



Katalysatormetalle im Schwebstaub Konzentration, Größenverteilung und räumliche Ausbreitung

Zusammenfassung

In der Zeit von August 2001 bis Juli 2002 untersuchte das Institut für Mineralogie der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG), inwieweit sich in Katalysatoren verwendete Metalle wie Platin, Palladium und Rhodium im Schwebstaub im Straßenraum anreichern und ob Hinweise zu finden sind, dass sich solche Elemente auch im weiteren Umfeld der „Quelle Straße“ verteilen. Hierzu wurden Schwebstaubproben auf Filtern gesammelt und im Labor ausgewertet. Die Messungen wurden an zwei Probenahmestellen im Stadtgebiet von Frankfurt am Main (ein verkehrsbezogener Standort und ein weiterer im städtischen Hintergrund) und an einem Standort außerhalb Frankfurts im ländlichen Raum durchgeführt. Bei der Auswahl der Messpunkte und bei der Probenahme wurden auch meteorologische Aspekte berücksichtigt. Insgesamt wurden 150 Schwebstaubproben verteilt auf ein Jahr (August 2001 bis Juli 2002) genommen und auf ihren Gehalt an Katalysatormetallen analysiert. Zur Ergänzung der Informationen über die Herkunft des untersuchten Schwebstaubs wurden weitere Elemente (Schwermetalle) in die Messpalette mit aufgenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die höchsten Schwermetall-Konzentrationen im Bereich von Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen auftreten. Die Konzentrationen nehmen vom verkehrsbezogenen Standort über den städtischen Hintergrund bis in den

ländlichen Raum hin ab. Diese Verteilung deutet auf einen Zusammenhang zwischen den Metall-Konzentrationen und der Verkehrsdichte hin. An allen drei Standorten ist eine heterogene Verteilung der Metalle im Schwebstaub innerhalb des Messjahres festzustellen. Die Schwermetall-Konzentrationen im Schwebstaub - mit Ausnahme von Kobalt, Vanadium, Cer und Mangan - weisen an allen Messorten einen deutlich erhöhten Anreicherungsfaktor z. B. gegenüber den Anteilen in der kontinentalen Erdkruste auf. Auch aus diesem Ergebnis wird deutlich, dass die Anreicherungen an allen drei Messorten anthropogenen Quellen zuzuschreiben sind.

Weitere Untersuchungen mit Impaktoren sollten Informationen liefern, an welche Partikelgrößen die untersuchten Inhaltsstoffe gebunden sind.

In allen Impaktorproben treten die Schwermetalle in unterschiedlichen Konzentrationen auf und zeigen in Bezug auf die Korngröße der Staubpartikel eine heterogene Verteilung, wobei die Anreicherung von Element zu Element und von Messort zu Messort unterschiedlich ist. Die Metalle Arsen (As), Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Vanadium (V) reichern sich in den Feinstaubpartikeln* mit Korndurchmessern unterhalb von 2,1 µm an, während der Hauptanteil von Cer (Ce), Chrom (Cr), Kobalt (Co) und Nickel (Ni), Platin (Pt), Palladium (Pd) und Rhodium (Rh) in den Grobstaubpartikeln* im Korngrößenbereich oberhalb von 2,1 µm zu finden ist. Die Elemente Kupfer (Cu), Mangan (Mn), Antimon (Sb) und Zink (Zn) treten mit hohen

Konzentrationen im mittleren Bereich der Impaktorstufen (Partikeldurchmesser 1,1 bis 4,7 μm) auf. Ferner zeigte sich, dass die Schwermetalle im Schwebstaub, der an der verkehrsbezogenen Messstelle gemessen wurde, eher im Grobstaub zu finden sind. Dieser Befund spricht dafür, dass auch die Aufwirbelung von Straßenstaub und der Straßenabrieb einen merklichen Beitrag zur Partikelbelastung im Straßenraum liefert. An den beiden anderen Messstellen findet die Anreicherung in den Feinstaubfraktionen statt, wobei im städtischen Hintergrund vermehrt Schwermetalle im Bereich der mittelgroßen Partikel der Korngröße 1,1 bis 4,7 μm nachzuweisen sind.

Die in den Feinstaubpartikeln ermittelten „Schwermetallgehalte“ können auch bei der Risikoabschätzung für die Atemwege von Bedeutung sein.

**Anmerkung: In der Grundlagenforschung werden Partikel $\leq 2,5 \mu\text{m}$ Durchmesser als feine Partikel oder als Feinstaub und Partikel $> 2,5 \mu\text{m}$ als Grobstaub bezeichnet. In der „Umgangssprache“ hat sich inzwischen der Begriff „Feinstaub“ sowohl für die Partikelfraktion PM10 (Partikel $\leq 10 \mu\text{m}$) als auch für die Partikelfraktion PM2,5 durchgesetzt. Weitere Informationen zum Thema Schwebstaub und Partikel können im Lufthygienischen Jahresbericht 2007, Teil II, HLUg 2008, nachgelesen werden.*

1 Einleitung

Das Projekt „Ermittlung der Konzentration, Größenverteilung und räumlichen Ausbreitung von Schwebstaub und Staubinhaltsstoffen (Schwermetalle) im Bereich Frankfurt am Main“ wurde im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie in den Jahren 2001 bis 2003 vom Institut für Mineralogie der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt durchgeführt. Inzwischen wurden Teile der Untersuchungsergebnisse von Zereini et al. 2004 und 2005 in der Zeitschrift *Environmental Science & Technology* publiziert. In diesem Bericht werden nun die gesamten

Untersuchungsergebnisse zusammenfassend dargestellt.

Ziel des Messprogramms war die Beantwortung der Frage, inwieweit sich in Katalysatoren verwendete Metalle wie Platin (Pt), Palladium (Pd), Rhodium (Rh) und Cer (Ce) als Bestandteile des Schwebstaubs im Straßenraum anreichern und ob Hinweise zu finden sind, dass sich solche Elemente auch in das Umfeld der „Quelle Straße“ verteilen. Um die Staubpartikel mit ihren Inhaltsstoffen zu erfassen, wurde der in der Außenluft vorhandene Schwebstaub (TSP: Total Suspended Particulates) auf Filtern gesammelt, um ihn anschließend im Labor auf die vorgenannten „Katalysator-metalle“ hin zu untersuchen. Die Messung der drei Platingruppenelemente Pt, Pd, Rh und des auch im Katalysator verwendeten Ce wurde durch die Messung der weiteren Elemente As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, V und Zn ergänzt. Die Erweiterung des Messprogramms sollte weitere Hinweise auf die mögliche Herkunft (bzw. die Quellen) des untersuchten Schwebstaubs geben.

Parallel zu den Messungen der „Gesamtschwebstaubmasse“ wurden auch fraktionierende Messungen mit Andersen-Impaktoren (8 Stufen im Partikeldurchmesserbereich zwischen $> 9 \mu\text{m}$ und $< 0,43 \mu\text{m}$ und ein Backup-Filter) durchgeführt. Auch die so erhaltenen Proben der verschiedenen Partikelfraktionen wurden auf die vorgenannten Inhaltsstoffe hin untersucht, um Hinweise zu erhalten, ob es für die unterschiedlichen Elemente bevorzugte Partikelgrößenbereiche gibt.

Die Ermittlung der Schwermetallkonzentrationen in den fraktionierten Staubpartikeln $\leq 10 \mu\text{m}$ verdient im Hinblick auf das Risiko für die Atemwege besondere Aufmerksamkeit.

In der Luft stellen Feinstaubpartikel (PM10) (Partikel mit Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$) die Hauptmasse des Schwebstaubs dar. Ihr Anteil an der Gesamtschwebstaubkonzentration liegt im Mittel bei ca. 80 % mit standortspezifischen Abweichungen nach oben und unten. Insbesondere die Partikel kleiner als 2,5 μm dringen bis in

die Lunge ein, wobei die ultrafeinen Partikel (kleiner als $0,1 \mu\text{m}$) sogar den Bereich der Alveolen (Lungenbläschen) erreichen, wo der Austausch zwischen Lunge und dem Kreislaufsystem stattfindet. Ultrafeine Partikel vermögen auch in die Blutbahn überzugehen und können dann zu unterschiedlichen Organen des menschlichen Körpers transportiert werden. U. a. gelten so die Effekte, die ultrafeine Partikel auslösen, als Risikofaktoren für die Entstehung von Herz-Kreislaufkrankungen (Faltblatt: Feinstaub (PM10), HLUK).

Als Hauptursache für anthropogene Schwermetall-Einträge in der Atmosphäre gelten Emissionen aus den Bereichen der Industrie und des Straßenverkehrs. Die Luft in Industrie- und Ballungsräumen ist in der Regel wesentlich stärker mit Schwermetallen belastet als in den ländlichen Gebieten (HLUK: Lufthygienischer Jahresbericht 2007, Teil II: Staub und Staubinhaltsstoffe; MEYER et al. 1999). Speziell im Straßenbereich ist der Pkw-Verkehr der größte Emittent. Metalle wie Cu, Co, Ni, Pb, Sb, V, Zn und die Platin-gruppenelemente (PGE) Pt, Pd und Rh stammen aus dem Straßenverkehr, überwiegend aus Verbrennungsrückständen, auch Tropfverlusten von Kraftstoffen und Motoren- bzw. Getriebeöl sowie von Reifen, Bremsbelägen, von Autoabgaskatalysatoren und Fahrbahnbelägen und von der Korrosion verzinkter Distanzschutzplanken (u. a. HILDEMANN et al. 1991; HEINRICH 1993; GOLWER & ZEREINI 1998; ZEREINI & ALT 2000, 2006; PLEBOW & HEINRICH 2001).

Auch die Wiederaufwirbelung trägt im Straßenraum zur Partikel- und Schwermetallbelastung bei.

Als Hauptemissionsquelle für die Platin-gruppenelemente und Ce im Straßenbereich werden die Autoabgaskatalysatoren angesehen (u. a. SCHÄFER et al. 1999; ZEREINI et al. 2001, 2007; GOMEZ et al. 2002; RAUCH & HEMOND 2003).

Die Autoabgaskatalysatoren werden seit Mitte der achtziger Jahre in Europa bzw. in Deutschland eingesetzt, um Schadstoffemissionen von Kohlenwasserstoffen,

Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffoxiden der Kraftfahrzeuge zu reduzieren. Im Abgaskatalysator werden die Elemente Platin, Rhodium und Palladium verwendet, wobei Platin im Pt-Rh-Katalysator mit dem Verhältnis 5:1 bei ca. $1,5 \text{ g/L}$ Hubraum mengenmäßig dominiert. Seit 1993 bietet die Industrie als Alternative zum klassischen Pt-Rh-Katalysator einen Drei-Wege-Katalysator auf der Basis von Palladium und Rhodium an (DOMESLE 1996). Seit 1998 sind neue Pt-Katalysatoren für Dieselmotoren in Betrieb genommen worden. Durch thermische und mechanische Beanspruchung des Katalysatormaterials werden die Platinmetalle in geringen Mengen in die Atmosphäre freigesetzt, was zu einer Erhöhung der Platinmetall-Konzentrationen in der Umwelt führt (u. a. ALT et al. 1993; SCHIERL 2000; ZEREINI et al. 2001; GOMEZ et al. 2000, 2001; RAUCH et al. 2001; KANITSAR et al. 2003).

Cer ist mit etwa 25 % Hauptbestandteil des Autoabgaskatalysators und gilt als ein wichtiger Sauerstoffspeicher und Stabilisator der Aluminiumoxidschicht. Darüber hinaus unterstützt es die Edelmetalldispersion im Katalysator (GIESHOFF 2001). Ein Drei-Wege-Katalysator enthält bis zu 80 Gramm pro Liter Hubraum Ceroxid (DOMESLE 1996). HELMERS (1995) konnte in Grasproben im Straßenbereich ein durchschnittliches Ce/Pt-Verhältnis von 179 zu 1 mit einer Variationsbreite von 141 bis 241 ermitteln. Die Konzentration von Ce im Straßenstaub lag im Jahr 1994 zwischen 35 und $91 \mu\text{g/kg}$ im Stadtgebiet Frankfurt (BEYER et al. 1999).

2 Probenahme

Für die Probenahme wurden drei Standorte unterschiedlicher Immissionsbelastung (a) Straßenschlucht mit hohem Verkehrsaufkommen, (b) städtischer Hintergrund mit geringem Kraftfahrzeugaufkommen, (c) ländlicher Raum ausgewählt. Die Festlegung des letztgenannten Standorts erfolgte so, dass er - bezogen auf die Hauptwindrichtung im Raum Frankfurt - im Lee der beiden im Stadtgebiet eingerichteten Pro-

benahmepunkte lag. Bei Wettersituationen, in denen nördliche bis nordöstliche Windrichtungen vorherrschen, beschreibt der zuletzt genannte Messpunkt am Lohrberg allerdings die Vorbelastung der Luft, die nach Frankfurt gelangt. Bei allen Messpunkten wurde darauf geachtet, dass sie frei anströmbar waren und ebenfalls nicht durch lokale Quellen direkt beeinflusst wurden. Die Probenahme selbst erfolgte zeitgleich an den drei Messpunkten an ausgewählten Probenahmetagen über den Zeitraum von jeweils 24 Stunden in der Zeit von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr.

Unter Berücksichtigung der Lage der Hintergrund-Messstation sollten auch Aussagen zum Transport der vom Kraftfahrzeugverkehr emittierten Metalle aus dem Stadtgebiet Frankfurt in den ländlichen Raum möglich sein. Bei dem in der Region vorherrschenden Südwest-Wind wird die Schadstoffausbreitung vom Stadtgebiet Frankfurt in Richtung des nordöstlich der Stadt gelegenen Messpunkts begünstigt. Die nachfolgende Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Lage der Probenahmestellen im Raum Frankfurt am Main.

Abbildung 1: Lage der Messpunkte in Frankfurt am Main



Detailinformationen zur Lage der Probenahmepunkte können den nachfolgenden Angaben entnommen werden.

Messpunkt 1:

Friedberger Landstraße 84

Lage: etwa 3 Meter vom Straßenrand entfernt in einer Straße mit hohem Verkehrsaufkommen

Verkehrsführung: vierspurig, Geschwindigkeitsbegrenzung auf 50 km pro Stunde, Verkehrsbelastung: ca. 32.500 Kfz/d

Die Proben wurden auf dem Dach der Luftmessstation des Luftmessnetzes Hessen des HLUg genommen.

Standortcharakter: Straßenschlucht

Probenahmehöhe: 4 m über Grund



Messpunkt 2:

Georg-Voigt-Straße 14

Lage: am Straßenrand einer wenig befahrenen Straße (Einbahnstraße)

Verkehrsführung: einspurig, Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30 km pro Stunde

Verkehrsbelastung: ca. 1.000 Kfz/d (Wohngebiet bzw. Nebenstraße)

Standortcharakter: städtischer Hintergrund

Probenahmehöhe: 5 m über Grund



Messpunkt 3:

Lohrberg

Lage: in einer großen Gartenanlage auf einer Anhöhe (165 ü. NN) am Stadtrand von Frankfurt am Main (ca. 450 m nord-nordöstlich von Frankfurt-Seckbach)

Standortcharakter: ländlicher Hintergrund bzw. Stadtrand

Probenahmehöhe: 1,7 m über Grund



Für die Schwebstaubprobenahme wurden an den drei verschiedenen Messpunkten LIS-P-Geräte entsprechend der VDI-Richtlinie 2463, Blatt 9 verwendet. Als Filtermaterial wurden dabei Cellulosenitratfilter (Porendurchmesser: 3 µm, Filterdurchmesser: 120 mm) eingesetzt.

Mit diesem Verfahren wurde der sogenannte Gesamtschwebstaub (TSP) erfasst.

An jeder der drei Probenahmestellen wurden in der Zeit von August 2001 bis Juli 2002 insgesamt 20 Gesamtschwebstaub-Proben gleichmäßig über das Messjahr verteilt (d. h. etwa alle 19 Tage) genommen. Dabei waren die sieben Wochentage mit der gleichen Probenanzahl vertreten. Die Sammelzeit pro Filter betrug 24 Stunden (von 0 bis 24 Uhr). Der Luftdurchsatz lag zwischen ca. 310 und 350 m³. Insgesamt wurden 60 Gesamtschwebstaub-Proben genommen. Die Probenahme erfolgte an den drei Messorten gleichzeitig.

Für die Sammlung von fraktioniertem Schwebstaub wurden an den oben genannten Messpunkten Andersen-Impaktoren (8 Stufen und ein „Backup-Filter“) eingesetzt, deren effektive Abscheidedurchmesser die Korngrößenbereiche: > 9; 9,0 - 5,8; 5,8 - 4,7; 4,7 - 3,3; 3,3 - 2,1; 2,1 - 1,1; 1,1 - 0,63; 0,63 - 0,43 und < 0,43 µm abdecken.

Um an den einzelnen Impaktorstufen eine für die spätere Analyse ausreichende Partikelmasse zu erhalten, wurden an den beiden geringer belasteten Messorten 2 und 3 je zwei Impaktoren parallel betrieben. An jedem der genannten Messorte wurden insgesamt 3 Impaktor-Proben im Abstand von ca. 2 bis 3 Monaten genommen. Die Sammelzeit der Impaktor-Proben lag bei ca. 30 Tagen. Die Impaktoren wurden so eingestellt, dass sie einen konstanten Luftdurchsatz von 28,3 L/min gewährleisten. Um dies sicherzustellen, wurde der Luftdurchsatz im Abstand von 3 bis 5 Tagen mit einem Rotameter kontrolliert und bei Bedarf nachgeregelt. Bei diesen Routinekontrollen wurde eine Abnahme des Luftdurchsatzes nach ca. zwei Wochen um bis zu 1 L/min ermittelt. Der Gesamtluftdurch-

satz pro Probenahme erreichte zwischen 1140 und 1215 m³.

Auch die Impaktorprobenahme erfolgte an den drei Messorten gleichzeitig. In der Summe wurden 15 Impaktor-Proben (pro Impaktor 9 Einzelproben in den 9 Abscheidestufen) genommen. Hieraus ergab sich eine Gesamtprobenzahl für die weitere Auswertung der Impaktorproben von 135.

3 Staubmassenbestimmung

Das Einwiegen der Cellulosenitratfilter und der Impaktorproben wurde im klimatisierten Wägeraum des HLUg vorgenommen. Die leeren und beaufschlagten Filter und Impaktorprobenvorlagen wurden ca. 48 Stunden vor der Wägung in diesem Raum bei einer Lufttemperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % konditioniert. Zur Qualitätssicherung wurden ferner die leeren und die beaufschlagten Filter bzw. Probenvorlagen - je nach Stabilität der Einwaage - drei bis sieben Mal mit einer Mikrowaage gewogen. Anschließend wurde aus den einzelnen Einwaagen ein durchschnittlicher Wert für die gesammelte Schwebstaubmasse ermittelt.

4 Analytik

4.1 Aufschlussverfahren

Der Aufschluss des Probenmaterials erfolgte mit einem geschlossenen Hochdruckaufschluss unter Verwendung von Königswasser. Details können unter „Zerini et. al, 2005, Environ. Sci. Technol. 39, Seiten 2983-2989“ nachgelesen werden.

4.2 Bestimmungsverfahren

Im Anschluss an den Aufschluss wurden die Elemente Pb, Cd, Mn, Ni, Zn, V, As, Sb, Cu, Cr, Co und Ce mit einem Sektorfeld-Massenspektrometer nach Ionisation in induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-SFMS) am Institut für Spektrochemie und angewandte Spektroskopie in Dortmund bestimmt.

Platin und Rhodium wurden aus der Aufschlusslösung mittels adsorptiver Voltam-

metrie (AdSV) bestimmt. Diese Methode wird von verschiedenen Autoren beschrieben (u. a. ALT et al. 1993; LEON et al. 1997; HOPPSTOCK & ALT 2000).

Die Bestimmung von Palladium erfolgte mittels Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse (TXRF) (R. Seifert & Co, Ahrensburg, Deutschland). Eine ausführliche Darstellung des analytischen Verfahrens kann der Arbeit von MESSERSCHMIDT et al. (2000) entnommen werden.

5 Qualitätssicherung der angewandten Analysenverfahren

Zur Verringerung der Gefahr von Kontamination oder Verlusten wurden die Filterproben immer in Kunststoffbehältern transportiert. Ferner wurde darauf geachtet, dass die Aufbereitungs- und die analytischen Arbeiten in relativ staubfreien Räumen durchgeführt wurden.

Die Staubmassenbestimmung erfolgte grundsätzlich nach ausreichender Äquilibrierung der Proben (48 Stunden) auf Basis von Wiederholungswägungen im klimatisierten Wägeraum des HLUG.

Die regelmäßige Überprüfung von Labor- und Feldblindwerten war Bestandteil aller Laboruntersuchungen.

Die Bestimmung der Schwermetalle Pb, Cd, Mn, Ni, Zn, V, As, Sb, Cu, Cr, Co, Ce in Schwebstaubproben mittels ICP-SFMS wurde durch vergleichende Analysen mit TXRF und Graphitrohr-AAS an ausgewählten Proben ergänzt.

Bei den angewandten Analysenverfahren - Bestimmung von Palladium mittels TXRF und Platin und Rhodium mittels adsorptiver Voltammetrie - handelt es sich um international anerkannte Methoden, die durch Ring- und Vergleichsversuche sowie durch Standard-Messungen auf ihre Reproduzierbarkeit und Genauigkeit hin überprüft und validiert worden sind (u. a. ALT et al. 1993; LEON et al. 1997;

HOPPSTOCK & ALT 2000; MESSERSCHMIDT et al. 2000).

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Schwebstaub-Konzentrationen in der Luft

Die gemessenen Schwebstaub-Konzentrationen zeigen innerhalb des Messjahres eine starke Variationsbreite sowohl an den einzelnen Messpunkten selbst als auch zwischen den drei Stellen (Tab. 1). Der Jahresmittelwert liegt am Messpunkt Friedberger Landstraße (hohes Verkehrsaufkommen) bei $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die Tagesmittelwerte variieren an diesem Messpunkt zwischen 24 und $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nach der EU-Tochterraichtlinie zur Luftqualität (1999/30/EG vom 22. April 1999) liegt der Grenzwert einschließlich Toleranzmarge für den Beurteilungszeitraum eines Kalenderjahres für Partikel (Feinstaub (PM₁₀)) im Jahr 2002 bei $44,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der entsprechende Grenzwert für die Kurzzeitbelastung (24-h-Wert mit 35 zulässigen Überschreitungen pro Jahr) beträgt einschließlich Toleranzmarge im Jahr 2002 $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Der Feinstaubanteil (PM₁₀) an der Gesamtschwebstaub-Konzentration beträgt etwa 80 %. Nach einer entsprechenden Umrechnung ergibt sich für dieses Messprogramm ein Jahresmittelwert für PM₁₀ von knapp $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Messort an der Friedberger Landstraße. Dieser Jahresmittelwert liegt knapp unterhalb des oben inkl. Toleranzmarge angegebenen Grenzwertes für Feinstaub (PM₁₀) von $44,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (siehe auch Tabelle 1).

Aufgrund der geringen Probenzahl wird auf eine Beurteilung der Kurzzeitbelastung (Anzahl der Werte eines Jahres größer als $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bzw. inkl. Toleranzmarge größer als $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$) verzichtet.

Diese Informationen können den Ergebnissen des Luftmessnetzes Hessen (Lufthygienische Jahresberichte) entnommen werden.

Tab. 1: Jahresmittelwerte der Schwebstaubkonzentration an den drei Messorten

Basis: Messwerte im Zeitraum von August 2001 bis Juli 2002

Messort	Probenzahl	Min. - max. Einzelwert (TSP) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Jahresmittelwerte der Gesamtschwebstaubkonzentration (TSP) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	berechneter PM10-Jahresmittelwert $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Friedberger Landstraße; Straßenschlucht; hohes Verkehrsaufkommen	20	23,7 – 118,6	52,5	43,6
Georg-Voigt-Straße ; städtischer Hintergrund	20	10,9 – 79,7	29,5	24,5
Lohrberg; ländlicher Raum	20	9,4 – 70,8	25,5	21,2

Die Schwebstaub-Konzentrationen nehmen von der verkehrsreichen Straßenschlucht über den städtischen Hintergrund bis zum ländlichen Raum deutlich ab. Diese Verteilung deutet auf einen Zusammenhang zwischen Staubkonzentration und Kraftfahrzeugaufkommen hin. Die höchsten Konzentrationen wurden an der Friedberger Landstraße gemessen, deutlich geringere Konzentrationen beschreiben den städtischen Hintergrund, zum Lohrberg im ländlichen Raum nimmt die Schwebstaubbelastung dann nochmal um etwa 15 % ab (Tabelle 1).

Um der Frage nachzugehen, ob die Schwebstaub-Konzentration vom Wochentag abhängig ist, wurden die Messwerte nach Wochentagen geordnet. Auf jeden Wochentag entfallen drei Proben, auf Sonntage zwei Proben innerhalb des Zeitraums August 2001 bis Juli 2002. Die Ergebnisse zeigen an fast allen Stationen an Sonntagen die niedrigsten Gesamtschwebstaub-Konzentrationen. Auch dies belegt,

dass der Kfz-Verkehr eine bedeutende Staubquelle darstellt. Trotz der geringen Probenzahl bestätigt auch diese Untersuchung das Bild, das langjährig durch die Ergebnisse der PM10-Messungen im hessischen Luftmessnetz wie auch im Rahmen der hessischen Luftreinhaltepläne belegt wird. Detailliertere Ergebnisse zur Schwebstaub- bzw. PM10-Immissions-situation sind unter <http://www.hlug.de> in den verschiedenen Luftreinhalteplänen und den Lufthygienischen Jahresberichten des HLUg nachlesbar.

6.2 Schwermetalle im Schwebstaub

Die Ergebnisse der Schwermetallkonzentrationen (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, V, Zn einschließlich Ce) und der Platingruppenelemente Pt, Pd und Rh als Bestandteile des Gesamtschwebstaubes (TSP) sind für die drei Messorte in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Jahresmittelwerte der Schwermetallkonzentration an den drei Messorten

Basis: Messwerte im Zeitraum von August 2001 bis Juli 2002

Klammerwerte (minimaler Einzelwert - maximaler Einzelwert)

Einheit der Messwerte: ng/m³

Element	Friedberger Landstraße Straßenschlucht (32500 Kfz/d)	Georg-Voigt-Straße städtischer Hintergrund (500 bis 1000 Kfz/d)	Lohrberg ländlicher Raum
Pt	0,023 (0,002 – 0,055)	0,006 (0,001 – 0,017)	0,005 (0,001 – 0,027)
Pd	0,015 (<0,0001 – 0,044)	0,006 (<0,001 – 0,039)	0,003 (<0,001 – 0,011)
Rh	0,004 (<0,0001 – 0,012)	0,001 (<0,001 – 0,002)	0,001 (<0,001 – 0,003)
Sb	23,5 (4,8 – 49,3)	6,1 (2,3 – 14,7)	3,1 (1,2 – 6,6)
As	1,0 (0,4 – 1,9)	0,9 (0,3 – 3,8)	0,6 (0,2 – 1,4)
Pb	32,6 (9,1 – 161)	12,6 (6,0 – 29,6)	11,6 (4,5 – 26,6)
Cd	0,3 (0,1 – 0,6)	0,3 (0,1 – 0,6)	0,2 (0,1 – 0,9)
Ce	2,4 (1,0 – 4,9)	0,9 (0,3 – 2,1)	0,6 (0,1 – 1,3)
Cr	16,3 (4,3 – 37,2)	5,6 (2,2 – 12,3)	3,8 (0,6 – 6,6)
Co	0,8 (0,2 – 2,4)	0,4 (0,1 – 0,9)	0,2 (0,1 – 10,5)
Cu	101,5 (21,0 – 264)	24,6 (7,3 – 56,6)	12,4 (5,1 – 24,2)
Mn	35,3 (9,0 – 85,7)	4,9 (4,2 – 30,6)	9,7 (3,4 – 19,2)
Ni	7,3 (3,0 – 13,1)	3,2 (0,9 – 6,2)	2,6 (1,6 – 9,7)
V	3,2 (0,6 – 8,1)	2,3 (0,5 – 6,2)	1,5 (0,3 – 4,5)
Zn	105,6 (30,1 – 539,2)	40,2 (14,5 – 71,0)	28,7 (14,0 – 35,6)

An allen Messorten weisen die Konzentrationen der Schwermetalle eine recht große Schwankungsbreite auf. Bezogen auf die Massenkonzentration dominieren in erster Linie Zink und Kupfer gefolgt von Mangan, Blei und Antimon.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass am Messpunkt Friedberger Landstraße die Außenluft höher mit Schwermetallen belastet ist als der Bereich des städtischen Hintergrundes oder der ländliche Raum. Trotzdem werden der für Blei vorgeschriebene Grenzwert wie auch die für Arsen, Cadmium und Nickel in der 4. EU-

Tochterraichtlinie zur Luftqualität (2004/107/EG) und heute in der 22. BImSchV angegebenen Zielwerte auch in der Friedberger Landstraße deutlich eingehalten.

Die gemessenen Schwermetallkonzentrationen werden im Straßenraum der Friedberger Landstraße zu einem wesentlichen Teil durch verkehrsbedingte Emissionen bestimmt. Neben dem Verkehr spielen natürlich auch andere Quellen eine Rolle. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die potentiellen Quellen der gemessenen Elemente.

Tab. 3: Quellen für die untersuchten Elemente

Elemente	Kfz: Verbrennungs- motoren	Kfz: Katalysator	Kfz: Bremsen, Rei- fen- und Stra- ßenabrieb	Sonstige Ver- brennungs- prozesse, In- dustrieanlagen	Kfz: Korrosion
Pb	X*		X*	X	
Pt, Pd, Rh, Ce		X			X
Cd, Zn,					X
Sb, Cu, Zn, Cr, Ni, Co			X		
As, Cd, V				X	

*: - Deutliche Reduzierung des Bleigehaltes in Ottokraftstoffen seit den 70er Jahren (Benzinbleigesetz BzBIG)
 - EU-weites Verbot des Inverkehrbringens von verbleitem Ottokraftstoff ab 1. Januar 2000 (EU-Richtlinie 98/70 EG)
 - Restemissionen von Blei aus dem Kfz-Betrieb durch Abrieb von z. B. Bremsbelägen, Reifen, Fahrbahn (Umweltbundesamt, Texte 19/05)

Ein Schwerpunkt dieser Untersuchung lag in der Beantwortung der Frage, ob die Platingruppenelemente wie auch andere Emissionen aus den Ballungsräumen in signifi-

kanter Massenkonzentration in der Außenluft des Straßenraums anzutreffen sind und ob sie auf dem Luftpfad auch in das Umfeld der Quellgebiete transportiert werden.

Abb. 2: Jahresmittelwerte der Schwermetall-Konzentrationen im Raum Frankfurt am Main

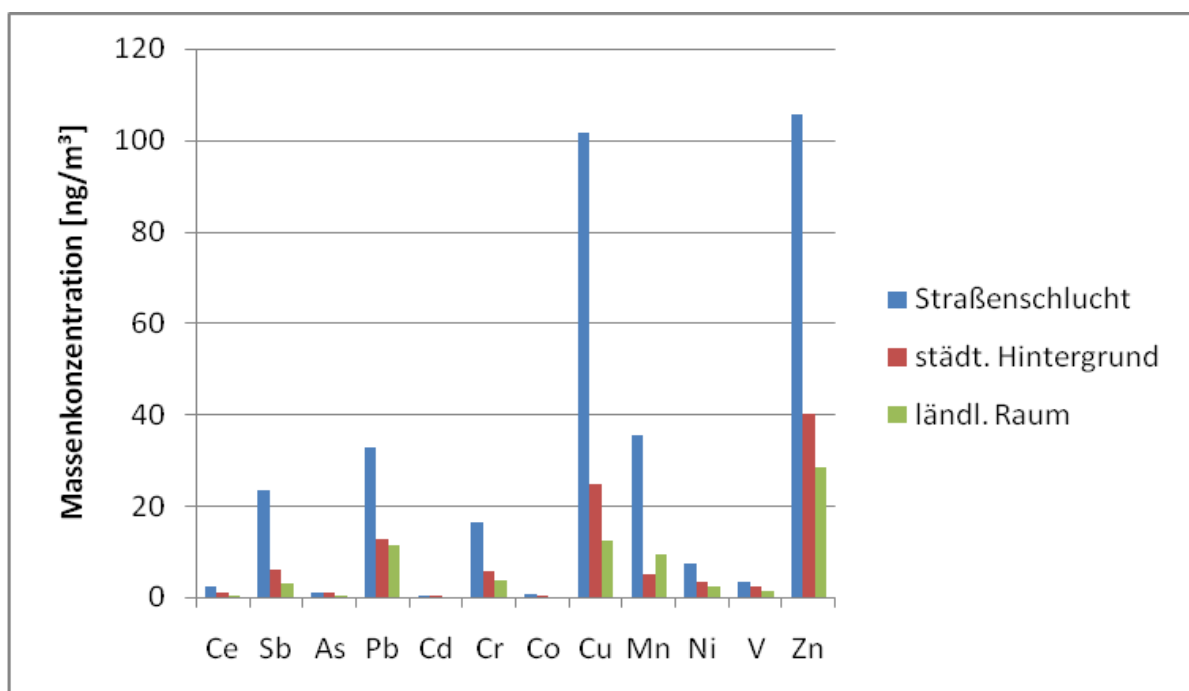
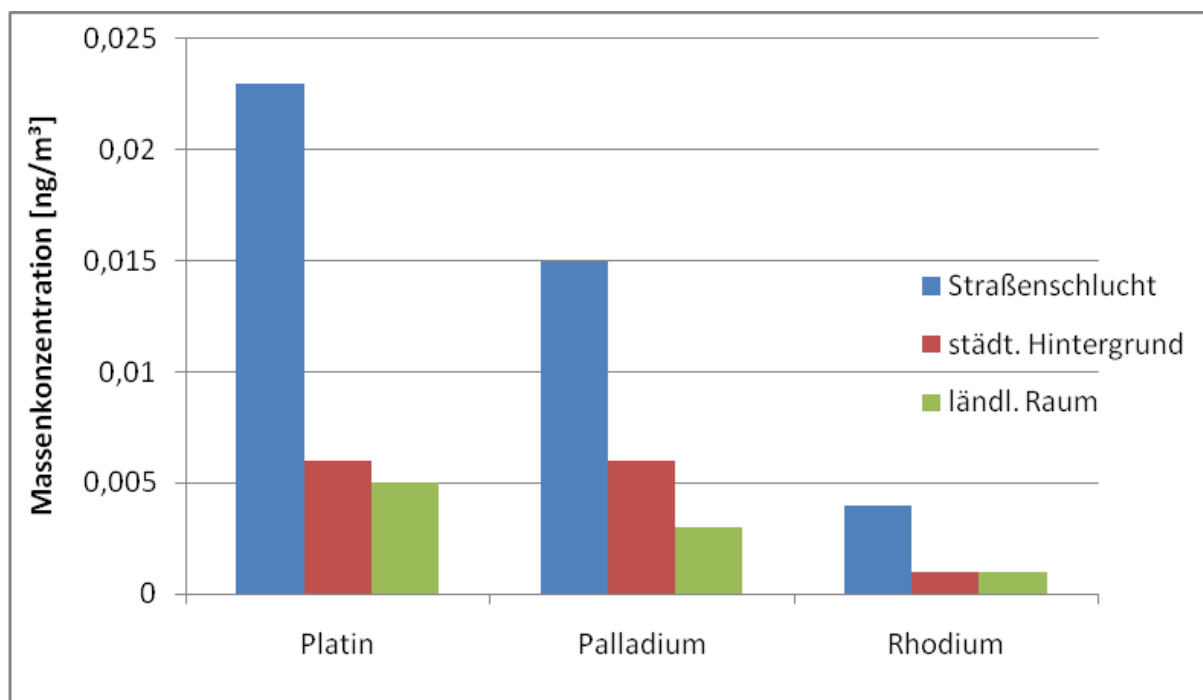


Abb. 3: Jahresmittelwerte der Konzentrationen der Platingruppenelemente im Raum Frankfurt am Main



Wie das Messprogramm zeigt, reichern sich die vom Kraftfahrzeugverkehr abgegebenen Elemente (die Katalysatorkomponenten Pt, Pd, Rh, Ce, aber auch die weiteren Schwermetalle Sb, Cu und Zn) als Bestandteile des Schwebstaubs (TSP) in der Außenluft einer Straßenschlucht mit hohem Verkehrsaufkommen wie der Friedberger Landstraße deutlich an (siehe auch die Abbildungen 2 und 3 sowie Tabelle 2).

Bis in den städtischen Hintergrund nehmen deren Massenkonzentrationen um etwa 60 bis 75 % ab. Sie erreichen schließlich im ländlichen Raum 10 bis 30 % des Ausgangswertes in der Straßenschlucht. Dieses Ergebnis zeigt, dass die „Katalysatormetalle“ sich ähnlich verhalten wie andere vom Kraftfahrzeug emittierte Schadstoffe und auch in das Umland von Straßen bzw. Ballungsräumen transportiert werden (siehe Abbildungen 2 und 3 sowie Tabelle 2).

Andere Komponenten, die überwiegend sonstigen Verbrennungsprozessen entstammen (z. B. As und Cd) verändern ihre

Außenluftkonzentration von der Straßenschlucht in den städtischen Hintergrund kaum und liegen im stadtnahen, ländlichen Raum immer noch bei 60 bis 70 % der im Stadtgebiet gemessenen Werte.

Ein interessantes Zusatzergebnis liefert die Mangankonzentration, die im städtischen Hintergrund nur noch 14 % der Massenkonzentration in der Straßenschlucht erreicht und im ländlichen Raum wieder auf 28 % des Ausgangswertes ansteigt. Bei diesem Element spielt im ländlichen Raum sicherlich die Aufwirbelung von Bodestaub eine nicht zu vernachlässigende Rolle (die geogene Mn-Konzentration in der Kontinentalkruste liegt bei 716 µg/g (WE-DEPOHL 1995)).

Die Platingruppenelemente (PGE) Pt, Pd, und Rh und auch Cer traten als umweltrelevante Metalle mit der Einführung des Autoabgaskatalysators Mitte der achtziger Jahre in Deutschland in Erscheinung. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass die PGE-Konzentrationen (Pt, Pd und

Rh) in der Luft an allen Messpunkten weit niedriger liegen als die der anderen Schwermetalle (Tabelle 2). Trotz der insgesamt niedrigen Konzentration ist allerdings seit der Einführung des Autoabgaskatalysators im Jahr 1986 in Deutschland ein kontinuierlicher Anstieg der PGE-Gehalte in der Luft zu beobachten (ZEREINI & ALT 2000, ZEREINI et al. 2001).

Wie oben erläutert, treten die höchsten Konzentrationen von Pt, Pd und Rh in der Luft ähnlich wie bei den anderen Schwermetallen in Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen auf. Im ländlichen Raum sind die PGE-Konzentrationen am niedrigsten. Bei dieser Verteilung dominiert Pt gefolgt von Pd und Rh (Abb. 3), wobei in manchen Proben die Pd-Konzentration höher ist als die von Pt. Eine ebenso verkehrsbezogene Abstufung zeigt Cer (Abb. 2).

Die Immissionen von Palladium standen erst nach der Einführung von Pd-haltigen Autoabgaskatalysatoren im Jahr 1993 im Mittelpunkt der Forschung. Deshalb liegen nur wenige Daten über die Pd-Konzentration in der Luft vor. Nach TILCH et al. (2000) lagen die Pd-Konzentrationen im Jahr 1997 in Berlin zwischen 0,2 und 14,6 pg/m^3 . In Göteborg betrug sie im Jahr 1999 zwischen 0,1-10 pg/m^3 (RAUCH et al. 2001), und in Rom lag sie im Jahr 1999 im Durchschnitt bei 69,5 pg/m^3 (PETRUCCI et al. 2000). Die Pd-Konzentrationen in der Luft, die in Frankfurt im Rahmen dieser Untersuchung im Jahr 2002 gemessen wurden, liegen zwar höher als in Berlin und Göteborg, aber noch deutlich niedriger als z. B. die in Rom ermittelte Pd-Belastung.

6.3 Größenfraktionierte Messung

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung des Schwebstaubs und seiner Inhaltsstoffe wurde gleichzeitig mit der Probe-

nahme des Gesamtschwebstaubs (TSP) auch eine größenfraktionierende Schwebstaubprobenahme mittels Andersenimpaktor (8 Stufen und ein „Backup-Filter“ mit der Fraktion $< 0,43 \mu\text{m}$) durchgeführt. In den verschiedenen Stufen des Sammlers scheiden sich Partikel folgender Größenklassen (Durchmesser) ab: > 9 ; 9,0 - 5,8; 5,8 - 4,7; 4,7 - 3,3; 3,3 - 2,1; 2,1 - 1,1; 1,1 - 0,63; 0,63 - 0,43 und $< 0,43 \mu\text{m}$ (Herstellerangaben).

6.3.1 Fraktionierter Schwebstaub

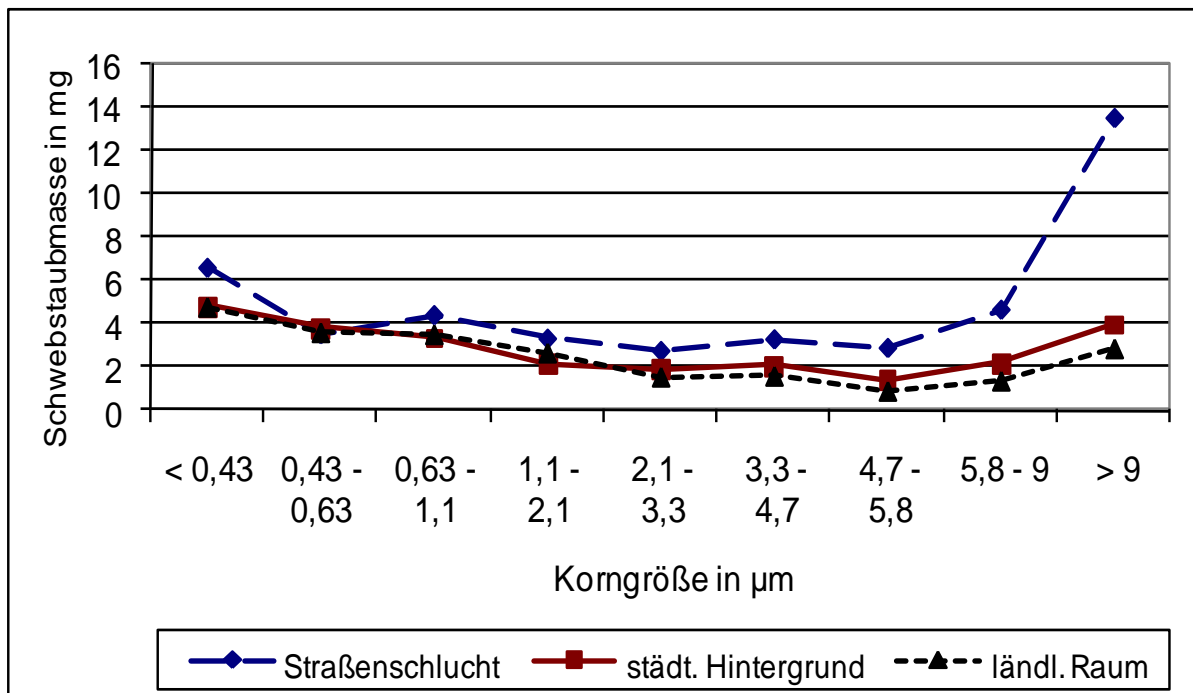
Die Untersuchungsergebnisse der Impaktorproben zeigen, dass in der Stadtluft die Partikel $> 2,1 \mu\text{m}$ dominieren (Abbildung 4); ihr Anteil an der Masse des Gesamtschwebstaubs (TSP) liegt im Mittel in der Friedberger Landstraße bei 60 % und der Anteil der kleineren Partikel ($< 2,1 \mu\text{m}$) bei 40 %. Der Anteil der Partikel $> 9 \mu\text{m}$ beträgt im Durchschnitt 30 %. Ursache hierfür könnte unter anderem auch die Aufwirbelung von Materialien auf der Fahrbahn durch den Kfz-Verkehr sein. Die Staubmassen, die an den einzelnen Impaktorstufen gesammelt wurden, variieren zwischen 1,5 und 18 mg.

Diese Staubmassen reichen aus, um für jede der einzelnen Stufen Staubanalysen auf Metalle durchzuführen.

Am Messpunkt in der Georg-Voigt-Straße (also im städtischen Hintergrund) überwiegen im Gegensatz zur verkehrsreichen Straßenschlucht die feinen Partikel $< 2,1 \mu\text{m}$. Sie betragen im Durchschnitt 55 %. Der Anteil des Schwebstaubs mit Partikeldurchmessern $> 9 \mu\text{m}$ erreicht dort im Durchschnitt 15 %. Die Staubmassen, die an den einzelnen Impaktorstufen gesammelt wurden, variieren zwischen 1 und 6,7 mg. Im ländlichen Raum überwiegen mit 63 % wiederum die feinen Fraktionen $< 2,1 \mu\text{m}$.

Im Vergleich zur Friedberger Landstraße ist die durchschnittliche Gesamtmasse an Schwebstaub an den beiden anderen Probenahmepunkten sehr gering.

Abb. 4: Durchschnittliche Partikelmasse in den unterschiedlichen Impaktorstufen



6.3.2 Schwermetalle im fraktionierten Schwebstaub

Ähnlich wie beim Gesamtschwebstaub (TSP) nehmen die Schwermetallkonzentrationen im Durchschnitt bei den Impaktorproben von der Straßenschlucht über den städtischen Hintergrund bis zum ländlichen Raum deutlich ab.

Die Verteilung der Schwermetalle in den verschiedenen Partikelgrößenklassen lässt sich in drei Gruppen einteilen. Bei Metallen wie As, Cd, Pb und V liegt der Hauptanteil im Durchschnitt in den feinen Fraktionen mit Korndurchmessern $< 2,1 \mu\text{m}$,

während die Elemente Ce, Cr, Co, Ni, Pt, Rh und Pd ihren Schwerpunkt im Bereich der Grobstaubpartikel mit Korngrößen $> 2,1 \mu\text{m}$ haben. Die Elemente Cu, Mn, Sb und Zn treten mit ihren höchsten Konzentrationen im mittleren Bereich der Impaktorstufen (Partikeldurchmesser von $1,1 \mu\text{m}$ bis $4,7 \mu\text{m}$) auf.

Die Konzentrationen der Schwermetalle im Bereich der feinen Partikelfraktionen verdienen besondere Aufmerksamkeit, da Feinstaubpartikel mit ihren Inhaltsstoffen tief in die Atemwege gelangen können.

7 Literatur

ALT, F.; BAMBAUER, A.; HOPPSTOCK, K.; MERGLER, B.; TÖLG, G. (1993): Platinum traces in airborne particulate matter. Determination of whole content, particle size distribution and soluble platinum; Fresenius J. Anal. Chem. 346, 693-696

BEYER, J.-M.; ZEREINI, F.; ARTELT, S.; URBAN, H. (1999): Platinkonzentrationen in Straßenstaubproben; in: Zereini, F. & Alt, F. (Hrsg.): Emissionen von Platinmetallen: Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz; Springer-Verlag, 131-146

DOMESLE, R. (1996): Katalysatortechnik; in: Abschlußpräsentation „Edelmetallemissionen“, GSF & BMBF (Eds), Hannover, 1996, 8-16

GIESHOFF, J. (2001): Der Autoabgaskatalysator: Zusammensetzung, Herstellung und Charakterisierung; in: Autoabgaskatalysatoren; Expert Verlag; Germany, 40-94

GOLWER, A.; ZEREINI, F. (1998): Einflüsse des Straßenverkehrs auf rezente Sedimente: Langzeituntersuchungen an einem Versickerbecken bei Frankfurt am Main; Geol. Jb. Hess. 126, 47-70

GOMEZ, B.; GOMEZ, M.; PALACIOS, M.A. (2000): Control of interferences in the determination of Pt, Pd and Rh in airborne particulate matter by inductively coupled plasma mass spectrometry; Anal. Chim. Acta 404, 285-294

GOMEZ, B.; GOMEZ, M.; SANCHEZ, J.L.; FERNANDEZ, R.; PALACIOS, M.A. (2001): Platinum and rhodium distribution in airborne particulate matter and road dust; Sci. Total Environ. 269, 131-144

GOMEZ, B.; PALACIOS, M.A.; GOMET, M.; SANCHEZ, J.L.; MORRISON, G.; RAUCH, S.; McLEOD, C.; MA, R.; CAROLI, S.; ALIMONTI, A.; PETRUCCI, F.; BOCCA, B.; SCHRAMMEL, P.; ZISCHKA, M.; PETTERSON, C.; WASS, U. (2002): Levels and risk assessment for humans and ecosystems of platinum-group elements in the airborne particles and road dust of some European cities; Sci. Total Environ. 299, 1-19

HEINRICHS, H. (1993): Die Wirkung von Aerosolkomponenten auf Böden und Gewässer industrieferner Standorte: eine geochemische Bilanzierung; Habilitationsschrift, Uni Göttingen, S.119

HELMERS, E. (1995): Platin-Emissionen aus KFZ-Abgaskatalysatoren - analytische Absicherung zeitlicher und räumlicher Trends durch Erfassung spezifischer Begleitelemente; Kurzreferat ANAKON 95 Schliersee

HILDEMAN, L. M.; MARKOWSKI, G. R.; CASS, G. R. (1991): Chemical composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol; Environ. Sci. Technol. 25, 744-759

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: Lufthygienische Jahresberichte 2001 bis 2007 (<http://www.hlug.de>)

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: Lufthygienische Jahresberichte 2006 und 2007, Teil II: Staub und Staubinhaltsstoffe (<http://www.hlug.de>)

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: Faltblatt: „Feinstaub (PM10), Eigenschaften - Quellen - gesundheitliche Bewertung - Immissionen“ (<http://www.hlug.de>)

HOPPSTOCK, K.; ALT, F. (2000): Voltammetric determination of ultratrace platinum and rhodium in biological and environmental samples; in: Zereini & Alt (Eds), Anthropogenic platinum group elements emissions; Springer Verlag, 145-152

KANITSAR, K.; KOELLENSPERGER, G.; HANN, S.; LIMBECK, A.; PUXBAUM, H.; STINGEDER, G. (2003): Determination of Pt, Pd and Rh by inductively coupled plasma sector field mass spectrometry (ICP-SFMS) in size-classified urban aerosol samples; J. Anal. At. Spectrom. 18, 239-246

LEON, C.; EMONS, H.; OSTAPCZUK, P.; HOPPSTOCK, K. (1997): Simultaneous ultratrace determination of platinum and rhodium by cathodic stripping voltammetry; Anal. Chim. Acta 356, 99-104

- MESSERSCHMIDT, J.; von BOHLEN, A.; ALT, F.; KLOCKENKÄMPER (2000): Separation and enrichment of palladium and gold in biological and environmental samples, adapted to the determination by total reflection X-ray fluorescence; *Analyst* 125, 397-399
- MEYER, I.; HEINRICH, J.; LIPPOLD, U. (1999): Factors affecting lead and cadmium levels in house dust in industrial areas of eastern Germany; *Sci. Tot. Environ.* 234, 25-36
- PETRUCCI, F.; BOCCA, B.; ALIMENTI, A.; CAROLI, S. (2000): Determination of Pd, Pt and Rh in airborne particulate and road dust by high-resolution ICP-MS: a preliminary investigation of the emission from automotive catalysts in the urban area of Rome; *J. Anal. At. Spectrom.* 15, 525-528
- PLEßOW, K.; HEINRICHS, H. (2001): Anthropogene Spurenelemente in Aerosolen industrie- und verkehrsferner Gebiete; in: *Umweltgeochemie in Wasser, Boden und Luft*; Gesellschaft für Umwelt-Geowissenschaften (Eds); Springer Verlag: New York, S. 205-223
- RAUCH, S.; HEMOND, H. F. (2003): Sediment-based evidence of platinum concentration changes in an urban lake near Boston, Massachusetts; *Environ. Sci. Technol.* 37, 3283-3288
- RAUCH, S.; LU, M.; MORRISON, G. (2001): Heterogeneity of platinum group metals in airborne particles; *Environ. Sci. Technol.* 35, 595-599
- Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 1998 über die Qualität von Otto- und Dieseldieselkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 93/12/EWG des Rates
- Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft (1. Tochterrichtlinie)
- Richtlinie 2004/107/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Dezember 2004 über Arsen, Kadmium, Quecksilber, Nickel und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in der Luft (4. Tochterrichtlinie)
- SCHÄFER, J.; ECKHARDT, J.-D.; BERNER, Z.; STÜBEN, D. (1999): Time-dependent increase of traffic-emitted platinum-group elements (PGE) in different environmental compartments; *Environ. Sci. Technol.* 33, 3166-3170
- SCHIERL, R. (2000): Environmental monitoring of platinum in air and urine; *Microchemical J.* 67, 245-248
- TILCH, J.; SCHUSTER, M.; SCHWARZER, M. (2000): Determination of palladium in airborne particulate matter in a German city; *Fresenius J. Anal. Chem.* 367, 450-453
- Umweltbundesamt, Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden, Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen, Texte 19/05
- Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. Juni 2007; 22. BImSchV, (BGBl. I S. 1006)
- WEDEPÖHL, K. H. (1995): The composition of the continental crust; *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 1217-1232
- ZEREINI, F.; Alt, F. (1999): Emissionen von Platinmetallen: Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz; S. 327, Springer-Verlag, ISBN 3-540-64982-4
- ZEREINI, F.; Alt, F. (Hrsg.) (2000): Anthropogenic Platinum-Group Element Emissions: Their Impact on Man and Environment; S. 308, Springer-Verlag, ISBN 3-540-66472-6
- ZEREINI, F.; Alt, F. (Eds.) (2006): Palladium Emissions in the Environment: Analytical Methods, Environmental Assessment and Health Effects S. 639; Springer-Verlag, ISBN 10 3-540-29219-5
- ZEREINI, F.; Alt, F.; MESSERSCHMIDT, J.; BOHLEN, A.; LIEBL, K.; PÜTTMANN, W. (2004): Concentration and distribution of platinum group elements (Pt, Pd, Rh) in airborne particulate matter in Frankfurt am Main, Germany; *Environ. Sci. Technol.* 38, 1686-1692

ZEREINI, F.; ALT, F.; MESSERSCHMIDT, J.; WISEMAN, C.; FELDMANN, I.; von BOHLEN, A.; MÜLLER, J.; LIEBL, K.; PÜTTMANN, W. (2005): Concentration and Distribution of Heavy Metals in Urban Airborne Particulate Matter in Frankfurt am Main, Germany; Environ. Sci. Technol. 39, 2983-2989

ZEREINI, F.; SKERSTUPP, B.; RANKENBURG, K.; DIRKSEN, F.; BEYER, J.-M.; CLAUS, T.; URBAN, H. (2001): Anthropogenic emission of platinum-group elements (Pt, Pd and Rh) into the environment: concentration, distribution and geochemical behaviour in soils; JSS-J. Soils & Sediments 1(1), 44-49

ZEREINI, F.; WISEMAN, C.; ALT, F.; MESSERSCHMIDT, J.; MÜLLER, J.; URBAN, H. (2001): Platinum and Rhodium Concentrations in Airborne Particulate Matter in Germany from 1988 to 1998; Environ. Sci. Technol. 35, 1996-2000

ZEREINI, F.; WISEMAN, C.; PÜTTMANN, W. (2007): Changes in palladium, platinum and rhodium concentrations and their spatial distribution in soils along a major highway in Germany from 1994 to 2004; Environ. Sci. Technol. 41, 451-456

Bearbeiter:

Prof. Dr. phil. nat. Fathi Zereini,
Institut für Atmosphäre und Umwelt
J. W. Goethe-Universität, Frankfurt am
Main
Altenhöferallee 1
D-60438 Frankfurt am Main
E-Mail: zereini@iau.uni-frankfurt.de

Dipl.-Met. K. Liebl,
Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie

**Aufbau, technische Betreuung
der Messstellen:**

T. A. Günter Cassens,
Dipl.-Ing. Rolf Paul,
Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie

Herausgeber:

Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie
Postfach 3209
65022 Wiesbaden
Telefon: 0611/6939-0
Telefax: 0611/6939-555

Internet: www.hlug.de

Vertrieb: vertrieb@hlug.de

Januar 2009