

Geo- und Klimaforschung

## Im Abgas der Großstadt – Untersuchung der Emissionen einer Megacity

Drewnick, Frank

Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz  
Abteilung – Partikelchemie

Korrespondierender Autor  
E-Mail: [frank.drewnick@mpic.de](mailto:frank.drewnick@mpic.de)

---

### Zusammenfassung

Eine zunehmende Zahl an Menschen lebt in den immer größer werdenden Städten dieser Welt. Damit tragen diese Großstädte einen rapide ansteigenden Anteil zu den globalen anthropogenen Emissionen von Schadstoffen bei. Zur detaillierten Untersuchung der partikel- und gasförmigen Substanzen in der Atmosphäre in und in der Umgebung einer Großstadt wurden umfangreiche Messungen im Großraum Paris durchgeführt. Um die Umwandlungs- und Alterungsprozesse zu erforschen, wurden modernste Messinstrumente in einer Bodenmessstation, auf einem Messflugzeug und in einem mobilen Aerosolforschungslabor eingesetzt.

### Abstract

*An increasing number of people are living in the growing cities of this world. This results in a rapid growth of the fraction of anthropogenic emissions of pollutants from such megacities. For a detailed investigation of the particulate and gaseous substances in the atmosphere in such a city and in its vicinity, extensive measurements were performed in the metropolitan area of Paris. The study of the transformation and aging processes of such species was done using modern instrumentation in a ground measurement station, on a research aircraft, and on a mobile laboratory for aerosol research.*

Immer mehr Menschen drängen sich in den Ballungsräumen der Welt. Im Jahre 2008 lebte erstmals in der Geschichte der Menschheit über die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten. Diese Städte werden immer größer: Zurzeit existieren 20 Städte mit mehr als 10 Millionen Einwohnern, und es ist davon auszugehen, dass diese Zahl in den kommenden Jahren noch deutlich ansteigen wird. Metropolen mit mehr als 5 Millionen Einwohnern bezeichnet man als *Megacity*. Die rasant wachsende Bevölkerung mit Lebensmitteln, sauberem Trinkwasser, medizinischen Grunddiensten oder Transportmitteln zu versorgen, stellt die Kommunen vor schier unlösbare Aufgaben. Das gleiche gilt für die Entsorgung von Müll, Abwasser und Abgasen. Dies führt vor allem in den Schwellenländern zu teilweise verheerenden Lebensbedingungen in solchen Großstädten.

Aber auch die Großstädte der Industrienationen sind durch häufig sehr schlechte Luftqualität gekennzeichnet. Ein erheblicher Teil der nationalen Wertschöpfung findet in diesen Ballungsräumen statt: In London werden 20% des britischen und in Paris sogar 28% des französischen Bruttoinlandsprodukts generiert. Diese industriellen Aktivitäten erzeugen gemeinsam mit den Emissionen jedes Einzelnen durch z. B. Transport oder Heizung große Mengen an Schadstoffen, die in die Atmosphäre gelangen. Megacities können daher als ausgedehnte, intensive Flächenquellen für eine Vielzahl an Spurengasen und Aerosolpartikel angesehen werden.

Welchen Einfluss haben die Emissionen einer solchen Großstadt auf die lokale, regionale oder gar globale Luftqualität? Wie entwickeln sich die chemischen Substanzen auf ihrem Weg über das Land, wie bilden sich hieraus neue Aerosolpartikel und wie verändern diese sich anschließend? Wie wirkt dieser „Cocktail“ aus Partikeln und Spurengasen auf das weltweite Klima? Eine ganze Reihe grundlegender Fragen in diesem Bereich ist bisher weitgehend unbeantwortet. Daher hat sich die Abteilung Partikelchemie – eine gemeinsame Einrichtung des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz und des Instituts für Physik der Atmosphäre der Universität Mainz – auf den Weg in eine europäische Großstadt gemacht, um diese Prozesse zu untersuchen.

Als Modell-Metropole wurde Paris gewählt. Während die Stadt Paris selbst „nur“ etwas über 2 Millionen Einwohner besitzt, qualifiziert sich der Großraum Paris mit über 11 Millionen Menschen in einem Umkreis von ca. 20 km um den Stadtkern spielend als Megacity. Ein entscheidender Vorteil dieses Ballungsraums für solche Untersuchungen ist seine Lage inmitten sehr ländlicher Regionen und in einem flachen Terrain. Hierdurch ist es gut möglich, die Emissionen von Paris weitgehend unbeeinflusst von umliegenden Quellen oder durch eine komplizierte Topographie zu untersuchen. Parallel zu einer Vielzahl von Atmosphären-Messungen in und um Paris im Rahmen des EU-Forschungsprojekts MEGAPOLI (*Megacities: Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation*) führten die Wissenschaftler der Partikelchemie im Juli 2009 ebenfalls umfangreiche Aerosol- und Spurengasmessungen auf mehreren Plattformen in dieser Gegend durch.



**Abb. 1:** Messstation im Nordosten von Paris mit Messcontainer und mobilem Aerosolforschungslabor MoLa (links). Moderne Messinstrumente (rechts) erlauben eine umfassende Untersuchung des atmosphärischen Aerosols.

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Als Basis für diese Aktivitäten errichteten die Wissenschaftler eine Messstation am Rande eines Golfplatzes in einem Vorort im Nordosten von Paris. In einem Messcontainer betrieben sie modernste Instrumente zur physikalischen und chemischen Charakterisierung der Aerosolpartikel in einem Größenbereich von wenigen Nanometern (millionstel Millimeter) bis zu einigen zehn Mikrometern mit hoher zeitlicher Auflösung (**Abb. 1**). Weitere Messgeräte lieferten Aufschluss über die Konzentrationen der wichtigsten Spurengase sowie über die jeweilige meteorologische Situation. Mit diesem Aufbau untersuchten sie über den gesamten Juli 2009 die Luftqualität – insbesondere die Partikelphase – kontinuierlich und intensiv. Da der gewählte Standort bei den vorherrschenden Südwestwinden meist auf der windabgewandten Seite von Paris lag, konnten sie mit dieser Messstation die Emissionen der Großstadt unmittelbar vor dem Verlassen des Ballungsraums erforschen.

Mit einem ähnlichen Park an Messgeräten an Bord des mobilen Aerosolforschungslabors (MoLa) wurden weitgehend die gleichen Partikel- und Spurengaseigenschaften wie in dem stationären Messcontainer gemessen. MoLa ist eine vollständig autonome Messplattform, die die Abteilung Partikelchemie in den letzten Jahren entwickelt hat. Das Labor basiert auf einem Ford Transit Kleintransporter, ausgestattet mit Instrumenten zur zeitlich hochaufgelösten Analyse von Partikelkonzentrationen und Partikelgrößenverteilungen, zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Partikel sowie zur Messung einer Reihe von Spurengasen. Ein GPS-System registriert zu jedem Zeitpunkt Position und Geschwindigkeit des Fahrzeugs, eine kompakte Wetterstation erfasst die aktuelle Wetter-situation. Mithilfe dieses Aufbaus wurde die Abluftfahne des Großraums Paris an verschiedenen Stellen außerhalb der Stadt untersucht.

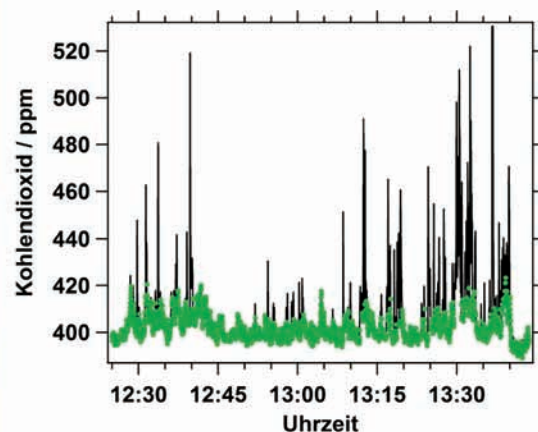
Zusätzlich zu den Aktivitäten im Nordosten der Stadt betrieben Wissenschaftler der Partikelchemie ein neuartiges, selbst entwickeltes Aerosolmassenspektrometer auf dem französischen Messflugzeug ATR-42 (**Abb. 2**, links). Mit diesem Instrument ist es möglich, die chemische Zusammensetzung einzelner Aerosolpartikel zu bestimmen und damit unterschiedliche Partikeltypen zu identifizieren. Während der Messflüge, die zickzackförmig in geringer Flughöhe durch die Emissionswolke von Paris verliefen, wurden hiermit die Unterschiede der Aerosolpartikel in der Emissionswolke und im Hintergrundaerosol untersucht. Bei einem großen Teil der identifizierten Partikeltypen handelte es sich um organisches Material, Ruß und Partikel aus Biomasseverbrennung. Um eine gute Vergleichbarkeit der Messungen im Flugzeug und auf den verschiedenen bodengebundenen Messplattformen zu gewährleisten, fanden während der Messkampagne mehrere Vergleichsmessungen mithilfe der verschiedenen beteiligten mobilen Messlabore am selben Ort statt (**Abb. 2**, rechts).



**Abb. 2:** Einzelpartikel-Aerosolmassenspektrometer im Flugzeug (links). Vergleichsmessung der Messinstrumente an Bord des französischen Forschungsflugzeugs ATR-42 und der verschiedenen an der Messkampagne beteiligten Messfahrzeuge. Links, das Mobile Labor (MoLa) der Partikelchemie (rechts).

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

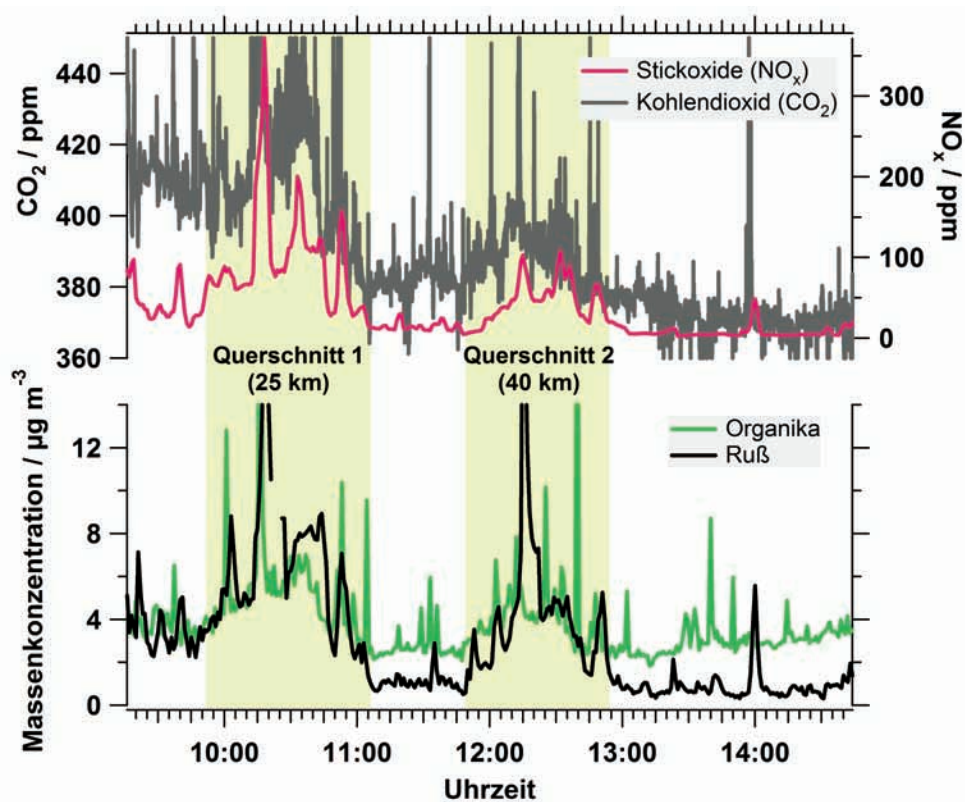
Um das Potenzial des mobilen Aerosolforschungslabors zur Untersuchung der Emissionen aus der Großstadt optimal auszuschöpfen, entwickelten die Wissenschaftler verschiedene Strategien. Bei mobilen Messungen, also Untersuchung der Partikel und Spurengase während der Fahrt, setzen sie die bordeigene Stromversorgung ein. Die Umgebungsluft wird bei solchen Messfahrten durch eine Probenmesonde über dem Fahrersitz eingesaugt, die ebenso wie das gesamte Luft-Transportsystem im Fahrzeug für geringe Partikelverluste optimiert ist. Um repräsentative Informationen über die Aerosolzusammensetzung fernab der Großstadt zu erhalten, müssen Kontaminationen der Messungen durch lokale Quellen wie z. B. Industriebetriebe oder vorausfahrende Fahrzeuge vermieden werden. Hierzu planten sie die Fahrtrouten vorwiegend über wenig befahrene Straßen und kleine Dörfer (**Abb. 3**, links). Trotz der sehr ländlichen Gebiete rund um den Großraum Paris lassen sich jedoch Verunreinigungen der Messungen nicht vollständig vermeiden. Mit selbst entwickelten statistischen Methoden können solche lokal beeinflussten Messwerte identifiziert und nachträglich eliminiert werden (**Abb. 3**, rechts). Die bearbeiteten Datensätze spiegeln dann die weitgehend unbeeinflussten Aerosol- und Spurengaszusammensetzungen der aus der Metropole herantransportierten Abgaswolke wider.



**Abb. 3:** Planung von Routen für mobile Messfahrten im Feld (links). Rechts: Identifizierung und Eliminierung kontaminierter Messdaten (schwarz) aus einer Messfahrt.

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Zur Untersuchung der Abluftwolke aus Paris wurden Messfahrten mit unterschiedlicher Zielsetzung durchgeführt: Während der Fahrten, die entlang der Ausbreitungsrichtung der Emissionswolke radial aus der Stadt hinaus führten, untersuchten die Wissenschaftler die zunehmende Verdünnung und Veränderung der Schadstoffe. Ein wesentliches Ziel dieses Ansatzes ist es, die Umwandlungsprozesse organischer Aerosolbestandteile in der Atmosphäre zu erforschen. Um die Ausbreitungsvorgänge zu analysieren, führten die Fahrten dagegen nahezu kreisförmig um die Stadt, quer durch die Abluftwolke. Hierbei können die Forscher einen Querschnitt durch die Emissionswolke messen, der mit demselben Messaufbau zusätzlich zu den Informationen zur Ausdehnung der Wolke direkt auch eine Messung des Aerosolhintergrunds, also der nicht durch die Großstadt beeinflussten Luftmassen ermöglicht. In **Abbildung 4** sind Messdaten einer solchen Fahrt gezeigt, bei der die Emissionswolke zweimal, 25 und 40 km vom Stadtzentrum entfernt, analysiert wurde. Deutlich sind die beiden Durchquerungen der Abgaswolke sowie die Abnahme der Konzentrationen mit größerem Abstand von der Stadt zu erkennen.

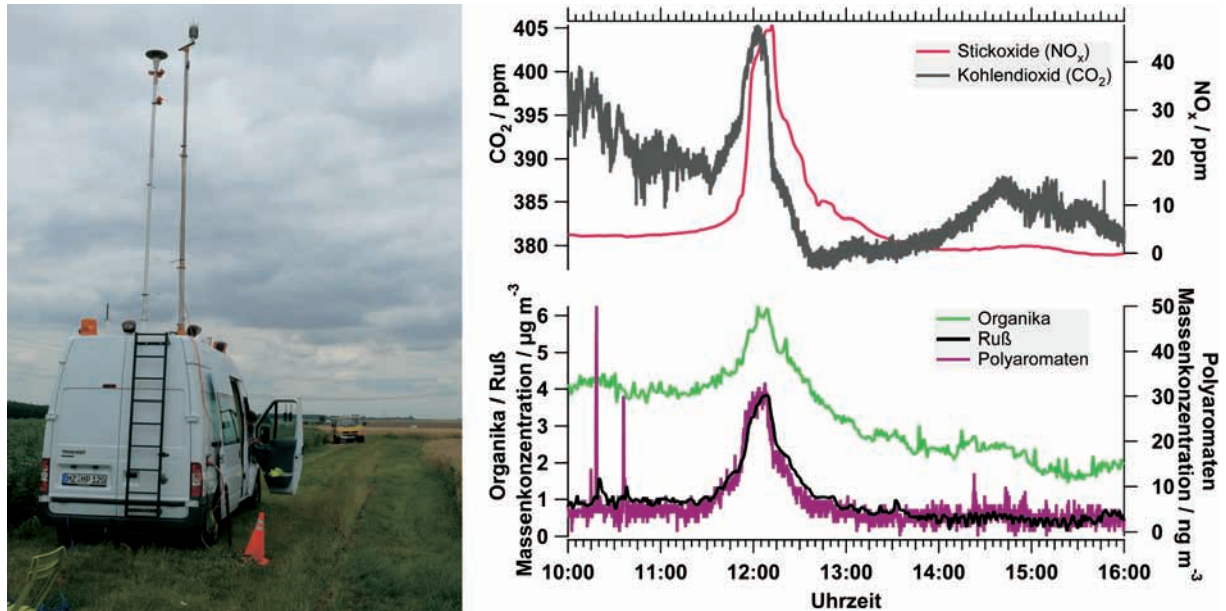


**Abb. 4:** Querschnitts-Messungen durch die Abluftwolke (gelbe Bereiche) von Paris in zwei unterschiedlichen Entfernungen von der Stadt – oben sind die Messungen zweier Spurengaskomponenten, unten die verschiedener Partikelkomponenten dargestellt.

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Für die Planung der mobilen Messungen ist eine möglichst genaue Kenntnis der Ausbreitungsrichtung der Emissionen aus der Stadt notwendig. Um die Fahrtrouten oder die Standorte für stationäre Messungen mit dem mobilen Aerosolforschungslabor festzulegen, verwendeten die Wissenschaftler daher Luftqualitäts-Vorhersagen des *Prev'Air* Systems. *Prev'Air* ist eine Initiative des französischen Ministeriums für Umwelt, Entwicklung und Raumplanung, die in Kooperation mit Forschungseinrichtungen und dem französischen Wetterdienst regelmäßig Informationen und Vorhersagen über Schadstoffverteilungen auf Basis eines Transport- und Chemiemodells bereitstellt. Aufgrund solcher Vorhersagekarten wurde auch die dritte Messvariante des MoLa geplant: stationäre Messungen innerhalb der

Ablufffahne. Um weitestgehende Unabhängigkeit und damit die Freiheit zu gewährleisten, an optimal geeigneten Standorten messen zu können, wurde auch hier auf eine Stromversorgung aus dem Leitungsnetz verzichtet. Zur Vermeidung der Kontamination mit eigenen Abgasen wurden diese Messungen mit einem Begleitfahrzeug durchgeführt, das einen Stromgenerator mitführte und ca. 50–100 m windabwärts des Messlabors geparkt wurde (Abb. 5, links).



**Abb. 5:** Stationäre Messung mit dem Mobil-Labor und Begleitfahrzeug (links). Der Durchgang der Emissionswolke bei drehendem Wind (rechts) ist deutlich in den Spurengas- (oben) und Partikelkonzentrationen (unten) zu erkennen.

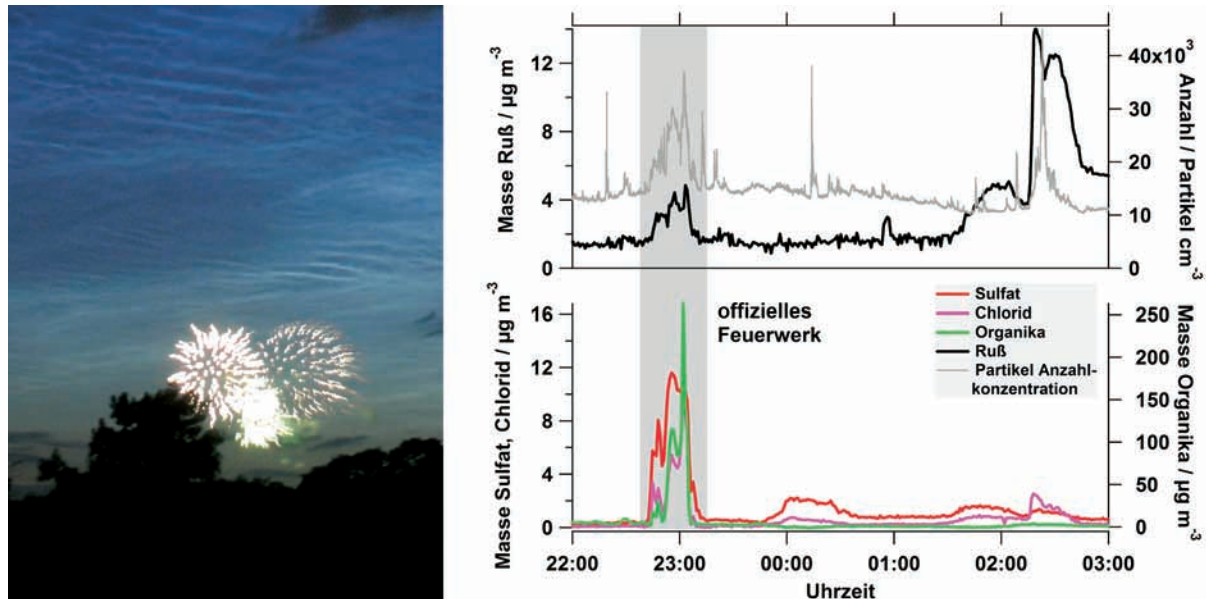
Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Bei solchen stationären Messungen kann an einer repräsentativen und von lokalen Quellen weitgehend unbeeinflussten Stelle die Emissionswolke über mehrere Stunden untersucht werden und so auch eine zeitliche Änderung im Laufe eines Tages analysiert werden. Im Falle einer Änderung der Windrichtung kann auch hier eine Art Querschnitt durch die Emissionswolke gemessen sowie die Messung der Hintergrundkonzentration durchgeführt werden (Abb. 5, rechts).

In den insgesamt 14 stationären und 10 mobilen Messungen mit dem Mobil-Labor kann die Emissionswolke aus Paris trotz vielfältiger lokaler Einflüsse klar erkannt werden. Mit zunehmendem Abstand zur Stadt nehmen die Konzentrationen erwartungsgemäß ab. Ein interessantes Ergebnis ist, dass in der Abgaswolke eine deutlich vom Hintergrund verschiedene chemische Zusammensetzung der organischen Aerosolbestandteile zu finden ist. Der Anteil kohlenwasserstoffartiger, organischer Komponenten ist in der Abgaswolke wesentlich größer, während der Anteil oxidierter, gealterter Komponenten im Hintergrundaerosol überwiegt. Eine eingehende Untersuchung des organischen Partikelanteils in unterschiedlichen Entfernungen von der Emissionsquelle, also der Großstadt, wird weitere Informationen über die Umwandlungs- und Alterungsprozesse organischer Substanzen liefern.

Die stationären Messungen mit dem Messcontainer lieferten einen kontinuierlichen und detaillierten Datensatz über die Partikel- und Spurengasparameter während des Monats Juli. Hieraus lassen sich direkte Aussagen über die zeitliche Variabilität der atmosphärischen Zusammensetzung im Tages- und Wochengang ziehen. Durch Vergleich mit den Daten der Messstationen aus dem MEGAPOLI-

Projekt in der Stadtmitte und im Südwesten der Metropole wird der Beitrag des Großraums Paris zur lokalen Luftqualität sowie dessen Variabilität deutlich. Ein solcher lokaler Beitrag wurde in der Nacht zum 14. Juli, dem französischen Nationalfeiertag, gemessen: In der näheren Umgebung der Messstation fand am Abend des 13. Juli ein Feuerwerk der örtlichen Gemeinde statt. Deutlich sind in den Aerosol- und Spurengasdaten die schlagartigen Anstiege der Konzentrationen verschiedener Atmosphärenbestandteile zu erkennen (**Abb. 6**). Später in der Nacht findet man deutlich erhöhte Ruß- und Partikelanzahl-Konzentrationen. Hierbei handelt es sich vermutlich nicht um ein weiteres Feuerwerk, sondern um das Ergebnis der „traditionellen“ nächtlichen Randalen, der in dieser Nacht allein im Großraum Paris 317 Autos zum Opfer fielen.



**Abb. 6:** Feuerwerk zum Nationalfeiertag in der Umgebung der Messstation. Neben den Emissionen des Feuerwerks zwischen 22.30 Uhr und 23.15 Uhr wurden später in der Nacht auch erhöhte Rußkonzentrationen, möglicherweise von angezündeten Autos, gemessen.

Urheber: Max-Planck-Institut für Chemie

Der umfangreiche Datensatz, der im vergangenen Sommer in Paris gewonnen wurde, wird zurzeit detailliert ausgewertet. Insbesondere der Vergleich der Ergebnisse von den verschiedenen Messstationen in der Stadt und von den an der Messkampagne beteiligten mobilen Laboren wird weiteren Aufschluss über den Beitrag des Großraums Paris zur lokalen und regionalen Luftverschmutzung liefern. Vor allem die Messungen in unterschiedlichen Abständen zur Quelle liefern neue Erkenntnisse über die Alterungs- und Umwandlungsprozesse des atmosphärischen Aerosols nach seiner Emission oder Entstehung aus Vorläufergasen. Zur weiteren Untersuchung, inwiefern unterschiedliche meteorologische Bedingungen diese Vorgänge beeinflussen, fand im Januar und Februar 2010 eine weitere, weitgehend gleichartige Messkampagne am selben Ort statt.

An dieser Stelle sei ausdrücklich den Organisatoren des MEGAPOLI-Projekts und der dazugehörigen Messkampagne, Mark Lawrence und Matthias Beekmann, für die Unterstützung in der Durchführung der hier vorgestellten Messungen gedankt.