



# Feinstaub

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

Stand Januar 2013

### Inhalt

<i>Begriffe</i>	2
<i>Eigenschaften</i>	4
<i>Emissionen</i>	8
<i>Immissionen</i>	10
<i>Immissionsgrenzwerte</i>	18
<i>Auswirkungen</i>	21
<i>Massnahmen</i>	24
<i>Literatur</i>	29
<i>Anhang A</i>	31
<i>Anhang B</i>	32

---

---

## Begriffe

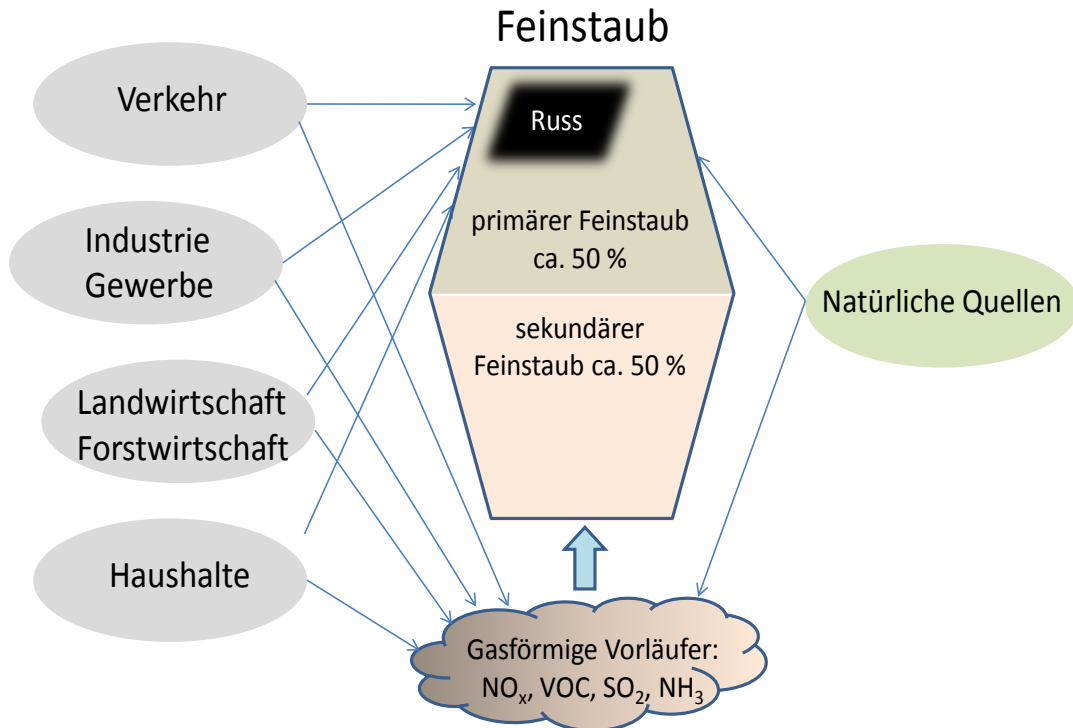
- **aerodynamischer Durchmesser:** Da luftgetragene Partikel sehr unterschiedliche Formen und Dichte aufweisen können, ist es nicht trivial, ihnen einen Durchmesser zuzuordnen. Der aerodynamische Durchmesser ist eine geeignete Größe, um eine Reihe von Prozessen zu beschreiben. Er entspricht demjenigen Durchmesser, den ein kugelförmiges Teilchen der Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$  haben müsste, damit es die gleiche Sinkgeschwindigkeit in Luft aufweisen würde wie das betrachtete Teilchen.
- **feine Partikel:** Staubteilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser unter  $2.5 \mu\text{m}$
- **grobe Partikel:** Staubteilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser von  $2.5$  bis  $10 \mu\text{m}$
- **LRV:** Luftreinhalte-Verordnung SR 814.318.142.1
- **NH<sub>3</sub>:** Ammoniak
- **NM VOC:** flüchtige organische Verbindungen mit Ausnahme von Methan
- **NO<sub>x</sub>:** Stickoxide
- **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 1.6 verwendet ( $\text{OM} = 1.6 * \text{OC}$ ).
- **PAK bzw. PAH:** polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe bzw. "polycyclic aromatic hydrocarbons" (z.B. Benzo[a]pyren)
- **PM<sub>10</sub> (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)
- **PM<sub>2.5</sub>:** 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)
- **primäre Partikel:** Staubteilchen, die direkt als Partikel in die Luft gelangen
- **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).
- **sekundäre Partikel:** Staubteilchen, die sich erst in der Atmosphäre aus Vorläufergasen (v.a. SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, NM VOC) bilden
- **SO<sub>2</sub>:** Schwefeldioxid

- 
- **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.
  - **TSP (Total suspended particulate matter):** Schwebestaub mit einer Sinkgeschwindigkeit  $\leq 10$  cm/s; Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als  $57 \mu\text{m}$
  - **ultrafeine Partikel:** Staubteilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser unter  $0.1 \mu\text{m}$
  - **USG:** Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz) SR 814.01

## Eigenschaften

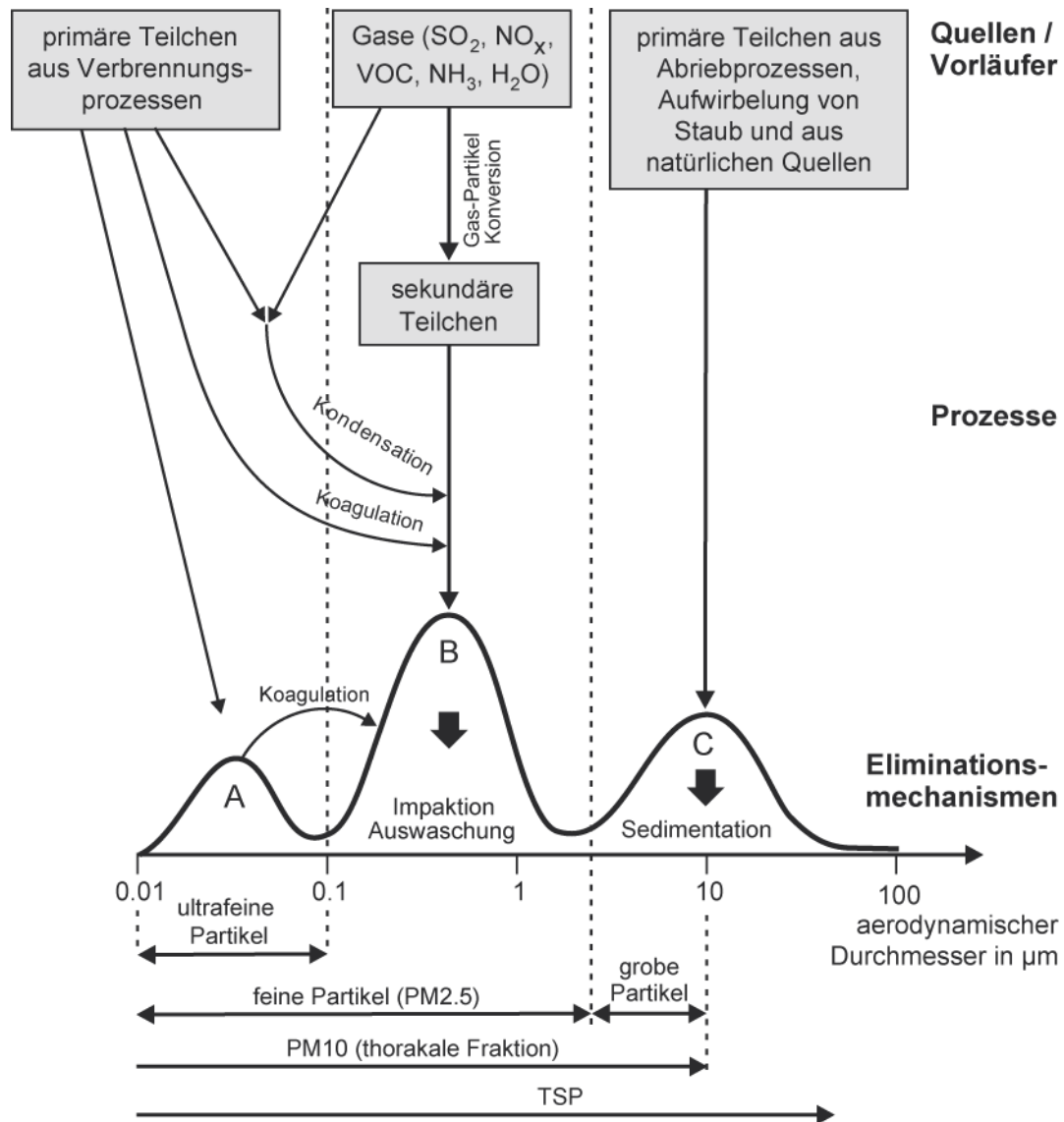
- **Wie entstehen Partikel?**

Man unterscheidet primäre, also direkt als Partikel emittierte und sekundäre, aus gasförmigen Vorläufern in der Atmosphäre gebildete Teilchen.



**Abbildung 1** Vereinfachte schematische Darstellung des luftgetragenen Feinstaubes in der Schweiz mit primären und sekundären Anteilen und deren Quellen. Russ bildet einen Teil des primären Feinstaubes.

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  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  und NMVOC.



**Abbildung 2** 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 (PM<sub>10</sub>)?**

Man kann 3 Grössenbereiche unterscheiden:

- 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 bilden massenmässig einen 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) anzuwachsen 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. An quellenfernen Standorten ("gealtertes" Aerosol) ist meist nur der Akkumulationsmodus als Maximum in der Grössenverteilung deutlich sichtbar. Der Akkumulationsmodus macht einen

grossen Teil der PM10-Masse aus, etwa die Hälfte beim gealterten Aerosol (BAFU 2010).

- **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
	Organisches Material (OM)	Gasförmige organische Verbindungen wie NMVOC

**Tabelle 1** Zusammensetzung und Quellen von PM10

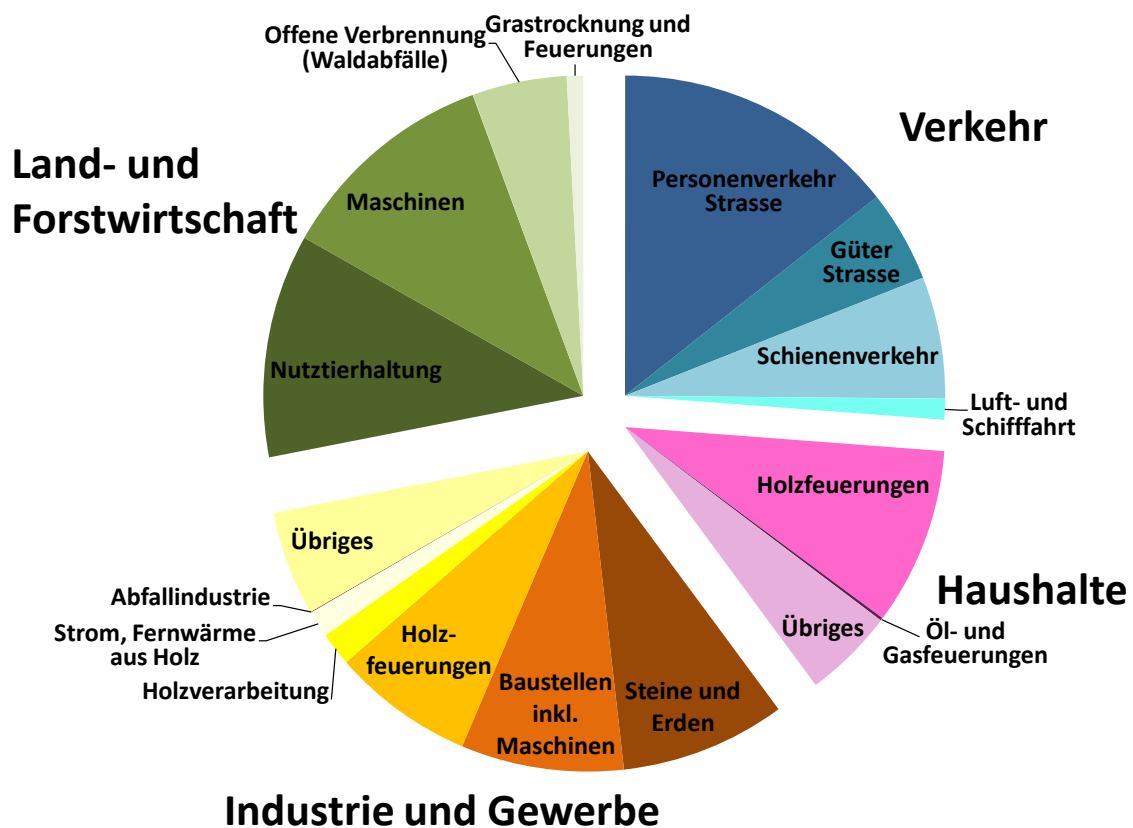
## Emissionen

- **Wie werden die Emissionen bzw. die Emissionsfaktoren verschiedener Quellen bestimmt?**

Angaben zu den Verfahren, die verwendet werden um die Emissionsfaktoren verschiedener Quellen zu bestimmen, sind im Anhang A zu finden. Dabei werden nur die Emissionen von primärem Feinstaub erfasst, die sekundären Partikel sind in diesen Emissionsfaktoren nicht enthalten.

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

Die Emissionen von primärem PM10 in der Schweiz betragen im Jahr 2010 gut 20'000 Tonnen (BAFU 2012a). Die folgende Abbildung zeigt die Anteile der verschiedenen Quellengruppen an diesen Emissionen. Neben Industrie und Verkehr trägt auch die Land- und Forstwirtschaft einen beträchtlichen Teil an die Emissionen bei. Bei den Haushalten fällt auf, dass Holzfeuerungen, welche nur einen geringen Teil des Wärmebedarfs abdecken, sehr viel höhere Emissionen aufweisen als die Öl- und Gasfeuerungen, welche den Löwenanteil der Wärmeenergie liefern. Die Holzfeuerungen und die offene Verbrennung von Waldabfällen produzieren zusätzlich grosse Mengen an kondensierbaren Feinstaubpartikeln, welche in diesen Zahlen noch nicht enthalten sind.



**Abbildung 3** Anteile der verschiedenen Quellen an den primären PM10-Emissionen in der Schweiz im Jahr 2010.



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

Es bestehen Abschätzungen über den Beitrag der Vorläufergase an die PM10-Immissionen (s. S. 13).

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

Es bestehen Abschätzungen über den Beitrag der natürlichen PM10-Partikel an die PM10-Immissionen (s. S.14).

## Immissionen

- **Wie wird Feinstaub in der Luft gemessen?**

Es gibt eine ganze Reihe von Messverfahren, die zur grössenselektiven Bestimmung des Schwebstaubes oder einzelner Anteile davon dienen können. Dazu gehören manuelle gravimetrische Verfahren, bei denen die Staubproben auf Filtern oder Folien abgeschieden und anschliessend bei vorgeschriebener Luftfeuchtigkeit und Temperatur konditioniert und gewogen werden. Automatisierte Verfahren registrieren ein kontinuierliches Messsignal, welches nicht direkt einer Wägung nach dem manuellen gravimetrischen Referenzverfahren entspricht. Dieses Messsignal muss auf eine Massenkonzentration umgerechnet und mit dem Referenzverfahren überprüft werden. Weitere Angaben zu verschiedenen Immissionsmessverfahren für die Feinstaubmasse und bestimmte Inhaltsstoffe sind in Anhang B zu finden.

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

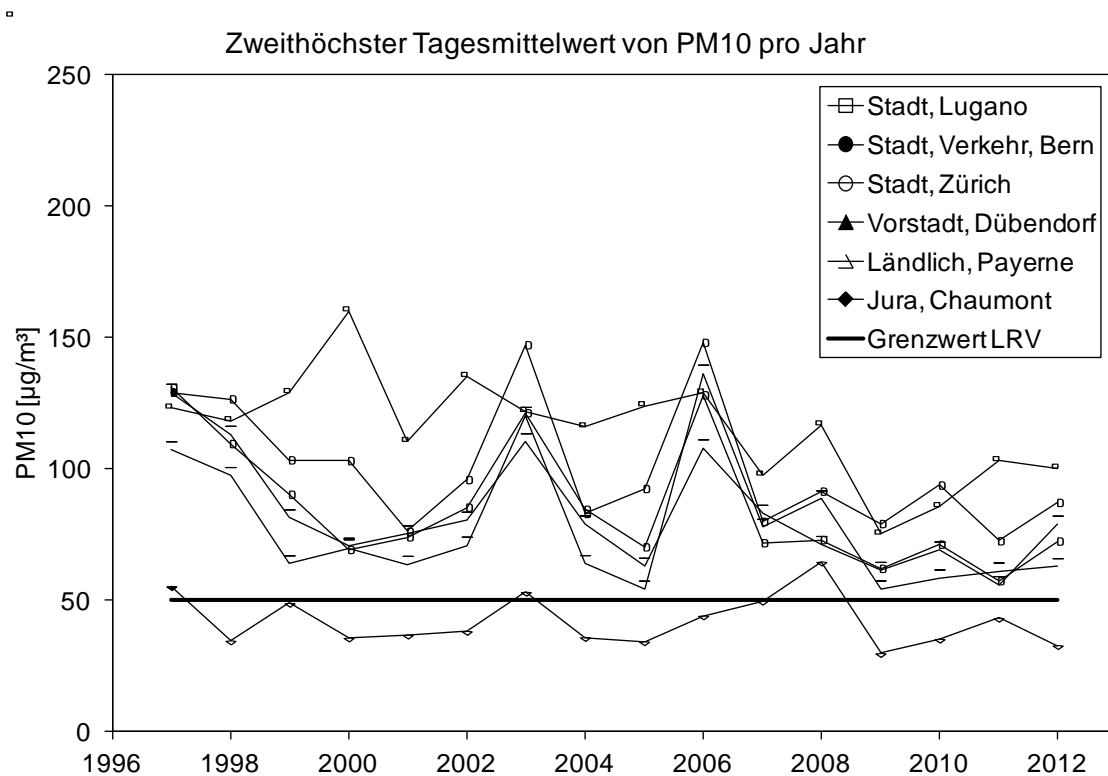
Typische PM10-Jahresmittelwerte für die Periode 2007 – 2011 in der Schweiz sind (Quelle: PM10-Messungen des NABEL; s. BAFU 2012b):

Stadt, verkehrsbelastet	22 - 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Stadtzentrum	20 - 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Vorstädtisch	18 - 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ländlich unter 1000 m ü. M.	15 - 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mittlere Höhenlagen (1000 - 2000 m ü. M.)	8 - 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Hochalpen (Jungfraujoch)	2 - 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

**Tabelle 2** PM10-Jahresmittelwerte an verschiedenen Standorttypen

- **Welche Überschreitungen des PM10-Kurzzeitgrenzwertes wurden gemessen?**

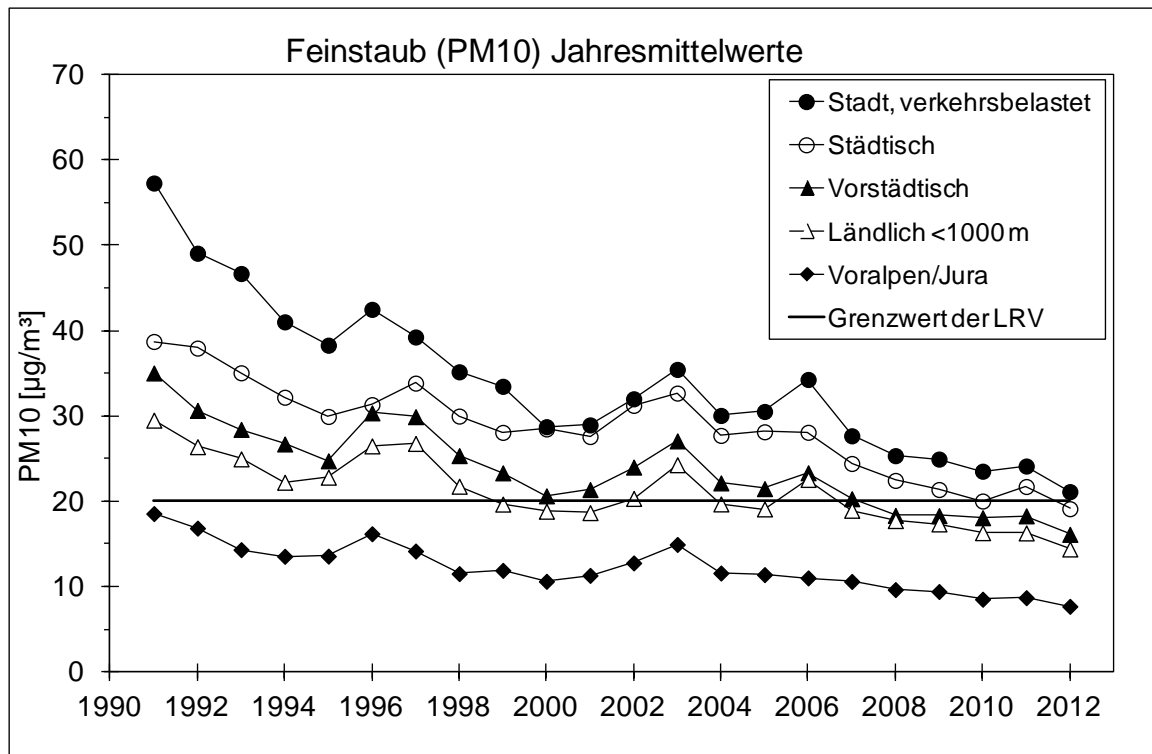
Seit Aufnahme der PM10-Messungen im NABEL liegen die höchsten Tagesmittelwerte an den meisten Standorten über dem Grenzwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Das Gesetz lässt eine solche Überschreitung pro Jahr zu, während das zweithöchste Tagesmittel den Grenzwert einhalten muss.



**Abbildung 4** Zeitliche Entwicklung des zweithöchsten PM10-Tagesmittelwertes.

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

Im NABEL wird PM10 seit 1997 gemessen. Für frühere Jahre liegen Daten für TSP vor. Ausführliche Parallelmessungen zwischen PM10 und TSP in den Jahren 1997 und 1998 (EMPA 1999) belegen eine hohe Korrelation zwischen den beiden Messgrößen. Da nicht davon auszugehen ist, dass sich die Zusammensetzung des Feinstaubes an den jeweiligen Standorten wesentlich geändert hat, können die langjährigen TSP-Messreihen mit einiger Sicherheit in PM10-Werte umgerechnet werden.



**Abbildung 5** Zeitliche Entwicklung der PM10-Belastung aus Messungen des NABEL; Werte vor 1997: aus TSP-Werten berechnet

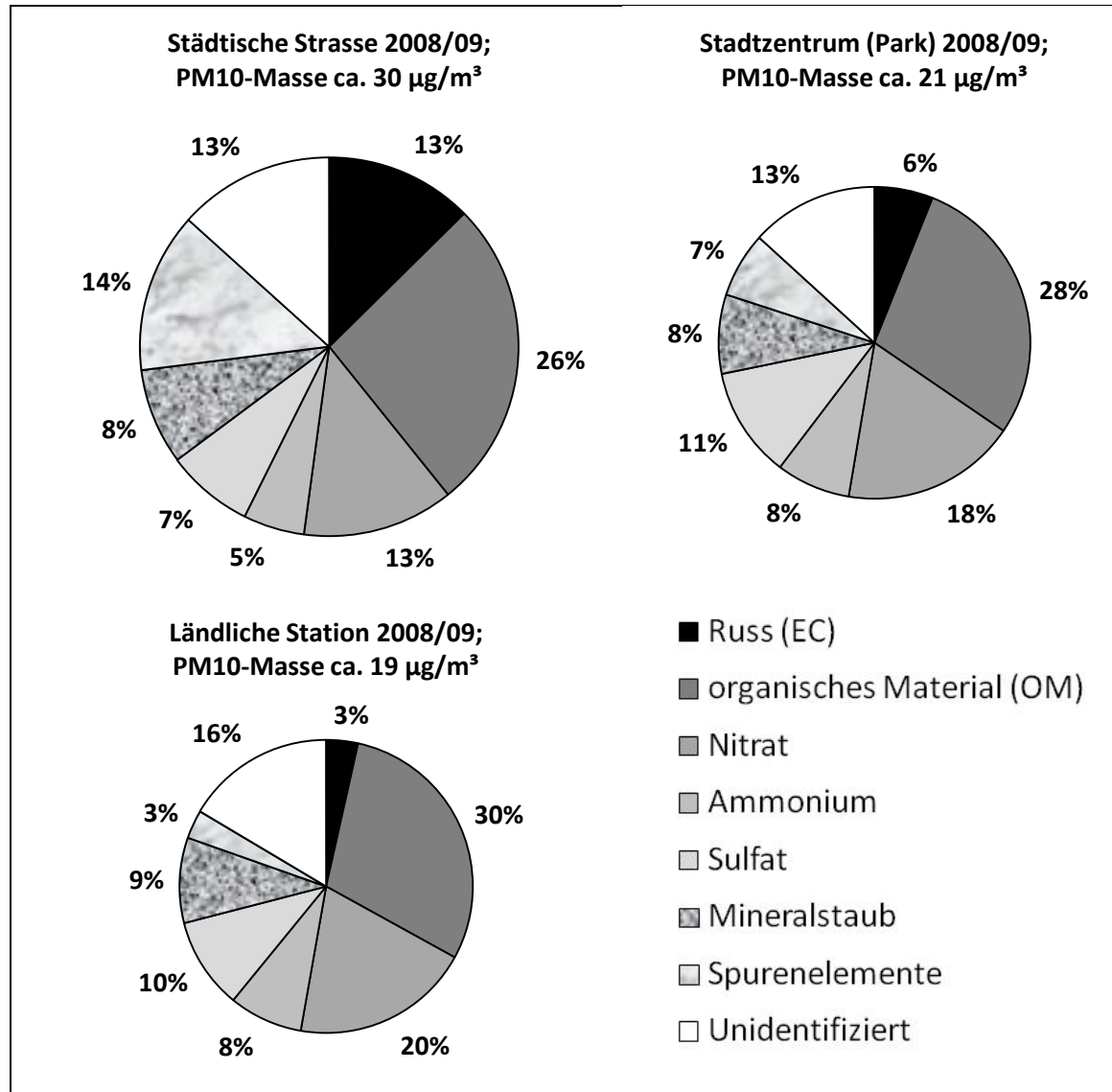
Die PM10-Belastung ist an allen Standorten seit 1990 rückläufig. Eine Analyse der Monatsmittelwerte zeigt, dass die PM10-Belastung der Wintermonate von Jahr zu Jahr sehr stark schwanken und die Jahresmittel beeinflussen kann. Die Häufigkeit von Inversionslagen dürfte im Wesentlichen dafür verantwortlich 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.

- **Welche Werte wurden während der Wintersmogepisode im Januar/Februar 2006 gemessen?**

Zwei Perioden im Januar/Februar 2006 waren durch lang anhaltende, sehr tief liegende Inversionen gekennzeichnet. Die im dicht besiedelten Mittelland der Alpennordseite ausgestossenen Schadstoffe sammelten sich in einem relativ geringen Luftvolumen an, was zu einem raschen Anstieg der Immissionen von PM10 und  $\text{NO}_x$  führte. Die an den tiefer liegenden Standorten der Alpennordseite gemessenen, auf das Referenzverfahren normierten PM10-Werte erreichten  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und damit die höchsten Werte seit Messbeginn im Jahr 1997. Stationen der Alpennordseite, welche über dem Hochnebel lagen, sowie die Alpensüdseite waren von der Smoglage nicht betroffen. Hier wurden im Januar/Februar 2006 keine höheren Werte gemessen als in den Vorjahren.

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

Daten aus der Schweiz, die im Rahmen eines Forschungsprojektes (Hüglin 2012) erhoben wurden, ergeben folgendes Bild:



**Abbildung 6** Chemische Zusammensetzung des PM10 an verschiedenen Standorttypen

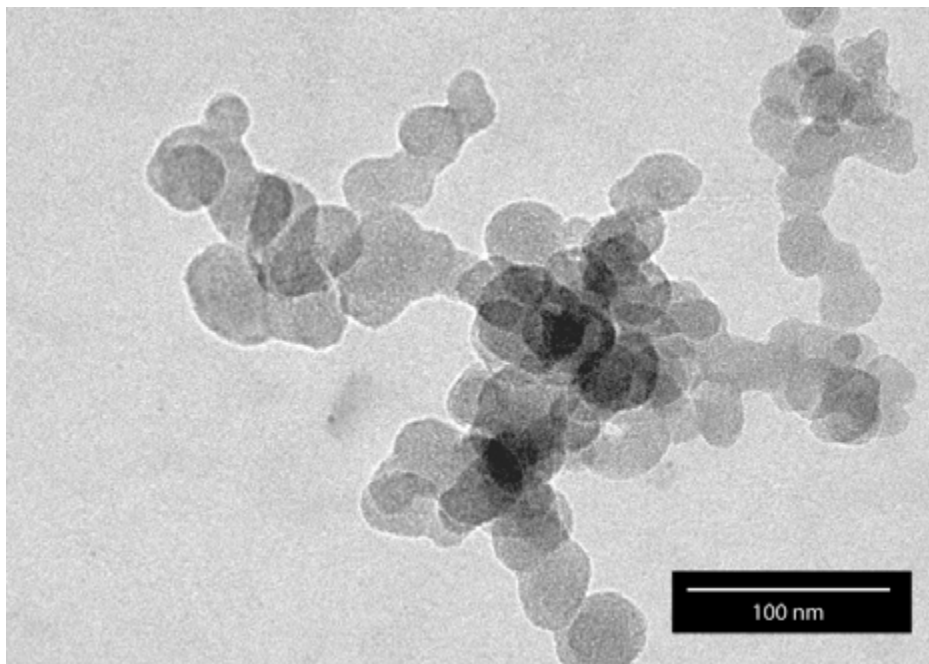
Im unidentifizierten Anteil ist u.a. Wasser enthalten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Ammonium, Nitrat und Sulfat etwa ein Drittel, am Strassenstandort etwa ein Viertel von PM10 ausmachen. Wird das sekundäre organische Material (Teil von OM) und das im unidentifizierten Anteil enthaltene atmosphärische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

Gegenüber der früheren Erhebung 1998/99 haben insbesondere Sulfat und Russ stark abgenommen, während bei Nitrat kein Rückgang feststellbar ist.

An Strassenstandorten findet man sowohl mehr ultrafeine Partikel (Russ) als auch mehr grobe Partikel (Brems- und Strassenabrieb, Aufwirbelung von Strassenstaub, Streusalz) als an ländlichen Standorten, während die absolute Konzentration der sekundären Komponenten im ganzen Mittelland ähnlich ist.

- **Gibt es kontinuierliche Russmessungen in der Schweiz?**

An einigen NABEL-Standorten in der Schweiz wird Russ (bzw. EC) kontinuierlich gemessen seit Ende 2008. An ländlichen Standorten betragen die Konzentrationen im Jahresmittel etwa  $0.5-1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , in Agglomerationen etwa  $1-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und strassennah mehr als  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dies weist deutlich auf den Strassenverkehr als eine Hauptquelle der Russbelastung hin.



**Abbildung 7** Dieselerussagglomerat

- **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 Pollen, Meeressgisch, Winderosion und Vulkane in Frage.

**Pollen:** Sie sind überwiegend grösser als  $10 \mu\text{m}$  und tragen deshalb nur wenig zur  $\text{PM}_{10}$ -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). Neuere Messungen in der Schweiz (Hüglin 2000 und unveröffentlichte Resultate) zeigen im Sommer sehr tiefe Natrium- und Chlorid-Werte (um  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 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 durch Fahrzeuge). 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.

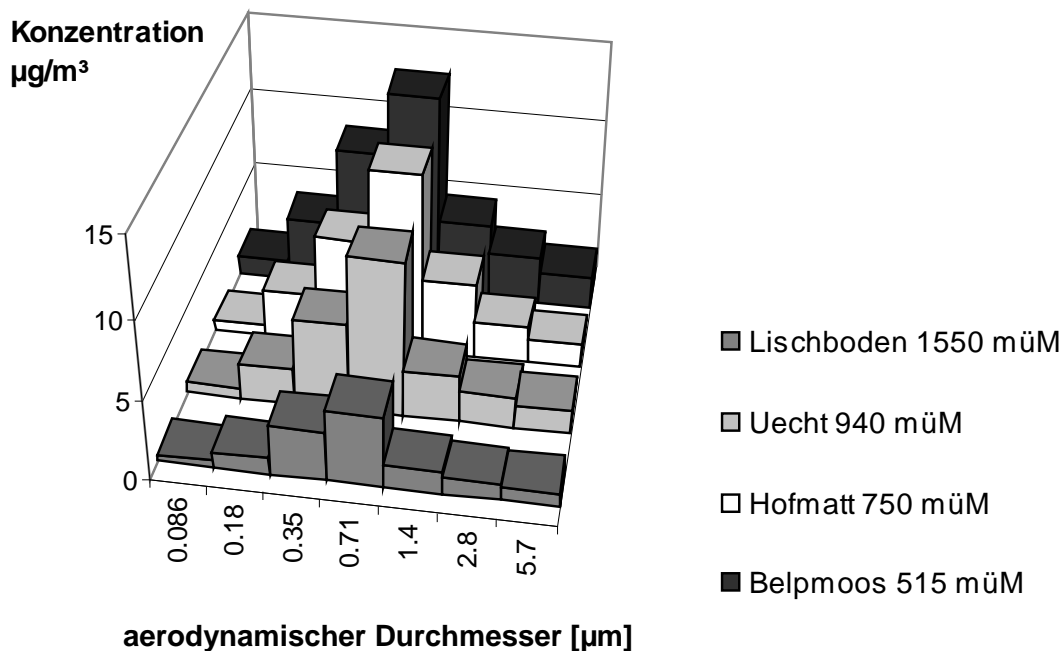
Ausserdem bildet sich sekundäres organisches Aerosol aus natürlichen VOC-Emissionen von Wäldern. Es liegen keine gesicherten Angaben über die Höhe der Belastung vor. Aus Teilresultaten verschiedener Studien lässt sich abschätzen, dass die Konzentration im schweizerischen Mittelland in der Grössenordnung von  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  oder darunter liegen dürfte. Dabei ist zu beachten, dass dieser Feinstaub zwar aus natürlichen VOC-Emissionen gebildet wird, jedoch durch Reaktion mit anthropogenen Schadstoffen.

- **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 PM10, PM2.5 und PM1?**

Die Grössenverteilung (Massenanteil) der Partikel an quellenfernen Standorten zeigt ein Maximum bei einem Partikeldurchmesser von 0.5 – 1  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 8** Massen-Grössenverteilung des Aerosols an 4 ländlichen Standorten im Kanton Bern 1985/86 mit logarithmischer Darstellung der Partikelgrösse (Gälli Purghart 1988).

Im Bereich zwischen 2.5 und 10  $\mu\text{m}$  sind nur ca. 20-30 % der Partikelmasse vorhanden. Dies bedeutet, dass PM10 in der Schweiz zu etwa 70-80 % aus PM2.5 besteht. Der Anteil von PM1 am PM10 liegt bei ca. 50% (BAFU 2010).

- **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 für PM2.5 die Resultate in Tabelle 3.

Grössenklasse	Anteil an Partikelzahl	Anteil an Partikelmasse
0.01 - 0.1 $\mu\text{m}$	73 %	1 %
0.1 – 0.5 $\mu\text{m}$	27 %	82 %
0.5 – 2.5 $\mu\text{m}$	0.01 %	17 %

**Tabelle 3** 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).

Im NABEL wird an fünf Standorten die Anzahl-Konzentration der Partikel zwischen 7 nm und 3  $\mu\text{m}$  mit einem optischen Partikelzähler (CNC) gemessen. An einem ländlichen Standort über 1000 m ü M liegen sie im Jahresmittel bei rund 3'000 pro  $\text{cm}^3$ , in der Stadt bei 10'000 bis 30'000 pro  $\text{cm}^3$ . An autobahnnahen Standorten wie NABEL-Härkingen oder Reiden zeigt sich klar der Einfluss des lokalen Verkehrs auf die Partikelkonzentration. Bei Winden von der Autobahn her ergeben sich im Mittel fast zehnmal so hohe Partikelanzahlkonzentrationen wie bei Windsituationen ohne Autobahneinfluss.

## Immissionsgrenzwerte

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

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

20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	für das Jahresmittel
50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	für das Tagesmittel (darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden)

- **Welche Werte empfiehlt die Weltgesundheitsorganisation?**

Die Weltgesundheitsorganisation WHO stellt fest, dass klare Zusammenhänge zwischen der Feinstaubbelastung und einer ganzen Palette von gesundheitlichen Auswirkungen, hauptsächlich Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen, bestehen. Sie empfiehlt folgende Richtgrenzwerte (WHO 2006).

<b>PM10</b>	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Richtgrenzwert (Guideline) für das Jahresmittel Richtgrenzwert für das Tagesmittel; 99-Perzentilwert (3 Werte pro Jahr dürfen höher sein)
<b>PM2.5</b>	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Richtgrenzwert (Guideline) für das Jahresmittel Richtgrenzwert für das Tagesmittel; 99-Perzentilwert (3 Werte pro Jahr dürfen höher sein).

**Tabelle 4** Richtgrenzwerte der WHO

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die PM10-Immissionsgrenzwerte der Schweiz auf wirkungsorientierten Kriterien beruhen und den PM10-Richtgrenzwerten der WHO entsprechen.

- **Warum gibt es in der Schweiz keinen Russ Immissionsgrenzwert?**

Dieseruss ist der LRV als kanzerogene Substanz eingestuft. Für derartige Substanzen gilt ein Minimierungsgebot. Das heisst, dass emissionsmindernde Massnahmen ergriffen werden müssen, auch wenn kein Immissionsgrenzwert besteht, welcher überschritten ist.

Eine Abschätzung der eidgenössischen Kommission für Lufthygiene EKL (Bericht Feinstaub in der Schweiz, EKL 2007) hat ergeben, dass die durchschnittliche Belastung der Bevölkerung der Schweiz durch Russpartikel (EC) im Jahresmittel rund 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  beträgt. Russpartikel werden z.B. von Dieselmotoren ohne wirksame Abgasfilter ausgestossen oder sie entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von Biomasse (z.B. Holz). Russpartikel sind krebserregend, die Emissionen müssen minimiert werden. Um dem verfassungsmässigen Schutzanspruch der Bevölkerung gerecht zu werden, sollten gemäss Ansicht der Kommission die Russkonzentrationen (EC) im Jahresmittel 0.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht übersteigen. Das heisst, dass längerfristig nicht mehr als 100-200 Tonnen Russ in die Atemluft der Schweiz gelangen sollten.

- **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 sind sehr gut.

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

Die PM10-Immissionsgrenzwerte der Schweiz entsprechen den PM10-Richtgrenzwerten der WHO. Der Bundesrat ist der Auffassung, dass medizinisch begründete Grenzwerte eine gute Grundlage bilden und ein Klima des Vertrauens zwischen Bevölkerung, Behörden und Politik schaffen (Amtliches Bulletin 1997).

In der EU, in den USA und Kalifornien gelten die folgenden PM10- und PM2.5 - Grenzwerte (Tabelle 5), wobei die USA ihren Jahresmittelgrenzwert für PM2.5 am 14. Dezember 2012 auf  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gesenkt haben. Die Grenzwerte der EU entsprechen nicht den Kriterien des USG. In der Schweiz hat die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL bisher keinen zusätzlichen Immissionsgrenzwert für PM 2.5 vorgeschlagen. Sie wird zurzeit neu bewertet. Bei den in der Schweiz gemessenen Grössenverteilungen des Feinstaubes würde der PM10-Immissionsgrenzwert von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  einem PM2.5-Wert von  $12-16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entsprechen.

<b>PM10</b>		
EU Mitglieder und Norwegen	40 µg/m <sup>3</sup> 50 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert (einzuhalten seit 1.1.2005) 24-h-Mittelwert, max. 35 Überschreitungen erlaubt (einzuhalten seit 1.1.2005)
USA	150 µg/m <sup>3</sup>	24-h-Mittelwert (darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden)
Kalifornien	20 µg/m <sup>3</sup> 50 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert 24-h-Mittelwert
<b>PM2.5</b>		
EU Mitglieder und Norwegen	25 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert (einzuhalten ab 1.1.2015)
USA	12 µg/m <sup>3</sup> 35 µg/m <sup>3</sup>	Jahresmittelwert (Mittel über 3 Jahre) 24-h-Mittelwert (98-Perzentilwert, Mittel über 3 Jahre)
Kalifornien	12 µg/m <sup>3</sup> ----	Jahresmittelwert 24-h-Mittelwert

**Tabelle 5** PM10- und PM2.5 Grenzwerte der EU, USA und Kalifornien

## Auswirkungen

- **Wie gelangt Feinstaub in den Körper?**

Mit jedem Atemzug gelangen Tausende von Partikeln in unsere Atemwege. Ein Teil der Partikel wird wieder ausgeatmet, der Rest wird im Atemtrakt abgelagert und kann Beschwerden hervorrufen und die Gesundheit beeinträchtigen. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer dringen sie in die Lunge ein. Partikel die grösser als ca. 10 Mikrometer sind, werden zum allergrössten Teil schon in den obersten Atemwegen abgeschieden..

- **Wie reagiert der menschliche Organismus auf Feinstaub?**

Zusammenhänge zwischen erhöhten PM10-Belastungen (grobe und feine Partikel) und verschiedenen gesundheitlichen Wirkungen konnten in sehr vielen Studien weltweit nachgewiesen werden. Die Wirkungen der groben Partikel zeigen sich vor allem nach kurzfristig erhöhten Schadstoffbelastungen (akute Wirkungen). Feine Partikel haben akute und chronische Wirkungen auf die Gesundheit. 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. Die WHO hält fest, dass die Verbrennungsaerosole eine sehr wichtige Rolle spielen. Partikel aus der Verbrennung von Biomasse (z.B. Holz) haben ein ähnliches toxisches Potential wie Partikel, welche bei der Verbrennung fossiler Treibstoffe (z.B. Diesel) entstehen. Je höher die Feinstaubbelastung ist desto gravierender sind die gesundheitlichen Auswirkungen.

- **Wie können die Wirkungen von Partikeln auf die Gesundheit zusammenfassend beurteilt werden?**

Feinstaubpartikel mit einem Durchmesser von mehr als etwa 10 µm werden durch die Nase aus dem Luftstrom ausgefiltert oder lagern sich im Rachen ab. Kleinere Partikel gelangen in die Luftröhre und die Atemwege, diejenigen unter etwa 2-3 µm bis in die Lungenbläschen. Heute können in wissenschaftlichen Untersuchungen verschiedene Fraktionen von Feinstaub separat gemessen und untersucht werden: PM10 mit einem Durchmesser von  $\leq 10$  µm, eine gröbere Fraktion (PM10 – PM2.5), feine Partikel mit einem Durchmesser von  $\leq 2,5$  µm (PM2.5), und eine ultrafeine Fraktion mit Korngrössen von weniger als 0.1 µm, die oft anhand der Zahl der Partikel charakterisiert wird, da so kleine Partikel wenig zur Schwebstaubmasse beitragen.

Die gröberen Partikel lagern sich vor allem in der Luftröhre, Bronchien und Bronchiolen ab. Am Ort der Ablagerung kommt es zu einer entzündlichen Abwehrreaktion mit vermehrter Schleimbildung. Der Reiz führt auch zur Engerstellung der Atemwege und dadurch bei Asthmatikern und Asthmatikerinnen zu häufigeren Atemnotanfällen. Die Schleimhaut der Bronchien und Bronchiolen enthält Flimmerzellen, deren Oberfläche mit Härchen bedeckt ist, welche die eingedrungenen Partikel abtransportieren. In den Alveolen gibt es keine Flimmerzellen mehr. Die kleinsten Staubteilchen, welche diese Lungenbläschen erreichen, müssen dort durch Reinigungszellen, sogenannte Makrophagen, aufgelöst oder entfernt werden. Ultrafeine Partikel werden durch diese

Mechanismen schlecht erfasst und können bis ins Blut und andere Körperorgane gelangen, bei Schwangeren auch in den Blutkreislauf des ungeborenen Kindes

Zahlreiche Studien belegen den Zusammenhang zwischen der Feinstaubkonzentration und Atemwegserkrankungen, Herz-/Kreislaufkrankheiten, Krebserkrankungen und Todesfällen. Es gibt Hinweise, dass die gröberen Anteile eher für Akutwirkungen und auf die Atemwege, die feinsten Staubanteile stärker für die langfristigen Auswirkungen und die Herz-/Kreislauftrisiken verantwortlich sind, und dass aus Verbrennungsprozessen stammende Partikel toxischer wirken als Partikel aus der Erdkruste. Nicht alle Personengruppen reagieren gleich empfindlich auf die Luftschadstoffbelastung: Kinder, ältere und kranke Personen sind einem erhöhten Risiko ausgesetzt. Auch die genetische Veranlagung spielt eine Rolle, wie empfindlich jemand auf die Luftverschmutzung reagiert.

Zu den Auswirkungen der Anzahl der ultrafeinen Partikel auf die Gesundheit gibt es noch zu wenige Studien, um zuverlässigen Aussagen zu machen. Insbesondere Studien zu Wirkungen einer langfristig zu hohen Belastung sind praktisch nicht vorhanden.

Kürzlich hat die Weltgesundheitsorganisation WHO die gesundheitlichen Wirkungen von Russpartikeln (Black Carbon, BC) umfassend beurteilt (Health Effects of Black Carbon, WHO 2012). Der Bericht kommt zum Schluss, dass es genügend Evidenz für Wirkungen von Black Carbon auf die Lunge und das Herzkreislaufsystem gibt. Die Datenlage ist aber noch nicht ausreichend, um die Wirkungen von BC von den Wirkungen anderer PM Komponenten quantitativ zuverlässig zu unterscheiden.

- **Mögliche Folgen eines kurzfristigen Anstiegs der Feinstaub-Belastung:**
  - Akute Atemwegssymptome wie z.B. Husten, Auswurf und Atemnot
  - Auslösen von Schüben von Bronchitis, Asthma sowie Störungen der Regulierung des Herzrhythmus
  - Abwesenheiten am Arbeitsplatz und in der Schule
  - Arzt- und Notfallstationsbesuche wegen Atemwegs- und Herzkreislaufproblemen
  - Spitaleinweisungen wegen Lungenentzündungen, Asthmaanfällen, Herzinfarkten, Hirnschlag und anderen Atemwegs- und Herzkreislaufferkrankungen
  - Todesfälle infolge dieser Krankheiten
- **Mögliche Folgen einer ständig zu hohen Feinstaubbelastung:**
  - Chronische Atemwegserkrankungen wie z. B. Asthma und COPD (chronische Bronchitis)
  - Chronische Verschlechterung der Lungenfunktion, bei Kindern vermindertes Lungenwachstum
  - Chronische Herzkreislaufferkrankungen wie Atherosklerose und Bluthochdruck
  - Lungenkrebs
  - Vorzeitige Todesfälle wegen Atemwegs- und Herzkreislaufkrankheiten und entsprechend verkürzte Lebenserwartung

Gesamthaft gesehen sind die Folgen von chronisch erhöhten Partikelbelastungen, welche durch den Immissionsgrenzwert für das Jahresmittel beurteilt wer-

den, wesentlich bedeutender als die Folgen kurzfristig (z.B. tageweise) erhöhter Konzentrationen.

Wenn die Luftverschmutzung dank der getroffenen Luftreinhalte-Massnahmen sinkt, lassen sich auch Verbesserungen bei der Gesundheit beobachten (ERS 2010).

- **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 2005). Der in dieser Studie massgebende Schadstoffindikator PM10 berücksichtigt auch die Wirkungen der Stickoxide, nicht aber die Wirkungen von Ozon. Jährlich sterben in der Schweiz 3000 bis 4000 Menschen frühzeitig an den Folgen der Luftverschmutzung, dabei gehen rund 48'000 Lebensjahre verloren (ARE 2008). Bezogen auf die Lebenserwartung der gesamten Bevölkerung bedeutet dies einen Verlust von ca. 6 Monaten, bei den Betroffenen wird die Lebenserwartung deutlich stärker verkürzt. In der Studie werden die jährlichen Gesundheitskosten auf 5.1 Milliarden Franken beziffert.

- **Was bedeuten diese Erkenntnisse für die Luftreinhalte-Politik?**

Massnahmen zur Verminderung der PM10-Belastung lohnen sich: Sie führen zu einer Verbesserung der Gesundheit der Bevölkerung. Die Massnahmen sollten alle Grössenklassen vermindern, also sowohl grobe als auch feine und ultrafeine Partikel. Besonderes Augenmerk ist den krebserregenden Russpartikeln zu widmen (EKL 2007).

- **Wo lassen sich detailliertere Angaben zu den gesundheitlichen Auswirkungen finden?**

Weitere Informationen zum Thema finden sich auf folgender Internetseite des Bundesamtes für Umwelt

<http://www.bafu.admin.ch/luft/10804/index.html?lang=de>

## Massnahmen

- **Welche Strategie verfolgt die Schweiz bei der Verminderung des Feinstaubes?**

PM10 setzt sich grob je zur Hälfte aus primärem (direkt als Partikel emittiertem) und sekundärem (in der Luft aus Vorläufergasen gebildetem) Material zusammen. Reduktionsmassnahmen müssen deshalb sowohl beim primär emittierten Feinstaub als auch bei den Vorläufergasen - Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak, flüchtige organische Verbindungen - ansetzen. Der Vergleich der aktuellen Belastung mit den Immissionsgrenzwerten zeigt, dass auf nationaler und internationaler Ebene die Masse der primären und sekundären PM10 um je rund die Hälfte reduziert und die kanzerogenen PM10 weitestgehend vermieden werden müssen. Die gasförmigen Vorläufer werden im Rahmen der bestehen Strategien gegen Ozon, Versauerung und Überdüngung vermindert. Für die erforderliche Reduktion der primären PM10 braucht es aber weitere technische und ökonomische Massnahmen bei allen Emissionsquellen. Solche Massnahmen werden im Rahmen der Weiterentwicklung des Luftreinhalte-Konzeptes evaluiert resp. z.T. im Rahmen des Aktionsprogrammes Feinstaub realisiert. Besonderes Gewicht wird auf die Verminderung des Russes gelegt, der einerseits zu PM10 beiträgt, andererseits wegen seiner krebserregenden Eigenschaften so weit wie möglich vermindert werden muss.

- **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 und stufenweise Verschärfung
- 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 (LSVA) mit emissionsabhängiger Ausgestaltung des Abgabensatzes
  - Anreize für den Einsatz von Fahrzeugen mit geringen Partikelemissionen bei der Rückerstattung der Mineralölsteuer und bei der LSVA
  - 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
  - Ergänzung der Luftreinhalteverordnung mit strengeren Vorschriften über den Partikelaustritt von Industrieanlagen, Holzfeuerungen und Baumaschinen
  - 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
  - Förderung von Massnahmen zur Ammoniakreduktion in der Landwirtschaft durch das Ressourcenprogramm.
- **Zu welchen Emissionsreduktionen führten diese Massnahmen?**

Zwischen 1990 und 2010 ist der Ausstoss von Schwefeldioxid in der Schweiz um 68%, von Stickoxiden um 44%, von flüchtigen organischen Verbindungen um 69% und von Ammoniak um 14% gesunken. Beim primären PM10 betrug der Rückgang 29%.

- **Welche weiteren 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 (Schweizerischer Bundesrat 2009).

Schadstoff	notwendige Emissionsreduktion gegenüber 2005
Schwefeldioxid SO <sub>2</sub>	Wiederanstieg verhindern, vorsorgliche Massnahmen
Stickoxide NO <sub>x</sub>	ca. 50%
Flüchtige organische Verbindungen NMVOC	ca. 20-30%
Feinstaub PM10 (primär)	ca. 45%
Ammoniak NH <sub>3</sub>	ca. 40%
kanzerogene Stoffe (z.B. Dieseleruss)	so weit wie technisch möglich und verhältnismässig

**Tabelle 6** 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 weiteren Massnahmen sind bereit eingeleitet?**

Die EU hat weitere Verschärfungen der Abgasvorschriften für Personenwagen (Euro-6), für Lastwagen und Busse (Euro VI), für Maschinen in Industrie, Bau- und Landwirtschaft beschlossen, welche in den kommenden Jahren stufenweise in Kraft treten und von der Schweiz übernommen werden. Auch für Motorräder ist eine Verschärfung vorgesehen. Diese Verschärfungen werden zusammen mit der Umsetzung der bereits rechtskräftigen Massnahmen zukünftig zu einer weiteren wesentlichen Verminderung sowohl der partikulären als auch der gasförmigen Schadstoffemissionen führen. .

Eine Ausnahme bildet Ammoniak, wo keine grösseren Reduktionen zu erwarten sind.

- **Welcher Rückgang ist bei den primären Feinstaubemissionen und den Vorläufern des sekundären Feinstaubes in der Schweiz und im Ausland zu erwarten?**

Im Rahmen der UNECE-Konvention über grossräumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung wurde 2012 eine Revision des Protokolls von Göteborg beschlossen, mit der die Protokollparteien weitergehende Reduktionsverpflichtungen der Emissionen von Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und primärem Feinstaub (PM2.5) bis 2020 beabsichtigen (Tabelle 7). Die Inkraftsetzung des revidierten Protokolls kann jedoch erst nach Ratifizierung durch mindestens die Hälfte der Protokollparteien erfolgen.

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	VOC	NH <sub>3</sub>	PM2.5
Schweiz	21%	41%	32%	8%	26%
Europäische Union (EU27)	59%	40%	28%	6%	22%

**Tabelle 7** Beabsichtigte Verpflichtungen zur Schadstoffreduktion zwischen 2005 und 2020 gemäss revidiertem Göteborg-Protokoll

Durch Anwendung des besten Standes der Technik könnten die Luftschadstoffe sowohl in der Schweiz als auch in Europa noch wesentlich stärker vermindert werden.

- **Welche zusätzlichen Massnahmen könnten die Schadstoffe weiter reduzieren?**

Folgende zusätzliche Massnahmen könnten gemäss Expertenberichten zur Emissionsreduktion beitragen (Künzler 2005, EKL 2010):

- möglichst schnelle Ausrüstung bzw. Nachrüstung aller schweren Nutzfahrzeuge, Traktoren und Maschinen mit Partikelfiltern
- Optimierung der Bremssysteme bei Zügen zur Reduktion des Abriebs
- Minderung von PM10-Emissionen aus Abrieb im Strassenverkehr
- Staubminderung bei emissionsintensiven Feuerungen (Holzfeuerungen) und Industriefeuerungen mit Biomasse
- Anpassung der LRV an den aktuellen Stand der Technik für weitere Anlagen und Geräte
- International gültige emissionsabhängige Landegebühren, Emissionshandelssystem im Flugverkehr
- Verschärfung der Energievorschriften im Gebäudebereich,

- Wärmerückgewinnung bei Heizungen und industriellen Feuerungen
  - CO<sub>2</sub>-Abgabe auf fossile Treibstoffe
  - Anreize zum Einsatz emissionsarmer Geräte und Fahrzeuge
  - 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
- 
- **Können die Ziele erreicht werden?**

Bei rascher und konsequenter Umsetzung der oben erwähnten Massnahmen in der Schweiz und Umsetzung der Protokolle der UNECE-Konvention über grossräumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung ist davon auszugehen, dass bis 2020 weitere wesentliche Verbesserungen erzielt werden.
  - **Wie soll bei Wintersmog reagiert werden?**

Episoden mit massiv erhöhten PM10-Werten können im Winterhalbjahr bei austauscharmen Wetterlagen mit starker Inversion auftreten. Die ausgestossenen Schadstoffe sammeln sich dann in einem relativ kleinen Luftvolumen an.

Kurzfristige Massnahmen, die erst bei hohen Schadstoffbelastungen ergriffen werden, können die Werte kaum mehr beeinflussen, da sie zu spät kommen. Bereits im Vorfeld solcher Wetterlagen muss dafür gesorgt werden, dass möglichst wenig Schadstoffe emittiert werden und gar keine alarmierend hohen Belastungen auftreten. Dazu sind dauerhaft wirksame Massnahmen geeignet, wie sie in den vorhergehenden Punkten erwähnt sind.

Aufgrund der Wintersmogepisoden 2005 und 2006 wurde ein Aktionsplan gegen Feinstaub ausgearbeitet, der vor allem die krebserregenden Dieselruesspartikel und den Feinstaub aus der Holzverbrennung rasch und dauerhaft vermindert.

Die Bau-, Planungs- und Umweltdirektorenkonferenz (BPUK) hat an der Hauptversammlung 2006 ein Interkantonales Interventionskonzept Feinstaub beschlossen. Bei ausserordentlich hohen Feinstaubbelastungen wird die Bevölkerung zuerst informiert und bei andauernder Belastung (kritischen Inversionslagen) werden je nach Ausmass der Belastung in zwei Stufen regionale Interventionsmassnahmen angeordnet.
  - **Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Luftreinhaltung und der Bekämpfung des Treibhauseffektes?**

CO<sub>2</sub> ist das wichtigste Treibhausgas. Doch auch Ozon und Dieselruess sind in beträchtlichem Mass klimaaktiv. Massnahmen gegen Dieselruess, Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) leisten somit einen wichtigen Beitrag zur Eindämmung der Klimaerwärmung.

Viele Luftschadstoffe entstehen bei Verbrennungsprozessen, welche auch CO<sub>2</sub> 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. Aus-

nahmen 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 Luftschadstoffemissionen von Holzfeuerungen nicht auf den Stand der Ölfeuerungen gebracht werden.

Die Umsetzung der Ziele gemäss Kyotoabkommen und CO<sub>2</sub>-Gesetz stellt eine wesentliche Vorbedingung für die Erreichung der Luftreinhalteziele dar.

**Literatur**

- 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)
- ARE, Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz, Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten, Bundesamt für Raumentwicklung und Bundesamt für Umwelt (2008)
- BAFU, "NABEL - Luftbelastung 2009", Umweltzustand Nr. 1016, Bern (2010)
- [BAFU 2012a, UNECE Submission 2012, Switzerland's Informative Inventory Report 2012](http://www.ceip.at/overview-of-submissions-under-clrtap/2012-submissions/) oder Centre on Emission Inventories and Projections: <http://www.ceip.at/overview-of-submissions-under-clrtap/2012-submissions/>
- BAFU 2012b, "NABEL - Luftbelastung 2011", Umweltzustand Nr. 1221, Bern (2012)
- EKL (Eidgenössische Kommission für Lufthygiene), Feinstaub in der Schweiz, Bern (2007)
- EKL (Eidgenössische Kommission für Lufthygiene), 25 Jahre Luftreinhaltung auf der Basis des Umweltschutzgesetzes, Bern (2010)
- EMPA, "Vergleich von TSP-, PM10- und PM2.5 Schwebestaubmessungen im NABEL 1997 und 1998", EMPA Nr. 168'107, Dübendorf (1999)
- ERS (European Respiratory Society), Luftverschmutzung und Gesundheit, Lausanne (2010)  
<http://www.ersnet.org/index.php/publications/reference-books.html>
- Gälli Purghart, B.C.; Schwermetalle auf grössenfraktioniertem Aerosol und in der Deposition: Untersuchungen an einem Höhenprofil im Kanton Bern; Dissertation Universität Bern, Bern (1988)
- 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)
- Hüglin, C., Gianini, M., Gehrig, R. „Chemische Zusammensetzung und Quellen von Feinstaub“, EMPA, Dübendorf 2012  
<http://www.bafu.admin.ch/luft/00575/00578/index.html?lang=de>
- IIASA (international Institute for Applied Systems Analysis): Scope for further environmental improvements in 2020 beyond the baseline projections, CIAM Report 1/2010, Laxenburg (2010)
- Künzler P., Weiterentwicklung des Luftreinhalt-Konzeptes, Schriftenreihe Umwelt Nr. 379, BUWAL, Bern (2005)
- 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)
  - Schweizerischer Bundesrat, Bericht Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen, BBl 2009 6585
  - Turnbull, A.B. et al., *Atmospheric Environment* 34, 3129-3137, (2000)
  - WHO 2006: WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide - Global update 2005. World Health Organization 2006. [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair\\_aqg/en/index.html](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_aqg/en/index.html)

## Anhang A

- **Welche Messverfahren werden bei der Emissionsmessung von Fahrzeugen und Maschinen 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 aufgefangenen 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 BAFU/EMPA-Programm erprobt (siehe Partikelanzahlmessverfahren im ECE-Reglement Nr. 83 und 49). Diese Messmethode und der entsprechende Partikelanzahlgrenzwert wird bei der Abgasstufe Euro 6 für Personenwagen sowie bei Euro VI für Lastwagen 2013/2014 in Kraft treten. 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 Gesamtstaub bei stationären Anlagen eingesetzt?**

Emissionsmessungen bei stationären Anlagen erfolgen in der Regel direkt im heissen Abgasstrom, d.h. im Abluftkamin. Dabei wird gemäss den Emissions-Messempfehlungen des BAFU nach den VDI-Richtlinien 2066 Blatt 2 oder Blatt 7 bzw. nach der neueren internationalen Norm EN 13284-1 vorgegangen. Ein definiertes Abluftvolumen wird über ein Filter gesogen und durch die Gewichtszunahme auf dem Filter kann die Gesamtstaubkonzentration in der Abluft bestimmt werden. Bei diesem Verfahren ist die Unterscheidung verschiedener Grössenfraktionen des Staubes (z.B. PM<sub>10</sub>, PM<sub>1</sub>) nicht möglich. Das Verfahren ist ausgelegt auf den Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung, welche als Grenzwerte bei stationären Anlagen Gesamtstaub-Massenkonzentrationen vorgibt. Für die Auftrennung des Gesamtstaubes in die verschiedenen Grössenfraktionen existieren verschiedene Normen, z.B. basierend auf Verfahren mittels Kaskaden-Impaktoren, jedoch gelangen diese in der Praxis der Vollzugsaufgaben nicht zum Tragen.

## Anhang B

- **Wie werden die Feinstaubimmissionen gemessen?**

<p><b>Manuelle gravimetrische Verfahren</b></p>	<p>Die Staubproben werden auf Filtern oder Folien abgeschieden, die danach bei vorgeschriebener Luftfeuchtigkeit und Temperatur konditioniert und gewogen werden.</p>
<p><b>High Volume Sampler</b> mit verschiedenen Probenahmeköpfen, die Partikel über einer bestimmten Grösse vor der Probenahme aus dem Luftstrom entfernen.</p>	<p>Messgeräte, die hohe Volumenströme (ca. 30 m<sup>3</sup>/h) durch ein Filter saugen; werden im NABEL eingesetzt (mit PM10-Kopf, PM2.5- oder PM1-Kopf).</p>
<p><b>Low Volume Sampler</b> mit verschiedenen Probenahmeköpfen, die Partikel über einer bestimmten Grösse vor der Probenahme aus dem Luftstrom entfernen.</p>	<p>Messgeräte, die niedrige Volumenströme (ca. 1-3 m<sup>3</sup>/h) durch ein Filter saugen.</p>
<p><b>Stufen-Impaktoren</b></p>	<p>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.</p>
<p><b>Automatisierte (quasi-) kontinuierliche Verfahren (Monitore)</b></p>	<p>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.</p>
<p><b>Betameter</b></p>	<p>saugen Luft durch einen Filterstreifen und messen kontinuierlich oder in kurzen Zeitintervallen die Absorption von <math>\beta</math>-Strahlen;</p>
<p><b>TEOM</b> (Tapered Element Oscillating Microbalance)</p>	<p>messen die Veränderung der Resonanzfrequenz des schwingend gelagerten partikelbeladenen Filters. Ältere Messsys-</p>



	teme (Filter bei 50 Grad) weisen durchschnittliche Massenverluste bis zu 30% auf. Neue Systeme mit FDMS (Filter Dynamics Measurement System) können diese Verluste kompensieren.
<b>Optische Geräte</b>	messen die Lichtstreuung an Partikeln, aus welcher die Massenkonzentration berechnet werden kann. Die Umrechnung hängt von der Zusammensetzung der Partikel ab und ist standortabhängig.

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. 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. Die Messung von PM2.5 ist in der Europäischen Norm EN 14907 geregelt, 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 trotzdem 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. Im NABEL werden als kontinuierliche Monitoren Betameter und TEOM FDMS eingesetzt. Um die Äquivalenz zur gravimetrischen Messung sicherzustellen, werden parallel dazu gravimetrische Tagesproben mit dem HiVol-Sampler erhoben und zur Korrektur der Monitorresultate verwendet.

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.