



Partikelanzahl und -größenverteilung in der Stadt Zürich

Messungen an unterschiedlichen belasteten
Messorten in und um die Stadt Zürich

MESSBERICHT

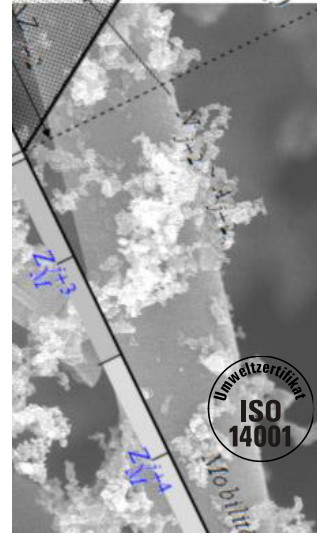
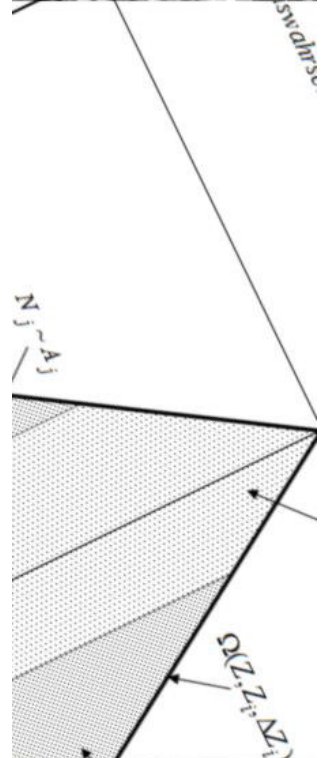
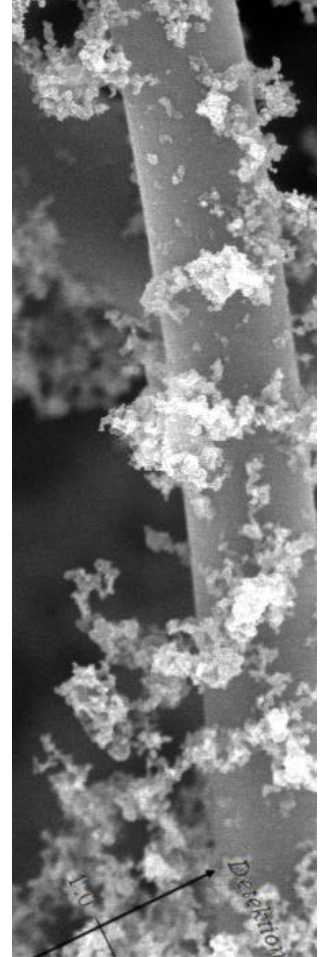
Bericht Nr. 20120229

Verfasser/in:

Jürg Brunner, Fachbereichsleiter Labor

Zürich, Dezember 2011

Gesundheits- und Umweltdepartement



Impressum

Herausgeberin

Stadt Zürich

Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich UGZ

Abteilung Umwelt
Fachbereich Labor
Walchestrasse 31
8021 Zürich

www.stadt-zuerich.ch/luft

Sachbearbeitung

Jürg Brunner

Susanne Schlatter

Thomas von Allmen

Markus Scheller

Noël Rederlechner

INHALTSVERZEICHNIS

1	Zusammenfassung.....	1
2	Einleitung	1
3	Glossar & Begriffe	7
4	Messkonzept.....	8
5	Instrumentierung	9
6	Auswertungen	11
7	Literatur.....	21
	Anhang	24

1 Zusammenfassung

Das Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG) [1] hat den Schutz des Menschen und seiner Umwelt zum Ziel. Es sieht ein zweistufiges Vorgehen vor, welches einerseits Emissionsbegrenzungen an der Quelle und Immissionsgrenzwerte und Anforderungen an Immissionsgrenzwerte für schädliche Einwirkungen beinhaltet. Dabei wird auch Russ als Luftverunreinigung aufgeführt. Entsprechend führt die schweizerische Luftreinhalte-Verordnung Dieseleruss in der Liste der krebserzeugenden Substanzen [2]. Die eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) beziffert das von Russ ausgehende Gesundheitsrisiko für die Bevölkerung als 100-fach über einem USG-konformen Risiko und bezeichnet einen zusätzlichen Immissionsgrenzwert für feinste Verbrennungsaerosole als wünschenswert und die Reduktion der Russ-Immissionen als dringend notwendig [3].

Bei Partikeln in der Aussenluft im Grössenbereich von 8 bis 320 nm handelt es sich in erster Linie um Russpartikel aus Verbrennungsprozessen. Partikel dieser Grössenordnung dringen tief in den menschlichen Atemtrakt ein und können nur langsam oder teilweise vom Körper gar nicht mehr ausgeschieden werden. Sie können in den Blutkreislauf oder ins Zentralnervensystem gelangen und sich in Organen akkumulieren. Neue Forschungsarbeiten zeigen zudem einen direkten Zusammenhang zwischen der Exposition durch Dieseleruss und direkten gesundheitlichen Auswirkungen.

Partikelmessungen in der Aussenluft sind im Gegensatz zu Emissionsmessungen von Partikeln ein eher junges Gebiet der Immissionsmesstechnik. Erst in den letzten Jahren wurden vermehrt Immissionsmessungen der Partikelanzahl und Grössenverteilung durchgeführt. Dabei fällt in erster Linie die Bandbreite der Belastung durch die Zahl der Partikel auf. So kann die Belastung an stark verkehrsexponierten Messorten mit hohem Schwerverkehrsanteil um ein Vielfaches höher sein als in einem unbelasteten Ort. Die Bandbreite der Belastungen ist deutlich grösser als dies bei Feinstaub PM₁₀ der Fall ist.

Die Messungen zeigen, dass insbesondere bei den Nanopartikeln ein hohes Verbesserungspotential besteht. Die Einführung einer generellen Partikelfilterpflicht für dieselbetriebene Motoren (optimal begleitet von DeNO_x-Systemen) würde die Problematik, insbesondere im Strassenraum oder bei hohen Schwerverkehrsanteilen deutlich entschärfen können.

2 Einleitung

In der Schweiz hat der Anteil neu in Verkehr gesetzter Diesel-Personenwagen ab 1999 rasant zugenommen (Abb. 1). Diese Entwicklung hat mehrere Hintergründe. Einerseits wurden sie von Automobilherstellern und Importeuren gezielt als besonders umweltfreundlich, mit geringerem Treibstoffverbrauch und entsprechend tieferen Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen angepriesen. Andererseits bestanden Absichten von politischer Seite, zur Minderung der CO₂-Emissionen im Verkehrsbereich neben Gastreibstoffen auch Diesel steuerlich zu begünstigen [4], welche in der Folge jedoch nicht umgesetzt wurden.

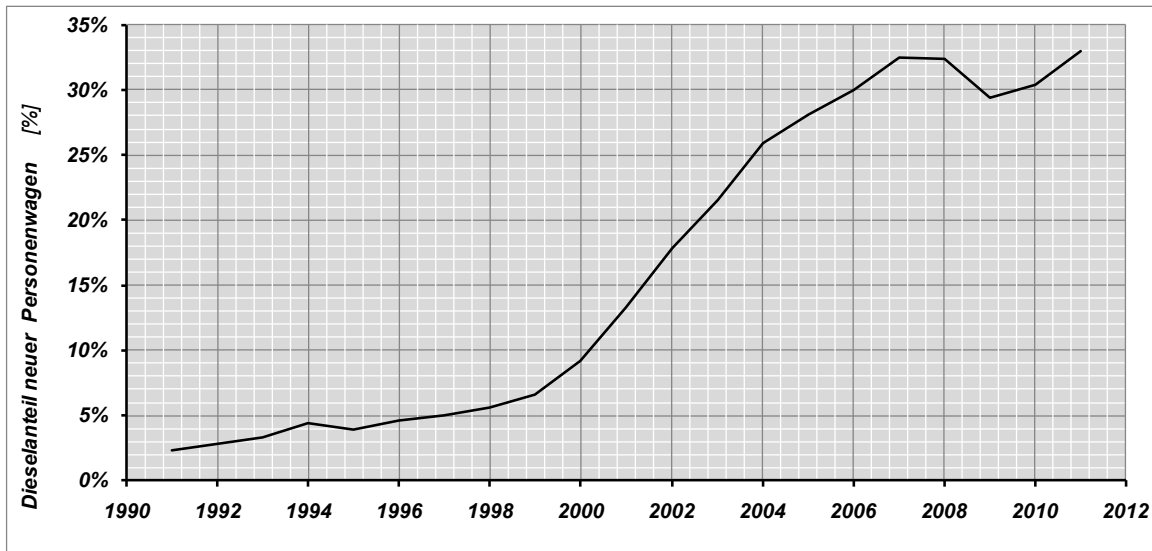


Abb. 1 ansteigender Dieselanteil der neu in Verkehr gesetzten Personenkraftwagen gemäss Auto-Schweiz [5] von 1991 bis 2011

Dabei geriet die Tatsache, dass ein Dieselfahrzeug ohne Partikelfilter ein Vielfaches der Partikel-Emission eines Benzinfahrzeugs aufweist, in den Hintergrund (Abb. 2). 1999 waren die wenigsten der in Verkehr gesetzten Diesel-Personenkraftwagen mit einem Partikelfilter ausgerüstet, da kaum ein Automobil-Hersteller Partikelfilter-Systeme für Dieselfahrzeuge serienmässig anbot.

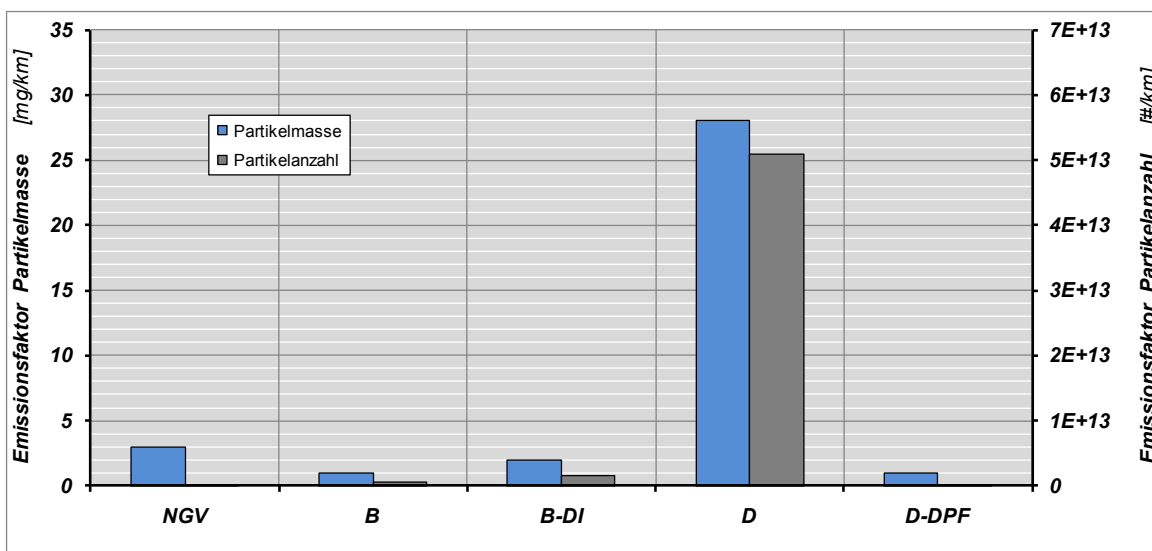


Abb. 2 Emissionsfaktoren Partikelmasse und -anzahl für dieselgetriebene Personenkraftwagen [6]
 NGV=Gasfahrzeuge, B=Otto-Motor (Benzin), B-DI=Otto-Motor mit Direkteinspritzung (Benzin),
 D=Diesel (ohne Partikelfilter), D-DPF=Diesel mit Partikelfilter

Dies änderte sich erst ab 2006 im Anschluss an eine lang anhaltende winterliche Inversionslage im Januar/Februar mit ausserordentlich hohen Feinstaub PM10-Belastungen im gesamten Schweizer Mittelland, welche zu einem entsprechenden medialen Echo führte (Abb. 3). Der Druck aus Medien und Öffentlichkeit führte dazu, dass die meisten Hersteller Partikelfilter-Systeme für Dieselfahrzeuge serienmässig oder zumindest als Option anboten. Nicht zuletzt auch als Folge der intensiven Diskussionen und der damit einhergehenden Relativierung der Umweltfreundlichkeit von Dieselfahrzeugen hat sich der rasante Anstieg des Anteils der Diesel-

Personenwagen an den neu in Verkehr gesetzten Fahrzeugen deutlich abgeflacht und bewegte sich seither bei knapp über 30% der Fahrzeuge.

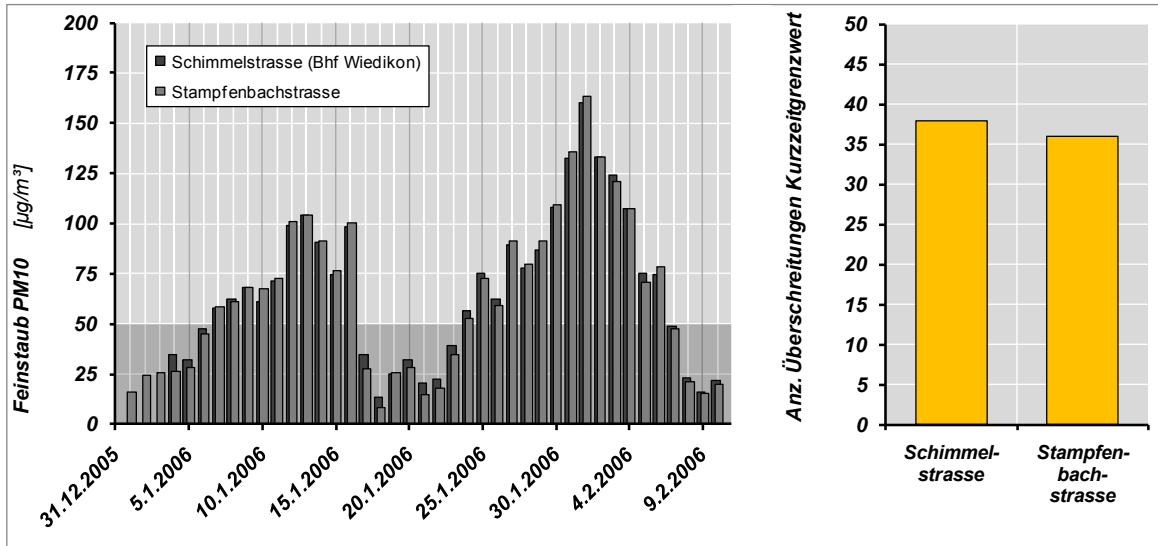


Abb. 3 Verlauf der Wintersmogepisode 2006 in der Stadt Zürich und Anzahl Überschreitungen des Kurzzeitgrenzwerts der LRV in den Monaten Januar und Februar 2006

Seit Beginn der Einführung von Emissionsvorschriften für Strassenfahrzeuge wurden diese laufend verschärft. Ab 1995 übernahm die Schweiz die Emissionsvorschriften der Europäischen Union (EURO 2 - EURO 6) [7-10]. Während bei den Benzin getriebenen Fahrzeugen die Partikelemission erst mit den Emissionsvorschriften EURO 4 (ab 2005) überhaupt ein Thema wurden, ist die Partikelemission (Dieselruss) bei den Dieselfahrzeugen von Beginn weg mit Emissionsvorschriften geregelt (Abb. 4).

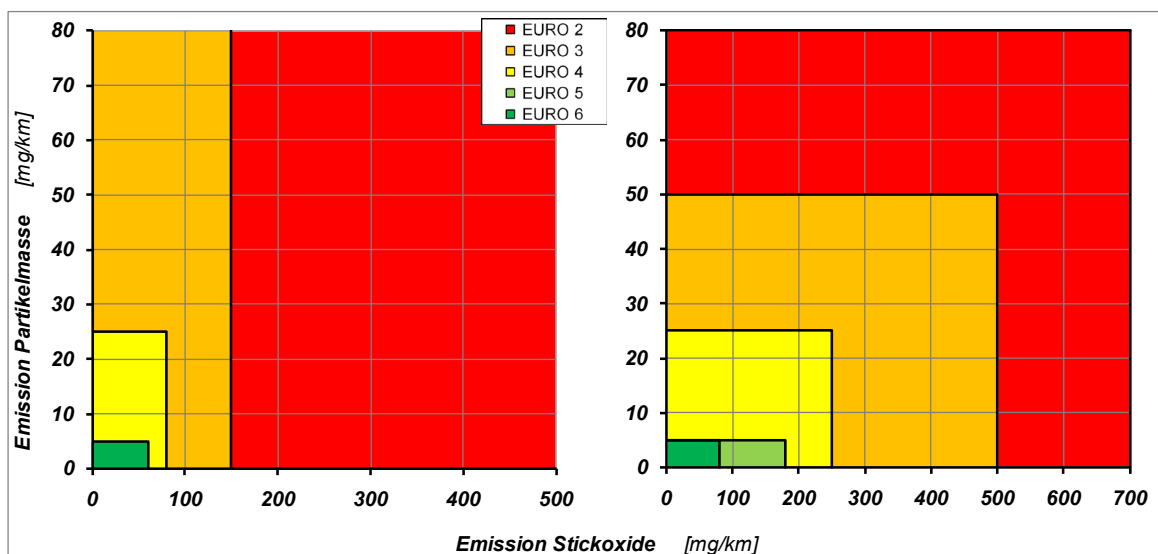


Abb. 4 Emissionsvorschriften Stickoxide und Partikelmasse EURO 2 bis EURO 6 für Personenfahrzeuge (links Otto-Motor, rechts Diesel)

Es handelt sich dabei um massenbezogene Grenzwerte, welche die maximale Russmasse je gefahrenen Kilometer begrenzen. Die laufende Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für

Dieselfahrzeuge zog eine motorentechnische Entwicklung nach sich, welche eine Verschiebung von grösseren Partikeln mit entsprechend höherer Masse, zu deutlich kleineren Russpartikeln geringerer Masse und in massiv höherer Anzahl zur Folge hatte. Entsprechend sehen die Emissionsvorschriften der EURO 6 erstmals auch einen Grenzwert für die Partikelanzahl vor, welcher im Moment noch nicht definiert ist, jedoch spätestens mit in Kraft treten definiert werden muss.

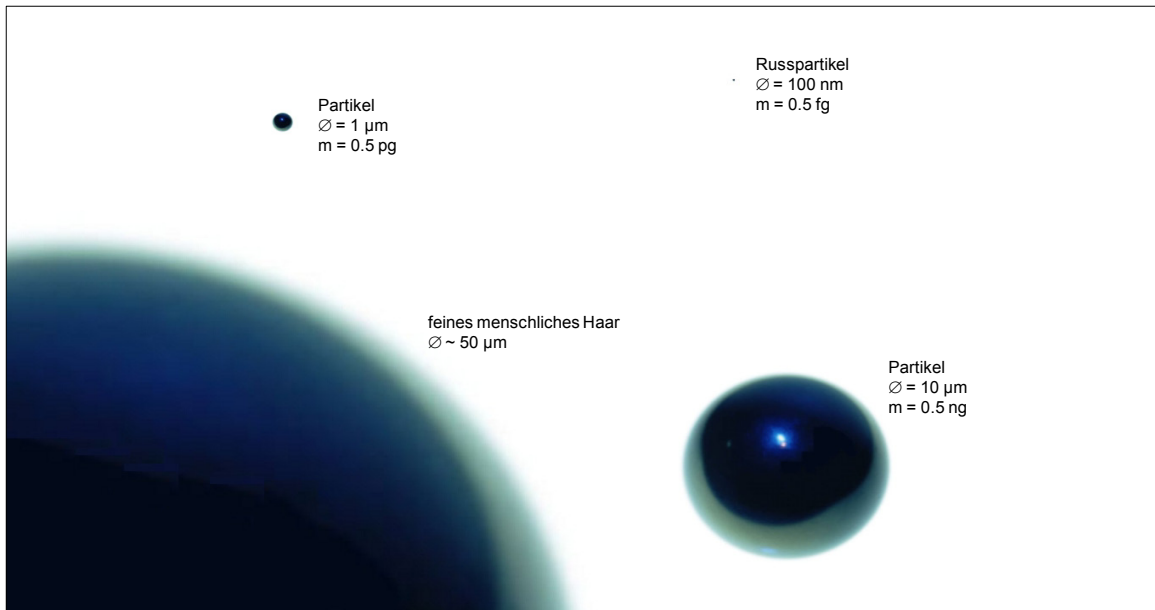


Abb. 5 qualitativer Vergleich der Grössenordnung und Massenverhältnisse von Partikeln anhand eines einfachen Kugelmodells

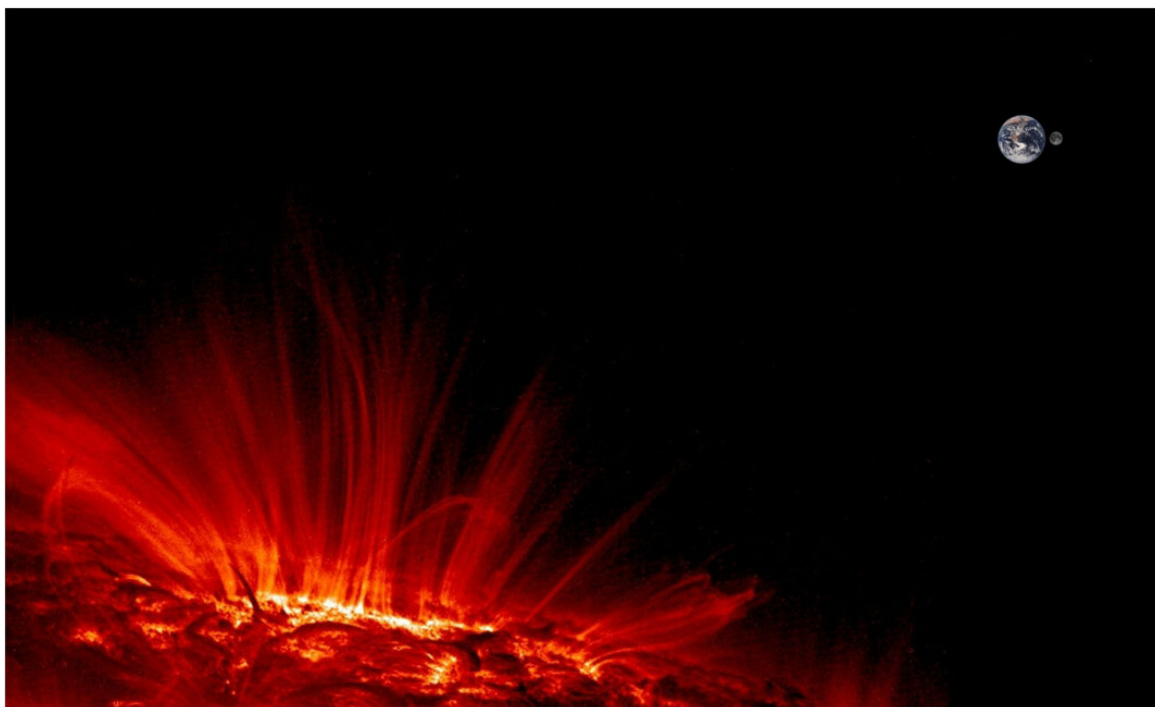


Abb. 6 qualitative Analogie im Makrokosmos [11, 12]

Dass bei der Verkleinerung der Partikel massenmässig sehr viel herausspringt zeigt der Vergleich von Durchmesser und Masse anhand einfacher Kugeln. Eine Änderung des Durchmessers um den Faktor 100 hat eine Massenänderung um den Faktor 1'000'000 zur Folge (Abb. 5). Zieht man dabei in Betracht, dass die Mehrzahl der Russartikel einen Durchmesser deutlich unter 100 nm aufweisen, erhält man einen Eindruck der Grössenordnungen von denen in der Folge die Rede sein wird. Ein analoges Verhältnis kann im Makrokosmos beobachtet werden, wenn die Sonne mit der Erde verglichen wird. Bei einem Verhältnis der Durchmesser von ungefähr 109:1, ergibt sich für die Massen ein Verhältnis von 330'000:1 (Abb. 6).

In der Realität haben Dieselerusspartikel keine kompakten Kugelformen, sondern mehr oder weniger stark strukturierte Formen, die von annähernd kugelförmigen Klumpen bis zu langkettigen Formen mit allen möglichen Zwischenstufen reichen können (Abb. 7).

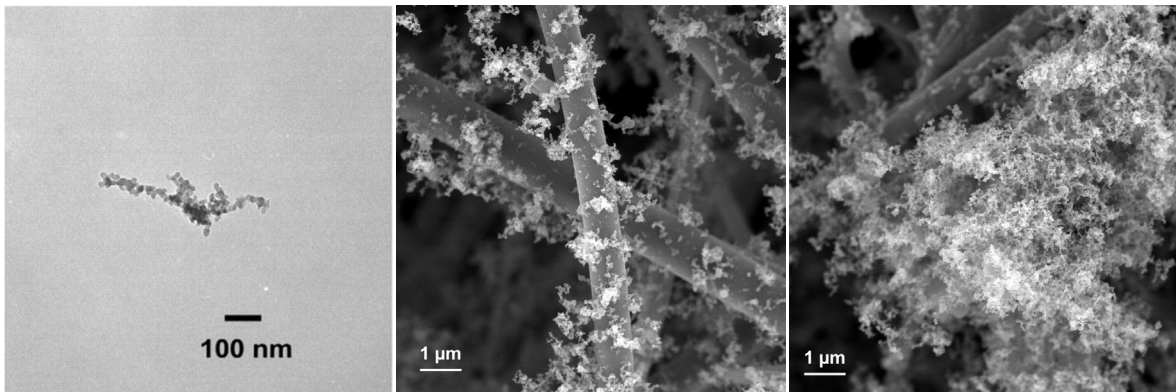


Abb. 7 TEM-Aufnahme eines frischen Dieseleruss-Partikels (links) [13] und REM-Aufnahmen von Dieseleruss-Partikeln und -Agglomeraten auf Filtern am Messort Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon) (rechts) [14]

Die Russpartikel bestehen im Kern aus elementarem Kohlenstoff (EC) und gelten als krebserregend. Auf ihrer Oberfläche finden sich organische Substanzen aus der Stoffklasse der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), von denen verschiedene als erbgutschädigend und erwiesenermassen, wahrscheinlich oder möglicherweise krebserregend eingestuft werden [15]. Je kleiner ein Russpartikel ist, umso tiefer kann er in die menschliche Lunge eindringen und umso schwerer ist es für den Körper ihn zu verarbeiten, resp. wieder aus dem Körper zu entfernen.

Einen Überblick über die Prozesse, Ein- und Auswirkungen von Nanopartikeln im menschlichen Körper gibt ein Bericht des kanadischen Instituts IRSST [16]. Der menschliche Körper besitzt zwei Mechanismen mit Partikeln umzugehen. Lösliche Partikel können sich am Ort ihres Auftreffens auflösen, schlecht lösliche oder unlösliche Partikel versucht der Körper zu entfernen, indem er sie an einen anderen Ort im Körper verfrachtet. Größere und auch ultrafeine Partikel, welche der Schleim in Bronchien und Bronchiolen auffängt, werden im Regelfall innert 24 Stunden über den Magen und den Verdauungstrakt wieder aus dem Körper ausgeschieden [17] oder allenfalls durch Auswurf entfernt.

Die ultrafeinen Partikel, die in die Alveolen gelangen und dort abgelagert werden, können von körpereigenen Fresszellen (Makrophagen) aufgenommen, falls möglich beseitigt oder dann an einen Ort transportiert werden, an welchem der obige Mechanismus zum Tragen kommt. Die ist ein langsamer Vorgang mit einer Halbwertszeit von nahezu 2 Jahren [18].

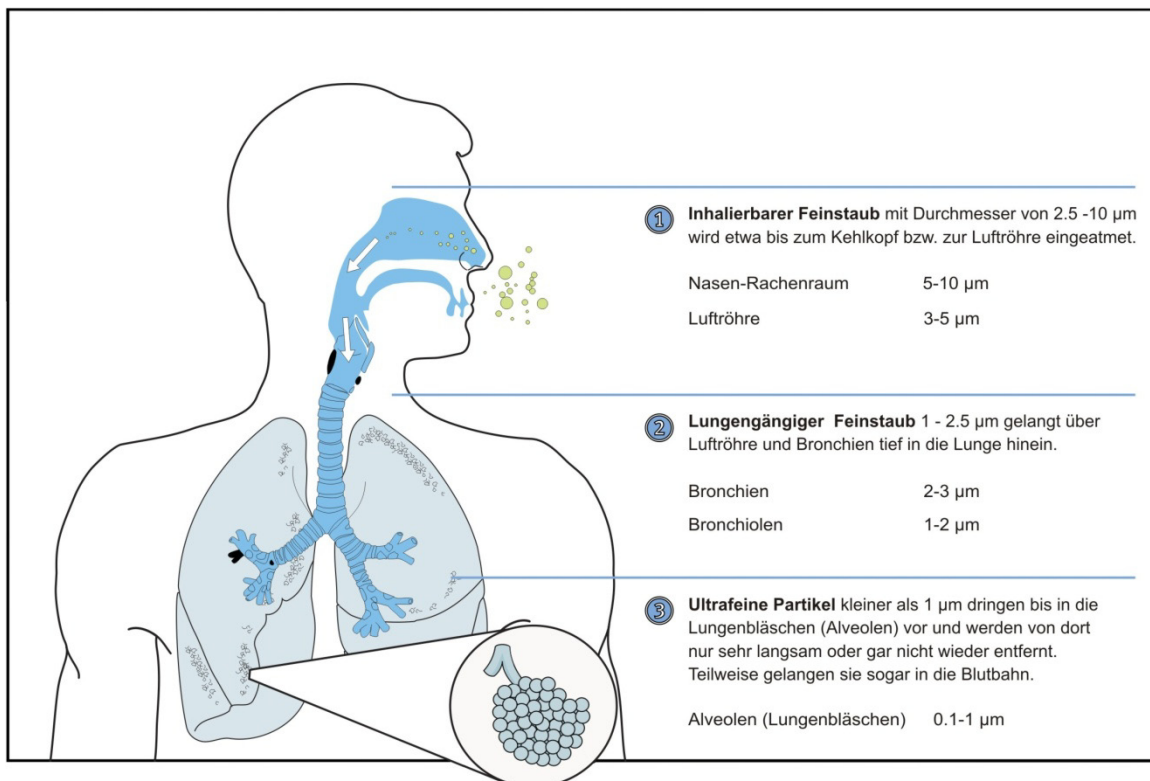


Abb. 8 menschlicher Atemtrakt und Feinstaub PM10

In diversen Publikationen wird gezeigt, dass verschiedenste Nanopartikel in der Lage sind, körpereigene Schutzmechanismen zu überwinden, Zellmembranen zu durchdringen und so beispielsweise bei Ratten oder Mäusen über den Riechnerv den Weg ins Gehirn finden [19, 20] oder über die Lunge und auch das Verdauungssystem in den Blutstrom gelangen können. Sie akkumulieren in der Folge in Organen wie Leber und Nieren. Die Fähigkeit Schutzmechanismen des Körpers überwinden zu können, machen sie auch für medizinische Anwendungen interessant. Sie könnten es erlauben, ultrafeine Partikel als Träger von Medikamenten zu benutzen, um diese gezielt an ihren Wirkungsort, beispielsweise im Gehirn, zu transportieren. Es ist naheliegend, dass diese Mechanismen auch beim Mensch bei Russpartikeln mit einem Durchmesser < 200 nm zum Tragen kommen können.

Auch wenn die exakten biologischen Mechanismen und Einflussfaktoren für die Aufnahme, Transport und nicht zuletzt ihrer Toxizität nicht restlos geklärt sind [21], zeigen diverse Studien (z.B. [22-25]) gesundheitliche Beeinträchtigung in Folge der Exposition durch Dieselmotorspartikel. Entzündungsreaktion der Atemwege, erhöhte Blutgerinnung mit entsprechend erhöhtem Thromboserisiko, verringerter Arterienflexibilität, diverser Auswirkungen im Nervensystem und nicht zuletzt einem erhöhtes Krebsrisiko.

Im Sinne einer ersten Bestandsaufnahme wurde auf dem Gebiet der Stadt Zürich von 2006 bis 2008 die Luftbelastung durch Nanopartikel und ultrafeine Partikel mit Durchmesser im Bereich von 8 - 320 nm an verschiedenen Messorten unterschiedlicher Charakteristik und Belastung erfasst.

3 Glossar & Begriffe

3.1 Begriffe

Feinstaub PM10	Massenkonzentration der Partikel mit einem Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$
grobe Partikel	Partikel mit einem Durchmesser $\geq 1 \mu\text{m}$
ultrafeine Partikel	Partikel mit einem Durchmesser $< 1 \mu\text{m}$
Nanopartikel	Partikel mit einem Durchmesser $< 100 \text{nm}$

3.2 Glossar

in alphabetischer Reihenfolge

AWEL	Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich
CO ₂	Kohlendioxid, klimarelevantes Gas
CPC	Condensation Particle Counter - Messgerät für die Partikelanzahl (Kondensationskernzähler)
DiSC	Diffusion Size Classifier - Messgerät für die Partikelanzahl
DMA	differentieller Mobilitätsanalysator - zentraler Bestandteil eines SMPS
EC	Elemental Carbon - Elementarer Kohlenstoff (im städtischen Raum insbesondere Dieseleruss)
EKL	Eidgenössische Kommission für Lufthygiene
LRV	Luftreinhalte-Verordnung der Schweizer Eidgenossenschaft
METAS	Metrologie und Akkreditierung Schweiz - Bundesamt für Metrologie
MiniDiSC	Miniaturisierte Version des DiSC
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (en: PAH)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer - Messgerät für die Partikelanzahl-Grössenverteilung auf der Basis der elektrischen Mobilität
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
UGZ	Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich
USG	Bundesgesetz über den Umweltschutz

4 Messkonzept

Im Rahmen der Partikel-Messkampagne erfolgten Messungen an drei unterschiedlich belasteten Messorten in der Stadt Zürich und der nahen Agglomeration. Sie wurden jeweils in der bestehenden Infrastruktur für die Immissionsmessungen von Luftschadstoffen gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV) des Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) und des Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL) durchgeführt.

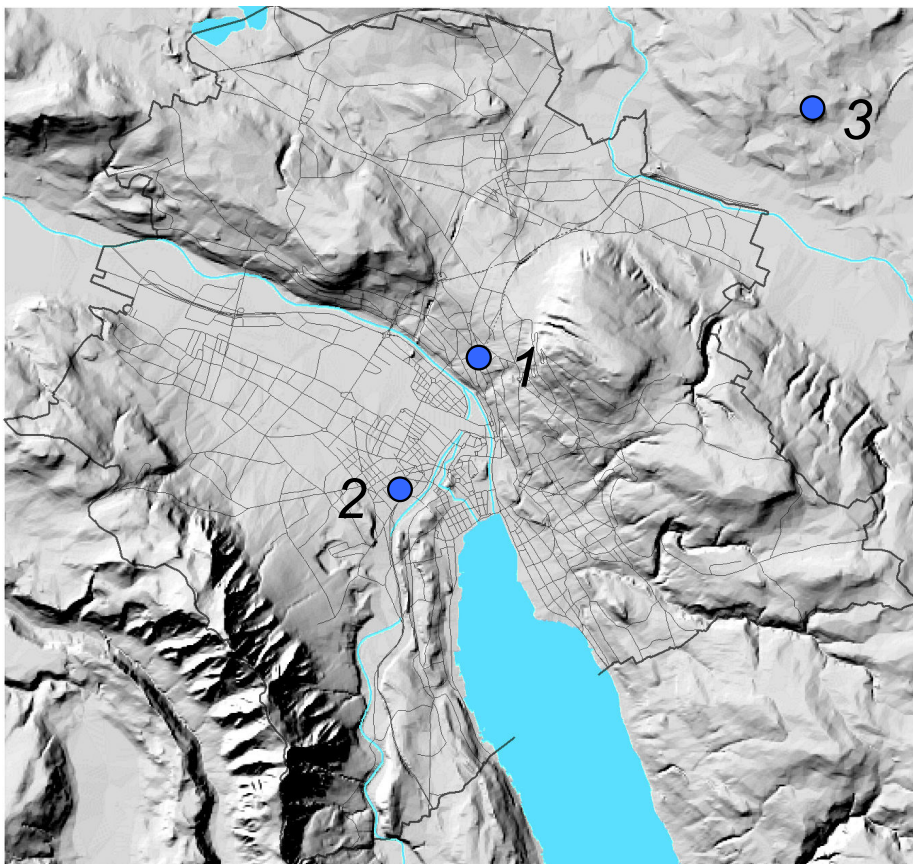
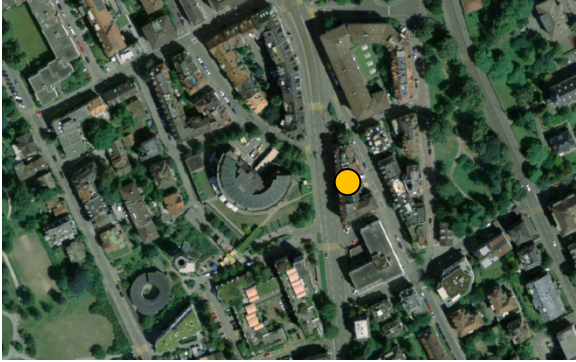
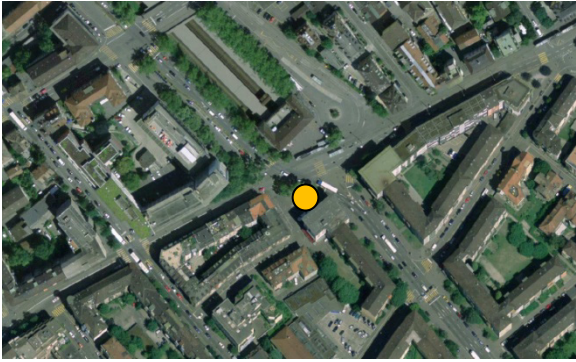
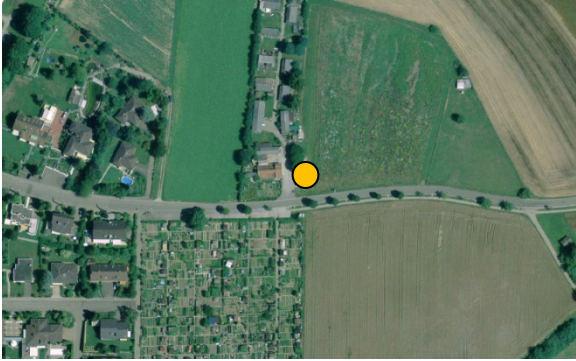


Abb. 9 Messorte der Messkampagne

Die Messorte wurden so gewählt, dass ein möglichst breites Belastungsspektrum abgebildet werden konnte. Dazu boten sich drei bestehende Messstationen der Stadt und des Kantons Zürich geradezu an. Die Messstation Wallisellen lag am äussersten Agglomerationsrand und weist nur eine geringe Verkehrsexposition aus. Die Messstation Stampfenbachstrasse bildet eine typische städtische Situation mit mässiger Verkehrsexposition in zentraler Lage ab, während die Messstation Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon) bis zur Eröffnung des Uetlibergtunnels im Mai 2009 den Extremfall einer städtischen Hauptverkehrsachse mit hohem Schwerverkehrsanteil repräsentierte.

Da für die Partikelmessungen nur ein Messinstrument zur Verfügung stand, erfolgten die Messungen zeitlich gestaffelt über einen Zeitraum von drei Jahren.

Tab. 1 Messorte der Messkampagne und ihre Charakteristik

	Messort	Charakteristik
1	Stampfenbachstrasse 	Messstation UGZ mittlere städtische Belastung mässige Verkehrsexposition 7'700 Fz/d, 1.6% Schwerverkehr 28. August - 12. Dezember 2006 30. Januar - 31. März 2008
2	Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon) 	Messstation UGZ Transitachse Chur – Bern-Basel hohe Verkehrsexposition 23'600 Fz/d, 7.2% Schwerverkehr 19. Juni - 2. August 2006 2. April - 29. Juni 2008
3	Wallisellen 	Messstation AWEL Kanton Zürich Agglomerationsrand geringe Verkehrsexposition 25. Juni 2007 – 31. August 2007

5 Instrumentierung

Die Messungen der Partikelgrössenverteilungen erfolgten mittels eines SMPS. Zur Grössendifferenzierung und Klassifikation von Aerosolen kann ihr Mobilitätsverhalten in einem elektrischen Feld genutzt werden.

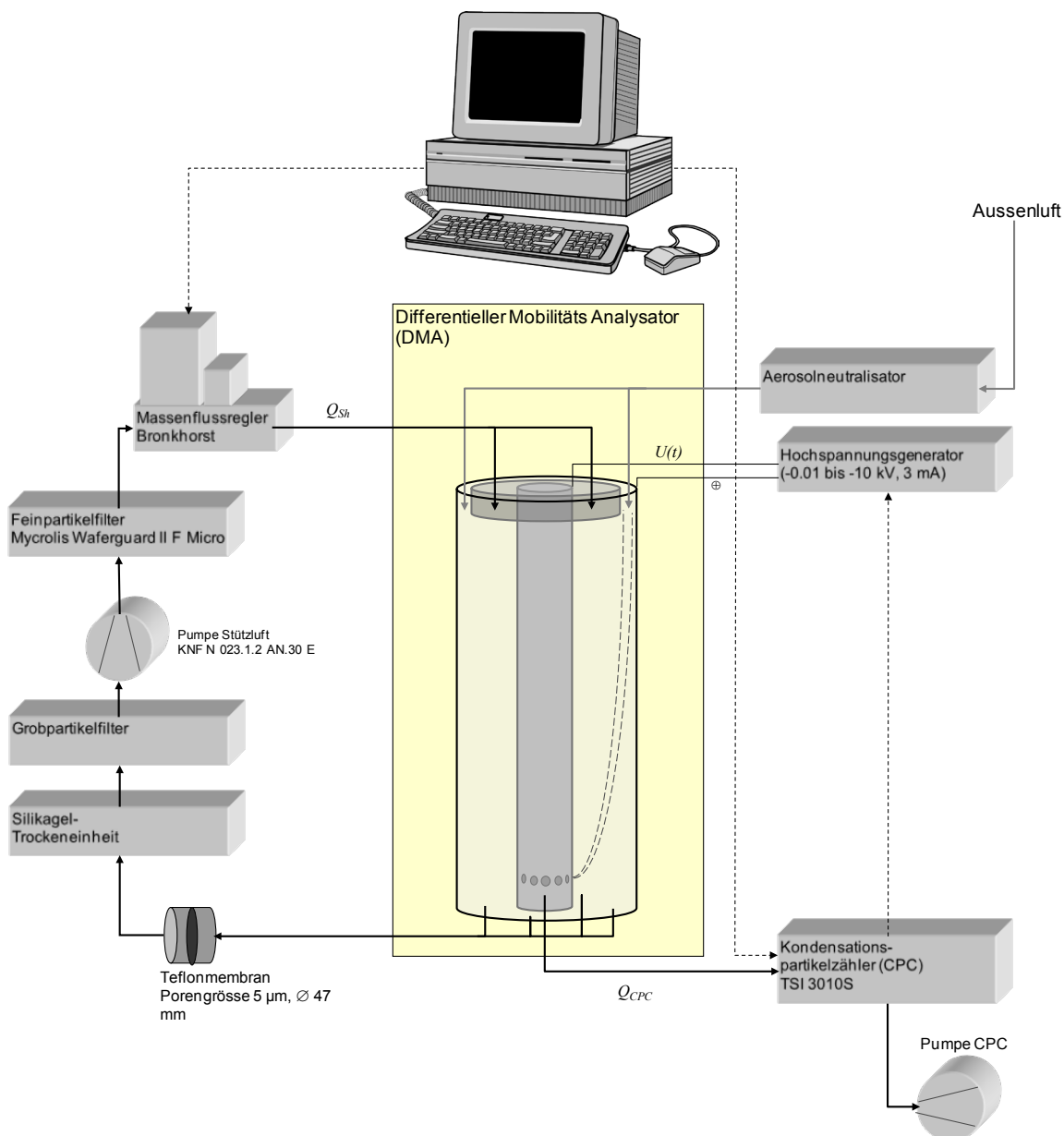


Abb. 10 Schematischer Aufbau des eingesetzten SMPS [26]

Kern des SMPS ist ein DMA (**D**ifferential **M**obility **A**nalysator). Im DMA-Zylinder zirkuliert die partikelfreie Stützluft mit einem Fluss Q_{Sh} . Ein Kondensationspartikelzähler (CPC) entzieht am Ende des Kollektors dem System Luft Q_A , welche dementsprechend am DMA-Eingang als Probe eintritt. Auf Grund der Dimensionierung des DMA entstehen laminare Flussverhältnisse im DMA bei einem Flussverhältnis von Q_{Sh} / Q_A von 10:1.

Durch die angelegte negative Spannung $U(t)$ über dem Kollektor und der Aussenwand werden positiv geladene Partikel im elektrischen Feld dieses Zylinderkondensators Richtung Kollektor abgelenkt. Je nach ihrer Mobilität im elektrischen Feld, abhängig von der Partikelgrösse und Ladungszustand, sind sie in der Lage die Austrittsöffnungen des Kollektors zu erreichen und können somit im CPC erfasst werden. Durch exponentielle Variation der Spannung kann ein definierter Grössenbereich der Partikel erfasst werden und ihre Anzahl in Abhängigkeit der Partikelgrösse bestimmt werden.

6 Auswertungen

Die Messungen der Partikelanzahl und -Grössenverteilungen mit einem SMPS erlauben es alle 5 Minuten eine Grössenverteilung aufzuzeichnen. Diese wurden zwecks der direkten Vergleichbarkeit mit den Messdaten von gas- und partikelförmigen Luftschadstoffen der standardmässigen Immissionsmessungen für Luftschadstoffe zu Halbstundenmittelwerten zusammengefasst. Sämtliche folgenden Auswertungen erfolgten direkt auf der Basis der oder durch Verdichtung der Halbstundenmittelwerte.

6.1 Grössenverteilungen

Erwartungsgemäss ist die Belastung durch feinste Partikel an den Messorten in der Stadt Zürich am höchsten. Während sich die Grössenverteilung am Messort Stampfenbachstrasse im gesamten Messbereich nur um einen Faktor vom Hintergrund-Messort Wallisellen unterscheidet, zeigen sich am stark verkehrsexponierten Messort Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon) bei den kleinsten Partikeln um 10 nm Durchmesser und Partikeln im Grössenbereich von 50 - 100 nm. Gemeinsam ist ihnen das Maximum im Bereich von 30 - 40 nm an allen Messorten.

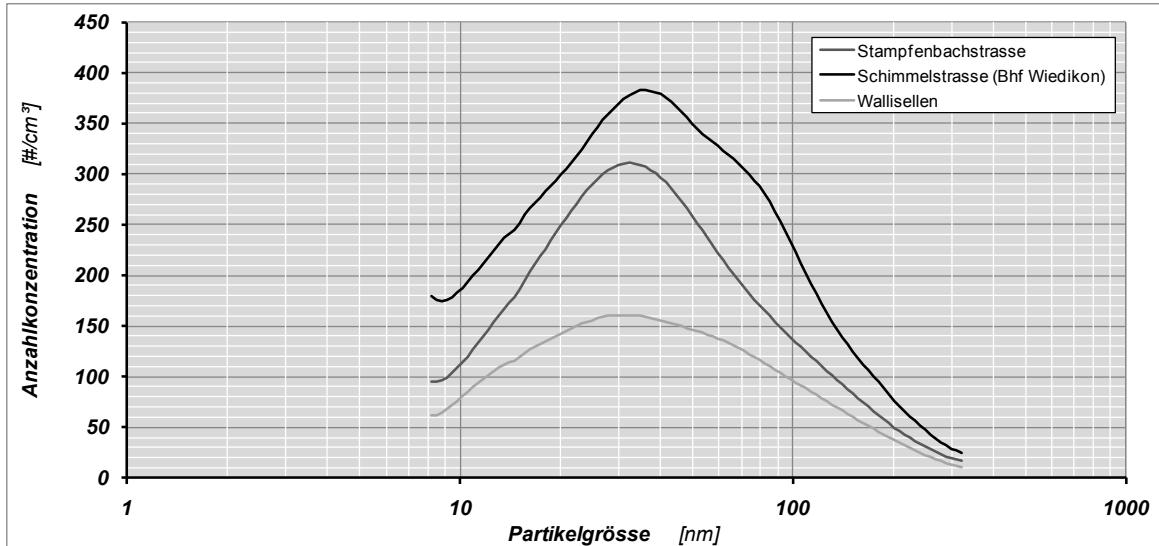


Abb. 11 Mittlere Grössenverteilungen an den Messorten der Messkampagne im Bereich von 8 bis 320 nm

Wird die Spannweite der Grössenverteilungen, von Minimalbelastung bis Maximalbelastung, betrachtet können an allen Messorten je nach Grösse der Partikel Unterschiede in der Anzahl bis zu zwei Grössenordnungen, respektive einen Faktor von 100 beobachtet werden.

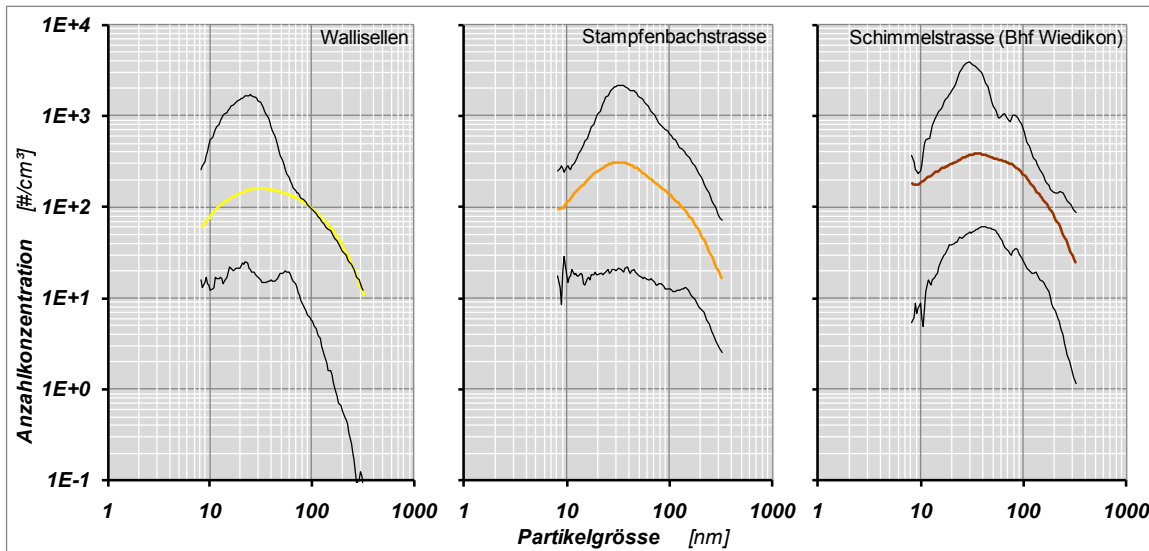


Abb. 12 Spannweite der Grössenverteilungen der Messkampagne

Rein qualitativ können die verschiedenen Anteile an der Luftbelastung, ausgehend vom Messort Wallisellen quantifiziert werden (Abb. 13). Dieser repräsentiert die Hintergrundbelastung am Agglomerationsrand mit geringem Einfluss durch Verkehr oder Siedlung. Der Messort Stampfenbachstrasse mit mässigem Verkehrsaufkommen ist in erster Linie durch den Siedlungseinfluss (zentrale städtische Lage) geprägt. Entsprechend kann der Siedlungseinfluss, resp. Siedlungshintergrund als zusätzliche Belastung zur Hintergrundbelastung angesehen werden. Das gleiche trifft für den Verkehrsanteil des stark verkehrsexponierten Messorts Schimmelstrasse zu. Wird die Belastung des ähnlich zentral gelegenen Messorts Stampfenbachstrasse abgezogen, ergibt sich ein Anhaltspunkt für Anzahl und Grössenverteilung der vom Verkehr verursachten zusätzlichen Luftbelastung.

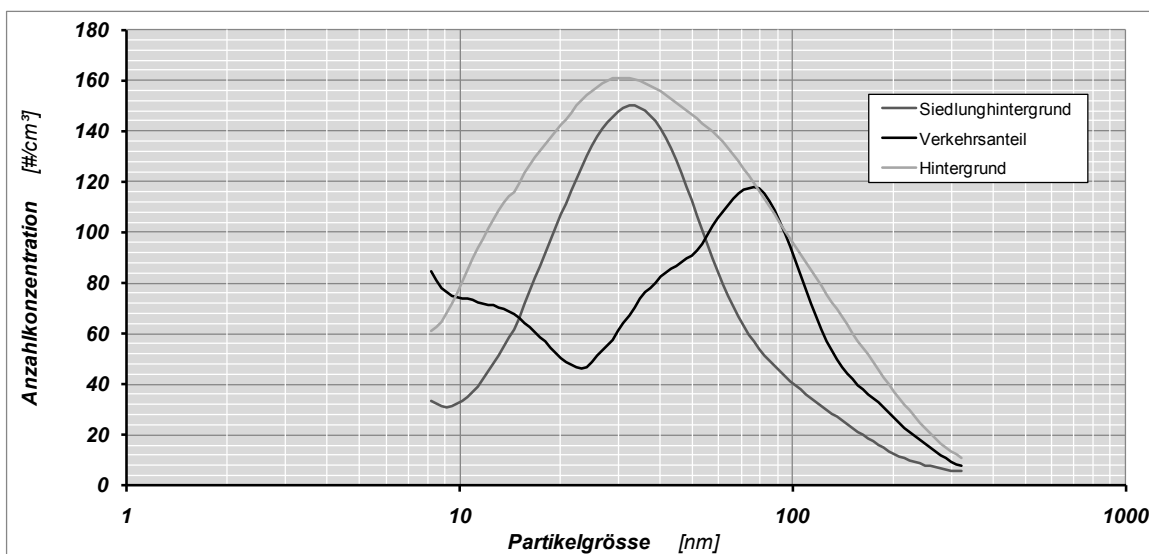


Abb. 13 Beiträge zur Gesamtbelastung qualitativ abgeschätzt

6.2 Partikelanzahl

Die Gesamtpartikelanzahl im Messbereich wird als Summe der Partikelanzahl über alle Grössenbereiche der Grössenverteilungen berechnet. Wird die mittlere Partikelanzahl an den Messorten verglichen, fallen die ausgeprägten Unterschiede zwischen den Messorten und die Spannweite der Messdaten auf.

Tab. 2 Partikelanzahl (8 - 320 nm) an den Kampagnenmessorten (Basis Halbstundenmittelwerte)

	Wallisellen [#/cm ³]	Stampfenbachstrasse [#/cm ³]	Schimmelstrasse [#/cm ³]
Mittelwert	10'793	17'755	24'884
Minimum	1'336	1'667	2'957
Maximum	58'392	90'091	123'768

Wird die Partikelanzahl der Feinstaub PM10-Belastung gegenübergestellt, zeigt sich für die Partikelanzahl eine deutlich stärkere Abstufung der Belastungen als dies beim Feinstaub PM10 der Fall ist.

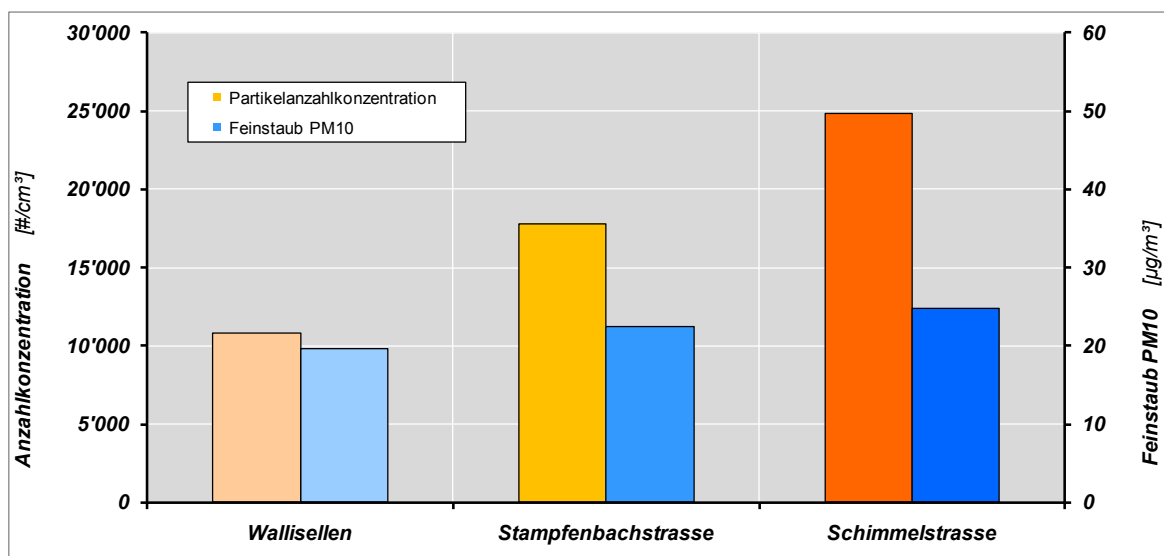


Abb. 14 Gegenüberstellung der Feinstaub PM10-Belastung und der Gesamtpartikelanzahl im Grössenbereich von 8 bis 320 nm (PM10 Jahresmittelwerte 2007/2008)

Dies hat in erster Linie damit zu tun, dass die Partikelanzahl in weitaus geringerem Masse von einer hohen Hintergrundbelastung dominiert wird als dies beim Feinstaub PM10 der Fall ist.

6.3 Massenkonzentrationen

Der Zusammenhang zwischen Durchmesser und Masse frischer Russpartikel ist aus verschiedenen Quellen bekannt [27-30] (vgl. A4). Sie setzen sich aus elementarem Kohlenstoff (EC) und organischem Kohlenstoff (OC) zusammen und verändern sich bezüglich ihrer

Morphologie (Struktur und Form) im Lauf ihrer Aufenthaltszeit in der Atmosphäre [31]. Unter Anwendung des EC-Anteils aus der Literatur [29] kann aus den Grössenverteilungen die EC-Massenkonzentration über den Messbereich berechnet werden.

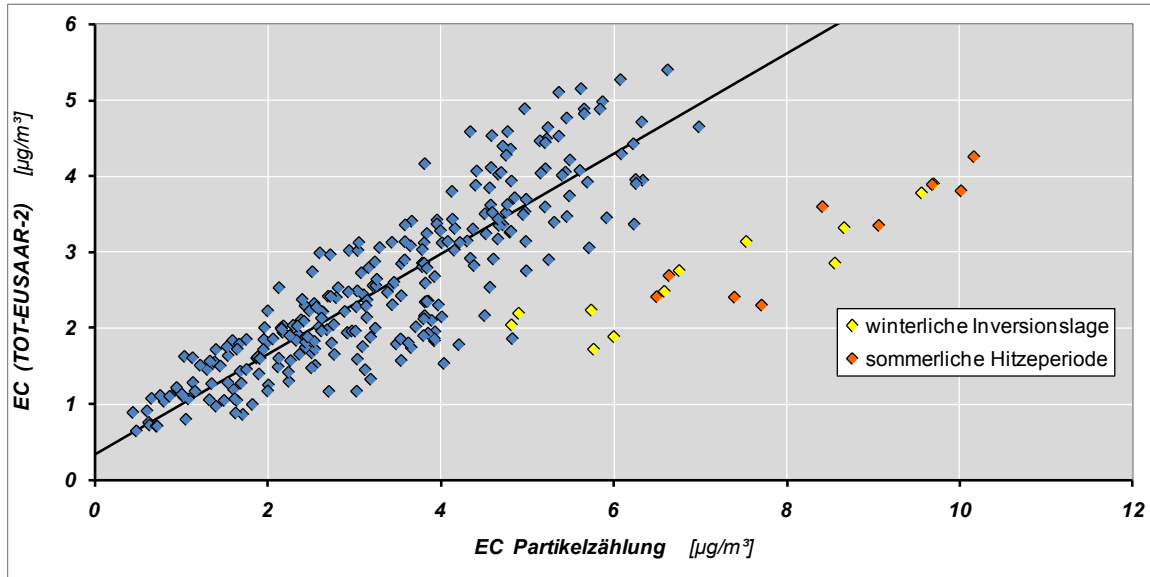


Abb. 15 Aus Grössenverteilungen berechnete EC-Massenkonzentrationen im Vergleich mit kontinuierlichen Russmessungen an den Messorten Stampfenbachstrasse und Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon)

Werden die so gewonnenen Daten mit den Messwerten der kontinuierlichen Messung verglichen, zeigt sich eine passable Übereinstimmung der beiden Messverfahren mit der Tendenz der aus der Partikelzählung erhaltenen EC-Massenkonzentrationen die effektive Belastung zu überschätzen. Hinweise für die Ursache geben zwei Episoden, die örtlich und zeitlich unabhängig voneinander Datenpunkte liefern, welche deutlich ausscheren (Abb. 15).

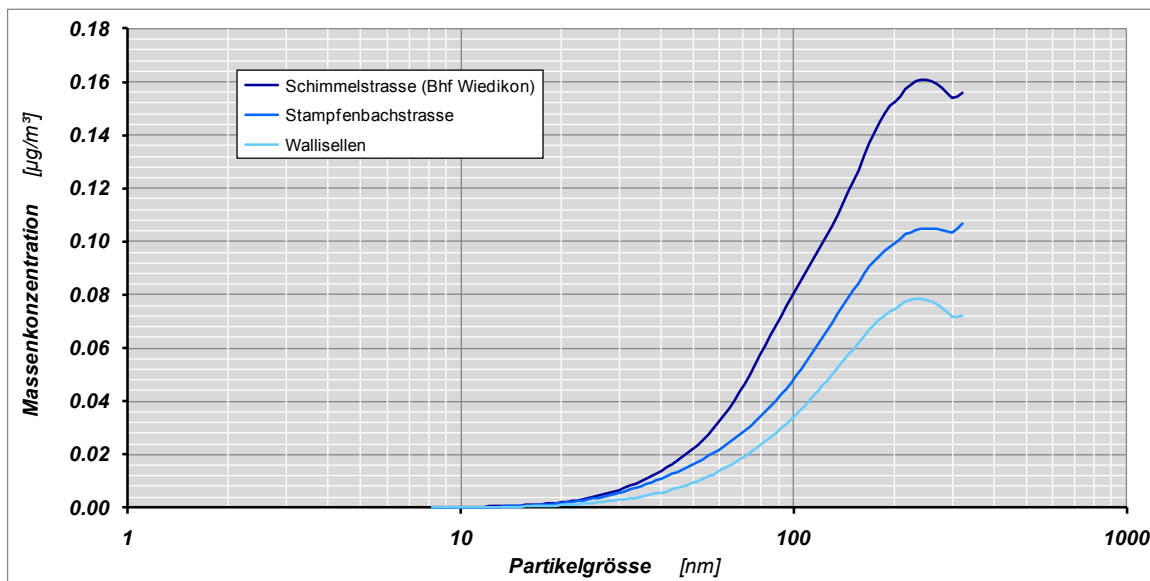


Abb. 16 Massenverteilung PM0.32 an den verschiedenen Messorten

Die Ursache dürfte entweder in der Überschätzung der Dichte der Partikel oder in der Überschätzung des EC-Anteils der Partikel liegen- gealterte Partikel im Fall der winterlichen Inversionslage [32] und der Bildung von Sekundäraerosolen im Verlauf der sommerlichen Hitzeperiode [33]. Entsprechend ist die Berechnung von Massenkonzentrationen aus Partikel-Grössenverteilungen abhängig von der Aerosolzusammensetzung und Wittereinflüssen, somit bei Immissionsmessungen eher qualitativer Natur.

Trotzdem zeigen die Verteilungen der Massenkonzentration in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers, dass Partikel mit einem Durchmesser < 100 nm bezüglich der Massenkonzentration einen geringen Einfluss haben (Abb. 16). Anteilsmässig machen sie bei der Anzahl der Partikel 86%, bei der Massenkonzentration nur gerade 20% aus.

Tab. 3 Anteile an Anzahl und Masse in verschiedenen Grössenbereichen (Messbereich 8 - 320 nm)

Partikeldurchmesser [nm]	Anzahl			Massenkonzentration		
	<50	50 - 100	>100	<50	50 - 100	>100
Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon)	62.1%	23.7%	14.2%	4.6%	16.5%	78.8%
Stampfenbachstrasse	66.3%	21.0%	12.7%	5.6%	15.6%	78.8%
Wallisellen	62.5%	22.4%	15.1%	4.3%	14.7%	81.0%
Mittel	63.6%	22.4%	14.0%	4.8%	15.6%	79.5%

6.4 Vergleich mit Gesamtpartikelanzahl und Feinstaub PM10

Bei den ersten Messungen an der Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon) bestand die Möglichkeit, die Daten der Grössenverteilungen (Summe der Partikel über alle Grössenklassen) mit der Messung der Gesamtpartikelanzahl zu vergleichen. Es zeigt sich, dass rund 87% der Partikel im Grössenbereich 8 bis 320 nm anzutreffen sind.

Tab. 4 Partikelanzahl im Grössenbereich 8 bis 320 nm im Vergleich zur Gesamtpartikelanzahl

	SMPS [#/cm ³]	CPC [#/cm ³]	Anteil SMPS
Partikelanzahl	27547	31798	87%

Tab. 5 Massenkonzentration PM0.32 im Vergleich zur Feinstaub PM10-Belastung

	PM0.32 [µg/m ³]	PM10 [µg/m ³]	Anteil PM0.32 an PM10
Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon)	5.6	24.2	23.1%
Stampfenbachstrasse	3.7	26.2	14.1%
Wallisellen	2.6	14.5	18.1%

An allen Messorten wurde auch die Luftbelastung durch Feinstaub PM10 erfasst. Werden die Massenkonzentrationen der Messung der Grössenverteilungen mit der PM10-Belastung an den jeweiligen Messorten verglichen, machen die Partikel im Grössenbereich 8 bis 320 nm je nach

Messort zwischen 14% und 23% der PM10-Massenkonzentration aus (Tab. 5). 87% der Partikel haben einen mittleren Anteil von rund 19% an der Massenkonzentration.

6.5 Vergleich mit gasförmigen Schadstoffen

Am besten korreliert die Partikelanzahl mit der Luftbelastung durch Stickoxide (NO_x). Dies ist insofern nicht verwunderlich, als für hohe Partikelbelastungen, resp. Russbelastungen vor allem Dieselfahrzeuge verantwortlich sind, welche auch einen deutlich höheren Stickoxid-Ausstoss aufweisen als im Vergleich dazu Benzin getriebene Fahrzeuge. Dabei fällt auf, dass der Messort Wallisellen bei tiefer Stickoxid-Belastung tendenziell hohe Partikelbelastungen aufweist.

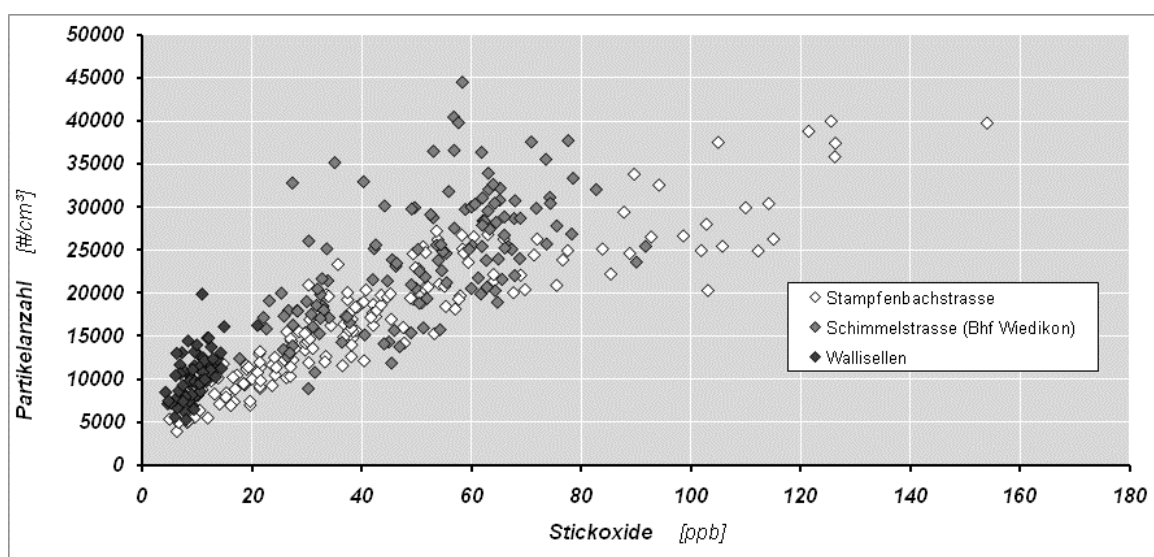


Abb. 17 Korrelation von Stickoxid-Belastung und Partikelanzahl (8 - 320 nm) auf der Basis von Tagesmittelwerten

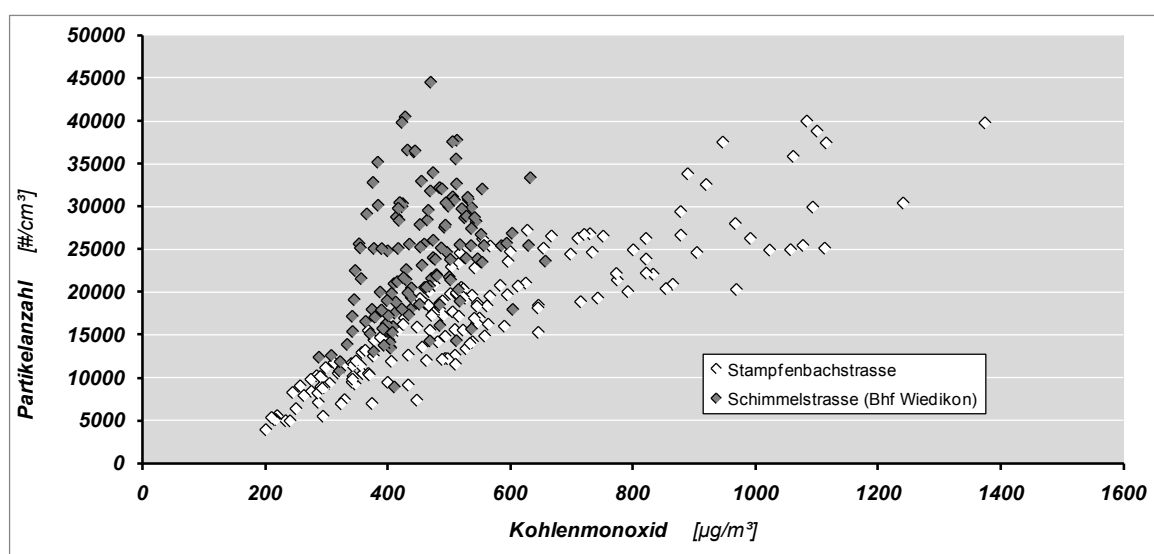


Abb. 18 Korrelation von Kohlenmonoxid-Belastung und Partikelanzahl (8 - 320 nm) auf der Basis von Tagesmittelwerten

Etwas anders sieht der Zusammenhang zwischen Partikel- und Kohlenmonoxid-Belastung aus. Hier führt die völlig unterschiedliche Verkehrszusammensetzung an Stampfenbachstrasse und Schimmelstrasse zu deutlich unterschiedlichen Korrelationen. Der hohe Schwerverkehrsanteil führt bei gleichen Kohlenmonoxid-Belastungen zu deutlich höheren Partikelbelastungen.

6.6 Tagesgänge

Werden die mittleren Tagesgänge der Partikelgrössenverteilungen an den Messorten betrachtet, werden diese in erster Linie durch ein Verkehrsmuster geprägt. Typisch für den Pendlerverkehr ist der Verlauf am Messort Stampfenbachstrasse - eine Morgenspitze zwischen 06:00 und 09:00 und erhöhte Belastungen durch den Feierabendverkehr zwischen 17:00 und 22:00 (Abb. 19). Ebenfalls typisch für verkehrsbedingte Partikelbelastungen ist das Maximum der Grössenverteilungen im Bereich von 30 bis 40 nm.

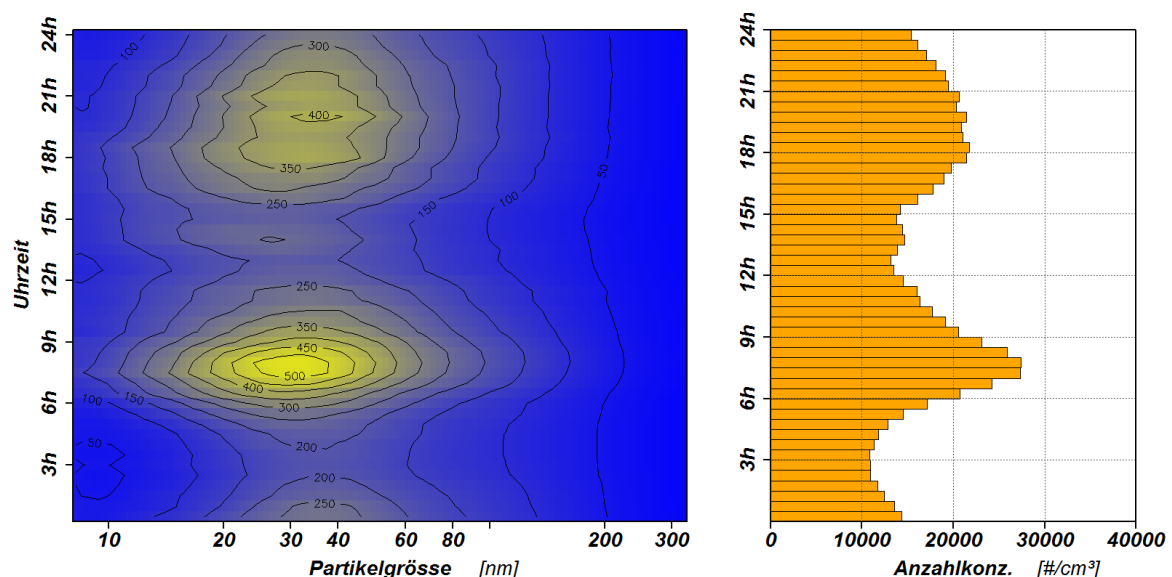


Abb. 19 Partikelanzahlkonzentration in Funktion der Partikelgrösse und der Tageszeit und mittlerer Tagesgang am Messort Stampfenbachstrasse

An der ehemaligen Transitachse Schimmelstrasse führte der hohe Schwerverkehrsanteil bereits um 06:00 morgens zu Höchstbelastungen der Luft mit Partikeln. Im Tagesverlauf nimmt die Partikelbelastung zwar allmählich etwas ab, verbleibt aber auf einem hohen Niveau (Abb. 20). Der Pendlerverkehr kann ansatzweise in der verbreiterten morgendlichen Spitze und einem geringen abendlichen Anstieg der Partikelbelastung beobachtet werden.

Am Messort Wallisellen ist der Berufsverkehr ebenfalls zu beobachten. Hier fällt zusätzlich eine Spitze der Partikelbelastung um die Mittagszeit auf, welche bezüglich der Grössenverteilung (Spitzenbelastung durch Partikel im Grössenbereich von 10 bis 20nm) aus dem üblichen Muster fällt.

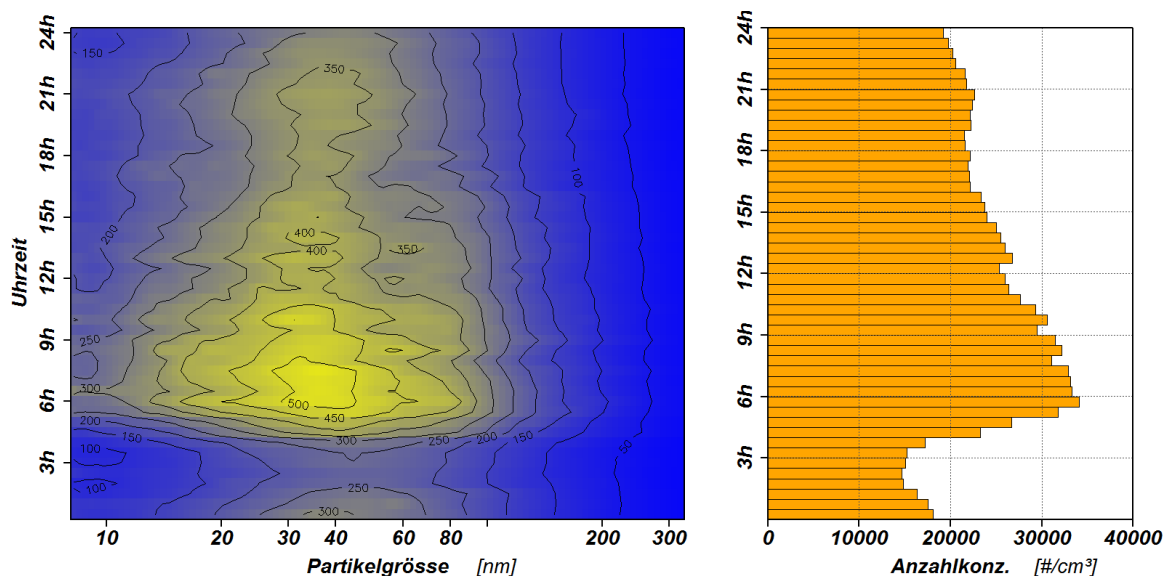


Abb. 20 Partikelanzahlkonzentration in Funktion der Partikelgrösse und der Tageszeit und mittlerer Tagesgang am Messort Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon)

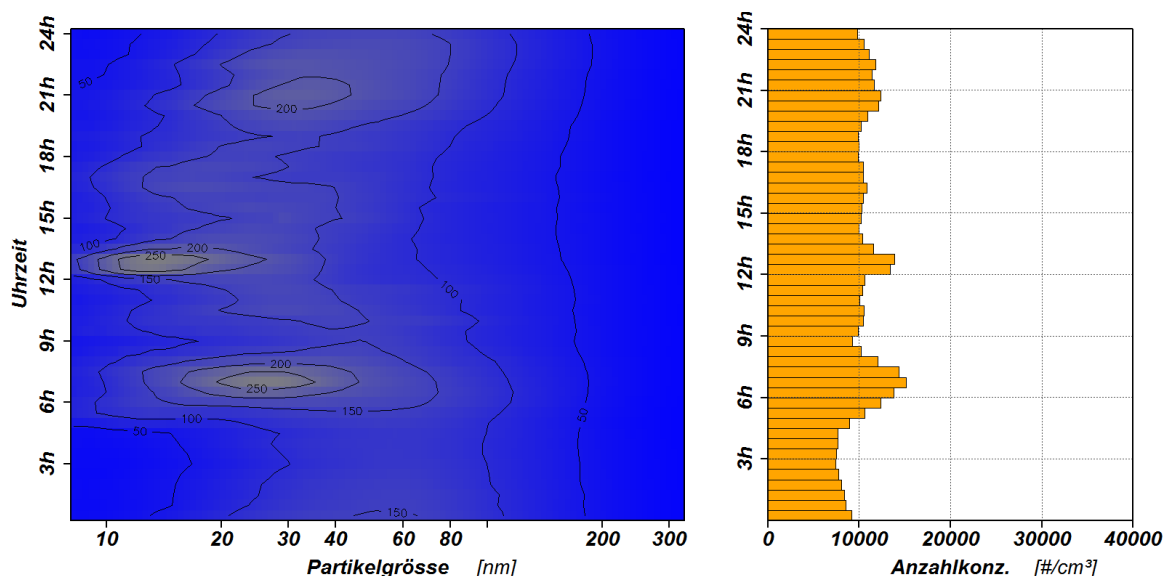


Abb. 21 Partikelanzahlkonzentration in Funktion der Partikelgrösse und der Tageszeit und mittlerer Tagesgang am Messort Wallisellen

6.7 Wochengang

Werden die mittleren Grössenverteilungen nach Wochentagen (Werktage, Samstag und Sonntag) miteinander verglichen, lassen sich verschiedene Beobachtungen machen. An den städtischen Messorten nimmt die Partikelbelastung an den Wochenenden deutlich ab, was in erster Linie auf den deutlich reduzierten Schwerverkehr am Wochenende zurückzuführen ist. Am Messort Wallisellen ist jedoch das Gegenteil der Fall. Die Partikelbelastung ist an den Wochenenden höher als an den Werktagen.

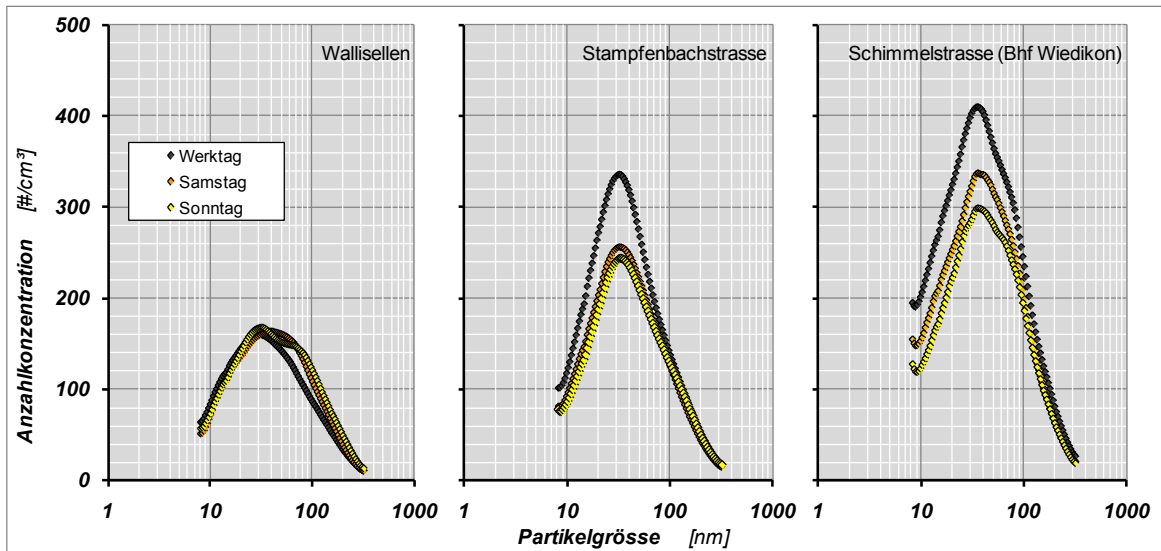


Abb. 22 Vergleich der mittleren Grössenverteilung zwischen Werktagen und Wochenende

Werden die Partikelanzahlkonzentrationen und Partikelgrössenverteilungen nach Wochentagen differenziert, zeigt sich, dass am Messort Wallisellen die höchsten Partikelkonzentrationen der Woche jeweils sonntags um die Mittagszeit auftreten (Abb. 23). Dies dürfte auf rege Grilltätigkeit im naheliegenden Familiengartenareal und im benachbarten Gelände des Kleintierzüchtervereins zurückzuführen zu sein.

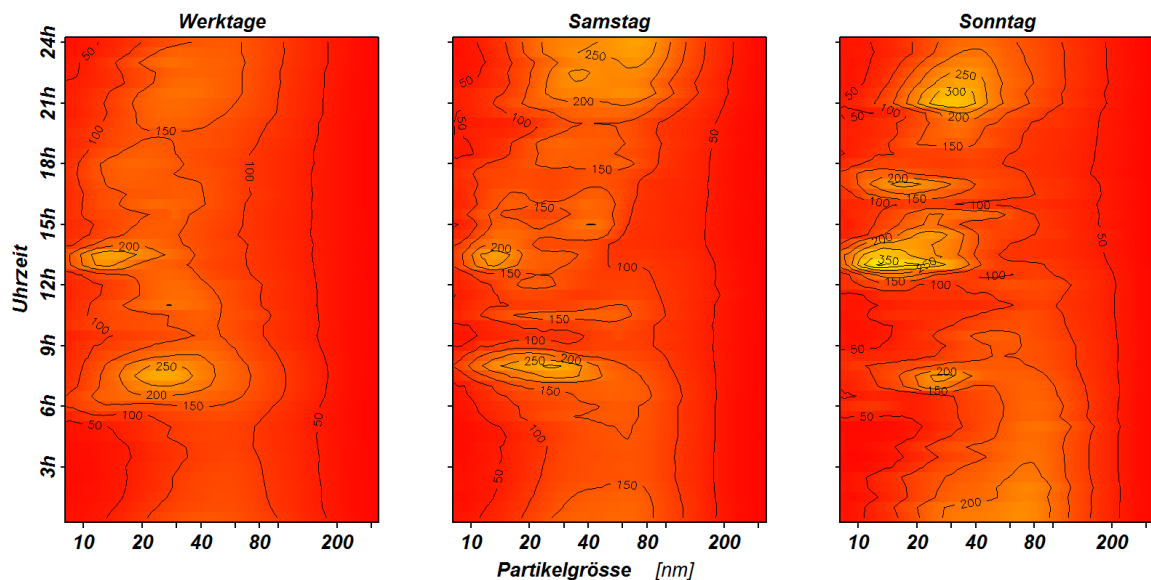


Abb. 23 Tagesgang der Partikelbelastung in Abhängigkeit des Wochentags am Messort Wallisellen

Wird dieselbe Auswertung am Messort Schimmelstrasse durchgeführt, lässt sich durch den Wegfall des Schwerververkehrs am Sonntag eine Reduktion der Partikelbelastung um rund 50% beobachten (Abb. 24). Dabei war das Verkehrsaufkommen auf der Schimmelstrasse vor der Eröffnung der Westumfahrung Zürich sonntags und werktags nur geringfügig verschieden. Der wegfallende Schwerverkehr wurde durch höheren Freizeitverkehr kompensiert.

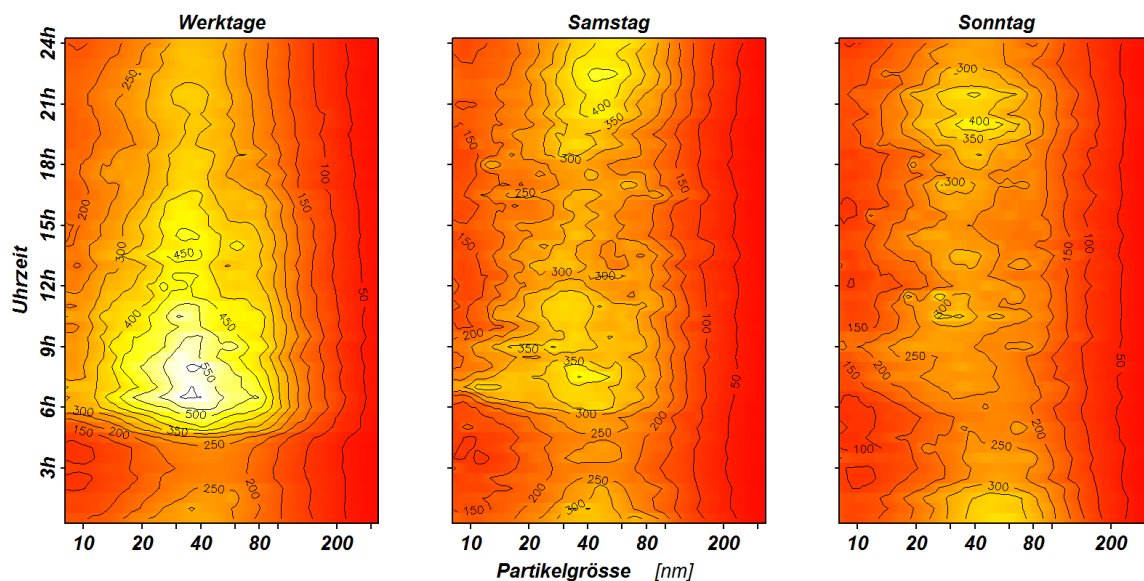


Abb. 24 Tagesgang der Partikelbelastung in Abhängigkeit des Wochentags am Messort Schimmelstrasse

Dass nicht nur der Schwerverkehr eine gewichtige Einflussgrösse darstellt, zeigt sich am mässig verkehrsbelasteten Messort Stampfenbachstrasse. Der werktägliche Pendlerverkehr führt unter der Woche zu deutlichen Mehrbelastungen.

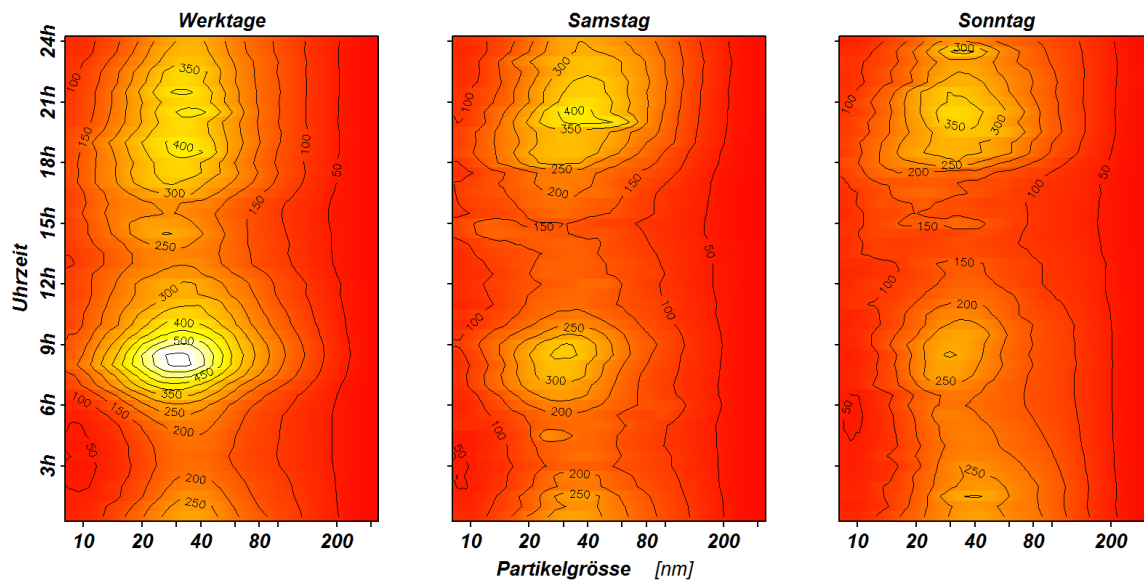


Abb. 25 Tagesgang der Partikelbelastung in Abhängigkeit des Wochentags am Messort Stampfenbachstrasse

7 Literatur

- [1] Schweiz. Eidgenossenschaft, Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG), Stand am 1. August 2010, SR 814.01, EDMZ, Bern, 1983
- [2] Schweiz. Eidgenossenschaft, Luftreinhalte-Verordnung (LRV), Stand am 15. Juli 2010, SR 814.318.142.1, EDMZ, Bern, 1985
- [3] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Feinstaub in der Schweiz - Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL), Bern, 2007
- [4] Kommission für Umwelt Raumplanung und Energie SR, Haushaltneutrale Verbilligung von Diesel, Erd-, Flüssig- und Biogas zwecks Minderung des CO₂-Ausstosses des Verkehrsbereiches, Motion 01.3690, 2001
- [5] Auto-Schweiz, Statistiken - Personenwagen nach Marken, www.auto-schweiz.ch/Personenwagen.html, 2011
- [6] C. Bach und S. Lienin, EMPA/sustainserv/novatantis, Emissionsvergleich verschiedener Antriebsarten in aktuellen Personenwagen, Dübendorf, 2007,
- [7] Europ. Gemeinschaft, Richtlinie 70/220/EWG vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Massnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Bd. L 76, Brüssel, 1970
- [8] Europ. Gemeinschaft, Richtlinie 94/12/EG vom 23. März 1994 über Massnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Bd. L 100, Brüssel, 1994
- [9] Europ. Gemeinschaft, Richtlinie 98/69/EG vom 13. Oktober 1998 über Massnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Bd. L 350, Brüssel, 1998
- [10] Europ. Gemeinschaft, Verordnung (EG) Nr. 715/2007 vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Bd. L 171, Brüssel, 2007
- [11] NASA, NASA - Hot Stuff, www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/iotd.html,
- [12] NASA, Solar System Exploration, <http://solarsystem.nasa.gov/index.cfm>,
- [13] R. Zhang et al., Variability in morphology, hygroscopicity, and optical properties of soot aerosols during atmospheric processing, *PNAS*, **105**, (30), 10291 - 10296, 2008,
- [14] N. Rederlechner, Korngrössenverteilung und EC-Bestimmung von Luftpartikeln entlang der Nord-Süd-Transitachse, Diplomarbeit, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie - Departement für Umweltnaturwissenschaften, ETH Zürich, Zürich, 1998
- [15] Bundesamt für Gesundheit (BAG), Faktenblatt polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), 2008, <http://www.bag.admin.ch/themen/chemikalien/00228/05582/index.html>
- [16] C. Ostiguy et al., Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Health Effects of Nanoparticles R-589, Montréal, 2008, www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/r-589.pdf

- [17] W. G. Kreyling et al., Translocation of Ultrafine Insoluble Iridium Particles from Lung Epithelium to Extrapulmonary Organs is Size Dependant But Very Low, *J. Tox. Environ. Health A*, **65**, (20), 1513 - 1530, 2002,
- [18] G. Oberdörster, Inhaled Nano-sized Particles: Potential Effects and Mechanisms, First International Symposium on Occupational Health Implications of Nanomaterials, Buxton, 2005, www.hsl.gov.uk/media/1646/nanosymrep_final.pdf
- [19] G. Oberdörster et al., Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain, *Inhal. Toxicol.*, **16**, (6-7), 437 - 445, 2004,
- [20] J. Wang et al., Time-Dependant Translocation and Potential Impairment on Central Nervous System by Intranasally Instilled TiO₂ Nanoparticles, *Toxicology*, **254**, 82 - 90, 2008,
- [21] Combustion Generated Fine Carbonaceous Particles, Proceedings of an International Workshop, Anacapri, 2007, <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000013744>
- [22] L. K. Fonken et al., Air Pollution Impairs Cognition, Provokes Depressive-Like Behaviours and Alters Hippocampal Cytokine Expression and Morphology, *Mol. Psychiatry*, **16**, 987 - 995, 2011,
- [23] M. Lundbäck et al., Experimental Exposure to Diesel Exhaust Increases Arterial Stiffness in Man, *Particle and Fibre Toxicology*, **6**, (7), 2009, <http://www.particleandfibretoxicology.com/content/6/1/7>
- [24] B. Crüts et al., Exposure to Diesel Exhaust Induces Changes in EEG in Human Volunteers, *Particle and Fibre Toxicology*, **5**, (4), 2008, <http://www.particleandfibretoxicology.com/content/5/1/4>
- [25] S. Barath et al., Impaired Vascular Function After Exposure to Diesel Exhaust Generated at Urban Transient Running Conditions, *Particle and Fibre Toxicology*, **7**, (19), 2010, <http://www.particleandfibretoxicology.com/content/7/1/19>
- [26] J. Brunner, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich, Partikelmessungen (Grössenverteilung und Anzahl) mit einem SMPS, UGZ FB LA DOK_008 V. 2.2, Zürich, 2009
- [27] K. Park et al., Measurement of Inherent Material Density of Nanoparticle Agglomerates, *J. Nanopart. Res.*, **6**, 267 - 272, 2004,
- [28] P. F. DeCarlo et al., Particle Morphology and Density Characterization by Combined Mobility and Aerodynamic Diameter Measurements. Part 1: Theory, *Aerosol Sci. Technol.*, **38**, 1185 - 1205, 2004, http://128.138.136.5/jimenez/Papers/DeCarlo_AST_2004_Published.pdf
- [29] J. G. Slowik et al., Particle Morphology and Density Characterization by Combined Mobility and Aerodynamic Diameter Measurements. Part 2: Application to Combustion-Generated Soot Aerosols as a function of Fuel Equivalence Ratio, *Aerosol Sci. Technol.*, **38**, 1206 - 1222, 2004, http://cires.colorado.edu/~jose/Papers/Slowik_AST_2004_Published.pdf
- [30] J. S. Olfert et al., The Effective Density and Fractal Dimension of Particles Emitted from a Light-Duty Diesel Vehicle with a Diesel Oxidation Catalyst, *J. Aerosol Sci.*, **38**, 69 - 82, 2007, www.ecd.bnl.gov/pubs/BNL-77708-2007-JA.pdf
- [31] T. Tritscher et al., Changes of Hygroscopicity and Morphology During Ageing of Diesel Soot, *Environ. Res. Lett.*, **6**, 034026, 2011, <http://iopscience.iop.org/1748-9326/6/3/034026>
- [32] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Witterungsbericht Februar 2008, Zürich, 2008,

- [33] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Witterungsbericht Juni 2008, Zürich, 2008,
- [34] METAS, Kalibrierzertifikat SMPS UGZ Nr. 235-10182, Bundesamt für Metrologie, 2008
- [35] METAS, Kalibrierzertifikat SMPS UGZ Nr. 235-10224, Bundesamt für Metrologie, 2009
- [36] P. G. Gormley und M. Kennedy, Diffusion from a Stream Flowing through a cylindrical Tube, *Proc. R. Ir. Soc.*, **52A**, 163 - 169, 1949,
- [37] D. Paulsen et al., Secondary Organic Aerosol Formation by Irradiation of 1,3,5-Trimethylbenzene-NO_x-H₂O in a new Reaction chamber for Atmospheric Chemistry and Physics, *Environ. Sci. Technol.*, **39**, (8), 2668 - 2678, 2005,
- [38] D. Imhof, Nanopartikel am Strassenrand, 2007,
- [39] M. Fierz et al., Field measurement of particle size and number concentration with the Diffusion Size Classifier (DiSC), *SAE International*, 2007,

Anhang

A1 Terminologie

η	Effizienzfaktoren	
D	Diffusionskoeffizient	$[m^2 s^{-1}]$
T	Temperatur	$[K]$
Q	Volumenstrom	$[m^3 s^{-1}]$
d_p	Partikeldurchmesser	$[nm]$
m_p	Masse eines Partikels	$[g]$
λ	mittlere freie Weglänge	$[m]$
k	Boltzmann-Konstante	$1.38066 \cdot 10^{-23} [JK^{-1}]$

A2 Diffusionsverluste des Systems

Diffusionsverluste im System des SMPS (DMA, Aerosolneutralisator und Schlauchverbindungen) sind rechnerisch kaum zu ermitteln. Aus diesem Grund erfolgte die Bestimmung mittels Rückführungen auf das nationale Normal (METAS) [34, 35]. Auf der Basis der Kalibrationsdaten wurde eine entsprechende Kalibrationskorrektur in die Datenauswertung implementiert. Die Validierung der Kalibrationskorrektur erfolgte durch eine erneute Auswertung der Daten des SMPS der METAS-Kalibration und zeigte in der Folge eine deutlich verbesserte Übereinstimmung zum nationalen Normal.

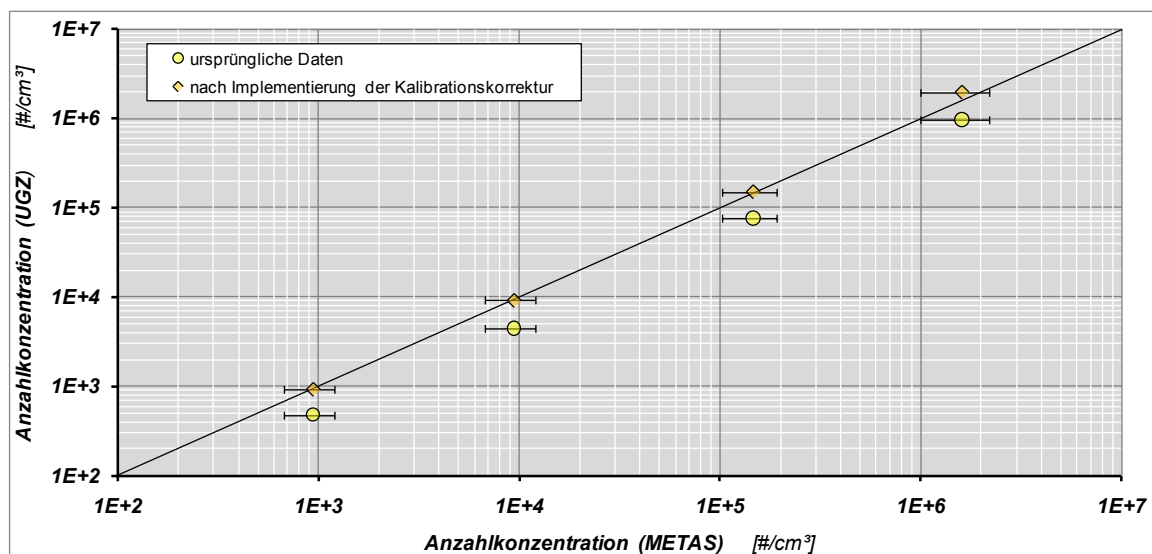


Abb. 26 Anzahlkonzentrationen vor und nach der Kalibration auf das Normal

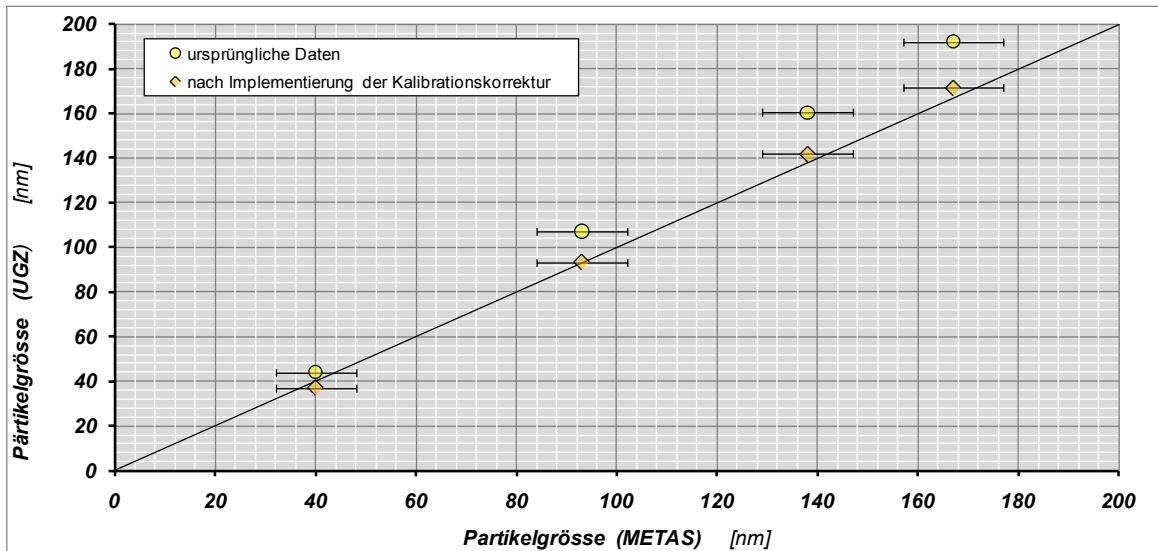


Abb. 27 Geometrischer Mittelwert der Partikelgrössen vor und nach der Kalibration auf das Normal

A3 Diffusionsverluste der Probenahme

In einer runden Probenahmeleitung unter laminaren Flussverhältnissen können die Diffusionsverluste in Abhängigkeit der Partikelgrösse nach Kennedy und Gormley [36, 37] bestimmt werden.

$$\eta_{\text{diffusion,laminar}} = 1 - 2.56 \cdot \xi^{2/3} + 1.2 \cdot \xi + 0.178 \cdot \xi^{4/3} \quad \xi < 0.02$$

$$\eta_{\text{diffusion,laminar}} = 0.819 \cdot \exp(-3.65 \cdot \xi) + 0.0975 \cdot \exp(-22.3 \cdot \xi) + 0.0325 \cdot \exp(-57.0 \cdot \xi) + 0.0154 \cdot \exp(-108 \cdot \xi) \quad \xi > 0.02$$

mit

$$\xi = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{Q}$$

wobei L die Länge des leitfähigen Probenahmeschlauchs, Q der Probenahmefluss und D der Diffusionskoeffizient eines Partikels der Masse m_p ist (vgl. A4).

$$D = \frac{\lambda}{3} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m_p}}$$

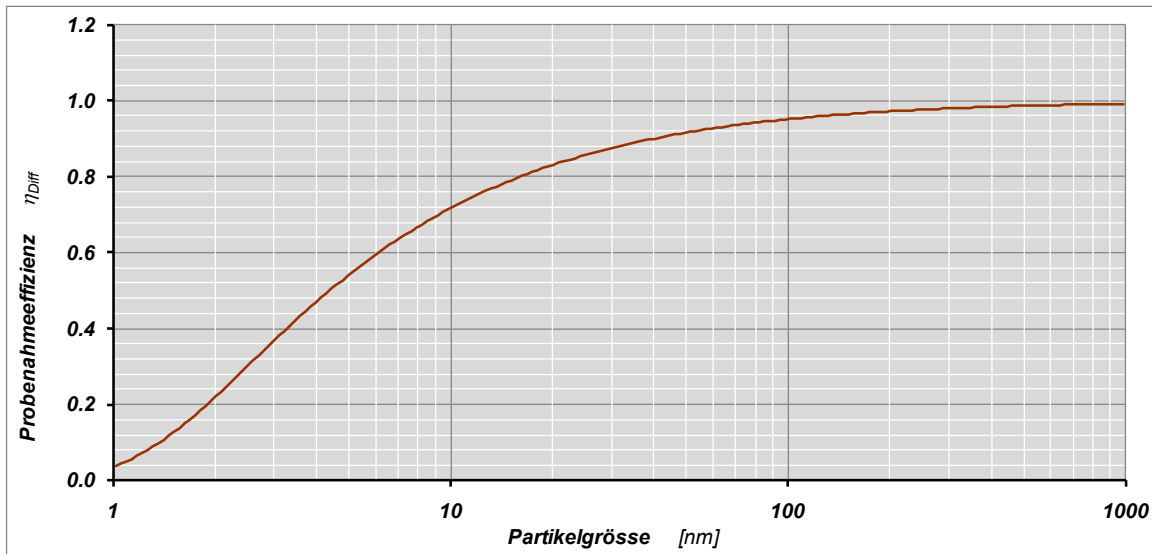


Abb. 28 Probenahmeeffizienz eines 4 m leitfähigen Silikon-Schlauchs bei einem Volumenstrom von 1 l/min

A4 Berechnung von Massenkonzentrationen aus Grössenverteilungen

Verschiedene Publikationen zeigen den Zusammenhang zwischen Durchmesser und Masse eines Russpartikels [27-30]. Bei bekannter Masse m_p eines Diesel-Russpartikels in Abhängigkeit seines Durchmessers d_p [27] kann die Massenkonzentration berechnet werden. Die Masse m_p eines Diesel-Russpartikels kann über die Funktion

$$\log_{10}(m_p) = 2.465 \cdot \log_{10}(d_p) - 5.380$$

gut angenähert werden.

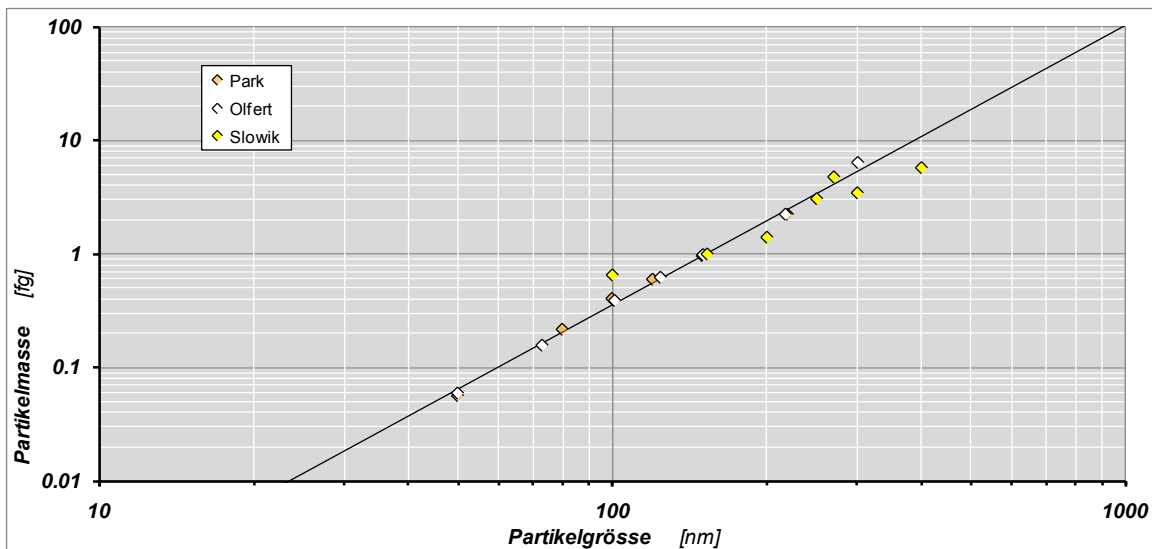


Abb. 29 Partikelmasse in Funktion des Partikeldurchmessers

A5 Vergleichsmessungen mit weiteren Partikelzählverfahren

Neben den städtischen Partikelmessungen erfolgten 2006 am Messort Schimmelstrasse (Bhf Wiedikon) auch Messungen der Gesamtpartikelanzahl im Rahmen des Projekts "Nanopartikel am Strassenrand" [38]. Auf der Basis der gleichzeitig statt findenden Messungen der Grössenverteilungen konnten die Diffusionsverluste im Probenahmesystem der Gesamtpartikelanzahlmessungen in guter Näherung berücksichtigt werden (vgl. A3).

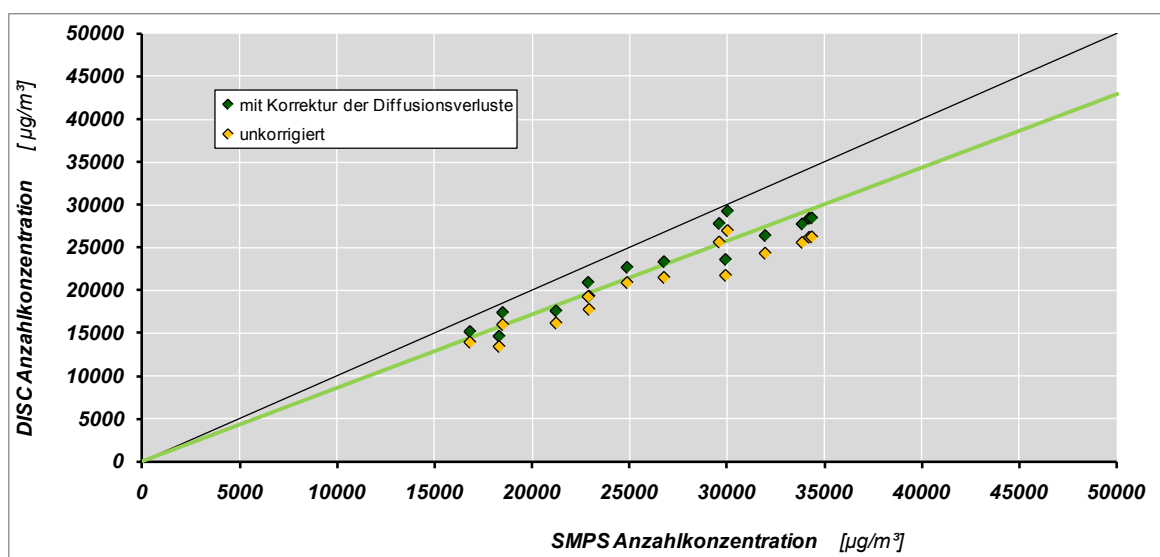


Abb. 30 Vergleich der Tagesmittelwerte der Partikelanzahlkonzentrationen von SMPS und DISC mit und ohne Korrektur von Diffusionsverlusten

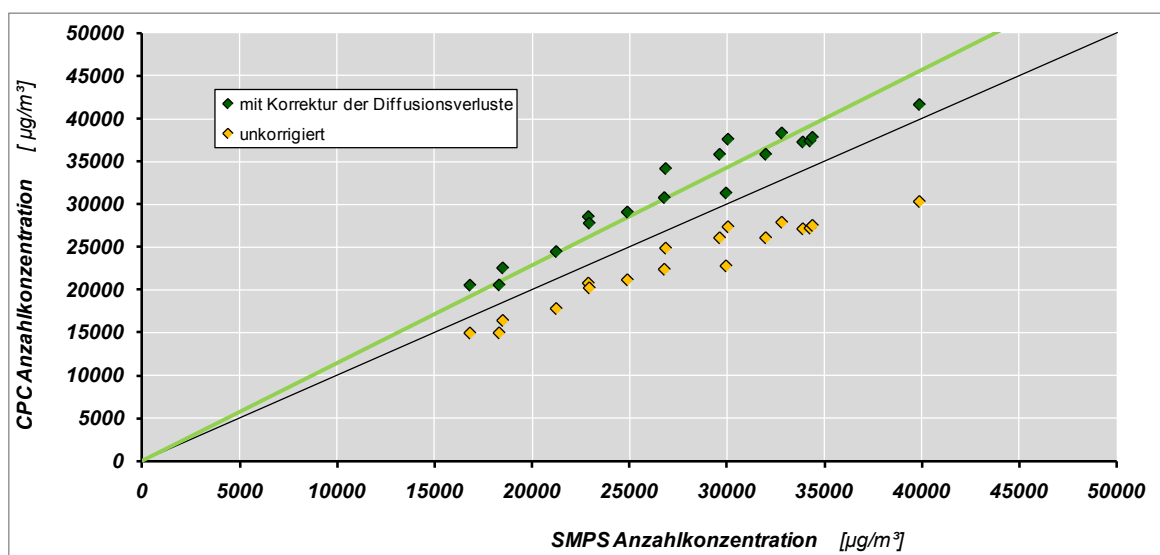


Abb. 31 Vergleich der Tagesmittelwerte der Partikelanzahlkonzentrationen von SMPS und CPC mit und ohne Korrektur von Diffusionsverlusten

Das DiSC [39] zeigt auch nach der Korrektur der Diffusionsverluste einen systematischen Minderbefund gegenüber dem SMPS, was auf die geringere Detektionseffizienz bei kleinsten

Partikeln (<40 nm) zurückzuführen sein dürfte. Der CPC hingegen weist nach der Korrektur der Diffusionsverluste die höheren Messwerte gegenüber dem SMPS auf. Dies ist weiter nicht erstaunlich, da das SMPS nur eine Teilmenge der Partikel erfasst (8 bis 320 nm) und erwartungsgemäss die Gesamtpartikelanzahl grösser sein muss.

Tab. 6 Mittelwerte der Vergleichsmessungen zwischen SMPS und DiSC (inkl. Diffusionskorrektur)

	SMPS [#/cm ³]	DiSC [#/cm ³]	Differenz %
Mittelwert	26422	22812	15.4

Tab. 7 Mittelwerte der Vergleichsmessungen zwischen SMPS und CPC inkl. Diffusionskorrektur)

	SMPS [#/cm ³]	CPC TSI 3025A [#/cm ³]	Differenz %
Mittelwert	27547	31798	-13.7

Entsprechend fällt auch der Vergleich der Mittelwerte aus den Messperioden für die diversen Gerätetypen aus.