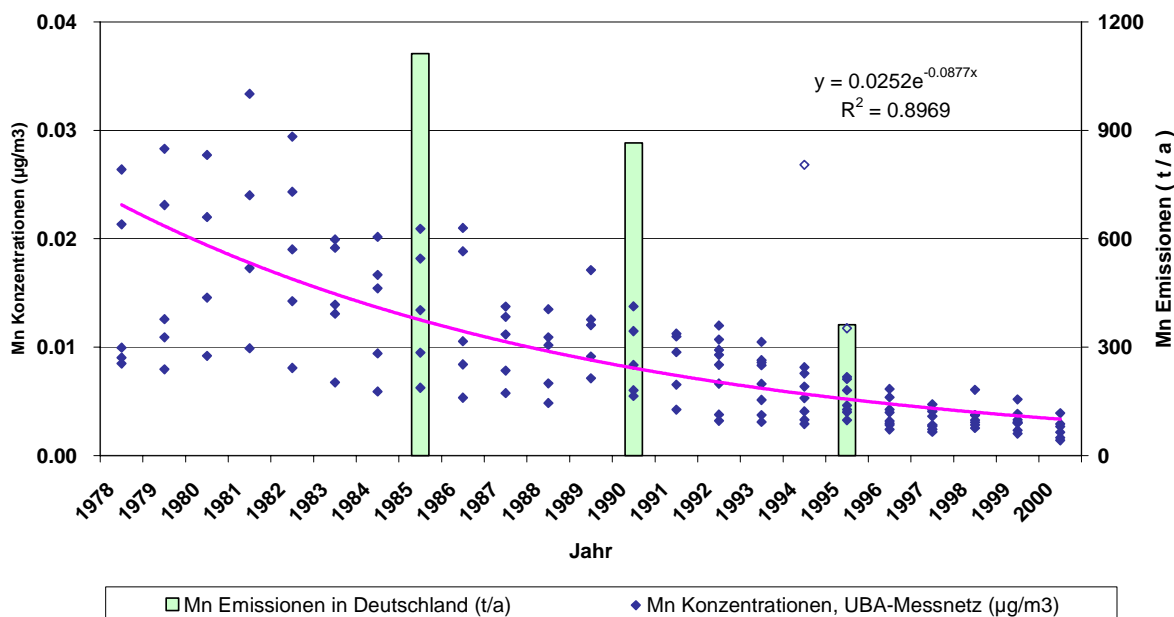


Abbildung 17: Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Mangan (1978 – 2000), mittlere Jahreskonzentrationen an den UBA-Stationen und Jahresemissionen in Deutschland

Die Abbildung 14 und Abbildung 17 zeigen den Abfall der Konzentrationen für partikelgebundenes Blei (1970 – 2000), Cadmium (1979 – 2000), Kupfer (1981 – 2000) und Mangan (1978 – 2000).

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

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

3.1.2.3 Überschreitung von PM₁₀-Grenzwerten im Messnetz des Umweltbundesamtes

In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Anzahl der Überschreitungen der Grenzwerte im Hinblick auf die Anforderungen der 1. EG-Tochterrichtlinie 1999/30/EG für Partikel (PM₁₀) für die 8 personell besetzten UBA-Messstellen von 1970 bis 2001 zusammengestellt. Da von 1970 bis 1998 im Messnetz des UBA Gesamtstaub und erst ab 1999 PM₁₀ gemessen wurden, wurde die Werte vor 1999 mit dem Faktor 0.83 von Gesamtstaub auf PM₁₀ umgerechnet. In den meisten Ländern wird zur Umrechnung ein Faktor zwischen 0.8 und 0.83 verwendet. Der Faktor wird teils durch Parallelmessungen selbst bestimmt, teils werden Literaturdaten verwendet. Der von uns verwendete Faktor von 0.83 beruht auf Parallelmessungen im UBA-Messnetz.

In Tabelle 6 ist die Zahl der Überschreitungen der Tagesmittel vom PM₁₀ >50 µg/m³ für Stufe 1 (bis 35 Überschreitungen pro Jahr und Station (dunkelgrau hinterlegt) ab 2005 zulässig) sowie für Stufe 2 bis 7 Überschreitungen pro Jahr und Station (grau hinterlegt) ab 2010 zulässig) aufgelistet. Die entsprechenden Überschreitungen der Jahresmittel für Stufe 1 (40 µg/m³ ab 2005, dunkelgrau hinterlegt) sowie für Stufe 2 (20 µg/m³ ab 2010, hellgrau hinterlegt) sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Mit Ausnahme der Station Westerland, wo das Seesalz erheblich zu den PM₁₀-Werten beitragen kann, wurden die Tagesmittel von 50 µg/m³ für Stufe 1 seit 1992 an keiner UBA-Station mehr als 35 mal pro Jahr überschritten. In 2001 lagen an 3 von 8 UBA-Stationen die Tagesmittel von 50 µg/m³ noch über Stufe 2 (bis 7 Überschreitungen pro Jahr) (Tabelle 6).

Besser als bei den Tagesmitteln sieht die Situation bei den Jahresmitteln aus (Tabelle 7). Der Grenzwert von 40 µg/m³ (Stufe 1) wurde seit 1986 an keiner der 8 UBA-Stationen mehr erreicht, der verschärfte Grenzwert von 20 µg/m³ (Stufe 2) mit Ausnahme von Westerland ab 1997 auch nicht mehr. Während zukünftige PM₁₀-Jahresmittel die Grenzwerte wahrscheinlich nur noch selten überschreiten werden, wird der 24-Stunden-Grenzwert auch im Jahr 2005 an einzelnen Emissionsschwerpunkten noch deutlich überschritten werden.

Tabelle 6: Anzahl der Tagesmittel von PM₁₀ >50 µg/m³ pro Jahr für die 8 personell besetzten Messstellen des UBA. Die Werte vor 1999 wurden von Gesamtstaub in PM₁₀ umgerechnet. Die fetten kursiven Zahlen (dunkelgrau hinterlegt) überschreiten Stufe 1, die kursiven Zahlen (hellgrau hinterlegt) Stufe 2 der Tochterrichtlinie

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

Tabelle 7: Jahresmittel von PM₁₀ in µg/m³ für die 8 personell besetzten Messstellen des UBA. Die Werte vor 1999 wurden von Gesamtstaub in PM₁₀ umgerechnet. Die fetten kursiven Zahlen (dunkelgrau hinterlegt) überschreiten Stufe 1, die kursiven Zahlen (hellgrau hinterlegt) Stufe 2 der Tochterrichtlinie

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

3.1.3 Herkunft des Feinstaubes

Wie in Kapitel 3.1.2.3 beschrieben, wurden die heutigen EU-Grenzwerte (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7) früher z.T. großflächig überschritten, insbesondere die Tagesmittelwerte (Tabelle 6). Im Falle von Grenzwertüberschreitungen besteht die Auflage, Aktionspläne zu erstellen, die sicherstellen müssen, dass weitere Überschreitungen in Zukunft vermieden werden. Zur Erstellung der Aktionspläne ist es notwendig, die Ursachen, d.h. die Quellen und Transportwege zu identifizieren und zu quantifizieren.

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

Ausgehend von Luftmassen-Trajektorienanalysen sowie von gemessenen mittleren Konzentrationsdifferenzen zwischen Hintergrundstationen im Umfeld von Berlin (z.B. auch die UBA-Messstelle Neuglobsow, ca. 100 km nordöstlich von Berlin), einem innerstädtischen Wohngebiet (innerstädtischer Hintergrund) sowie innerstädtischen Verkehrsmessstellen (Nahquellen) wurden die Beiträge der 3 Quellgruppen großräumige Quellen, Quellen im Ballungsgebiet sowie Nahquellen zu den an einer verkehrsreichen Straße gemessenen PM₁₀-Konzentrationen abgeschätzt.

Tabelle 8: Beiträge verschiedener Quellgruppen zum PM₁₀-Wert an einer verkehrsreichen Straße von 50.3 µg/m³ (*Ref. 16, 17*)

Großräumige Quelle außerhalb von Berlin:	18.6 µg/m ³	ca. 37%
Quellen im Ballungsgebiet Berlin	17.0 µg/m ³	ca. 34%
Quellen im Nahbereich (verkehrsreiche Straße)	14.7 µg/m ³	ca. 29%

Ein Vergleich der Anteile in Tabelle 8 zeigt, dass für Berlin etwa 50% der städtischen Hintergrund-PM₁₀-Konzentrationen und mehr als ein Drittel der an der verkehrsreichen Straße gemessenen PM₁₀-Konzentration durch großräumige Quellen verursacht werden, die außerhalb von Berlin liegen. Eine genauere Quellenzuordnung (z.B. Anteil der deutschen, europäischen und außereuropäischen Quellen) ist aber derzeit noch nicht möglich. Ein nicht unerheblicher Anteil des durch Ferntransport nach Berlin verfrachteten Aerosols scheint sekundäres Aerosol zu sein, das aus NH₃, NO_x, SO₂ und VOC gebildet worden ist. Allerdings ist der Anteil des sekundären Aerosols am Gesamt-PM₁₀-Aerosol ebenfalls noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

Der Anteil des natürlichen (sekundär und primär) Aerosols an der PM₁₀-Masse der städtischen Hintergrundkonzentrationen liegt nach (*Ref. 16*) zwischen 10 und 15%, der Anteil steigt auf ca. 20% beim außerhalb von Berlin gemessenen regionalen Hintergrund.

Eine Bestimmung der verschiedenen Anteile des Staubgehaltes an den UBA-Messstellen aus primären und sekundären natürlichen und anthropogenen Aerosolquellen sowie aus lokalen gegenüber regionalen und überregionalen Quellen aus dem Ferntransport ist ungleich schwieriger als für Städte wie z.B. Berlin, da neben den weitgehend fehlenden Konzentrationsunterschieden gegenüber dem Umland der Messstellen auch wesentliche Parameter, die zu einer solchen Abschätzung erforderlich sind, im Messnetz des UBA nicht gemessen werden. So kann beispielsweise der Anteil der sekundären Aerosolbildung nur dann mit hinreichender Genauigkeit abgeschätzt werden, wenn die Partikelkonzentrationen und die größenabhängige chemische Zusammensetzung in hoher zeitlicher Auflösung (Minuten bis

maximal Stunden) verfolgt werden kann (Ref. 17). Hinzu kommt, dass die Messung einiger dominierender sekundärer Aerosolkomponenten (z.B. Ammoniumnitrat, organische Kohlenstoffverbindungen) wegen der semi-flüchtigen Eigenschaften dieser Stoffe erheblich erschwert ist. (Ref. 17). Eine detaillierte Abschätzung der Beiträge verschiedener Quellen und Quellgruppen für die Stationen im UBA-Messnetz wird deshalb an dieser Stelle nicht versucht.

3.1.4 Literatur

(1) UBA (2000)

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

(2) Remus, R. (2000)

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

(3) Schütz, L. and Seibert, M. (1987)

Mineral aerosols and source identification. Journal Aerosol Science, 18, 1, pp. 1-10

(4) EMEP (1999)

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

(5) Jaenicke, R. (1978)

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

(6) Kuhlbusch, T. (2001)

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

(7) Harrison, R. et al. (1999)

Atm.Env. 33, pp.303 – 321

(8) Wichmann, H.E. (2000)

S.43 – 75 in Ref.1

- (9) BUWAL (2001)
PM₁₀: Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen und Maßnahmen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 29. März 2001, 39 Seiten
- (10) KRdL im VDI und DIN (1999)
VDI Richtlinie 2267, Blatt 1, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4, Beuth-Verlag, Berlin.
- (11) UBA (2000)
Jahresbericht 1999 aus dem Messnetz des UBA, Texte 58/00, S.137 – 152.
- (12) UBA (1997)
Daten zur Umwelt, 1997, Erich – Schmidt Verlag, Berlin.
- (13) Mylona, S. (1999)
EMEP Emission Data Status Report 1999, EMEP/MSC-W Report 1/99.
- (14) Olendrzynski et al. (1996)
Atmospheric emissions and depositions of cadmium, lead and zinc in Europe during the period 1955 – 1987, Env. Reviews, Vol.4, pp.300 – 320, 1996.
- (15) Lenschow, P. und Pesch, M. (2000)
Zuordnung von Immissionen zu Quellen, WaBoLu-Hefte 2/00: Feinstaub – Die Situation in Deutschland nach der EU-Tochterraichtlinie. Bericht über ein Symposium am 26./27. Juni 2000, S. 135 – 150.
- (16) Abraham, H.J. et al. (2000)
Some ideas about sources of PM₁₀, WaBoLu-Hefte 2/2000, Bericht Symposium 26./27. Juni 2000, S. 195 – 203.
- (17) EUROTRAC 2, Annual Report (2000)
Aerosol, Composition and Size Evaluation of the Secondary Aerosol. The complete report can be found at the following website: <http://aerosol.web.psi.ch>