

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	89 (1998)
<b>Heft:</b>	21
<b>Artikel:</b>	Russ aus Verbrennungsprozessen : Entstehung und Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen
<b>Autor:</b>	Siegmann, Konstantin / Binz, Hans / Siegmann, Hans-Christoph
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-902125">https://doi.org/10.5169/seals-902125</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 19.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Stinkende und qualmende Dieselmotoren gelten gemeinhin als Inbegriff der vom Strassenverkehr verursachten Umweltbelastung. Heimtückischer und für die Gesundheit des Menschen viel gefährlicher sind aber kleinere Russpartikel, die auch in scheinbar sauberen Verbrennungen (nicht nur in Dieselmotoren) entstehen und bis in die Lungenbläschen vordringen können. Die zum Teil stark krebserregenden Partikel sind geruchlos, man kann sie nicht sehen, und sie verbleiben als Schwebeteilchen sehr lange in der Luft.

# Russ aus Verbrennungsprozessen

## Entstehung und Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen

■ Konstantin Siegmann, Hans Binz und Hans-Christoph Siegmann

Bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material entsteht Kohlenstoff. Dieses sogenannte Russen von Feuerungen ist ein ganz allgemeines Phänomen und beruht auf der speziellen Eigenschaft des Kohlenstoffatoms, selbst bei sehr hohen Temperaturen stabile Teilchen zu bilden. Die Bedingungen für die Kohlenstoffbildung sind: hohe Temperaturen von mindestens 1000°C, zu wenig Luft (d.h. Sauerstoffmangel) und/oder eine schnelle Abkühlung der Verbrennungsgase. Solche Bedingungen sind in sehr verschiedenen Verbrennungsprozessen erfüllt, wie zum Beispiel in Dieselmotoren, bei Zigaretten und in schlecht eingestellten Ölfeuerungen. Das endgültige Produkt, die Russteilchen, ist eine ernsthafte Gefahr für unsere Gesundheit. Weil die Menschheit immer noch stark von der Verbrennung fossiler Brennstoffe zur Energieerzeugung abhängig ist, ist Russ ein «brennendes» Problem unserer Zivilisation.

### Das Problem Russ

Die Russbildung ist ein komplexer Prozess. In wenigen Millisekunden ent-

steht in der Verbrennungszone eine grosse Anzahl von chemischen Verbindungen, angefangen bei kleinen Molekülen wie Benzol oder Acetylen bis hin zu glühenden Russsteinchen aus mehreren tausend Kohlenstoffatomen [1]. Sobald die Abgase abkühlen, kondensieren viele der Chemikalien auf den Kohlenstoffteilchen. Unter ihnen sind vor allem Polzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) zu nennen, von denen einige Vertreter als sehr stark krebsauslösende Substanzen bekannt sind. Wenn diese Teilchen einmal in die Atmosphäre gelangt sind, ist es sehr schwierig, sie wieder loszuwerden. Das liegt an der Grösse der Teilchen, die typischerweise um 0,1 µm verteilt ist. So kleine Teilchen verhalten sich fast wie Gasmoleküle, das heisst, dass sie sich nicht absetzen, sondern in der Luft schweben. Auf der anderen Seite ist es gerade die Kleinheit der Teilchen, die sie in den Körper eindringen lässt und daher gefährlich macht (siehe unten). Anzufügen ist noch, dass diese Russsteinchen auch zu klein sind, um gesehen zu werden. Die schwarzen Wolken, die man speziell bei anfahrenden Diesellastwagen beobachten kann, bestehen aus grossen Teilchen, die weit weniger gefährlich sind. Ebenfalls kann man Russsteinchen nicht riechen, sie sind also eine heimtückische Gefahr.

### Die Modellflamme

Um die Russentstehung zu verfolgen und zu verstehen, benutzen wir eine Modellflamme. Als Brennstoff verwenden

#### Adressen der Autoren

Dr. Konstantin Siegmann und Prof. Dr. Hans-Christoph Siegmann, Institut für Verbrennungs-aerosole und Schwebeteilchen der ETH Zürich 8093 Zürich, Dr. med. Hans Binz, Kantonsarzt des Kantons Solothurn, Baselstrasse 40 4509 Solothurn

wir Methargas (normales Stadtgas), das aus einer Düse austritt. Die umgebende Luft dient als Sauerstofflieferant. Diese simple Anordnung heisst «laminare Diffusionsflamme» und gleicht prinzipiell einer Kerzenflamme oder der Flamme eines Gasfeuerzeugs. Die ganze Flamme ist 70 mm hoch. Dank der laminaren Strömung (keine Wirbel oder Turbulenzen) entspricht die Höhe über dem Brennermund einer Zeitskala: Ganz unten sind die Russteilchen noch jung. Je weiter sie in der Flamme nach oben wandern, desto älter werden sie. Wir untersuchen die Russbildung in solchen Flammen, indem wir kleine Mengen von Verbrennungsgasen aus verschiedenen Höhen absaugen und diese Proben sofort mit sauberem, kaltem Stickstoff oder Luft verdünnen, um alle Reaktionen zu stoppen. Die Größenverteilung in den Gasproben analysieren wir dann entweder mit einem Massenspektrometer (Flugzeit-Massenpektrometer mit Laserionisation [TOF-MS]) oder mit Aerosolmethoden [2, 3].

### Massenspektroskopische Analyse der Moleküle in der Flamme

Bild 1 zeigt ein Massenspektrum von Verbrennungsgasen aus einem stark russhaltigen Teil der Flamme. Um die Teilchen nachweisen zu können, wurden sie im Massenspektrometer mit UV-Laserpulsen von 248 nm Wellenlänge ionisiert. Man kann zwei Massenbereiche erkennen: Unterhalb von etwa 1000 amu (amu

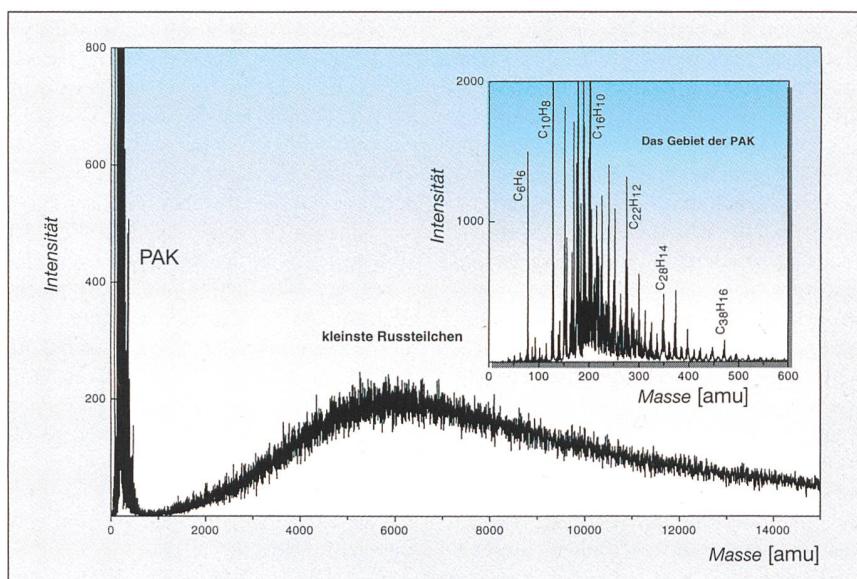
ist eine Masseneinheit, 1000 amu heisst 1000mal schwerer als ein Wasserstoffatom) sieht man die Flammenmoleküle. Diese Zone ist im Einsatz vergrössert dargestellt. Jeder Peak entspricht einem Kohlenwasserstoff mit bestimmter Anzahl von Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen. Diese Moleküle gehören alle zu den Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen und sind zum Teil stark kanzerogen. Die flachen, pfannkuchenartigen Moleküle sind aus sechseckigen Benzolringen aufgebaut. Bild 2 zeigt Beispiele dieser Moleküle. (Der zur Absättigung der 4. Bindung des Kohlenstoffs an den Rändern noch vorhandene Wasserstoff ist nicht eingezeichnet.) Man findet mit dieser Technik PAK mit über 50 C-Atomen in 20 gekoppelten Benzolringen, jedoch nimmt die Intensität mit wachsender Masse der PAK bei etwa 600 amu sehr rasch ab. Bei höheren Massen sieht man Signale, die einen unstrukturierten Hügel mit einer Kulmination bei 6000 amu bilden. Wir vermuten, dass Spezies im Massenbereich von 1000 bis 14000 amu kleinste, primäre Russelteilchen sind. Um die Mechanismen, die zur PAK-Bildung führen, besser zu verstehen, nehmen wir Höhenspektren von ausgewählten PAK auf. Die Konzentration des PAK wird mit dem Massenspektrometer als Funktion der Höhe über dem Brenner gemessen. In Bild 2 sind solche Höhenspektren gezeigt. Man sieht, dass diese Moleküle unten in der Flamme nicht vorhanden sind, dann langsam gebildet

werden und weiter oben wieder verschwinden. Man erkennt deutlich, dass die Konzentration der kleineren PAK früher ansteigt als die der grösseren. Je grösser der PAK, desto weiter oben in der Flamme erreicht er seine maximale Konzentration. Man lernt daraus, dass die grossen PAK aus den kleinen entstehen. In der Tat wachsen PAK in der Flamme durch die Anlagerungen von kleinen Molekülen, wie zum Beispiel Acetylen ( $C_2H_2$ ), und auch durch Dimerisierung (Verbindung zweier Moleküle). Die Abnahme der PAK-Konzentration im oberen Teil der Flamme hat zwei Gründe: Einerseits verbinden sich kleine PAK zu grossen und andererseits verbrennen alle PAK (und Russelteilchen) ganz oben in der ungestörten Flamme [3].

### Die Entstehung der Russelteilchen

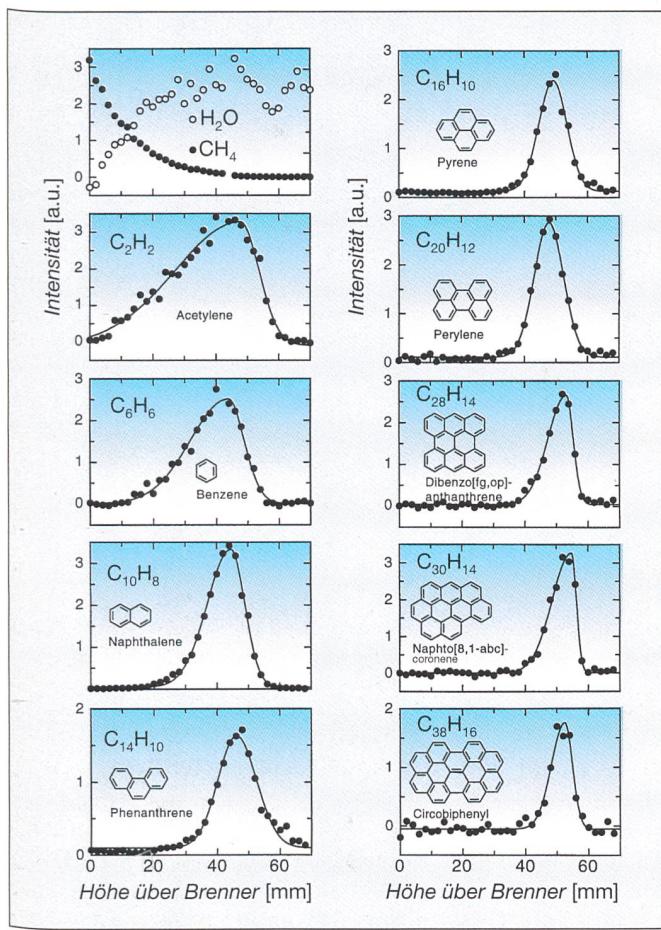
Wir wollen jetzt auf die Russelteilchen in der Flamme eingehen. Wir bedienen uns der hochempfindlichen Aerosol-Messmethoden, um höhenabhängige Größenverteilungen von Russpartikeln zu bestimmen. Abgesaugt werden die Flammengase wie bei den massenspektroskopischen Experimenten, mit dem Unterschied, dass die Gasproben viel höher verdünnt werden (1:400), um Koagulation (Zusammenballen) der Teilchen zu verhindern. Dann werden die Partikel mit Hilfe eines radioaktiven Präparates überwiegend einfach elektrisch geladen. Durch Wahl des elektrischen Feldes in einem Zylinderkondensator kann man dann eine Grösse von Partikeln aufgrund der elektrischen Beweglichkeit herausfiltern und Partikel-Grössenspektren aufzeichnen. Bild 3 zeigt solche Grössenspektren aus verschiedenen Höhen in der Flamme. Wie bei den PAK sind ganz unten und ganz oben in der Flamme keine Russpartikel zu finden. Anders als bei den PAK-Spektren nehmen jedoch Partikelgrösse und -anzahl in einer bestimmten Höhe in der Flamme fast explosionsartig zu. In dem Beispiel in Bild 3 passiert das in etwa 40 mm Höhe. Schon in einer Höhe von etwa 30 mm kann man die ersten, sehr kleinen Partikel (Durchmesser  $<20\text{ nm}$ ) feststellen. Ganz oben in der Flamme nehmen Durchmesser und Anzahlkonzentration der Russpartikel wieder ab, weil schliesslich alles organische Material verbrennt. Dies ist eine Eigenschaft der ungestörten laminaren Diffusionsflamme.

Die Bildung und das sukzessive Wachstum der PAK unter Abspaltung von Wasserstoff ist sicher ein Prozess, der einen Beitrag zur Entstehung des Kohlen-



**Bild 1** Massenspektrum einer Gasprobe aus einer Methanflamme

Ionisiert wurde mit Laserpulsen von 248 nm Wellenlänge. Im Massenbereich bis 1000 amu zeigt das Spektrum Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Darüber sieht man eine kontinuierliche Verteilung kleinster Russelteilchen; diese Verteilung hat ein Maximum bei 6000 amu. Dies entspricht einem ungefähr  $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$  grossen Teilchen.



**Bild 2** Normierte Höhenprofile von ausgewählten Molekülen in der Flamme  
Die sichtbare Flamme ist 70 mm hoch.  
Entstehung und Vernichtung der PAK sind von ihrer Größe abhängig (je größer ein PAK, desto mehr Kohlenstoffatome enthält er). Das kleinste aromatische Molekül ist Benzol,  $C_6H_6$ .

halb 1  $\mu\text{m}$  dringen tief in den menschlichen Atmungstrakt ein. Größere Teilchen im sichtbaren Bereich werden dagegen bereits in der Nase und der Mundhöhle eliminiert (siehe unten). Wie wir gezeigt haben, sind die in der Verbrennungszone erzeugten Teilchen jedenfalls anfänglich viel kleiner als 1  $\mu\text{m}$ . Genau diese Teilchen stellen die Hauptgefahr für die menschliche Gesundheit dar. Dementsprechend sind für die Beurteilung des Gesundheitsrisikos folgende messtechnische Probleme zu lösen:

- selektive Erfassung der Teilchen mit 1  $\mu\text{m}$  Durchmesser und darunter, die aus Verbrennungen stammen oder Verbrennungsprodukte angelagert haben
- Zuordnung der Teilchen zu den verschiedenen Quellen (weil die Mischung der Chemikalien für die verschiedenen Quellen wie Diesel, Holzfeuer oder Zigaretten unterschiedlich ist, erwartet man auch einen quellenabhängigen Risikofaktor)
- Quantifizierung des Gesundheitsrisikos
- Bestimmung der individuellen Exposition, die sehr verschieden sein kann von der Konzentration an einer festen Messstelle

Diese Bedingungen schließen viele der heute gängigen Messverfahren aus, so zum Beispiel das Zählen oder Wiegen aller Teilchen, Messung der Filterschwärzung und Verfahren mit langen Sammelzeiten, weil sie keine Quellenzuordnung erlauben. Außerdem sollte eine brauch-

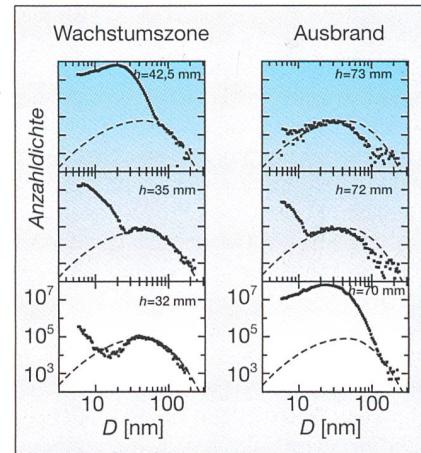
stoffe in Verbrennungen liefern kann. Verschiedene neue Experimente zeigen aber, dass der Wachstumsmechanismus über PAK zu ineffizient ist, um das explosionsartige Anwachsen der Kohlenstoffpartikel und ihre frühe, in niedriger Höhe (wo es ja überhaupt noch gar keine grossen PAK gibt) stattfindende Nukleation zu erklären. Vielmehr scheint es so zu sein, dass der Kohlenstoff direkt in einer oder mehreren seiner verschiedenen Formen nukleiert. Das Kohlenstoffatom mit seiner  $2s^22p^2$ -Elektronenkonfiguration kann einfache, zweifache oder dreifache Bindungen eingehen, wobei die Elektronen  $sp$ -,  $sp^2$ - oder  $sp^3$ -Hybridorbitale bilden. Wahrscheinlich sind in den «jungen» Kohlenstoffteilchen alle drei Formen vertreten, mit kettenartigen ( $sp$ -Bindungen), flächenhaften ( $sp^2$ -Bindungen) und diamantartigen ( $sp^3$ -Bindungen) Strukturen. Man findet auch die erst in den letzten Jahren entdeckten Fullerene (für ihre Entdeckung wurde 1996 der Nobelpreis verliehen), bei denen die Graphitebenen zu geschlossenen Kugeln oder Ellipsoiden gebogen sind, und Nanoröhrchen mit zylindrisch aufgerollten Ebenen. Solche Strukturen kann man nachweisen, wenn man die Partikel aus

der Verbrennungszone auf einem Träger niederschlägt und im Elektronenmikroskop abbildet. Es ist uns auch gelungen, mittels Laserbeschuss Fullerene aus den Partikeln abzudampfen und im Flugzeit-spektrometer an der Stelle des «Russenhügels» nachzuweisen [4]. Mit wachsendem Alter verwandeln sich die Partikel schliesslich in graphitartigen Kohlenstoff. Dieser ist chemisch inert und verbrennt nur dann mit Sauerstoff zu  $\text{CO}_2$ , wenn die Partikel noch sehr heiss sind.

Was geschieht nun mit den Russteilchen aus unvollständigen Verbrennungsprozessen, wie zum Beispiel aus einem Dieselmotor? Wenn sich das Abgas abkühlt, kondensieren schwerflüchtige organische Moleküle, wie die PAK, auf den Russteilchen. Weil Partikel aus Verbrennungen sehr klein sind (typischerweise 100 nm Durchmesser), bleiben sie lange in der Atmosphäre und können von dort in unsere Lungen gelangen [5].

### Messtechnische Probleme für die Beurteilung des Gesundheitsrisikos

Der wichtigste Faktor zur Beurteilung des Gesundheitsrisikos durch Schwebeteilchen ist ihre Größe. Partikel unter-



**Bild 3** Größenverteilungen von Partikeln in verschiedenen Höhen einer mit Palladiumteilchen dotierten Methanflamme

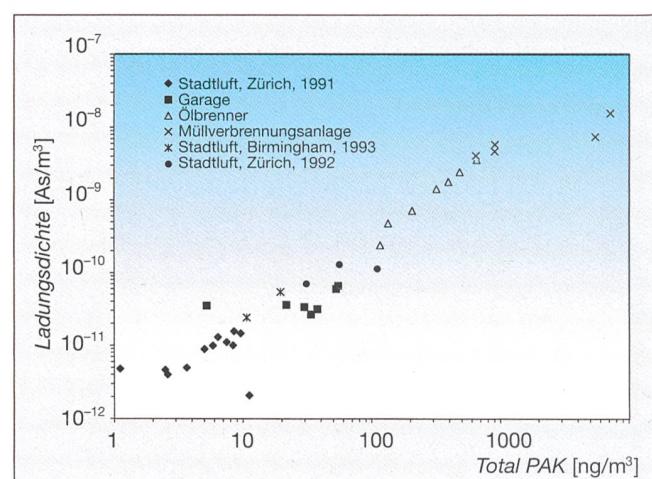
Um den Absaugmechanismus und die ganze Apparatur zu testen, wurden dem Methangas Palladiumteilchen mit einem bekannten Grössenspektrum von 10 bis 100 nm beigemischt (gestrichelte Linie). Man sieht, dass diese Test-Teilchen die Verbrennung und Extraktionsprozedur unbeschadet überleben.  $h$  bezeichnet die Höhe [mm] in der Flamme.

bare Methode auch die Hauptgefahr, den Zigarettenrauch, nachweisen können. Immerhin sterben am Zigarettenrauch weltweit über 3 Millionen Menschen pro Jahr, während die Partikel aus dem Motorfahrzeugverkehr laut Schätzung der WHO vom November 1996 «nur» 460 000 Todesfälle verursachen.

### Der photoelektrische Aerosolsensor als Russmessgerät

Schon früher haben wir darauf aufmerksam gemacht, dass die photoelektrische Aufladung der Schwebeteilchen mit UV-Licht im Bereich der Photonenenergie 5–6 eV sehr gut geeignet ist, um die menschliche Exposition gegenüber lungengängigen Verbrennungsprodukten zu bestimmen [6]. Die photoelektrische Aufladung findet nämlich nur bei Schwebeteilchen unterhalb 1 µm Durchmesser statt, weil die mittlere freie Weglänge des Photoelektrons im Trägergas grösser als der Teilchendurchmesser sein muss, wenn verhindert werden soll, dass das Photoelektron wieder zurück zum Teilchen diffundiert. Damit wird bei der photoelektrischen Aufladung automatisch der lungengängige Bereich ausgewählt. Der zweite Grund ist aber der, dass Teilchen, die PAK angelagert haben, eine viel höhere photoelektrische Ausbeute haben als Teilchen ohne PAK. In Modellexperimenten haben wir eine Reihe von Phänomenen identifiziert, welche diese Erhöhung der Ausbeute erklären können. Jedenfalls ist die mit einer vorgegebenen UV-Lampe in der Luft erzeugte Ladungsdichte proportional zur gaschromatographisch bestimmten totalen Masse der teilchengebundenen PAK. In Bild 4 wird das Signal des photoelektrischen Aerosolsensors mit der chemischen Analyse von gesammelten Filterproben verglichen. Man sieht, dass die Messpunkte gut auf einer Geraden liegen. Die Proportionalitätskonstante ist nicht wesentlich von der Art und Herkunft des Verbrennungsaerosols abhängig. Mit diesem Glückfall hat man eine sehr einfache und billige Methode in der Hand, die totale Masse der an die Schwebeteilchen gebundenen PAK zu bestimmen. Weil die PAK das charakteristische Nebenprodukt sind, das stets zusammen mit dem Kohlenstoffsklelett der primären Verbrennungsaerosole auftritt, sind sie die ideale Markierung der Teilchen aus unvollständiger Verbrennung, mit deren Hilfe man diese von anderen Partikeln unterscheiden kann. Natürlich sind auch praktische Gründe massgebend, warum ein photoelektrischer Aerosolsensor sehr gut zur Quantifizierung der Verbrennungsaerosole geeignet ist: er

**Bild 4** Vergleich der chemischen Analyse (x-Achse) mit dem Aerosolsensor (y-Achse)  
Die Messungen korrelieren gut, trotz der Verschiedenheit der untersuchten Aerosole.



kann auch winzige Konzentrationen kontinuierlich nachweisen und lässt sich einfach realisieren. Die Nachweisgrenze eines solchen Sensors ist  $\approx 1 \text{ ng partikelgebundener PAK pro m}^3$  (PPAK/m<sup>3</sup>) bei einer Messdauer von etwa 1 s [6]. Zum Vergleich: Für eine gaschromatographische Analyse muss man stundenlang grosse Mengen Luft durch ein Filter saugen, bis man genügend Teilchen für die Herstellung der Filterextrakte gesammelt hat.

### Lungengängige Schwebeteilchen und Gesundheit

Was passiert mit inhalierten Schwebeteilchen?

Beim Inhalieren werden grosse Teilchen bereits in der Nase oder in den oberen Luftwegen abgefangen. Nur Schwebeteilchen mit einem Durchmesser kleiner als 1 µm können bis zu den Lungenbläschen vordringen. Ob die Teilchen Wasser aufnehmen können (hydrophil) oder nicht (hydrophob), bestimmt, wo sie im Respirationstrakt deponiert werden. Hydrophile Partikel werden durch Wasserkondensation in der mit Wasserdampf gesättigten Atmosphäre des Respirationstraktes sehr rasch grösser und entsprechend schon im oberen Teil der Atemwege absorbiert. Der Mechanismus der Selbstreinigung der Lungen, der Zilienschlag des Flimmerepithels der Bronchien, fördert dann die Partikel wieder aus den Lungen. Kleine hydrophobe Partikel sind dagegen weit gefährlicher als hydrophile. Sie dringen tief in die Lungen ein und können unter Umständen die Lungenbläschen (Alveolen) erreichen. Spezielle Fresszellen, Makrophagen, nehmen dort die unlöslichen Partikel auf. Falls die Staubpartikel toxische Stoffe

tragen (z.B. PAK), sind Auswirkungen auf die Gesundheit unvermeidlich.

### Kurzeffekte der lungengängigen Schwebeteilchen

Einige der Leserinnen und Leser werden sich sicher noch an Bilder oder Berichte der berühmten Smogs in London in den 50er Jahren erinnern. Während dieser Smogs nahmen die Todesfälle zu. Heute ist es gesichert, dass der Smog direkt für die Todesfälle verantwortlich war. Diese historischen Daten illustrieren deutlich, dass lungengängige Schwebeteilchen fatale Folgen für die menschliche Gesundheit haben können. Dass dieser Kurzeffekt bei Personen, die an einer Lungenerkrankung wie chronische Bronchitis leiden, heftiger ausfällt als bei gesunden, erscheint logisch. Die Wirkung der lungengängigen Schwebeteilchen ist schematisch in Bild 5 dargestellt.

Studien in verschiedenen Städten haben einen direkten Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und erhöhte Morbidität (Häufigkeit von Erkrankungen in der Bevölkerung) sowie Mortalität (Zahl der verstorbenen Personen in der Bevölkerung) aufgedeckt. Lungenentzündung, chronische Bronchitis und Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind die Ursachen der Todesfälle. Der Effekt ist bei Personen über 65 Jahren ausgeprägter als bei jüngeren Mitgliedern der Bevölkerung. Die Harvard-Sechs-Städte-Studie zeigt, dass die Sterblichkeit in der am stärksten belasteten Stadt (Feinstaubbelastung 46 mg/m<sup>3</sup>) um 26% höher war als in der am wenigsten belasteten Stadt (Feinstaubbelastung 18 mg/m<sup>3</sup>). Es erstaunt nicht, dass dabei die Raucher eine höhere Sterblichkeit aufwiesen als Nichtraucher, wobei auch bei ihnen eine Ab-

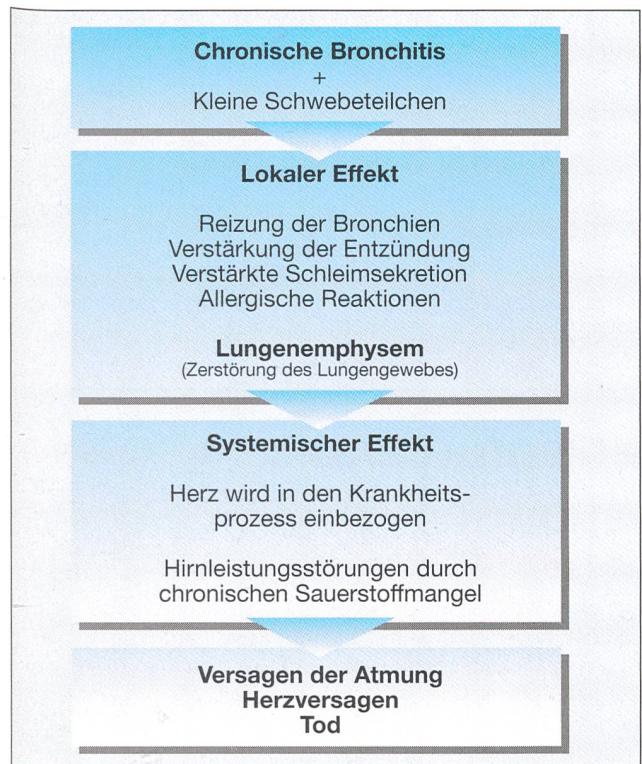


Bild 5 Schematische Darstellung der Wirkung der lungengängigen Schwebeteilchen auf die Gesundheit

tein. Wegen seiner veränderten Struktur kann das Protein p53 seine Aufgabe nicht mehr wahrnehmen.

Die Wirkung eines Karzinogens ist nicht sofort sichtbar. Die Entstehung eines diagnostizierbaren Lungenkrebses dauert oft Jahre oder Jahrzehnte. Die unlöslichen Russpartikel mit den PAK auf der Oberfläche, die im Körper bleiben, stellen deshalb Zeitbomben dar. Ähnlich wie beim Zigarettenrauch kann eine langfristige Feinstaubexposition in Kombination mit anderen Schadstoffen wie Ozon, NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> sowie Pollen zu einer chronischen Entzündung (Bronchitis) und weiteren Erkrankungen wie Lungenemphysem oder Lungenfibrose führen.

## Quantifizierung der Gesundheitsschädigung durch lungengängige Schwebeteilchen

Es ist ausserordentlich schwierig, das gesundheitsschädigende Potential von Feinstaub zu quantifizieren. Heute gelingt dies mehr oder weniger auf indirekte Weise. Es ist ohne Zweifel anerkannt, dass Zigarettenrauchen die Hauptursache von Lungenkrebs ist und auch für andere Tumoren wie Kehlkopfkrebs, Krebs im Mundbereich und Speiseröhrenkrebs mitverantwortlich ist. Je mehr eine Person raucht, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, an Lungenkrebs zu erkranken; die Abhängigkeit ist linear. Wie oben beschrieben wurde, können PAK auf der Oberfläche von Russpartikeln einfach als PPAK nachgewiesen und quantifiziert werden. Es ist auch bekannt, dass beim Rauchen einer Standardzigarette 200 ng PPAK inhaliert werden. Da der Mensch in 24 Stunden mindestens 11 m<sup>3</sup> Luft einatmet, lassen sich aus den Messdaten mittels einfacher Formel sogenannte Zigarettenäquivalente errechnen. Atmet ein Mensch während 24 Stunden normal Luft ein, die 18 mg/m<sup>3</sup> PPAK enthält, hat er, was die PAK betrifft, das Rauchäquivalent einer Normalzigarette inhaliert. Selbstverständlich können gegen diese Quantifizierung verschiedene Einwände gemacht werden. Trotzdem geben die Zigarettenäquivalente bezüglich PAK einen gewissen Hinweis auf die Gefährlichkeit der Luft. So berechnete man aufgrund von vielen Messungen, dass eine Person, die sich eine Stunde im Gubristunnel in der Nähe von Zürich aufhält, das Äquivalent von sechs Zigaretten einatmet. Selbstverständlich ist ein solcher Wert auch abhängig von der physischen Aktivität einer Person [6].

Zum Schluss sei hier ganz deutlich hervorgehoben, dass ein Verzicht auf Tabak – aktives oder passives Rauchen –

hängigkeit von der Feinstaubbelastung nachgewiesen werden konnte. Mehrere Studien zeigen ausserdem – neben den beobachteten Todesfällen – eine Zunahme der Spitaleintritte, hauptsächlich wegen Asthmas, Lungenentzündung oder anderen Lungenerkrankungen [10, 12, 13, 14].

Der beim Menschen beobachtete Effekt der Aerosole konnte kürzlich im Tierversuch bestätigt werden. Ratten wurden an drei aufeinanderfolgenden Tagen während sechs Stunden pro Tag 30fach konzentrierter Stadtluft (272 mg/m<sup>3</sup>) ausgesetzt. Hatten die Ratten vor dem Versuch eine chronische Bronchitis, starben 37% der exponierten Ratten. Bei 80% der verendeten Tiere wurde eine massive Verengung der Bronchien beobachtet und eine verstärkte Entzündung festgestellt. Bei den Kontrolltieren ohne chronische Bronchitis, die aber der gleichen Luft ausgesetzt waren, konnten keine Todesfälle und keine Gewebeveränderungen festgestellt werden [11].

Die gesundheitsschädigende Wirkung des Feinstaubes ist beim Menschen mit gewissen bestehenden Krankheiten, wie chronische Bronchitis, Asthma oder Lungenemphysem, nicht mehr umstritten. Hat der Feinstaub auch eine Wirkung beim gesunden Menschen? Einige Studien deuten darauf hin, dass die lungengängigen Schwebeteilchen auch in diesem Fall zu Beschwerden führen können.

Personen in belasteten Regionen erkanken häufiger an Husten, Auswurf, Lungenentzündung, Asthmaanfällen oder chronischer Bronchitis als Personen in weniger belasteten Regionen. Auch Kinder leiden an Atemwegserkrankungen beim Anstieg der Schwebepartikelzahl. Steigt der Feinstaub-Jahresmittelwert um 10 mg/m<sup>3</sup>, nehmen die Atembeschwerden (Atemnot) um 41% und Husten und Auswurf um 31% zu, und dies selbst bei Kindern. Lungenfunktion und Lebenserwartung korrelieren. Personen mit einer guten Lungenfunktion haben eine längere Lebenserwartung. Da das Lungenvolumen bei zunehmender Schadstoffbelastung abnimmt, verkürzt eine erhöhte Feinstaubbelastung die Lebenserwartung [7, 8, 9].

## Langzeiteffekte der Schwebeteilchen

Russpartikel tragen auf ihrer Oberfläche Polzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PPAK). Darunter findet man das sehr karzinogene Benzo(a)-pyren, das auch im Zigarettenrauch enthalten ist und für den Lungenkrebs bei Rauchern verantwortlich ist. Dieser Stoff verändert im Körper das Gen für ein ganz spezielles Protein (Protein p53), das im Körper normalerweise dafür sorgt, dass kein Krebs entsteht. Das veränderte Gen liefert ein entsprechend verändertes Pro-

die wichtigste Massnahme darstellt, um die Hauptbelastung mit lungengängigen Schwebeteilchen zu eliminieren, die auf der Oberfläche PAK tragen.

### Literatur

- [1] K. Siegmann et al.: Multiphoton Ionization Mass Spectroscopy of Soot, PAH and Fullerenes: The Effect of Photon Energy. *J. Aerosol Sci.* 26(1995) Suppl. 1, pp. 661-662. – H. Hepp et al.: Multiphoton Ionization Mass Spectroscopy and Size Analysis of Soot Particles. *J. Aerosol Sci.* 26(1995) Suppl. 1, pp. 127-128.
- [2] M. Kasper et al.: Evaluation of an in-situ Sampling Probe for its Accuracy in Determining Particle Size Distributions from Flames. *J. Aerosol Sci.* 28(1997), pp. 1569-1578.
- [3] K. Siegmann et al.: Reactive Dimerization: A New PAH Growth Mechanism in Flames. *Combust. Sci. and Tech.* 109(1995), pp. 165-181.
- [4] K. Siegmann und H.-C. Siegmann: Molekulare Vorstadien des Russes und Gesundheitsrisiko für den Menschen. *Phys. Bl.* 54(1998), S. 149-152.
- [5] G. Skillas et al.: High Fractal-like Dimension of Diesel Soot Agglomerates. *J. Aerosol Sci.* 29(1998)4, pp. 411-419.
- [6] K. Siegmann and H.-C. Siegmann: The Formation of Carbon in Combustion and how to Quantify the Impact on Human Health. *Europhysics News* 28(1997)2, pp. 50-57.
- [7] C. Braun-Fahrlander et al.: Air pollution and respiratory disease in preschool children. *A. Rev. Respir. Dis.* 145(1992), pp. 42-47.
- [8] C. Braun-Fahrlander et al. and the Scarpol Team: Respiratory Health and Long-Term Exposure to Air Pollutants in Swiss Schoolchildren. *A. Rev. Resp. Crit. Care Med.* 155(1997), pp. 1042-1049.
- [9] Dienst für Gesamtverkehrsfragen, GVF EVED: Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten. Synthesebericht. GVF-Auftrag Nr. 272, 1996.
- [10] D. W. Dockery et al.: An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *The New England Journal of Medicine.* 329(1993), pp. 1753-1759.
- [11] J. J. Godleski et al.: Death from Inhalation of Concentrated Ambient Air Particles in Animal Models of Pulmonary Disease. *Proc. of the second colloquium of particulate air pollution and human health.* Held May 1-3, 1996 in Park City, Utah.
- [12] P. Leuenberger et al. and Sapalida-Team: Swiss Study on Air Pollution and Lung Diseases in Adults. Final report to the Swiss National Research Foundation. Lausanne/Basel, 1995.
- [13] W. Roemer et al.: Effect of Wintertime Air Pollution on Respiratory Health of Children with Chronic Respiratory Symptoms. *Am. Rev. Respir. Dis.* 147, pp. 118-124.
- [14] J. Schwartz and A. Marcus: Particulate Air Pollution and Daily Mortality in Detroit. *Environm. Res.* 56(1991), pp. 204-213.

## Suie issue de processus de combustion

### Formation et séquelles sur la santé de l'homme

Epaisses et nauséabondes, les fumées que dégagent les moteurs diesel sont communément l'incarnation de la pollution de l'environnement due à la circulation routière. Cependant, pour la santé des humains, les infimes particules de suie constituent une menace autrement sournoise, même produites par des combustions apparemment plus propres (pas seulement dans des moteurs diesel) pouvant pénétrer dans les alvéoles pulmonaires. En partie fortement cancérogènes, les particules sont inodores, on ne peut les voir et elles demeurent en suspension dans l'air très longtemps.

**Betriebsleiter, Sicherheitsbeauftragte und Elektrofachleute!**

# Was ist sicher?

Unsicherheit ist absolut **SICHER!**

Darum:

ein Sicherheitskonzept mit dem **SEV**

Kontaktstelle:

Rolf Oster, SEV, SM, Telefon 01 956 12 10, Fax 01 956 17 10

E-Mail: rolf.oster@sev.ch