



# PM10

## Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen, und Massnahmen

Stand 29. März 2001

### Inhalt

<i>Begriffe</i>	2
<i>Eigenschaften</i>	4
<i>Emissionsmessverfahren</i>	7
<i>Emissionen</i>	8
<i>Immissionsmessverfahren</i>	10
<i>Immissionen</i>	12
<i>Immissionsgrenzwerte</i>	20
<i>Auswirkungen</i>	23
<i>Massnahmen</i>	34
<i>Literatur</i>	38

---

---

## Begriffe

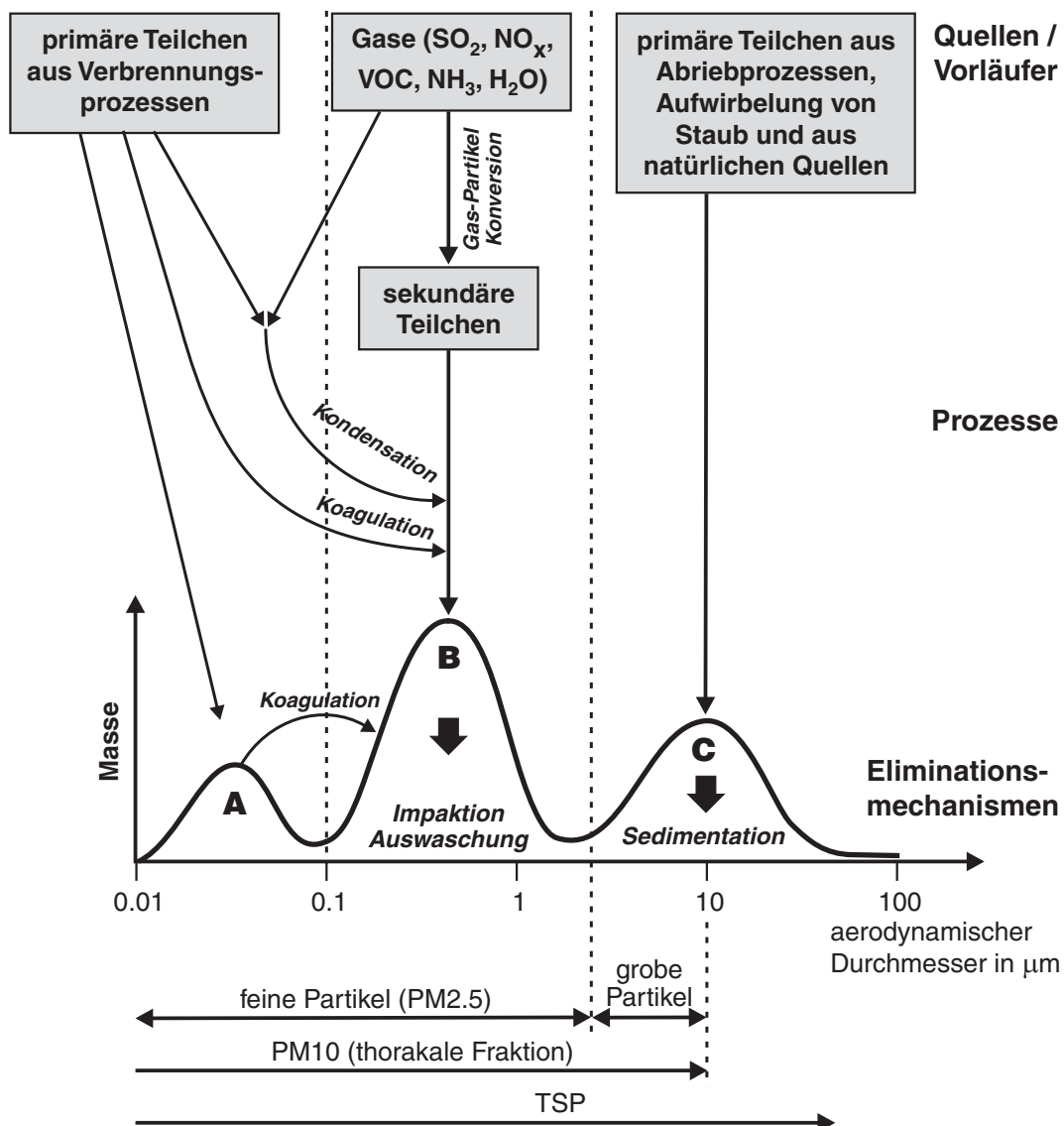
- **aerodynamischer Durchmesser:** Da luftgetragene Partikel sehr unterschiedliche Formen und Dichte aufweisen können, ist es nicht trivial, ihnen einen Durchmesser zuzuordnen. Der aerodynamische Durchmesser ist eine geeignete Grösse, um eine Reihe von Prozessen zu beschreiben. Er entspricht demjenigen Durchmesser, den ein kugelförmiges Teilchen der Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$  haben müsste, damit es die gleiche Sinkgeschwindigkeit aufweisen würde wie das betrachtete Teilchen.
- **TSP (Total suspended particulate matter):** Schwebestaub mit einer Sinkgeschwindigkeit  $\leq 10 \text{ cm/s}$ ; Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als  $57 \mu\text{m}$
- **PM10 (Particulate matter):** Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser  $\leq 10 \mu\text{m}$  (genauer: Partikel, die einen Einlass mit einer 50 % Abscheideeffizienz von  $10 \mu\text{m}$  aerodynamischem Durchmesser passieren)
- **PM2.5:** Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  (genauer: Partikel, die einen Einlass mit einer 50 % Abscheideeffizienz von  $2.5 \mu\text{m}$  aerodynamischem Durchmesser passieren)
- **ultrafeine Partikel:** Staubteilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser unter  $0.1 \mu\text{m}$
- **feine Partikel:** Staubteilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser unter  $2.5 \mu\text{m}$
- **grobe Partikel:** Staubteilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von  $2.5$  bis  $10 \mu\text{m}$
- **primäre Partikel:** Staubteilchen, die direkt als Partikel in die Luft gelangen
- **sekundäre Partikel:** Staubteilchen, die sich erst in der Atmosphäre aus Vorläufergasen (v.a.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ , VOC) bilden
- **Russ** umfasst alle primären, kohlenstoffhaltigen Partikel eines unvollständigen Verbrennungsprozesses. Er besteht v.a. aus elementarem Kohlenstoff (elemental carbon **EC**) und organischen Verbindungen, die als organischer Kohlenstoff (organic carbon **OC**) gemessen werden. Immissionsseitig wird oft der elementare Kohlenstoff allein als Russ bezeichnet (z.B. in der deutschen 23. BImSchV).
- **Totaler partikelförmiger Kohlenstoff (TC):** Summe aus elementarem (EC) und organischem Kohlenstoff (OC). Er umfasst ausser Russ auch die in der Atmosphäre sekundär gebildeten organischen Partikel.
- **Organisches Material (OM):** Bei der gängigen chemischen Analysemethode wird nur der Kohlenstoffanteil (OC) des organischen Materials gemessen. Um auch die Fremdatome (v.a. Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff) bei der Massenbilanz zu berücksichtigen, muss OC mit einem Faktor multipliziert werden, um OM zu erhalten. Bei den in dieser Publikation enthaltenen Daten wurde ein Umrechnungsfaktor von 1.4 verwendet ( $\text{OM} = 1.4 \cdot \text{OC}$ ).

- 
- **PAH:** polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzo[a]pyren)

## Eigenschaften

### • Wie entstehen Partikel?

Man unterscheidet primäre, also direkt als Partikel emittierte und sekundäre, aus gasförmigen Vorläufern in der Atmosphäre gebildete Teilchen. Aus anthropogenen Quellen entstehen primäre Teilchen bei Verbrennungsprozessen, vor allem als ultrafeine und feine Teilchen mit einem Durchmesser unter etwa  $0.3\ \mu\text{m}$  (z.B. Russ). Teilchen, die durch Abrieb oder Aufwirbelung entstehen, sind meist grösser als  $1\text{-}2\ \mu\text{m}$ . Als natürliche Quellen kommen Pollen, Meeressgicht, Winderosion und Vulkane in Frage. Teilchen im mittleren Grössenbereich (zwischen  $0.1$  und  $2.5\ \mu\text{m}$ ) sind zum überwiegenden Teil sekundären Ursprungs und bilden sich durch Gas-Partikelkonversion aus den Vorläufern  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  und VOC.



**Figur 1** Vereinfachte Darstellung der Grössenverteilung des atmosphärischen Aerosols in Quellennähe und der wichtigsten Prozesse. A: ultrafeine Partikel, B: Akkumulationsmodus, C: grobe Partikel. Quellenferne Standorte weisen vorwiegend den Akkumulationsmodus B auf.

- **Welche Eigenschaften des Aerosols sind relevant?**

Die Grösse, Form und Dichte der luftgetragenen Partikel variiert stark. Eine wichtige Grösse ist der aerodynamische Durchmesser (s. unter Definitionen). Er bestimmt weitgehend, welche Prozesse in der Atmosphäre für die Teilchen relevant sind und wie lange ihre Aufenthaltsdauer ist. Luftgetragene Teilchen können fest oder flüssig sein und ihren Aggregatzustand in Abhängigkeit von der umgebenden Luft und der Temperatur ändern (z.B. Verdampfen leichtflüchtiger Verbindungen). Massgebend ist auch die chemische Zusammensetzung der Teilchen, z.B. für ihre Reaktivität und ihre Fähigkeit, Wasser aus der Luft aufzunehmen und als Kondensationskeime für Wolkenröpfchen zu dienen.

- **Wie ist die Grössenverteilung atmosphärischer Partikel (PM<sub>10</sub>)?**

Man unterscheidet 3 Grössenbereiche:

- ultrafeine Partikel (aerodynamischer Partikeldurchmesser < 0.1 µm),
- den Akkumulationsmodus (0.1-2.5 µm) und
- grobe Partikel (>2.5 µm).

Die ultrafeinen Partikel und der Akkumulationsmodus werden zusammen als feine Partikel bezeichnet. Während die ultrafeinen Partikel nur einen sehr geringen Teil der Partikelmasse ausmachen, sind sie die weitaus häufigsten Teilchen in der Atmosphäre. Die groben Partikel können wesentlich zur Partikelmasse beitragen, ihre Anzahl ist im Vergleich zu den feinen Partikeln jedoch sehr gering.

- **Was geschieht mit den Teilchen nach der Emission der primären Partikel bzw. nach der Bildung der sekundären Partikel?**

Die massgebenden Prozesse hängen primär vom Partikeldurchmesser ab. Teilchen über 10 µm sedimentieren rasch und werden so aus der Luft entfernt. Ultrafeine Partikel (< 0.1 µm) haben hohe Diffusionsgeschwindigkeiten und koagulieren innerhalb weniger Stunden mit grösseren Partikeln oder wachsen durch Kondensation. Teilchen im Akkumulationsmodus (0.1-2.5 µm) bilden massenmässig den Hauptteil des Aerosols an Standorten, die nicht in unmittelbarer Nähe einer grossen Quelle liegen. Die Eliminationsmechanismen für diese Grössenkategorie sind nicht sehr effizient, so dass die Teilchen mehrere Tage in der Luft bleiben und entsprechend weit transportiert werden können. Teilchen dieser Grössenklasse werden hauptsächlich durch Niederschläge aus der Atmosphäre entfernt, zum Teil durch Impaktion. Es gibt keine wirkungsvollen Prozesse, um feine Teilchen zu groben Teilchen (>2.5 µm) anwachsen zu lassen.

- **Was bedeutet das für die Massen-Grössenverteilung vom PM<sub>10</sub> bei den Immissionen?**

Sekundäre Teilchen im Akkumulationsmodus bilden sich in der gesamten unteren Atmosphäre aus den Vorläufergasen. Primäre Partikel hingegen werden vor allem als ultrafeine Teilchen (Verbrennungsprozesse) oder grobe Teilchen (Abriebsprozesse) durch lokal eng begrenzte Quellen emittiert und rasch verdünnt. Aus diesen Gründen und wegen der relativ raschen Elimination ultrafeiner und grober Teilchen aus der Luft unterscheidet sich die Grössenverteilung in Quellennähe von derjenigen an quellenfernen Standorten. In Quellennähe ("frisches" Aerosol) ist meist bei allen drei Partikelklassen ein Maximum erkennbar (Figur 1). An quellenfernen Standorten ("gealtertes" Aerosol) ist meist nur der Ak-

kumulationsmodus als Maximum in der Grössenverteilung deutlich sichtbar. Der Akkumulationsmodus macht den grössten Teil der PM10-Masse aus, etwa 80 % beim gealterten Aerosol.

- **Wie ist die chemische Zusammensetzung von PM10?**

Staub ist ein physikalisch-chemisch komplexes Gemisch. Es besteht sowohl aus primär emittierten wie sekundär gebildeten Komponenten. Folgende wichtige Komponenten können unterschieden werden:

	<b>Komponente</b>	<b>Vorläufer / Ursache</b>
<b>Primäre Komponenten</b>	Russ (EC und primärer OC)	Verbrennungsprozesse
	geologisches Material	Bau, Landw., Verkehr, Wind
	Schwermetalle	Verbrennung, Produktion
	Abriebspartikel	mechanische Beanspruchung
	biologisches Material	Pilzsporen, Pflanzenfragmente
<b>Sekundäre Komponenten</b>	Sulfat	Schwefeldioxid
	Nitrat	Stickoxide
	Ammonium	Ammoniak
	organischer Kohlenstoff (OC)	VOC

**Tabelle 1** Zusammensetzung und Quellen von PM10

## Emissionsmessverfahren

- **Welche Messverfahren werden bei der Emissionsmessung von Fahrzeugen eingesetzt?**

Bei dem gesetzlich vorgeschriebenen gravimetrischen Verfahren (EU-Richtlinie 88/77/EWG) wird das Abgas in einem Verdünnungstunnel um Faktor 5-10 verdünnt und auf unter 51.7°C abgekühlt. Die Probe wird durch einen Glasfaserfilter mit definiertem Abscheidegrad geleitet. Je nach Abgaszusammensetzung können dabei die Taupunkte flüchtiger Inhaltsstoffe bereits unterschritten und das Ergebnis durch Kondensation beeinflusst werden.

- **Welche Messverfahren werden bei der Emissionsmessung von stationären Anlagen eingesetzt?**

Emissionsmessungen bei stationären Anlagen erfolgen direkt im heissen Abgasstrom bzw. in der Abluft. Die Partikel werden mittels Impaktoren, im Bedarfsfall mit Vorabscheider, oder mittels Zyklonen mit Endfilter durch Trägheitsabscheidung gesammelt (Willeke 1993). Verschiedene europäische (VDI 2066 Blatt 5, Staubmessung in strömenden Gasen – Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren – Kaskadenimpaktor, 1994) und amerikanische Richtlinien (US EPA Method 201 und 201A, Determination of PM<sub>10</sub> emissions; constant sampling rate procedure) schreiben vor, wie die grössenfraktionierte Staubprobenahme zu erfolgen hat. Die schweizerischen Messempfehlungen enthalten dazu keine speziellen Angaben.

## Emissionen

- **Wieviel primäres PM10 emittieren die verschiedenen Quellen?**

Quellengruppe	Massgebliche Quellen	PM10-Emissionen 1995	
		in Tonnen	in %
<b>Verkehr</b>	Strassenverkehr (Güterverkehr)	3'246	11.5
	Strassenverkehr (Personenverkehr)	3'489	12.4
	Schiene	2'754	9.8
	Luftfahrt	655	2.3
	andere	128	0.5
	<b>Subtotal</b>		<b>10'273</b>
<b>Energieversorgung</b>	Elektrizität	73	0.3
	Fernwärme	40	0.1
	<b>Subtotal</b>		<b>113</b>
<b>Haushalte</b>	Feuerungen	793	2.8
	Garten+Hobby	122	0.4
	andere	350	1.2
	<b>Subtotal</b>		<b>1'264</b>
<b>Industrie / Gewerbe</b>	Feuerungen Industrie	547	1.9
	Feuerungen Dienstl./Gew./Landw.	377	1.3
	Industrie der Steine / Erden	1'260	4.5
	Min. Oelindustrie	43	0.2
	Gaswerke	0	0.0
	Metallindustrie	826	2.9
	Lebensmittelindustrie	326	1.2
	Abfallentsorgung	1'760	6.2
	Baugewerbe (inkl. Baumaschinen)	4'483	15.9
	Kunststoffindustrie	2	0.0
	Gesundheitswesen	40	0.1
	Industrielle Maschinen	175	0.6
	andere	47	0.2
	<b>Subtotal</b>		<b>9'886</b>
<b>Land- und Forstwirtschaft</b>	Nutztierhaltung	1'772	6.3
	Grastrocknung	301	1.1
	Maschinen und Geräte	3'101	11.0
	Abfallentsorgung	1'512	5.4
<b>Subtotal</b>		<b>6'686</b>	<b>23.7</b>
<b>Gesamttotal</b>		<b>28'222</b>	<b>100</b>

**Tabelle 2** Emissionen von primärem PM10 im Jahr 1995 (Electrowatt Engineering 2001)

- **Wieviel PM10 wird aus den Vorläufergasen gebildet?**

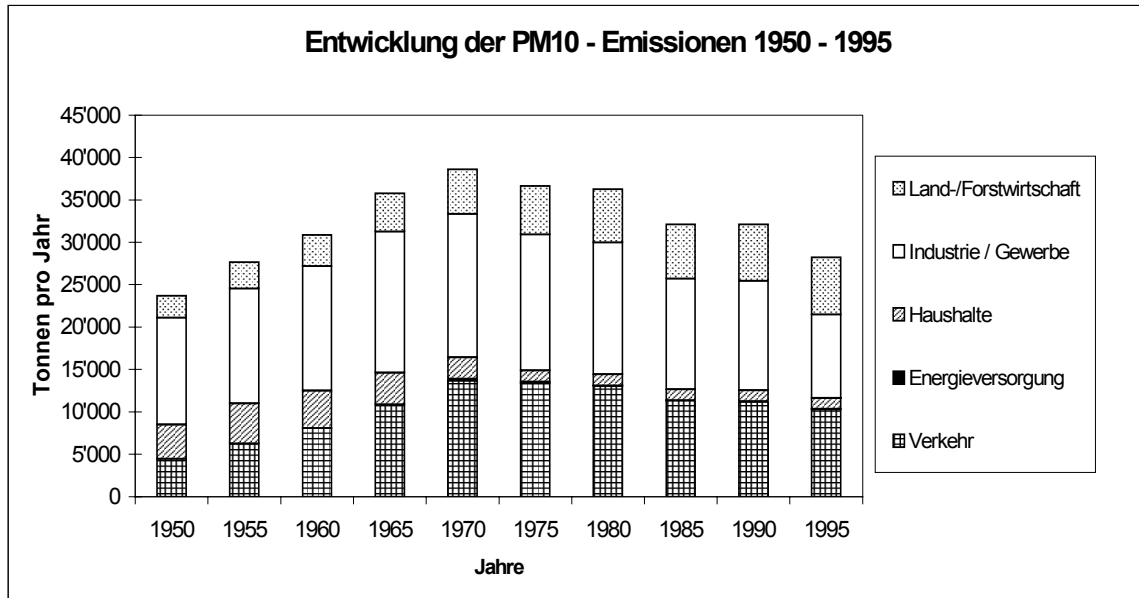
Es bestehen Abschätzungen über den Beitrag der Vorläufergase an die PM10-Immissionen (s. S. 15).



- **Wie hoch sind die natürlichen PM10-Emissionen?**

Es bestehen Abschätzungen über den Beitrag der natürlichen PM10-Partikel an die PM10-Immissionen (s. S. 16).

- **Wie haben sich die PM10-Emissionen entwickelt?**



**Figur 2** Zeitliche Entwicklung der Emissionen von primärem PM10 in der Schweiz

## Immissionsmessverfahren

### PM10 (Masse)

Es gibt eine ganze Reihe von Messverfahren, die zur grössenselektiven Bestimmung des Schwebstaubes oder einzelner Anteile davon dienen können. Dazu gehören

<b>1. Manuelle gravimetrische Verfahren</b> wie	Die Staubproben werden auf Filtern oder Folien abgeschieden, die danach bei vorgeschriebener Luftfeuchtigkeit und Temperatur konditioniert und gewogen werden
High Volume Sampler mit verschiedenen Vorsätzen, die Partikel über einer bestimmten Grösse vor der Probenahme aus dem Luftstrom entfernen	Messgeräte, die hohe Volumenströme (ca. 30 m <sup>3</sup> /h) durch ein Filter saugen; werden im NABEL eingesetzt (mit PM10-Kopf oder PM2.5-Kopf)
Low Volume Sampler mit verschiedenen Vorsätzen, die Partikel über einer bestimmten Grösse vor der Probenahme aus dem Luftstrom entfernen	Messgeräte, die niedrige Volumenströme (einige l/min) durch ein Filter saugen
Impaktoren	ergeben die Massenkonzentration in verschiedenen Grössenintervallen. Die mehrstufigen Geräte sind aus Lochplatten mit immer kleiner werdenden Löchern und dahinterliegenden Prallplatten aufgebaut, so dass sukzessive kleinere Teilchen aus dem Luftstrom entfernt und auf den Prallplatten gesammelt werden.
<b>2. automatisierte (quasi-)kontinuierliche Verfahren</b>	schliessen durch eine alternative Messgrösse auf die Massenkonzentration
β-Messgeräte	saugen Luft durch einen Filterstreifen und messen kontinuierlich oder in kurzen Zeitintervallen die Absorption von β-Strahlen; Nachteil: unterschiedliche Absorptionsquerschnitte verschiedener Elemente. Bei Verwendung dieser Geräte muss an jedem Standort die Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren überprüft bzw. ein Umrechnungsalgorithmus bestimmt werden.
TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)	messen die Veränderung der Resonanzfrequenz durch auf einem Filter abgelagerten Staub; Nachteil: Proberaum muss beheizt werden → leichtflüchtige Komponenten gehen verloren, was zu einem Minderbefund von bis zu 30% im Jahresmittel führen kann. Bei Verwendung dieser Geräte muss an jedem Standort die Gleichwertigkeit mit dem Referenz-

	verfahren überprüft bzw. ein Umrechnungsalgorithmus bestimmt werden.
--	--

Weitere Geräte geben Aufschluss über andere Eigenschaften des Aerosols, z.B. Lichtstreuung (Nephelometer), Oberfläche (Epiphaniometer, NanoMet), Anzahl Partikel in unterschiedlichen Grössenklassen (Kondensationskeimzähler, Differentieller Mobilitätsanalysator, Diffusionsbatterie, elektrischer Aerosolanalysator, optischer Partikelzähler), chemische Zusammensetzung von Einzelpartikeln (Flugzeit-Massenspektrometer) oder die Konzentration bestimmter chemischer Verbindungen.

### **Russ**

Coulometrie (elektrochemische Ladungsmessung)

Aethalometer (Messen der optischen Transmission von Filterproben)

Black-Smoke-Verfahren (Messen der optischen Reflexion von Filterproben)

Photoelektrischer Aerosolsensor (Messen der Photoionisation von polyzyklischen Aromaten an Russteilchen)

### **Messempfehlung für PM10**

Die Europäische Norm EN 12341 über die Schwebstaubmessung legt die zu verwendenden Referenzverfahren für die Ermittlung der PM10-Fraktion im Schwebstaub fest. Es werden zwei Geräte (HIVOL-Sammler 68 m<sup>3</sup>/h oder Kleinfiltergerät 2.3 m<sup>3</sup>/h mit gravimetrischer Staubmassenbestimmung) als Referenzmethoden zugelassen. Die Schweiz übernimmt diese Norm. Die entsprechende provisorische Empfehlung von BUWAL und EMPA zur Messung von PM10 (März 1997) wird in der laufenden Revision der Immissionsmessempfehlungen berücksichtigt.

Werden andere Messverfahren als die Referenzverfahren eingesetzt, so hat der Messnetzbetreiber gemäss EN 12341 zu zeigen, dass die Messungen gleichwertige Resultate ergeben wie das Referenzverfahren.

## Immissionen

- **Wie sieht die PM10-Belastung im Jahresmittel aus?**

### *für die Schweiz:*

Typische PM10-Jahresmittelwerte in der Schweiz sind (Quelle: PM10-Messungen NABEL 1998/1999; s. BUWAL 1999b, BUWAL 2000)

Stadt, an Hauptverkehrsstrasse:	30 - 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Stadtzentrum, in Park	25 - 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Agglomeration	20 - 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Land	15 - 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mittlere Höhenlagen (1000 - 2000 m ü.M.)	10 - 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Hochalpen (Jungfrauoch)	um 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

**Tabelle 3** PM10-Jahresmittelwerte an verschiedenen Standorttypen

### *für das Ausland:*

Typische PM10-Jahresmittelwerte in europäischen Städten sind zwischen 12 (Malmö) und 82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Sabadel, Spanien): Berlin 60, Lyon 60, Madrid 47, Amsterdam 40, Mulhouse 35, Paris 31, London 28, Stockholm 23 (Quelle: European Commission 1997. Bericht enthält PM10-Daten von 36 Städten, z.T. Mittel über mehrere Stationen).

- **Welche maximalen PM10-Tagesmittelwerte wurden gemessen?**

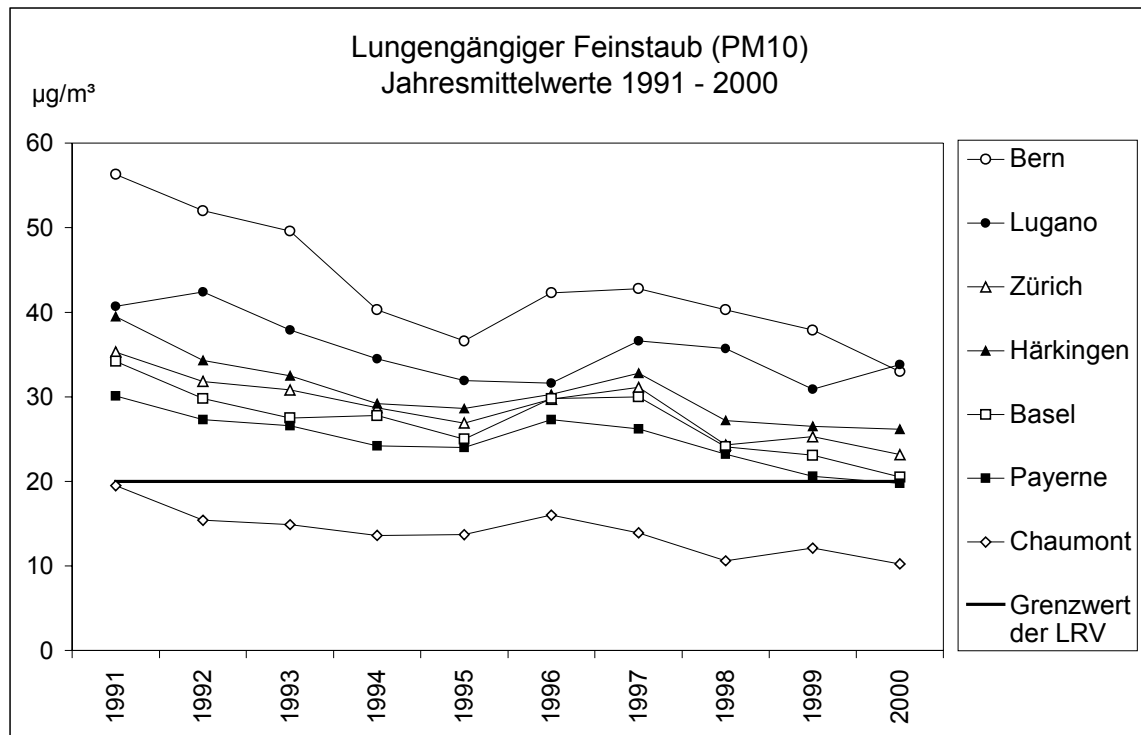
NABEL: PM10 Auswertung Januar 99 - Dezember 99

Station	Mittelwert 1999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Max. Tagesmittel 1999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2. höchstes Tagesmittel 1999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anzahl Tage >50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 1999	Anzahl Tage >100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 1999
Basel	23	70	70	20	0
Bern	38	104	104	77	3
Chaumont	12	52	49	1	0
Dübendorf	24	85	82	24	0
Härkingen	27	81	80	26	0
Lugano	31	164	130	44	5
Magadino	28	124	110	40	2
Payerne	21	65	64	9	0
Rigi	12	66	59	3	0
Sion	23	74	62	13	0
Tänikon	19	67	66	9	0
Zürich	25	109	90	29	1

**Tabelle 4** PM10-Belastung an den NABEL-Stationen 1999 (BUWAL 2000)

- **Wie hat sich PM10-Belastung in den letzten 10 Jahren entwickelt?**

Im NABEL wurden 1997 und 1998 ausführliche Parallelmessungen zwischen PM10 und TSP durchgeführt (EMPA 1999). Diese Messungen belegen eine hohe Korrelation zwischen den beiden Messgrößen. Da nicht davon auszugehen ist, dass sich die Zusammensetzung des Feinstaubes an den jeweiligen Standorten in den letzten Jahren wesentlich geändert hat, können die langjährigen TSP-Messreihen mit einiger Sicherheit in PM10-Werte umgerechnet werden.



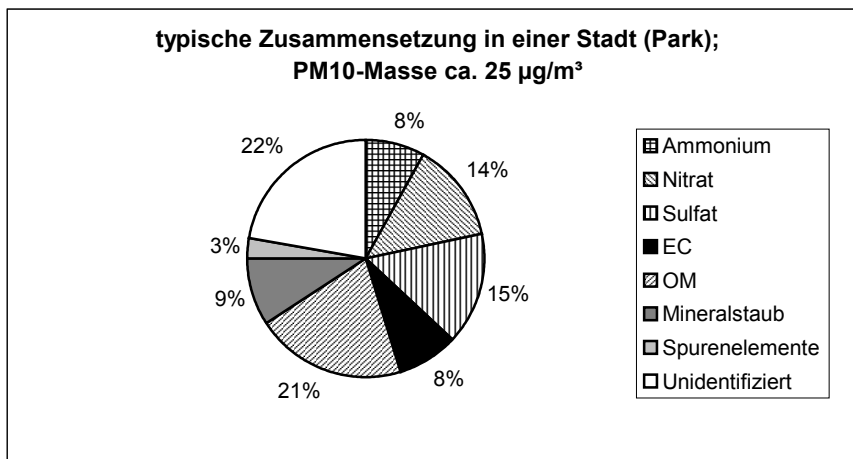
**Figur 3** Zeitliche Entwicklung der PM10-Belastung (BUWAL 2001); Werte vor 1997: aus TSP-Werten berechnet

Die PM10-Belastung ist an allen Standorten in den letzten 10 Jahren leicht zurückgegangen. Eine Analyse der Monatsmittelwerte zeigt, dass die PM10-Belastung der Wintermonate sehr stark von Jahr zu Jahr schwanken kann. Die Häufigkeit von Inversionslagen dürfte im Wesentlichen dafür verantwortlich sein. Dies hat zur Folge, dass die Zahl der Tage mit einer PM10-Belastung  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Überschreitung des Tagesgrenzwertes) von Jahr zu Jahr starken Schwankungen unterliegt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Zahl dieser Tage in den letzten 10 Jahren beträchtlich abgenommen hat.

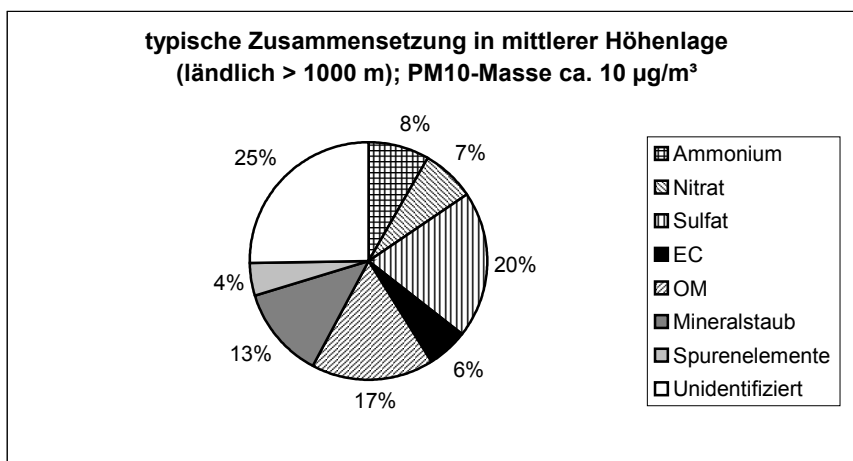
- **Wie ist die chemische Zusammensetzung der PM10-Belastung in der Schweiz?**

***Situation abseits vielbefahrener Strassen***

Neuere Daten aus der Schweiz, die im Rahmen des NFP41 (Hüglin 2000) und des NABEL (EMPA 2000) erhoben wurden, ergeben folgendes Bild:



**Figur 4** Chemische Zusammensetzung an einer städtischen Hintergrundsstation



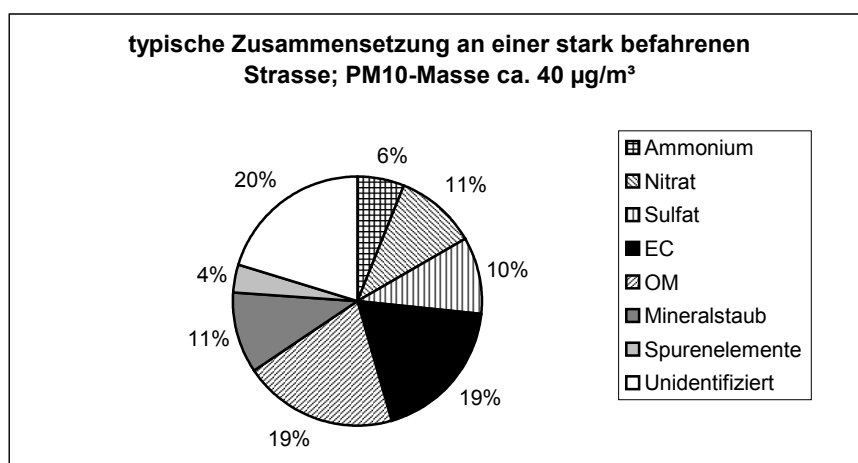
**Figur 5** Chemische Zusammensetzung an einer ländlichen Station mittlerer Höhenlage

Im unidentifizierten Anteil ist u.a. Wasser enthalten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Ammonium, Nitrat und Sulfat gut ein Drittel von PM10 ausmachen. Wird das sekundäre organische Material (Teil von OM) und das im unidentifizierten Anteil enthaltene atmosphärische Wasser dazugezählt, so resultiert ein Anteil an sekundärem Aerosol von ca. 50 %. EC und OM zusammen machen einen Anteil von einem Viertel bis einen Drittel aus. Der Massenanteil der Schwermetalle ist sehr gering.

Eine flächendeckende Abschätzung der PM10-Immissionen, der Zusammensetzung und der Beiträge verschiedener Quellen findet sich in der Schriftenreihe Umwelt Nr. 310 (BUWAL 1999a)

### ***Situation an stark befahrenen Strassen im Stadtzentrum***

Messungen im Stadtzentrum von Zürich im Rahmen des NFP41 (Hüglin 2000) ergeben folgendes Bild:



**Figur 6** Chemische Zusammensetzung von PM10 an einer stark befahrenen städtischen Strasse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Anteil von Ammonium, Nitrat und Sulfat in Quellennähe bei etwa einem Viertel liegt. An Strassenstandorten findet man sowohl mehr ultrafeine Partikel (Russ) als auch mehr grobe Partikel (Strassen- und Pneuabrieb, Aufwirbelung von Strassenstaub) als an ländlichen Standorten, während die absolute Konzentration der sekundären Komponenten im ganzen Mittelland ähnlich ist.

- **Wie hoch ist die durch nicht-schweizerische Quellen verursachte Grundbelastung?**

**Jahresmittel (BUWAL, 1999a):**

Komponente	Messwerte Mittel 1994-97	schweizerischer Anteil berechnet mit Modell	ausländischer Anteil (Differenz der beiden vorangehenden Spalten)
	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>
Nitrat	4.7	1.6	3.1
Ammonium	2.4	0.5	1.9
Sulfat	3.4	0.1	3.3
Summe	10.5	2.2	8.3

**Tabelle 5** Anteil schweizerischer und ausländischer Quellen am sekundären PM10

Die obige Tabelle illustriert die Abschätzung der grossräumigen Anteile an Nitrat, Sulfat und Ammonium für den Standort Payerne. Von den Messwerten der ersten Kolonne wurden die mittels eines Modells berechneten Beiträge durch schweizerische Quellen subtrahiert. Daraus resultiert ein Beitrag ausländischer Quellen von ca. 8 µg/m<sup>3</sup>.

Zu diesen sekundären Aerosolen kommen grossräumig transportierte primäre Aerosole hinzu. Dazu liegen erste gesamteuropäische Modellrechnungen vor (für die Schweiz: ca. 3 µg/m<sup>3</sup>). Damit ergibt sich eine PM10-Konzentration von ca. 11 µg/m<sup>3</sup> die durch nicht-schweizerische Quellen verursacht wird.

Dieser Wert dürfte für grosse Teile des schweizerischen Mittellandes gelten. Im Tessin muss mit einem deutlich grösseren Anteil (ca.  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) gerechnet werden.

### **Tageswerte:**

Studien über den grossräumigen Transport von PM10-Partikeln während Episoden mit hoher Belastung existieren bisher in Mitteleuropa nicht. An ländlichen schweizerischen Stationen und in den Voralpen können während solchen Lagen Werte von knapp über  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen werden. Diese Konzentrationen dürften in vielen Fällen mehrheitlich durch lokale Quellen bestimmt sein. Es ist jedoch nicht auszuschliessen, dass der Tagesgrenzwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  während solchen Lagen allein aufgrund der grossräumig transportierten Belastung überschritten werden kann.

- **Wie hoch ist die natürliche Grundbelastung?**

Gesamthaff kann man von einem durchschnittlichen Anteil der natürlichen Grundbelastung am Jahresmittelwert von  $1-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ausgehen.

Als natürliche Quellen kommen in Frage:

Pollen, Meeressgisch, Winderosion, Vulkane

**Pollen:** Sie sind überwiegend grösser als  $10 \mu\text{m}$  und tragen deshalb nur wenig zur PM10-Belastung bei. Pollenfragmente und Sporen können kleiner als  $10 \mu\text{m}$  sein.

**Meeressgisch:** Gemäss englischen Studien beträgt die Konzentration der Seesalzpartikel an küstennahen Standorten  $4-7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und im Landesinneren ca.  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Airborne Particles Expert Group 1999, Turnbull 2000). Messungen aus Mitte der Achtziger Jahre zeigen, dass im schweizerischen Mittelland maximal  $0.5-0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  marinen Ursprungs sein könnten (Hertz 1988, Gälli Purghart 1988). Die NFP41 -Messungen zeigen im Sommer sehr tiefe Natrium- und Chlorid-Werte ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Im Winter werden wesentlich höhere Werte gemessen, die jedoch mehrheitlich auf das von den Strassen aufgewirbelte Streusalz zurückzuführen sind.

**Winderosion:** Sie spielt insbesondere über ariden und semiariden Gebieten eine Rolle und ist deshalb in Mitteleuropa nur von geringer Bedeutung. Bei uns kann die Winderosion über offenen Ackerflächen eine Rolle spielen. Sie muss aber als anthropogen bezeichnet werden (wie auch die Aufwirbelung auf Baustellen und von Fahrzeugen). Teile dieser durch Winderosion produzierten Partikel sind  $<10 \mu\text{m}$ . Belegt ist dies insbesondere durch Saharastaubereignisse, die selten in Mitteleuropa auftreten und ein Grössenmaximum bei  $2.5 \mu\text{m}$  haben (Pani 1992). Als eine grobe Schätzung kann man von einer Häufigkeit von 2 - 6 solchen Ereignissen pro Jahr ausgehen. 0 - 2 Ereignisse davon bringen höhere PM10-Werte.

**Vulkane:** Der Beitrag der Vulkane an die schweizerischen PM10-Immissionen ist vernachlässigbar.

- **Warum entsprechen die Emissionsanteile der verschiedenen Quellengruppen nicht deren Immissionsbeiträgen?**

Emissionsinventare erfassen nur die primär emittierten Partikel. Ein wesentlicher Teil der PM10-Immissionen ist jedoch sekundär gebildet. Zudem variiert die Auf-



enthaltendauer der Partikel in der Atmosphäre beträchtlich in Abhängigkeit ihrer Grösse. Grosse Partikel können zwar massenmässig in den Emissionsbilanzen eine wesentliche Rolle spielen. Da sie jedoch relativ rasch aus der Luft entfernt werden, tragen sie nicht sehr stark zu den Immissionen an Standorten bei, die nicht in Quellennähe liegen.

- **Wie sind die Verhältnisse zwischen TSP, PM10 und PM2.5 ?**

#### **Verhältnis TSP zu PM10**

Die im NABEL 1997 und 1998 durchgeführten Parallelmessungen von TSP und PM10 zeigen, dass ein hoher Prozentsatz der TSP-Masse als PM10 vorliegt (EMPA 1999). Mit Ausnahme der strassennahen Stadtzentrumstationen liegt dieser Anteil zwischen 80 und 90 %. An der strassennahen Stadtstation (Bern) ist der Anteil tiefer (um 65 %).

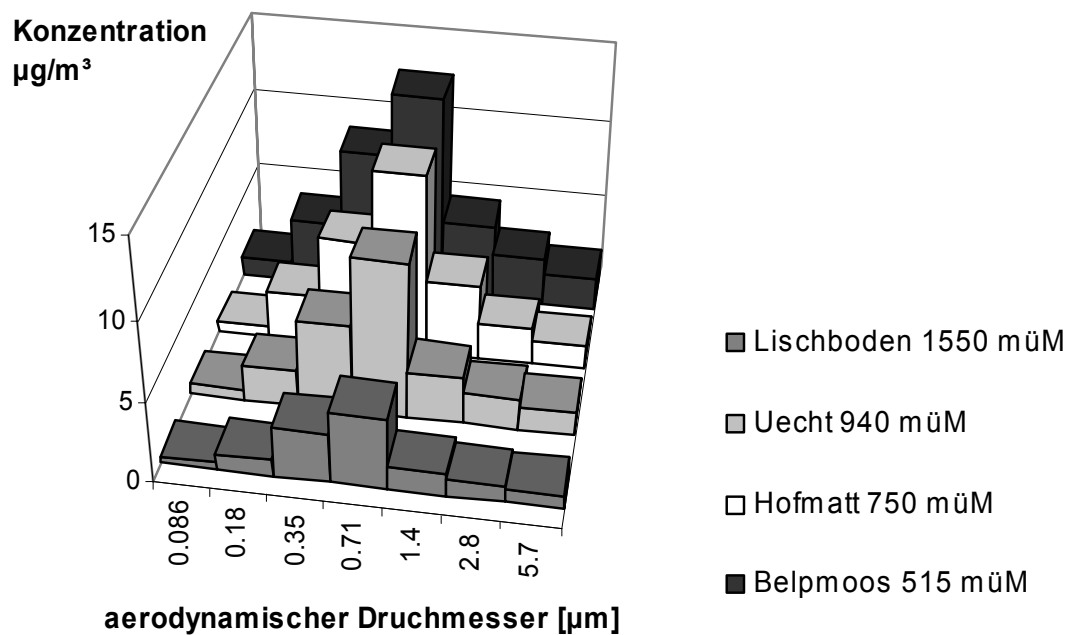
Station	Standorttyp	Jahresmittelwert 1997			Jahresmittelwert 1998		
		TSP	PM10	Verhält-	TSP	PM10	Verhält-
		µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	nis	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	nis
<b>Basel</b>	Agglomeration	34.4	30.4	88	30.0	24.0	80
<b>Bern</b>	Stadtzentrum, an Strasse	66.6	43.3	65			
<b>Chaumont</b>	ländlich, > 1000 m ü.M.	15.9	13.8	87			
<b>Dübendorf</b>	Agglomeration	31.7	29.0	91	30.0	26.7	89
<b>Härkingen</b>	ländlich, an Autobahn	36.5	32.7	90	35.0	27.4	78
<b>Lugano</b>	Stadtzentrum, Park	44.2	36.6	83	41.4	35.7	86
<b>Payerne</b>	ländlich, < 1000 m ü.M.	29.5	26.4	89	27.0	23.5	87
<b>Zürich</b>	Stadtzentrum, Park	35.5	31.3	88			

**Tabelle 6** TSP- und PM10-Parallelmessungen 1997 und 1998. (Es wurden nur Tage berücksichtigt, die gültige Werte von TSP und PM10 haben.)

Das Verhältnis PM10/TSP variiert je nach Jahreszeit. Im Winter ist es höher als im Sommer. Im Frühling wird oft ein Minimum beobachtet (Pollenflug).

#### **Verhältnis PM2.5 zu PM10**

Die Grössenverteilung (Massenanteil) der Partikel an quellenfernen Standorten zeigt ein Maximum bei einem Partikeldurchmesser von 0.5 – 1 µm. Im Bereich zwischen 2.5 und 10 µm sind nur ca. 20-30 % der Partikelmasse vorhanden. Dies bedeutet, dass PM10 in der Schweiz zu etwa 70-80 % aus PM2.5 besteht. An der strassennahen Station (Bern) ist der Anteil wegen Pneuabrieb und Aufwirbelung tiefer (50 - 60 %).



**Figur 7** Massen-Größenverteilung des Aerosols an 4 ländlichen Standorten im Kanton Bern 1985/86 mit logarithmischer Darstellung der Partikelgröße (Galli Purghart 1988).

Station	Standorttyp	Jahresmittelwert 1998			Jahresmittelwert 1999		
		PM10 µg/m <sup>3</sup>	PM2.5 µg/m <sup>3</sup>	Ver- hältnis %	PM10 µg/m <sup>3</sup>	PM2.5 µg/m <sup>3</sup>	Ver- hältnis %
Basel	Agglomeration	24.1	17.9	74	23.1	18.1	78
Bern	Stadtzentrum, an Strasse	40.4	23.3	58	37.7	20.4	54
Chaumont	ländlich, > 1000 m ü.M.	10.5	7.6	72	12.1	8.8	73
Dübendorf	Agglomeration	26.7	20.0	75			
Lugano	Stadtzentrum, Park				30.9	24.3	79
Payerne	ländlich, < 1000 m ü.M.				20.5	16.0	78
Zürich	Stadtzentrum, Park	24.4	18.9	77	25.3	18.7	74

**Tabelle 7** PM10- und PM2.5-Parallelmessungen 1998 und 1999. (Es wurden nur Tage berücksichtigt, die gültige Werte von PM10 und PM2.5 haben.)

- **Welche Beziehung besteht immissionsseitig zwischen Partikelmasse und -anzahl?**

Die Partikelzahl wird durch die ultrafeinen Partikel bestimmt, die Partikelmasse dagegen durch die feinen. Eine Studie mit Messungen an einem belasteten Stadtstandort in Deutschland (Erfurt; Peters 1997) ergab folgende Resultate (für PM2.5)

Größenklasse	Anteil an Partikelzahl	Anteil an Partikelmasse
0.01 - 0.1 µm	73 %	1 %
0.1 - 0.5 µm	27 %	82 %
0.5 - 2.5 µm	0.01 %	17 %

**Tabelle 8** Verhältnis von Partikelmasse und-anzahl bei einem städtischen Standort

Aus parallelen Messungen von Anzahl und Masse ergaben sich folgende Korrelationskoeffizienten (berechnet über 144 Tagesmittelwerte):

PM10-Masse vs. Anzahl Teilchen in Grössenklasse 0.01 - 2.5 $\mu\text{m}$	0.73
PM10-Masse vs. Anzahl Teilchen in Grössenklasse 0.01 - 0.1 $\mu\text{m}$	0.60
PM10-Masse vs. Anzahl Teilchen in Grössenklasse 0.1 - 0.5 $\mu\text{m}$	0.81
PM10-Masse vs. Anzahl Teilchen in Grössenklasse 0.5 - 2.5 $\mu\text{m}$	0.82

Die Konzentration der Teilchen lag an diesem Stadtstandort im Mittel zwischen Oktober und März bei ungefähr 15'000 Teilchen pro  $\text{cm}^3$  (Variation: 2000 - 50'000 /  $\text{cm}^3$  im Tagesmittel).

Seit Januar 2000 werden an vier NABEL-Standorten Stichprobenmessungen der Anzahl-Konzentration der Partikel mit einem optischen Partikelzähler (CNC) durchgeführt. Resultate liegen noch nicht vor.

Stichprobenmessungen im Rahmen des NFP41 während 3 Wochen im März 1998 an der autobahnnahe Station Härkingen zeigten klar den Einfluss des lokalen Verkehrs auf die Partikelkonzentration. Bei Situationen ohne Einfluss der Autobahn wurden Partikelkonzentrationen von 17'000 pro  $\text{cm}^3$  gemessen, bei Winden von der Autobahn her ergaben sich Werte von 350'000 pro  $\text{cm}^3$ .

- **Wie sieht die PM10-Exposition der schweizerischen Bevölkerung aus?**

Im Projekt "Modellierung der PM10-Belastung in der Schweiz" (BUWAL 1999a) wurde eine Karte der PM10-Belastung in der Schweiz erstellt. Damit kann die PM10-Belastung der schweizerischen Bevölkerung auf der Basis des Wohnortes bestimmt werden:

PM10-Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Bevölkerungsanteil in der entsprechenden Klasse
Klasse	Klassenmitte	
< 5	2.5	0.0%
5-10	7.5	1.2%
10-15	12.5	5.7%
15-20	17.5	31.8%
20-25	22.5	42.5%
25-30	27.5	14.6%
30-35	32.5	3.0%
35-40	37.5	0.9%
> 40	42.5	0.3%
Alle		100.0%
Einwohner 1997		7.08 Mio.

**Tabelle 9** Anteil der Bevölkerung, der in Gebieten mit verschieden hoher PM10-Belastung wohnt

Gemäss dieser Auswertung leben rund 60 % der schweizerischen Bevölkerung in Gebieten mit einer übermässigen PM10-Belastung ( $> 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Rund 4 % leben in Gebieten mit einem PM10-Jahresmittel  $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## Immissionsgrenzwerte

- **Welche Immissionsgrenzwerte gelten in der Schweiz?**

In der LRV sind seit 1. März 1998 folgende Immissionsgrenzwerte für Schwebestaub (PM10) festgelegt:

20 µg/m <sup>3</sup>	für das Jahresmittel
50 µg/m <sup>3</sup>	für das Tagesmittel (darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden)

- **Welche Grenzwerte gelten international?**

Es gibt Länder, die bereits Grenzwerte für PM10 erlassen haben. Dazu gehören

USA	50 µg/m <sup>3</sup> 150 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert 24-h-Mittelwert; 99-Perzentil Mittel über 3 Jahre
Kalifornien	30 µg/m <sup>3</sup> 50 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert, 1983 festgelegt 24-h-Mittelwert (1983)
Grossbritannien	50 µg/m <sup>3</sup>	24-h-Mittelwert; 99.9-Perzentil, einzuhalten bis 2005 <sup>1</sup>
Norwegen	40 µg/m <sup>3</sup> 70 µg/m <sup>3</sup>	Halbjahresmittelwert, 1992 festgelegt 24-h-Mittelwert (1992)

**Tabelle 10** Übersicht über PM10-Grenzwerte andere Länder

Nach der Richtlinie 1999/30/EG vom 22. April 1999 gelten für **PM10** in der EU folgende Grenzwerte (limit values):

*Stufe 1* (einzuhalten bis 1.1.2005):

40 µg/m<sup>3</sup> für das Jahresmittel

50 µg/m<sup>3</sup> für das Tagesmittel, darf nicht öfter als 35 Mal im Jahr überschritten werden.

*Stufe 2* (einzuhalten ab 1.1.2010)<sup>2</sup>:

20 µg/m<sup>3</sup> für das Jahresmittel

50 µg/m<sup>3</sup> für das Tagesmittel, darf nicht öfter als 7 Mal im Jahr überschritten werden.

In den **USA** wurden 1997 - zusätzlich zum PM10 - PM2.5-Grenzwerte eingeführt. Die Werte betragen: 15 µg/m<sup>3</sup> für das Jahresmittel und 65 µg/m<sup>3</sup> für das Tagesmittel (98-Perzentil, Mittel über 3 Jahre).<sup>3</sup>

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in der Schweiz geltenden Grenzwerte etwa gleich streng sind wie die Grenzwerte in andern Ländern, wenn sie auf wirkungsorientierten Kriterien beruhen.

<sup>1</sup> Dieser Wert wurde im Frühjahr 2000 durch den Grenzwert der EU ersetzt

<sup>2</sup> "Indicative value": Wird im Licht der neuen Erkenntnisse über Gesundheits- und Umweltauswirkungen und aufgrund der Erfahrungen mit Stufe 1 nochmals überprüft

<sup>3</sup> Unter Berücksichtigung des Anteils, den PM2.5 an PM10 hat, ist der Grenzwert für das Jahresmittel etwa gleich streng wie derjenige der Schweiz.

- **Welche Beurteilungswerte gibt es für Russ?**

In Deutschland gilt seit Mitte 1998 ein Prüfwert für Russ (EC, elementaren Kohlenstoff) von  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für das Jahresmittel. Dieser Wert gilt an hochbelasteten Standorten. Der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) hat zur Verminderung des Krebsrisikos für die Bevölkerung einen Richtwert von  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Jahresmittelwert) vorgeschlagen. Dieser Wert ist als flächenbezogener Beurteilungswert für eine 70-jährige Einwirkung definiert.

- **Warum begrenzt man ausgerechnet PM10?**

PM10 entspricht demjenigen Anteil des luftgetragenen Staubes, der weiter als bis zum Kehlkopf in den Atemtrakt hinein gelangt. Dort kommt es zu schädlichen Wirkungen.

- **Aufgrund welcher Kriterien werden die Immissionsgrenzwerte in der Schweiz festgelegt?**

Absatz 1 des Zweckartikels (Art. 1) des USG lautet: "Dieses Gesetz soll Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche und lästige Einwirkungen schützen und die Fruchtbarkeit des Bodens erhalten."

In Artikel 14 heisst es: "Die Immissionsgrenzwerte für Luftverunreinigungen sind so festzulegen, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb dieser Werte

- a) Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume nicht gefährden;
- b) die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören;
- c) Bauwerke nicht beschädigen
- d) die Fruchtbarkeit des Bodens, die Vegetation und die Gewässer nicht beeinträchtigen.

Artikel 13, Absatz 2 schreibt vor: "Er [der Bundesrat] berücksichtigt dabei auch die Wirkung der Immissionen auf Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit, wie Kinder, Kranke, Betagte und Schwangere."

Dem Zusammenwirken verschiedener Schadstoffe, die sich in ihren Auswirkungen gegenseitig verstärken können, ist Rechnung zu tragen.

- **Welches sind die Grundlagen zur Grenzwertfestlegung?**

Grundlagen für die PM10-Grenzwerte sind das USG, die Dosis-Wirkungstabellen der WHO und eine Vielzahl von epidemiologischen Studien, die in der Schweiz und in anderen Ländern durchgeführt wurden. Die wissenschaftlichen Grundlagen für die Grenzwertfestlegung im In- und Ausland sind sehr gut.

- **Gibt es einen Schweizer Alleingang bei den PM10-Grenzwerten?**

Die EU kommt - basierend auf der Risikobeurteilung durch die WHO und Empfehlungen der „Ambient Air Quality Steering Group“ - zu ähnlichen Vorschlägen wie die Grenzwerte der Schweiz. In den USA wurden - auf der Basis von PM2.5 - ähnlich strenge Grenzwerte in Kraft gesetzt. England hat den gleichen Kurzzeitgrenzwert erlassen wie die Schweiz. Dieser wurde u.a. vom Auto-Oil-Programm der EU als „agreed air quality target value“ übernommen. Von einem Alleingang kann nicht gesprochen werden.

Betreffend der Sachlichkeit der Diskussion ist der Bundesrat zudem der Auffassung, dass medizinisch begründete Grenzwerte eine gute Grundlage bilden und ein Klima des Vertrauens zwischen Bevölkerung, Behörden und Politik schaffen (Amtliches Bulletin 1997).

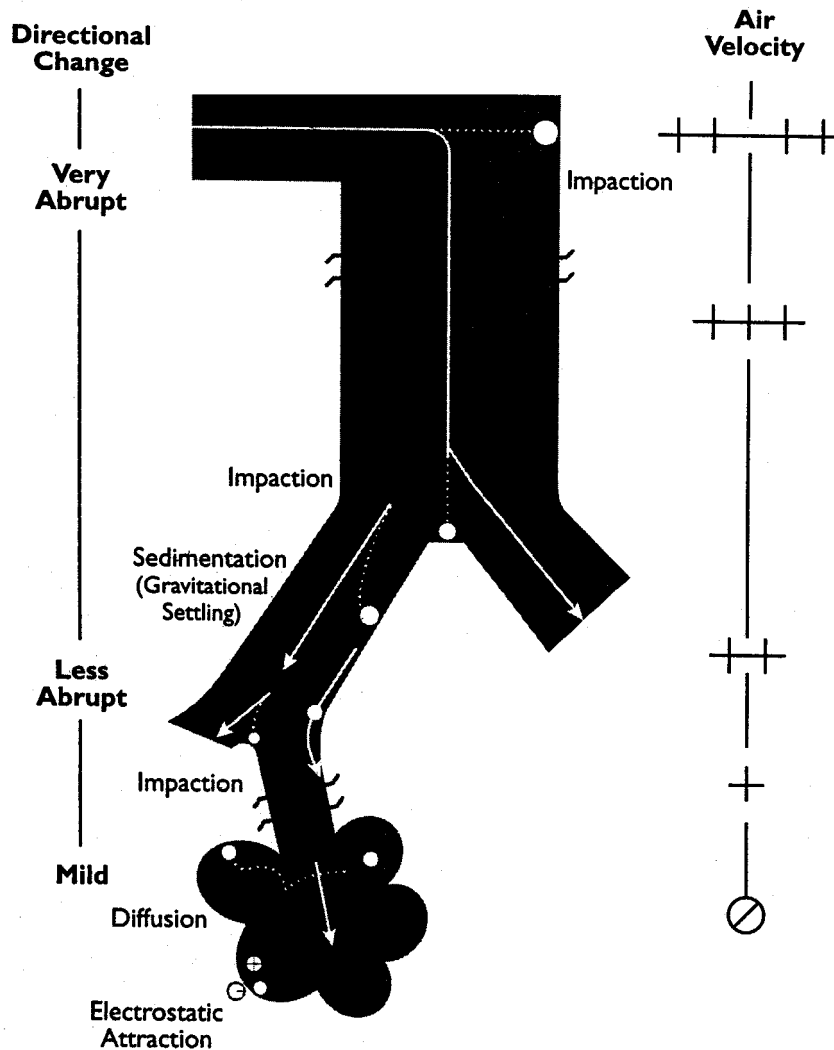
- **Müssten nicht Massnahmen zur Senkung der Feinstaubbelastung bekannt sein, bevor Immissionsgrenzwerte für PM10 eingeführt werden?**

Immissionsgrenzwerte stellen eine Messlatte oder ein Beurteilungskriterium für die Luftverschmutzung dar. Im Vergleich mit den aktuellen Immissionen kann der Handlungsbedarf abgeleitet werden. Danach müssen geeignete Massnahmen ermittelt werden. Die Einführung der Immissionsgrenzwerte für PM10 erforderte keine grundsätzliche Neuorientierung der schweizerischen Luftreinhaltepolitik. Massnahmen zur Senkung der Feinstaubbelastung der Atemluft sind bekannt. Die vor der Einführung des PM10-Immissionsgrenzwertes getroffenen Luftreinhalte-Massnahmen haben bereits zu einer Verminderung der PM10-Belastung geführt. Die weiteren inzwischen eingeleiteten Massnahmen tragen ebenfalls zur Reduktion bei. In Ergänzung dazu sind gezielte Massnahmen zur Senkung der primären Partikel nötig (s. S. 36).

## Auswirkungen

- Welche Partikel werden wo deponiert?

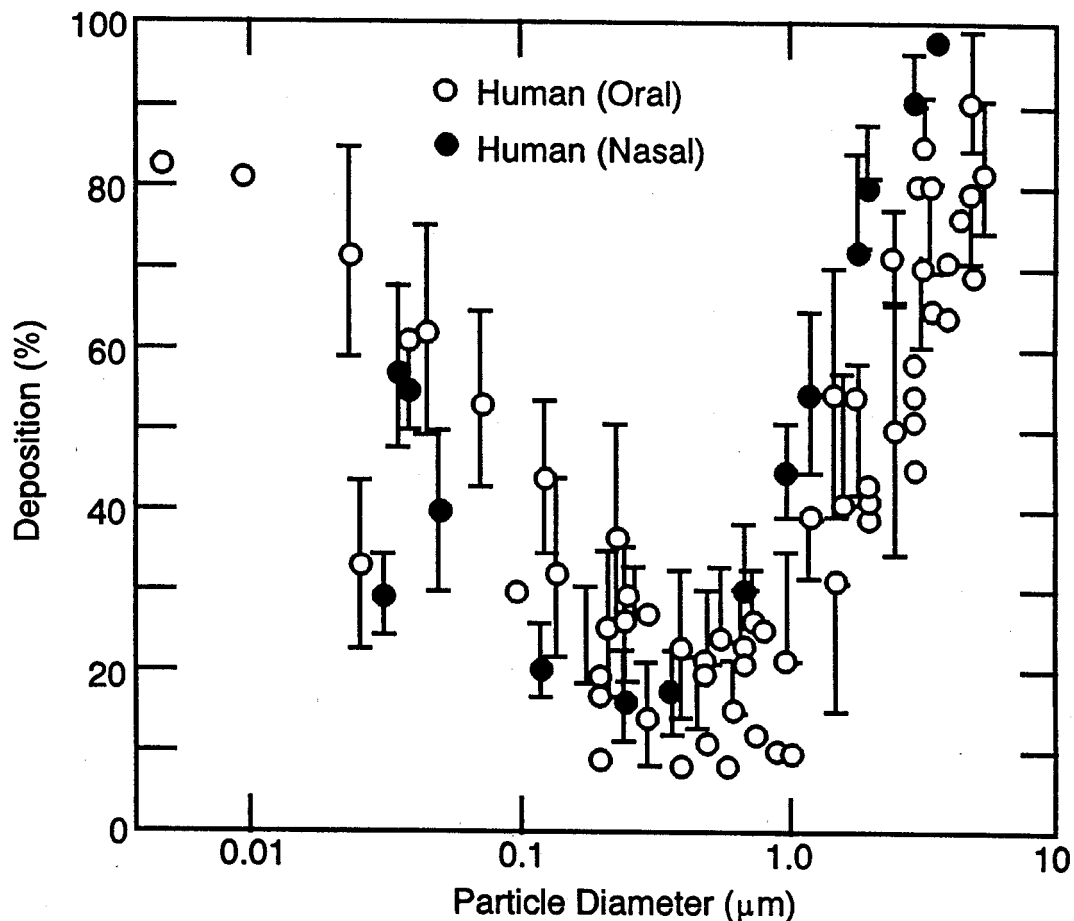
Mit jeder Einatmung gelangen Tausende von Partikeln in unsere Lunge, wo sie je nach Grösse in den luftleitenden Atemwegen oder im Gasaustauschbereich - den Alveolen - abgelagert werden. Die folgende schematische Darstellung der Atemwege (Nase, Rachen, Luftröhre, Bronchien, Bronchiolen, Alveolen) zeigt die Mechanismen der Partikeldeposition.



**Figur 8** Schematische Darstellung der Atemwege und der Mechanismen der Partikeldeposition. Der Luftstrom ist mit Pfeilen, die Partikel-Trajektorien mit gestrichelten Linien gekennzeichnet.

Teilchen über ca. 10  $\mu\text{m}$  werden nicht eingeatmet. Teilchen zwischen etwa 7-10  $\mu\text{m}$  werden vorwiegend in der Nase zurückgehalten. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer dringen sie in die Lunge ein, wobei zu beachten ist, dass hygroskopische Teilchen in der feuchten Atemluft beträchtlich anwachsen können. Teilchen unter 7  $\mu\text{m}$  werden durch Impaktion und Sedimentation im Rachen, der Luftröhre und in den Bronchien oder durch Diffusion in den Bronchiolen und Lungenbläschen (Alveolen) abgeschieden.

Die folgende Abbildung zeigt, dass von den eingeatmeten Partikeln die grösseren und ganz kleinen fast vollständig deponiert werden, während im Grössenbereich von 0.2-0.3  $\mu\text{m}$  die Depositionswahrscheinlichkeit am kleinsten ist. Diese Partikel werden zum größeren Teil wieder ausgeatmet. Die Partikel sind zu klein, um durch Impaktion effizient deponiert zu werden, aber noch zu gross, um an die Wände der Alveolen zu diffundieren.



**Figur 9** Grössenverteilung der Partikeldeposition in der Lunge in Prozenten der totalen inhalierten Masse.

- **Wie werden die Partikel wieder aus der Lunge entfernt?**

Die Luftröhre, die Bronchien und Bronchiolen sind mit Flimmerhaaren (Zilien) ausgekleidet. Die Spitzen der Flimmerhaare ragen in den darüberliegenden, hochviskösen, zusammenhängenden Schleimteppich (Mucus), der in der Luftröhre 8-12  $\mu\text{m}$ , in den Bronchiolen nur noch 0.1  $\mu\text{m}$  dick ist. Durch eine Partikel-Oberflächenfilm-Interaktion (coating) ermöglicht dieses System die Entfernung eingedrungener Partikel. Die feinen Härchen transportieren den Flüssigkeitsfilm samt den darin haftenden Partikeln durch Wellenbewegungen in Richtung Rachen, wo er laufend verschluckt oder ausgehustet wird (mukoziliäre Clearance).

In den Alveolen hat es keine Flimmerhaare und keinen Schleim mehr. Die Partikel, die bis in die Lungenbläschen gelangt sind, werden durch Makrophagen entfernt (alveoläre Clearance). Makrophagen sind Fresszellen, welche Partikel, aber auch eingedrungene Bakterien und Trümmer zerstörter Zellen aufnehmen.



Wenn sie unverdauliches Material aufgenommen haben, wandern sie über die zuleitenden Atemwege in Richtung Rachen und werden ausgeschieden. Tierversuche zeigen, dass die Makrophagen bei sehr hoher Partikelbelastung zuviel Partikel verschlingen, schliesslich platzen und die Partikel wieder freigesetzt werden. Ob dieser Effekt auch bei einer „normalen“ Partikelbelastung auftritt, ist noch Gegenstand von Untersuchungen.

- **Wie lange bleiben die Partikel in der Lunge?**

Je nach Eindringtiefe und Partikelgrösse dauert der Abtransport der Partikel unterschiedlich lang. Während innert 24 Stunden über 90% der Partikel  $> 6 \mu\text{m}$  ausgeschieden werden, sind es bei den Partikeln  $< 1 \mu\text{m}$  im selben Zeitraum weniger als 30%. Bei entzündlichen Prozessen in der Lunge und bei obstruktiven Atemwegserkrankungen (Asthma, Bronchitis), welche die Zusammensetzung des Mukus verändern oder die Makrophagen schädigen, kann der Abtransport der Partikel stark verzögert werden. Die Ausscheidungszeit beträgt dann Monate bis Jahre. Deswegen besteht bei wiederholter und chronischer Belastung mit feinen Partikeln die Gefahr einer Anreicherung dieser Partikel in der Lunge. Tabakrauch, Säuren, Metalle und andere für die Makrophagen giftige Stoffe verlangsamen die alveoläre Clearance zusätzlich. Partikel, welche wesentlich kleiner sind als  $1 \mu\text{m}$  können durch das Alveolarepithel hindurch in das Lymphsystem und in die Blutbahn gelangen. Sie werden durch das Immunsystem abgebaut oder über die Nieren ausgeschieden.

- **Epidemiologische Studien, Aussagen und Grenzen**

Mit epidemiologischen Studien ist es möglich, die Wirkungen tatsächlich vorkommender Schadstoffbelastungen zu erfassen. Niedrige, langandauernde Expositionen sind nur mit solchen Studien erfassbar. Die Studienpopulation kann repräsentativ für die Gesamtbevölkerung ausgewählt werden. Bei der Exposition wird ein Schadstoffmix erfasst. Die beobachteten Wirkungen einem bestimmten Einzelschadstoff zuzuordnen, ist oft schwierig. Weitere Einflussgrössen (Alter, Geschlecht, Berufsexposition, Rauchen, Meteo etc.) müssen erfasst und bei der Auswertung der Studien berücksichtigt werden.

Die Beziehung zwischen Gesundheitsfaktor und Belastung wird mit statistischen Methoden erfasst. Um einen ursächlichen Zusammenhang zwischen Schadstoffexposition und gesundheitlicher Störung postulieren zu können, müssen folgende Kriterien erfüllt sein:

- Das Gesamturteil sollte auf mehreren, methodisch korrekten Studien basieren.
- Die Exposition geht der Krankheit voraus.
- Verschiedene Studien kommen mit unterschiedlichen Methoden und Studienpopulationen und unter verschiedenen klimatischen Verhältnissen zu vergleichbaren Ergebnissen (Konsistenz).
- Die Gesundheitsstörung nimmt mit steigender Exposition zu (Dosis-Wirkungsbeziehung).
- Der Zusammenhang wurde bei vielen gesundheitlichen Zielgrössen wie Lungenfunktion, Atemwegsbeschwerden, Spitaleintritten oder Sterblichkeit beobachtet (Kohärenz).
- Die Zusammenhänge sind bei empfindlichen Bevölkerungsgruppen oder spezifischen Zielgrössen stärker ausgeprägt (Spezifität).
- Die Wirkung ist biologisch plausibel.

- **Toxikologische Studien, Aussagen und Grenzen**

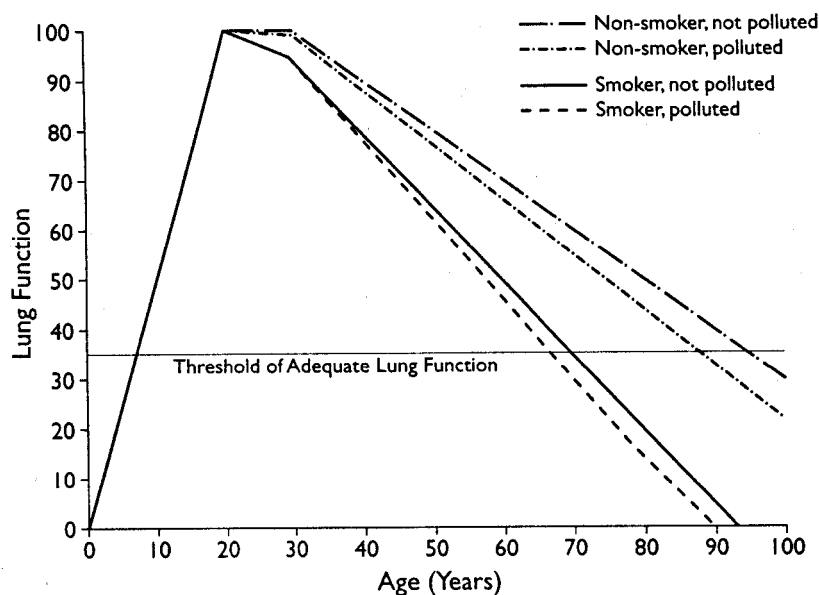
Toxikologische Studien werden meistens mit Tieren oder Zellkulturen durchgeführt. Experimente mit meist jungen, gesunden Probanden finden vereinzelt ebenfalls statt. In derartigen Studien können die Expositionsbedingungen und weitere Einflussvariablen im Gegensatz zu den epidemiologischen Studien relativ genau kontrolliert werden. Die Übertragung eines Experimentes mit wenigen Tieren auf ganze Bevölkerungsgruppen ist jedoch sehr schwierig. Einzelne Tierfamilien können auf die gleiche Belastung ganz unterschiedlich reagieren. Eine Substanz kann z.B. für Mäuse hochtoxisch sein, während die Ratte kaum reagiert - ist der Mensch eher eine Maus oder eine Ratte? Oder Rattenweibchen einer bestimmten Art reagieren ganz anders als die Männchen. In der Toxikologie werden zumeist ganz gesunde Tiere verwendet - wie reagieren kranke z.B. asthmatische Tiere? Meist werden im Tierversuch auch sehr hohe Dosen eingesetzt und die Ergebnisse mit Hilfe von Sicherheitsfaktoren oder Extrapolationen für die umweltrelevanten Konzentrationen interpretiert. Während Tierversuche für die Bestimmung eines Risikos für eine ganze Bevölkerung nicht sehr hilfreich sind, können sie bei der Abklärung von Wirkungsmechanismen wertvolle Dienste leisten.

- **Wirkungsmechanismen**

Die Wirkungsmechanismen der Partikel sind im Moment Gegenstand von intensiven Untersuchungen. Zur Erklärung des Zusammenhanges zwischen Partikelbelastung und Mortalität werden folgende Hypothesen diskutiert:

- erhöhte Anfälligkeit für Infektionen wegen geschwächter Immunabwehr
- Entzündungen der Atemwege, welche zu einem verminderten Gasaustausch und zur Hypoxie (weniger Sauerstoff in bestimmten Körperregionen) führen
- Entzündungen der Alveolen, hervorgerufen durch ultrafeine Partikel, welche zur Ausschüttung von Botenstoffen und als Folge zu einer erhöhten Blutgerinnung und damit zu einem erhöhten Risiko für einen Herzinfarkt führen
- erhöhte Durchlässigkeit der Lunge, welche zum Lungenödem führt
- vorzeitiges Herzversagen bei Personen mit chronischen Herzkrankheiten durch akute Bronchiolitis oder Pneumonie, hervorgerufen durch die Partikel.

Eine weitere Erklärung der verkürzten Lebenserwartung bei Partikelbelastung ist die Abnahme der Lungenfunktion. Die folgende Grafik zeigt, dass die Abnahme der Lungenfunktion bei Nichtrauchern einer stark mit Partikeln belasteten Stadt eine bis um 6 Jahre kürzere Lebenserwartung erklären kann.



**Figur 10** Verlauf der Lungenfunktion bei Rauchern und Nichtrauchern in verschmutzter und nicht-verschmutzter Atemluft (Wilson 1996).

Toxikologische Untersuchungen an Ratten zeigen, dass die ultrafeinen (20 nm) und die hydrophoben Partikel ein besonderes Risiko (erhöhte Mortalität) darstellen (Oberdörster 1992). Diese Partikel provozierten auch ein starkes Anschwellen des Mukus. Russpartikel ohne PAH hatten im Experiment die gleiche Wirkung wie Russpartikel mit PAH (Dieselruss) (Pott 1991). Die Bedeutung der Partikelazidität ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  grösserer Effekt als  $\text{SO}_2$ ) und der Übergangsmetalle ( $\text{Fe}^{3+}$ ) (Dreher 1997) wird kontrovers diskutiert. Im Tierexperiment haben sich lösliche Partikel, wie z.B. Ammoniumnitrat erst in sehr hohen Dosen als wirkungsrelevant erwiesen. Allerdings enthalten "lösliche" Partikel in der Umgebungsluft fast immer auch unlösliche Anteile.

Zur Festlegung von Immissionsgrenzwerten sind genaue Kenntnisse über die Wirkungsmechanismen nicht notwendig. Die epidemiologischen Grundlagen sind überzeugend genug. Erklärungen, welche die beobachteten Wirkungen biologisch plausibel erscheinen lassen, sind vorhanden. Es ist auch zu erwarten, dass bei einer so grossen Vielzahl von beobachteten Wirkungen nicht nur ein einziger Wirkungsmechanismus hinter den Partikelwirkungen steht. Kleinkinder oder Asthmatiker reagieren auf die Partikelbelastung wahrscheinlich anders als Personen mit bestehenden Herzkrankheiten.

- **Sind die Immissionsgrenzwerte für PM<sub>10</sub> wissenschaftlich genügend abgestützt, da insbesondere wenig über die Wirkungsmechanismen bekannt ist?**

Epidemiologische Studien an über 10'000 Erwachsenen und an über 5'000 Kindern in der Schweiz sowie sehr viele Studien aus dem Ausland zeigen ein einheitliches Bild. Die Konzentrationen der lungengängigen Stäube, welche heute in der Schweiz gemessen werden, haben bedeutende gesundheitliche Auswirkungen auf die Bevölkerung. Auch wenn die Wirkungsmechanismen noch nicht in allen Details bekannt sind, sind die Grundlagen für die Festlegung der Immissionsgrenzwerte gegeben. Insbesondere ist die epidemiologische Datenlage für die Festlegung von Immissionsgrenzwerten sehr gut.

- **Welches sind die gesundheitlichen Auswirkungen bei einer kurzfristig, d.h. von Tag zu Tag variierenden PM10-Belastung?**

Die Auswirkungen eines Tages mit höheren PM10-Belastungen sind meist am Tag danach am stärksten erkennbar. Sie dauern im allgemein aber länger und sind oft auch am 2. folgenden Einzeltag signifikant nachweisbar. In vielen Studien werden die Wirkungen daher auch über 3 oder bis fünf Tage zusammengefasst.

Eine Erhöhung der PM10-Belastung am Stichtag um  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ergab folgende Veränderungen bei den verschiedenen gesundheitlichen Auswirkungen:

	24-h-Mittelwerte während der Studie	Veränderungen bei einer Erhöhung von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$		
Gesamte Todesfälle ohne Unfälle	5-120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	+ 0.5-1.5%	Pope 1998	
Spitaleintritte	Atemwegs-Todesfälle	"	1.5-4%	
	Herz-Kreislauf- Todesfälle	"	0.5-2%	
	wegen Lungenentzündung und chronischer Bronchitis	24-46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	+ 2%	Samet et al. 2000
	wegen Herzkrankheiten	"	+ 1%	"
	wegen Asthma bei jüngeren Personen	19-39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	+ 2.5%	Sheppard et al. 1999
Notfallkonsulta- tionen wegen Asthma, Kinder	9-105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	+ 2.6%	Tolbert et al. 2000	

**Tabelle 11** Veränderung der Häufigkeit von Symptomen bei einer kurzzeitigen Erhöhung von PM10 um  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

- **Welches sind die gesundheitlichen Auswirkungen bei langfristig (im Jahresmittel) unterschiedlichen PM10-Belastungen?**

Bei einer im Jahresmittel durchschnittlich um  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erhöhten PM10-Belastung um ergeben sich folgende Veränderungen bei den verschiedenen gesundheitlichen Auswirkungen:

	Jahresmittelwerte	Veränderungen bei einer Erhöhung von 10 µg/m <sup>3</sup>	
Gesamtsterblichkeit	18-47 µg PM10/m <sup>3</sup>	+ 9%	Dockery et al., 1993
Gesamtsterblichkeit Herz-/Lungentodesfälle Lungenkrebstodesfälle	11-29.6 µg PM2.5/m <sup>3</sup>	+ 14% + 20% + 20%	Dockery et al., 1993
Gesamtsterblichkeit Todesfälle an Herz- und Lungenkrankheiten an Lungenkrebs	9-33.5 µg PM2.5/m <sup>3</sup>	+ 6.9%  + 12.6% ns	Pope et al., 1995
Gesamtsterblichkeit (Nichtraucher)	10-84 µg PM10/m <sup>3</sup>	Männer +4.6% ns Frauen ns	Abbey 1999
Atemwegstodesfälle (Nichtraucher)		Männer +9% Frauen +4% ns	
Lungenkrebstodesfälle (Nichtraucher)		Männer +98% Frauen +14% ns	
Todesfälle bei Säuglingen wegen Atemwegserkrankungen	12-89 µg PM10/m <sup>3</sup>	+20%	Woodruff 1997
Lungenfunktion: Forcierte Vitalkapazität	10-34 µg PM10/m <sup>3</sup>	-3.1%	Ackermann-Liebrich et al., 1997
Forcierte Sekundenkapazität		-1%	
chronischer Husten/Auswurf (Nichtraucher)	10-34 µg PM10/m <sup>3</sup>	+ 27%	Zemp et al., 1999
Atemnot bei körperlicher Tätigkeit (Nichtraucher)		+32%	
Kinder: Atemwegsinfektionen	10-33 µg PM10/m <sup>3</sup>	+26%	Braun-Fahrländer et al., 1997
häufig Husten		+54%	
Kinder: Bronchitis	20-59 µg PM15/m <sup>3</sup>	+ 37%	Dockery et al., 1989
chron. Husten		+ 67%	

**Tabelle 12** Veränderung der Häufigkeit von Symptomen bei einer Erhöhung des PM10-Jahresmittels um 10 µg/m<sup>3</sup>

- **Wieviele Personen sind bei bestimmten PM10-Belastungen von Atemwegserkrankungen betroffen?**

PM10-Jahresmittelwert	10	15	20	25	30	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Grippe und/oder Bronchitis, Kinder	32	35	37	40	43	45 %
Wiederholt Husten, Kinder	24	28	32	37	42	47 %
Atemnot bei Nierauchern	5	6	7	8	10	11 %
Chronischer Husten oder Auswurf bei Nierauchern	5	5	6	7	8	9 %

**Tabelle 13** Anteil der Personen, die von Symptomen betroffen sind, in Abhängigkeit der PM10-Belastung (EKL 1996)

So haben zum Beispiel in einer Ortschaft mit einem durchschnittlichen Jahresmittelwert von  $10 \mu\text{g PM}_{10}/\text{m}^3$  24% aller Kinder häufig Husten. Bei einem Jahresmittelwert von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sind es bereits 42%.

- **Sind die groben (2.5-10  $\mu\text{m}$ ), die feinen (<2.5  $\mu\text{m}$ ) oder die ultrafeinen Partikel (<0.1  $\mu\text{m}$ ) aus gesundheitlicher Sicht wichtiger?**

Dies ist noch Gegenstand von Untersuchungen. Neuere Studien zu den akuten Wirkungen zeigen, dass sowohl die groben wie auch die feinen Partikel Auswirkungen auf Mortalität und Morbidität haben (Lippmann 2000). Aus Untersuchungen an Ratten mit ultrafeinen Titandioxid-Partikeln ergeben sich Hinweise, dass ultrafeine Partikel viel toxischer (schwere Entzündungsreaktionen, Lungenödem, Mortalität) wirken als die feinen. Auf Grund der Resultate einer Tagebuchstudie an Erwachsenen mit Asthma in Erfurt (Peters 1997) wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Zahl der ultrafeinen Partikel eine stärkere Beziehung zur Lungenfunktion habe als die Masse (gravimetrische Messung). Bei den Kindern mit Asthma derselben Studie und bei den Asthmakindern einer ähnlichen Studie in Finnland (Pekkanen 1997) bestätigte sich diese Hypothese jedoch nicht. PM10 war in allen diesen Studien ein guter, wenn nicht der beste Indikator für Asthmasymptome. Eine neue Studie aus Erfurt (Wichmann 2000) zeigt, dass sowohl feine als auch ultrafeine Partikel akute Auswirkungen auf die Mortalität haben. Die Wirkungen sind weitgehend unabhängig voneinander und in der gleichen Größenordnung.

Schwebestaubproben der Aussenluft enthalten in der groben Fraktion auch gramnegative Bakterien, Endotoxine und andere Partikel biologischer Herkunft, welche Entzündungsvorgänge auslösen können. Die grobe Fraktion der Schwebestaubpartikel (PM10-PM2.5) allein ist stärker mit Husten, Asthmaanfällen und respiratorischer Mortalität assoziiert, dagegen sind die feinen Anteile (PM2.5) stärker mit Herzrhythmusstörungen oder einem Anstieg der kardiovaskulären Mortalität korreliert.

- **Was ist für die Wirkung der Partikel von Bedeutung?**

Aerosolpartikel sind in ihrer Zusammensetzung und ihrer Wirkung komplex. Bereits die Abscheidung von Partikeln, die keine für den Körper toxischen Substanzen enthalten, bedeutet eine Belastung für die Lunge, da die Partikel wieder entfernt werden müssen. Es wurde nachgewiesen, dass auch derartige, an sich "inerte" Partikel zu Krebs führen können (z.B.  $\text{TiO}_2$ , PAH-freier Russ). Viele Partikel in der Atemluft sind zudem Träger von krebserregenden Substanzen wie PAH, Cd und  $\text{Cr}^{\text{VI}}$ , von Schwermetallen und Säuren. Die epidemiologischen Studien zeigen klare Zusammenhänge zwischen der PM10-Belastung und Herz-Kreislauf- sowie Atemwegserkrankungen. Hingegen gibt es bisher zu wenig Evidenz, um die beobachteten Wirkungen einzelnen Komponenten des Aerosols zuzuschreiben.

- **Wie können die akuten Wirkungen von Partikeln auf die Gesundheit zusammenfassend beurteilt werden (Stand Ende 2000)?**

Aufgrund der bisher publizierten Studien ergibt sich folgendes Bild:

- Partikel, die grösser sind als PM10, haben praktisch keine Auswirkungen.
  - Sowohl die groben Partikel (beurteilt als Massendifferenz zwischen PM10 und PM2.5 bzw. zwischen PM10 und PM1) als auch die feinen Partikel (beurteilt als Masse PM2.5 oder PM1) wie auch die ultrafeinen Partikel (beurteilt als Anzahl kleiner  $0.1 \mu\text{m}$ ) haben Auswirkungen auf Mortalität und Morbidität. Die Wirkungen sind weitgehend unabhängig voneinander.
  - Die grobe Fraktion von PM10 ist stärker mit Husten, Asthmaanfällen und respiratorischer Mortalität assoziiert, dagegen sind die feinen Anteile stärker mit Herz-Rhythmusstörungen und kardiovaskulärer Mortalität korreliert. Die Wirkungen der feinen Partikel können nicht durch die ultrafeinen allein, diejenigen der groben nicht durch die feinen erklärt werden.
  - Bei den heute üblicherweise vorkommenden Konzentrationen und Schwankungsbreiten sind die grobe, die feine und die ultrafeine Fraktion in etwa gleich wirksam.
  - Wirkungen auf die respiratorische Mortalität treten sofort oder einen Tag nach der erhöhten Partikelbelastung auf. Wirkungen auf die kardiovaskuläre Mortalität sind nach etwa 4 Tagen am stärksten sichtbar. Das bedeutet, dass die Wirkung der groben Partikel sofort bis leicht verzögert auftritt, jene der feinen und ultrafeinen etwas später (bis 4 Tage nach Belastungsanstieg). Das relative Risiko ist für die respiratorische Mortalität grösser. Durch die kardiovaskuläre Mortalität sind aber mehr Leute betroffen.
  - Personen mit Erkrankungen der unteren Atemwege, mit Herzinsuffizienz und über 65-Jährige tragen ein höheres Risiko.
  - Die Wirkungen wurden in epidemiologischen, toxikologischen und klinischen Studien nachgewiesen.
- **Wie können die chronischen Wirkungen von Partikeln auf die Gesundheit zusammenfassend beurteilt werden (Stand Ende 2000)?**

Aufgrund der bisher publizierten Studien ergibt sich folgendes Bild:

- Die chronischen Auswirkungen sind bedeutender als die akuten.
  - In epidemiologischen Studien sind erhöhte PM10-, PM2.5 oder Sulfatbelastungen mit erhöhter Mortalität und Morbidität korreliert.
  - Elementarere Kohlenstoff (Dieselruss) hat ein grosses kanzerogenes Potential.
  - Studien, die bei der Mortalität und Morbidität in der Allgemeinbevölkerung zwischen der chronischen Wirkung von groben, feinen und ultrafeinen Partikeln unterscheiden können, gibt es (noch) keine.
- **Was bedeuten diese Erkenntnisse für die Luftreinhalte-Politik?**

Beurteilungskriterien sollten die groben, die feinen und die ultrafeinen Partikel umfassen. Eine Kombination von PM10, PM2.5 (oder PM1) sowie die Anzahl oder Oberfläche der ultrafeinen Partikel scheint ein geeigneter Beurteilungsmassstab zu sein. Die Qualität der Aussenluft in Bezug auf ultrafeine Partikel kann nicht auf der Basis von PM10 oder PM2.5 allein beurteilt werden. Auch bei abnehmender PM10-Belastung konnten an gewissen Orten Belastungszunahmen bei den ultrafeinen Partikel beobachtet werden. Massnahmen zur Reduktion der Partikelbelastung sollten deshalb alle Grössenklassen umfassen (vgl. BUWAL 1998), also sowohl grobe als auch feine und ultrafeine Partikel.
  - **Wie verhält sich die PM10-Belastung im Vergleich zur Belastung durch das Rauchen (passiv/aktiv)?**

Für das einzelne Individuum stellt Aktivrauchen das viel grössere gesundheitliche Risiko dar, als die Luftverschmutzung durch Partikel. Das Lungenkrebsrisiko zum Beispiel ist für einen Raucher 8-10 mal (800-1000%) so hoch wie für einen Nieraucher, während ein Bewohner einer stark mit Partikeln belasteten Stadt ein ca. 1.3 mal so hohes (d.h. 30% höheres) Lungenkrebsrisiko trägt wie (als) ein Bewohner einer schwach belasteten Gegend. Auch das Risiko, vorzeitig zu sterben (alle Ursachen zusammengenommen), ist bei einem Raucher immer noch 2 mal so hoch wie bei einem Nieraucher. Die Bewohner von stark mit Partikeln belasteten Städten tragen ein ca.1.2 mal so hohes Risiko, vorzeitig zu sterben, verglichen mit schwach belasteten Personen. Für die öffentliche Gesundheit ist die Partikelbelastung in den Städten dennoch ein grosses Problem, da viele Menschen davon betroffen sind. Regelmässige Passivraucher (zu Hause, am Arbeitsplatz) tragen ähnliche Risiken wie die Bewohner von stark belasteten Städten.
  - **Wie hoch ist die Belastung von Innenräumen?**

Der Schwebstaubgehalt der Raumluft in unbenutzten Räumen beträgt etwa 70 % der PM10-Belastung der Aussenluft. Sobald sich Menschen im Raum aufhalten, wird der Schwebstaubgehalt wesentlich beeinflusst. Die Erhöhung der Staubbelastung ist von der Aktivität (z.B. Staubsaugen, Kochen, Umhergehen) und von Quellen im Rauminnern (z.B. Gasherde) abhängig. Die PM10-Belastung in Raucherwohnungen ist wesentlich höher als in Nichtraucherwohnungen (ETH, 1997).
  - **Welche Auswirkungen auf die Umwelt hat PM10 (Boden, Wasser)?**

Ein wesentlicher Teil des Stoffflusses in die Umwelt erfolgt über Aerosole (z.B. Schwermetalle, Dioxine/Furane, Schwefel, Stickstoff). Der Staub gelangt über



nasse oder trockene Deposition auf die Erdoberfläche. Der Eintrag wird z.B. im NABEL-Messnetz als Staubbiederschlag (gesamt) mittels Bergerhoff-Gefässen erfasst. Er kann aber an Stellen mit hoher Vegetation - z.B. durch Auskämmen von Partikeln, Nebel- und Wolkenröpfchen durch Baumkronen - noch wesentlich grösser sein, als mit der erwähnten Methode bestimmt wird. Der Eintrag führt zur Belastung des Bodens, des Wassers, der Pflanzen und - über die Nahrungskette - auch des Menschen.

- **Können wir die feinen Partikel mit unseren Sinnen erfassen?**

Partikel streuen das Licht und sind z.B. bei sommerlichen Hochdrucklagen als Dunst oder bei winterlichen Inversionen von erhöhten Standorten aus als bräunliche Trübung "sichtbar". Sie vermindern die Sichtweite (vgl. EDI 1984).

- **Welches sind die externen Kosten, die aus der heutigen PM10-Belastung in der Schweiz erwachsen?**

Das GS EVED (Dienst für Gesamtverkehrsfragen) hat die Auswirkungen der anthropogenen Luftverschmutzung bezüglich Mortalität und Morbidität mit PM10 als Indikator für das Jahr 1993 geschätzt (GS EVED 1996). In der Studie werden die jährlichen Gesundheitskosten auf knapp 3 Milliarden Franken als untere Grenze beziffert, wobei rund die Hälfte dem Verkehr als Verursacher angelastet werden muss.

In einem tri-lateralen Forschungsprojekt unter der Schirmherrschaft der WHO wurden 1999 die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten für Frankreich, Österreich und die Schweiz für das Jahr 1996 ermittelt. Als Indikator für die Luftbelastung wurde PM10 gewählt. Auf Grund einer neuen Bewertung der Morbiditäts- und Mortalitätsfälle nach dem Zahlungsbereitschaftsansatz werden in dieser Studie für die Schweiz jährliche Gesundheitskosten von gut 6 Milliarden Franken ausgewiesen (Seethaler 1999).

- **Welche gesundheitlichen Schäden könnten bei Einhaltung der IGW vermieden werden?**

Bei Einhaltung der geltenden Immissionsgrenzwerte für PM10 könnten 2'400 vorzeitige Todesfälle, über 20'000 Fälle von chronischer Bronchitis und gegen 30'000 Fälle von Bronchitis bei Kindern verhindert werden.

## Massnahmen

- **Welche Massnahmen wurden bisher getroffen, um die PM10-Belastung zu vermindern?**

Seit dem Inkrafttreten der Luftreinhalte-Gesetzgebung haben Bund, Kantone und Gemeinden eine Vielzahl von Massnahmen getroffen, um den Ausstoss von PM10 und seinen Vorläuferschadstoffen zu vermindern:

- Emissionsbegrenzungen für etwa 150 verschiedene Schadstoffe und über 40 industrielle und gewerbliche Anlagentypen; Vorschriften über Lagerung und Umgang mit staubenden Gütern
- Qualitätsanforderungen an Brenn- und Treibstoffe (Einführung von bleifreiem Benzin und Begrenzung des Schwefelgehaltes)
- Einführung einer Lenkungsabgabe auf dem Schwefelgehalt von Heizöl EL
- stufenweise Einführung einer Lenkungsabgabe auf flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)
- Abgasgrenzwerte für Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen, Motorräder, Mofas, Gesellschaftswagen, Busse, Strahlflugzeuge und Motorboote
- Abgaswartungspflicht für Strassenfahrzeuge mit Benzin- und Dieselmotoren
- Senkung der allgemeinen Höchstgeschwindigkeiten auf Autobahnen resp. Ausserortsstrassen auf 120/80 km/h
- Erhöhung der Ordnungsbussen zur verbesserten Durchsetzung der geltenden Tempolimiten
- Neuausrichtung der Agrarpolitik im Rahmen des neuen Landwirtschaftsgesetzes und dessen Ausführungsverordnungen
- Aktionsprogramm Energie 2000 (inkl. Energiegesetzgebung, Förderprogramme, freiwillige Massnahmen) und Förderprogramm Nachhaltige Entwicklung des Amtes für Raumentwicklung, welche ebenfalls zur Verminderung der Luftbelastung beitragen
- Aufbau integrierter Strukturen in der Zusammenarbeit von Bund und Kantonen sowie für die Verknüpfung von Ursachen der Luftverschmutzung, Auswirkungen, Massnahmen, Umweltbeobachtung und Erfolgskontrolle
- Einführung einer leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe mit emissionsabhängiger Ausgestaltung des Abgabensatzes
- Einführung emissionsabhängiger Landesteuern auf den Landesflughäfen
- Sicherstellung der Bau und Finanzierung von Infrastrukturvorhaben des öffentlichen Verkehrs

- Vollzug der Emissionsvorschriften der LRV durch die Kantone und Gemeinden, Erlass von Tausenden von Verfügungen zur Sanierung von Industrie- und Gewerbebetrieben sowie von Heizungsanlagen
  - lufthygienische Massnahmenpläne in 25 Kantonen zur Reduktion der übermässigen Luftbelastung auf lokaler Ebene
- **Zu welchen Emissionsreduktionen führten diese Massnahmen?**

Seit Mitte der 1980er Jahre ist der Ausstoss von Schwefeldioxid in der Schweiz um 66%, von Stickoxiden um 40%, von flüchtigen organischen Verbindungen um 51% und von Ammoniak um knapp 10% zurückgegangen. Bei primärem PM10 betrug der Rückgang 17% (Electrowatt Engineering 2001).

- **Welche Emissionsreduktionen sind nötig, um die Bevölkerung vor übermässigen Immissionen zu schützen?**

Der Effekt verschiedener hypothetischer Emissionsreduktionen auf die Bevölkerungsexposition und die Gesundheitskosten wurden mit dem schweizerischen PM10-Modell berechnet (Infras 2000). Es wurde nach den schweizerischen und ausländischen Quellen unterschieden. Ein Hauptresultat ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Der Prozentsatz der Emissionsreduktionen bezieht sich dabei sowohl auf die primären Partikelemissionen wie auch auf die Vorläufergase der sekundären Aerosole (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, VOC).

Nr.	Varianten Reduktion in der Emittentengruppe:	wo wird reduziert?	Emissionsreduktion	Anteil der Bevölkerung in Gebieten >20 µg/m <sup>3</sup> %	Bevölkerung Differenz zu Variante 0 Anzahl Einwohner
0	Zustand 1997 unverändert		0%	61.4	0
13	alle Emittenten	Schweiz	-10%	53.6	-551'000
14	alle Emittenten	Schweiz	-30%	33.7	-1'962'000
15	alle Emittenten	Schweiz	-50%	14.9	-3'291'000
16	alle Emittenten	Schweiz	-70%	2.8	-4'149'000
17	alle Emittenten	Schweiz+Ausland	-10%	40.9	-1'450'000
18	alle Emittenten	Schweiz+Ausland	-30%	8.9	-3'716'000
19	alle Emittenten	Schweiz+Ausland	-50%	0.8	-4'289'000
20	alle Emittenten	Schweiz+Ausland	-70%	0.0	-4'349'000

**Tabelle 14** Bevölkerungsexposition bei verschiedenen Reduktionsszenarien (Auszug aus Tabelle 3 des obengenannten Berichts)

Fazit: Um die Grenzwerte einhalten zu können, müssen die schweizerischen und die ausländischen Emissionen um mindestens 50% vermindert werden.

- **Welche Massnahmen sind bereit eingeleitet und was bewirken sie?**

Die von der EU beschlossenen und von der Schweiz übernommenen Abgasgrenzwerte EURO 3 und 4 für leichte bzw. EURO 3, 4 und 5 für schwere Motorwagen werden zu einer weiteren wesentlichen Verminderung sowohl der partikulären als auch der gasförmigen Schadstoffemissionen führen. In der Trendprognose sind die Auswirkungen der LSVA und die absehbare Zulassung von 40-t-Lastwagen als Folge des bilateralen Abkommens im Landverkehr, aber auch das CO<sub>2</sub>-Gesetz sowie verschiedene kantonale Massnahmen im Rahmen

der aktualisierten Massnahmenplanung einbezogen. Damit nehmen die primären PM10-Emissionen in der Schweiz bis 2010 um insgesamt etwa 15% ab. Bei den gasförmigen Vorläufersubstanzen für sekundäres PM10 ist ohne zusätzliche Massnahmen gemäss Schriftenreihe Umwelt Nr. 255 (inkl. Nachtrag 2000) und 256 in der Schweiz mit einer Abnahme von 2000 bis 2010 im Bereich von etwa 5% (SO<sub>2</sub>) bis 27% (NO<sub>x</sub>) zu rechnen.

• **Welche zusätzlichen Massnahmen sind möglich und was bewirken sie (Trendprognose)?**

Zu den wichtigsten Massnahmen gehören:

- Minderung von PM10-Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung im Verkehr
- Emissionsminderung beim ÖV und bei Nutzfahrzeugflotten (Partikelfilter, alternative Antriebssysteme, Ecodriving)
- Möglichst schnelle Ausrüstung bzw. Nachrüstung aller schweren Nutzfahrzeuge mit Partikelfiltern
- Staubminderung bei emissionsintensiven Feuerungen (Holzfeuerungen)
- Abgasnormen für neue Baumaschinen und Geräte
- Emissionsbeschränkung auf Baustellen
- Emissionsreduktion bei Maschinen und Geräten in Industrie, Gewerbe, Haushalten
- Reduktion der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen
- Staubvermeidung bei der Intensiv-Tierhaltung
- Abgasnormen für neue landwirtschaftliche Fahrzeuge und Maschinen
- Verzicht auf die offene Verbrennung von Feld- und Waldabfällen

Nähere Informationen zu den Massnahmen (Stand 2000) sind dem Bericht "Massnahmen zur Reduktion der PM10-Belastung" ( Electrowatt Engineering 2001) zu entnehmen. Mit den oben aufgeführten Massnahmen und einer Reihe weiterer kleinerer Beiträge könnten die jährlichen primären PM10-Emissionen bezogen auf das Jahr 2010 um weitere 8200 Tonnen vermindert werden. Damit würden sie noch 16'500 Tonnen betragen, was einem Rückgang von etwa 40 % gegenüber 1995 entspricht.

• **Welcher Rückgang ist bei den Vorläufern des sekundären PM10 zu erwarten?**

Aufgrund der Protokolle zur Genfer Konvention über die weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung kann der Rückgang der europäischen Emissionen im Jahr 2010 gegenüber 1990 abgeschätzt werden.

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	VOC	NH <sub>3</sub>
Schweiz	40%	52%	51%	13%
Europäische Union (EU15)	75%	49%	57%	15%

**Tabelle 15** Erwarteter Rückgang der gasförmigen Emissionen zwischen 1990 und 2010

- **Können die Ziele erreicht werden?**

Die erwähnten Massnahmen führen zu einem Belastungsrückgang, der zwischen der Variante 18 und 19 der Tabelle 14 liegt. Damit werden im Jahr 2010 voraussichtlich noch etwa 5 % der Bevölkerungen PM10-Immissionen im Bereich des Grenzwertes oder darüber ausgesetzt sein. Das bedeutet eine wesentliche Verbesserung gegenüber der heutigen Situation, genügt aber noch nicht. In diesem Zusammenhang ist auch erwähnenswert, dass die PM10-Reduktionsmassnahmen nicht nur die PM10-Masse reduzieren, sondern dass dabei gleichzeitig auch die Anzahl der emittierten PM10-Partikel massiv vermindert wird. Besonders positiv ist der Umstand zu werten, dass die kanzerogenen Russpartikel durch die im Vordergrund stehenden Massnahmen überdurchschnittlich stark reduziert werden.

## Literatur

- Abbey, D.A. et al., Am. J. Respir. Crit. Care Med., 159, 373-382 (1999)
- Ackermann-Liebrich, U. et al., Am. J. Respir. Crit. Care Med, 155, 122-129 (1997)
- Airborne Particles Expert Group: Source Apportionment of Airborne Particulate Matter in the United Kingdom (January 1999)
- Amtliches Bulletin der Bundesversammlung, Nationalrat, Frühjahrssession 1997; Interpellation Leuba S. 577-579, Bern (1997)
- Braun-Fahländer, C. et al., Am. J. Respir. Crit. Care Med. 155, 1042-1049 (1997)
- BUWAL, "Position des BUWAL zum Thema Feinstaub, PM10 und Nanopartikel", Bern (Juni 1998)
- BUWAL, "Modellierung der PM10-Belastung in der Schweiz", Schriftenreihe Umwelt Nr. 310, Bern (1999a)
- BUWAL, "NABEL 1998", Schriftenreihe Umwelt Nr. 311, Bern (1999b)
- BUWAL, "NABEL 1999", Schriftenreihe Umwelt Nr. 316, Bern (2000)
- BUWAL, "Luftbelastung 2000", Bern (2001)
- Dockery, D.W. et al., Am. Rev. Respir. Dis. 138, 587-594 (1989)
- Dockery, D.W. et al., N. Engl. J. Med. 329(24), 1753-1759 (1993)
- Dreher, K.L. et al., J. Toxicol. Environ. Health 50, 285-305 (1997)
- EDI (Eidgenössisches Departement des Innern), "Waldsterben und Luftverschmutzung", Bern (1984)
- EKL (Eidgenössische Kommission für Lufthygiene), "Schwebestaub - Messung und gesundheitliche Bewertung", BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 270, Bern (1996)
- Electrowatt Engineering, "Massnahmen zur Reduktion von PM10-Emissionen", BUWAL Umweltmaterialien, Vorabdruck Januar 2001, Bern (2001)
- EMPA, "Vergleich von TSP-, PM10- und PM2.5 Schwebestaubmessungen im NABEL 1997 und 1998", EMPA Nr. 168'107, Dübendorf (1999)
- EMPA, "Messungen von Russ (EC) und partikelgebundenem organischem Kohlenstoff (OC) an NABEL-Stationen 1998 und 1999", EMPA Nr. 200'053, Dübendorf (2000)
- ETH, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, "Luftqualität in Innenräumen", BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 287, Bern (1997)
- European Commission, DG XI: Economic evaluation of air quality targets for sulphur dioxide, nitrogen dioxide, fine and suspended particulate matter and lead. Institute for Environmental Studies. vrije Universiteit Amsterdam. (1997)
- Gälli Purghart, B.C.; Schwermetalle auf grössenfraktioniertem Aerosol und in der Deposition: Untersuchungen an einem Höhenprofil im Kanton Bern; Dissertation Universität Bern, Bern (1988)

- 
- GS EVED/Dienst GVF, Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten, GVF-Auftrag Nr. 272, Bern (1996)
  - Hertz, J., et al., *Chimia* 42, (1988), 57-67
  - Hüglin, C. et al., "Anteil des Strassenverkehrs an den PM10- und PM2.5-Immisionen. Chemische Zusammensetzung der Feinstaubes und Quellenzuordnung mit einem Rezeptormodell." Berichte des NFP41 "Verkehr und Umwelt", Bericht C4, Programmleitung NFP41, Bern (2000)
  - Infrac/Meteotest, PM10-Modell Schweiz: Sensitivitätsanalysen. Interner Bericht Bericht BUWAL/Dienst GVF (2000)
  - Lippmann M. et al., "Association of Particulate Matter Components with Daily Mortality and Morbidity in Urban Populations", Health Effects Institute Research Report 95, Cambridge MA (August 2000)
  - Oberdörster, G. et al., *Environ. Health Perspectives* 97, 193-199 (1992)
  - Pani, R., Höhenabhängigkeit der chemischen Zusammensetzung und der Konzentration von atmosphärischen Schwebestäuben, Dissertation Universität Zürich, Zürich (1992)
  - Pekkanen, J. et al., *Environmental Research* 74, 24-33 (1997)
  - Peters, A. et al., *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 155, 1376-1383 (1997)
  - Pope, C.A. et al., *Am. J. Respir. Crit. Care* 151, 669-674 (1995)
  - Pope, C.A., *Appl. Occup. Environ Hyg.* 13, 356-363, (1998)
  - Pott, F., *VDI-Berichte* 888, 211-244 (1991)
  - Samet, J.M. et al., The national morbidity, mortality, and air pollution study Part II: Morbidity, mortality and air pollution in the United States, Health Effects Institute Research Report 94, Part II, Cambridge MA (Juni 2000)
  - Seethaler, R: Health Costs due to Road Traffic-related Air Pollution. An impact assessment project of Austria, France and Switzerland. Synthesis Report, Bern (1999)
  - Sheppard, L. et al., *Epidemiology*; 10/1, 23-30 (1999)
  - Tolbert, P.E. et al., *Am. J. Epidemiol.* 151 (8), 798-810 (2000)
  - Turnbull, A.B. et al., *Atmospheric Environment* 34, 3129-3137, (2000)
  - Wichmann, H.-E. et al., "Daily Mortality and Fine and Ultrafine Particles in Erfurt, Germany. Part I: Role of Particle Number and Particle Mass", Health Effects Institute Research Report 98, Cambridge MA (November 2000)
  - Willeke, K., Baron, P.A.: *Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications*. Van Nostrand Reinhold, New York (1993)
  - Wilson, R., Spengler, J.D., *Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects*, Harvard University Press, Harvard (1996)
  - Woodruff, T.J. et al, *Environmental Health Perspect.*; 105/6; 608-612 (1997)
  - Zemp, E. et al. and SAPALDIA Team. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 159; 1257-1266 (1999)
-