

Reduzierung von Partikelimmissionen – eine gesundheitspolitische Schwerpunktaufgabe

Teil 1: Luftbelastung durch Partikeln und gesundheitliche Auswirkungen

U. Lahl, W. Steven

Zusammenfassung Partikeln, vor allem feine und ultrafeine Partikeln (UFP), die u. a. beim Verbrennen von fossilen Stoffen in Kraftwerken und in Dieselmotoren entstehen, sind in letzter Zeit zunehmend in den Blick der Forschung geraten. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO), die EU-Kommission sowie der National Research Council und die Umweltschutzbehörde der USA stellen den Schwebstaub (Feinstaub) als eines der gegenwärtig vorrangigen umwelt-hygienischen Schwerpunktthemen in Europa und den USA heraus. Auch gibt es Hinweise auf kanzerogene Wirkungen. Schwerpunkt des Beitrags ist die Darstellung eines Maßnahmenpakets der Bundesländer und der Bundesregierung zur Reduzierung der Emission von Gesundheit schädigender Partikeln. Weitreichende Reduzierungen lassen sich nur durch eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen in den Sektoren Verkehr, Industrieanlagen und Kraftwerke, Privathaushalte und Landwirtschaft erreichen. Als Beispiel einer solchen Maßnahme ist der umfassende Einbau von Partikelfiltern in Dieselfahrzeugen zu nennen. Der grenzüberschreitende Ferntransport von Partikeln und insbesondere auch ihrer Vorläuferstoffe, wie Schwefeldioxid und Ammoniak, lässt sich durch internationale Maßnahmen wirkungsvoll vermindern.

Reduction of particulate matter in ambient air – a major political task – Part 1: Air pollution by particles and health-related effects

Abstract Particulate matter, especially fine and ultra fine particulate matter (UFP), which is, e. g., generated during the combustion of fossil fuels in power plants and diesel engines, has recently received increased attention from researchers. The World Health Organization, the European Commission as well as the National Research Council and the United States Environmental Protection Agency (EPA) consider suspended particulate matter (fine particles) to be one of the most important issues in Europe and the US in the field of environmental hygiene. Findings indicate that cancerogenic effects might also be involved. The article focuses on the presentation of a set of measures introduced by the Federal Länder and by the Federal Government to reduce these health damaging particulate emissions. A far reaching reduction can only be achieved by a whole range of measures in the sectors traffic, industrial installations and power plants, private households and agriculture. An example of one of these measures is the extensive fitting of particulate filters in diesel powered vehicles. The transboundary long-range transport of particulate matter and in particular its precursors such as sulfur dioxide and ammonia can be reduced significantly by international measures.

1 Einleitung

Bei der Verringerung der klassischen Staubbelastung hat der Umweltschutz große Erfolge erstritten. Unter dem Stichwort „Blauer Himmel über der Ruhr“ wurden die entsprechenden

Filtertechniken in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum in die relevanten Anlagen eingebaut. Doch die Idylle ist trügerisch. Es geht nicht nur um den sichtbaren Staub, sondern auch um den unsichtbaren, die kleinen und kleinsten Staubpartikeln in der Luft. Im Folgenden soll ein Überblick über die zahlreichen wissenschaftlichen Informationen zum Entstehen der Partikeln, ihrer Emissionsquellen und Wirkungen sowie der politischen Prioritäten und geplanten internationalen und nationalen Maßnahmen zur Problemlösung gegeben werden.

2 Luftbelastung

2.1 Definitionen

In der deutschen Literatur ist die Einteilung und Definition der kleinen und kleinsten Partikeln nicht stringent und z. T. widersprüchlich. Aus diesem Grunde wird auf den Begriff „Feinstaub“ verzichtet. In der englischsprachigen Literatur wird der Begriff „Particulate Matter – PM“ verwendet. Im Folgenden werden die Schwebstaubpartikeln mit Partikeln oder PM bezeichnet. Eine gute Übersicht hat die VDI-Arbeitsgruppe „Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit“ der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN [1] erarbeitet, die die Partikeln in erster Linie über ihre Größe einteilt (s. a. *Wichmann* [2; 3]):

Als **Schwebstaub** bezeichnet man feste oder flüssige Schwebstoffe, die in Gasen suspendiert sind. In dieser Ausarbeitung werden folgende Definitionen verwendet:

– **Schwebstaub** (total suspended particulates, **TSP**) ist die Aerosolkomponente der in der Luft vorhandenen Partikeln bis zu einem oberen aerodynamischen Durchmesser von rund 30 µm (VDI 2465, Bl. 1).

– **Thorakaler Schwebstaub** (thoracic particulates, **PM₁₀**) umfasst Partikeln, die einen in ISO 7708 definierten gröbselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirkung von 50 % aufweist.

– **Alveolengängiger Schwebstaub** (respirable particulates, **PM_{2,5}**) umfasst Partikeln, die einen in ISO 7708 definierten gröbselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist. Er wird auch als Feinstaub (FP) bezeichnet.

– **Ultrafeine Partikeln** (UFP) umfassen Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 0,1 µm.

– **Grobe Partikeln** (coarse particles) sind in der internationalen Literatur Partikeln im Größenbereich von 2,5 bis 10 µm.

Die ultrafeinen Partikeln (UFP) sind eine Teilmenge von PM_{2,5}, diese sind eine Teilmenge von PM₁₀ und diese wiederum eine Teilmenge von TSP. UFP tragen wenig zur Gesamtmasse bei, dafür ist ihre Zahl aber bedeutend. Sie werden

Ministerialdirektor **Dr. Uwe Lahl**, Regierungsdirektor
Dr. Wilhelm Steven,
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit, Bonn.

Quelle		Größe der Partikeln in μm
natürliche Quellen	Bodenerosion	1 bis 150
	Sandstürme	1 bis 150
	Vulkane	0,005 bis 150
	Maritimes Aerosol	1 bis 20
	Waldbrände	0,005 bis 30
	biogene Stäube (Pollen, Schimmelpilze, Milbenexkrementen)	2 bis 50
anthropogene Quellen	stationäre Verbrennung (Heizung, Energieerzeugung)	0,005 bis 2,5
	mobile Verbrennung (Verkehr)	0,005 bis 2,5
	Verhüttung	0,1 bis 30
	industrielle Prozesse (Metallverarbeitung)	0,005 bis 2,5
	Schüttgutumschlag	10 bis 150
	Zigarettenrauch	0,02 bis 10

Tabelle 1. Natürliche und anthropogene Quellen, Größe der Partikeln [6].

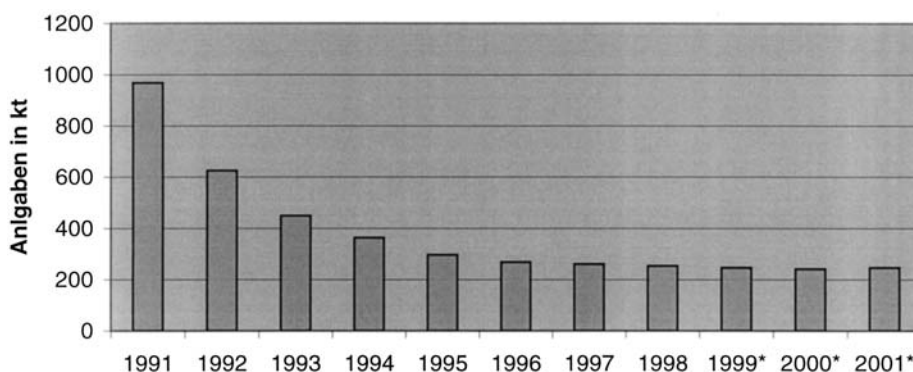


Bild 1. Gesamtstaubemissionen in Deutschland 1990 bis 2001 (berechnet).

* vorläufige Schätzungen

deshalb auch nicht in Masse-Konzentrationen, sondern in Anzahl-Konzentrationen angegeben.

Der Massenanteil von PM_{10} an TSP beträgt i. d. R. etwa 60 % bis 90 %, der von $\text{PM}_{2,5}$ an PM_{10} liegt etwa bei 50 % bis 80 %, woraus sich für $\text{PM}_{2,5}$ ein Anteil von ca. 30 % bis 75 % am TSP ergibt [4].

Hinsichtlich des Entstehens sind Partikeln (PM) Teilchen unterschiedlicher Größe und chemischer Zusammensetzung, die entweder unmittelbar in die Luft emittiert werden (primäre Partikeln) oder aus Vorläufersubstanzen in einer chemischen Reaktion in der Luft entstehen (sekundäre Partikeln). Solche Vorläufersubstanzen sind Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak, flüchtige organische Verbindungen (NMVOC)¹⁾. Sekundäre Partikeln sind i. d. R. sehr klein (UFP). Über das Entstehen und die Entstehungsmechanismen von sekundären Partikeln aus den genannten Vorläufersubstanzen siehe UBA-Jahresbericht 2001 [5].

Primäre Partikeln können aus natürlichen und anthropogenen Quellen stammen. Wie aus **Tabelle 1** ersichtlich, werden aus natürlichen Quellen in erster Linie große Partikeln freigesetzt, aus Verbrennungsvorgängen in erster Linie kleine bis sehr kleine Partikeln (UFP).

Die Partikeln sind nicht statisch, sondern es kommt fortlaufend zu Umwandlungen. Ultrafeine Partikeln können u. a. aufgrund ihrer hohen Eigenbeweglichkeit miteinander koagulieren. Hierdurch kommt es zur Bildung von größeren Teilchen [2].

Ultrafeine Partikeln werden darüber hinaus in Gegenwart

von feinen und groben Partikeln adsorbiert (scavenging effect). Insgesamt hat die Reduktion größerer Partikeln durch Luftreinhaltemaßnahmen dazu geführt, dass der früher sehr effektive „scavenging effect“ heute einen geringeren Einfluss hat. Dadurch ist die Konzentration ultrafeiner Partikeln in der Umwelt relativ gesehen angestiegen, obwohl gegenwärtig die Anzahl der emittierten ultrafeinen Partikeln nicht größer ist [2].

2.2 Partikelemissionen

Im globalen Maßstab überwiegen bei der Emission die natürlichen Quellen. Für die Immissionskonzentrationen in den Industrienationen spielen jedoch die Emissionen aus anthropogenen Quellen wegen ihrer vergleichsweise längeren Verweildauer in der Atmosphäre eine wichtigere Rolle. In der EU und Deutschland fehlen ausreichende Einzel-

Tabelle 2. Emissionen in Deutschland 2001 nach Quellgruppen in kt [6; 7].

Quellgruppe	TSP	PM_{10}
Straßenverkehr	29	29
übriger Verkehr	16	16
Haushalte/Kleinverbraucher	34	33
Schüttgutumschlag	42	8
Industrieprozesse	100	60
Industriefeuerungen	6	6
Kraft- und Fernheizwerke	20	19
Summe	247	171

¹⁾ NMVOC = non methane volatile organic compounds – flüchtige organische Verbindungen mit Ausnahme von Methan.

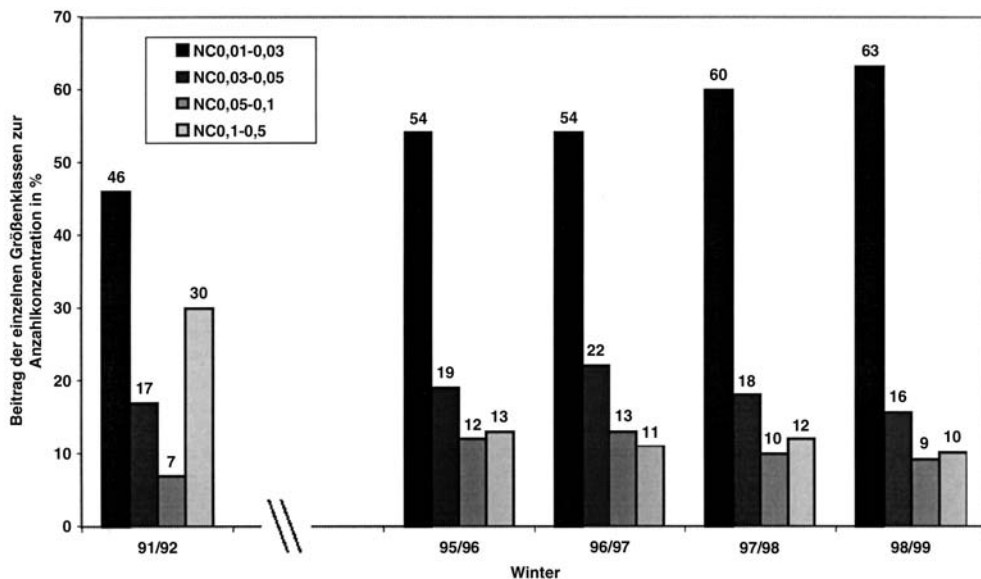


Bild 2. 7-Jahres-Trend der relativen Anzahlkonzentration (in %) – für verschiedene Größenklassen (0,01 bis 0,03, 0,03 bis 0,05, 0,05 bis 0,1, 0,1 bis 0,5 µm) in Erfurt, Winter (Oktober bis März) 1991/92 bis 1998/99. Der Anteil in der kleinsten Größenklasse steigt kontinuierlich an [8].

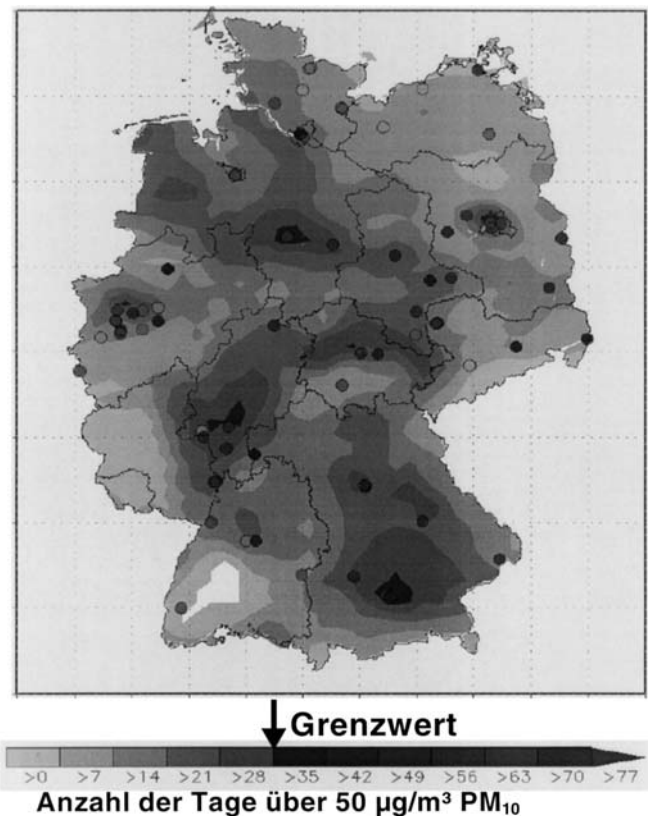


Bild 3. Partikelbelastung mit PM₁₀ im Jahr 2002 (Anzahl der Tage mit PM₁₀-24-Stunden-Mittel über 50 µg/m³). Kreise zeigen Stationen, die nur für ein kleines Gebiet repräsentativ sind (zumeist Verkehrsmessstationen). Die Konzentrationen in der Fläche wurden aus den Daten der übrigen Stationen interpoliert.

Emissionsdaten von PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0} und UFP. In **Bild 1** ist die Entwicklung der Gesamtstaubemission abgebildet. Für 2001 sind die Verursacherbereiche in **Tabelle 2** aufgeführt. Die Gesamtstaubemissionen gingen von 1990 bis 2001 um ca. 87 % zurück. Die deutliche Abnahme zu Beginn der 90er Jahre ist in erster Linie dem Rückgang der Emissionen bei Kraftwerken, Industrie und Hausbrand zuzuschreiben. Dieser abnehmende Trend hat sich in den letzten fünf Jahren nicht fortgesetzt. Im Jahre 2001 haben die Emissionen, besonders aus dem Verkehr, wieder leicht zugenommen. Dies dürfte u. a. auf ein erhöhtes Verkehrsaufkommen, z. B. der Dieselfahrzeuge, zurückzuführen sein [2].

Hinsichtlich der PM₁₀-Emissionen kann von einem ähnlichen Trend wie bei der Gesamtstaubemission ausgegangen werden. Der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) geht davon aus, dass der Straßenverkehr mit ca. 45 bis 65 % an den in Verkehrsnähe auftretenden PM₁₀-Spitzenbelastungen beteiligt ist. In Städten geht ca. ein Drittel der PM₁₀-Masse auf Sekundäraerosole zurück, die aus dem Ferntransport stammen.

In Europa wird von einem Rückgang der PM₁₀-Emissionen von 18 % im Zeitraum zwischen 1990 und 2000 ausgegangen, wobei auch die Emission der Vorläufersubstanzen substanziiell gesunken ist [7].

Betrachtet man hingegen die kleinste Fraktion der ultrafeinen Partikeln im Größenbereich von 0,01 bis 0,03 µm, wird von einer deutlichen Zunahme des prozentualen (aber nicht unbedingt auch des absoluten) Anteils dieser Fraktion an der gesamten Partikelanzahlkonzentration ausgegangen (siehe **Bild 2**).

Stationskategorie	ländlich	städtischer Hintergrund	verkehrsnah	Nähe Schwerindustrie (mit diffusen Quellen)
Jahresmittel in µg/m ³	10 bis 18	20 bis 30	30 bis 45	30 bis 40
Anzahl der Tage mit Tagesmittel > 50 µg/m ³	0 bis 5	5 bis 20	15 bis 100	50 bis 90
Spitzenwerte, Tagesmittel in µg/m ³	50 bis 70	60 bis 100	70 bis 150	100 bis 200

Tabelle 3. Typische Konzentrationsbereiche von PM₁₀ im Jahr 2001 an deutschen Messstationen (zusammengefasst aus den Internetangeboten der Messnetze der deutschen Bundesländer) [1].

Stationskategorie	ländlich	städtischer Hintergrund	verkehrsnahe	industriell beeinflusst
Jahresmittel in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 bis 15	15 bis 20	25 bis 30	15 bis 25
Spitzenwerte, Tagesmittel in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 bis 70	50 bis 70	70 bis 150	50 bis 80

Tabelle 4. Typische Konzentrationsbereiche von $\text{PM}_{2,5}$ im Jahr 2001 an deutschen Messstationen (zusammengefasst aus den Internetangeboten der deutschen Bundesländer) [1].

2.3 Immissionssituation

2.3.1 Immissionsbelastung durch PM_{10}

Die Immissionsbelastung durch PM_{10} in Deutschland wird in **Bild 3** dargestellt. **Tabelle 3** enthält einen Überblick typischer im Jahr 2001 gemessener Konzentrationsbereiche an den genannten Stations- und Gebietskategorien.

Im Jahresmittel steigt die PM_{10} -Belastung vom ländlichen Hintergrund mit zunehmender Nähe zu den Quellen, d. h. an verkehrsnahen und industriell geprägten Messstellen, auf das Doppelte bis Dreifache an. Durch Ferntransporte können auch im ländlichen Raum einige Tagesmittel pro Jahr den Wert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreiten. Die ab 2005 geltenden Grenzwerte der EU für PM_{10} ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel und $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Tagesmittel, wobei 35 Überschreitungen im Jahr zulässig sind, s. u.) werden an Messstellen in typischen urbanen Wohngebieten (städtischer Hintergrund) i. d. R. eingehalten.

Betrachtet man die Immissionsbelastung im Hinblick auf diese Grenzwerte, dann wird der aufs Tagesmittel bezogene Grenzwert an mehr Stationen überschritten als der Jahresgrenzwert. So kam es 2002 an 98 (24 %) der ca. 400 bundesweit kontinuierlich betriebenen PM_{10} -Messstellen zu mehr als 35 Überschreitungen des aufs Tagesmittel bezogenen Grenzwertes. Der Jahresgrenzwert wurde hingegen nur an 10 (2 %) Messstellen nicht eingehalten. Grenzwertüberschreitungen traten vorrangig in Städten und Ballungsräumen auf, in denen lokale Emissionen, zumeist vom Straßenverkehr, zur Hintergrundbelastung hinzukommen. An einigen Brennpunkten wurde der Tagesmittelwert, statt der ab 2005 pro Jahr erlaubten 35 Überschreitungen, sogar an mehr als 100 Tagen überschritten. Großflächige Überschreitungen wurden außer in Ballungsräumen auch in Gebieten registriert, die durch Intensivtierhaltung geprägt sind²⁾.

Daten zur Entwicklung der PM_{10} -Luftbelastung in den 90er Jahren liegen nur für die wenigen Messstellen vor, an denen schon frühzeitig auf eine PM_{10} -Probenahme umgestellt worden war. Dort nahm die Belastung seit Mitte der 90er Jahre bis 2001 langsam ab und stieg im Jahr 2002 wieder an. Diese Zunahme hat sich nach bisherigen Erkenntnissen im Osten Deutschlands auch 2005 fortgesetzt. Auswertungen einiger Länder lassen erkennen, dass der Grund für den Anstieg neben lokalen Ursachen auch in der Hintergrundbelastung liegt. Zudem ist bei der Betrachtung einzelner Jahre die teilweise vom langjährigen Mittel abweichende meteorologische Situation zu beachten.

Insgesamt deutet sich in Deutschland ein Gefälle der PM_{10} -Belastung an, das von den dicht besiedelten Gebieten im Westen und Süden zum Norden und Nordosten mit niedrigeren Werten reicht.

Nach Einschätzung der Länder ist 2005 noch in 70 bis 120 Kommunen mit mehr als 35 Überschreitungen des aufs Tagesmittel bezogenen PM_{10} -Grenzwerts und in ca. 30 Kommunen mit Überschreitungen des PM_{10} -Jahresgrenzwerts zu rechnen, wenn keine zusätzlichen Maßnahmen ergriffen werden.

²⁾ Siehe hierzu auch Bericht zum Workshop „ PM_{10} -Quellenidentifizierung: Ergebnisse als Grundlage für Maßnahmepläne“. Umweltbundesamt 2004.

2.3.2 Immissionsbelastung durch $\text{PM}_{2,5}$ [1; 7]

Die $\text{PM}_{2,5}$ -Immissionsmessungen stützen sich derzeit nur auf knapp 20 Messstationen in Deutschland. Die Angaben in **Tabelle 4** mit typischen Konzentrationsbereichen sind deshalb als orientierende Anhaltswerte zu verstehen. Dies trifft insbesondere auf die Kategorien „verkehrsnahe“ und „industriell beeinflusst“ zu, die auf den Ergebnissen von jeweils nur zwei Messstationen beruhen. Trotzdem können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Bei $\text{PM}_{2,5}$ finden sich zwar prinzipiell ähnliche Konzentrationsabstufungen der Stationskategorien (ländlich bis verkehrsnah) wie bei PM_{10} , die Konzentrationsunterschiede sind jedoch geringer. Dies ist auch plausibel, da der Anteil der sekundären Aerosole (Hintergrundbelastung) bei $\text{PM}_{2,5}$ höher und damit der Anteil lokal erzeugten Aerosols geringer ist als bei PM_{10} .

- Auch bei $\text{PM}_{2,5}$ finden sich Überschreitungen eines Tagesmittels von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, selbst an ländlichen Stationen. An verkehrsnahen Messstellen werden für $\text{PM}_{2,5}$ ähnlich hohe Spitzenwerte (Tagesmittel) wie für PM_{10} gefunden. Es ist allerdings herauszustellen, dass die Häufigkeit der Überschreitungen bei $\text{PM}_{2,5}$ deutlich niedriger liegt.

- In Abhängigkeit von der Stationskategorie beträgt der Anteil von $\text{PM}_{2,5}$ ca. 50 bis 80 % der Masse an PM_{10} . 65 % können als typischer Wert festgestellt werden. Im ländlichen Bereich liegt der Anteil eher höher, an Verkehrsstationen niedriger.

2.3.3 Immissionsbelastung durch ultrafeine Partikeln [1]

Die Immissionsbelastung durch ultrafeine Partikeln wurde bis jetzt in Deutschland nur an wenigen Stellen erfasst. In Erfurt wurden im Winter 1991/92 und in den Winterhalbjahren seit September 1995 kontinuierlich größenabhängige Partikelkonzentrationen im Rahmen von verschiedenen epidemiologischen Studien gemessen [9]. Vergleichbare Messungen wurden auch in Sachsen-Anhalt im Raum Bitterfeld, Hettstedt und Zerbst im ersten Halbjahr des Jahres 1995 und 1999 durchgeführt [10].

Für den Zeitraum September 1995 bis Dezember 1998 ergeben sich für Erfurt mittlere Anzahlkonzentrationen von $1,6 \cdot 10^4$ Partikeln/ cm^3 [9]. Bei Messungen der Außenluftpartikeln zeigte sich eine starke saisonale Variation mit der höchsten Konzentration im Winter und ein ausgeprägter Tagesgang mit einem deutlichen Maximum während der verkehrreichen Stunden [1, mit zahlreichen weiteren Daten].

2.3.4 Trends der PM_{10} -, $\text{PM}_{2,5}$ - und UFP-Belastung [1]

Die wenigen Stationen mit längeren Zeitreihen weisen mehr oder weniger deutliche Abnahmen der PM_{10} - und $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentrationen auf. Die Partikelanzahl der UFP (0,01 bis 0,10 μm) scheint an den betreffenden Messstationen ungefähr konstant zu bleiben. Betrachtet man hingegen die kleinste Fraktion der UFP (0,01 bis 0,03 μm), fällt eine deutliche Zunahme des prozentualen Anteils dieser Fraktion an der gesamten Partikelanzahlkonzentration auf [1, mit zahlreichen weiteren Literaturziten].

3 Gesundheitliche Auswirkungen von Partikeln

Die Frage, inwieweit PM eine Gefahr darstellen bzw. aus Vorsorgegründen von Bedeutung sind, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Neben der Konzentration der PM in der Luft spielen die chemische Zusammensetzung, die Beladung der Oberfläche der PM mit wirksamen chemischen Substanzen, wie Schwermetalle oder polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), und vor allem die Größe der Partikeln eine Rolle.

3.1 Abhängigkeit der Wirksamkeit von der Partikelgröße [4]

Die Partikeln stellen ein Konglomerat von festen und flüssigen Bestandteilen dar, die in der Luft suspendiert sind. Diese Partikeln unterscheiden sich in Größe, Zusammensetzung und Entstehung. Wie unter Abschn. 2.1 beschrieben, werden die PM über ihre Größe (aerodynamischer Durchmesser) klassifiziert, da diese auch über ihre gesundheitliche Wirkung wesentlich mitentscheidet.

Je gröber die Partikeln desto weiter oben werden sie im Atemtrakt abgefangen. Partikeln über 10 µm können kaum den Kehlkopf passieren, von den kleineren Partikeln (thorakale Fraktion⁴⁾) können fast nur diejenigen, die kleiner als etwa 2 bis 3 µm sind, bis in den Alveolenbereich vordringen. Die Depositionswahrscheinlichkeit in den Atemwegen hängt ebenfalls von der Partikelgröße ab. In einem Größenbereich um 0,5 µm ist die Depositionswahrscheinlichkeit aus physikalischen Gründen am geringsten (siehe Bild 4). Wenn man voraussetzt, dass nur dort eine Partikelwirkung auftritt, wo in nennenswertem Umfang eine lokale Deposition stattfindet, so scheiden dafür Partikeln über 10 µm (außer im Nasen-Rachen-Raum) weitgehend aus. Für Wirkungen, die im Tracheobronchialbereich ausgelöst werden (z. B. Husten), kommen primär Partikeln des Intermodal- und des Akkumulationsmodus als die „wirksame“ Fraktion infrage, für Veränderungen im Alveolarbereich hauptsächlich Partikeln < 2,5 µm.

Bei unlöslichen oder schwer löslichen Partikeln stellt die Oberfläche der Partikeln die Schnittstelle zu Zellen, Geweben und Lungenflüssigkeiten dar. Da die Oberfläche der großen Zahl ultrafeiner Partikeln bei gleicher Massenkonzentration viel größer ist als diejenige der relativ wenigen feinen Partikeln, ist die Wahrscheinlichkeit, dass unlösliche ultrafeine Partikeln adverse Gesundheitseffekte hervorrufen können, größer als die Wahrscheinlichkeit für unlösliche feine Partikeln. Effekte ultrafeiner Partikeln sollten von der Anzahl und der Oberfläche der Partikeln abhängen. Sie können als Träger für toxische Substanzen dienen und sind in der Lage, das Alveolarepithel und das Lungeninterstitium zu erreichen und auch nach einiger Zeit systemisch zu wirken. Aufgrund der Korngrößenverteilung ist zu erwarten, dass geogener Staub unter gesundheitlichen Gesichtspunkten weniger problematisch ist als anthropogener Staub. Die wenigen vorhandenen Untersuchungen zu diesem Thema scheinen diese Annahme zu bestätigen [11].

3.2 Epidemiologische Studien

In den letzten Jahren wurde eine große Anzahl von epidemiologischen Studien zur Wirkung von Partikeln auf die menschliche Gesundheit durchgeführt [1, zusammenfassende Darstellung der Studien mit zahlreichen weiteren Literaturstellen]. Ohne im Einzelnen auf die jeweiligen Untersuchungen einzugehen, kann zusammenfassend fest-

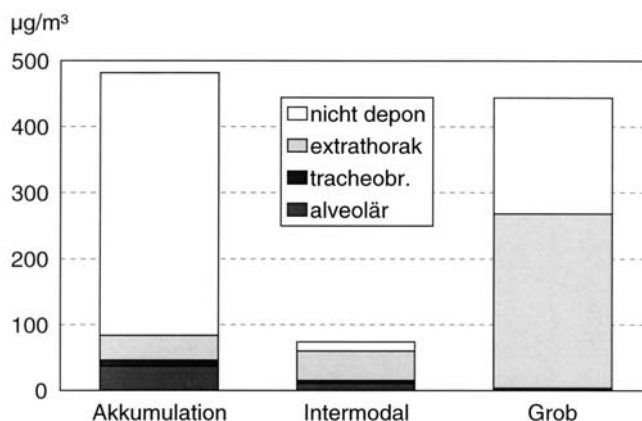


Bild 4. Inhalierter und deponierter Staubmasse, aufgeschlüsselt nach Verteilungsmodus in der Außenluft und Depositionsort in den Atemwegen [4].

gestellt werden: Große Kohortenstudien ergaben eindeutige Assoziationen zwischen verschiedenen Gesundheitsfaktoren (Gesamtmortalität, Mortalität durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Atemwegserkrankungen, bei Lungenkrebs zeichnet sich ebenfalls ein Zusammenhang ab) und PM₁₀ und PM_{2,5}, wobei die Assoziation mit den feinen Partikeln stärker war als mit den gröbereren Partikeln. Zeitreihenuntersuchungen zeigten ebenfalls signifikante Assoziationen zwischen der Partikelexposition einerseits und der Mortalität und der Morbidität der Bevölkerung andererseits.

Die epidemiologischen Studien zeigen einen Anstieg der Mortalität und der Morbidität insbesondere bei alten Menschen und bei Personen mit Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen.

In den epidemiologischen Studien konnte keine Wirkungsschwelle festgestellt werden. Dies wird damit erklärt, dass es in einer großen Population immer einige Individuen gibt, die auch auf sehr niedrige PM-Konzentrationen reagieren. Interventionsstudien zeigen darüber hinaus, dass eine Reduktion der PM-Konzentrationen einen positiven Effekt auf die menschliche Gesundheit hat [1]. Zwei Beispiele sollen hier dargestellt werden⁵⁾:

Während der olympischen Sommerspiele 1996 in Atlanta wurde der Einfluss von Verkehrsbeschränkungen auf kindliches Asthma untersucht. Der Rückgang war teilweise signifikant. Hieraus ergibt sich, dass die zeitweise Verbesserung der Luftqualität in Atlanta im Sommer 1996 zu einem zeitweisen Rückgang der Schwere bei bestehendem Asthma geführt hat.

In der Children's Health Study in Süd-Kalifornien wurde der Einfluss einer veränderten Luftschadstoffbelastung auf die longitudinale Zunahme der Lungenfunktion untersucht [12]. Bei Kindern, die aus dem Studiengebiet weggezogen waren, wurden im Follow-up Lungenfunktionstests durchgeführt und mit früheren Lungenfunktionstests aus der Zeit verglichen, als die Kinder im Studiengebiet wohnten. Der Umzug in eine Gemeinde mit niedrigerer PM₁₀-Konzentration war mit einem Anstieg der Wachstumsrate der Lungenfunktion assoziiert, das Wegziehen in eine Gemeinde mit höherer PM₁₀-Konzentration mit einem reduzierten Wachstum. Entsprechende Zusammenhänge mit Konzentrationen von NO₂ und O₃ waren schwächer.

Epidemiologische Studien deuten weiter darauf hin, dass es

3) Weitere Beispiele siehe [1].

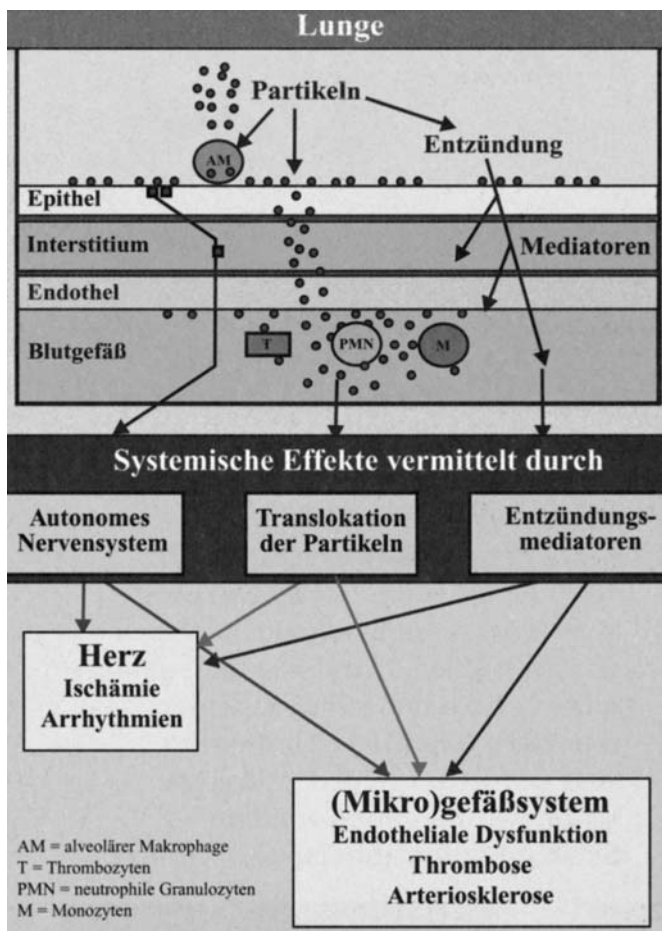


Bild 5. Schädigungsmodell mit drei möglichen Wegen.

eine Beziehung zwischen bestimmten Emissionsquellen, vor allem Automotoren und Kohlekraftwerken, und Gesundheitsbeeinträchtigungen gibt [7].

Das Bundesumweltministerium hat auf der Basis der vorhandenen epidemiologischen Erkenntnisse eine Abschätzung darüber durchführen lassen, welche positiven gesundheitlichen Auswirkungen durch den großflächigen Einsatz von Partikelfiltern in Diesel-Pkw zu erwarten sind [2]. Hieraus ergibt sich unter konservativen Annahmen theoretisch ein Minderungspotenzial durch Partikelfilter in Dieselfahrzeugen von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2,5}$. Die mittlere Immissionskonzentration in Deutschland würde damit von 15 auf $12 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{2,5}$ fallen.

Die Studie kommt zu folgenden Ergebnissen: Das Vermeidungspotenzial durch die Verwendung von Partikelfiltern in Dieselfahrzeugen in Deutschland beträgt im Hinblick auf die Gesamtsterblichkeit (gerundet) 1 bis 2 %. Dies entspricht einer Vermeidung von 10 000 bis 19 000 Todesfällen pro Jahr oder einer Verlängerung der rechnerischen Lebenserwartung der Gesamtbevölkerung um ein bis drei Monate.

3.3 Toxikologische Untersuchungen

In den letzten zehn Jahren wurde eine große Zahl von toxikologischen In-vivo- und In-vitro-Untersuchungen zum Thema PM publiziert. Eine ausführliche Übersicht findet sich in [13].

In Anbetracht der unbestreitbaren Evidenz der epidemiologischen Untersuchungen wurden toxikologische Untersuchungen hauptsächlich mit folgenden Zielrichtungen

durchgeführt:

- die biologische Plausibilität der statistischen Assoziationen zu belegen,
- die für die gesundheitlichen Wirkungen verantwortlichen Staubkomponenten zu ermitteln,
- den Wirkungsmechanismus und eine Dosis-Wirkungs-Beziehung für die verantwortlichen Staubkomponenten zu analysieren.

Die toxikologischen Studien ergaben u. a. folgende Ergebnisse:

- Die chemische Zusammensetzung der Partikeln scheint die Toxizität stark zu beeinflussen (organische Bestandteile, Metalle).
- Einige Staubbestandteile (z. B. Ölflugasche mit unterschiedlichen Gehalten an Übergangsmetallen) sind toxischer als andere.
- Bisher gibt es keine Klarheit, ob Metallverbindungen die hauptsächliche Ursache für die gesundheitlichen Auswirkungen von Partikeln sind.
- Zahlreiche Studien belegen die systemische (kardiovaskuläre) Toxizität von Partikeln.
- UFP zeigen im Tierversuch eine größere Wirkung als feine Partikeln.
- Mechanismen, die zu einer erhöhten Toxizität der UFP beitragen, sind noch nicht geklärt [1, mit einigen potenziellen Mechanismen].

Die bisher durchgeführten tierexperimentellen Untersuchungen zeigen, dass Wirkungen nach akuter Exposition nicht an gesunden erwachsenen Tieren, sondern meist erst bei älteren und bei vorgeschädigten Tieren zu beobachten waren. Insgesamt muss allerdings festgestellt werden, dass die toxikologischen Untersuchungen bisher noch kein abschließendes Bild ergeben [13].

3.4 Schädigungsmodell

Ein Erklärungsmodell [14] geht davon aus, dass vorwiegend ultrafeine Partikeln, die im Alveolarbereich Kontakt mit den Pneumocyten haben, dort zur Bildung freier Radikale beitragen, die entzündliche Veränderungen auslösen. Dieses entzündliche Geschehen beeinflusst einerseits Atemwegserkrankungen und führt andererseits zu einer Freisetzung von Mediatoren aus Leukozyten und Makrophagen, die einen Anstieg der Blutkoagulabilität und dadurch der Plasmaviskosität bewirken. Sowohl die Atemwegsbeeinträchtigung als auch die erhöhte Plasmaviskosität führen zu einer erhöhten Herz-Kreislauf-Belastung, woraus sich eine erhöhte Mortalität ergeben würde. Erhöhungen der Plasmaviskosität im Zusammenhang mit erhöhten Partikelkonzentrationen konnten in Smogepisoden [15] nachgewiesen werden. Ob Erhöhungen der Herzfrequenz, die ebenfalls in epidemiologischen Untersuchungen [16; 17] demonstriert werden konnten, über eine erhöhte Plasmaviskosität oder eine Beeinflussung des vegetativen Nervensystems zustande kommen, ist noch unklar. Für letzteres könnte sprechen, dass auch eine Einschränkung der Herzfrequenz-Variabilität beobachtet wurde [18; 19].

Eine Untersuchung des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit zeigt drei mögliche Wege auf, wie UFP, die von den Fresszellen wegen ihrer geringen Größe (kleiner als 100 nm) nur schlecht erkannt werden, den Organismus schädigen [20] (Bild 5):

- Sie beeinflussen das vegetative Nervensystem über Rezep-

toren (links).

- Sie können direkt durch die dünnen Häutchen der Lungenbläschen in die Blutbahn eindringen und von hier aus zu jedem Organ gelangen (Mitte).

- UFP können über Mediatoren das Lungengewebe entzünden und so Herz und Gefäße beeinträchtigen (rechts).

Mögliche Folgen sind Herzrhythmusstörungen, Ischämie, endotheliale Dysfunktion, Thrombose und Arteriosklerose.

3.5 Handlungsbedarf

Die WHO hat in einer früheren Veröffentlichung [21] festgestellt, dass es einen kausalen Zusammenhang zwischen der Immission von PM und Gesundheitsbeeinträchtigungen gibt, wobei es noch nicht möglich ist, diese Krankheitseffekte einer bestimmten PM-Fraktion zuzuordnen.

In ihrer Antwort auf zwölf Fragen der Europäischen Kommission im Rahmen des CAFE-Programms [7] hebt die WHO in diesem Jahr hervor, dass eine große Anzahl von Untersuchungen [1; 2] einen starken Zusammenhang zwischen PM-Immissionen und Gesundheitsbeeinträchtigungen (vor allem kardiovaskuläre Effekte) festgestellt hat. Danach sind PM_{2,5}-Immissionen stark mit den Endpunkten für Tod und Herz-Lungen-Krankheiten verbunden.

Folgende Krankheitssymptome bzw. Krankheiten werden daher den PM zugeordnet:

- Husten,

- chronischer Husten,

- Bronchitis,

- Herz-Lungen-Probleme (kardiovaskuläre Effekte),

- Beeinträchtigung der Lungenfunktionsmesswerte (vor allem bei Kindern),

- Lungenkrebs sowie

- Verkürzung der Lebenserwartung.

Auch wenn noch eine ganze Reihe von Fragen offen ist, wie z. B. die Darstellung von Wirkungsmechanismen und die Zuordnung von Effekten einer bestimmten PM-Fraktion, so zeigen die durchgeführten epidemiologischen Studien doch, dass die PM-Konzentration in der Umgebungsluft mit Gesundheitseffekten assoziiert ist [1, mit zahlreichen weiteren Literaturzitate]. Nach den vorliegenden Untersuchungen bewirkt die vorherrschende PM-Konzentration eine Verkürzung der durchschnittlichen Lebenserwartung von einigen Monaten durch Herz-Lungen-Krankheiten und möglicherweise auch durch Lungenkrebs.

Die WHO, die EU-Kommission sowie der National Research Council und die EPA der USA stellen daher die Wirkung von Partikeln auf die menschliche Gesundheit als eines der gegenwärtig vorrangigen umwelthygienischen Schwerpunktthemen heraus.

Literatur

- [1] Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zur gesundheitlichen Wirkung von Partikeln in der Luft. Hrsg.: Arbeitsgruppe „Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit“ der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Juli 2003.
- [2] Wichmann, E.: Abschätzung positiver Auswirkungen durch den Einsatz von Partikelfiltern in Dieselfahrzeugen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juni 2003. www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/index.htm#diesel.
- [3] Wichmann, E.: Positive und gesundheitliche Auswirkungen des Einsatzes von Partikelfiltern bei Dieselfahrzeugen – Risikoabschätzung für die Mortalität in Deutschland. *Umwelt Forsch. Prax.* 9 (2004) Nr. 2, S. 85-99.
- [4] Englert, N.: Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit – Welche Partikel-Eigenschaften korrelieren mit der Wirkung? In: *Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität*. VDI-Berichte 1656, S. 91-100. Düsseldorf: VDI 2002.
- [5] UBA-Jahresbericht 2001. Texte 69/02, S. 77-84, 111-113, 169-173. Hrsg.: Umweltbundesamt. Berlin 2002.
- [6] Daten Umweltbundesamt 2004.
- [7] CAFE Working Group on Particulate Matter, Second Position Paper on Particulate Matter. CAFE-Report 2003.
- [8] Wichmann, H. E.; Peters, A.: Epidemiological evidence of the effects of ultrafine particle exposure. *Phil. Trans. R. Soc. London A* 358 (2000), S. 2751-2769.
- [9] Kreyling, W. G.; Tuch, T.; Peters, A.; Pitz, M.; Heinrich, J.; Stötzl, M.; Cyrys, J.; Heyder, J.; Wichmann, H. E.: Diverging long-term trends in ambient urban particle 49 mass and number concentrations associated with emission changes caused by the German unification. *Atm. Environm.* (im Druck).
- [10] Pitz, M.; Kreyling, W. G.; Hölscher, B.; Cyrys, J.; Wichmann, H. E.; Heinrich, J.: Change of the ambient particle size distribution in East Germany between 1993 and 1999. *Atm. Environm.* 35 (2002), S. 4357-4366.
- [11] Diesel Exhaust: A Critical Analysis of Emissions, Exposure, and Health Effects. Hrsg.: Health Effects Institute, Cambridge, MA, USA, 1995.
- [12] Avol, E. L.; Gauderman, W. J.; Tan, S. M.; London, S. J.; Peters, J. M.: Respiratory effects of relocating to areas of differing air pollution levels. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 164 (2001), S. 2067-2072.
- [13] Health effects assessment of diesel engine exhaust. Hrsg.: United States Environmental Protection Agency, Washington, D. C. 2002.
- [14] Seaton, A.; MacNee, W.; Donaldson, K.; Godden, D.: Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet* 345 (1995), S. 176-178.
- [15] Peters, A.; Döring, A.; Wichmann, H. E.; Koenig, W.: Increased plasma viscosity during an air pollution episode: a link to mortality? *Lancet* 349 (1997), S. 1582-1587.
- [16] Peters, A.; Perz, S.; Döring, A.; Stieber, J.; Koenig, W.; Wichmann, H. E.: Increased heart rate during an air pollution episode. *Am. J. Epidemiol.* 150 (1999), S. 1094-1098.
- [17] Pope, C. A.; Thun, M. J.; Namboodiri, M. M.; Dockery, D. W.; Evans, J. S.; Speizer, F. E. Jr.; Heath, C. W. Jr.: Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 151 (1995), S. 669-674.
- [18] Godleski, J. J.; Lovett, E. G.; Reinisch, U.; Murthy, G. G. K.; Killingsworth, C.; Catalano, P. J.; Coull, B.; Koutrakis, P.; Wolfson, J. M.; Verrier, R. L.: Assessment of ambient particle toxicity in canines (abstract). The 14th Health Effects Institute Annual Conference. Boston, Massachusetts 1998.
- [19] Shy, C.; Creason, J.; Williams, R.; Liao, D.; Zweidinger, R.; Watts, R.; Devlin, R.; Hazucha, M.; Nestor, J.: Physiological responses of elderly persons to particulate air pollution (abstract). The 14th Health Effects Institute Annual Conference. Boston, Massachusetts 1998.
- [20] www.gsf.de/Aktuelles/mensch+umwelt/index.phtml
- [21] WHO Air Quality Guidelines for Europe. Second edition. WHO Regional Publications, European Series, No. 91. Kopenhagen 2000.

Reduzierung von Partikelimmissionen – eine gesundheitspolitische Schwerpunktaufgabe

Teil 2: Maßnahmenprogramm zur Reduzierung der Emissionen von Partikeln

U. Lahl, W. Steven

Zusammenfassung Partikeln, vor allem feine und ultrafeine Partikeln (UFP), die u. a. beim Verbrennen von fossilen Stoffen in Kraftwerken und in Dieselmotoren entstehen, sind in letzter Zeit zunehmend in den Blick der Forschung geraten. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO), die EU-Kommission sowie der National Research Council und die Umweltschutzbehörde der USA stellen den Schwebstaub (Feinstaub) als eines der gegenwärtig vorrangigen umwelt-hygienischen Schwerpunktthemen in Europa und den USA heraus. Auch gibt es Hinweise auf kanzerogene Wirkungen. Schwerpunkt des Beitrags ist die Darstellung eines Maßnahmenpakets der Bundesländer und der Bundesregierung zur Reduzierung der Emission von Gesundheit schädigender Partikeln. Weitreichende Reduzierungen lassen sich nur durch eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen in den Sektoren Verkehr, Industrieanlagen und Kraftwerke, Privathaushalte und Landwirtschaft erreichen. Als Beispiel einer solchen Maßnahme ist der umfassende Einbau von Partikelfiltern in Dieselfahrzeugen zu nennen. Der grenzüberschreitende Ferntransport von Partikeln und insbesondere auch ihrer Vorläuferstoffe, wie Schwefeldioxid und Ammoniak, lässt sich nur durch internationale Maßnahmen wirkungsvoll vermindern.

Reduction of particulate matter in ambient air – a major political task – Part 2: Programme for the reduction of particulate emissions

Abstract Particulate matter, especially fine and ultra fine particulate matter (UFP), which is, e. g., generated during the combustion of fossil fuels in power plants and diesel engines, has recently received increased attention from researchers. The World Health Organization, the European Commission as well as the National Research Council and the United States Environmental Protection Agency (EPA) consider suspended particulate matter (fine particles) to be one of the most important issues in Europe and the US in the field of environmental hygiene. Findings indicate that cancerogenic effects might also be involved. The article focuses on the presentation of a set of measures introduced by the Federal Länder and by the Federal Government to reduce these health damaging particulate emissions. A far reaching reduction can only be achieved by a whole range of measures in the sectors traffic, industrial installations and power plants, private households and agriculture. An example of one of these measures is the extensive fitting of particulate filters in diesel powered vehicles. The transboundary long-range transport of particulate matter and in particular its precursors such as sulfur dioxide and ammonia can only be reduced significantly by international measures.

4 Maßnahmenprogramme zur Reduzierung der Emissionen

In Deutschland wurden in den letzten Jahren die Voraussetzungen dafür geschaffen, die Partikelbelastung auf ein gesundheitspolitisch akzeptableres Niveau zu senken.

Ministerialdirektor **Dr. Uwe Lahl**, Regierungsdirektor
Dr. Wilhelm Steven,
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit, Bonn.

4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

In der EU basiert das System der Luftreinhalte-Gesetzgebung in erster Linie auf der EU-Rahmenrichtlinie über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität und den hierzu erlassenen Tochterrichtlinien sowie der NEC-Richtlinie¹⁾. Die EU-Gesetzgebung und die Rechtsprechung des Europäischen Gerichtshofs (EuGH) haben auch in Deutschland einen Paradigmenwechsel im Recht der Luftreinhaltung hervorgerufen. Während in früheren Jahren in Deutschland eine eher emissionsbezogene Betrachtungsweise vorherrschte (Großfeuerungsanlagenverordnung, TA Luft etc.), verlangt die EU-Gesetzgebung nunmehr eine zusätzlich immissionsbezogene Betrachtungsweise. Dieser Paradigmenwechsel schlägt sich in der 7. Novelle des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) und in der 22. BImSchV (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft) nieder (s. a. **Kasten**, S. 582).

Die festgeschriebenen Immissionsgrenzwerte (1. Tochterrichtlinie/22. BImSchV) oder Höchstmengen (NEC-Richtlinie/33. BImSchV) müssen bis zum Jahr 2005 bzw. 2010 eingehalten werden. Werden diese Grenzwerte mit bestimmten Toleranzmargen heute nicht eingehalten, müssen die Länder Luftreinhaltepläne mit Maßnahmen zur fristgerechten Einhaltung der Grenzwerte vorlegen. Die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte, die zum Schutz der menschlichen Gesundheit erlassen worden sind, ist für den Bürger einklagbar.

Die Immissionsgrenzwerte der 22. BImSchV sind auch als Immissionswerte in die TA Luft übernommen worden. Die TA Luft beschreibt ein Verfahren, wie diese Immissionswerte bei Anlagengenehmigungen zu berücksichtigen sind. Danach können Genehmigungen von Anlagen grundsätzlich nur erteilt werden, wenn die Einhaltung der in der 22. BImSchV normierten Grenzwerte im Einwirkungsbereich der Anlagen sichergestellt werden kann.

Bei den Maßnahmen zur Reduzierung von PM, die auf dem o. g. Rechtssystem basieren, ist zu differenzieren zwischen

- Maßnahmen, die die Emissionen von PM direkt reduzieren (auf der Basis der 22. BImSchV), und
- Maßnahmen, die die Vorläuferstoffe für die Sekundärbildung von Partikeln reduzieren (auf der Basis der 33. BImSchV und der 22. BImSchV).

Nur durch das Zusammenwirken beider Rechtsinstrumente wird die Belastung mit PM auf Dauer wirksam reduziert werden können.

In der 22. BImSchV werden die in **Tabelle 5** genannten Grenzwerte für PM₁₀ für das Jahr 2005 festgelegt²⁾.

¹⁾ Richtlinie 2001/81/EG über nationale Emissionshöchstgrenzen für bestimmte Luftschadstoffe. Nach der englischen Bezeichnung „national emission ceilings“ ist sie auch als „NEC-Richtlinie“ bekannt. Sie legt für die einzelnen Mitgliedsstaaten verbindliche nationale Emissionshöchstgrenzen ab dem Jahr 2010 fest.

²⁾ Die in der ersten Tochterrichtlinie enthaltenen Werte für das Jahr 2010 sind Richtgrenzwerte, die noch einer weiteren Überprüfung unterzogen werden müssen.

<p>EU-Richtlinien (Beispiele):</p> <p>1. Luftqualitätsregelungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Luftqualitätsrahmenrichtlinie einschl. der Tochterrichtlinien <p>2. Höchstmengenregelungen für Mitgliedstaaten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • NEC-Richtlinie <p>3. Regelungen für Anlagen und Verkehr:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Großfeuerungsanlagenrichtlinie • VOC-Richtlinie • Abgasrichtlinien Lkw, Pkw, Motorrad <p>4. Produktregelungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Treibstoffqualitätsrichtlinie 	<ul style="list-style-type: none"> • UN-ECE-Protokolle Reduzierung großräumiger europäischer Schadstofftransporte (Ferntransporte) durch Vereinbarung nationaler Emissionshöchstmengen
<p>Nationale Regelungen und Maßnahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Überwachung und Verbesserung der Luftqualität, Luftreinhalteplanung <ul style="list-style-type: none"> ◦ §§ 44 ff BImSchG • Immissionsgrenzwerte/Luftreinhaltepläne und Aktionspläne <ul style="list-style-type: none"> ◦ 22. BImSchV (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft) • Nationale Höchstgrenzen <ul style="list-style-type: none"> ◦ 33. BImSchV (Verordnung zu nationalen Höchstmengen) • Sektorale Maßnahmen <ul style="list-style-type: none"> ◦ Sektor Verkehr (Eurostandard, steuerliche Anreize) ◦ Sektor Industrieanlagen – Emissionsgrenzwerte (13., 17., 31. BImSchV, TA Luft) ◦ Sektor Produkte (10. BImSchV) ◦ Haushalt (1. BImSchV) 	

Tabelle 5. PM₁₀-Grenzwerte der 22. BImSchV³⁾.

Stoff	Art des Grenzwerts	Grenzwert in µg/m ³	Erlaubte Überschreitungen	Zeitpunkt der Einhaltung
PM ₁₀	24-Stunden	50	35 Tage/Jahr	2005
	1-Jahres	40	–	2005

³⁾ Diese Grenzwerte werden im Licht der Erkenntnis des fehlenden Schwellenwerts, der neuen Ergebnisse zu Gesundheitsbeeinträchtigungen und der Hinweise der besonderen Gefahren durch PM_{2,5} und UFP in der EU zurzeit einer Prüfung unterworfen.

Tabelle 6. SO₂- und NO₂-Grenzwerte der 22. BImSchV.

Stoff	Art des Grenzwerts	Grenzwert in µg/m ³	Erlaubte Überschreitungen	Zeitpunkt
SO ₂	1-Stunden	350	24 Stunden/Jahr	2005
	1-Tages	125	3 Tage/Jahr	2005
NO ₂	1-Stunden	200	18 Stunden/Jahr	2010
	1-Jahres	40		2010

Tabelle 7. Emissionen in Deutschland und Emissionshöchstmengen für Deutschland in der 33. BImSchV und im UN-ECE-Protokoll.

Emissionen	SO ₂ in kt	NO _x in kt	NH ₃ in kt	NMVOC in kt
Emissionshöchstmengen der 33. BImSchV 2010	520	1 051	550	995
Emissionshöchstmengen des UN-ECE-Protokolls 2010	550	1 081	550	995
Emissionen in Deutschland im Jahre 2000	636	1 555	599	1 607

Hinsichtlich der Reduzierung der Vorläufersubstanzen (SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC) sind Immissionsgrenzwerte von SO₂ und NO₂ in der 22. BImSchV festgelegt, deren Schutzziel die Vermeidung, Verhütung oder Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt insgesamt ist (Tabelle 6).

Bei den Grenzwerten der 22. BImSchV handelt es sich um Schadstoffkonzentrationen in der Luft, die ab den genannten Zeitpunkten nicht mehr überschritten werden dürfen. Sie regelt nicht nur die Reduzierung von primären PM, sondern trägt über ihre Vorschriften für SO₂ und NO₂ auch zur Verminderung der Vorläufersubstanzen von sekundären PM bei.

Die beiden übrigen Vorläufersubstanzen NH₃ und NMVOC sind neben SO₂ und NO_x in der 33. BImSchV geregelt (Umsetzung der NEC-Richtlinie). Diese Verordnung regelt die Emissionsminderung über nationale Höchstmengen (Tabelle 7).

4.2 Maßnahmen in den einzelnen Makrosektoren

4.2.1 Makrosektor Verkehr

Der wesentliche Beitrag zur Zielerreichung muss im Makrosektor Verkehr erbracht werden. Hierzu ist das Thema Dieselmotor und Partikelfilter anzusprechen, das in den letzten Monaten in der öffentlichen Diskussion eine hohe Bedeutung hatte bzw. nach wie vor hat.

Die kontinuierliche Fortschreibung der europäischen Abgasesetzgebung hatte zwar eine Trendwende bei der Emissionsentwicklung eingeleitet. So werden die verkehrsbedingten Emissionen im Zeitraum von 1990 bis 2010 voraussichtlich um bis zu 90 %, z. B. bei Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid, sinken. Trotz des zu erwartenden

den deutlichen Anstiegs der Fahrleistungen um über 285 Mrd. km im gleichen Zeitraum, wird davon ausgegangen, dass die Partikelemissionen um 60 % und die Stickstoffoxidemissionen um etwa 66 % sinken.

Die Minderung der Partikel- und Stickstoffoxidemissionen ist aber bei weitem noch nicht ausreichend. Insbesondere der aus Klimaschutzgründen erfreuliche Trend zum Diesel-Pkw kann dazu führen, dass die erreichten Erfolge für Partikeln sogar wieder aufgezehrt werden. Daher ist die Einführung verschärfter Abgasgrenzwerte erforderlich. Die Festlegung verschärfter Grenzwerte für solche Kraftfahrzeuge, spätestens ab 2010, muss zur Einführung effizienter Abgasreinigungssysteme, z. B. Partikelfiltersysteme, führen. Die Vorbereitungen für eine Euro-5-Abgasstufe für Pkw laufen bereits sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene. Die Kommission hat zugesagt, spätestens im Frühjahr 2005 einen konkreten Vorschlag für neue Grenzwerte auf der Basis der Ergebnisse des CAFE-Programms vorzulegen. Bundeskanzler *Schröder* hat kürzlich die Kommission aufgefordert, diesen Vorschlag schon im Herbst 2004 vorzulegen. National wird eine steuerliche Förderung von Pkw mit Partikelfilter oder Vergleichbarem (Kfz-Steuer) vorbereitet. Ab 2005 laufen die jetzigen Regelungen zur steuerlichen Förderung moderner Umwelttechnik am Pkw aus. Daher haben sich Bundesregierung und Automobilindustrie darauf verständigt, die Förderung von Diesel-Pkw mit deutlich geringerer Rußpartikelfreisetzung ab 2005 vorzunehmen.

Durch die Einführung eines PM-Grenzwerts in der Größenordnung von etwa 2,5 mg/km im Rahmen einer Abgasstufe Euro 5 für Diesel-Pkw, womit Dieselpartikelfiltertechnik erzwungen würde, würden sich die Partikelemissionen aus Pkw von 2004 bis 2010 um ca. 36 % vermindern. Dabei ist ein Anteil der Diesel-Pkw an den Neuzulassungen von 40 % zugrunde gelegt sowie die Annahme, dass im Jahre 2006 10 %, in 2007 30 %, in 2008 60 % und danach alle neu zugelassenen Diesel-Pkw den genannten Grenzwert unterschreiten.

Zur Minderung der verkehrsbedingten NO_x-Emissionen gilt es, die bereits festgeschriebenen Anforderungen für schwere Nutzfahrzeuge zügig umzusetzen und entsprechende Fahrzeuge auf die Straße zu bringen. Zur Einhaltung des ab 2008 geltenden NO_x-Grenzwerts von 2 g/kWh bei schweren Nutzfahrzeugen werden Katalysatoren zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) zum Einsatz kommen. Hierdurch wird die spezifische NO_x-Emission um 40 bis 60 % abgesenkt. Diese Lkw werden ab 2004 auf den Markt kommen.

4.2.2 Makrosektor Industrieanlagen und Kraftwerke

Mittels Verschärfungen in der TA Luft und der Großfeuerungsanlagenverordnung (15. BImSchV) wird eine Reduzierung von PM und Vorläuferstoffen für die Sekundärbildung erreicht werden.

Hinsichtlich der primären PM wurden die Werte für Gesamtstaub in der 13. BImSchV und der TA Luft von 50 mg/m³ auf 20 mg/m³ reduziert. In der 17. BImSchV wurde der Wert von 10 mg/m³ fortgeschrieben.

Eine Minderung der Vorläufersubstanzen SO₂ und NO_x wird durch Grenzwertabsenkungen und durch die Dynamisierungsklauseln der TA Luft, die bei bestimmten Anlagenarten eine Absenkung von Emissionswerten ermöglichen, bis zum Jahr 2010 erwartet.

Wichtig ist, dass der Vollzug der Länder die Verschärfungen und Dynamisierung des Stands der Technik aufgreift und zügig umsetzt.

4.2.3 Makrosektor Privathaushalte

Von den Wärmeerzeugungsanlagen der Privathaushalte werden sowohl primäre PM (Gesamtstaub, Ruß) als auch Vorläufersubstanzen (SO₂, NO_x) für sekundäre PM emittiert. Diese Emissionen werden durch die Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV) begrenzt.

Die 1. BImSchV wurde zuletzt im Jahre 1988 umfassend novelliert. Die in den 90er Jahren vorgenommenen Änderungen der Verordnung betrafen vornehmlich Öl- und Gasfeuerungsanlagen. Die bei diesen Anlagen verschärften Abgasgrenzwerte werden die Emissionen von Vorläufersubstanzen SO₂ und NO_x vor allem beim Altanlagenbestand weiter vermindern.

Die emissionsbegrenzenden Anforderungen an die in Privathaushalten eingesetzten Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe sind von Ordnungsänderungen weitgehend unberührt geblieben. Ihre Anpassung an den seit 1988 deutlich fortgeschrittenen Stand der Technik im Rahmen der Novellierung der 1. BImSchV wird die Emissionen von primären PM vermindern. Damit wird auch der seit einigen Jahren zu verzeichnenden starken Zunahme des Holzeinsatzes in Kleinfeuerungsanlagen Rechnung getragen.

4.2.4 Makrosektor Landwirtschaft

Die Landwirtschaft emittiert primäre PM, aber vor allem die Vorläufersubstanz NH₃ für sekundäre PM. Im Jahre 2000 wurden durch die Landwirtschaft 567 kt NH₃ emittiert. Davon entfielen 464 kt auf die Tierhaltung und 105 kt auf die Düngemittelverwendung. Damit ist die Landwirtschaft der bei weitem größte Emittent von NH₃ (Gesamtemissionsmenge 598 kt im Jahr 2000). NH₃ ist eine Vorläufersubstanz von sekundären PM (s. Teil 1).

Aufgrund der Struktur tierhaltender Betriebe in Deutschland ist eine Senkung der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft nicht allein mit Maßnahmen des technischen Emissionsschutzes leistbar (nur etwa 25 % der Nutztiere stehen in Betrieben, die einer Genehmigung nach BImSchG bedürfen). Emissionsminderungen sind z. T. nur durch Änderung von Produktionsprozessen oder Einschränkung der Produktion zu erreichen.

Die Bundesregierung erarbeitet daher zurzeit ein integriertes Programm zur Senkung der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft, das neben den geplanten oder bereits durchgeführten Vorschriften (TA Luft, Düngeverordnung) weitere Maßnahmen enthalten soll, die positive Auswirkungen auf die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft haben werden. Die Summe der dort aufgeführten Maßnahmen haben das Ziel, die jährlichen Emissionen aus der Landwirtschaft ab 2010 auf 400 kt Ammoniak zu senken. Solche Maßnahmen sind [22]:

- Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP),
- Förderung des ökologischen Landbaus,
- Empfehlungen der guten fachlichen Praxis,
- Erarbeitung von Empfehlungen zu BVT (beste verfügbare Technik) für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen,
- Fördermaßnahmen zur Verringerung der Viehdichten,
- Agrarumweltmaßnahmen,
- Fördermaßnahmen für eine betriebliche Viehobergrenze,
- Fördermaßnahmen zur Einführung emissionsmindernder Techniken,
- Anpassung des Baurechts zur Beschränkung der flächenunabhängigen Tierhaltung,
- Anpassung der Düngeverordnung,

- Ausdehnung der Genehmigungspflicht,
- Berücksichtigung des Stickstoffeintrags bei der Prüfung der Vorbelastung im Rahmen der TA Luft.

4.2.5 Sonstiges (Produkte, Gewerbe, privater Konsum)

Ungefähr 1 000 kt NMVOC werden durch den Lösemittelverbrauch in Gewerbe und Haushalt, z. B. durch Einsatz lösemittelhaltiger Farben und Lacke, europaweit freigesetzt.

Für die Verwendung von organischen Lösemitteln im gewerblichen und privaten Bereich außerhalb von Anlagen sowie in Anlagen unterhalb der Verbrauchsschwellen der Richtlinie 1999/13/EG bestehen noch keine europäischen Regelungen. Mit der vorgeschlagenen produktbezogenen Regelung in der VOC-Produkt-Richtlinie (Grenzwert für den zulässigen Lösemittelgehalt und Kennzeichnung des VOC-Gehalts in Farben und Lacken) sollen diese Maßnahmen einfach, transparent und vollzugsfreundlich umgesetzt werden. Mit dem Abschluss der Richtlinienverhandlungen werden dann nationale Regelungen zur Begrenzung des VOC-Gehalts in Farben und Lacken erlassen. Die produktbezogenen Maßnahmen ergänzen diese Regelungen. Ziel der produktbezogenen Maßnahmen ist es, eine Änderung in der Verwendung von lösemittelhaltigen hin zu wasserhaltigen Produkten zu erreichen.

In der bereits verabschiedeten Richtlinie 1999/13/EG (umgesetzt mit der 31. BImSchV) werden hingegen die von diversen industriellen und gewerblichen Anlagen in die Umwelt freigesetzten VOC-Emissionen durch anlagenbezogene Maßnahmen begrenzt.

Durch diese Maßnahmen wird ein Einsparpotenzial von ca. 300 kt NMVOC in Europa erwartet. Die Reduzierung der NMVOC dient vornehmlich der Reduzierung des bodennahen Ozons. Gleichzeitig werden hierdurch auch Sekundärpartikeln reduziert, da die NMVOC für beide Schadstoffgruppen Vorläufersubstanzen darstellen.

4.2.6 Ferntransport

Die PM_{10} -Belastungssituationen sind nicht nur ein lokales, sondern hier und da auch ein großräumiges Problem. Sie treten in Verbindung mit ungünstigen meteorologischen Bedingungen manchmal sogar episodentypisch auf.

In den Bundesländern durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass der lokale Anteil (z. B. Verkehr) an der PM_{10} -Belastung in Ferntransport-Episoden bis in den Bereich von 20 und 30 % sinken kann. Kleinräumige Maßnahmen können in dieser besonderen Situation nur Spitzen kappen.

Aus diesem Grunde ist es für ein Land wie Deutschland mit einer herausgehobenen Mittellage in Europa von besonderer Bedeutung, über internationale Verträge die Emissionen von PM und seinen Vorläuferstoffen in den Nachbarstaaten einzuschränken.

Bereits das Schwefelprotokoll der UN-ECE aus dem Jahre 1985, aber auch die folgenden Protokolle zu Stickstoffoxiden und VOC haben geholfen und werden helfen, die Emissionen an Vorläufersubstanzen für die Sekundärbildung von Feinpartikeln zu reduzieren. Das Multikomponentenprotokoll aus dem Jahr 1999 legt länderspezifische Emissionshöchstmengen für SO_2 , NO_x , NH_3 und VOC fest und wird sicherlich einen weiteren wichtigen Beitrag liefern, den Ferntransport für sekundär gebildete Feinpartikeln zu reduzieren. Das Protokoll wird voraussichtlich 2004 in Kraft treten. Die direkten Feinstaubemissionen werden gegenwärtig in-

ternational nicht reguliert. Um den Ferntransport in den kommenden Jahren deutlich zu reduzieren, wird Deutschland deshalb die Bestrebungen zur Aufnahme der PM in die Stoffliste des Multikomponentenprotokolls der UN-ECE – neben SO_2 , NO_x , NH_3 , NMVOC – unterstützen und Aktivitäten verstärken, auf UN-ECE-Ebene weitere Reduzierungen der Partikelemissionen (Ferntransport) zu erreichen⁴⁾.

4.2.7 Zusammenwirken der Sektoren

Die oben dargestellten Maßnahmen in den einzelnen Makrosektoren waren bzw. sind von den Ländern im Rahmen des Planungsrechts und des Vollzugs und vom Bund vor allem im Rahmen der Gesetzgebung umzusetzen. Die Grenzwerte der 22. BImSchV wurden ausdrücklich zum Schutz der menschlichen Gesundheit erlassen. Nach § 45 Abs. 1 BImSchG sind die zuständigen Behörden verpflichtet, die erforderlichen Maßnahmen zur Einhaltung der Grenzwerte zu ergreifen.

Für die Behörden kann dies bedeuten, dass unabhängig von der Aufstellung von Luftreinhalteplänen bereits vor dem Inkrafttreten der Grenzwerte heute alle Entscheidungen unter dem Gesichtspunkt der zeitgerechten Einhaltung der Grenzwerte getroffen werden müssen. Die Planungen müssen dazu führen, dass zukünftige Grenzwerte eingehalten werden können [23]. Die in den Luftreinhalte- und Aktionsplänen festgelegten Maßnahmen müssen die zuständigen Behörden durch Anordnungen oder sonstige Entscheidungen durchsetzen (§ 47 Abs. 6 BImSchG).

Maßnahmen können bis hin zu Verkehrsbeschränkungen oder -verboten oder gar Betriebsstillegungen gehen. Die Maßnahmen sind entsprechend des Verursacheranteils unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit gegen alle Emittenten zu richten, die zum Überschreiten der Immissionswerte beitragen. Die Einhaltung der genannten Grenzwerte kann durch den betroffenen Bürger gerichtlich durchgesetzt werden.

Der Bund hat die Verpflichtung, durch unterstützende bundesweit geltende Regelungen und den Anstoß internationaler Maßnahmen seinen Beitrag zur Einhaltung der 22. und 35. BImSchV zu leisten. Hierzu zählen:

- Verschärfung der gesetzlichen Vorschriften (siehe TA Luft, 1., 15. und 17. BImSchV),
- Einführung einer emissionsgestaffelten Lkw-Maut,
- steuerliche Förderung des Einbaus eines Partikelfilters oder vergleichbarer Rückhalteeinrichtungen (Pkw),
- Aktivitäten zur beschleunigten Umsetzung der 32. BImSchV und der Richtlinie zur Begrenzung von VOC in Farben und Lacken,
- EU-Initiative zur weiteren Verschärfung der Abgasstandards sowie zur Verminderung der Lösemittlemissionen (VOC) und der übrigen Vorläufersubstanzen,
- Initiative zur weiteren Reduktion der Vorläufersubstanzen im Rahmen der UN-ECE,
- Initiative zur Reduktion der Partikelemissionen (Ferntransport) im Rahmen der UN-ECE.

4.2.8 Aktuelle Situation

Der ab dem 1. Januar 2005 einzuhaltende PM_{10} -Tagesgrenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 35 zulässigen Überschreitungen wurde im Jahr 2000 an 30 Stationen (entsprechend ca.

⁴⁾Schreiben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit an die UN-ECE (April 2004).

11 %), im Jahr 2001 an 38 Stationen (ca. 11 %) und 2002 an 98 Stationen (ca. 24 %) überschritten (s. o.).

Die höchsten PM_{10} -Tageseinzelwerte, die in den Jahren 2000 bis 2002 beobachtet wurden, liegen zwischen 200 und knapp 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. An den Stationen mit den größten Häufigkeiten von Schwellenwertüberschreitungen wurden dagegen als höchste Tageseinzelwerte ca. 100 bis 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. Hervorzuheben ist auch, dass PM_{10} -Belastungssituationen bei ungünstigen meteorologischen Bedingungen nicht nur ein lokales, sondern manchmal auch ein großräumiges Problem sind und somit die Überschreitungshäufigkeit der vorgegebenen Schwellenwerte in Abhängigkeit von den meteorologischen Verhältnissen von Jahr zu Jahr schwankt. Solche Ferntransporte beruhen in erster Linie auf Sekundärpartikeln mit z. T. hohen Nitrat- und Sulfatlasten aus Vorläuferstoffen.

In Einzelfällen können auch Staubferntransporte zu großräumigen PM_{10} -Belastungssituationen führen. So kam es z. B. am 10. September 2002 infolge der Verfrachtung einer im Zusammenhang mit Waldbränden im Großraum Moskau entstandenen umfangreichen Staubwolke in weiten Teilen Norddeutschlands zu PM_{10} -Tagesmittelwerten zwischen 50 und 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Der ab 1. Januar 2005 einzuhaltende **PM_{10} -Jahresgrenzwert** von 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde im Jahr 2000 an sechs Stationen (ca. 2 %), 2001 an vier Stationen (ca. 1 %) und 2002 an zehn Stationen (ca. 2 %) überschritten. Die höchsten in 2002 festgestellten PM_{10} -Jahresmittelwerte liegen zwischen 40 und 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

5 Fazit

Die gegenwärtige Belastung der Umgebungsluft mit Partikeln (PM_{10} , $PM_{2,5}$, UFP) ist deutlich zu hoch. Die Belastungen führen, folgt man der herrschenden Meinung unter den hiermit befassten Wissenschaftlern, zu Gesundheitsschäden. Dies macht den politischen Handlungsdruck zur Emissionsminderung deutlich.

Die PM_{10} -Grenzwerte der 22. BImSchV sind im Rahmen der Schutzpflicht des BImSchG auf jeden Fall einzuhalten. Verantwortlich hierfür sind nach § 45 Abs. 1 BImSchG die zuständigen Behörden der Länder, die Luftreinhalte- und

Aktionspläne erlassen müssen, wenn Erkenntnisse vorhanden sind, dass ab 2005 die Grenzwerte nicht eingehalten werden können.

Mit den planungsrechtlichen Folgen der 22. BImSchV müssen sich die Behörden schon heute befassen. So müssen sie z. B. die Vorschriften der 22. BImSchV bei der Neu- bzw. Ausbauplanung von Straßen oder bei bestehenden Straßen berücksichtigen [23].

Die vorhandenen rechtlichen Regelungen bieten den Ländern zur Einhaltung der PM_{10} -Grenzwerte ein breites Planungs- und Eingriffsinstrumentarium, was in besonders gravierenden Fällen bis hin zu Betriebsstilllegungen und Verkehrsbeschränkungen gehen kann.

Falls die Länder zur Durchführung von Verkehrsbeschränkungen eine Kennzeichnungsverordnung für schadstoffarme Pkw wünschen, würde der Bund diese nach § 40 Abs. 3 BImSchG vorlegen⁹⁾.

Das beschriebene Politikfeld ist nicht nur von hoher Priorität, sondern auch ambitioniert. Einerseits, weil es über die beschriebenen Sektoren und Ebenen geht, wo nur die Summe der Einzelbeiträge den Gesamterfolg ausmacht, andererseits auch deshalb, weil in einer wirtschaftlich schwierigen Zeit auf viele Akteure finanzielle Belastungen zukommen. Diese Ausarbeitung zeigt, welche fachlichen Gründe für die beschriebenen Maßnahmenpakete gegeben sind und in welches Gesamtkonzept sich die jeweiligen Einzelmaßnahmen einfügen.

⁹⁾ Ein diesbezüglicher Vorstoß im Bundesrat fand kürzlich keine Mehrheit (Plenum am 12. März 2004).

Literatur

- [22] Nationales Programm der Bundesregierung nach Art. 6 der Richtlinie 2001/81/EG vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchst-mengen für bestimmte Luftschadstoffe.
- [23] Grundsatzurteil des Bundesverwaltungsgerichts, AZ: 9A5.03 und 6.03 vom 26. Mai 2004.