

## Abgasschadstoffe von Dieselmotoren im Tunnelbau

### Bulletin 5:

Unsichtbare Partikel in der Atemluft –  
Gefahren für den Organismus

#### 1. Die Lunge – Haupteinfallstor für Schadstoffe

Bei der Arbeit werden Schadstoffe hauptsächlich über die Lunge aufgenommen. Das Kontaktisiko lässt sich wie folgt skizzieren: Pro Minute kommen bei normaler Arbeit 20 l Luft und 10 l Blut auf einer Austauschfläche von ca. 100 m<sup>2</sup> miteinander in Berührung. Getrennt sind Luft und Blut lediglich durch zwei Zellschichten von wenigen Tausendstel Millimeter Dicke. Der Gasaustausch und mit ihm die Aufnahme von Schadstoffen erfolgt über 500 Millionen Alveolen von etwa 1/10 Millimeter Durchmesser, versorgt durch ein Netz von Kapillargefässen von ca. 2000 km Länge. Der Gesamt-Querschnitt der Atemwege erweitert sich, ausgehend vom Rachen, auf fast 1 m<sup>2</sup>, er verästelt sich bis zu den Bronchiolen, die beim Einatmen etwa 8 mm, beim Ausatmen etwa 3 mm Durchmesser aufweisen. Die Luftgeschwindigkeit wird dabei extrem klein, die Verweilzeit entsprechend lang,

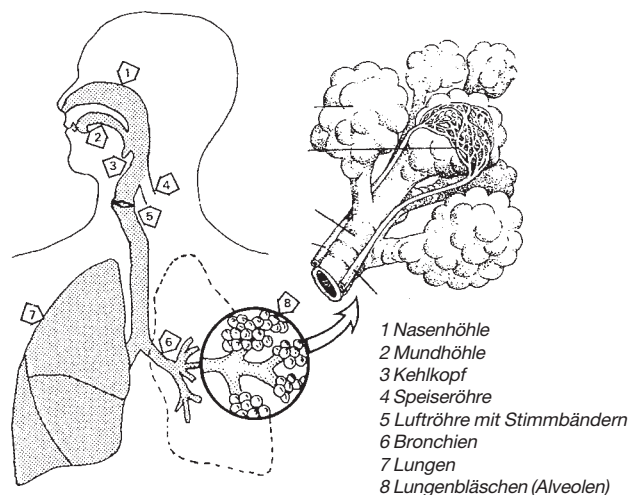


Bild 1: Die Lunge, Einfallstor für Luftschadstoffe

Quelle: Birgersson, Chemie und Gesundheit 1988 [1]

d.h., es besteht für partikuläre Schadstoffe ausreichend Gelegenheit, sich abzulagern (Sedimentation, Diffusion) oder sogar durch die feinen Zellmembranen tiefer in den Organismus einzudringen.

Im Zuge der Evolution haben sich im Atemwegssystem und im Lungengewebe allerdings sehr effiziente Abwehrmechanismen ausgebildet: Staub wird an den feuchten Oberflächen abgeschieden, die Schleimschicht wird durch feine Flimmerhärchen ständig in Richtung Rachen bewegt, und ein ausgeklügeltes Warnsystem mit empfindlichen chemischen Sensoren sorgt mit vielerlei Massnahmen, z.B. durch Husten und Niesen, dafür, dass unsere Lunge weitgehend sauber bleibt. Zudem sind in den Alveolen und den Atemwegen freibewegliche "Fresszellen" (Makrophagen) vorhanden, die Partikel und Mikroorganismen in sich aufnehmen, abtransportieren oder, sofern es sich um organisches Material handelt, abbauen können.

Das funktioniert alles recht perfekt bei natürlichen Fremdstoffen, an die sich unser Organismus angepasst hat – bei Stäuben etwa bis in den Bereich von 2,5 mm (1 mm = 1 Tausendstel mm). Dies entspricht der feinsten Korngrösse von verfrachtetem Saharastaub, der unsere Breiten erreicht. Bei Schadstoff-Partikeln, die kleiner als 1 mm oder sogar nur wenige Nanometer gross sind (1 Nanometer = 1 Millionstel mm), sind die Schutz- und

#### Editorial

Die Frage der Gesundheitsrisiken durch atembare Feinstäube ist ins Zentrum der Lufthygiene gerückt. Für die Arbeitsmedizin ist dieses Thema nicht neu. Aber erst in den letzten Jahren wurde klar, wie stark das Risiko mit abnehmender Partikelgrösse ansteigt, wie wichtig die Oberfläche, die Zusammensetzung und andere Eigenschaften der Partikel sind, und dass deren toxische Wirkung nicht nur von ihrer Gesamtmasse, sondern zu einem grossen Teil auch von ihrer Anzahl abhängig ist. VERT hat dieser Frage im Zuge des Projektes zunehmend Aufmerksamkeit geschenkt und Erprobungskriterien, Systementscheidungen und Analytik darauf abgestimmt. Dabei wurde erkannt, dass für die Diesel-Partikelemissionen im unsichtbaren Bereich, die nach neueren toxikologischen Studien als besonders kritisch eingeschätzt werden, nur hocheffiziente Partikelfilter im Abgasstrom eine Lösung darstellen. Das vorliegende Bulletin versucht, einen Überblick über diese Problematik zu geben.

AUVA, Suva, TBG

Abwehrmechanismen aber weniger effektiv als bei grösseren Schwebeteilchen. So erzeugen technische Verbrennungen Partikel, die 10 mal kleiner sind als natürliche Stäube. Auch die feinsten Verästelungen der Lungenkanäle sind im Vergleich dazu noch gross; die Staubkörnchen gelangen mühelos in den Alveolarbereich, in dem der Flimmerhaarsaum als effizienter Rücktransport-Mechanismus fehlt. Die Verweilzeit im Innersten der Lunge ist ausserordentlich gross. Es kann Monate dauern, bevor sie allenfalls durch die Reinigungsarbeit der Makrophagen – die besonders feine Partikel übrigens nicht zu erkennen scheinen –, abgebaut oder entfernt werden, durch die Zellwände in Blut und Lymphe gelangen oder schliesslich im Lungengewebe endgültig deponiert werden. Feine Stäube bieten überdies grosse, zerklüftete Oberflächen für die Anlagerung weiterer toxischer Substanzen, die damit in die Tiefe der Lunge transportiert und dort wirksam werden können. Die schädlichen Einflüsse, die sich aus der Verweilzeit, Löslichkeit, Grösse, dem Oberflächen-Charakter, den chemischen Eigenschaften und schliesslich der Anzahl dieser Partikel für den Organismus ergeben, stellen in ihrer Gesamtheit für den Körper eine Belastung dar, der er nicht immer gewachsen ist.

## 2. Wie fein sind Feinstpartikel?

Sandkorn grob	1 mm
Alveole	0.1 mm
Haar (feinstes)	0.01 mm
Bronchiole	0.006 mm
Zelle (kleinste)	0.001 mm
Licht (untere Sichtbarkeitsgrenze)	0.0004 mm
Dieselpartikel (mittlere Grösse)	0.0001 mm
Virus	0.00001 mm
Gasmolekül (grosses)	0.000001 mm

Dieselpartikel sind also sehr klein gegenüber Alveolen und noch immer klein gegenüber den Lungen-Epithelzellen. Man spricht daher auch von ultrafeinen Teilchen oder Nanopartikeln. Sie sind insbesondere auch kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts und daher unsichtbar.

Die fast verschwindende Grösse der Partikel und damit ihre sehr geringe Gesamtmasse scheint vorteilhaft, wenn man sie als Schadstoff nach ihrer massenmässigen Konzentration in der Atemluft bewertet oder an ein Überladungsphänomen denkt. Biologisch gesehen aber liegt gerade da das Problem. Denn derart feine Partikel können Zellmembranen penetrieren und zwischen Zellen hindurch leicht ins Innere des Organismus eindringen.

Beim Einatmen von unverdünntem Dieselabgas werden etwa 1000 Partikel pro Alveole und Minute, bei üblicher

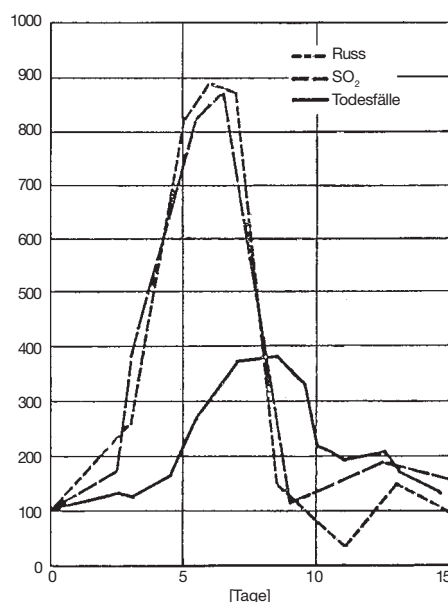
Verdünnung am Arbeitsplatz (1:100) aufgenommen. Also etwa 10 Partikel pro Alveole und Minute – Ist das viel oder wenig?

Versuche mit gesunden Erwachsenen zeigen nach 30 Minuten Exposition gegenüber verdünntem Abgas (also nur 300 Partikel pro Alveole, eine verschwindend kleine Menge) bereits den Beginn entzündlicher Reaktionen in der Lunge, während Überladungsphänomene auch bei konzentrierter Beatmung erst nach Jahrzehnten zu erwarten wären.

Übliche Schutzmassnahmen wie Mundschutz oder Kabinenfilter sind gegenüber derart kleinen Partikeln praktisch wirkungslos. Ihre Wirksamkeit hört in der Regel unterhalb von 1 µm auf.

## 3. Gesundheitsrisiken durch Feinstäube

Ganz neu ist das Phänomen wohl nicht.



Obere Kurven: Anstieg von Russ und SO<sub>2</sub>  
Untere Kurve: Anstieg der Todesfälle

Bild 2: Zusammenhang zwischen Luftverunreinigung und Todesfällen während einer Smog-Situation in London 1952  
Quelle: EPA, Workshop April 1996

Bei Smog-Situationen, ausgelöst durch Verbrennungsprodukte aus Hausfeuerungen und Verbrennungsmotoren, wurde in London bereits 1952 ein überzeugendes Zusammentreffen von Luftverschmutzung und spontanen Todesfällen beobachtet. Auch Langzeit-Phänomene, bis hin zu Lungenkrebs, wurden erkannt und seither weltweit sehr umfangreich am Beispiel besonders belasteter Bevölkerungsgruppen mittels Epidemiologie sowie in Tierversuchen (in vitro) und Zellversuchen (in vitro) studiert. Dieser Forschungsprozess ist noch bei weitem nicht abgeschlossen, vielmehr werden ständig umfangreichere und detailliertere Studien initiiert – die Besorgnis steigt ständig weiter an.

Die Schweizer Studien SAPALDIA (Erwachsene) und SCARPOL (Kinder) [2] haben gezeigt, dass Atemwegssymptome und -infektionen mit steigender Partikelbelastung der Atemluft nahezu proportional zunehmen. Bei der recht bescheidenen Erhöhung der Feinstaubkonzentration um 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , wie wir sie selbst in recht sauberen Gebieten immer wieder antreffen, sind die folgenden Effekte zu erwarten:

vorzeitige Todesfälle insgesamt	4.4 %
Arbeitsunfähigkeit	10 %
Bronchitis bei Erwachsenen	25 %
Bronchitis bei Kindern	35 %
Atemwegsbeschwerden (Kindern)	54 %

Diese eindrucksvollen und beunruhigenden Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit in der Schweiz wurden erstmals 1996 ausgewertet (GVF 272). Insgesamt führt die Luftverschmutzung zu 3800 vorzeitigen Todesfällen, 53'000 Fällen von Bronchitis bei Kindern und 791'000 Tagen Arbeitsunfähigkeit pro Jahr. Sie führt auch zu ganz erheblichen volkswirtschaftlichen Belastungen, wie sie das folgende Bild illustriert:

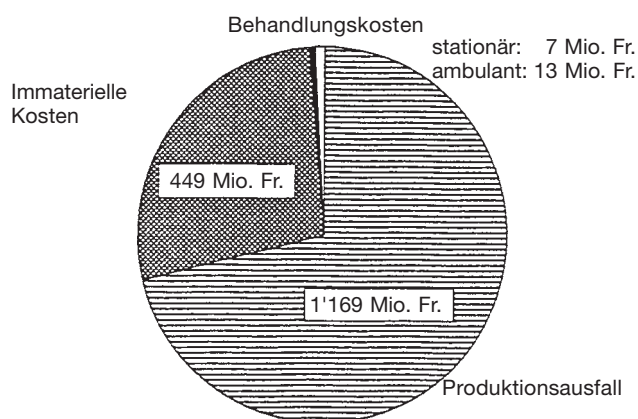


Bild 3: Externe Gesundheitskosten in der Schweiz  
Quelle: GVF 272/1996 [1]

Diese Berechnungen beruhen auf den Auswirkungen der Luftverschmutzung durch Feinstäube bis zu einer Korngrösse von 10  $\mu\text{m}$ , sogenannte PM10 in der Gesamtheit ihrer stofflichen Zusammensetzung. Wie weit die darin enthaltenen Emissionen einzelner Quellen, insbesondere die Diesel-Fahrzeugmotoren mit ihren sehr feinen und praktisch unlöslichen Partikeln dazu beitragen, kann vorerst nur vermutet werden. Es besteht jedoch der begründete Verdacht, dass sie in einem überproportionalen Mass an den Gesundheitsrisiken beteiligt sind.

#### 4. Feinstäube in der Arbeitsmedizin

"Stäube, Rauche und Nebel" waren in der Arbeitsmedizin seit jeher ein wichtiges Thema, nicht zuletzt auch wegen der Staubbeltung im Untertagebau. Das Thema wurde mit ständig verschärften Grenzwerten inter-

national recht einheitlich verankert. Sehr früh wurden klare Vorstellungen und Konventionen für die Definitionsbereiche Lungengängigkeit, Lungendeposition und Toxikologie erarbeitet. Konsequenterweise wurde die Betrachtung bereits 1959 mit der Johannesburger Konvention auf die alveolengängigen Partikel unter 5  $\mu\text{m}$  eingeschränkt, später kamen das Kriterium der Schwerlöslichkeit hinzu sowie die Berücksichtigung der Toxizität der jeweiligen Substanzen. Als besonders hartes Kriterium gilt die Einstufung als "wahrscheinlich für den Menschen kanzerogen", die in vielen Ländern seit 1988 zunehmend für Dieselpartikel eingeführt wurde, was in allen modernen Regelwerken zur verbindlichen Forderung der Minimierung dieses Schadstoffes "nach dem technischen Stand" geführt hat. Das folgende Bild, aus den Unterlagen zu MAK 97, zeigt eindrucksvoll, wie die Depositionswahrscheinlichkeit von Feinstpartikeln mit abnehmender Grösse stark zunimmt – besonders dann, wenn sie, wie Dieselschmutz, nicht hygroskopisch sind. Dies entspricht der Zunahme ihrer "Beweglichkeit" unter dem Einfluss der Brown'schen Molekularbewegung. Theoretisch geht man unter Berücksichtigung der sogenannten Cunningham-Korrektur von einem quadratischen Einfluss aus. Damit wird dieses Risiko augenfällig.

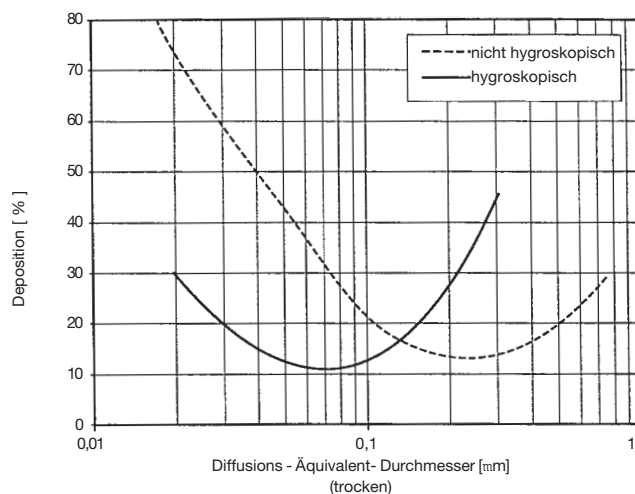


Bild 4: Depositionswahrscheinlichkeit von Feinstpartikeln im Alveolarbereich [3]

Solche winzigen Partikel tragen kaum zum Gewicht der Gesamt-Partikelmasse bei. Es ist daher nur konsequent, dass Partikel, die hauptsächlich in diesem Gröszenbereich auftreten, nicht nur nach ihrer Masse bewertet werden, sondern insbesondere auch nach ihrer Zahl im Sinne der "Anzahlkonzentration" oder aber nach ihrer Gesamtoberfläche. Die Oberfläche wird dabei zunehmend als sehr wichtig eingestuft mit der Begründung, dass alle biologischen Vorgänge stark von Oberflächen-Eigenschaften abhängen.

## 5. Schädigungsmechanismen

Durch jedes einzelne Partikel, das eine Zelloberfläche des Lungenepithels kontaktiert, wird bei ausbleibendem Abtransport ein Reaktionsprozess ausgelöst, der allergischer oder entzündlicher Natur sein kann. Es scheint einleuchtend, dass dieser Prozess sich umso heftiger ausbildet, je mehr Zellen reagieren, d.h., je mehr Partikel anfallen, respektive je länger diese Partikel im Mehrfachkontakt mit den Zelloberflächen im Alveolarbereich verweilen. Reaktionen zeigen sich in Form von Entzündungszellen und speziellen Enzymen, die in der Bronchialflüssigkeit nachgewiesen werden können, aber bei stärkerer Einwirkung auch in Form von Symptomen wie Niesen, Husten, Auswurf, Verschlechterung der Lungenfunktionswerte und asthmatischen Episoden. Bei älteren und kranken Personen kann es dabei zum Herz-Kreislaufversagen kommen. Die Feinstpartikel sind aber auch imstande, durch das Lungenepithel hindurchzudringen. Sie gelangen, wie das folgende Bild zeigt, in die Kapillaren des Blutkreislaufs und in die Lymphgefässe und auf diesem Weg an praktisch jede beliebige Stelle des Organismus – selbst für die Durchdringung der sogenannten Hirnschranke dürften viele von ihnen klein genug sein. Die Fülle der unterschiedlichen Schädigungen, die durch Dieselrußpartikel ausgelöst werden können, ist noch keineswegs in allen Einzelheiten geklärt.

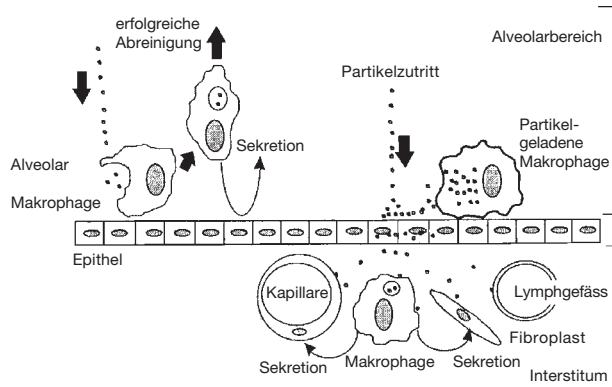


Bild 5: Der Weg der Partikel in den Organismus  
Quelle: Donaldson [4]

Aus epidemiologischen Untersuchungen weiss man immerhin, dass Feinstpartikel nicht nur die Lunge schädigen, sondern dass sie auch im Gefässsystem akutschädigende Wirkungen, beispielsweise durch eine Erhöhung der Blutviskosität, auslösen können. Besonders feine Partikel (um 30 nm) zeigen sich dabei in Tierversuchen nach Oberdörster [6] wesentlich aggressiver als Partikel um 250 nm. Die Beobachtungen von Asthmatikern durch Wichmann/Erfurt [5] haben ebenfalls deutlich gemacht, dass für solche akutschädigende Wirkungen vor allem die ultrafeinen Partikel verantwortlich sind. In den USA hat man sogar beobachtet, dass bei erhöhter Partikelbelastung der Atemluft Herzrhythmusstörungen in bedrohlichem Ausmass bei vorgeschädigten Per-

sonen (Infarktpatienten) auftreten. Es werden vielerlei Krankheitswirkungen vermutet, wobei neuerdings auch Schwermetallspuren, die mit aus der Verbrennung kommen und den Rußpartikeln anhaften können oder selbständige Partikel bilden, als wirkungsrelevant angesehen werden. Dabei sind vor allem die sogenannten Übergangsmetalle im Visier, zu denen zum Beispiel auch Eisen gehört. Darüber hinaus zeigen epidemiologische Untersuchungen auch, dass die Unfallhäufigkeit mit ansteigender Luftverschmutzung zunimmt, was nicht überrascht.

## 6. Regeln und Grenzwerte

Die gesetzlichen Immissionsgrenzwerte sind in der Regel auf das Luftvolumen bezogen ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), die Emissionsgrenzwerte dagegen auf Energie ( $\text{g}/\text{kWh}$ ) oder Fahrstrecke ( $\text{g}/\text{km}$ ). Zwecks Vergleichbarkeit sind sie in der folgenden Übersicht vereinfacht umgerechnet:

### Emissionen (Gesamtpartikel TPM):

• Baumaschinen	EU1,	116 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Baumaschinen	EU2,	50 $\text{mg}/\text{m}^3$
• LKW	EURO 2,	17 $\text{mg}/\text{m}^3$
• LKW (Vorschlag 22.12.98)	EURO 4/5,	3 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Stationärer Dieselmotor	LRV 98	5 $\text{mg}/\text{m}^3$

### Immissionen (versch. Definitionen: Russ, EC, EC+OC):

• Arbeitsplatz MAK-Wert/CH	200 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Arbeitsplatz TRK/D	100 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Arbeitsplatz USA:	
Vorschlag 95	160 $\text{mg}/\text{m}^3$
Vorschlag 98	50 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Leitwert Innenstadt/D 98 (Russ)	8 $\text{mg}/\text{m}^3$
• Aussenluft Schweiz 98 (PM10)	20 $\text{mg}/\text{m}^3$

Offensichtlich bestehen in beiden Bereichen noch immer recht grosse Unterschiede bezüglich Definition, Messverfahren und Grenzwertniveau. Immerhin erkennt man aus dieser Auflistung den sehr starken Trend, wegen der zunehmenden Besorgnis bezüglich der Gesundheitsrisiken durch Feinstpartikel die Grenzwerte sowohl bei den Emissionen der Dieselmotoren als auch bei der Atemluftkonzentration (Immission) drastisch zu verschärfen.

## 7. Dieseluß

Aus den gleichen Gründen wurde im Rahmen des Projektes VERT ein grosser Aufwand zur Charakterisierung der Diesel-Rußpartikel getrieben. Im Hinblick auf die weitreichenden Schlussfolgerungen war es wichtig, die Grössenverteilung dieser Partikel zu kennen, ihre Anzahl-Konzentration und, zumindest annähernd, ihre chemische Zusammensetzung. Darüber hinaus war es



von grösster Bedeutung, zu untersuchen, ob sich diese Befunde generalisieren lassen, d.h. festzustellen, in welcher Weise diese Eigenschaften von Motor zu Motor und zwischen verschiedenen Betriebszuständen variieren. Dies führte zwangsläufig zu einer recht breiten Untersuchung: An 10 Nutzfahrzeugmotoren, meist typischen Baumaschinenmotoren, und an 5 PKW-Dieselmotoren wurden Messungen im Feld, auf Motorprüfständen oder auf der Rolle durchgeführt. Das folgende Bild zeigt ein typisches Ergebnis:

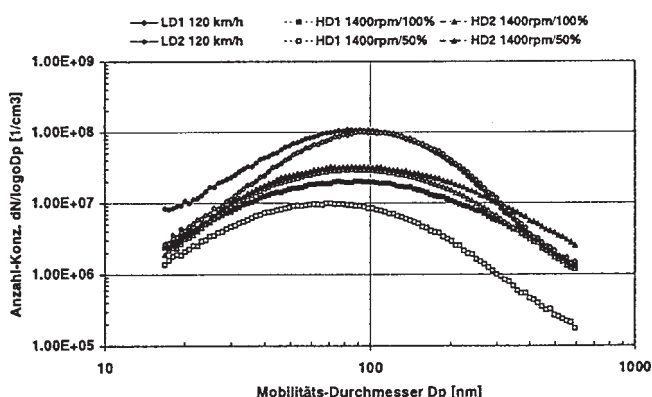


Bild 6: Grössenverteilung von Diesel-Russpartikeln bei 2 NFZ-Motoren und 2 PKW-Motoren Quelle: VERT [7]

Man findet in aller Regel recht einheitliche Anzahl-Konzentrationen mit einem Schwerpunkt um 100 nm, also im unsichtbaren Bereich. Es ist sicher zunächst überraschend, dass die Grössenverteilungen sich über alle Motoren-Bauarten so einheitlich darstellen. Eine Fülle von Untersuchungen hat dies mittlerweile bestätigt. Es scheint sich um ein ganz generelles Phänomen der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen unter motorischen Bedingungen zu handeln, das inzwischen recht gut durch theoretische Vorstellungen erklärt werden kann [8].

Besonders beunruhigend ist das Ergebnis [10], dass neuere Motorkonzepte gegenüber älteren kaum Vorteile zu haben scheinen – eher umgekehrt. Auch die im heutigen Trend liegende Verbesserung der Dieselmotoren (weniger Schwefel, weniger Aromaten, höhere Cetanzahl) wirkt sich kaum sichtbar auf die Grössenverteilung und Konzentration der Feinstpartikel aus.

Eindrucksvoll ist das hohe Niveau der Konzentration, die in der Summierung über alle Klassen häufig 100 Millionen Teilchen pro  $\text{cm}^3$  erreicht und damit an der Sättigungsgrenze liegt.

Nach dem Stand der im Zuge des Projektes erarbeiteten Kenntnisse, die sich weitgehend mit den Forschungsergebnissen an anderen Stellen decken, muss geschlossen werden, dass Dieselmotoren recht trockene, hydrophobe Kohlenstoffpartikel mit grosser zerklüfteter Oberfläche in sehr hohen Konzentrationen in einem Grössenbereich emittieren, der aus Sicht der Atemluftbelastung als besonders kritisch angesehen

werden muss. Um von diesen Konzentrationen auf ein vertretbares Mass herunterzukommen, wäre eine Verdünnung erforderlich, die um ein Vielfaches über das am Arbeitsplatz "Tunnelbau" durch Verstärkung der Belüftungsmassnahmen technisch Machbare hinausgeht. Dies führt zwingend zu der Schlussfolgerung, dass das Problem an der Quelle gelöst werden muss, d.h., dass nur eine sehr effiziente Filtration des Dieselaabgases als kostengerechtes Mittel angesehen werden kann, um die Partikelemission auf das notwendige Mass (Zielfaktor >100) zu vermindern [11].

## 8. Anteil Dieseleruss in der Atemluft

Es stellt sich natürlich die Frage, inwieweit die Dieselemissionen für die hohen Feinstaub-Belastungen in der Atemluft generell verantwortlich sind. Dazu gibt es keine allgemeine Antwort. Vielmehr variieren die Angaben sehr stark zwischen ländlichen und städtischen Standorten in Funktion der Jahres- und Tageszeit sowie in Abhängigkeit der Dieselpopulation.

Für die Schweiz gibt das BUWAL [9] Angaben aus dem NABEL-Messnetz, die nach dem folgenden Bild sogar an einem ländlichen Standort wie Payerne eindrucksvoll ausfallen:

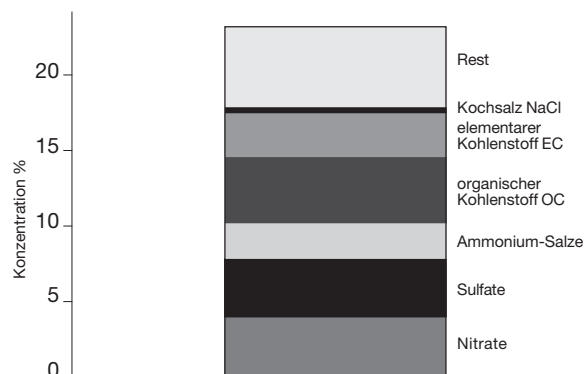


Bild 7: Zusammensetzung des Feinstaubes in Payerne Quelle: BUWAL [9]

Demnach liegt der Anteil des Feinstaubes aus Verbrennungen, hier als elementarer Kohlenstoff EC + organischer Kohlenstoff OC dargestellt, doch immerhin bei ca. 1/3 der PM10-Immission. Er dürfte zu einem bedeutenden Teil aus Dieselemissionen stammen.

Für Los Angeles wird ein Anteil der Diesel-Partikelemissionen am Feinstaub mit 36% angegeben, für New York sogar mit 53%, obschon bekanntlich in diesen Städten nur sehr wenige PKW mit Dieselmotoren ausgerüstet sind. Für stärker "verdieselte" Metropolen wie London und Paris dürfte der Wert noch höher liegen.

Während diese Angaben sich in der Regel auf die Gesamtmasse aller Partikel unter 10  $\mu\text{m}$  beziehen, wurde in der erwähnten Erfurter Studie [5] nach Partikelgrösse unterschieden. Dabei zeigt sich nach dem folgenden

Bild deutlich, dass in der Klasse der feinsten Partikel (0.01 – 0.1  $\mu\text{m}$ ) kaum mehr Masse festgestellt werden; gerade hier aber liegen die höchsten Anzahl-Konzentrationen vor, während dies in der obersten Grössenklasse umgekehrt ist. Diese Studie zum Verhalten von Asthmatikern unter Feinpartikelbelastungen kommt zum Schluss, "die gesundheitlichen Effekte müssen der kleinsten Grössenklasse zugeordnet werden", was einen deutlichen Hinweis auf die Wirkung von Anzahl-Konzentration und Oberfläche beinhaltet.

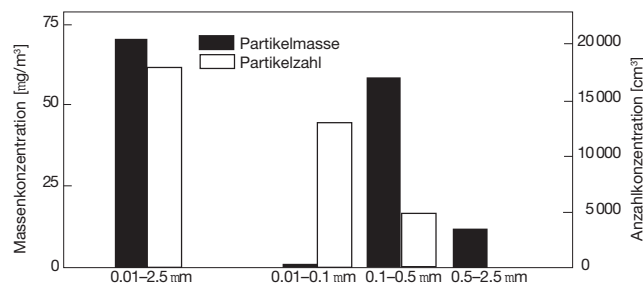


Bild 8: Grössenverteilung von Stadtstaub in Erfurt  
Quelle: Wichmann [5]

## 9. Messtechnik

Zur Untersuchung der Diesel-Partikelemissionen kamen bisher vor allem Methoden zum Einsatz, die das Gewicht der Partikel oder deren Wirkungen im Bereich des sichtbaren Lichtes zur Signalbildung benutzen: Entweder werden die Partikel auf einem Filter aufgefangen und gewogen (Gravimetrie) oder die Trübung eines Lichtstrahls durch Absorption und Reflexion wird ausgewertet (Opazimetrie). Beide Verfahren sind gesetzlich festgelegt und werden bei der Zertifizierung der Fahrzeuge und der periodischen Kontrolle eingesetzt.

Keines dieser Verfahren gibt adäquat die Emission von Partikeln im Grössenbereich um 100 nm, da sie weder das Gewicht noch die Trübung erheblich mitbeeinflussen.

Andererseits werden diese bisher weitgehend unberücksichtigten Partikel nach neuesten Vorstellungen nun als die gesundheitsschädlichste Komponente der Dieselemission angesehen, d.h., es wird ihnen ein weit höheres Gefährdungspotential zugesprochen als grösseren Partikeln im sichtbaren Bereich, wie sie durch Agglomerationsprozesse entstehen können und früher im Vordergrund der Betrachtung standen.

Die gängigen Messverfahren beinhalten einen weiteren Nachteil: indem nämlich das Abgas rasch abgekühlt wird, können sich Tröpfchen (Spontankondensate), z.B. aus Wasserdampf und Schwefeloxiden, bilden, die als Partikel interpretiert werden, obschon sie mit den Russ-Feststoffpartikeln aus der Verbrennung stofflich keinerlei Ähnlichkeit haben.

Solche Partikel bilden sich hingegen in der "wirklichen" Welt bei der grossen Verdünnung des Abgasstroms in

der Atmosphäre in der Regel nicht. Zudem wird die toxische Wirkung solcher angesäuerten Kondensate im Vergleich zu Feststoffpartikeln als sehr gering eingestuft.

Von derartigen Messmethoden, die aufgrund eigentlicher Artefakt-Bildung zu irreführenden Interpretationen verleiten, musste Abstand genommen werden. Mit Hilfe der ETH, des Eidg. Amtes für Messwesen EAM, der EMPA und dem Paul Scherrer-Institut wurden modernere Methoden zur Charakterisierung des Russes eingesetzt, mit denen die Partikel nach ihrer Grösse klassiert, gezählt, analysiert und bezüglich ihrer Oberfläche beurteilt werden können.

Unter Nutzung dieser neuen messtechnischen Erkenntnisse ist im Zuge dieser Arbeiten ein Messverfahren entstanden, das es gestattet, die eigentliche Feinstpartikelemission von Dieselmotoren auch unter Feldbedingungen, selbst bei wechselnden Betriebszuständen, "on line" zu erfassen.

Über diese Messtechnik (NanoMet) wird in einem weiteren Bulletin berichtet.

## 10. Abhilfemassnahmen

Rufen wir uns das Ziel in Erinnerung: Verminderung der Feststoffpartikel aus dem Dieselaabgas um Faktor 100 im gesamten Grössenbereich ab 10 nm (Messgrenze).

Alle bekannten und irgendwie für die praktische Anwendung greifbaren oder auch nur denkbaren Massnahmen wurden im Hinblick auf diese Zielsetzung untersucht. Dabei musste leider folgendes festgestellt werden:

- Selbst modernste Motorentwicklungen (wie die sogenannte common rail-Einspritztechnik, computergesteuert unter Einsatz hoher Einspritzdrücke) reduzieren die Emission von Feinstpartikeln nicht, ja sie scheinen sogar deren Grösse tendenziell zu verringern, womit das Risiko eher steigt.
- Auch modernste Kraftstoffformulierungen, selbst hochreine synthetische Brennstoffe ganz ohne Schwefel und Aromaten, vermindern die Feinstpartikelemission nicht.
- Die Anwendung von Oxidationskatalysatoren bringt ebenfalls keinen Vorteil bei Feinstpartikel, jedoch Nachteile bezüglich  $\text{NO}_2$  und  $\text{SO}_3$ , die unter arbeitsmedizinischen Kriterien nicht akzeptiert werden können.
- Auch weitere Massnahmen, wie Optimierung der Motoreinstellung, Abgasrückführung, Ladeluftkühlung und dergleichen, haben keine wesentliche Minderung der Feinstpartikel gezeigt. Als einzige wirksame Abhilfemassnahme erwies sich der Einsatz von Partikelfiltern, wie sie bereits in Bulletin 2 beschrieben sind. Diese Filter wurden einem ausführlichen Feldtest unterworfen (siehe Bulletin 4).

Ein typisches Ergebnis:

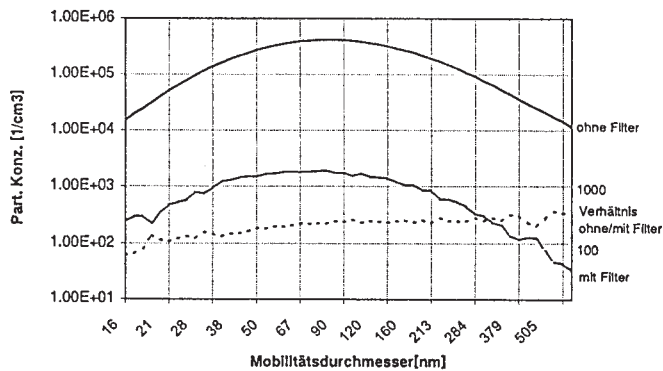


Bild 9: Partikelemission im Abgas eines Liebherr-Baumaschinenmotors ohne und mit Partikelfilter. Quelle: VERT [10]

Dargestellt ist die Anzahlkonzentration von Feststoffpartikeln in Abhängigkeit der Partikelgrösse für den Fall ohne Filter und mit Filter. Die beiden Kurven "Rohgas/Reingas" unterscheiden sich durch einen Faktor 100–500, d.h., es wird sogar bei den feinsten Partikeln ein Abscheidegrad von 99% erreicht.

Dies ist nur eines und nicht einmal das beste Beispiel. Manche Filter erreichen Abscheidegrade über 99.9%, selbst für Partikel < 20 nm. Filter dieser Art sind bei Dieselmotoren aller Grössen, aller Bauarten und aller Entwicklungsstufen einsetzbar, d.h., prinzipiell besteht die Möglichkeit, durch Nachrüstung der gesamten Motorenpopulation im Zielgebiet (Tunnel, Baustelle, Innenstadt) die Partikelkonzentration in der Atemluft nachhaltig zu vermindern und dabei auch die ultrafeinen Partikel konsequent zu entsorgen. So hat sich auf deutschen Tunnelbaustellen, wo gemäss TRGS 554 die Anwendung von Partikelfiltern bei allen Dieselmotoren gefordert ist, inzwischen gezeigt, dass die Konzentration von Dieselmotorspartikeln in der Atemluft auf Werte unter 0.1 mg/m<sup>3</sup> gesunken ist, während man vor Einführung dieser Massnahme Konzentrationen von bis zu 2 mg/m<sup>3</sup> gemessen hatte.

Partikelfilter wirken nicht nur unter stationären Bedingungen, sondern auch während der freien Beschleunigung, also der grösstmöglichen Beschleunigung eines Motors, wie Bild 10 zeigt.

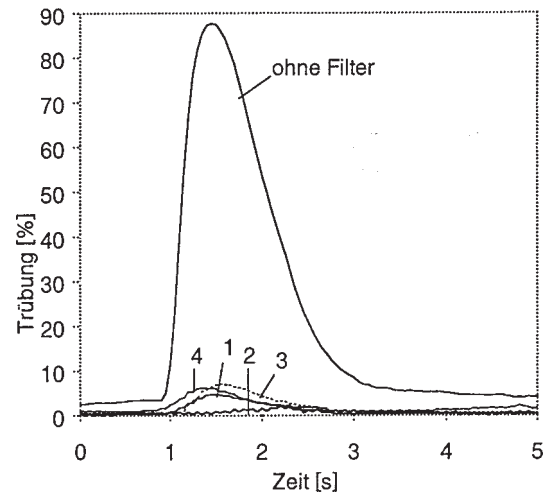


Bild 10: Freie Beschleunigung des Liebherr-Baumaschinenmotors mit verschiedenen Filtern (1-4) und ohne Partikelfilter. Quelle: VERT [7]

## 11. Eine Vision: der ultrasaubere Dieselmotor

Der Dieselmotor hat im Vergleich mit allen bekannten motorischen Verbrennungsverfahren die vollständigste und thermodynamisch beste Verbrennung und ist damit auch der bei weitem wirtschaftlichste Motor. Er ist in dieser Hinsicht noch keineswegs am Ende seiner Entwicklung. Vielmehr ist zu erwarten, dass die Weiterentwicklung von Einspritztechnik und Aufladung noch erhebliche Steigerungen des Wirkungsgrades selbst bei kleinen Fahrzeug-Dieselmotoren bringt, besonders dann, wenn keine Kompromisse zugunsten der Abgasemission gemacht werden müssen. Das Stichwort lautet: Entkoppelung von Verbrennung und Abgasemission, d.h. optimale Verbrennung und effiziente Abgasnachbehandlung, wie dies beim Ottomotor mit dem 3-Wege-Katalysator längst der Fall ist. So wie heute der Katalysator zum Ottomotor gehört, muss in Zukunft der Partikelfilter zum Dieselmotor gehören, schrittweise sicher ergänzt durch katalytische Massnahmen zur weiteren Verminderung der Stickoxide.

Damit wird der Dieselmotor bezüglich aller umweltschädlichen Substanzen, inkl. CO<sub>2</sub>, seinen Platz verteidigen und ausbauen. Er wird als der ökologisch sauberste und ökonomisch beste Motor gelten dürfen.

In diesem Sinn will das vorliegende Bulletin über Dieselpartikel nicht als Argument gegen den Dieselmotor verstanden werden, sondern als Unterstützung des Diesels auf seinem Weg zu einem Motorkonzept, welches das Attribut der Nachhaltigkeit verdient.

**Literaturverzeichnis**

1. B. Birgersson, Chemie und Gesundheit, VCH-Verlagsgesellschaft mbH, 1988, ISBN 3-527-26455-8
2. Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten GVF-Auftrag Nr. 272, Mai 1996
3. Grenzwerte am Arbeitsplatz 1997 Maximale Arbeitsplatzkonzentrationswerte gesundheitsgefährdender Stoffe (MAK-Werte), Suva, Januar 1997
4. Ultrafine (Nanometre) Particle Mediated Lung Injury Donaldson et al., J.Aerosol Sc. 5.6 1998
5. Respiratory Effects Are Associated with the Number of Ultrafine Particles Wichmann et al. Maximilians Universität, München, 1997
6. Increased pulmonary toxicity of inhaled ultrafine particles: Due to lung overload alone? Oberdörster et al., Elsevier Sc. Publ., New York, 1994
7. Partikelfilter für die Nachrüstung von Baumaschinenmotoren, VERT-Abschlussmessungen und Umsetzung. SAE 1999-01-0116
8. Characterization of Carbon Particles in Diesel Exhaust in Relation to Environmental Protection L. Jing, EAM/Wabern,
9. Ambient PM10 in Switzerland Nyffeler et al., Environm. Congress, Durban, September 1998
10. VERT: Diesel Nano-Particulate Emissions: Properties and Reduction Strategies SAE 980539/1998
11. VERT-Bulletin 3: Mehr Luft oder weniger Abgasschadstoffe? Juli 1996

**Abkürzungen**

AUVA	Allg. Unfallversicherungsanstalt/Österreich
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft/Bern EC Elementarer Kohlenstoff
EMPA	Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt/Dübendorf
EPA	Environment Protection Agency der U.S.A.
GVF	Dienst für Gesamtverkehrsfragen der Schweiz
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
mg	Mikrogramm = $10^{-6}$ g
mm	Mikrometer = $10^{-6}$ m
NFZ	Nutzfahrzeuge
nm	Nanometer = $10^{-9}$ m
OC	Organischer Kohlenstoff
PM10	Partikel <10 mm
SAE	Society of Automotive Engineers
Suva	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
TBG	Tiefbau-Berufsgenossenschaft
PM	Total Particulate Matter
TRK	Technische Richtkonzentration
VERT	Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau, ein gemeinsames Projekt der AUVA, Suva, TBG und BUWAL

---

**Projektleitung:**

Ing.-Büro TTM, A. Mayer, Fohrhölzlistr. 14b, CH-5443 Niederrohrdorf  
Tel. 0041(56) 496 6414, Fax 0041(56)496 6415  
E-Mail: TTM.a.mayer@bluewin.ch

**Projektausschuss der Auftraggeber:**

AUVA: J. Weidhofer, 0043(1-33111) 584  
ÖSBS: A. Schuster, 0043(3842)24317-21  
TBG: Prof. D. Kieser, 0049(761)73135  
Suva: W. Scheidegger, 0041(41)419 5060  
BUWAL: Max Wyser-Heusi, (0041(31)322 9369

**Bulletin-Bestellungen:**

**AUVA:** Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
Abteilung für Unfallverhütung und Berufskrankheitenbekämpfung  
Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Wien (Frau Radosztics)  
Tel. 0043(1-33111)418, Fax 0043(1-33111)347  
Bestell-Nr. AUVA-Report 4/2

**TBG:** Tiefbau-Bauberufsgenossenschaft  
Am Knie 6, D-81241 München  
Tel. 0049(89)8897 505, Fax 0049(89)8897494

**Suva:** Schweizerische Unfallversicherungsanstalt  
Zentraler Kundendienst, Postfach, 6002 Luzern  
Tel. 0041(41)419 5851, Fax 0041(41)419 5917