



Feinstaub PM10

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

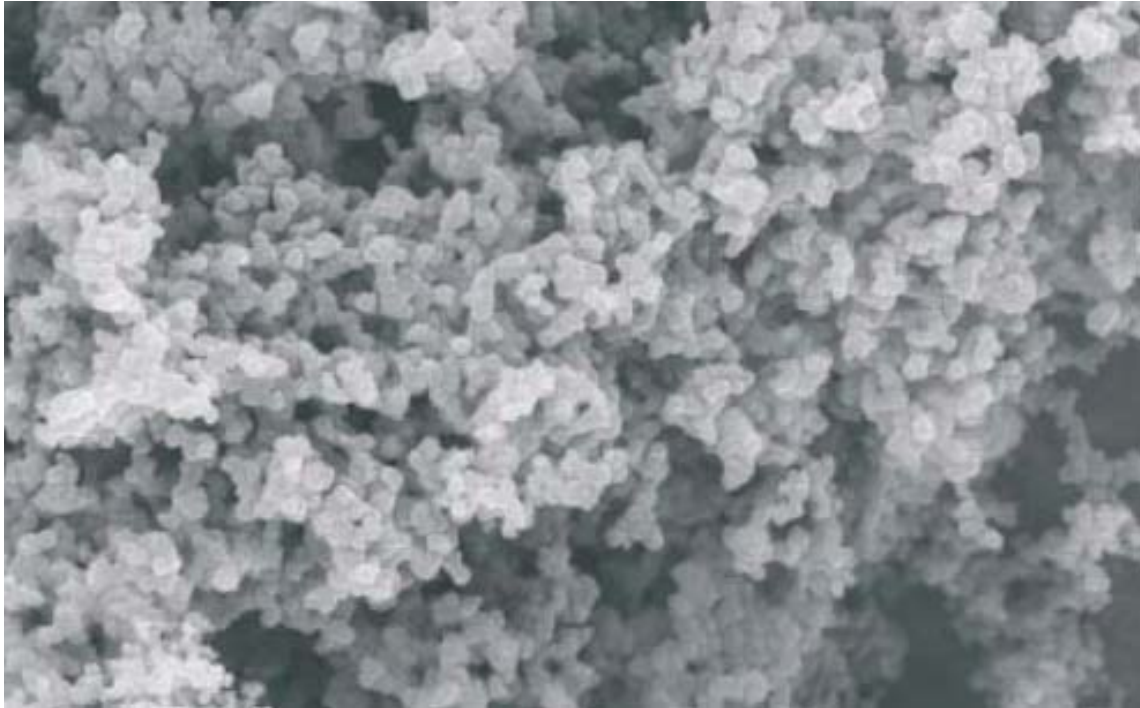
Stand 1. Dezember 2005

Inhalt

<i>Begriffe</i>	2
<i>Eigenschaften</i>	4
<i>Emissionsmessverfahren</i>	7
<i>Emissionen</i>	8
<i>Immissionsmessverfahren</i>	10
<i>Immissionen</i>	13
<i>Immissionsgrenzwerte</i>	21
<i>Auswirkungen</i>	24
<i>Massnahmen</i>	39
<i>Literatur</i>	44

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 g/cm^3 haben müsste, damit es die gleiche Sinkgeschwindigkeit in Luft 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 bei $10 \mu\text{m}$ 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 bei $2.5 \mu\text{m}$ 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. SO_2 , NO_x , NH_3 , NMVOC) bilden
- **Russ** umfasst alle primären, kohlenstoffhaltigen Partikel eines unvollständigen Verbrennungsprozesses. Er besteht v.a. aus elementarem (schwarzem) 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).



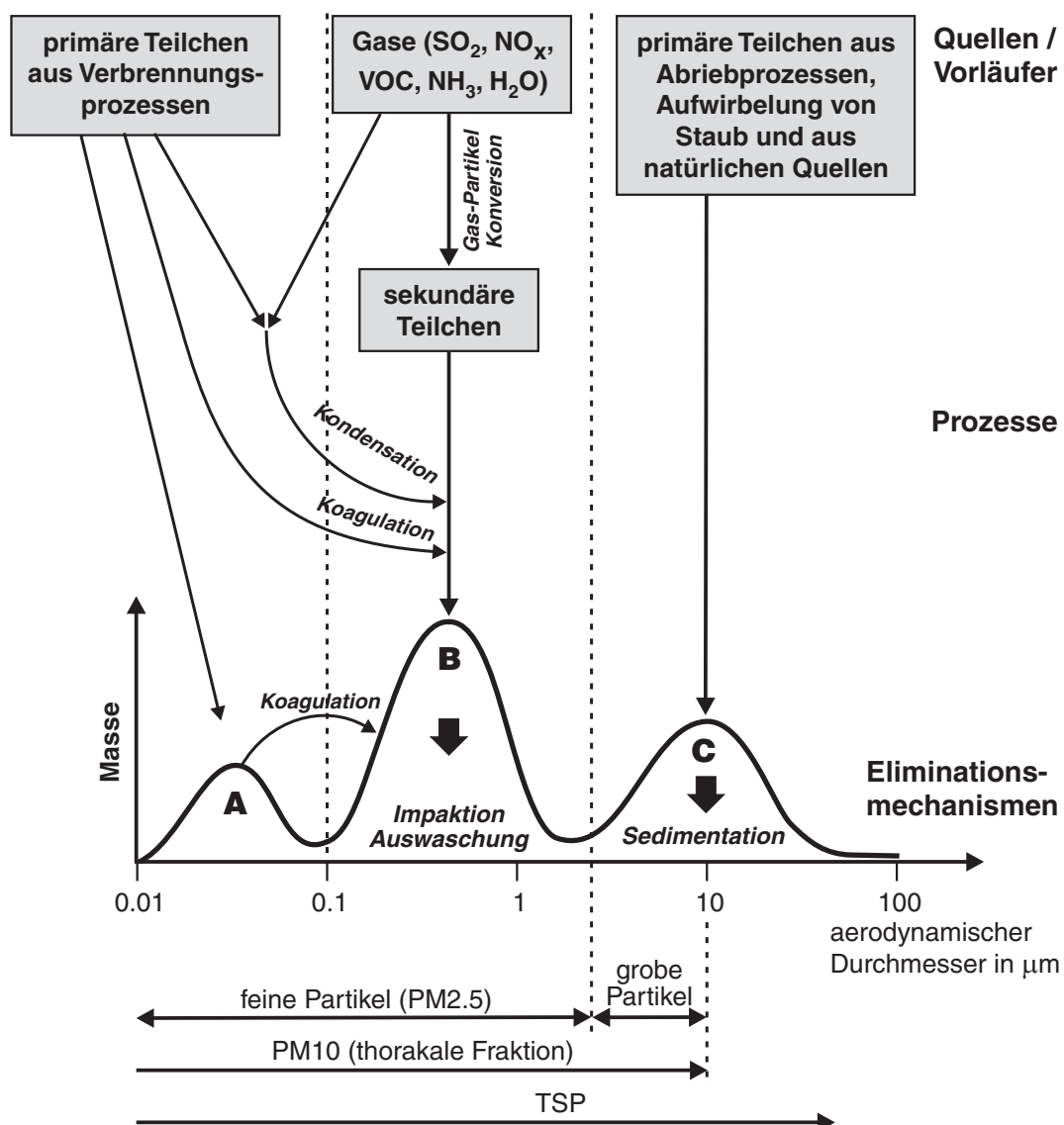
Dieselerusspartikel in 700facher Vergrößerung, Aufnahme mittels Rasterelektronenmikroskop. Quelle: GSF Neuherberg D

- **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 und biologisches Material.
- **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 ($OM = 1.4 * OC$).
- **PAK bzw. PAH:** polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe bzw. "polycyclic aromatic hydrocarbons" (z.B. Benzo[a]pyren)
- SO₂: Schwefeldioxid
- NO_x: Stickoxide
- NMVOC: flüchtige organische Verbindungen mit Ausnahme von Methan
- NH₃: Ammoniak
- LRV: Luftreinhalte-Verordnung SR 814.318.142.1
- USG: Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz) SR 814.01

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 $1\ \mu\text{m}$) sind zum überwiegenden Teil sekundären Ursprungs und bilden sich durch Gas-Partikelkonversion aus den Vorläufern SO_2 , NO_x , NH_3 und NMVOC.



Figur 1 Vereinfachte schematische 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 Wolkentröpfchen zu dienen.

- **Wie ist die Grössenverteilung atmosphärischer Partikel (PM₁₀)?**

Man unterscheidet 3 Grössenbereiche:

- ultrafeine Partikel (aerodynamischer Partikeldurchmesser < 0.1 µm),
- den Akkumulationsmodus (0.1-1 µm) und
- grobe Partikel (>2.5 µm).

Die Grössenklasse unter 2.5 µm wird 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, setzen sich auf Oberflächen ab oder wachsen durch Kondensation. Teilchen im Akkumulationsmodus (0.1-1 µm) bilden massenmässig den Hauptteil des Aerosols an Standorten, die nicht in unmittelbarer Nähe einer grossen Quelle liegen. Die Eliminationsmechanismen für diese Grössenklasse 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 PM₁₀ 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 zwei Drittel beim gealterten Aerosol (BUWAL 2005).

- **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:

	Komponente	Vorläufer / Ursache
Primäre Komponenten	Russ (EC und primärer OC)	Verbrennungsprozesse
	geologisches Material	Bau, Landw., Verkehr, Wind
	Schwermetalle	Verbrennung, Produktion
	Abriebspartikel	mechanische Beanspruchung
	biologisches Material	Pilzsporen, Pflanzenfragmente
Sekundäre Komponenten	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) zur Bestimmung der Partikelmasse wird das gesamte Abgas in einem Verdünnungstunnel um typischerweise Faktor 5-10 verdünnt und auf unter 51.7°C abgekühlt. Während des vorgeschriebenen Fahrzyklus (NEFZ, Dauer: 20 min) wird eine Teilprobe durch einen Glasfaserfilter mit definiertem Abscheidegrad geleitet. Die Partikelemission wird durch eine Wägung des Filters vor und nach der Belegung bestimmt und auf die zurückgelegte Fahrstrecke bezogen (g/km). Je nach Abgaszusammensetzung besteht ein Teil der aufgefundenen Masse aus leichtflüchtigen Inhaltsstoffen, deren Taupunkte bereits unterschritten werden und die zur Messunsicherheit beitragen. Im Hinblick auf die zukünftigen EU-Abgasvorschriften wurde eine neue Methode zur Bestimmung der Partikelanzahl von Feststoffpartikeln im Rahmen der UN-ECE GRPE Particle Measurement Programme (PMP) sowie in einem BUWAL/EMPA-Programm erprobt. Das Verfahren arbeitet mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC) mit einer vorgeschalteten Verdampfungseinheit, mit der die leichtflüchtigen Partikelsubstanzen im verdünnten Abgas bei 300°C verdampft werden. Die einzelnen Komponenten dieser Messkette wie die zusätzliche Verdünnungseinheit, die Verdampfungseinheit und der Partikelzähler müssen strenge Anforderungen zur Effizienz und Kalibration erfüllen. Folgende Verbesserungen werden mit der neuen Messmethode beabsichtigt: grössere Messgenauigkeit, stärkere Berücksichtigung von kleineren Partikeln, klarere Partikeldefinition.

- **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 PM10 emissions; constant sampling rate procedure) schreiben vor, wie die grössenfraktionierte Staubprobenahme zu erfolgen hat. Die Emissions-Messempfehlungen des BUWAL enthalten dazu keine speziellen Angaben. Sie beschreiben lediglich Messverfahren, für welche in der LRV auch entsprechende Grenzwertvorschriften festgelegt sind (z.B. für den Gesamtstaub).

Emissionen

- **Wie viel primäres PM10 emittieren die verschiedenen Quellen in der Schweiz?**

Quellengruppe	Massgebliche Quellen	PM10 2000	
		In Tonnen	%
Verkehr	Strassenverkehr (Güterverkehr)	1600	8%
	Strassenverkehr (Personenverkehr)	2800	13%
	Schiene	1000	5%
	Luftfahrt	700	3%
	Subtotal	6100	29%
Haushalte	Feuerungen	900	4%
	Garten+Hobby	600	3%
	Subtotal	1500	7%
Industrie / Gewerbe	Feuerungen Industrie	500	2%
	Feuerungen Dienstl./Gew./Landw.	400	2%
	Industrie der Steine / Erden	600	3%
	Min. Ölindustrie	0	0%
	Gaswerke	0	0%
	Metallindustrie	200	1%
	Lebensmittelindustrie	300	1%
	Abfallentsorgung	300	1%
	Baugewerbe (inkl. Baumaschinen)	3200	15%
	Kunststoffindustrie	0	0%
	Gesundheitswesen	0	0%
	Industrielle Maschinen	200	1%
	andere	100	0%
	Subtotal	5800	27%
Land- und Forstwirtschaft	Nutztierhaltung	2300	11%
	Grastrocknung	300	2%
	Maschinen und Geräte	3600	17%
	Abfallentsorgung	1500	7%
Subtotal	7700	37%	
Gesamttotal		21100	100%

Tabelle 2 Emissionen von primärem PM10 im Jahr 2000 (BUWAL, Interne Schätzung, Stand November 2005)

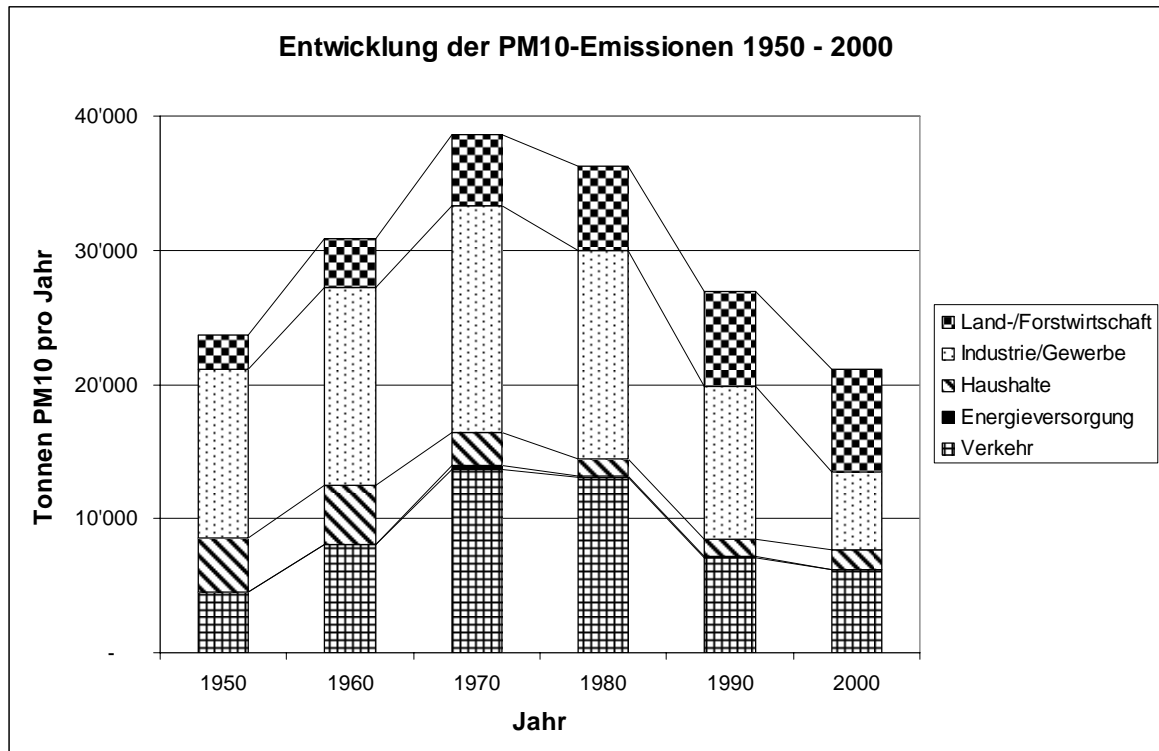
- **Wie viel PM10 wird aus den Vorläufergasen gebildet?**

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. 17).

- Wie haben sich die PM10-Emissionen entwickelt?



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

Immissionsmessverfahren

- **Wie wird Feinstaub gemessen?**

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

1. Manuelle gravimetrische Verfahren	Die Staubproben werden auf Filtern oder Folien abgeschieden, die danach bei vorgeschriebener Luftfeuchtigkeit und Temperatur konditioniert und gewogen werden
High Volume Sampler mit verschiedenen Probenahmeköpfen, die Partikel über einer bestimmten Grösse vor der Probenahme aus dem Luftstrom entfernen.	Messgeräte, die hohe Volumenströme (ca. 30 m ³ /h) durch ein Filter saugen; werden im NABEL eingesetzt (mit PM10-Kopf, PM2.5- oder PM1-Kopf).
Low Volume Sampler mit verschiedenen Probenahmeköpfen, die Partikel über einer bestimmten Grösse vor der Probenahme aus dem Luftstrom entfernen.	Messgeräte, die niedrige Volumenströme (ca. 1-3 m ³ /h) durch ein Filter saugen.
Stufen-Impaktoren	erlauben das getrennte Sammeln von Partikeln in verschiedenen Grössenklassen. Die mehrstufigen Geräte sind aus Lochplatten mit immer kleiner werdenden Düsen und dahinter liegenden Prallplatten aufgebaut, auf denen die Teilchen nach Grösse (Trägheit) getrennt abgeschieden werden.
2. automatisierte (quasi-) kontinuierliche Verfahren (Monitore)	verwenden alternative Messprinzipien zur Erzeugung eines (quasi-) kontinuierlichen Signals für Massenkonzentrationen. Bei Verwendung dieser Geräte muss an jedem Standort die Gleichwertigkeit mit dem Referenzverfahren überprüft bzw. ein Umrechnungsalgorithmus bestimmt werden. Ein häufiges Problem sind Verluste flüchtiger Komponenten auf den zur Vermeidung von Kondensation leicht erwärmten Sammelfiltern.
Betameter	saugen Luft durch einen Filterstreifen und messen kontinuierlich oder in kurzen Zeitintervallen die Absorption von β -Strahlen;
TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)	messen die Veränderung der Resonanzfrequenz des schwingend gelagerten partikelbeladenen Filters. Ältere Messsysteme (Filter bei 50 Grad) weisen durchschnittliche Massenverluste bis zu 30%

	auf. Neue Systeme mit FDMS (Filter Dynamics Measurement System) scheinen hingegen diese Verluste gut kompensieren zu können.
--	--

Weitere Geräte ermöglichen die Messung anderer Eigenschaften der Aerosole, z.B. Lichtstreuung mit Nephelometern, Oberfläche mit Epiphaniometern, Anzahl der Partikel mit Kondensationskernzählern. Die Grössenverteilung der Partikel kann gemessen werden mit DMA (Differentieller Mobilitätsanalysator), SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), DC (Diffusionsauflader), ELPI (Electric Low Pressure Impactor) oder mit optischen Partikelzählern. Information über die chemische Zusammensetzung von Partikeln erhält man durch Analysen der Filterproben oder sogar on-line mit Aerosolmassenspektrometern. Eine Möglichkeit, Partikel in verschiedenen Grössenklassen mit hoher Zeitauflösung für nachfolgende Analysen zu sammeln, bietet der Rotating Drum Impactor. Mikroskopische und mikroanalytische Methoden wie SEM (Scanning Electron Microscopy), TEM (Transmission Electron Microscopy) oder AFM (Atomic Force Microscopy) erlauben die morphologische Charakterisierung und chemische Analyse von Einzelpartikeln.

- **Wie wird elementarer und organisch gebundener Kohlenstoff (Russ) gemessen?**

Obwohl Russ eine komplexe Mischung von elementarem und organisch gebundenem Kohlenstoff darstellt, wird bei Immissionsmessungen von Russ nur auf den elementaren Kohlenstoff (EC) abgestellt. Die Messung erfolgt entweder manuell mit einzelnen Filterproben oder quasikontinuierlich mit Monitoren durch thermografische Separierung und Verbrennung des elementaren Kohlenstoffs und Quantifizierung des gebildeten Kohlendioxids (coulometrisch oder spektrometrisch). Verbreitet sind auch optische Verfahren wie Aethalometrie (optische Transmission von Filterproben) und Black Smoke (optische Reflexion von Filterproben) sowie photoelektrische Aerosolsensoren, welche die Photoionisation von am Russ adsorbierten Polyaromaten messen. Diese Methoden sind zwar relativ einfach und schnell, doch muss der quantitative Zusammenhang mit der EC-Konzentration standort- und seasonspezifisch ermittelt werden.

- **Wie lautet die Messempfehlung für PM₁₀?**

Die Europäische Norm EN 12341 über die Schwebstaubmessung legt manuell gravimetrische Referenzverfahren für die Ermittlung der PM₁₀-Fraktion im Schwebstaub fest. Die Schweiz hat diese Norm übernommen. Die vom BUWAL im Januar 2004 herausgegebenen Empfehlungen zur Immissionsmessung von Luftfremdstoffen geben Hinweise zur korrekten Messung von PM₁₀. Für PM_{2.5} steht eine weitere Europäische Norm kurz vor ihrer Publikation (EN 14907), welche ebenfalls auf manuell gravimetrischen Referenzverfahren beruht.

Werden andere Messverfahren als die Referenzverfahren eingesetzt, so hat der Messnetzbetreiber zu zeigen, dass die Messungen gleichwertige Resultate ergeben wie das Referenzverfahren. In der nationalen und internationalen Messnetzpraxis betrifft dies vor allem die mit automatischen Monitoren gemessenen Daten (TEOM, Betameter), deren Äquivalenz zum Referenzverfahren bisher mit einfachen Korrekturfaktoren nicht erreicht werden konnte. Da diese Verfahren trotz-

dem wegen des im Vergleich zu den Referenzverfahren geringeren Aufwands und der besseren Zeitauflösung weit verbreitet sind, ist beim Vergleich von Daten aus unterschiedlichen Quellen grosse Vorsicht geboten. Es ist zu fordern, dass bei allen Monitordaten klar deklariert wird, ob und falls ja, welche Korrekturfaktoren verwendet wurden.

Europaweit werden die gemessenen Partikelkonzentrationen auf die während der Messung herrschenden Bedingungen (Temperatur, Luftdruck) bezogen. Dies im Gegensatz zu gasförmigen Schadstoffen, welche einheitlich auf 20 Grad und 1013 Millibar bezogen werden.

Immissionen

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

für die Schweiz:

Typische PM10-Jahresmittelwerte für die Periode 2000 – 2004 in der Schweiz sind (Quelle: PM10-Messungen des NABEL; s. BUWAL 2005):

Stadt, an Hauptverkehrsstrasse:	25 - 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Stadtzentrum, in Park	25 - 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Agglomeration	20 - 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ländlich unter 1000 m ü. M.	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)	3 - 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabelle 3 PM10-Jahresmittelwerte an verschiedenen Standorttypen

für das Ausland:

Typische PM10-Jahresmittelwerte in europäischen Städten lagen in den Jahren 2000 – 2002 zwischen 17 (Stockholm) und 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Athen): Bilbao 36, Budapest 29, Lille 26, London 22, Madrid 37, Paris 22, (Quelle: APHEIS: Air Pollution and Health: A European Information System, 2005. Der Bericht enthält PM10-Daten von 26 Städten, z.T. Mittel über mehrere Stationen).

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

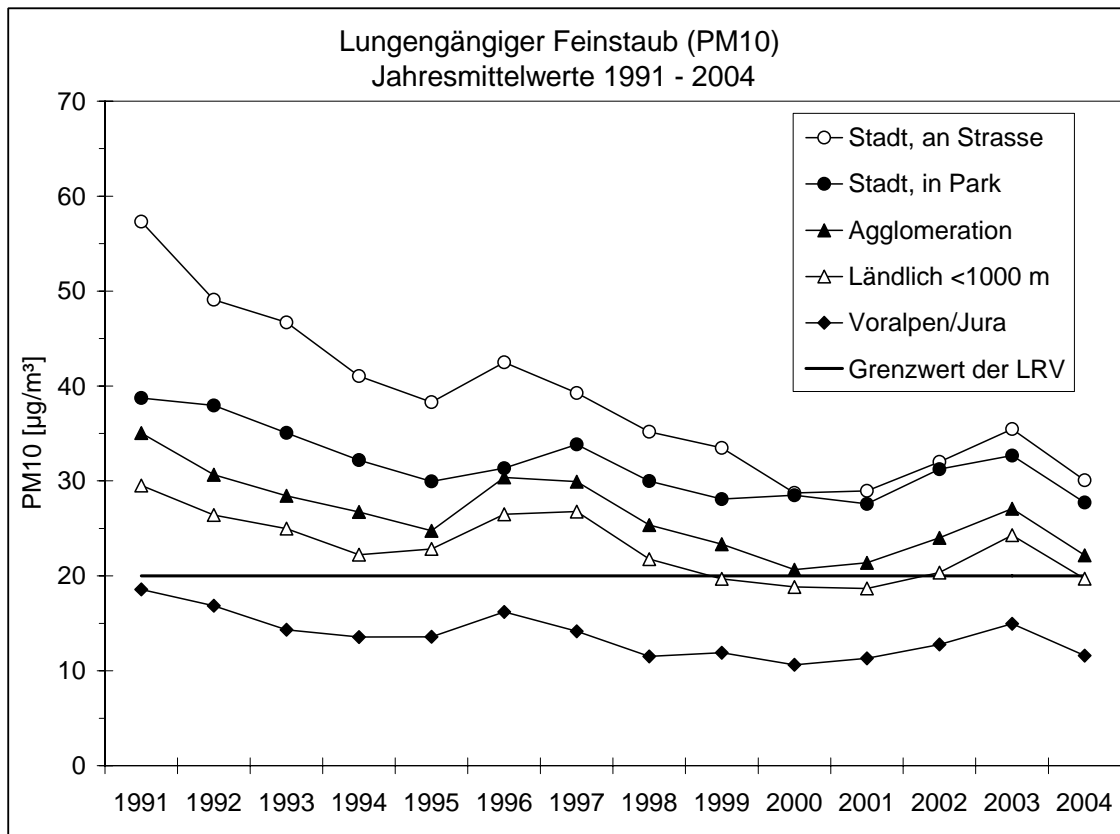
NABEL: PM10 Auswertung Januar 2004 - Dezember 2004

Stationstyp	Station	Mittelwert 2004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Max. Tagesmittel 2004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2. höchstes Tagesmittel 2004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anzahl Tage >50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 2004	Anzahl Tage >100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 2004
Stadt, Strasse	Bern	33	91	83	58	0
	Lausanne	27	84	72	23	0
Stadt, in Park	Lugano	31	152	116	34	3
	Zürich	25	86	85	23	0
Agglomeration	Basel	22	77	75	16	0
	Dübendorf	22	81	79	15	0
ländlich an Autobahn	Härkingen	27	101	86	31	1
	Sion	24	81	69	18	0
ländlich unterhalb 1000 m ü. M.	Magadino	28	123	120	41	3
	Payerne	20	64	64	9	0
	Tänikon	19	73	63	7	0
Mittlere Höhe	Chaumont	11	43	36	0	0
	Rigi	12	42	39	0	0

Tabelle 4 PM10-Belastung an den NABEL-Stationen 2004 (BUWAL 2005)

- **Wie hat sich PM10-Belastung in den letzten 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.



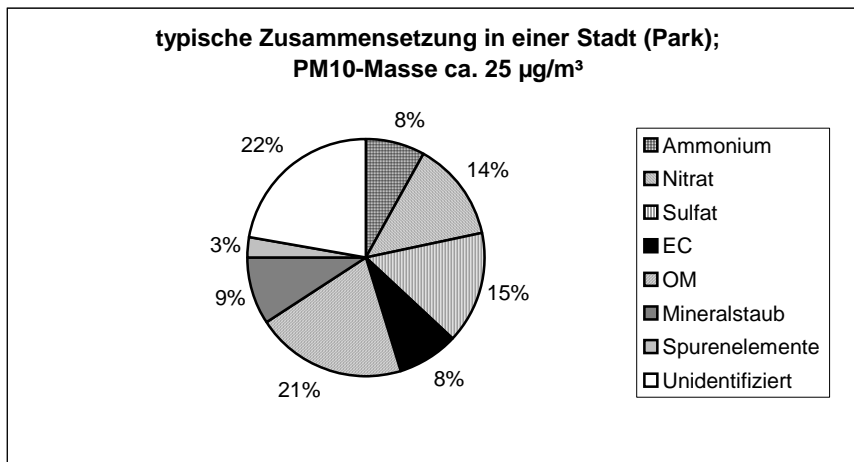
Figur 3 Zeitliche Entwicklung der PM10-Belastung (BUWAL 2005); Werte vor 1997: aus TSP-Werten berechnet

Die PM10-Belastung ist an allen Standorten zwischen 1990 und 2000 zurückgegangen. Seit 2000 ist sie fast unverändert geblieben. 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. Die Zahl dieser Tage hat in den letzten 15 Jahren abgenommen.

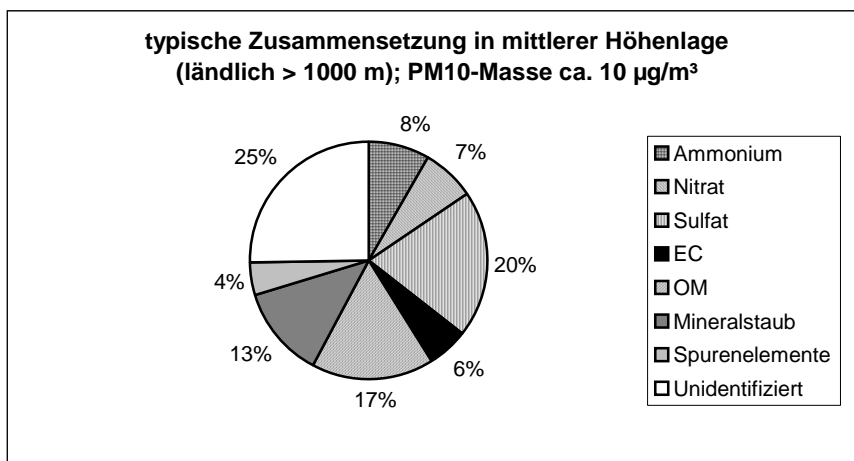
- **Wie ist die chemische Zusammensetzung der PM10-Belastung in der Schweiz?**

Situation abseits vielbefahrener Strassen

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



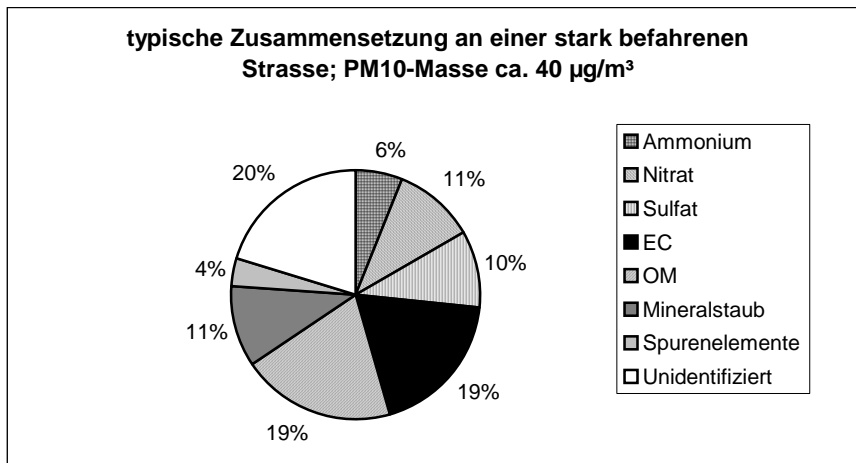
Figur 5 Chemische Zusammensetzung an einer ländlichen Station mittlerer Höhenlage

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-Materialien Nr. 169 (BUWAL 2003).

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, 2003):

Komponente	Messwerte 1999	schweizerischer Anteil berechnet mit Modell	ausländischer Anteil (Differenz der beiden vorangehenden Spalten)
	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
Nitrat	3.1	1.8	1.3
Ammonium	1.6	0.6	1.0
Sulfat	3.5	0.1	3.3
Summe	8.2	2.5	5.7

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 das schweizerische Mittelland. 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. 6 µg/m³.

Zu diesen sekundären Aerosolen kommen grossräumig transportierte primäre Aerosole hinzu. Dazu liegen erste gesamteuropäische Modellrechnungen vor (für

die Schweiz: ca. $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Damit ergibt sich eine PM10-Konzentration von ca. $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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?**

Gesamthaft 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, Meeresgisch, 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.

Meeresgisch: 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 Aufenthaltsdauer 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. Zudem sind die Emissionen nicht gleichmässig über die ganze Schweiz verteilt.

- **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 %).

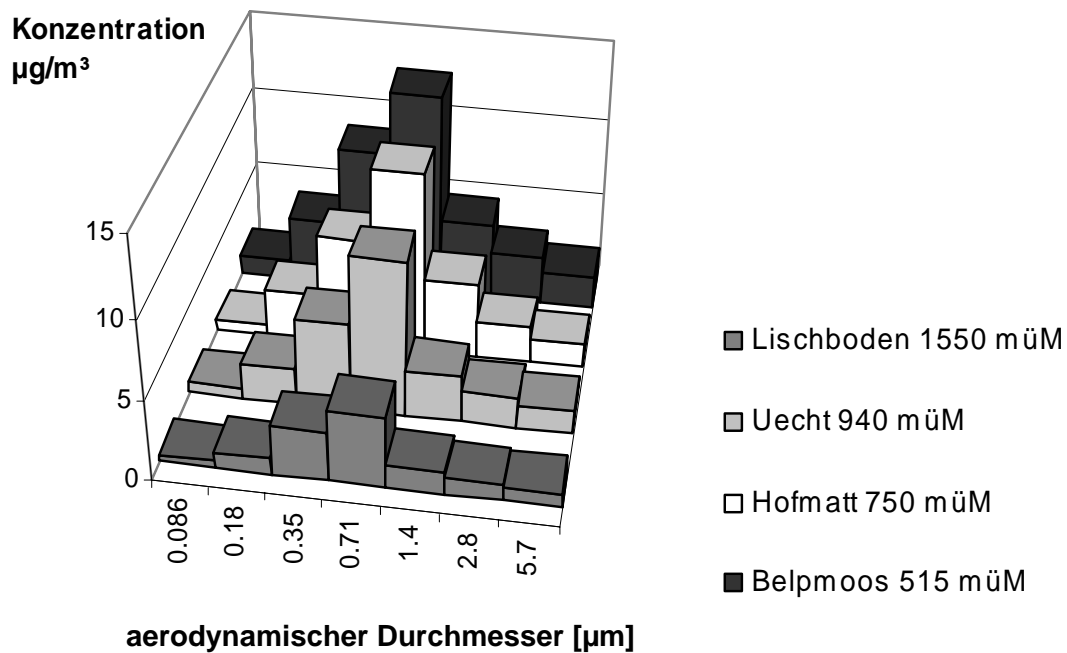
Station	Standorttyp	Jahresmittelwert 1997			Jahresmittelwert 1998		
		TSP µg/m ³	PM10 µg/m ³	Verhältnis %	TSP µg/m ³	PM10 µg/m ³	Verhältnis %
Basel	Agglomeration	34.4	30.4	88	30.0	24.0	80
Bern	Stadtzentrum, an Strasse	66.6	43.3	65			
Chaumont	ländlich, > 1000 m ü.M.	15.9	13.8	87			
Dübendorf	Agglomeration	31.7	29.0	91	30.0	26.7	89
Härkingen	ländlich, an Autobahn	36.5	32.7	90	35.0	27.4	78
Lugano	Stadtzentrum, Park	44.2	36.6	83	41.4	35.7	86
Payerne	ländlich, < 1000 m ü.M.	29.5	26.4	89	27.0	23.5	87
Zürich	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 %). Neuere Messungen bestätigen diese Verhältnisse (BUWAL, 2005).



Figur 7 Massen-Grössenverteilung des Aerosols an 4 ländlichen Standorten im Kanton Bern 1985/86 mit logarithmischer Darstellung der Partikelgrösse (Gälli Purghart 1988).

Station	Standorttyp	Jahresmittelwert 1998			Jahresmittelwert 1999		
		PM10 µg/m³	PM2.5 µg/m³	Ver- hältnis %	PM10 µg/m³	PM2.5 µg/m³	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

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

Stadtstandort in Deutschland (Erfurt; Peters 1997) ergab für PM_{2.5} die Resultate in Tabelle 8.

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

PM ₁₀ -Masse vs. Anzahl Teilchen in Grössenklasse 0.01 - 2.5 µm	0.73
PM ₁₀ -Masse vs. Anzahl Teilchen in Grössenklasse 0.01 - 0.1 µm	0.60
PM ₁₀ -Masse vs. Anzahl Teilchen in Grössenklasse 0.1 - 0.5 µm	0.81
PM ₁₀ -Masse vs. Anzahl Teilchen in Grössenklasse 0.5 - 2.5 µm	0.82

Die Konzentration der Teilchen lag an diesem Stadtstandort im Mittel zwischen Oktober und März bei ungefähr 15'000 Teilchen pro cm³ (Variation: 2000 - 50'000 / cm³ im Tagesmittel).

Im NABEL wird an fünf Standorten die Anzahl-Konzentration der Partikel mit einem optischen Partikelzähler (CNC) gemessen. Auf dem Chaumont ergeben sich im Jahresmittel rund 4'000 pro cm³, in der Stadt 25'000 bis 35'000 pro cm³, an der Autobahn in Härkingen 57'000 pro cm³. Die autobahnahe Station Härkingen zeigt klar den Einfluss des lokalen Verkehrs auf die Partikelkonzentration. Bei Situationen ohne Einfluss der Autobahn wurden im Mittel Partikelkonzentrationen von 12'000 pro cm³ gemessen, bei Winden von der Autobahn her ergaben sich im Mittel Werte von 110'000 pro cm³.

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

Im Projekt "Modelling of PM₁₀ and PM_{2.5} ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010" (BUWAL 2003) 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:

PM ₁₀ -Konzentration in µg/m ³	Bevölkerungsanteil in der entsprechenden Klasse
Klasse Klassenmitte	
< 5 2.5	0.0%
5-10 7.5	1.5%
10-12 11	1.6%
12-14 13	3.4%
14-16 15	9.3%
16-18 17	20.2%
18-20 19	22.7%
20-22 21	20.0%
22-24 23	9.1%
24-26 25	4.5%
26-28 27	3.3%
28-30 29	1.7%
30-35 32.5	2.7%
Alle	100.0%
Einwohner 2000	7.29 Mio.

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

Gemäss dieser Auswertung leben rund 40 % der schweizerischen Bevölkerung in Gebieten mit einer übermässigen PM₁₀-Belastung (> 20 µg/m³). Rund 3 % leben in Gebieten mit einem PM₁₀-Jahresmittel > 30 µg/m³.

Immissionsgrenzwerte

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

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

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

- **Welche Grenzwerte gelten international?**

PM10 Grenzwerte gelten zurzeit u.a. in folgenden Ländern:

EU Mitglieder und Norwegen	40 µg/m ³	Stufe 1: Jahresmittelwert (1.1.2005) Stufe 1: 24-h-Mittelwert, max. 35 Überschreitungen erlaubt (ab 1.1.2005)
	50 µg/m ³	
	20 µg/m ³	Stufe 2 Richtgrenzwert* : Jahresmittelwert (ab 1.1.2010) Stufe 2 Richtgrenzwert* : 24-h-Mittelwert, max. 7 Überschreitungen erlaubt (ab 1.1.2010)
	50 µg/m ³	
USA	50 µg/m ³ 150 µg/m ³	Jahresmittelwert 24-h-Mittelwert
Kalifornien	20 µg/m ³ 50 µg/m ³	Jahresmittelwert 24-h-Mittelwert
Japan	100 µg/m ³ 200 µg/m ³	24-h-Mittelwert 1-h-Mittelwert

Tabelle 10: PM10-Immissionsgrenzwerte in anderen Ländern

* Stufe 2 Richtgrenzwerte, die im Lichte weiterer Informationen über die Auswirkungen auf die Gesundheit und Umwelt, über die technische Durchführbarkeit und die bei der Anwendung der Grenzwerte der Stufe 1 gemachten Erfahrungen zurzeit überprüft werden (EU 1999).

Zusätzlich zu PM10 gelten in den USA und Kalifornien folgende PM2.5-Grenzwerte:

USA	15 µg/m ³ 65 µg/m ³	Jahresmittelwert 24-h-Mittelwert
Kalifornien	12 µg/m ³ ----	Jahresmittelwert 24-h-Mittelwert

- In der EU sind, zusätzlich zu PM10, Grenzwerte für PM2.5 in Diskussion (EU 2004).
- In den USA ist geplant (US-EPA 2005), die PM10-Grenzwerte durch einen Grenzwert für „coarse particles“ (PM10-PM2.5) zu ersetzen. In Diskussion ist zurzeit ein 24-h-Mittelwert im Bereich von 50-70 µg/m³ (kein Jahresmittelwert für „coarse particles“ geplant).
Im Weiteren wird in den USA vorgeschlagen (US-EPA 2005), die PM2.5-Grenzwerte in den Bereich von 12-14 µg/m³ (Jahresmittelwert), resp. 30-40 µg/m³ (24-h-Mittelwert) zu verschärfen.

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.

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

In den USA und Kalifornien gibt es seit Mitte 1998 einen so genannten Reference Exposure Level (REL) für nicht kanzerogene Effekte von Russ (hier Diesel-PM genannt) von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel. Diesel-PM ist in den USA und Kalifornien als Toxic Air Contaminant (TAC) klassiert (CARB 1998). Für diese Substanzen gilt das Minimierungsgebot. Der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) hat 1991 zur Verminderung des Krebsrisikos für die Bevölkerung einen Richtwert von $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EC 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 Umweltschutzgesetzes (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?**

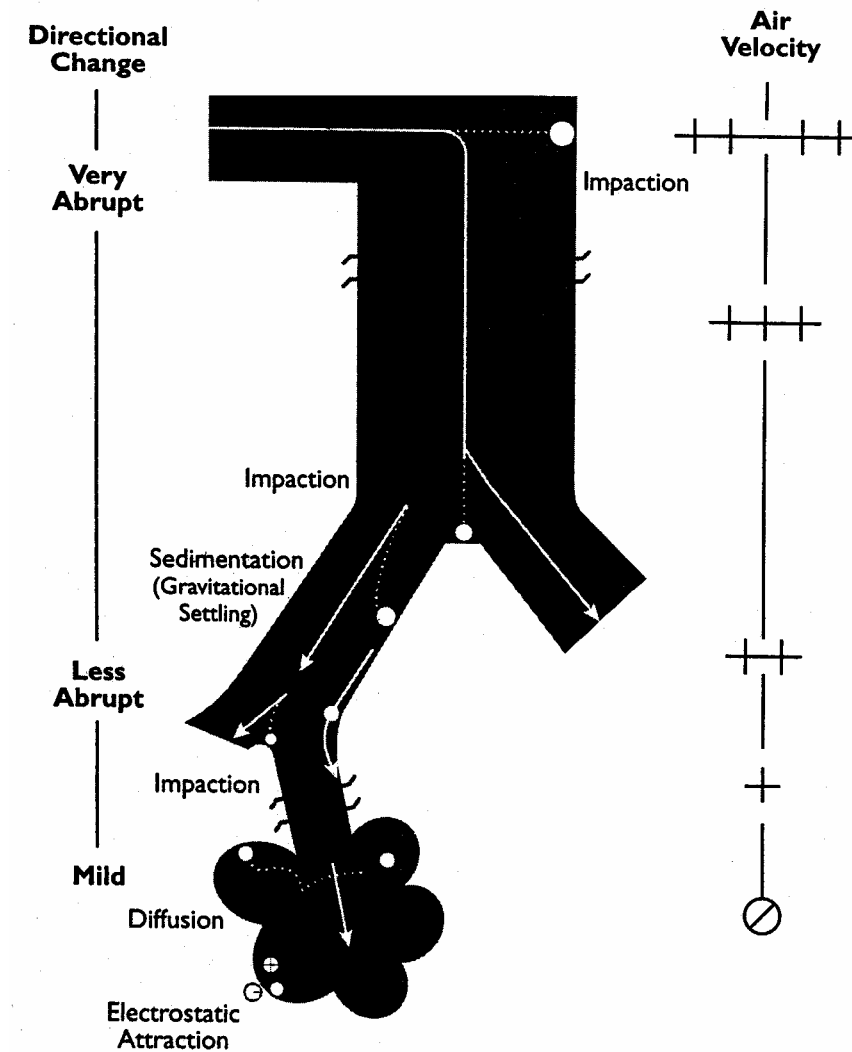
Die EU kommt - basierend auf der Risikobeurteilung durch die WHO und Empfehlungen der „Clean Air for Europe Steering Group“ - zu ähnlichen Vorschlägen wie die Grenzwerte der Schweiz. In den USA wurden - auf der Basis von PM2.5 - ähnlich strenge Grenzwerte in Kraft gesetzt. Von einem Alleingang kann nicht 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).

Auswirkungen

- **Welche Partikel werden wo deponiert?**

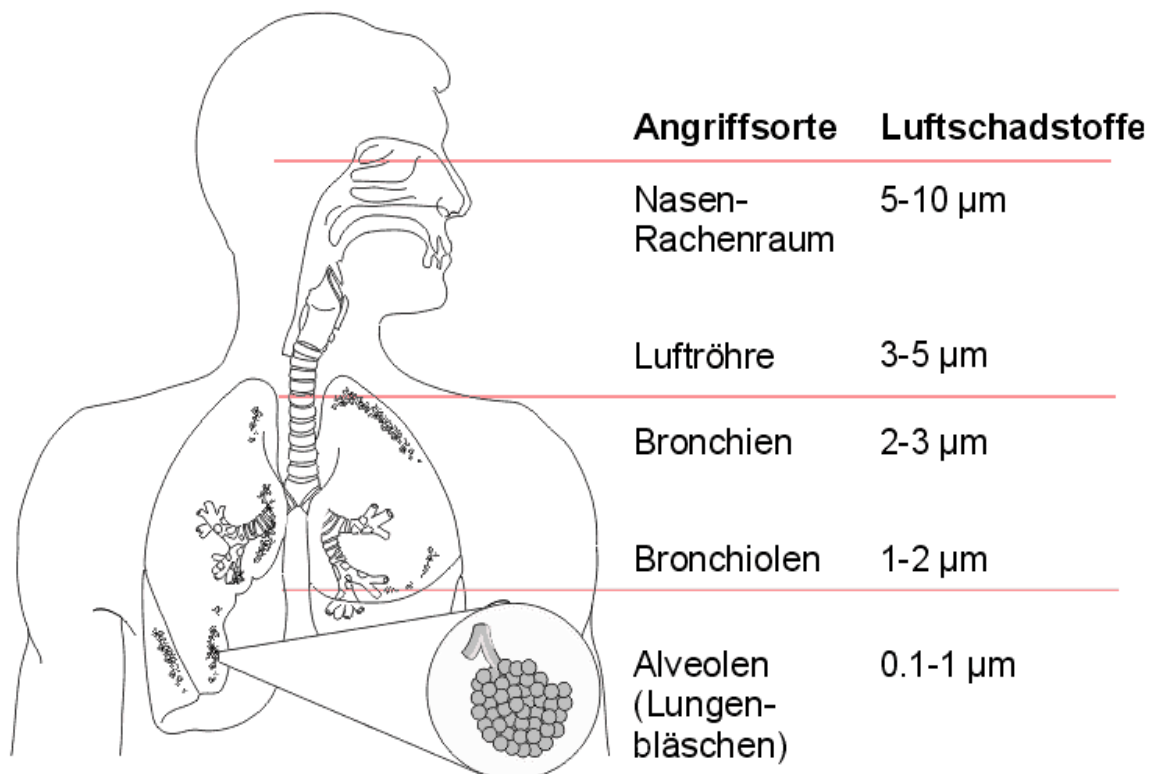
Mit jeder Einatmung gelangen Tausende von Partikeln in unsere Lunge, wo sie je nach Grösse in den luftleitenden Atemwegen oder im Gasaustauschbereich - den Alveolen - abgelagert werden. Die folgende schematische Darstellung der Atemwege (Nase, Rachen, Luftröhre, Bronchien, Bronchiolen, Alveolen) zeigt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



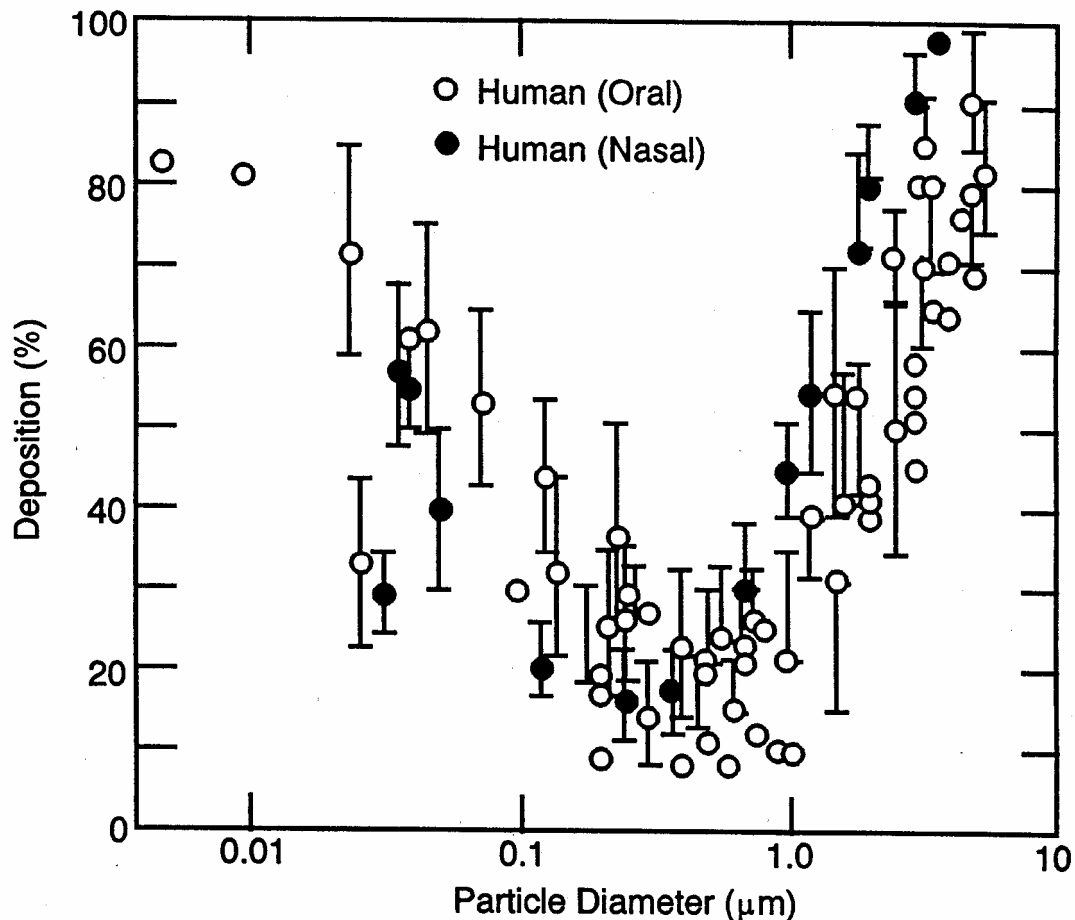
Figur 8 Schematische Darstellung der Atemwege und der Mechanismen der Partikeldeposition. Der Luftstrom ist mit Pfeilen, die Partikel-Trajektorien mit gestrichelten Linien gekennzeichnet.

Ob Aerosolpartikel ein Gesundheitsrisiko darstellen, hängt vor allem davon ab, wo die Teilchen im Atemtrakt abgeschieden und wie lange sie dort festgehalten werden. Teilchen über ca. 10 Mikrometer werden nicht eingeatmet. Die Partikeldeposition wird sodann durch die Nasen- oder Mundatmung beeinflusst. Bei der Nasenatmung filtern die Schleimhäute der Nase vor allem grobe Partikel, die größer als 2,5 Mikrometer sind, effektiv aus der Atemluft. Die Trägheit ihrer Masse und die Schwerkraft

bewirken, dass sich diese Partikel auf dem Nasenschleim und den Epithelzellen der Nase ablagern. Nur wenige Partikel dieser Größe gelangen auf diesem Wege in die Lunge. Ganz anders bei der Mundatmung: Atmet ein gesunder Erwachsener langsam durch den Mund, dringen die Partikel nahezu ungehindert in den Rachenraum und in die großen Bronchien ein. Partikel, die grösser als fünf Mikrometer oder kleiner als zehn Nanometer sind, lagern sich bevorzugt hier ab. Die übrigen Teilchen strömen weiter bis in die Lungenperipherie. Sie können sich sowohl auf den Wänden der Bronchiolen als auch auf den hauchdünnen Epithelwänden der Alveolen festsetzen. Während Partikel größer als 500 Nanometer aufgrund ihrer Schwerkraft in die feinen Verästelungen der Lungen gelangen, dominiert bei Partikeln kleiner als 500 nm die Diffusion aufgrund Brownscher Molekularbewegung deren Abscheidung. Lediglich Partikel um 500 Nanometer Größe werden kaum im Atemtrakt deponiert. Etwa 80 Prozent von ihnen werden wieder aus der Lunge ausgeatmet, sie bleiben im Luftstrom der ein- und ausgeatmeten Luft. Mit weiter abnehmender Größe bis 20 Nanometer steigt der Anteil der abgelagerten Partikel in der Lungenperipherie stark an. Generell gilt für Partikel mit einer Größe kleiner als 500 Nanometer: Je kleiner die eingeatmeten Teilchen sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie gegen Membranen in den Atemwegen stossen und deponiert werden, bevor sie der Luftstrom wieder aus der Lunge heraustransportiert. Bei langsamen und tiefen Atemzügen gelangt eine grosse Menge des Aerosols in die Lunge und zu den Alveolen. Ob sich ein Partikel schon im Rachenraum oder erst in der Lungenperipherie ablagert, hängt zusätzlich von seinen Wasser aufnehmenden Komponenten ab, die die Teilchen im feuchten Atemtrakt rasch wachsen lassen. Die erwähnten Depositionswahrscheinlichkeiten gelten für gesunde erwachsene Menschen, bei Alten und Kranken kann die Deposition anders sein.



Figur 9: Ablagerung von Feinstaub im menschlichen Atemtrakt



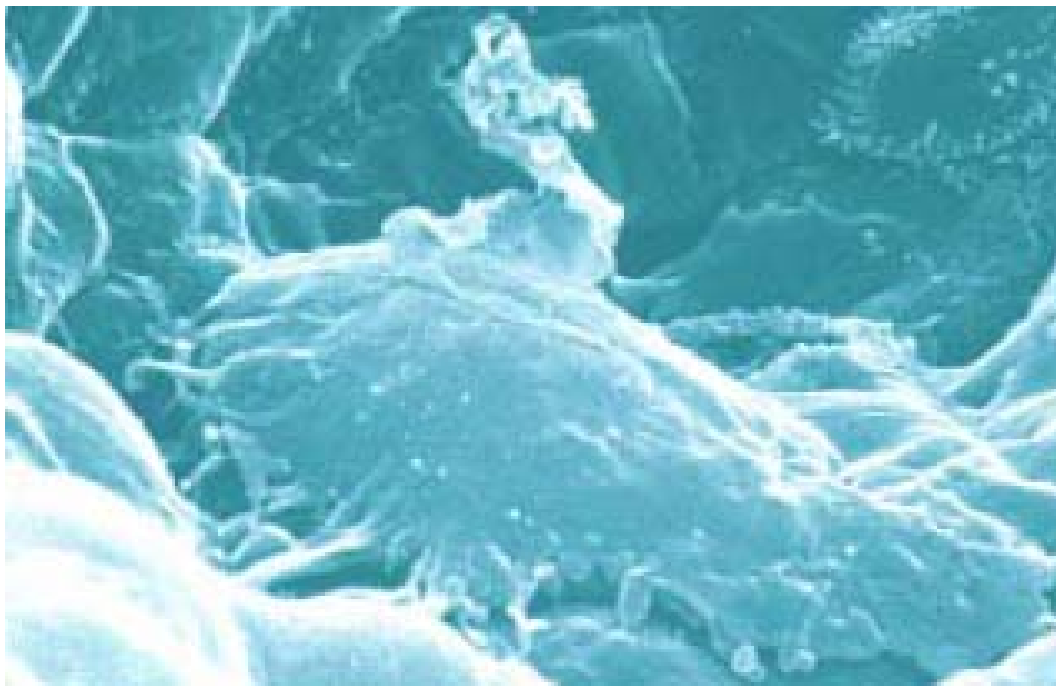
Figur 10 Grössenverteilung der Partikeldeposition in der Lunge in Prozenten der totalen inhalierten Masse.

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

Der Körper kann die deponierten Partikel mit zwei unterschiedlichen Abwehrmechanismen wieder entfernen: Abtransport und Abbau. Die Luftröhre, die Bronchien und Bronchiolen sind mit Flimmerhaaren (Zilien) ausgekleidet. Die Spitzen der Flimmerhaare ragen in den darüber liegenden, hochviskosen, zusammenhängenden Schleimteppich (Mucus), der in der Luftröhre 8-12 µm, in den Bronchiolen nur noch 0.1 µm dick ist. Durch eine Partikel-Oberflächenfilm-Interaktion (coating) ermöglicht dieses System die Entfernung eingedrungener unlöslicher 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). Innerhalb von ein bis drei Tagen werden die Partikel auf diese Weise mit dem Schleim wieder herausbefördert. Bei den allerfeinsten Partikeln versagt dieser Mechanismus aber, 80% dieser Partikel verbleiben mehrere Wochen in den Bronchien. Lösliche Partikelbestandteile werden aufgrund ihrer biochemischen Eigenschaften über den Stoffwechsel abgebaut.

In den Alveolen hat es keine Flimmerhaare und keinen Schleim mehr. Die Partikel, die bis in die Lungenbläschen gelangt sind, werden durch alveolare Makrophagen entfernt (alveolare Clearance). Makrophagen (Fresszellen) sind die natürlichen Reinigungszellen des Immunsystems. Sie nehmen Partikel, aber auch eingedrungene Bakterien und Trümmer zerstörter Zellen auf, inaktivieren und zersetzen sie und ge-

ben die Stoffwechselprodukte ins Lungengewebe und ins Blut ab. Wenige Fresszellen wandern mit ihrer Fracht in die Bronchien, wo sie über die mukoziliäre Clearance entfernt werden. Makrophagen fressen bevorzugt gröbere und feine Partikel, die allerfeinsten erkennen sie schlecht. Diese Partikel bleiben daher länger auf dem Alveolarepithel sitzen und können in dessen Zellen, das darunter liegende Gewebe, in die Lymphknoten und ins Blut vordringen. In welchem Ausmass die Partikel dann noch in weitere Organe wie Leber, Herz oder Gehirn gelangen können, ist zurzeit noch Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen. Der Körper kann darauf mit Entzündungsreaktionen reagieren, die das Immunsystem in Alarmbereitschaft versetzen. Je mehr und je länger die Abwehr durch die Partikel beansprucht wird, desto schlechter kann sie gegen Viren und Bakterien ankämpfen. Ein grosser Teil der allerfeinsten Partikel kann jahrelang in den Lungen verbleiben. Aus der Lungenperipherie werden Partikel wesentlich langsamer entfernt als im oberen Atemtrakt durch die mukoziliäre Clearance. Chronisch obstruktive Lungenerkrankungen, kurz COPD genannt (dazu gehören chronisch obstruktive Bronchitis und das Lungenemphysem), führen zu einer Verminderung der Makrophagenzahl und zu einer Erhöhung von Entzündungsreaktionen fördernden Zytokinen. Dies wiederum führt zu einer deutlichen Verzögerung der Clearance der eingeatmeten und deponierten Partikel.



Figur 11: Alveolarmakrophagen, die natürlichen Reinigungszellen des Immunsystems, fressen bevorzugt grobe und feine Partikel, die kleineren, ultrafeinen dagegen erkennen sie schlecht. Quelle: P. Gehr/ Universität Bern

- **Welches sind die Aussagen und Grenzen epidemiologischer Studien?**

Mit epidemiologischen Studien ist es möglich, die Wirkungen tatsächlich vorkommender Schadstoffbelastungen zu erfassen. Niedrige, lang andauernde 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 (Spezifizität).
- Die Wirkung ist biologisch plausibel.

- **Welches sind die Aussagen und Grenzen toxikologischer Studien?**

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 aber 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. Zudem erfolgen Tierversuche meistens mit genetisch einheitlichen Stämmen, für Menschen ist aber bekannt, dass genetisch unterschiedliche Prädispositionen auch zu unterschiedlichen Reaktionen gegenüber bestimmten Schadstoffen führen kann. Während Tierversuche für die Bestimmung eines Risikos für eine ganze Bevölkerung nicht

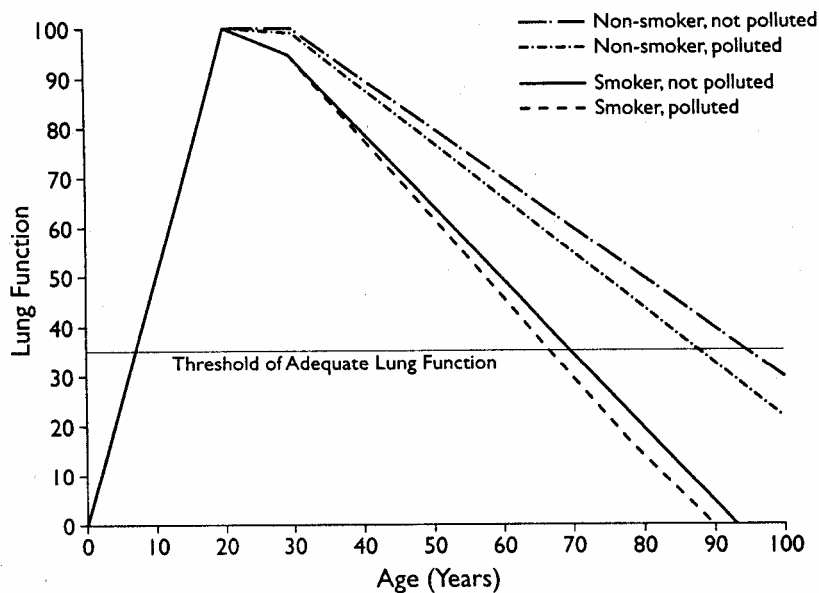
sehr hilfreich sind, können sie bei der Abklärung von Wirkungsmechanismen wertvolle Dienste leisten.

- **Wie sind die Wirkungsmechanismen von Partikeln?**

Die Wirkungsmechanismen der Partikel sind zurzeit Gegenstand von intensiven Untersuchungen. Zur Erklärung der Zusammenhänge zwischen Partikelbelastung und Morbidität / Mortalität werden zurzeit folgende Hypothesen diskutiert (US-EPA 2004, GSF 2005):

- Partikel können direkt auf Organe des Herzkreislaufsystems oder Blutbestandteile einwirken. Wenn Partikel direkt auf Organe einwirken, durchdringen sie zuerst die dünne Membran der Alveolen und gelangen ins Blut. Der Blutstrom transportiert sie dann zu jedem Organ. Ultrafeine Partikel lassen sich in der Leber, dem Herz, aber auch im Gehirn nachweisen. Partikel in der Blutbahn führen zu einer Aktivierung der Blutplättchen (Thrombozyten). Dadurch gerinnt das Blut schneller, das Thrombosierisiko ist erhöht und Infarkte werden wahrscheinlicher. Das Risiko für eine beschleunigte Entwicklung der Arteriosklerose nimmt ebenfalls zu.
- Partikel interagieren mit der Alveolarmembran und beeinflussen dadurch das vegetative Nervensystem. Neben den Gefäßen ist auch das Herz direkt betroffen, denn der Herzschlag unterliegt der Kontrolle des vegetativen Nervensystems. Der Puls ist leicht beschleunigt, die Herzrhythmusvariabilität nimmt ab und das Herz kann nicht mehr angemessen auf körperliche Anstrengung und Stress reagieren.
- Partikel rufen Abwehrprozesse in Form von Entzündungsreaktionen hervor. Diese spielen sich zuerst in der Lunge ab, führen aber dann zur Ausschüttung von Botenstoffen (Zytokinen) und als Folge zu einer erhöhten Blutgerinnung und damit zu einem erhöhten Risiko für einen Herzinfarkt. Der ständige Entzündungsreiz schwächt die Immunabwehr, was wiederum zu einer erhöhten Anfälligkeit für Infektionen führt. Entzündungen der Atemwege können zu einem verminderten Gasaustausch und zur Hypoxie (weniger Sauerstoff in bestimmten Körperregionen) führen.

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. Allgemein gilt die Lungenfunktion als ein sehr guter Prädiktor für die Mortalität.



Figur 12 Verlauf der Lungenfunktion bei Rauchern und Nichtrauchern in verschmutzter und nicht-verschmutzter Atemluft (Wilson 1996).

Mit toxikologischen Untersuchungen werden mögliche physiologische Mechanismen der Partikelwirkung sowie die Effekte verschiedener Partikelfractionen und Zusammensetzungen studiert. Sie zeigen, dass die ultrafeinen (20 nm) und die hydrophoben Partikel ein besonderes Risiko (stärkere entzündliche Reaktionen, grösserer oxidativer Stress, erhöhte Mortalität bei Ratten) darstellen verglichen mit den feinen. Bezogen auf die Partikeloberfläche zeigten ultrafeine und feine Partikel aber ähnliche Dosis-Wirkungsbeziehungen. Inhalierete ultrafeine Partikel haben möglicherweise auch systemische Effekte, welche unabhängig von den Wirkungen auf die Lunge sind. Insgesamt genügt die Datenlage aber noch nicht, um zu postulieren, die hohe Zahl ultrafeiner Partikel würde in ganz unterschiedlicher Weise zu den beobachteten Gesundheitsrisiken beitragen als die feinen Partikel (US-EPA 2004). Wasserlösliche Transitionsmetalle (z.B. Ni, V, Zn, Fe) und organische Komponenten (welche in Verbrennungsaerosolen gefunden werden) waren in toxikologischen Studien konsistent mit Zellschädigungen, entzündlichen Reaktionen, Atemwegshyperreaktionen und Antigen induzierten Immunreaktionen assoziiert (US-EPA 2004). Die mutagenen und genotoxischen Eigenschaften der Dieselpartikel haben sich in diversen Studien bestätigt. In früheren Studien aus Deutschland zeigten Dieselpartikel ohne PAH eine ähnliche Wirkung wie Dieselpartikel mit PAH (Pott 1991). Bioaerosole rufen in Verbindung mit Dieselpartikeln deutlich verstärkte Immunreaktionen hervor. Zur Wirkung der Partikelazidität (saure Aerosole, H_2SO_4) gibt es nur wenig neue Daten. Die sauren Partikel lösen vor allem bei Asthmatikern verstärkte respiratorische Symptome aus. Bioaerosole (Pilze und Pilzsporen, Pollenbestandteile, Endotoxine, Partikelgrösse 0.01 bis $>20 \mu m$) tragen normalerweise nur wenig zur PM-Masse bei. Sie lösen allergische Rhinitis (Heuschnupfen) und Asthmaanfälle aus. Potenzierende Wirkungen von Bioaerosolen in Verbindung mit organischen Kohlenwasserstoffen (PAH) wurden gezeigt. 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 PM10 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 Allgemeinen 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 um $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h-Mittelwert) ergab folgende Veränderungen bei den verschiedenen gesundheitlichen Auswirkungen (WHO 2004a):

Wirkung auf die Gesundheit	Anstieg des Risikos pro 10 µg/m ³ PM10 (95%-KI)	Anzahl Studien von der WHO in der Meta-Analyse berücksichtigt:
Gesamt-Mortalität ohne Unfälle	0.6% (0.4 – 0.8%)	33
Mortalität wegen Atemwegserkrankungen	1.3% (0.5 - 2.0 %)	18
Mortalität wegen Herz-Kreislaufkrankungen	0.9% (0.5 - 1.3%)	17
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen, Alter 65+	0.7% (0.2 – 1.3%)	8
Chronischer Husten bei Kindern (5-15 Jahre)	0.0% (-1.3 -1.1%, NS)	34
Medikamentengebrauch bei Kindern mit chronischen Atemwegsproblemen	0.5% (-1.9 – 2.9%, NS)	31

Tabelle 11 Veränderung der Häufigkeit von Gesundheitswirkungen bei einer kurzzeitigen Erhöhung von PM10 um 10 µg/m³

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

Bei einer im Jahresmittel durchschnittlich um 10 µg/m³ erhöhten PM10-Belastung ergeben sich folgende Veränderungen bei den verschiedenen gesundheitlichen Auswirkungen (ARE 2004, WHO 2003, UNECE 2004)

Wirkung auf die Gesundheit	Anstieg des Risikos pro 10 µg/m³ PM10 (95%-KI)	Anzahl Studien in der Meta-Analyse berücksichtigt:
Gesamt-Mortalität ohne Unfälle	5.9% (3.1 - 8.8%)	3
Lungenkrebs-Mortalität	10.6% (4.2 – 17.4%)	3
Säuglingssterblichkeit	5.6% (2.6 – 8.8%)	5
Spitaltage wegen Atemwegserkrankungen	0.9% (0.6 – 1.1%)	8
Spitaltage wegen Herz-Kreislauserkrankungen	0.7% (0.4 – 0.9%)	14
Chronische Bronchitis bei Erwachsenen	5.0% (0.0 – 15.0%)	1
Akute Bronchitis bei Kindern	35% (10.0 – 67.0%)	6
Asthmaanfälle bei Erwachsenen	2.9% (1.3 - -4.5%)	6
Tage mit eingeschränkter Aktivität	9.4% (8.0 – 11.0%)	2

Tabelle 12 Veränderung der Häufigkeit von Gesundheitswirkungen bei einer Erhöhung des PM10-Jahresmittels um 10 µg/m³

- **Welches sind die gesundheitlichen Auswirkungen der Luftverschmutzung in der Schweiz?**

In einer von Lufthygienikern, Epidemiologen und Ökonomen durchgeführten Studie wurden die Wirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit der Bevölkerung in der Schweiz ermittelt (Basisjahr 2000). Der in dieser Studie massgebende Schadstoffindikator PM10 berücksichtigt auch die Wirkungen der Stickoxide, nicht aber die Wirkungen von Ozon. Die Wirkungen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Jährlich sterben in der Schweiz rund 3700 Menschen frühzeitig an den Folgen der Luftverschmutzung, dabei gehen rund 42'000 Lebensjahre verloren (ARE 2004), etwa doppelt so viele wie durch die tödlichen Unfälle im Strassenverkehr. Bezogen auf die Lebenserwartung der gesamten Bevölkerung bedeutet dies ein Verlust von ca. 6 Monaten, bei den Betroffenen wird die Lebenserwartung durchschnittlich um 10 Jahre verkürzt.

Gesundheitseffekt	Beobachtete Prävalenz	Attributable Fälle pro 10 µg/m ³ PM10 und 100'000 Einwohner (95%-KI)	Anzahl Fälle wegen der Luftbelastung (95%-KI)
Gesamtmortalität (Erwachsene >30 Jahre)	805	44 (23-66)	3'746 (1968-5587)
Lungenkrebsmortalität	39	4 (1-6)	311(123-511)
Säuglingssterblichkeit	5	0.3 (0.1-0.4)	23 (10-36)
Spitaltage wegen Atemwegserkrankungen	8'313	70 (51-90)	5'858 (4'273-7'512)
Spitaltage wegen Herz-kreislauferkrankungen	17'837	117 (71-163)	9'780 (5'927-13'633)
Chronische Bronchitis bei Erwachsenen	247	12 (0-35)	999 (0-2954)
Akute Bronchitis bei Kindern	1'914	479 (129-911)	39'049 (10'509-74'227)
Asthmaanfälle bei Erwachsenen	17'364	486 (218-755)	41'073 (18'412-63'735)
Tage mit eingeschränkter Aktivität (Erwachsene >19 Jahre)	248'377	20'954 (17'833-24'521)	1'773'821 (1'509'635-2'075'748)

Tabelle 13: Überblick über die Krankheitshäufigkeiten, die attributablen Fälle und die Anzahl Fälle aufgrund der Luftschadstoffbelastung (Indikator PM10) in der Schweiz im Jahr 2000 (ARE 2004).

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

PM10-Jahresmittelwert	10	15	20	25	30	35 µg /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 14 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% (Braun-Fahrländer 1997).

- **Sind alle PM-Komponenten aus gesundheitlicher Sicht gleich bedeutend?**

Nach Analyse verschiedener epidemiologischer Studien kommt die WHO zum Schluss, dass die feinen Partikel ($\text{PM}_{2.5}$) aus gesundheitlicher Sicht bedeutender sind als die groben ($\text{PM}_{10}\text{-PM}_{2.5}$) (WHO 2003, WHO 2004a, WHO 2004b). Die WHO hält aber fest, dass die groben Partikel ebenfalls Wirkungen auf die Gesundheit haben und reduziert werden sollten. Zusammenhänge zwischen erhöhten PM_{10} -Belastungen (grobe und feine Partikel) und verschiedenen gesundheitlichen Wirkungen konnten in sehr vielen Studien weltweit nachgewiesen werden. Die WHO hält weiter fest, dass die Verbrennungsaerosole dabei eine sehr wichtige Rolle spielen. Diese Partikel enthalten neben Kohlenstoff auch organische Komponenten und Transitionsmetalle und sie haben eine relativ grosse Oberfläche. Viele Toxikologen sind der Meinung, dass die Oberfläche der Partikel und deren chemische Zusammensetzung für die gesundheitlichen Wirkungen entscheidend sind. Erdkrustenmaterial und verschiedene lösliche Salze wie Ammonium, Chloride, Sulfate und Nitrate zeigen in Laborstudien eine geringere Toxizität als Verbrennungsaerosole. In epidemiologischen Studien erweisen sich Schadstoffe (u.a. Partikel) aus dem Verkehr und die Wohnlage in der Nähe von viel befahrenen Strassen als besonders risikoreich. Aus Untersuchungen an Ratten mit ultrafeinen Titandioxid-Partikeln ergeben sich Hinweise, dass ultrafeine Partikel toxischer (schwere Entzündungsreaktionen, Lungenödem, Mortalität) wirken als die feinen. In epidemiologischen Kurzzeitstudien zeigen die ultrafeinen Partikel teilweise leicht stärkere Beziehungen zu diversen gesundheitlichen Wirkungen, teilweise jedoch auch nicht. PM_{10} war in allen diesen Studien ein guter, wenn nicht der beste Indikator für Asthmasymptome. Eine 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.

Schwebstaubproben der Aussenluft enthalten in der groben Fraktion auch gramnegative Bakterien, Endotoxine und andere Partikel biologischer Herkunft, welche Entzündungsvorgänge auslösen können. Die grobe Fraktion der Schwebstaubpartikel ($\text{PM}_{10}\text{-PM}_{2.5}$) allein ist stärker mit Husten, Asthmaanfällen und respiratorischer Mortalität assoziiert, dagegen sind die feinen Anteile ($\text{PM}_{2.5}$) stärker mit Herzrhythmusstörungen oder einem Anstieg der kardiovaskulären Mortalität korreliert.

- **Wie können die Wirkungen von Partikeln auf die Gesundheit zusammenfassend beurteilt werden (Stand 2005)?**

Aufgrund der publizierten Übersichten (WHO 2003, WHO 2004 a und b, ISPM 2005) ergibt sich folgendes Bild:

- Folgende Gesundheitsauswirkungen wurden im Zusammenhang mit einer chronisch erhöhten Partikelbelastung in vielen epidemiologischen Studien weltweit beschrieben: ein Anstieg der Symptome der untern Atemwege, eine Reduktion der Lungenfunktion

bei Kindern und Erwachsenen, ein Anstieg von chronisch obstruktiven Lungenerkrankungen (COPD), eine Reduktion der Lebenserwartung wegen respiratorischer und kardiopulmonärer Mortalität sowie Lungenkrebs. Eine akut erhöhte Partikelbelastung kann zu folgenden Wirkungen führen: zu entzündlichen Prozessen in der Lunge, zu Atemwegssymptomen generell, zu negativen Effekten auf das Herzkreislaufsystem (z.B. Herzinfarkt), zu einer Zunahme des Medikamentengebrauchs, zu einer Zunahme der Spitaleinweisungen wegen Atemwegs- und Herzkreislaufproblemen, zu einer erhöhten Mortalität.

- Die Wirkungen wurden in epidemiologischen, toxikologischen und klinischen Studien nachgewiesen.
- Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser grösser als 10 Mikrometer haben praktisch keine Auswirkungen.
- Die Fraktion der feinen Partikel (PM_{2.5}) zeigt in epidemiologischen Studien die konsistentesten und ausgeprägtesten Wirkungen auf die Gesundheit.
- Die chronischen Auswirkungen von konstant zu hohen Partikelbelastungen (hohe Jahresmittelwerte) sind aus Public Health Sicht bedeutender als die akuten Wirkungen von Spitzenbelastungen (hohe 24h-Mittelwerte).
- Eine Schwelle unterhalb derer keine Wirkungen auftreten, ist in epidemiologischen Studien mit grösseren Bevölkerungsgruppen nicht erkennbar. Wirkungen wurden bei allen untersuchten Expositionen gefunden. Die Expositions-Wirkungsbeziehungen sind grösstenteils linear. Das heisst, auch bei Einhaltung der PM-Grenzwerte können Wirkungen nicht ausgeschlossen werden.
- In experimentellen Studien haben die Verbrennungsaerosole das grösste toxische Potential. Diese Partikel enthalten oft Transitionsmetalle, organische Komponenten, sie haben eine grosse Oberfläche und sind in grosser Zahl vorhanden.
- Lösliche Salze wie Ammonium, Sulfate, Nitrate, Chloride und auch Erdkrustenmaterial zeigen in experimentellen Studien ein geringeres toxisches Potential.
- Dieselruss (elementarerer Kohlenstoff mit angelagerten organischen Verbindungen) hat ein grosses kanzerogenes Potential.
- Partikel aus dem Verkehr scheinen besonders toxisch zu wirken.
- Sowohl die groben Partikel (beurteilt als Massendifferenz zwischen PM₁₀ und PM_{2.5} bzw. zwischen PM₁₀ und PM₁) als auch die feinen Partikel (beurteilt als Masse PM_{2.5} oder PM₁) wie auch die ultrafeinen Partikel (beurteilt als Anzahl kleiner 0.1 µm) haben Auswirkungen auf Mortalität und Morbidität. Die Wirkungen sind weitgehend unabhängig voneinander.
- Die Wirkungen der groben und ultrafeinen Partikel zeigen sich vor allem nach kurzfristig erhöhten Schadstoffbelastungen (akute Wirkungen). Feine Partikel haben akute und chronische Wirkungen auf die Gesundheit. Es gibt zurzeit noch keine Studien, welche die Wirkungen von langfristig hohen Konzentrationen ultrafeiner Partikel untersucht haben.

- Die grobe Fraktion von PM10 ist stärker mit Husten, Asthmaanfällen und respiratorischer Mortalität assoziiert (vor allem akute Wirkungen), 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.
 - In Zeitreihenstudien treten Wirkungen auf die respiratorische Mortalität einen Tag nach der erhöhten Partikelbelastung auf. Wirkungen auf die kardiovaskuläre Mortalität sind nach etwa 4 Tagen am stärksten sichtbar. Das relative Risiko ist für die respiratorische Mortalität grösser. Durch die kardiovaskuläre Mortalität sind aber mehr Leute betroffen.
 - Ungeborene, Säuglinge und Kleinkinder, Personen mit Erkrankungen der Atemwege und des Herzkreislaufsystems sowie die über 65-Jährigen reagieren besonders empfindlich auf die Feinpartikelbelastung. Dazu begünstigen gewisse genetische Konstellationen die Wirkung der Partikel.
- **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 EC oder/und die Oberfläche/Anzahl 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 Partikeln 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 70-80 % 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?**

Eine von Epidemiologen, Lufthygienikern und Ökonomen gemeinsam durchgeführte Studie im Auftrag des ARE (Bundesamt für Raumentwicklung), des BUWAL, des BAG (Bundesamt für Gesundheit) und des BFE (Bundesamt für Energie) hat die Auswirkungen der anthropogenen Luftverschmutzung auf die Bevölkerung der Schweiz bezüglich Mortalität und Morbidität mit PM10 als Indikator für das Jahr 2000 berechnet (ARE 2004). In der Studie werden die jährlichen Gesundheitskosten auf 4.2 Milliarden Franken beziffert, wobei rund 1.62 Milliarden dem Verkehr als Verursacher angelastet werden.

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

Eine Reduktion der Feinstaub-Belastung (auch eine kleine) bringt eine Verbesserung der Gesundheit. Dies haben verschiedene Studien im Ausland und auch in der Schweiz (SCARPOL- Bayer Oglesby et. al 2005, SAPALDIA) gezeigt. Würden die geltenden PM10-Immissionsgrenzwerte der LRV eingehalten, könnten über 2'000 vorzeitige Todesfälle, über 25'000 Fälle von Bronchitis bei Kindern und gegen 30'000 Asthmaanfälle bei Erwachsenen 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 (NMVOC)
- 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
- Neuausrichtung der Agrarpolitik im Rahmen des neuen Landwirtschaftsgesetzes und dessen Ausführungsverordnungen
- Aktionsprogramm Energie 2000 (inkl. Energiegesetzgebung, Förderprogramme, freiwillige Massnahmen) und Folgeprogramm energieschweiz; 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 Landetaxen auf den Landesflughäfen
- Sicherstellung des Baus und der Finanzierung von Infrastrukturvorhaben des öffentlichen Verkehrs

- Baurichtlinie Luft zur Verminderung der Feinstaubemissionen durch Baustellen mit strengeren Auflagen für Grossbaustellen (u.a Partikelfilter für Baumaschinen mit einer Leistung über 18 kW)
 - 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 bis zum Jahr 2000 (bzw. 2005) ist der Ausstoss von Schwefeldioxid in der Schweiz um 75%, von Stickoxiden um 40% (bzw. knapp 50%), von flüchtigen organischen Verbindungen um 58% (bzw. 64%) und von Ammoniak um 21% (bzw. 23%) zurückgegangen. Beim primären PM10 betrug der Rückgang 26% (bzw. 27%).

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

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht, welche Emissionsreduktionen bei PM10 und den Vorläuferstoffen in der Schweiz nötig sind, damit die Grenzwerte zum Schutz der Gesundheit eingehalten werden können.

Schadstoff	notwendige Emissionsreduktion gegenüber 2000
Schwefeldioxid SO ₂	Wiederanstieg verhindern
Stickoxide NO _x	ca. 60%
Flüchtige organische Verbindungen NMVOC	ca. 50%
Feinstaub PM10 (primär)	ca. 45%
Ammoniak NH ₃	ca. 45%
kanzerogene Stoffe (z.B. Dieseleruss)	so weit wie technisch möglich

Tabelle 15: Zur Einhaltung der Gesundheits- und Umweltziele nötige Emissionsreduktion

Fazit: Um die Grenzwerte einhalten zu können, müssen die schweizerischen Emissionen von PM10 und den meisten Vorläufergasen nochmals etwa halbiert werden. Zusätzlich müssen auch die Emissionen aller Schadstoffkomponenten in den übrigen europäischen Ländern um etwa 50% reduziert 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 schrittweise Zulassung von 40-t-Lastwagen als Folge des bilateralen Abkommens im Landverkehr, die Baurichtlinie Luft sowie verschiedene kantonale Massnahmen im Rahmen der aktualisierten Massnahmenplanung einbezogen. Damit nehmen die primären

PM10-Emissionen in der Schweiz von 2005 bis 2020 um insgesamt etwa 20% ab. Bei den gasförmigen Vorläufersubstanzen für sekundäres PM10 ist ohne zusätzliche Massnahmen gemäss Schriftenreihe Umwelt Nr. 379 (Künzler 2005) in der Schweiz mit einer weiteren Abnahme der PM10-Emissionen um ca. 20% zu rechnen.

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

Auch der Ausstoss der gasförmigen Schadstoffe wird zurückgehen. Die folgende Tabelle zeigt den zu erwartenden Rückgang der Vorläuferschadstoffemissionen von sekundärem PM10 in der Schweiz und der EU (IIASA 2005), unter Berücksichtigung der rechträftig eingeleiteten Massnahmen.

	SO ₂	NO _x	VOC	NH ₃
Schweiz	10%	34%	22%	11%
Europäische Union (EU25)	68%	49%	45%	4%

Tabelle 16 Erwarteter Rückgang der gasförmigen Emissionen zwischen 2000 und 2020

- **Welche zusätzlichen Massnahmen sind möglich und was bewirken sie?**

Zu den wichtigsten zusätzlichen Massnahmen gehören:

- strenge Euro-5-Abgasgrenzwerte für PW und Lieferwagen (inkl. Partikelfilter oder äquivalente Systeme und NO_x-Reduktion Dieselfahrzeuge)
- strenge Euro-6-Abgasgrenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge (inkl. Partikelfilter oder äquivalente Systeme und NO_x-Reduktion)
- Emissionsminderung beim ÖV und bei Nutzfahrzeugflotten (Partikelfilter, DeNO_x, alternative Antriebssysteme, Ecodriving)
- möglichst schnelle Ausrüstung bzw. Nachrüstung aller schweren Nutzfahrzeuge mit Partikelfiltern
- bei Neubeschaffungen von Dieselfahrzeugen durch die öffentliche Hand nur Fahrzeuge (inkl. PW) mit Partikelfiltern
- Abgasnormen für Maschinen und Geräte der Land- und Forstwirtschaft nach dem aktuellen Stand der Technik
- Verschärfung der Abgasnormen für Baumaschinen und -geräte
- Partikelfilter für Diesellokomotiven
- Optimierung der Bremssysteme bei Zügen zur Reduktion des Abriebs
- Minderung von PM10-Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung im Verkehr
- Staubminderung bei emissionsintensiven Feuerungen (Holzfeuerungen) und Industriefeuerungen mit Biomasse
- Anpassung der LRV an den aktuellen Stand der Technik
- Abgasnormen für neue Baumaschinen und Geräte nach dem aktuellen Stand der Technik

- Erhöhung der emissionsabhängigen Landegebühren, Streichen von Steuervergünstigungen im Flugverkehr
- verbindliche Einführung des Minergie-Standards bei Neubauten
- CO₂-Abgabe auf fossile Brenn- und Treibstoffe
- ökologische Steuerreform
- Wärmerückgewinnung bei Heizungen und industriellen Feuerungen
- Erhöhung der VOC-Abgabe
- konsequente Umsetzung der Baurichtlinie Luft
- Emissionsreduktion bei Maschinen und Geräten in Industrie, Gewerbe, Haushalten
- Reduktion der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen (Ausbringung mittels Schleppschläuchen oder Injektion, Verbesserung der Stallkonstruktionen/Abluftreinigung, Abdeckung Güllelager, lufthygienische Auflagen bei den Direktzahlungen)
- Laufstallsanierungen zur Staubvermeidung und Ammoniakreduktion bei der Tierhaltung
- Verminderung des Stickstoffaustrags auf landwirtschaftlichen Böden
- Verzicht auf die offene Verbrennung von Feld- und Waldabfällen

Eine ganze Reihe dieser Massnahmen - insbesondere die Verschärfung von Abgasgrenzwerten - kann nur im Gleichschritt mit der EU eingeführt werden. Nähere Informationen zu den Massnahmen sind dem Bericht "Weiterentwicklung des Luftreinhalte-Konzepts" (Künzler 2005) zu entnehmen. Mit den oben aufgeführten Massnahmen und einer Reihe weiterer kleinerer Beiträge könnten die jährlichen primären PM₁₀-Emissionen bezogen auf das Jahr 2020 um weitere 1'900-5'600 Tonnen vermindert werden. Damit würden sie noch 12'300 bis 16'000 Tonnen betragen, was einem Rückgang von etwa 28-45% gegenüber 2005 entspricht.

- **Können die Ziele erreicht werden?**

Bei rascher und konsequenter Umsetzung der oben erwähnten Massnahmen in der Schweiz und Umsetzung der Protokolle der Genfer Konvention in den übrigen europäischen Staaten und Nordamerika ist davon auszugehen, dass die Luftreinhalteziele bis 2020 erreicht werden können.

- **Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Luftreinhaltung und der Bekämpfung des Treibhauseffektes?**

CO₂ ist das wichtigste Treibhausgas. Doch auch Ozon und Dieselmotoren sind in beträchtlichem Mass klimaaktiv. Massnahmen gegen Dieselmotoren, Stickoxide (NO_x) und flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) leisten somit einen wichtigen Beitrag zur Eindämmung der Klimaerwärmung.

Andererseits entstehen viele Luftschadstoffe bei Verbrennungsprozessen, welche auch CO₂ freisetzen. Massnahmen zur Verminderung des Brenn- und Treibstoffverbrauchs leisten in der Regel deshalb auch einen wichtigen Beitrag zur Luftreinhaltung, indem sie gleichzeitig den Ausstoss mehrerer Luftschadstoffe vermindern. Ausnahmen sind z.B. der Ersatz von Benzin- durch Dieselmotoren, solange für die Dieselmotoren nicht gleich strenge Abgasgrenzwerte gelten wie für Benzinmotoren oder der Ersatz von Heizöl durch Holz, solange die

Emissionen von Holzfeuerungen nicht auf den Stand der Ölfeuerungen gebracht werden.

Die Umsetzung der Ziele gemäss Kyotoabkommen und CO₂-Gesetz stellt eine wesentliche Vorbedingung für die Erreichung der Luftreinhalteziele dar.

Literatur

- Ackermann-Liebrich, U. et al. and SAPALDIA Team. Lung Function and Long-term Exposure to Air Pollutants in Switzerland, *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)
- APHEIS: Air Pollution and Health: A European Information System, "Health Impact Assessment of Air Pollution and Communication Strategy" (2005)
- ARE 2004. Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2000. Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2004)
- Bayer-Oglesby et al. and SCARPOL Team. Decline of Ambient Air Pollution Levels and Improved Respiratory Health in Swiss Children, *Environmental Health Perspectives*, doi: 10.1289/ehp.8159 <http://dx.doi.org/> (2005)
- Braun-Fahrländer, C. et al and SCARPOL Team. Respiratory Health and Long-term Exposure to Air Pollutants in Swiss Schoolchildren, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 155, 1042-1049 (1997)
- BUWAL, "Position des BUWAL zum Thema Feinstaub, PM10 und Nanopartikel", Bern (Juni 1998)
- BUWAL, "Modelling of PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010", *Umwelt-Materialien* Nr. 169, Bern (2003)
- BUWAL, "NABEL, Luftbelastung 2004", *Schriftenreihe Umwelt* Nr. 388, Bern (2005)
- CARB 1998: California Environmental Protection Agency, Air Resources Board. Proposed Identification of Diesel Exhaust as a Toxic Air Contaminant (1998)
- 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)

- EU 1999: Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften 29. Juni (1999)
- EU 2004: Second Position Paper on Particulate Matter. CAFE Working Group on Particulate Matter. Dezember (2004)
- Gälli Purghart, B.C.; Schwermetalle auf grössenfraktioniertem Aerosol und in der Deposition: Untersuchungen an einem Höhenprofil im Kanton Bern; Dissertation Universität Bern, Bern (1988)
- GSF 2005: Aerosolforschung in der GSF. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg Deutschland (2005)
- Hertz, J., et al., *Chimia* **42**, 57-67, (1988)
- Hüglin, C. et al., "Anteil des Strassenverkehrs an den PM10- und PM2.5-Immissionen. Chemische Zusammensetzung der Feinstaubes und Quellenzuordnung mit einem Rezeptormodell." Berichte des NFP41 "Verkehr und Umwelt", Bericht C4, Programmleitung NFP41, Bern (2000)
- IIASA: A final set of scenarios for the Clean Air For Europe (CAFE) programme, CAFE Scenario Analysis Report Nr. 6, Laxenburg (2005)
- ISPM 2005: Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel, Dokumentationsstelle Luftverschmutzung und Gesundheit. Aussenluftverschmutzung und Gesundheit - Zusammenfassende Beurteilung <http://pages.unibas.ch/ispmb/LuG/Uebersicht05.pdf>
- Infrac/Meteotest, PM10-Modell Schweiz: Sensitivitätsanalysen. Interner Bericht Bericht BUWAL/Dienst GVF (2000)
- Künzler P., Weiterentwicklung des Luftreinhalte-Konzeptes, Schriftenreihe Umwelt Nr. 379, BUWAL, Bern (2005)
- LAI 1992: Krebsrisiko durch Luftverunreinigungen. Länderausschuss für Immissionsschutz LAI, Düsseldorf Deutschland (1992)
- Pani, R., Höhenabhängigkeit der chemischen Zusammensetzung und der Konzentration von atmosphärischen Schwebestäuben, Dissertation Universität Zürich, Zürich (1992)
- Peters, A. et al., Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* **155**, 1376-1383 (1997)
- Pott, F., VDI-Berichte **888**, 211-244 (1991)
- Turnbull, A.B. et al., *Atmospheric Environment* **34**, 3129-3137, (2000)
- UNECE 2004: Modelling and Assessment of the Health Impact of Particulate Matter and Ozone. Summary report by the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution of the World Health Organisation/European Centre for Environment and Health and the Executive Body. United Nations Economic Commission for Europe. EB.AIR/WG.1/2004/11
- US EPA 2004: Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume I and II, United States Environmental Protection Agency www.epa.gov/ncea (2004)
- US EPA 2005: EPA's Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, Final PM Staff Paper July 2005, United States Environmental Protection Agency (2005)

-
- WHO 2003: Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Report on a WHO Working Group, Copenhagen WHO Regional Office for Europe, EUR/03/5042688 (2003)
 - WHO 2004a: Meta-analysis of Time Series Studies and Panel Studies of Particulate Matter and Ozone. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, EUR/04/5042688 (2004)
 - WHO 2004b: Health Aspects of Air Pollution – Answers to Follow-up Questions from CAFE. Report on a WHO Working Group Meeting, Copenhagen WHO Regional Office for Europe, EUR/04/5046026 (2004)
 - 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)