

Testverfahren zur Ermittlung der Feinstaubemissionen von emissionsgeminderten Kehrmaschinen

Dr. D. Renschen

DMT GmbH & Co. KG
Abteilung Produktprüfung Kälte & Luftqualität
Am Technologiepark 1
D-45307 Essen

TÜV NORD Gruppe



**PAS OP!
UITSTEKENDE DELEN**

BT-DZ-47

1. Einführung

- Insbesondere in vielen Innenstädten überschreiten die Feinstaubgehalte an PM10 die nach dem BImSchG festgelegten Grenzwerte (PM10-Tagesmittel von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq 35 \times$ pro Jahr).
- Es wird geschätzt, dass bei einer PM10 Konzentration von $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ der wiederaufgewirbelte Feinstaub der Straße einen Anteil von $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ausmacht.
- Das UBA schätzt die Gesamtmenge der Feinstaubemission durch Straßenkehrung für Berlin auf etwa 100 t/Jahr (alle Kraftwerke ~ 800 t/a).
- Mittlerweile stellen mehrere Hersteller staubgeminderte Straßenkehrmaschinen her
- Deshalb wurde im Auftrag des UBA 2010 ein Projekt durch die DMT durchgeführt, eine zuverlässige Methode für die Ermittlung der Feinstaubemissionen von Kehrmaschinen unter standardisierten Bedingungen zu entwickeln.

2. Methodenbeschreibung

Hauptausforderung bei der Prüfung der emissionsgeminderten Kehrmaschinen war die zuverlässige Erfassung der diffusen Emissionen (von den drehende Bürsten oder Bürstenwalzen; der Motorkühlluft, die auf die Straßenoberfläche geblasen wird usw.). Deshalb wurden alle Feinstaubemissionen in einer hermetisch geschlossenen Halle gesammelt (B x L x H: 20 x 100 x 10 m) und gemessen.

➤ **Prüfhalle**

- Die Halle wurde sehr sorgfältig gereinigt und alle sichtbaren Öffnungen (Lecks) verschlossen.
- Die Dimensionen der Kehrmaschinen ($\geq 5 \text{ m}^3 \text{ Kl.}$) betragen bis zu $2,5 \times 10 \times 4 \text{ m}$.
- Eine effektive Durchmischung der Hallenluft wurde mittels 4 Ventilatoren erzielt ($\approx 17.000 \text{ m}^3/\text{h}$).
- Staubbelastete Luft nach den Tests wurde mittels zweier Luftextraktionssysteme bei geöffneter Fronttür abgesaugt (Zielwert $\text{PM}_{10} \leq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

2. Methodenbeschreibung

➤ **Kehrprüfstaubmischung**

- Für die Prüfung wurde eine Mischung an Prüfstaub aus zwei Sand- und einer Feinstaubfraktion (Dolomit) präpariert und deren Partikelgrößenverteilung und Charakteristik für den Prüfpzweck ermittelt .
- Die Massenfraktion an Partikeln unterhalb 10 µm beträgt 4.8%

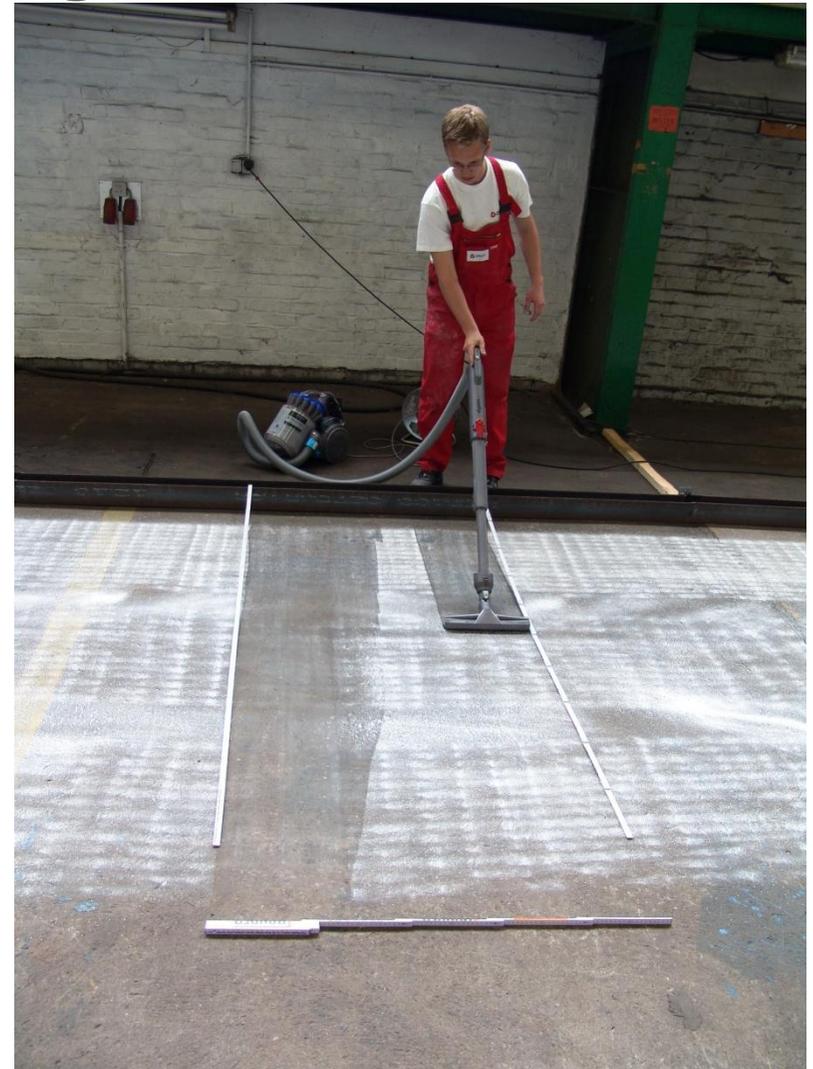
➤ **Der Prüfparcour für die Kehrungssimulation**

- Der Parcours hat eine Länge von 48 m und wird mit dem Kehrprüfstaubgemisch mit Hilfe eines Walzenstreuers homogen bestreut (~ 125 g/m²)
- Ein 48 m langer Stahlträger dient zur Simulation des Randsteins
- Zur Simulation der Randsteinkehrung wird die Staubmischung auf eine Breite von 60 cm entlang des Stahlträgers präpariert und zur Simulation der Straßenkehrung auf 1,80 m Breite.

2. Methodenbeschreibung



Testparkour präpariert für die Randsteinkehrung



Bestimmung der Staubflächenkonzentration

2. Methodenbeschreibung

- Zur Kontrolle der Dichte der verteilten Kehrprüfstaubmischung werden drei Querstreifen (1 m Breite) entlang der Teststrecke mit einem Zyklonsauger abgesaugt.
- Die Kehreffizienz der Kehrmaschinen wird nach deren Testkehrung durch Rücksaugen des auf dem Testparcour verbliebenen Prüfstaubes ermittelt (3 Streifen).

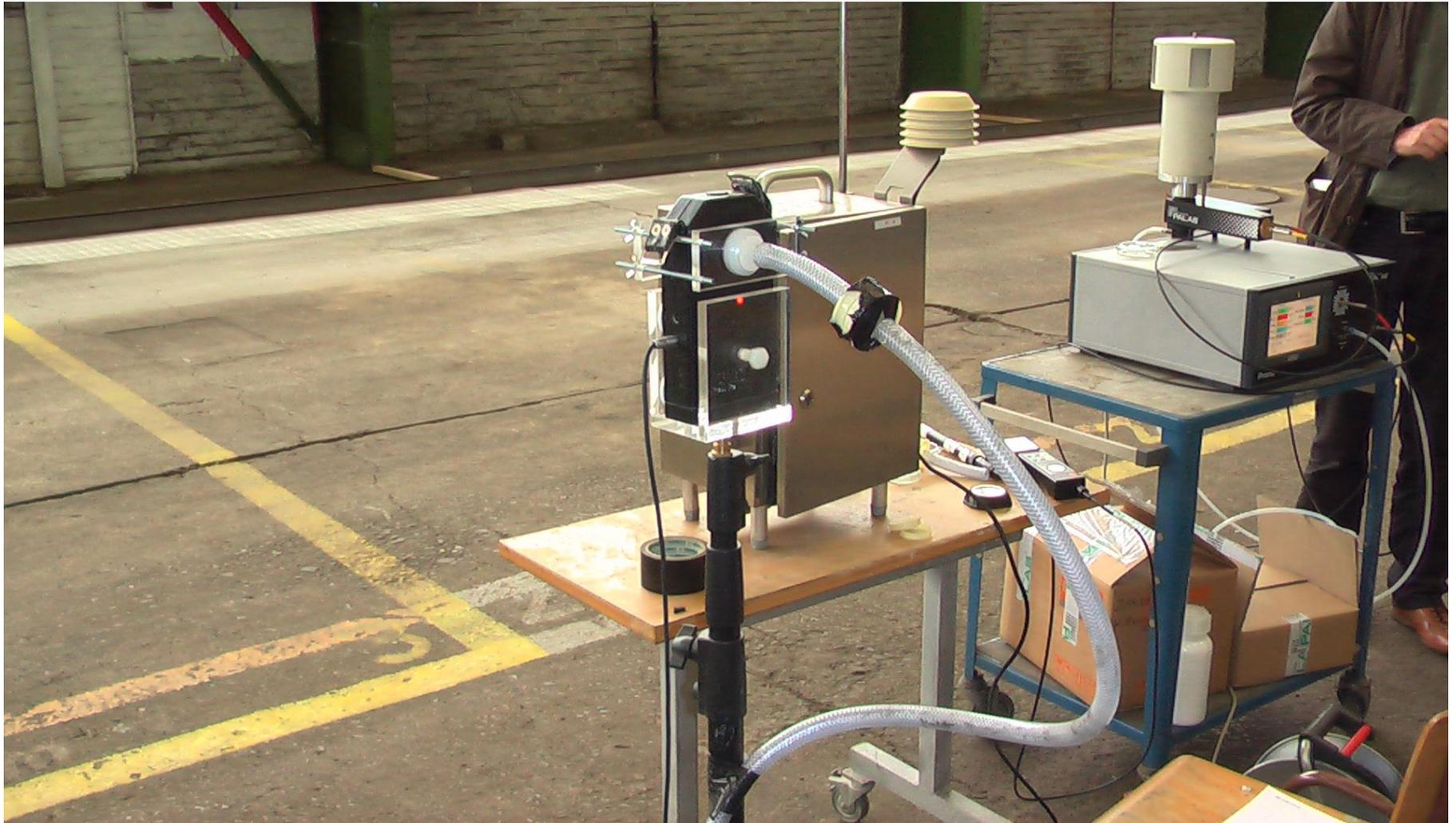
➤ **Abkehren des Prüfparcours**

- Die Durchführung erfolgt unter standardisierten Bedingungen, d.h. kritische Parameter (Geschwindigkeit, Sprühdichte Kehrbesenbesprühung etc.) werden fixiert, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen.
- Jede Kehrmaschine wird an 4 Positionen (beidseitig vorne und hinten) mit mobilen Partikelmonitoren ausgerüstet, um die wesentlichen Emissionsquellen zu erfassen.

2. Methodenbeschreibung

➤ Feinstaubmessung

- Die PM10-, PM2,5- und PM1-Fractionen werden in der Hallenluft kontinuierlich mittels eines stationären optischen Partikelspektrometers erfasst (Promo 2000 kombiniert mit dem Sensor 2300 - 32 Kanäle von 0,2 bis 105 µm, ein SIGMA 2 Kopf und Filterhalter). Die stationären Messgeräte sind in der Hallenmitte platziert.
- Die entsprechenden Feinstaubfraktionen werden über die je Kanal erfassten Partikelzahlen quantifiziert (automatische Berechnung nach DIN EN 12341 bzw. DIN EN 14907).
- Das Partikelspektrometer wird täglich auf ein klassisches gravimetrisches PM10-Immissionsmessgerät (LVS von Derenda, Berlin) referenziert.
- Die mobilen Partikelzähler sind kompakte Streulichtmessgeräte vom Type TM data (Hund) zur Erfassung des luftgetragenen Feinstaubes



2. Methodenbeschreibung

➤ **Der Standardprüfablauf**

1. Zu Beginn eines Messtages werden alle stationären Feinstaubmessgeräte mit Filter ausgestattet und in Betrieb genommen.
2. Vor dem Beginn einer Kehrmaschinenprüfung und nach Lüftung der Halle über Nacht wird die Hintergrundkonzentration an Staub in der Hallenluft bestimmt.
3. Danach wird der Anstieg des Staubgehaltes in der Hallenluft durch den nichtkehrenden Betrieb einer Kehrmaschine ermittelt. Die Kehrmaschine wird wieder in der Ausgangsposition platziert und ausgeschaltet.
4. Im Anschluss daran wird die Prüfstrecke mit der Kehrprüfstaubmischung gespurt.
5. Danach werden an drei definierten Positionen entlang der Strecke Streifen von 1m Breite abgesaugt und darüber die Massenkonzentration in g/m^2 für die aufgetragene Kehrprüfstaubmischung ermittelt

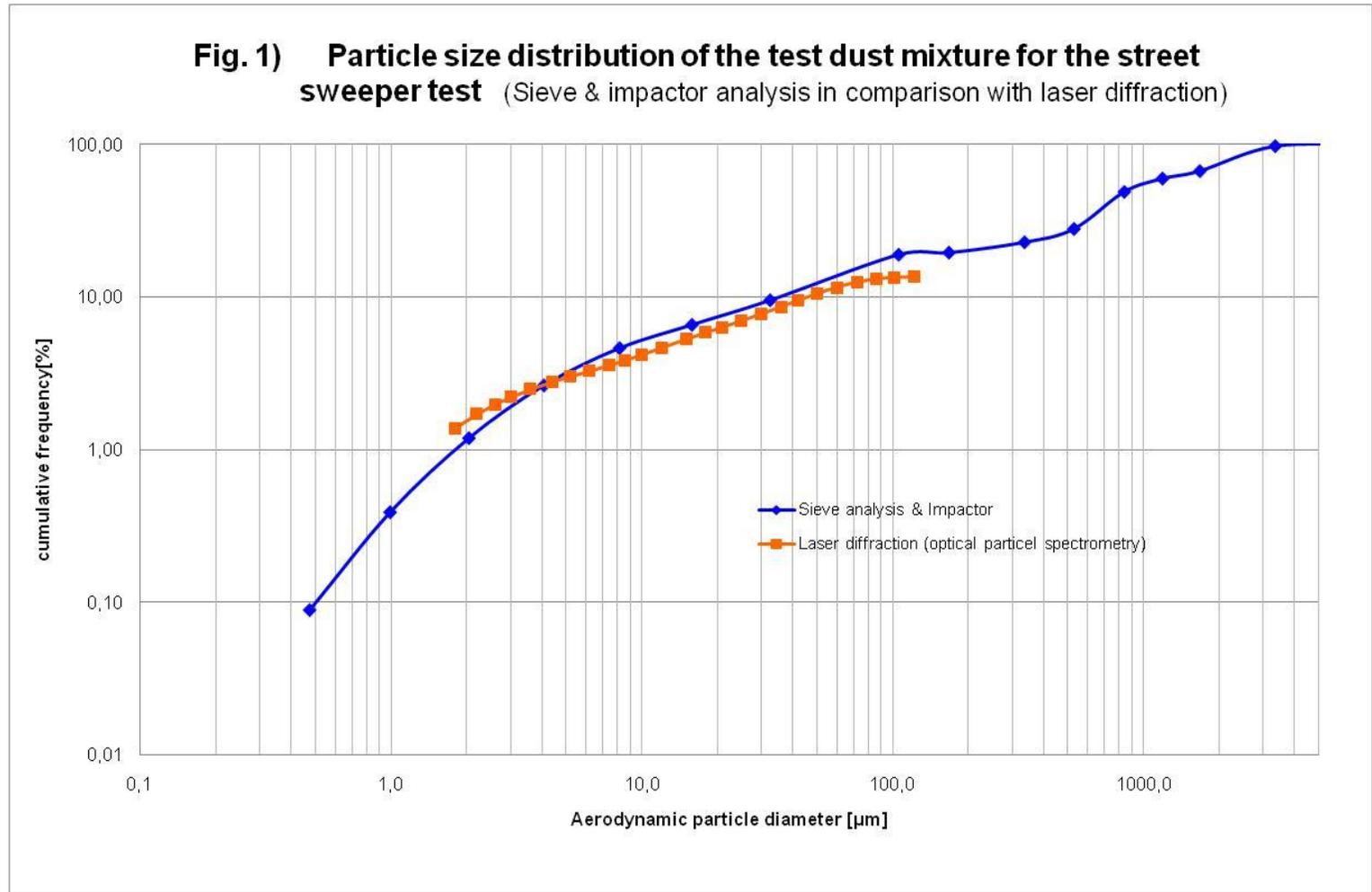
2. Methodenbeschreibung

6. Vor der Kehrmaschinenprüfung wird die Halle je nach Staubbelastung der Luft etwa 30 – 120 min belüftet, bis ein Konzentrationslimit von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM10 unterschritten ist.
7. Start der Kehrung der Spur mit den vorgegebenen bzw. beschriebenen Einstellungen bzw. der Kehrmaschinenfahrer versucht diese Zielwerte zu erreichen. Nach dem Abkehren werden die Schmutzlöse- und Aufnahme-einrichtungen ausgeschaltet und die Kehrmaschine fährt in die Ausgangsposition zurück (< 2 min).
8. Dann erfolgt die Erfassung der Aufnahmeeffizienz der Kehrmaschine für die ausgestreute Kehrprüfstaubmischung. Danach wird mit einem Industriesauger die Spur nachgereinigt, um die Prüfstrecke möglichst vollständig abzureinigen.
9. Danach wird der Prüfparcour für die nächste Prüfung präpariert und die Halle gelüftet.

3. Ergebnisse und Diskussion

➤ Partikelgrößenverteilung der Kehrprüfstaubmischung

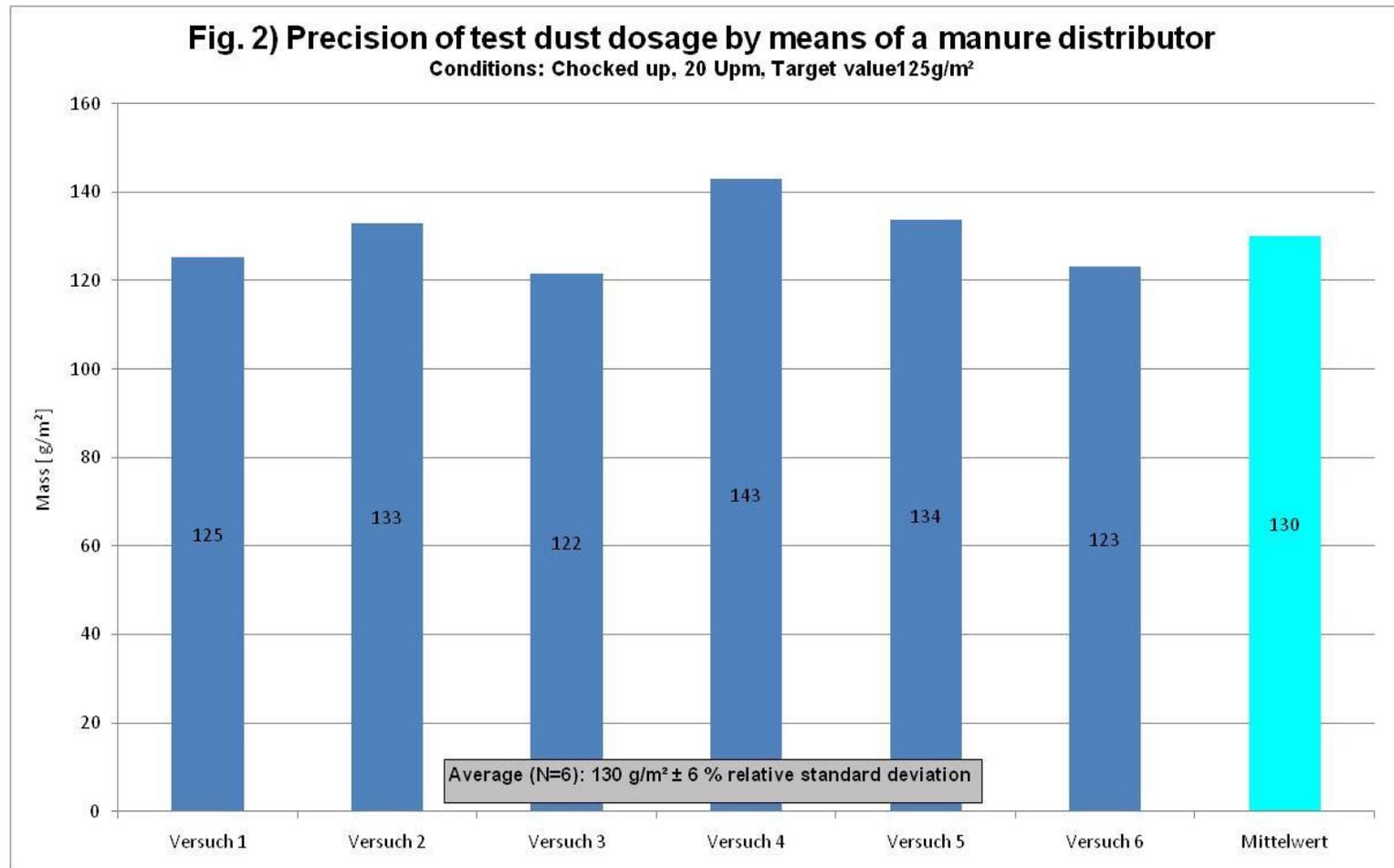
Der “Fein-
staubanteil”
d.h. die
Fraktion < 10
µm beträgt
4,8 % nach
der Impaktor
Analyse
mittels DMT
modifiziertem
Berner
Impaktor



3. Ergebnisse und Diskussion

➤ Präzision der Teststaubverteilung (mittels Walzenstreuer)

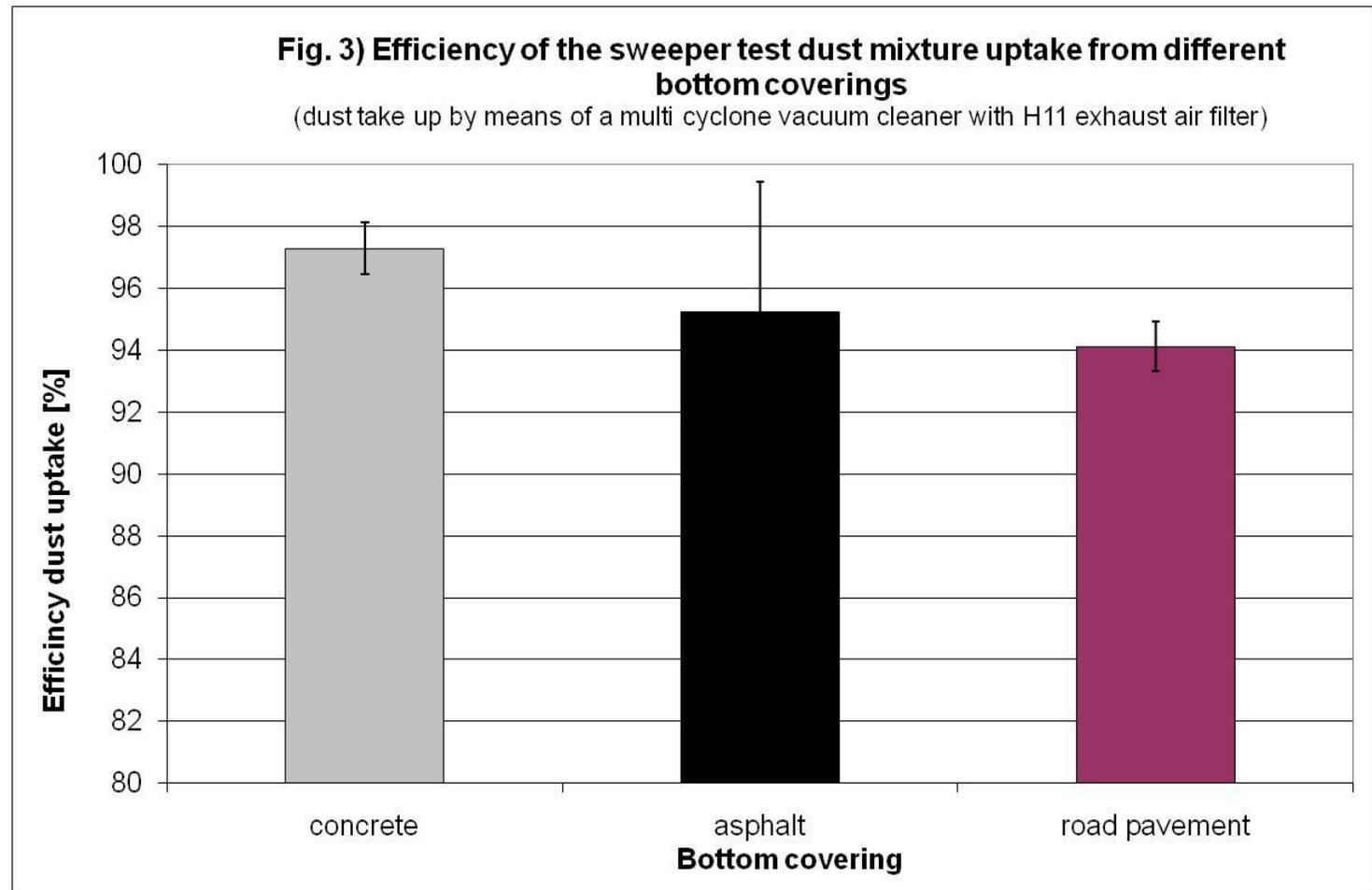
Die Verteilung per Kastenwalzenstreuer wies beim Schub- bzw. Zugbetrieb nur eine Genauigkeit von etwa $\pm 20\%$ relative Standardabweichung auf (im Vergleich mit der im aufgebockten Zustand).



3. Ergebnisse und Diskussion

➤ Einfluss des Bodenbelags auf die Staubaufnahme beim Staubsaugen

In der Prüfhalle bestand der Bodenbelag aus Beton. Deshalb wurde zur Bestimmung der Kehr-effizienz mit einem Korrekturwert von 0,97 gerechnet.

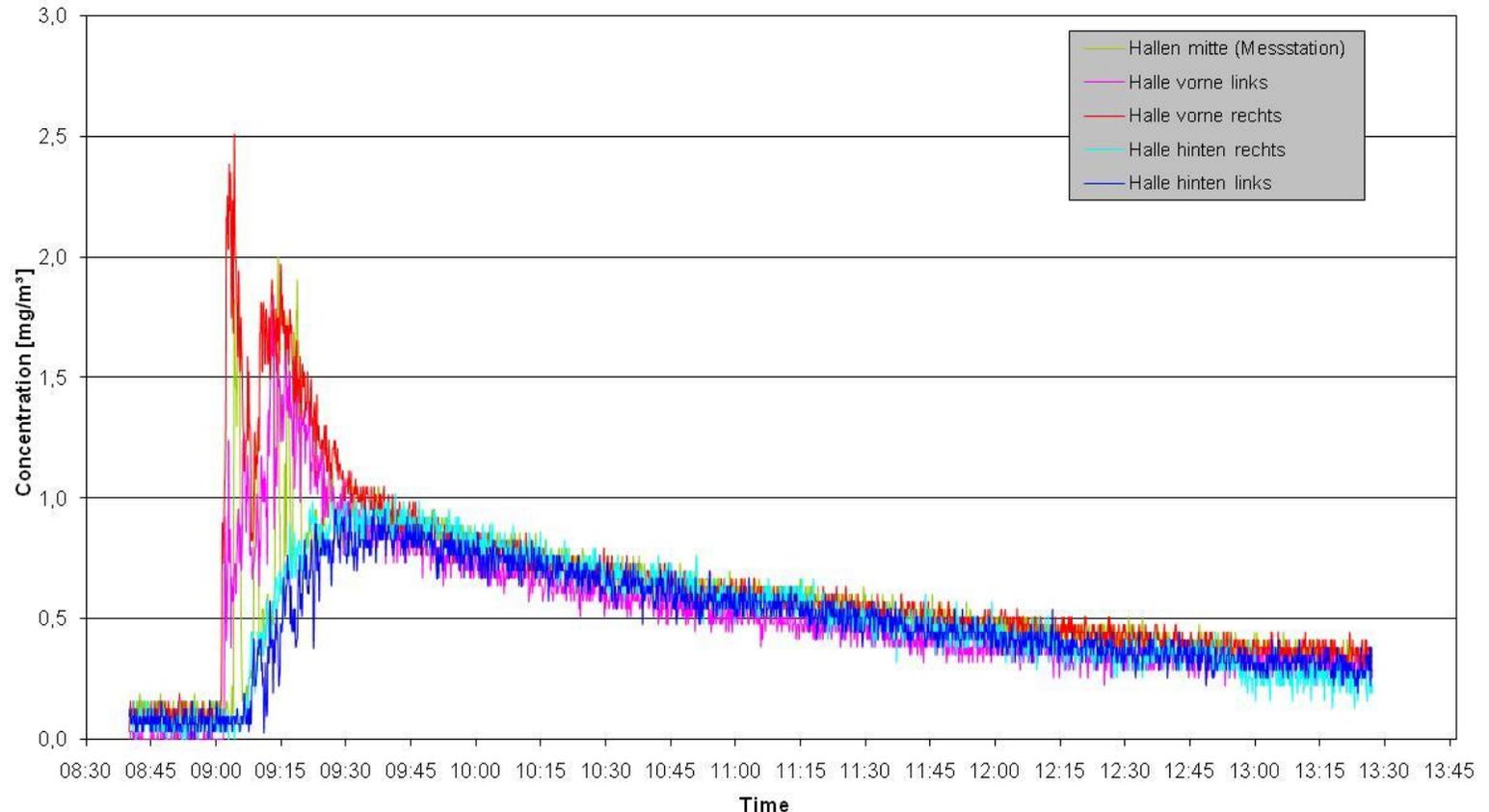


3. Ergebnisse und Diskussion

➤ Gleichverteilungsdauer des dispergierten Staubes in der Hallenluft

Fig. 4) Variation in time between 5 different positioned Tyndallometer
(15 min test dust dosage)

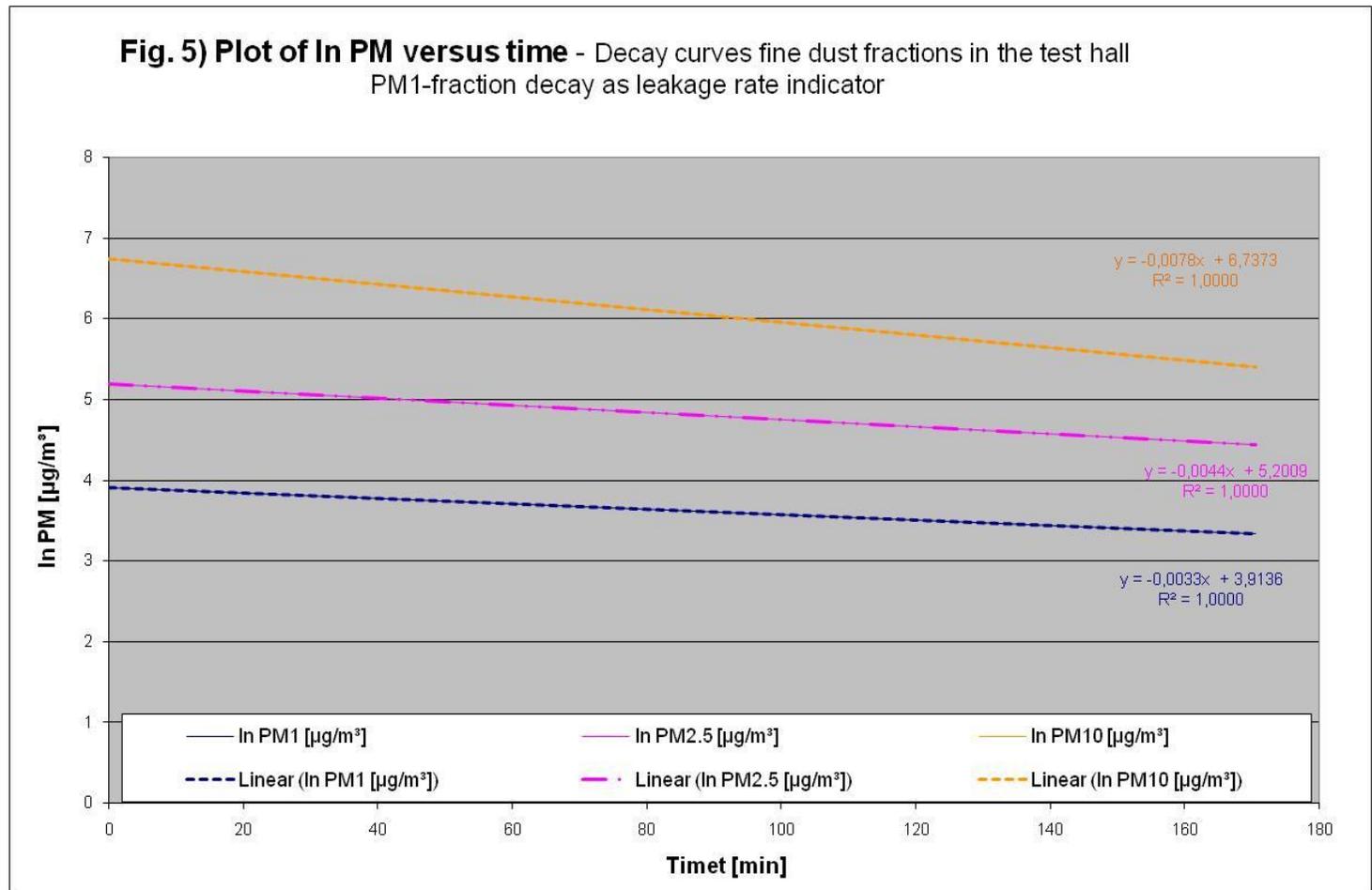
Nach knapp 15 min Mischdauer der Hallenluft zeigte sich zwischen den Messpositionen eine gleiche Konzentration des in der Luft dispergierten Prüfstaubes



3. Ergebnisse und Diskussion

➤ Bestimmung der Leckrate der Prüfhalle

Für ruhige Wetterlagen ergab sich als Leckrate n für die verwendete Prüfhalle ein Bereich von 0,2 bis 0,26 h^{-1} ($N = 3$). Entsprechend der EnEV 2007 liegt die Leckage für Standardgebäude bei $0,7 \text{ h}^{-1}$.



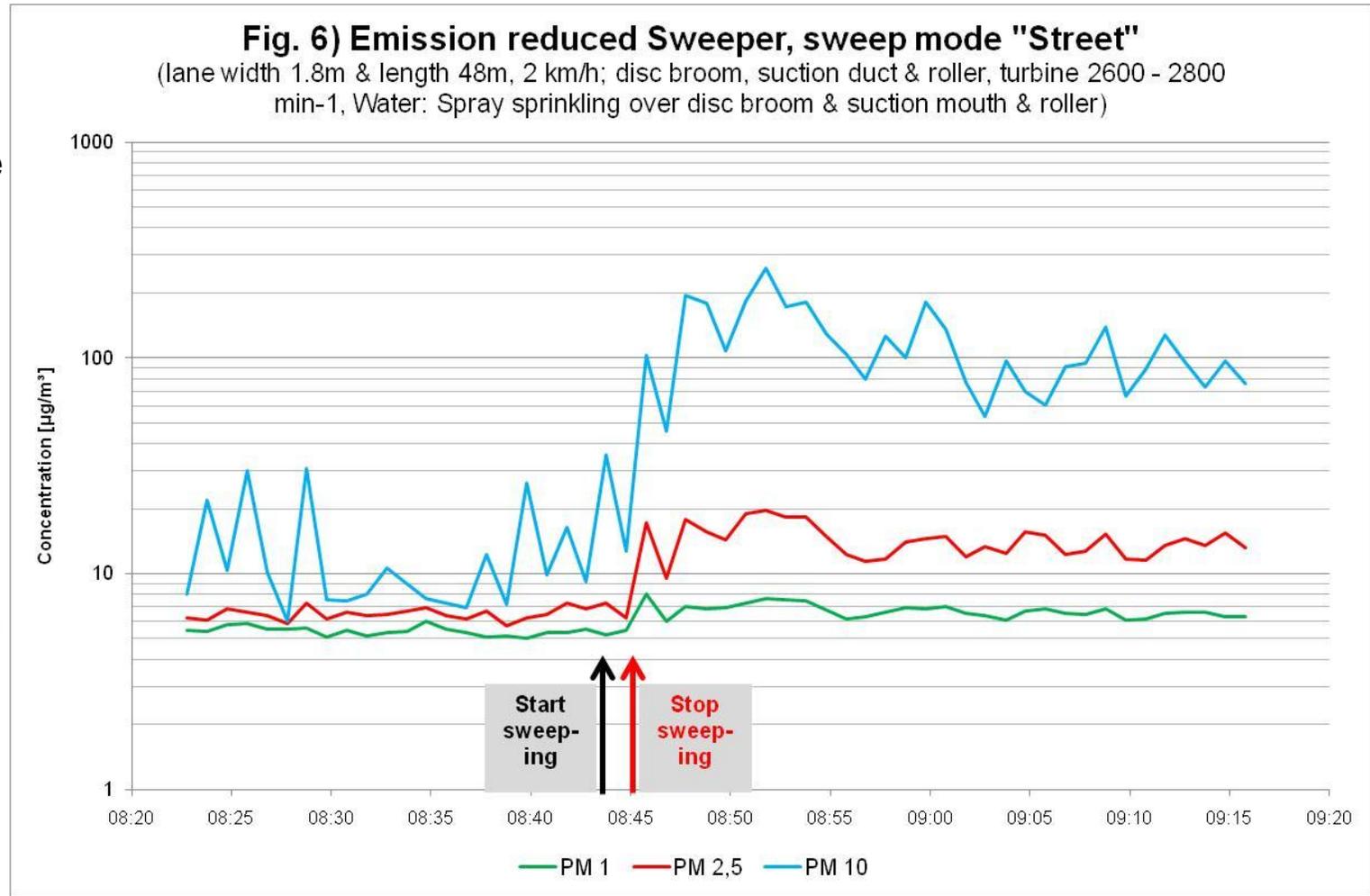
$$n = (\ln c_{t1} - \ln c_{t2}) / (t_2 - t_1) \quad [\text{EN ISO 12569}]$$

3. Ergebnisse und Diskussion

- In der beschriebenen Testhalle wurden von fünf emissionsgeminderten Straßenkehrmaschinen deren tatsächliche Emissionen überprüft.
- Die jeweiligen Feinstaubemissionen beim Aufkehren der Kehrprüfstaubmischung vom Prüfparcour wurden bestimmt als:
 - “Gesamtemission” durch Erfassung des Feinstaubgehaltes in der Hallenluft vor und nach der Kehrfahrt.
 - “Diffuse Emission” gemessen an vier Messpunkten um die Kehrmaschine herum während der Kehrprüfung.
 - Beide Arten an Simulationen der Kehrung (“Randstein” bzw. “Straßen”) wurden üblicherweise dreifach wiederholt.
- In der Abb. 5 ist ein Aufnahme einer “Gesamtemissionsmessung” wiedergegeben. Der Kurvenverlauf der drei erfassten Feinstaubfraktionen ist dargestellt. Unter Berücksichtigung der Hintergrundkonzentration (subtrahiert) beträgt der Anstieg der PM10-Fraktion bei dieser Kehrmaschine $74 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3. Ergebnisse und Diskussion

In Bezug zur
gekehrten
Fläche liegt die
Emissionsrate
bei diesem
Beispiel bei 20
(± 9) mg/m²
PM10. Die
entsprechen-
den Werte für
PM2,5 sind 1,9
(± 0,5) mg/m²
und 0,3 (± 0,1)
mg/m² für
PM1.



3. Ergebnisse und Diskussion

- Im Vergleich mit einer nicht emissionsgeminderten Kehrmaschine (Referenz) weist das vorherige Beispiel einen Emissionsminderungsgrad von 95 % auf (PM10).
- Die Messung der so bezeichneten “Diffusen Emissionen” um die Kehrmaschine herum, ergab nur qualitative Werte, die aber die Hauptquellen für Feinstaub indizieren.
- Eine quantitative Bestimmung der wirklichen diffusen Emissionen erfolgt durch Subtraktion der geführten Emissionen (Motorabgas, Bunkerabluft) von der Gesamtemission.
- Die Bunkerabluftermissionen der emissionsgeminderten Kehrmaschinen wurden unter standardisierten Bedingungen separat untersucht und die Abscheideleistungen der Partikelseparatoren bestimmt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Positionen der mobilen Feinstaubmonitore entlang der Kehrmaschine
Beispiel auf der rechten Seite einer emissionsgeminderten KM (TM data)



3. Ergebnisse und Diskussion

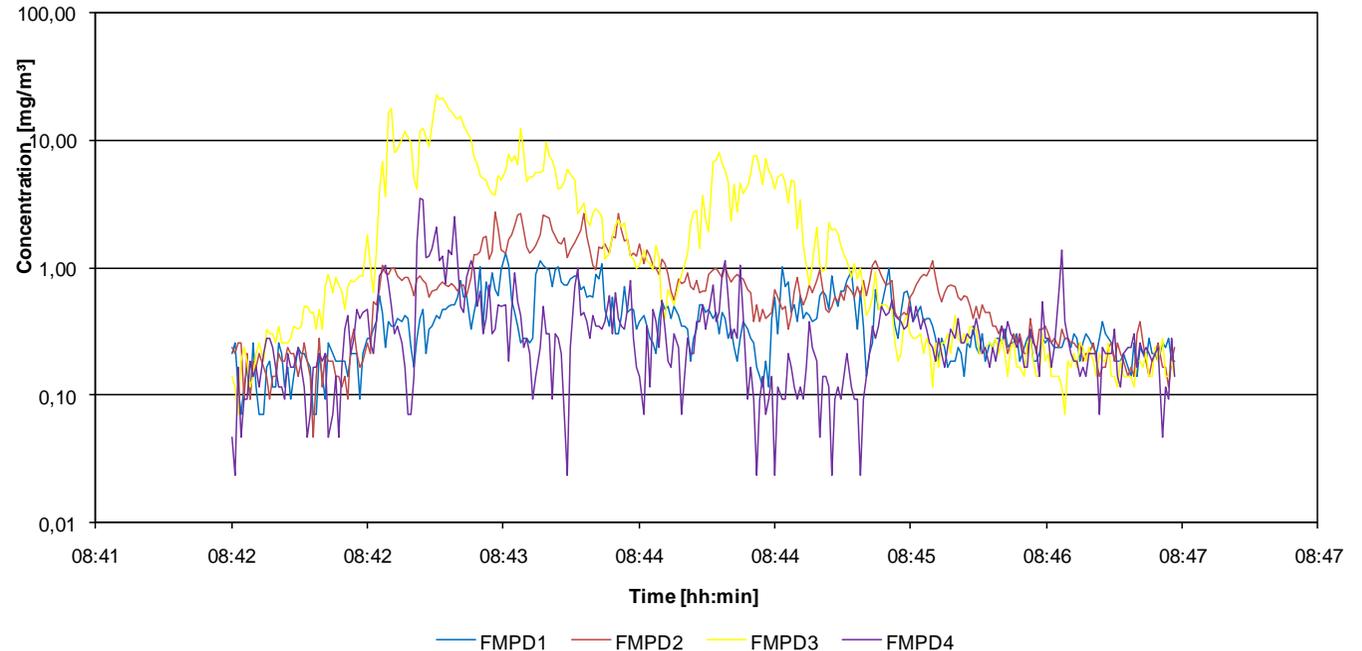
Beispiel zur Erfassung der lokalen „Diffusen Emissionen“ um die Kehrmaschine herum (Mittelwerte in mg/m^3):



0,4	6,9
1,1	0,5

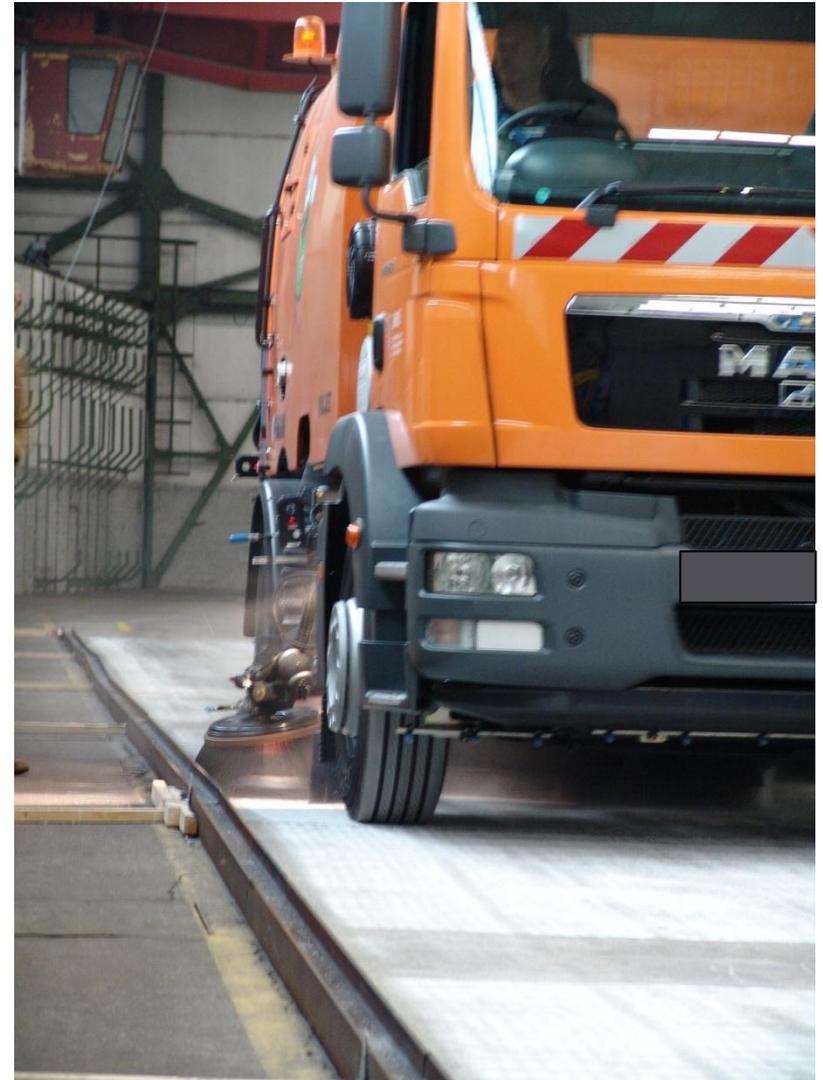
Pfeil in Fahrtrichtung

Fig. 7) Emission reduced Sweeper, sweep mode "Street"
 Mobile fine dust monitoring around the sweeper
 (lane width 1.8m & length 48m, 2 km/h; disc broom, suction duct & roller, turbine 2600 - 2800 min^{-1} , Water: Spray sprinkling over disc broom & suction mout)



3. Ergebnisse und Diskussion

Die Bilder zeigen den rotierenden Seitenbesen als Hauptquelle der diffusen Staubemissionen

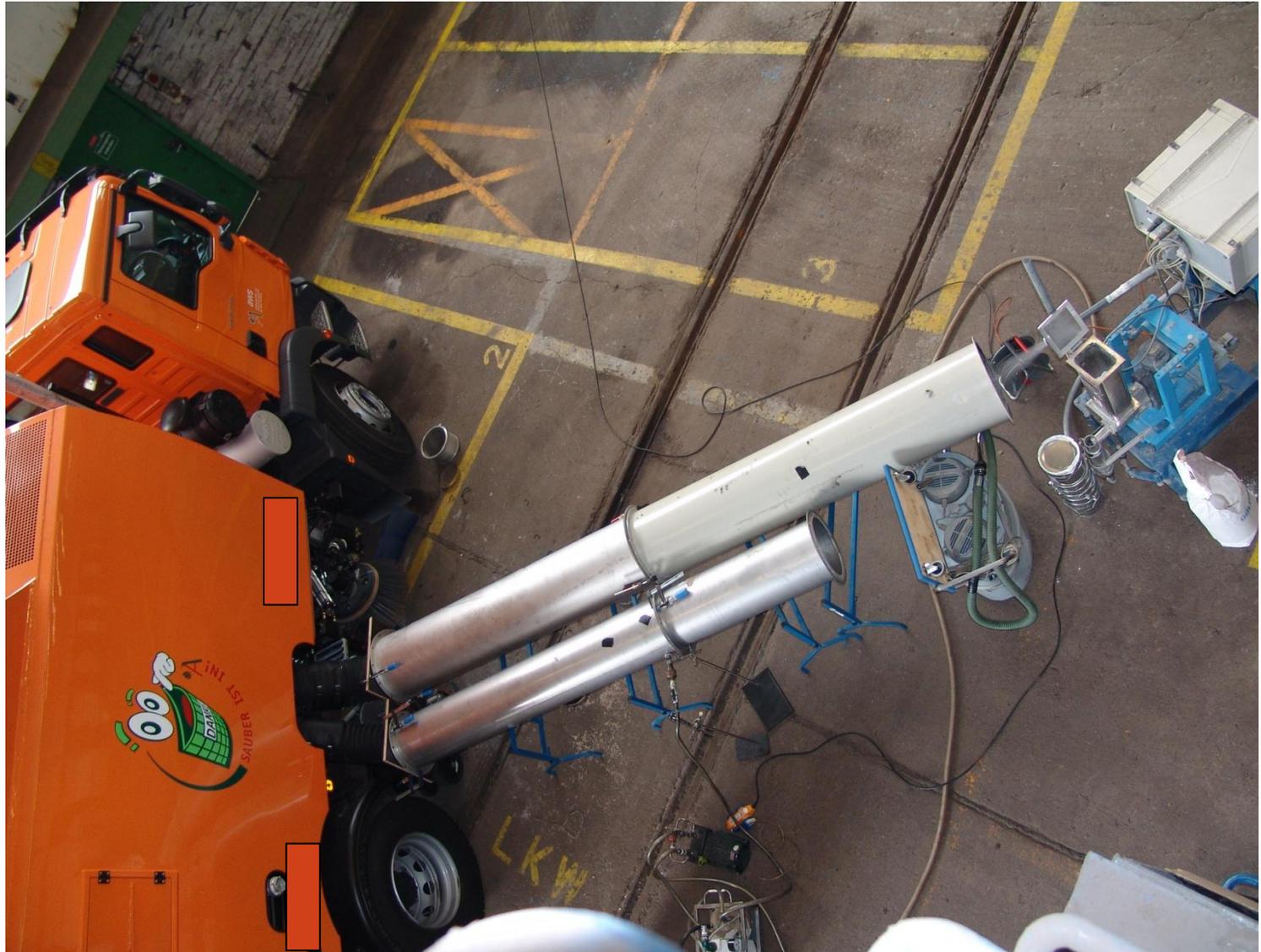


3. Ergebnisse und Diskussion

- **Bestimmung des Emissionsminderungsgrades der Feinstaubemission durch Reinigung der Bunkerabluft durch Staubseparatoren**
 - Die Prüfstaubkonzentration (Dolomite < 63 μm) im Rohgas beträgt 1000 mg/m³. Der Staub wird über einen Pressluftejektor in die vom Saugmund angesaugte Luft dispergiert.
 - Die Bestimmung des Staubgehaltes im Reingas (filtrierter Bunkerabluft) wurde mittels gravimetrische Staubprobenahme durchgeführt.
 - Die drei untersuchten emissionsgeminderten Kehrmaschinen mit filtrierenden Abscheidern wiesen Abscheidegrade zwischen 99,7 bis 99,996 % auf. Die Abscheideeffizienz hinsichtlich des Prüfstaubes lag bei einem elektrostatischer Staubabscheider bei der stationären Prüfung bei 82 %.

3. Ergebnisse und Diskussion

Das Bild zeigt den Prüfaufbau zur Bestimmung des Abscheidegrades des Partikelabscheiders einer emissionsgeminderten Kehrmaschine



3. Ergebnisse und Diskussion

- **Vergleichende Bestimmung des Emissionsminderungsgrades von emissionsgeminderten Kehrmaschinen**
 - Vergleichende Untersuchungen des Feinstaubemissionsminderungsgrades von fünf staubgeminderten Kehrmaschinen der 5 m³-Klasse (und größer) im Vergleich mit einer Referenzkehrmaschine ohne Staubminderungsmaßnahmen wurden durchgeführt.
 - Die drei untersuchten emissionsgeminderten Kehrmaschinen mit Filtern und eine auf einem Nassreinigungsverfahren basierende Maschine wiesen im Vergleich mit der Referenzkehrmaschine über 90% hin bis zu über 99% geringere Feinstaubemissionen auf (PM10).
 - Gleichzeitig zeigten diese Kehrmaschinen hinsichtlich der Kehrung der Kehrprüfstaubmischung Aufnahmeeffizienzen von mehr als 80% (bis 94% als absolute Werte)

4. Zusammenfassung

- Das beschriebene Prüfverfahren erlaubt eine verlässliche Bestimmung der Feinstaubemissionen von Kehrmaschinen beim Kehren ausgedrückt z. B. als “Masse PM10 pro Fläche” (im Gegensatz zu anderen Verfahren wie dem “ETV Canada Sweeper Performance Verification”).
- Es erlaubt eine Differenzierung geführter und diffuser Emissionen (-sraten).
- Relativ unabhängig von den Abmessungen einer (luftdichten) Prüfhalle können flächenbezogene Emissionsbestimmungen durchgeführt werden .
- Mittels dieses Verfahrens kann der Effekt technische Verbesserungen zur Emissionsminderung an mobilen Fahrzeugen quantifiziert werden.
- Die beschriebene Methode soll Bestandteil der Richtlinie VDI 2096 werden (“Emissionsgeminderte Kehrmaschinen”, VDI Arbeitsgruppe NA 134-01-65 AA)

Ich freue mich über ihre Fragen!

Mein Dank geht an die Herren:

Edgar Andrae,

Dietmar Glätzer

Johannes Schamberg

Willi Weidenfeller

sowie

Bernd Schröer (AWISTA Gesellschaft für Abfallwirtschaft und Stadtreinigung mbH,
Höherweg 222, 40233 Düsseldorf)

**und insbesondere an das Umweltbundesamt (UBA, Dessau) welches dieses
Projekt finanzierte !**

Ein weiteres Beispiel einer emissionsgeminderten Kehrmaschine,
die am Projekt teilnahm







Die Referenz-Kehrmaschine ohne Emissionsminderung



Ein weiteres Beispiel einer emissionsgeminderten Kehrmaschine, die am Projekt teilnahm

Ein Beispiel einer emissionsgeminderten KM ohne besondere Einhausung der Besen und der Walze aber entsprechender Eignung für den kommunalen Alltag



Ein weiteres Beispiel einer emissionsgeminderten Kehrmaschine, die am Projekt teilnahm

Eine stark emissionsgeminderten Kehrmaschine mit extra Einhausung im Kkehrbereich aber wahrscheinlich geringer Eignung für den kommunalen Alltag



Ausblick

Um die Alltagstauglichkeit einiger der geprüften emissionsgeminder-ten Kehrmaschinen im Innenstadtbereich zu überprüfen, sind Praxisuntersuchungen in einer großen Kommune als Folgeprojekt vom Umweltbundesamt geplant.