BERICHTE des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
SONDERHEFT 1/2009

Versuchsweiser Einsatz von Calcium-Magnesium-Acetat zur Reduzierung von Feinstaub in Halle (Saale)

HALLE Die Stadt

SACHSEN-ANHALT
Landesamt für Umweltschutz

Versuchsweiser Einsatz von Calcium-Magnesium-Acetat zur Reduzierung von Feinstaub in Halle (Saale)

Gemeinsames Projekt der Stadt Halle und des Landesamtes für Umweltschutz des Landes Sachsen-Anhalt

Berichte des
Landesamtes für Umweltschutz
Sachsen-Anhalt

2009 – Sonderheft 1

Herausgegeben
durch das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Immissionsschutz

in Zusammenarbeit mit
dem Umweltamt der Stadt Halle (Saale)

HALLE Die Stadt

SACHSEN-ANHALT
Landesamt für Umweltschutz

Mit diesem Sonderheft werden die Ergebnisse des versuchsweisen Einsatzes von Calcium-Magnesium-Acetat zur Reduzierung von Feinstaub in Halle (Saale) veröffentlicht.

Impressum

ISSN 1619-4071

Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt. - Halle (2009) Sonderheft 1:

Versuchsweiser Einsatz von Calcium-Magnesium-Acetat zur Reduzierung von Feinstaub in Halle (Saale)

Autoren / Redaktion:
Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Torsten Bayer
Katrin Eifert
Prof. Dr. Christian Ehrlich
Dr. Ulrich Zimmermann
Wigbert Albrecht

Stadt Halle
Silke Jacobi

Herausgeber und Bezug:
PSF 200 841, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt,
06009 Halle, Sitz: Reideburger Str. 47, 06116 Halle, Telefon (0345) 5704 0
E-mail: poststelle@lau.mlu.sachsen-anhalt.de

Diese Schriftenreihe wird kostenlos abgegeben und darf nicht verkauft werden. Der Nachdruck bedarf der Genehmigung.
Die Autoren sind für den fachlichen Inhalt ihrer Beiträge selbst verantwortlich. Die von ihnen vertretenen Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Version 1.0-2009 (Dezember 2009)

Diese Schrift darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben politischer Informationen oder Werbemittel. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Schrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner Gruppen verstanden werden könnte.

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung / Ausgangssituation 7

2 Fachlicher Hintergrund 9

3 Vorgehensweise und Methodik 10
3.1 Voruntersuchungen und sicherheitstechnische Aspekte 10
3.2 Technische Randbedingungen 15
3.3 Messtechnik und Messprogramm 21

4 Auswertung der Daten und Bewertung der Ergebnisse 25
4.1 Allgemeine Hinweise 25
4.2 Charakterisierung des Versuchszeitraumes 25
4.3 Partikel PM_{10}-Konzentrationen in Abhängigkeit von der CMA-Ausbringung 26
4.3.1 Theoretische Grundlagen 26
4.3.2 Vergleich der PM_{10}-Tagesmittelwerte (Probenahmeverfahren) 28
4.3.3 Analyse und Vergleich von zeitlich höher aufgelösten PM_{10}-Messwerten 31
4.4 Bewertung und Diskussion 41

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 44

Danksagung 45

Literaturverzeichnis 46

Anhang 47

1 Aufgabenstellung / Ausgangssituation

Derzeitige Aktivitäten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung in der Stadt Halle (Saale) resultieren aus der Belastung durch Feinstaub mit der Partikelgröße von bis zu 10 Mikrometer (PM_{10}). Dabei erweist sich im Stadtgebiet Halle (Saale) die Einhaltung des seit dem 01.01.2005 gültigen Tagesmittelwert von 50 µg/m³ (zulässig 35 Überschreitungen im Jahr) als problematisch /6/. Zur Gewährleistung der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte für Partikel PM_{10} in Halle (Saale) wurde im Jahr 2006 ein Luftreinhalteplan mit integriertem Aktionsplan /5/ erstellt und in Kraft gesetzt. Dieser Plan beinhaltet verursacherbezogene emissionsmindernde Maßnahmen zur kurzfristigen und dauerhaften Reduzierung der Partikel PM_{10}.

Vorausgegangene Ursachenermittlungen bestätigen den Einfluss regionaler Emissionsquellen, Partikel PM_{10}-Ferntransporte und städtischer Emittentengruppen, wobei im städtischen Bereich der motorisierte Straßenverkehr als Hauptverursacher in Halle (Saale) zu sehen ist /5/. Mit Hilfe eines komplexen Maßnahmenkatalogs soll die Partikel PM_{10}-Belastung deutlich gesenkt und die Einhaltung der Grenzwerte für Partikel PM_{10} sichergestellt werden. Lokale Minderungspotenziale werden in Halle (Saale) vorrangig im Verkehrsbereich gesehen. Während der Luftreinhalteplan neben anlagen- und abgasbezogenen Maßnahmen auch Maßnahmen zur städtischen Verkehrsentwicklung enthält, werden im Aktionsplan der Stadt Halle kurzfristig zu ergreifende Minderungsmaßnahmen, wie z. B. die regelmäßige Nassreinigung und Geschwindigkeitsreduzierung im Überschreitungsgebiet der Merseburger Straße umgesetzt. Wesentliche Ziele der verkehrsbezogenen Maßnahmen sind die Reduzierung der motorbedingten und nicht motorbedingten Emissionen wie Abrieb (Bremsen-, Reifen-, Straßenabrieb) und Wiederaufwirbelungen. Da in meteorologisch ungünstigen Jahren auch zukünftig in Halle (Saale) die Gefahr der Überschreitung des Tagesmittelgrenzwertes für Partikel PM_{10} bestehen wird, müssen auch weiterhin verursacherbezogene Maßnahmen zur Reduzierung der Partikel PM_{10}-Belastung vorgehalten und fortgeschrieben werden. Im lokalen Bereich bietet jedoch bislang die komplizierte Verkehrswegesituation in der Stadt Halle nur wenige Eingriffsmöglichkeiten für die Umsetzung dauerhaft wirksamer und verhältnismäßiger Maßnahmen.

Als eine erfolgreiche Maßnahme erwies sich in Skandinavien und Österreich im Winter der Einsatz von Calcium-Magnesium-Acetat (CMA), auch Feinstaubkleber genannt, als alternatives Streumaterial, dem eine bindende Wirkung des verkehrsbedingten Feinstaubs nachgewiesen werden konnte. Erfahrungen zeigen, dass unter den dort gewählten Einsatzbedingungen Reduktionen der Partikel PM_{10}-Konzentration um durchschnittlich 35 Prozent erzielt werden können. Das als flüssige Lösung vorliegende CMA wird dabei auf die Straßenoberfläche aufgesprüht und wirkt ebenfalls der Bildung von Eisschichten, Glätte und festgefahrenen Schneedecken vorbeugend entgegen /1/-/4/.

Inwieweit Calcium-Magnesium-Acetat auch zur Reduzierung der Partikel PM_{10}-Belastung unter den in der Stadt Halle (Saale) vorhandenen verkehrlichen Bedingungen beitragen kann, sollte in einem praxisnahen Versuch im Überschreitungsgebiet der Merseburger Straße unter messtechnischer Begleitung durch das Landesamt für Umweltschutz des Landes Sachsen-Anhalt (LAU) untersucht werden. Dazu wurde der Stadt Halle (Saale) auf Initiative eines Bürgers, Herrn Gobsch, Calcium-Magnesium-Acetat für den versuchsweisen Einsatz unter Vermittlung der RAW Handel und Beratungs GmbH durch den dänischen Hersteller NORDISK ALUMINAT A/S kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Als ursprünglicher Zeitraum zur Durchführung des Versuchs war das Winterhalbjahr vorgesehen, da in dieser Zeit die meisten Überschreitungen des PM_{10}-Tagesmittelwertes erfolgen. Durch die Firma RAW wurde jedoch ein Test während der Winterdienstphase für wenig sinnvoll angesehen, da CMA wasserlöslich ist und somit die feinstaubbindende Wirkung bei feuchter Fahrbahn schnell verloren geht. Da dadurch nach kurzer Zeit kein reines CMA mehr auf der Fahrbahnoberfläche des Versuchsgebietes vorhanden wäre, hätte dies die Verwertbarkeit der Messergebnisse in Frage gestellt. Des Weiteren hätte die Gefahr des Vermischens zwischen CMA und dem eigentlich im Winterdienst zum Einsatz kommenden Streumaterialien (Natrium- und Magnesiumchlorid) in den angrenzenden Straßen und Flächen bestanden.
Insofern handelt es sich um einen unter völlig anderen Bedingungen stattfindenden Versuch.

Die gesamte Projektdauer umfasste den Zeitraum von Mitte September 2008 bis Ende Februar 2009. Die Ausbringung des CMA sollte dabei vom 15.09.2008 bis 10.10.2008 erfolgen. Der eigentliche CMA-Ausbringungszeitraum wurde dann aber im Einvernehmen aller Beteiligten um einen Monat bis zum 17.11.2008 verlängert. Über die aktive Versuchsphase hinaus erfolgten durch das LAU bis Ende Februar 2009 Vergleichsmessungen.

Als Versuchsstrecke wurde der Straßenabschnitt in der Merseburger Straße im Bereich der Verkehrsmessstation des Luftüberwachungssystems Sachsen-Anhalt ausgewählt. Dieser Abschnitt ist ein wesentlicher PM_{10}-Belastungsschwerpunkt in Halle (Saale) mit Nähe zum Riebeckplatz, dem verkehrsreichsten Knotenpunkt der Stadt Halle (Saale).
Der Riebeckplatz ist der historische Knotenpunkt aller überregionalen Straßen, gebündelt auf den heutigen Bundesstraßen B 6 Süd (Leipziger Chaussee), B 91 (Merseburger Straße), B 80 (Franckestraße), B 6 Nord (Magdeburger Chaussee). Zusätzlich erreichen direkt die Verkehre aus der Delitzscher Straße als L165 den Riebeckplatz, sowie indirekt über die genannten Bundesstraßen die Fernverkehre der B 100 (Berliner Chaussee), Berliner Straße, Döläuer Straße, Posthornstraße.

Die Versuchsorganisation und –durchführung erfolgte durch die Stadt Halle (Saale) unter Mitwirkung der Stadtwirtschaft GmbH Halle und der Polizei. Bezüglich der Verkehrssicherheit wurden im Vorfeld des versuchsweisen Einsatzes von CMA bei der Halleschen Verkehrs AG und der DEKRA Automobil GmbH Untersuchungen zu möglichen Einflüssen des aufgebrachten CMA auf die Bremseigenschaften von Straßenbahn und Pkw durchgeführt. Genaue Angaben der Zuständigkeiten sind dem Anhang der Tabelle A 1 zu entnehmen.

Die Bevölkerung der Stadt Halle (Saale) wurde im Vorfeld des versuchsweisen Einsatzes von CMA über die Versuchsdurchführung und mögliche verkehrstechnische und sonstige Beeinträchtigungen (Hinweis auf möglichen Essiggeruch) während des Versuchsablaufes informiert.

2 Fachlicher Hintergrund

CMA wurde bereits früher aufgrund seiner taumittelähnlichen und umweltverträglichen Eigenschaften in den USA und Skandinavien als Alternative zu herkömmlichen Streumaterialien im Winterdienst angewendet. Bezüglich der feinstaubbindenden Wirkung von CMA sind jedoch nur wenige Aussagen aus der Literatur bekannt.

Untersuchungen in Schweden an Versuchsstrecken mit und ohne CMA /1/ weisen Reduktionen von PM_{10}-Konzentrationen zwischen 15% und 60% auf der mit CMA behandelten Strecke aus. Die durchschnittliche Reduktion der PM_{10}-Konzentration wird mit 35% beschrieben. Auch die Analyse der Überschreitungen des gültigen Tagesmittelwertes von 50 µg/m³ ergab eine positive Wirkung durch den Einsatz von CMA. Während im Untersuchungszeitraum von 21 Tagen auf der unbehandelten Versuchsstrecke 12 Überschreitungen festgestellt wurden, waren es auf der mit CMA behandelten Versuchsstrecke nur 3 Überschreitungstage.

Weitere Effekte aus den schwedischen Untersuchungen sind folgend dargestellt:

- Bei Betrachtung der einzelnen PM_{10}-Tagesverläufe im Untersuchungszeitraum zeigte sich, dass zum Ende eines Tages der PM_{10}-Reduktionseffekt abnahm. Zurückgeführt wurde das auf den stetigen Wegtransport/Wegleiten des aufgebrachten CMA von der Teststrecke durch Reifen und die Verdunstung des CMA.
- Bei Aufbringen des CMA mehrere Tage hintereinander stieg der PM_{10}-Reduktionseffekt noch weiter an.
- Die Luftfeuchtigkeit nimmt voraussichtlich Einfluss auf die hygroskopische Eigenschaft des CMA.

Untersuchungen in Österreich und Südtirol im Rahmen eines EU-Life-Projektes KAPA GS (**K**lagenfurts **A**nti **P**M_{10} **A**ktionsprogramm mit **G**raz und Bozen/**S**üdtirol) sollten verschiedene verursacherbezogene Maßnahmen aus den Bereichen Verkehr und Hausbrand, unter anderem auch die Anwendung von CMA als Streumaterial im Winterdienst, testen, die bei einer dauerhaften Umsetzung zu einer spürbaren Entlastung der Feinstaubsituation beitragen könnten /3/.

In Klagenfurt/Österreich erfolgten Versuchreihen zum Ausbringen von CMA in den Wintermonaten der Jahre 2005 bis 2007. Während sich im Winter 2005/2006 das Aufsprühen von CMA auf wesentliche Hauptverkehrsstraßen beschränkte, wurde in den darauffolgenden Wintermonaten der Versuchsbereich auf die Klagenfurter Innenstadt ausgedehnt.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde festgestellt, dass die vom Verkehr verursachten PM_{10}-Immissionen in den Wintermonaten (Oktober – Mai) um ~ 20% reduziert werden konnten. Das Reduktionspotential für den Aufwirbelungsanteil lag bei ~ 30%. Eine modelltechnische Betrachtung der gesamten PM_{10}-Belastung ergab eine Reduktion von ~ 7%.
Vergleiche der Szenarien mit und ohne CMA-Ausbringung für das Jahr 2006/2007 weisen für den PM_{10}-Jahresmittelwert ein durchschnittliches Reduktionspotential zwischen 0,5 und 1 µg/m³ (Wintermonate: 1 bis 2 µg/m³), an Hauptverkehrsstraßen und wichtigen Kreuzungspunkten sogar von ~ 3 µg/m³, aus. Unter Annahme einer regelmäßigen Ausbringung des CMA in den Wintermonaten kann das durchschnittliche Reduktionspotential für den PM_{10}-Jahresmittelwert an entsprechenden Straßenabschnitten (~ 7 µg/m³) noch erhöht werden.
Weiterer Untersuchungsbedarf besteht zum optimalen Zeitpunkt der Ausbringung des CMA, der Konzentrationsmenge, der Ausbringungshäufigkeit, der Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit und Temperatur und der Verkehrssicherheit.

Weitere Effekte wurden analysiert /3/; /4/; /7/:

- Durch das aufgesprühte CMA können sich die Bremseigenschaften eines Fahrzeuges verändern. Erste Griffigkeitsuntersuchungen in Klagenfurt ergaben jedoch keine wesentliche Beeinträchtigung der Bremseigenschaften durch CMA.
- CMA verlängert den Zeitraum des Nasszustandes einer Straße.
- Unterschiedliche Außentemperaturen haben keinen nachweisbaren Einfluss auf die Viskosität des CMA.

3 Vorgehensweise und Methodik

3.1 Voruntersuchungen und sicherheitstechnische Aspekte

Während des CMA-Großversuches in Klagenfurt war aufgrund von Verkehrsunfällen auf der Versuchsstrecke der Verdacht entstanden, dass durch das CMA die Fahrbahnverhältnisse negativ beeinflusst werden könnten. Im Auftrag des Magistrats der Stadt Klagenfurt, Abteilung Umweltschutz wurden im November 2007 Griffigkeitsuntersuchungen /7/ durchgeführt. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass das CMA unabhängig von der ausgebrachten Streumenge keine wesentliche Beeinträchtigung der Griffigkeit erzeugt.

Entsprechende sicherheitstechnische Aspekte galt es auch in der Stadt Halle (Saale) im Rahmen von Voruntersuchungen abzuklären. Da innerhalb des Versuchgebietes in Halle (Saale) im Gegensatz zur Klagenfurter Versuchsstrecke auch Straßenbahngleise verlaufen und keine Erfahrungen zum Bremsverhalten von Straßenbahnen unter der CMA-Einwirkung vorlagen, mussten aus Gründen der Verkehrssicherheit sowohl Bremsversuche mit dem Pkw als auch mit der Straßenbahn durchgeführt werden.

<u>Ergebnisse des Straßenbahn-Bremsversuches</u>

In Halle wird der Straßenbahnverkehr durch die Hallesche Verkehrs AG (HAVAG) ausgeführt.
Auf dem Betriebsgelände der HAVAG in der Freiimfelder Straße 74 ist eine aus mehreren nebeneinander liegenden Gleisen bestehende Gleisanlage vorhanden. Die gerade verlaufende Gleislänge beträgt jeweils ca. 240 m. Die HAVAG hatte sich bereit erklärt, die Bremsversuche dort auszuführen.

Die Bremsversuche wurden am Vormittag des 20.08.2008 bei trockener windiger Witterung durchgeführt. Vorgesehen war je ein Bremsversuch bei Tempo 30 und 50 km/h bei folgenden Zuständen des Gleises

1. unbehandelt, trocken
2. mit CMA benetzt – feucht
3. mit CMA benetzt – trocken.

Eingesetzt wurde ein aus zwei TATRA-Triebwagen (je 18,1 t) bestehender Zug. Vor jedem Bremsversuch wurde der Triebwagen beschleunigt. Beim Erreichen der jeweiligen Geschwindigkeit von 30 oder 50 km/h erfolgte eine Vollbremsung unter maximalem Einsatz der elektrischen Bremse. Der Bremsweg wurde hierbei über ein elektronisches direkt am Straßenbahnzug installiertes Messgerät erfasst.

Abbildung 3.1.1: Straßenbahn auf CMA benetzten Testgleis

Das CMA wurde mit einer 5 l – Pumpspritze direkt auf die Gleise aufgetragen. Auf den Gleisen trocknete das CMA trotz der günstigen Witterungsbedingungen nur sehr langsam. Nach 20 min waren immer noch feuchte Stellen auf den Gleisen vorhanden.

Abbildung 3.1.2: CMA-Auftrag und Gleisbenetzung

Nachfolgend sind die Ergebnisse des Straßenbahnbremsversuches zusammengefasst. Die Details sind im Anhang der Tabelle A 7 zu entnehmen.

Tabelle 3.1.1: Übersicht der Ergebnisse des Straßenbahnbremsversuches (Quelle: Hallesche Verkehrs AG)

Elektronische Messung	**trocken**		**CMA (nass)**		**Wasser**	**CMA (angetrocknet)**
	V1	**V2**	**V1**	**V2**	**V1**	**V1**
Geschwindigkeit (km/h)	46,0	33,2	44,9	33,5	44,8	45,7
Bremsweg (m) max. Soll	82,4	47,5	79,5	48,8	79,5	81,0
Bremsweg ist (m) IST	51,9	30,6	71,6	40,5	48,6	**95,8**
Bemerkungen			Gleitschutz-eingriff	Gleitschutz-eingriff		Gleitschutz-eingriff

Da der Straßenbahnzug bei mit CMA befeuchteter Strecke ins Rutschen kam, wurde während der Bremsvorgänge hier automatisch Sand auf die Gleise gestreut. Um bei den folgenden Versuchen unverfälschte Ergebnisse zu erzielen, wurden jeweils die Gleisabschnitte gewechselt.

Abbildung 3.1.3: CMA benetztes Gleis nach Gleitschutzeingriff

Bei CMA-feuchten Gleisen wurde der maximale Soll-Bremsweg noch eingehalten. Bei angetrocknetem CMA wurde der maximale Soll-Bremsweg erheblich überschritten. Auch hierbei wurde automatisch Sand ausgestreut, da der Straßenbahnzug rutschte.

Um einen Vergleich zwischen dem Bremsverhalten bei CMA-benetzten und mit Wasser befeuchteten Gleisen zu erhalten, wurde ein weiterer Bremsversuch nach Wasserbefeuchtung durchgeführt.

Abbildung 3.1.4: Benässung des Gleises mit Wasser

Beim Vergleich der erzielten Bremswege ist ersichtlich, dass der Bremsweg bei trockenen und mit Wasser befeuchteten Gleisen annähernd gleich ist. Werden die Gleise mit CMA benetzt, verlängert sich der Bremsweg erheblich. Solange das CMA noch nicht abgetrocknet ist, wird der Soll-Bremsweg sowohl bei 30 als auch bei 50 km/h noch eingehalten. Trocknet das CMA ab, wird der Soll-Bremsweg erheblich überschritten.

Um Gefahren für die Straßenverkehrsteilnehmer auszuschließen, bestand nach der Vorlage dieser Ergebnisse die Notwendigkeit, Bremsversuche mittels Pkw durchzuführen.

Ergebnisse der Pkw-Bremsversuche

Da die Pkw-Bremsversuche auf Grund des hohen Verkehrsaufkommens nicht auf der vorgesehenen CMA-Versuchsstrecke in der Merseburger Straße ausgeführt werden konnten, wurde die Zufahrt der B 80 zwischen Weststraße und Kaolinstraße durch die Polizei abgesperrt.

Abbildung 3.1.5: Sicherung der Teststrecke durch die Polizei

Das CMA wurde durch die Stadtwirtschaft GmbH Halle mittels Abschnitt 3.2 beschriebener Gerätetechnik ausgebracht.

Die Bremsversuche fanden am 25.08. und 27.08.2008 jeweils vormittags statt. Zunächst war geplant, die Bremsversuche an nur einem Tag auszuführen, da es aber am ersten Tag zeitweise leicht regnete, erfolgte zwei Tage später eine Wiederholung bei trockenem Wetter. Die Ausführung und Auswertung erfolgte durch Herrn Dr. Matzen, DEKRA Automobil GmbH mit einem Pkw VOLVO V 70 und ein im Fahrzeug angebrachtes Messgerät VZM 100, der Firma MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG.

Abbildung 3.1.6: CMA-Ausbringung und Testfahrzeug

Bei jedem Bremsvorgang wurde die Bremsverzögerung gemessen.

Insgesamt erfolgten je fünf Bremsvorgänge (jeweils Vollbremsungen nach Beschleunigung auf 50 km/h bis zum Stand):

- auf regenfeuchter Fahrbahn,
- auf regenfeuchter mit CMA benetzter Fahrbahn,
- auf trockener Fahrbahn,
- auf trockener mit CMA-benetzter Fahrbahn.

Abbildung 3.1.7: CMA-benetzte Fahrbahn

Nach Auswertung der Ergebnisse (Details siehe Anhang Tabelle A 8) wurde durch Herrn Dr. Matzen festgestellt, dass bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2% (0,02) das Ausbringen des CMA keine signifikanten Veränderungen der Haftung zwischen Reifen und Fahrbahn verursacht.
Bei einer Erhöhung der Irrtumswahrscheinlichkeit stellen sich möglicherweise Tendenzen dar:

a. nach CMA-Aufbringung und Abtrocknen der Fahrbahn tendieren die Reibungswerte zu niedrigeren Werten gegenüber der trockenen unbehandelten Fahrbahn,
b. die CMA-Behandlung liefert bei nassen Fahrbahnen tendenziell einen höheren Reibungswert.

<u>Fazit</u>

Nach Auswertung der Straßenbahn- und Pkw-Bremsversuche konnte der CMA-Versuch im Einverständnis aller Beteiligten auf der vorgesehenen Teststrecke durchgeführt werden. Voraussetzung, war jedoch, dass sichergestellt wird, dass eine Benetzung der Straßenbahngleise mit CMA ausgeschlossen wird.

3.2 Technische Randbedingungen

Calcium-Magnesium-Acetat

Entsprechend den Angaben im Datenblatt ist „ICE & DUST-AWAY“ eine Lösung aus Calcium Magnesium Acetat (CMA) mit der CAS Nr.: 110518-63-3 und mit dem nordischen Umweltzeichen, der Schwanenmarke gekennzeichnet /2/. Im Gegensatz zu chloridhaltigen Taumitteln bestehen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit keine Bedenken. CMA ist biologisch abbaubar. Auch korrosive Wirkungen auf Stahl, Beton und sonstige Materialien wurden nach Angaben des Herstellers beim langjährigen Einsatz von CMA nicht nachgewiesen. Allerdings ist CMA deutlich teurer als herkömmliche Streumaterialien.

Unter Vermittlung der RAW Handel und Beratungs GmbH wurde durch den Hersteller NORDISK ALUMINAT A/S ein 20 l – Kanister für den Bremsversuch der Straßenbahn und sieben Palettentanks zu je 1100 l für den Bremsversuch des Pkw sowie für den Einsatz auf der Teststrecke während des Versuchszeitraumes zur Verfügung gestellt. Nach Angaben des Herstellers lag das CMA in einer Konzentration von 25% vor. Die CMA-Lösung wurde mit 20 g/m² auf die Teststrecke aufgebracht. Je Ausbringung kamen jeweils Mengen zwischen 160 und 280 Litern zur Anwendung.

Versuchsstrecke

Der CMA-Einsatz erfolgte auf dem zwischen Pfännerhöhe und den Ein- und Ausfahrten zum Riebeckplatz befindlichen Teilabschnitt der Merseburger Straße. Die Abbiegespuren von der Merseburger Straße in Richtung Riebeckplatz sowie die Riebeckplatzbrücke bis Mitte Riebeckplatz wurden mit einbezogen. Die Fläche dieses Abschnitts betrug insgesamt ca. 13100 m².

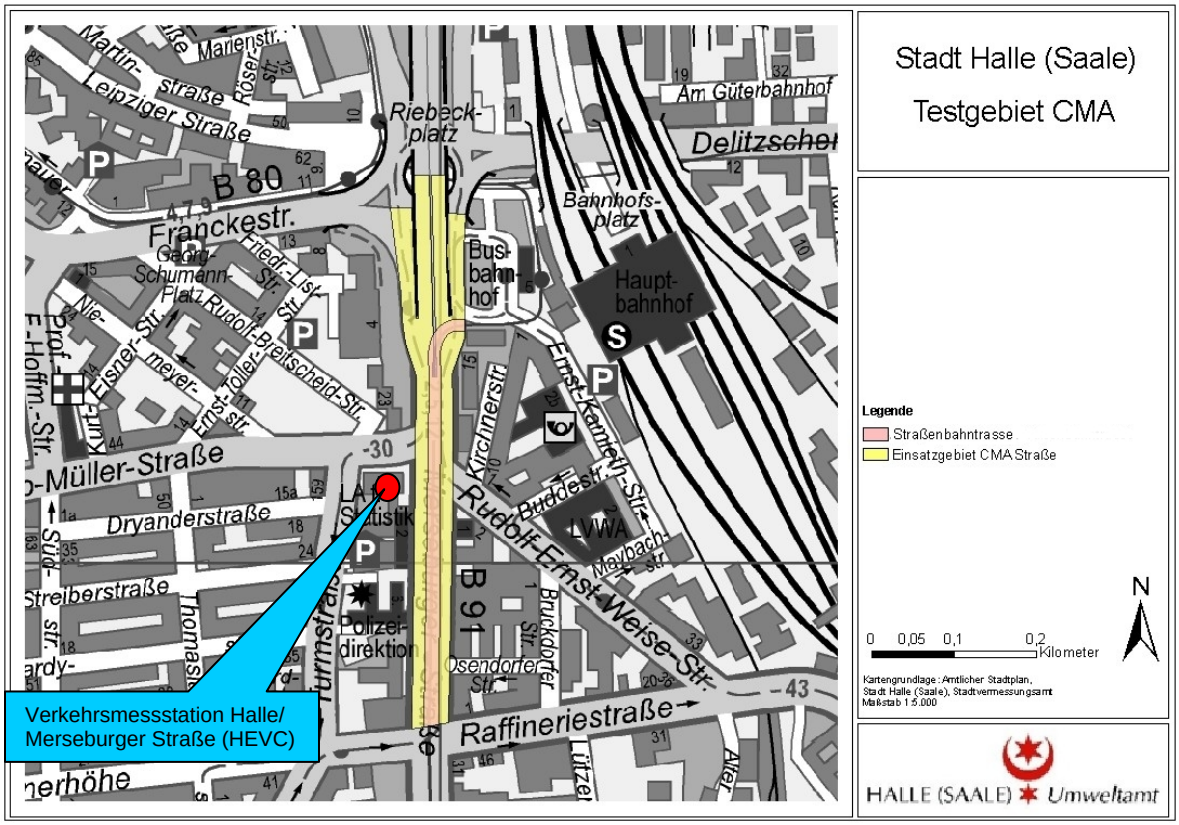

Abbildung 3.2.1: Versuchsstrecke auf der Merseburger Straße

Abbildung 3.2.2: Merseburger Straße in Richtung Süden (Links) / Merseburger Straße in Richtung Norden (Rechts)

Gerätetechnik

Das CMA wurde durch die Stadtwirtschaft Halle GmbH mittels einer Anhänge-Streumaschine der Firma Schmidt Holding GmbH vom Typ STRATOS A, Fassungsvermögen 0,8 m³ über einen Streuteller auf der Versuchsstrecke ausgebracht. Streubreite sowie Dosiermenge ließen sich variabel einstellen.

Abbildung 3.2.3: Gerätetechnik

Möglich waren Streubreiteneinstellungen zwischen 1,5 – 6 m. Die Streubreiteneinstellung funktionierte zuverlässig. Allerdings erfolgte der Auftrag des flüssigen Streumittels innerhalb der eingestellten Streubreite nicht gleichmäßig (Mitte = starker Auftrag; Ränder = schwächer werdender Auftrag).

Abbildung 3.2.4: tropfenförmige Benetzung der Straße mit CMA

CMA-Ausbringung

Das CMA wurde im Zeitraum vom 15.09.2008 bis zum 17.11.2008 an insgesamt 29 Tagen aufgebracht. Da die Versuchsstrecke insbesondere tagsüber sehr stark befahren ist, musste die CMA-Ausbringung nachts in der verkehrsärmsten Zeit erfolgen. Die CMA-Ausbringung erfolgte planmäßig alle 48 Stunden jeweils (nachts) zwischen 01:00 und 02:00 Uhr und unter der Voraussetzung, dass kein Niederschlag gefallen war und sich die Fahrbahn in trockenem Zustand befand. Insbesondere witterungsbedingt konnte dieser Rhythmus nicht immer eingehalten werden. So musste die Ausbringung z.B. nach Regen am nächsten Tag wiederholt werden. Die genauen Angaben zur Ausbringung können dem Anhang der Tabelle A 2 entnommen werden. Die Streubreite bei der Ausbringung auf die Fahrbahn wurde so eingestellt, dass eine Benetzung der parallel zur Fahrbahn verlaufenden Straßenbahngleise mit CMA unterbunden wurde. Damit konnte jedoch auch eine vollständige Straßenbenetzung über die gesamte Fahrbahnbreite nicht gewährleistet werden.

Abbildung 3.2.5: Eingeschränkte Streubreite über die Fahrbahn

Maßnahmen zur Verkehrssicherheit während der aktiven Versuchsphase

Zusätzlich wurden bei der Versuchsdurchführung folgende Maßnahmen zur Verkehrssicherheit umgesetzt.

Aufstellung von Gefahrenschildern und Zusatzzeichen

Im Versuchsgebiet gilt auf Grund des Luftreinhalte- und Aktionsplans für den Ballungsraum Halle 2005 jeweils vom 01.09. bis zum 30.04. des Folgejahres eine auf 30 km/h reduzierte Geschwindigkeit.
Um dennoch mögliche Gefahren auszuschließen, wurden während der aktiven Versuchsphase jeweils an den Einfahrten zum Versuchsgebiet Gefahrenzeichen Nr. 101 (Gefahrenstelle), Zusatzschilder „500 m“ und „bei Nässe“, gemäß § 40 der Straßenverkehrsordnung aufgestellt.

Am Vorschriftszeichen „Zulässige Höchstgeschwindigkeit - 30“ gemäß § 41 der Straßenverkehrsordnung wurde das Zusatzzeichen „Geschwindigkeitskontrolle“ angebracht sowie über die Informationstafeln des Parkleitsystems wurde auf mögliche Maßnahmen zur Geschwindigkeitsüberwachung hingewiesen.

Abbildung 3.2.6: Gefahrenschilder und Zusatzzeichen während des Versuchs

Geschwindigkeitsmesstafeln

Kurz vor dem Beginn der aktiven Versuchsphase wurden in beiden Fahrtrichtungen Geschwindigkeitsmesstafeln installiert. Diese dienten sowohl zur Eigenkontrolle für die Kraftfahrer als auch zur Gewinnung von Aussagen über die Befolgungsrate des Tempolimits.

Mit der Messtafel in Richtung Pfännerhöhe wurden vom 15.09. bis zum 10.10.2008 und mit der Messtafel in Richtung Riebeckplatz vom 12.09. bis zum 03.11.2008 die Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge erfasst.
Auf Grund eines technischen Defekts der Anzeigetafel konnte die Geschwindigkeit in Richtung Pfännerhöhe nicht über die gesamte aktive Versuchsphase angezeigt werden.

Abbildung 3.2.7: Geschwindigkeitsmesstafel

Die nachfolgenden Tabellen enthalten eine Übersicht zur Geschwindigkeitsbefolgungsrate für beide Fahrtrichtungen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die vorgegebene Geschwindigkeit nur von wenigen Autofahrern befolgt wird. Während die vorgegebene Geschwindigkeit in Richtung Riebeckplatz nur von knapp einem Viertel der Fahrzeugführer eingehalten wird, sind es in Richtung Pfännerhöhe sogar nur noch ca. 6%. Der größte Teil der Autofahrer fuhr im Versuchsgebiet mit einer Geschwindigkeit von 35-50 km/h. Die Detailauswertungen der Geschwindigkeitsmesstafeln sind dem Anhang der Tabelle A 3 und Tabelle A 4 zu entnehmen.

Tabelle 3.2.1: Befolgungsrate in Richtung Pfännerhöhe

Geschwindigkeit in km/h	**Summe Fahrzeuge im Erfassungszeitraum (15.09.2008 bis 10.10.2008)**
< 15 km/h	293
< 20 km/h	462
< 25 km/h	816
< 30 km/h	5998
< 35 km/h	17839
< 40 km/h	24509
< 45 km/h	25366
< 50 km/h	28180
Summe (< 30 km/h)	7569
Summe (< 40 km/h)	49917
Summe (< 50 km/h)	103463
Summe Fahrzeuge gesamt	128014
Anteil < 30 km/h am Gesamtfahrzeugaufkommen	6 %
Anteil < 40 km/h am Gesamtfahrzeugaufkommen	39 %
Anteil < 50 km/h am Gesamtfahrzeugaufkommen	81 %

Tabelle 3.2.2: Befolgungsrate in Richtung Riebeckplatz

Geschwindigkeit in km/h	Summe Fahrzeuge im Erfassungszeitraum (15.09.2008 bis 10.10.2008)
< 15 km/h	5630
< 20 km/h	9725
< 25 km/h	15250
< 30 km/h	51071
< 35 km/h	71250
< 40 km/h	65354
< 45 km/h	55655
< 50 km/h	43102
Summe (< 30 km/h)	81676
Summe (< 40 km/h)	218280
Summe (< 50 km/h)	317037
Summe Fahrzeuge gesamt	342776
Anteil < 30 km/h am Gesamtfahrzeugaufkommen	24 %
Anteil < 40 km/h am Gesamtfahrzeugaufkommen	64 %
Anteil < 50 km/h am Gesamtfahrzeugaufkommen	93 %

Geschwindigkeitsüberwachung

Die Einhaltung der im Versuchsgebiet geltenden Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h wurde während des Versuches an mehreren Tagen in beiden Fahrtrichtungen durch eine Radarkontrolle des Ordnungsamtes der Stadt Halle (Saale) überwacht.

Obwohl durch Zusatzschilder an den Einfahrten zum Versuchsgebiet auf die Geschwindigkeitsüberwachung hingewiesen wurde, haben sich während der Kontrollen ca. 8 % der Fahrzeugführer nicht an die Geschwindigkeitsbegrenzung gehalten. Die Mehrzahl der festgestellten Überschreitungen erfolgte im Bereich bis 20 km/h über der zulässigen Geschwindigkeit von 30 km/h. Zur Festsetzung von Verwarn- oder Bußgeldern als eingreifende Maßnahme muss die Dokumentation der einzelnen Geschwindigkeitsüberschreitungen zweifelsfrei sein. Sobald Zweifel möglich sind, kann keine Verfolgung im Ordnungswidrigkeiten- oder Strafverfahren erfolgen.

Eine Übersicht über die während der aktiven Versuchphase erfassten sicher festgestellten Geschwindigkeitsüberschreitungen ist nach Fahrtrichtungen getrennt im Anhang in der Tabelle A 5 und Tabelle A 6 enthalten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Befolgungsrate der vorgegebenen Geschwindigkeit zu den Zeiten der Geschwindigkeitskontrollen durch das Ordnungsamt wesentlich höher war, als im übrigen Versuchszeitraum.

Abbildung 3.2.8: Radarkontrolle durch das Ordnungsamt der Stadt Halle (Saale)

3.3 Messtechnik und Messprogramm

Die messtechnische Begleitung des Versuches erfolgte einerseits mit der in der Merseburger Straße vorhandenen Infrastruktur in Form der Verkehrsmessstation Halle/Merseburger Straße (Abbildung 3.3.1 und Abbildung 3.3.2) und andererseits durch das Luftmessfahrzeug des Landesamtes für Umweltschutz.

Abbildung 3.3.1: Verkehrsmessstation Halle/Merseburger Straße, Blick in Richtung Westen

Abbildung 3.3.2: Verkehrsmessstation Halle/Merseburger Straße, Blick in Richtung Süden

Für das Luftmessfahrzeug wurde ein geeigneter Standplatz mit vergleichbaren Standortbedingungen in einer Entfernung von 1,1 km südlich der Verkehrsmessstation gefunden. Sowohl Bebauungssituation als auch Verkehrsbelegung sind dort ähnlich. Der Standplatz des Messfahrzeuges befand sich am westlichen Fahrbahnrand.
Die Verkehrsmessstation befindet sich genau in dem Abschnitt der Merseburger Straße, auf dem das CMA aufgebracht wurde. Mithin stellt die Messung am Messfahrzeug die Referenz ohne CMA dar.

Die nachfolgende Abbildung 3.3.3 und Abbildung 3.3.4 zeigen das Fahrzeug am Standplatz in Höhe der Merseburger Straße Nr. 106, westliche Straßenseite.

Abbildung 3.3.3: Luftmessfahrzeug am Standort Merseburger Straße Nr. 106, Blick in Richtung Westen

Abbildung 3.3.4: Luftmessfahrzeug am Standort Merseburger Straße Nr. 106, Blick in Richtung Südwesten

Die folgende Abbildung 3.3.5 zeigt auf Basis eines Luftbildes[1] die Lage der beiden Standorte und die Bebauungssituation in der Merseburger Straße.

Abbildung 3.3.5: Lageplan zu den Standorten der Verkehrsmessstation und des Messfahrzeugs in der Merseburger Straße in Halle

[1] Basis: RGB-Orthofotos Sachsen-Anhalt (2005)

Einsatzzeitraum des Luftmessfahrzeugs

Die ursprünglich vorgesehene Laufzeit des Gesamtprojektes erstreckte sich von Mitte September bis zum Jahresende, wobei eine CMA-Ausbringung nur in der Zeit vom **15.09.2008** bis zum **10.10.2008** erfolgen sollte. Der Zeitraum ab dem 10.10.2008 bis zum Jahresende war dabei als Referenzzeitraum vorgesehen. Dieser war notwendig, um für die Auswertung des Versuches einen genügend großen Zeitraum an Parallelmessungen zur Verfügung zu haben und zwar unter der Bedingung, dass an beiden Messstationen kein CMA-Einfluss gegeben ist.

Um genügend Zeit für die Einsatzvorbereitung und das Einlaufen der Analysatoren zu haben, wurde das Messfahrzeug bereits am 02.09.2008 am vorgesehenen Standort aufgestellt und es war dann am 10.09.2008 komplett einsatzbereit (Messbeginn). Die CMA-Ausbringung konnte damit planmäßig am 15.09.2008 gestartet werden.
Da nach dem 10.10.2008 hinaus noch eine ausreichende Menge an CMA vorhanden war und eine größere Datenmenge sich günstig auf die Zuverlässigkeit der Versuchsergebnisse auswirkt, sollte die aktive Versuchsphase fortgeführt werden, bis der CMA-Vorrat aufgebraucht war. Da das eingesetzte Fahrzeug wegen eines Wintereinbruchs bereits Mitte November für den Winterdienst abgestellt werden musste, endete die CMA-Anwendung mit der letzten Ausbringung am **17.11.2008**.
Aufgrund der Verlängerung des CMA-Einsatzes war jedoch auch eine Ausweitung des Referenzzeitraumes erforderlich. Das Messfahrzeug befand sich daher noch bis zum 24.02.2009 vor Ort.

Messtechnik

Nachfolgend eine Aufstellung der in der Verkehrsmessstation und im Messfahrzeug eingesetzten Messtechnik, soweit sie für die Auswertungen in diesem Bericht relevant war. Das Standardmessprogramm umfasst jeweils noch weitere Luftschadstoffkomponenten.

Tabelle 3.3.1: Verkehrsmessstation Halle/Merseburger Straße (HEVC)

gemessene Schadstoffe	Messgerätetyp	Messprinzip	DIN/ EN - Norm
Partikel PM_{10}	Sharp 5030	Nephelometer + Beta–Absorption	
	HVS DHA-80	Gravimetrie	DIN EN 12341
Partikel $PM_{2,5}$	Sharp 5030	Nephelometer + Beta–Absorption	
Stickstoffmonoxid (NO) Stickstoffdioxid (NO_2)	APNA 370	Chemilumineszenz	DIN EN 14211

Tabelle 3.3.2: Messfahrzeug Halle/Merseburger Straße (MW17)

gemessene Schadstoffe	Messgerätetyp	Messprinzip	DIN/ EN - Norm
Partikel PM_{10}	Sharp 5030	Nephelometer + Beta–Absorption	
	HVS DHA-80	Gravimetrie	DIN EN 12341
Stickstoffmonoxid (NO) Stickstoffdioxid (NO_2)	TE42C	Chemilumineszenz	DIN EN 14211
meteorologische Parameter			
relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit			VDI 3786

4 Auswertung der Daten und Bewertung der Ergebnisse

4.1 Allgemeine Hinweise

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich im Wesentlichen auf die Herausarbeitung möglicher Unterschiede in der Partikel PM_{10}-Belastung in Abhängigkeit von der CMA-Ausbringung. Weitere potentielle Einflussgrößen, wie beispielsweise die Einhaltung der eingerichteten Geschwindigkeitsbegrenzung auf 30 km/h, werden zunächst nicht mit betrachtet, da dies weitergehenden Auswertungen vorbehalten bleiben soll. Dies gilt ebenso für die Analyse der Inhaltsstoffe im Feinstaub.

4.2 Charakterisierung des Versuchszeitraumes

In diesem Abschnitt werden die äußeren Bedingungen während der Durchführung des Projektes sowohl von meteorologischer Seite aus als auch im Hinblick auf die Feinstaubbelastung kurz beschrieben und charakterisiert.

Aus **meteorologischer Sicht**[2] haben die Bedingungen im Versuchszeitraum das Zustandekommen erhöhter Feinstaubkonzentrationen nicht begünstigt. Der September war vergleichsweise niederschlagsreich. In Sachsen-Anhalt lag das Flächenmittel des Niederschlages bei 122% des vieljährigen Mittels von 1961 – 1990. Die zweite Monatshälfte, also genau die Startphase des Projektes war überwiegend durch Tiefdruckeinfluss geprägt.
Auch der Folgemonat Oktober war deutlich zu nass, das Flächenmittel des Niederschlages lag in Sachsen-Anhalt bei 133% des vieljährigen Mittels. Kurzen aber intensiven Nassphasen folgten aber durchaus auch mehrtägige Trockenperioden. Die Sonnenscheindauer lag jedoch meist unter dem Durchschnitt.
Der November zeigte sich überwiegend trocken und mild, das letzte Drittel jedoch winterlich ausgeprägt. Zum Monatsanfang (03. – 07.11.2008) war eine Südostlage wetterbestimmend, verbreitet gab es in den Morgenstunden Nebel. Insofern ist es nicht verwunderlich, dass genau in diesem Zeitabschnitt die beiden einzigen Überschreitungen des PM_{10}-Tagesmittelwertes gemessen wurden (siehe nachfolgenden Abschnitt).

Der Zeitraum vom 15.09. bis zum 17.11.2008 ist, wie auch das gesamte Jahr 2008, hinsichtlich der **Feinstaubbelastung** als vergleichsweise niedrig belastet einzustufen. Dies ist überwiegend auf günstige meteorologische Bedingungen zurückzuführen, denn es fehlten beispielsweise länger anhaltende, ausgeprägte Südostlagen unter Hochdruckeinfluss, welche Schadstoffferntransporte begünstigen. Zwar traten an einer Reihe von Tagen nächtliche, bodennahe Temperaturinversionen auf, welche ebenfalls höhere Schadstoffkonzentrationen begünstigen, jedoch führten diese nicht zu einer länger anhaltenden Anreicherung der PM_{10}-Konzentrationen in den bodennahen Luftschichten.
Im genannten Zeitraum gab es an der Verkehrsmessstation Halle/Merseburger Straße nur zwei moderate Überschreitungen des Tagesmittelwertes für Partikel PM_{10} von 50 µg/m³, und zwar am 05. und 06. November mit 54 µg/m³ bzw. 58 µg/m³. Am Messfahrzeug wurden an den gleichen Tagen ebenfalls Überschreitungen gemessen und zwar mit 52 µg/m³ bzw. 58 µg/m³.
In diesem Zeitraum wurden an anderen Hotspots sechs Überschreitungen (Magdeburg/Reuter-Allee) bzw. drei (Wittenberg/Dessauer Str.) oder auch nur eine (Magdeburg/Damaschkeplatz) registriert.
Es gab während des Versuches keine einzige überregionale Belastungssituation, die zu großflächigen Überschreitungen geführt hätte. Mithin traten keine wirklich hohen Partikelkonzentrationen auf.

[2] Quelle: DWD, Witterungsreport Express Nr. 09, 10 und 11/2008

4.3 Partikel PM_{10}-Konzentrationen in Abhängigkeit von der CMA-Ausbringung

4.3.1 Theoretische Grundlagen

Um mögliche Unterschiede der Partikel PM_{10}-Belastung in Abhängigkeit von der CMA-Ausbringung aufzuzeigen und damit einen Wirkungsnachweis erbringen zu können, sollen zunächst die PM_{10}-Tagesmittelwerte beider Messstellen miteinander verglichen werden. In einem weiteren Schritt ist die Analyse der Wirkung des CMA auf die Partikel PM_{10}-Konzentration unmittelbar nach der Ausbringung vorgesehen.

Zunächst einige Details zur Ausbringung des CMA. Wie bereits erwähnt, wurde das CMA im Zeitraum vom 15.09.2009 bis zum 17.11.2009 an insgesamt 29 Tagen, meist in der Zeit zwischen 1:00 Uhr und 2:00 Uhr auf der vorgesehenen Versuchsstrecke ausgebracht. Die genauen Angaben zur Ausbringung können der entsprechenden Tabelle A 2 im Anhang entnommen werden.
Das CMA dürfte in erster Linie auf die sogenannte „coarse-fraction“ (Grobfraktion) im Feinstaub wirken, also den Anteil der kleiner PM_{10} und größer $PM_{2,5}$ ist. In dieser „coarse-fraction“ finden sich die nichtauspuffbedingten Anteile des Feinstaubes wie z.B. Reifen-, Bremsen und Fahrbahnabrieb, welche sich auf der Fahrbahn ablagern, durch den Fahrzeugverkehr wieder aufgewirbelt werden und letztendlich mit zur Feinstaubbelastung beitragen. Durch das CMA soll gezielt diese Wiederaufwirbelung verhindert werden, indem das Mittel den Staub bindet.
Demzufolge ist das Einflusspotential für CMA unter dem Einfluss von Schadstoffferntransporten deutlich geringer als bei lokal verursachter Belastung, da überwiegend nur sehr kleine Partikel über weite Strecken transportiert werden. Dies führt häufig dazu, dass unter „Transportbedingungen“ nahezu keine „coarse-fraction“ vorhanden ist und der Unterschied zwischen PM_{10} und $PM_{2,5}$ meist sehr gering ausfällt.
Für die Beurteilung der Wirksamkeit der CMA-Ausbringung sind daher besonders die Tage interessant, an denen der Anteil der „coarse-fraction“ besonders hoch ist. Dieser Anteil lässt sich nach folgender Formel berechnen.

$$Anteil\ "coarse\ \ fraction"\ [\%] = \left(\frac{PM_{10} - PM_{2,5}}{PM_{10}} \right) \times 100$$

In der nachfolgenden Tabelle 4.3.1 sind die Tagesmittelwerte der Partikelkonzentrationen (automatische Messungen), der Anteil der „coarse-fraction“ und die PM_{10}-Belastungsdifferenzen zwischen dem Messfahrzeug (MW17) und der Verkehrsmessstation (HEVC) enthalten. Berücksichtigt wurden jedoch nur vollständige Datenpaare und nur die Fälle, wo die PM_{10}-Konzentrationen am Messfahrzeug höher waren als an der Verkehrsmessstation. Diese Bedingungen waren für 19 der insgesamt 29 CMA-Einsatztage erfüllt, was einem Anteil von rund 66 % entspricht.

Der „coarse-fraction“ – Anteil lag im Mittel über die berücksichtigten CMA-Einsatztage bei 39%. Als Tage mit besonders hohem Anteil fallen der 02.10.2008 (59%), der 17.10.2008 (52%) und der 17.11.2008 (60%) auf. Betrachtet man die Unterschiede in der PM_{10}-Konzentration im Vergleich Messfahrzeug und Verkehrsmessstation, so korrespondiert allerdings nur in einem Fall und zwar am 17. November ein hoher Belastungsunterschied von rd. 6 µg/m³ mit einem hohen „coarse-fraction“ – Anteil.
Die Abbildung 4.3.1 zeigt den Versuch, einen Zusammenhang zwischen dem „coarse-fraction“ – Anteil und dem festgestellten Minderungspotential, ausgedrückt als PM_{10}-Belastungsdifferenz zwischen den beiden Messorten, darzustellen. Der erwartete Zusammenhang deutet sich, wenn auch nur mit einem Bestimmtheitsmaß < 0,4 zumindest an. Die Anzahl der Versuchstage ist für eine gesicherte statistische Aussage in diesem Fall zu gering.

Tabelle 4.3.1: Partikelkonzentrationen und Anteile der „coarse-fraction“ an den CMA-Einsatztagen (Basis: Tagesmittelwerte SHARP 5030)

Datum	PM_{10} (MW17) [µg/m³]	$PM_{2,5}$ (HEVC) [µg/m³]	Anteil „coarse-fraction“ [%]	Differenz PM_{10} MW17 – HEVC
15.09.2008	19,6	12,2	37,5	3,1
17.09.2008	28,2	14,5	48,4	4,3
19.09.2008	22,1	14,3	35,6	0,9
22.09.2008	13,8	9,0	34,9	0,1
02.10.2008	12,8	5,3	58,6	1,4
04.10.2008	17,8	9,1	48,9	3,5
07.10.2008	24,6	17,8	27,7	0,2
09.10.2008	25,8	18,1	29,8	3,3
11.10.2008	30,0	23,0	23,4	1,5
13.10.2008	29,4	21,4	27,2	2,1
17.10.2008	17,4	8,5	51,5	2,8
20.10.2008	28,7	17,2	40,2	0,8
23.10.2008	31,3	16,9	45,9	6,2
27.10.2008	13,7	9,4	31,7	0,6
28.10.2008	27,5	14,1	48,7	6,6
03.11.2008	38,3	26,8	30,2	0,7
07.11.2008	39,7	26,9	32,2	0,8
14.11.2008	26,6	17,6	33,8	1,7
17.11.2008	26,2	10,5	59,9	6,3

Zur Ermittlung des „coarse-fraction“ – Anteils wurden die PM_{10}-Konzentrationen des Messfahrzeugs (ohne CMA-Einfluss) und, in Ermangelung einer $PM_{2,5}$-Messung am gleichen Ort, die $PM_{2,5}$-Konzentrationen an der Verkehrsmessstation herangezogen.
Auf die „coarse-fraction“ wurde hier hilfsweise zurückgegriffen da anzunehmen ist, dass die $PM_{2,5}$-Konzentrationen durch das CMA kaum beeinflusst werden.

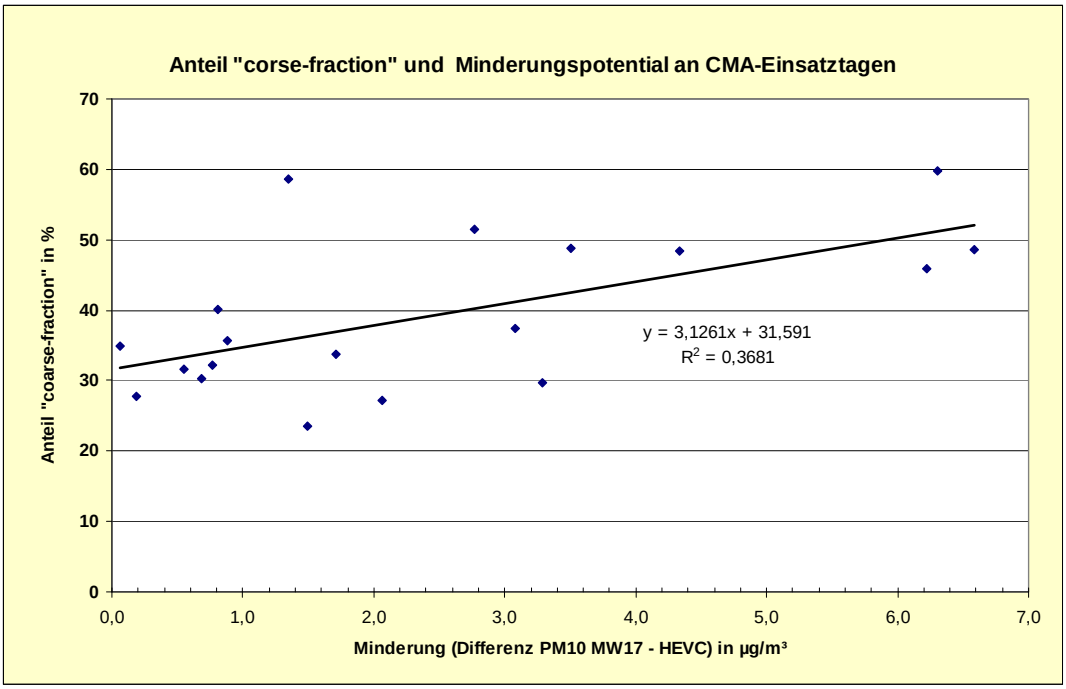

Abbildung 4.3.1: Zusammenhang zwischen „coarse-fraction“ – Anteil und Minderungspotential an CMA-Einsatztagen

4.3.2 Vergleich der PM_{10}-Tagesmittelwerte (Probenahmeverfahren)

Der Vergleich der PM_{10}-Tagesmittelwerte erfolgt auf Basis der Ergebnisse des Probenahmeverfahrens. Dieses beruht auf der Abscheidung der PM_{10}-Fraktion auf einem Filter (150 mm) und gravimetrischer Massenbestimmung (Wägung der Filter) im Labor. Die nachfolgende Abbildung 4.3.2 zeigt den Vergleich der auf diese Weise bestimmten Tagesmittelwerte beider Messstellen für den CMA-Einsatzzeitraum (= aktive Versuchsphase). Die Tage, an denen CMA eingesetzt wurde, sind orange hinterlegt.

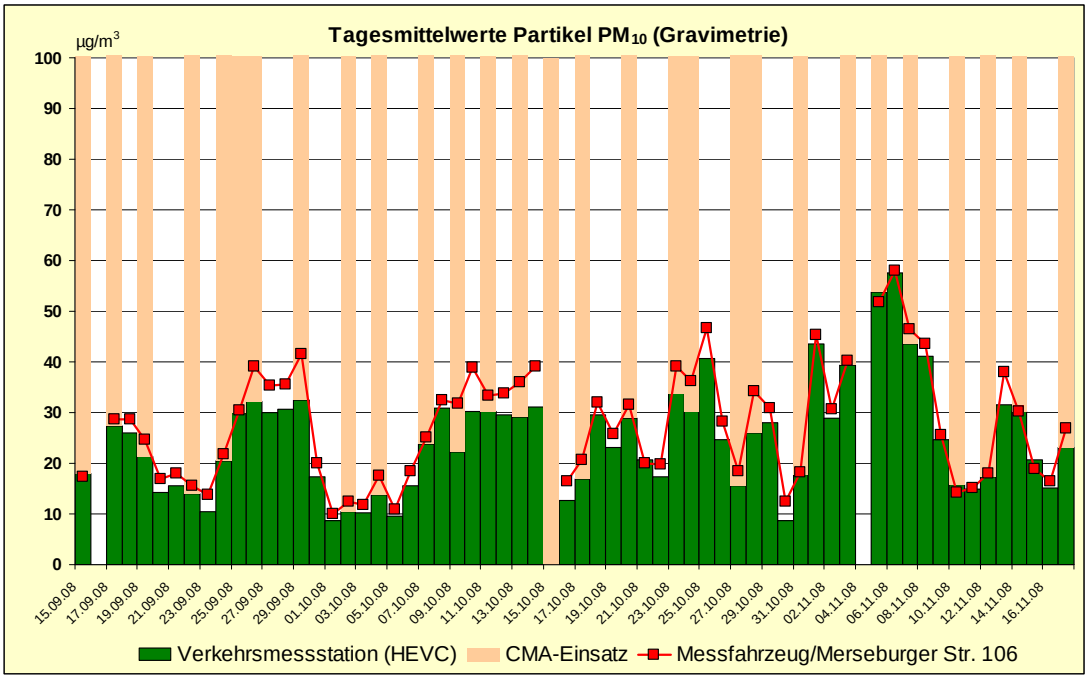

Abbildung 4.3.2: Vergleich der Tagesmittelwerte PM_{10} (Verkehrsmessstation und Messfahrzeug)

Es konnte festgestellt werden, dass an 24 von 28[3] ausgewerteten CMA-Einsatztagen am Messfahrzeug eine höhere PM_{10}-Belastung als an der Verkehrsmessstation gemessen wurde. Der Belastungsunterschied zur Verkehrsmessstation betrug an diesen Tagen im Mittel **3,7 µg/m³.** Das Minimum lag bei 0,3 µg/m³ (31.10.2008) und der maximale Unterschied sogar bei 9,7 µg/m³ (09.10.2008).
An weiteren drei Tagen (15.09. / 05.11. / 10.11.) war es umgekehrt, hier wies die Verkehrsmessstation höhere Werte auf, der Belastungsunterschied zum Messfahrzeug betrug im Mittel **1,3 µg/m³**, der maximale Belastungsunterschied lag bei 1,9 µg/m³ (Minimum = 0,5 µg/m³).
Darüber hinaus gab es einen Tag (14.11.2008), an dem die Belastungsdifferenz beider Messorte < 0,15 µg/m³ war.

In einem weiteren Schritt erfolgte die gleiche Betrachtung für jene Tage, an denen kein CMA ausgebracht wurde. Dies waren im Zeitraum 15.09. bis 17.11.2008 insgesamt 35 Tage. Davon sind zwei Tage (16.09. und 04.11.) jedoch nicht auswertbar, da jeweils für einen der beiden Standorte aus technischen Gründen kein Messergebnis vorhanden war. Betrachtet man nun die verbleibenden 33 Tage so ist festzustellen, dass an 31 Tagen am Messfahrzeug eine höhere PM_{10}-Belastung als an der Verkehrsmessstation gemessen wurde. Der Belastungsunterschied zur Verkehrsmessstation betrug an diesen Tagen im Mittel **3,1 µg/m³.** Das Minimum lag bei 0,4 µg/m³ (11.11.2008) und der maximale Unterschied bei 8,6 µg/m³ (10.10.2008).
An den übrigen zwei Tagen wies die Verkehrsmessstation höhere Werte auf. Der Belastungsunterschied zum Messfahrzeug lag bei 0,7 µg/m³ (21.10.) bzw. 1,9 µg/m³ (15.11.).
Insgesamt gesehen zeigen sich mithin deutliche Parallelen und nur geringfügig unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Belastungsunterschiede zwischen beiden Standorten.

[3] Wie unter 4.2 aufgezeigt, wurde CMA an 29 Tagen ausgebracht. Für den 15.10.08 liegt aus technischen Gründen jedoch kein Tagesmittelwert für HEVC vor, so dass dieser Tag nicht mit ausgewertet werden konnte, folgerichtig wurden nur 28 CMA-Einsatztage berücksichtigt.

Ein Indiz für die Wirkung des CMA lässt sich allenfalls aus der Differenz der gemittelten Belastungsunterschiede ableiten, denn mit CMA-Einsatz ist der Belastungsunterschied zwischen Messfahrzeug und Verkehrsmessstation um **0,6 µg/m³** größer. Mithin ließe sich diese Differenz der feinstaubbindenden Wirkung des CMA zuschreiben und es ergäbe sich aus diesem Projekt heraus ein Minderungspotential von 0,6 µg/m³ bezogen auf den Versuchszeitraum (Basis: Tagesmittelwerte (TMW) PM_{10}).

Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass das alle zwei bis drei Tage ausgebrachte CMA von so nachhaltiger Wirkung ist, dass auch die PM_{10}-Konzentrationen an den Tagen zwischen der Ausbringung noch positiv beeinflusst werden. Insofern war es erforderlich, die Belastungsunterschiede zwischen den beiden Messstandorten auch für einen Referenzzeitraum zu untersuchen, in dem jeglicher CMA-Einfluss an der Verkehrsmessstation ausgeschlossen werden konnte. Aus diesem Grund erfolgte auch die Verlängerung des Einsatzes des Messfahrzeugs bis zum 23.02.2009.

Die nachfolgende Abbildung 4.3.3 zeigt nun den Vergleich der gravimetrisch bestimmten Tagesmittelwerte beider Messstellen für den Einsatzzeitraum des Messfahrzeuges (10.09.2008 - 23.02.2009, jeweils erster und letzter Tagesmittelwert). Die Tage, an denen CMA eingesetzt wurde, sind aus Gründen der Vollständigkeit hier ebenfalls mit dargestellt und orange hinterlegt. Der CMA-Einsatzzeitraum wird jedoch in der nachfolgenden Betrachtung ausgeklammert. Dies gilt ebenso für die auffallend hohen Werte vom Silvester- und Neujahrstag sowie vom 15./16.01.2009.

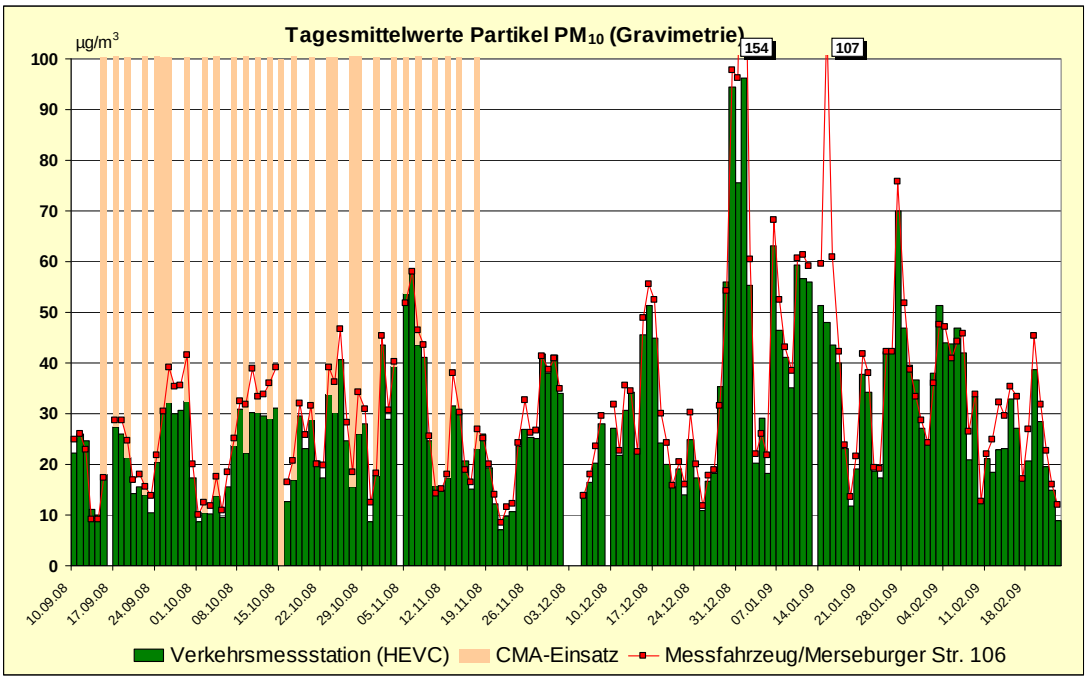

Abbildung 4.3.3: Vergleich der Tagesmittelwerte PM_{10} (10.09.08 – 23.02.09)

Die Auswertungen für den Referenzzeitraum basieren somit auf insgesamt 94 Tagen, wobei festzustellen war, dass an 72 Tagen am Messfahrzeug eine höhere PM_{10}-Belastung als an der Verkehrsmessstation gemessen wurde. Der Belastungsunterschied zur Verkehrsmessstation betrug an diesen Tagen im Mittel **3,0 µg/m³.** Das Minimum lag bei 0,2 µg/m³ (13.12.2008) und der maximale Unterschied bei 9,2 µg/m³ (13.02.2008).
An 17 Tagen war die PM_{10}-Belastung an der Verkehrsmessstation höher, der Belastungsunterschied zum Messfahrzeug betrug im Mittel **1,9 µg/m³**, der maximale Belastungsunterschied lag bei 3,8 µg/m³ (Minimum = 0,3 µg/m³).
An den übrigen fünf Tagen lag die Belastungsdifferenz beider Messorte im Bereich < 0,15 µg/m³.

Im Vergleich zu den Tagen innerhalb des CMA-Einsatzzeitraums, an denen kein CMA ausgebracht wurde (mittlerer Belastungsunterschied von 3,1 µg/m³), ergibt sich hinsichtlich der Belastungsdifferenz ein Unterschied von **0,1 µg/m³.** Dies würde das bereits beschriebene CMA-Minderungspotential auf **0,7 µg/m³**, bezogen auf den Versuchszeitraum, erhöhen.

Betrachtet man den gesamten Referenzzeitraum und bildet die Mittelwerte über diese Periode, so ergibt sich für die Verkehrsmessstation ein Wert von 30,3 µg/m³ und für das Messfahrzeug ein Wert von 32,3 µg/m³. Mithin ist die Belastung am Standort des Messfahrzeugs höher und es leitet sich daraus ein Belastungsunterschied von **2,0 µg/m³** bezogen auf den **Mittelwert dieser Periode** ab.

Als erstes **Zwischenfazit** lassen sich aus den dargelegten Ergebnissen folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die PM_{10}-Belastung (Tagesmittelwert) war in der deutlichen Mehrzahl aller betrachteten Fälle am Standort des Messfahrzeugs in der Merseburger Straße 106 höher als an der Verkehrsmessstation. Dies gilt sowohl für den CMA-Einsatzzeitraum als auch für den Referenzzeitraum.
- Der Belastungsunterschied im **Referenzzeitraum** lässt sich im Mittel mit **3,0 µg/m³** quantifizieren. Die Spannweite erstreckt sich dabei von minimal 0,2 µg/m³ bis maximal 9,2 µg/m³. Diese Aussage gilt für die Fälle, in denen der TMW PM_{10} Messfahrzeug größer als der TMW PM_{10} Verkehrsmessstation ist.
- Für den Referenzzeitraum leitet sich darüber hinaus eine im Mittel um **2,0 µg/m³** höhere PM_{10}-Belastung am Messfahrzeug gegenüber der Verkehrsmessstation ab, bezogen auf den Mittelwert der Periode (94 Tage insgesamt).
- Durch den CMA-Einsatz wurde der Belastungsunterschied zwischen Messfahrzeug und Verkehrsmessstation im Durchschnitt um **0,7 µg/m³** größer. Die Differenz beträgt im Mittel 3,7 µg/m³ für die Fälle in denen gilt: TMW PM_{10} Messfahrzeug > TMW PM_{10} Verkehrsmessstation. Die Spannweite erstreckt sich dabei von minimal 0,3 µg/m³ bis maximal 9,7 µg/m³.
- Diese Differenz lässt sich der feinstaubbindenden Wirkung des CMA zuschreiben und es ergibt sich aus diesem Projekt heraus ein mittleres Minderungspotential von **0,7 µg/m³** bezogen auf den Versuchszeitraum.

Das nach der umseitig beschriebenen Methodik ermittelte Minderungspotential in Höhe von 0,7 µg/m³ ergibt sich auch bei folgendem Ansatz.
Da nachhaltige Wirkungen des CMA an den Tagen zwischen den eigentlichen Ausbringungstagen nicht sicher ausgeschlossen werden können erscheint es sinnvoll, die aktive Phase des Projektes als Ganzes zu betrachten und alle Tage in die Ermittlung der Belastungsdifferenz mit einzubeziehen. Mithin ergibt sich für den Zeitraum vom 15.09. bis 17.11.2008 ein mittlerer Belastungsunterschied zwischen Verkehrsmessstation und Messfahrzeug in Höhe von **2,9 µg/m³**. Unberücksichtigt blieben in diesem Fall nur die Tage, an denen jeweils nur ein Tagesmittelwert vorgelegen hatte. Dies waren insgesamt drei Tage (16.09.2008 / 16.10.2008 / 04.11.2008).
Die gleiche Betrachtung erfolgte für den Referenzzeitraum (18.11.2008 bis 23.02.2009). Unberücksichtigt blieben hier fünf Tage mit nur einem Tagesmittelwert (02. – 04.12.2008 / 09.12.2008 / 13.01.2009), der Silvester- und Neujahrstag sowie der 15. und 16.01.2009, insgesamt also neun Tage. Es ergibt sich eine mittlere Belastungsdifferenz in Höhe von **2,2 µg/m³**. Im Vergleich der beiden Versuchphasen lässt sich daraus ein Minderungspotential in Höhe von **0,7 µg/m³** ableiten.

4.3.3 Analyse und Vergleich von zeitlich höher aufgelösten PM_{10}-Messwerten

Für die genauere Abschätzung der Wirkungen des ausgebrachten CMA auf die PM_{10}-Konzentration ist die Betrachtung zeitlich höher aufgelöster PM_{10}-Messwerte unumgänglich. Zu diesem Zweck wurden die Verläufe der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen an der Verkehrsmessstation auf Basis von Halbstundenmittelwerten zumeist in einem Zeitfenster von drei Stunden vor bis zehn Stunden (im Einzelfall auch länger) nach der CMA-Ausbringung genauer untersucht und mit den Verläufen am Messfahrzeug verglichen. Nachfolgend einige ausgewählte Beispiele für die Auswertung der Konzentrationsverläufe. Im Anhang finden sich darüber hinaus die in diesem Abschnitt nicht dargestellten Konzentrationsverläufe an den CMA-Einsatztagen (Voraussetzung: gültige Messwerte innerhalb des Zeitfensters).

Gegenstand der ersten Betrachtung ist der 15.09.2008, der Tag des Projektbeginns und der erste Tag mit CMA-Ausbringung. Den Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen innerhalb des hier größer gewählten Zeitfensters visualisiert Abbildung 4.3.4 auf Basis von Halbstundenmittelwerten. Der Ausbringungszeitraum für das CMA ist blau hinterlegt.

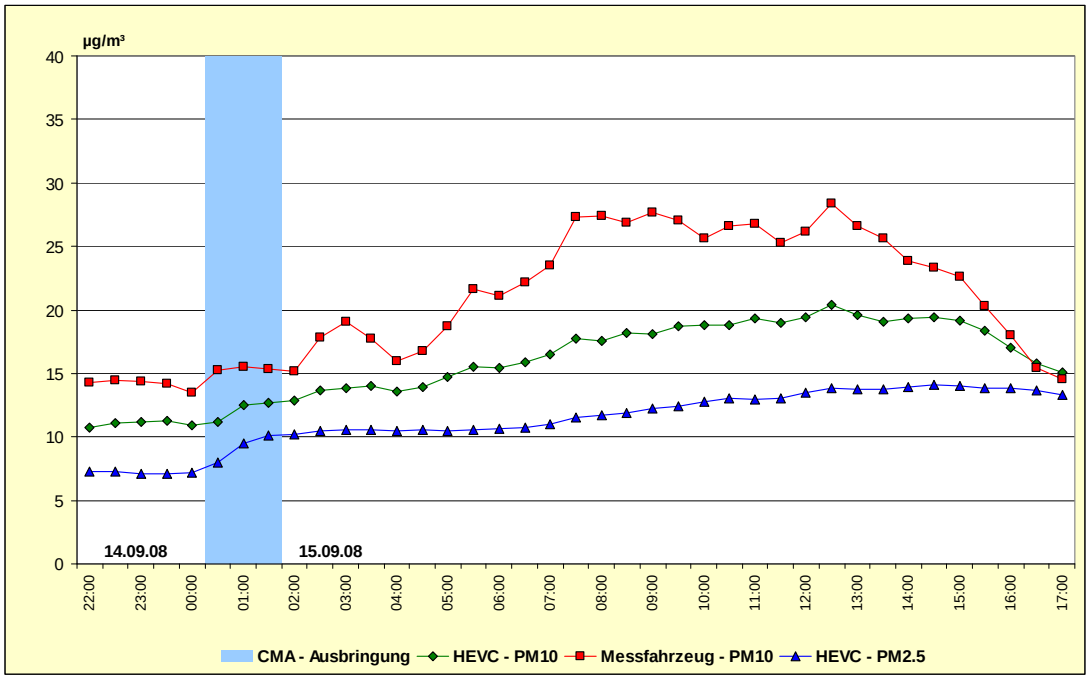

Abbildung 4.3.4: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 14./15.09.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

Erkennbar ist, dass die PM_{10}-Konzentration an der Verkehrsmessstation generell auf etwas niedrigerem Niveau verläuft als am Messfahrzeug und ab 0:30 Uhr leicht ansteigt, wobei dieser Anstieg auch bei $PM_{2,5}$ sichtbar ist. Insgesamt zeigt sich ein ansteigender Belastungstrend, der jedoch an der Verkehrsmessstation im Vergleich zum Messfahrzeug deutlich moderater ausfällt. Beginnend ab 7:30 Uhr hat sich dann zwischen beiden Standorten ein Belastungsunterschied von rd. 10 µg/m³ herausgebildet. Dieser Belastungsunterschied nimmt dann im Tagesverlauf wieder etwas ab, zunächst noch moderat, ab 14:00 Uhr dann kontinuierlich fallend und ab 16:30 Uhr haben beide Standorte in etwa das gleiche Niveau.
Dies ist vermutlich ein durch das CMA hervorgerufener Effekt und die Wirkung besteht in diesem Fall darin, dass der Anstieg der Konzentrationen zwar nicht verhindert, aber zumindest erheblich gedämpft worden ist.

Ein sehr ähnliches Bild zeigt sich auch bei der Analyse einer Situation vom 23.10.2008. Auch dieser Tag wird durch einen ansteigenden Belastungstrend charakterisiert und wieder ist dieser am Messfahrzeug erheblich stärker ausgeprägt. Ab 6:30 Uhr, dem Beginn Hauptberufsverkehrs, treten dabei Belastungsdifferenzen von größer 10 bis maximal 17 µg/m³ auf (Abbildung 4.3.5).

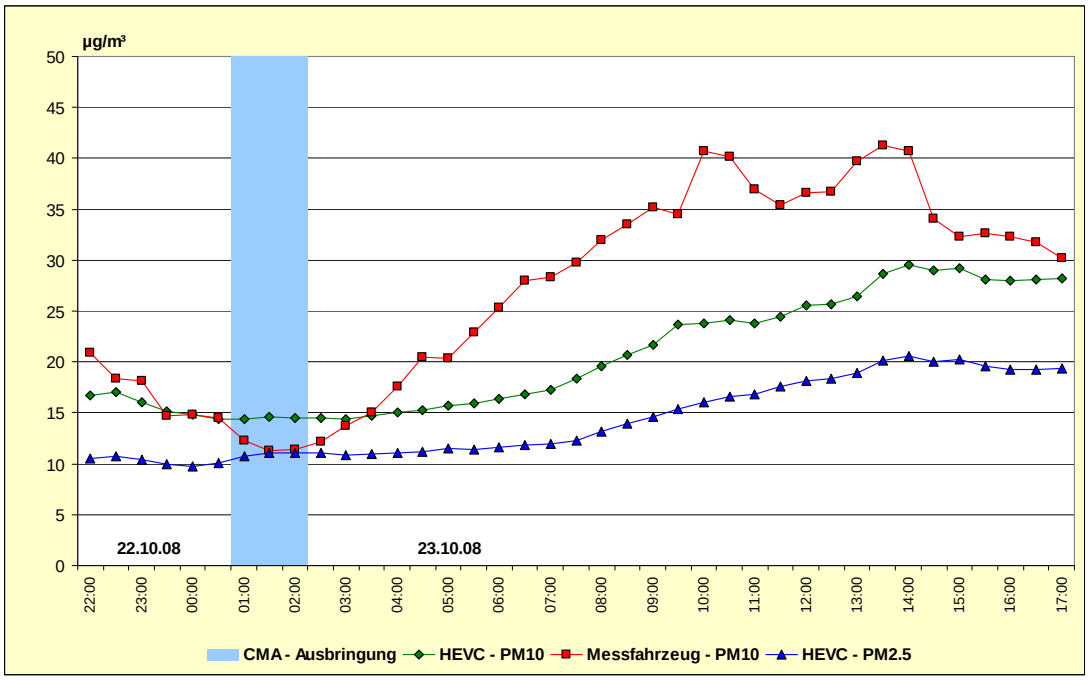

Abbildung 4.3.5: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 22./23.10.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

Es erscheint plausibel, den gedämpften Belastungsanstieg der Wirkung des CMA zuzuschreiben, auch wenn der Nachweis, dass der Belastungsverlauf ohne CMA-Einsatz nicht auch der gleiche gewesen wäre, hier nicht geführt werden kann.

Die Analyse einer Situation vom 22.09.2008 zeigt einen vergleichbaren Effekt, wenn auch nicht in dieser deutlichen Ausprägung. Erkennbar sind ein ansteigender Belastungstrend und die Tatsache, dass am Anfang des ausgewählten Zeitfensters die PM_{10}-Konzentrationen an der Verkehrsmessstation höher waren als am Messfahrzeug (Abbildung 4.3.6). Nach der CMA-Ausbringung kehren sich ab 3:30 Uhr die Vorzeichen jedoch um und die PM_{10}-Konzentrationen an der Verkehrsmessstation liegen um einige Mikrogramm pro m³ niedriger als am Messfahrzeug. Die maximale Differenz betrug dabei rund 8 µg/m³ und wurde um 11:30 Uhr gemessen.

Eine weitere interessante Situation zeigt Abbildung 4.3.7. Nach dem Zeitpunkt der CMA-Ausbringung laufen die PM_{10}-Kurven an beiden Standorten lange Zeit nahezu parallel. Erst beginnend ab 8:00 Uhr zeigt sich ein größer werdender Belastungsunterschied, welcher um 9:30 Uhr mit rd. 8 µg/m³ sein Maximum erreicht und um 11:30 Uhr wieder verschwunden ist. Danach ist für die Dauer von zwei Stunden ein konstanter Belastungsunterschied von 2 µg/m³ erkennbar.

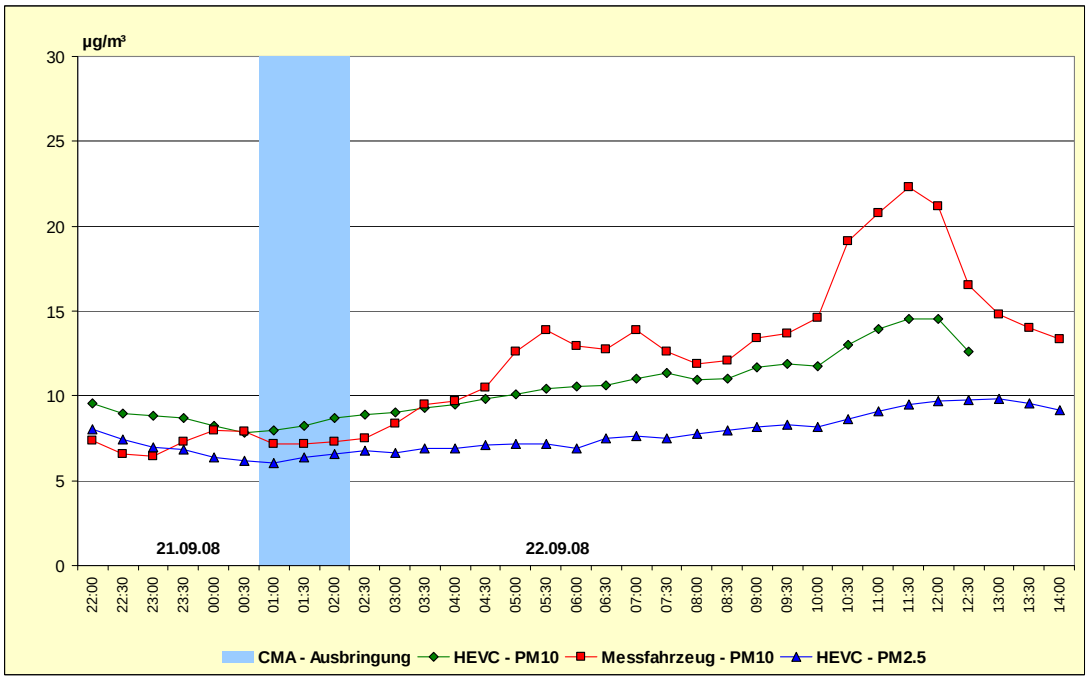

Abbildung 4.3.6: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 21./22.09.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

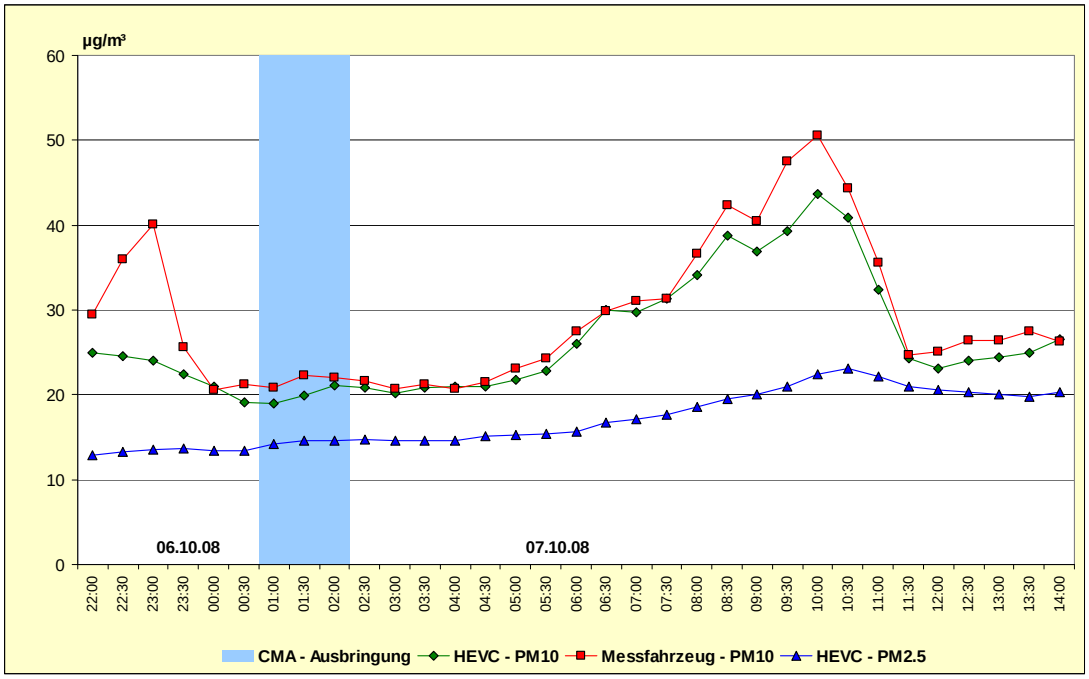

Abbildung 4.3.7: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 06./07.10.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

Möglich, dass dies ein Effekt des CMA ist, welches erwartungsgemäß erst mit dem stärker einsetzenden Verkehr seine Wirkung entfalten konnte, was über einen Zeitraum von drei Stunden hinweg offensichtlich auch erkennbar ist.
Der ab 10:00 Uhr deutlich sichtbare Einbruch der PM_{10}-Konzentrationen erklärt sich durch verbesserte Austauschbedingungen, da etwa zu diesem Zeitpunkt die Wolkendecke aufriss, die Sonne zum Vorschein kam und die Luft sich stetig erwärmte. Als Folge der entstehenden Turbulenzen wurden die mit Feinstaub angereicherten Luftmassen ausgeräumt.

Ein ähnliches Beispiel zeigt die Abbildung 4.3.8. Dort ist zwar nach dem gegen 1:30 Uhr erreichten Maximum ein deutlicher Rückgang der PM_{10}-Konzentrationen während der CMA-Ausbringung zu erkennen, jedoch zeigt sich dieser Rückgang gleichermaßen auch am Messfahrzeug. Darüber hinaus sind die Konzentrationen an der Verkehrsmessstation nach dem CMA-Einsatz bis ca. 7:30 Uhr höher als am Messfahrzeug. Erst danach werden für eine Dauer von ca. 6,5 Stunden – den Zeitraum der morgendlichen Verkehrsspitze mit eingeschlossen – niedrigere Konzentrationen als am Messfahrzeug erreicht.

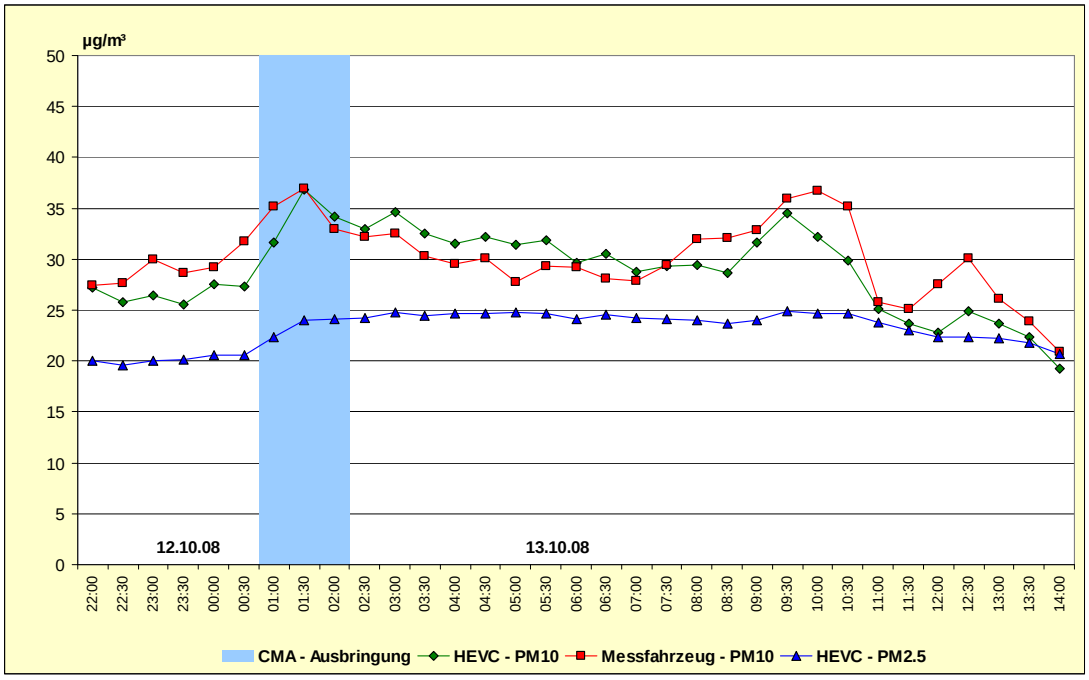

Abbildung 4.3.8: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 12./13.10.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

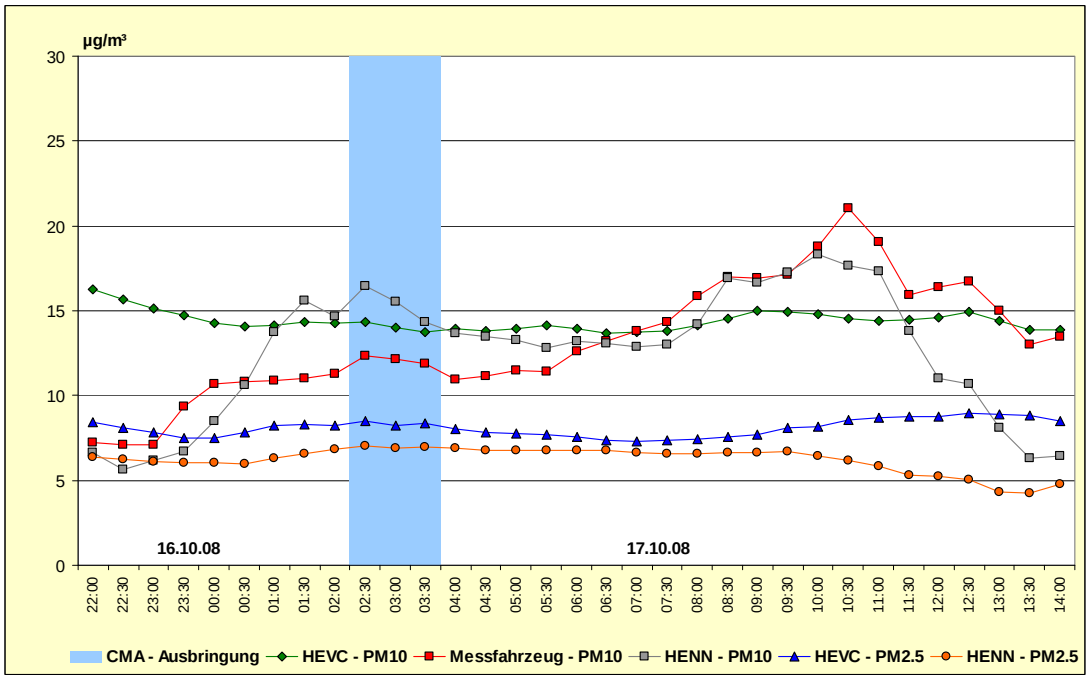

Abbildung 4.3.9: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 16./17.10.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC), Messfahrzeug und Halle/Nord (HENN)

Eine positive CMA-Wirkung lässt sich auch in Auswertung der Belastungssituation am 17. Oktober 2008 unterstellen (Abbildung 4.3.9). Es zeigen sich mit dem stärker einsetzenden Fahrzeugverkehr ab etwa 7:00 Uhr bis 13:00 Uhr höhere PM-Konzentrationen am Messfahrzeug. Die dort gegen 10:30 Uhr aufgetretene Belastungsspitze bildet sich im Konzentrationsverlauf an der Verkehrsmessstation nicht ab. Für eine CMA-Wirkung spricht auch der Vergleich mit dem Verlauf der PM_{10}-Konzentration an der Station Halle/Nord. Dieser folgt tendenziell dem Verlauf am Messfahrzeug, während sich demgegenüber der Verlauf an der Verkehrsmessstation auffallend „glatt“ darstellt. Letzteres gilt ebenso für die $PM_{2,5}$-Konzentrationen an beiden Messstationen.
Das besondere an dieser Situation ist, dass die Ausbringung aufgrund von Niederschlag zeitlich etwas nach hinten verlagert werden musste. Insofern dürfte die Wirkung des CMA noch etwas verstärkt worden sein, da die rel. Luftfeuchtigkeit bis 9:00 Uhr noch bei über 80% gelegen hatte.
Wie bereits unter 4.3.1 dargelegt, zeichnet sich dieser Tag auch durch einen relativ hohen „coarse-fraction“ – Anteil von 47% aus. Infolgedessen war ein entsprechendes Minderungspotential vorhanden, was offensichtlich auch wirksam wurde.

Die bereits gezeigten Situationen (Abbildung 4.3.4 bis Abbildung 4.3.9) sind stellvertretend für den mehr oder weniger gut sichtbaren feinstaubbindenden Effekt des CMA ausgewählt worden. Weitere Abbildungen ähnlicher Situationen, in denen eine Wirkung des CMA zu unterstellen ist, finden sich im Anhang.

Darüber hinaus traten im Zuge der Analyse der CMA-Einsatztage jedoch auch eine Reihe von Situationen zu Tage, welche offensichtlich keine bzw. nur minimale Minderungseffekte des CMA erkennen lassen. Auch dafür nachfolgend einige Beispiele im Text und weitere im Anhang.

Wie anhand von Abbildung 4.3.10 erkennbar ist, lagen die PM_{10}-Konzentrationen an der Verkehrsmessstation sowohl vor als auch nach der CMA-Ausbringung etwas höher als am Messfahrzeug (bei annähernd parallelem Verlauf). Mithin ist hier zunächst kein Minderungseffekt sichtbar. Erst ab 11:30 Uhr sinken die PM_{10}-Konzentrationen an der Verkehrsmessstation für längere Zeitabschnitte unter das Niveau am Messfahrzeug.

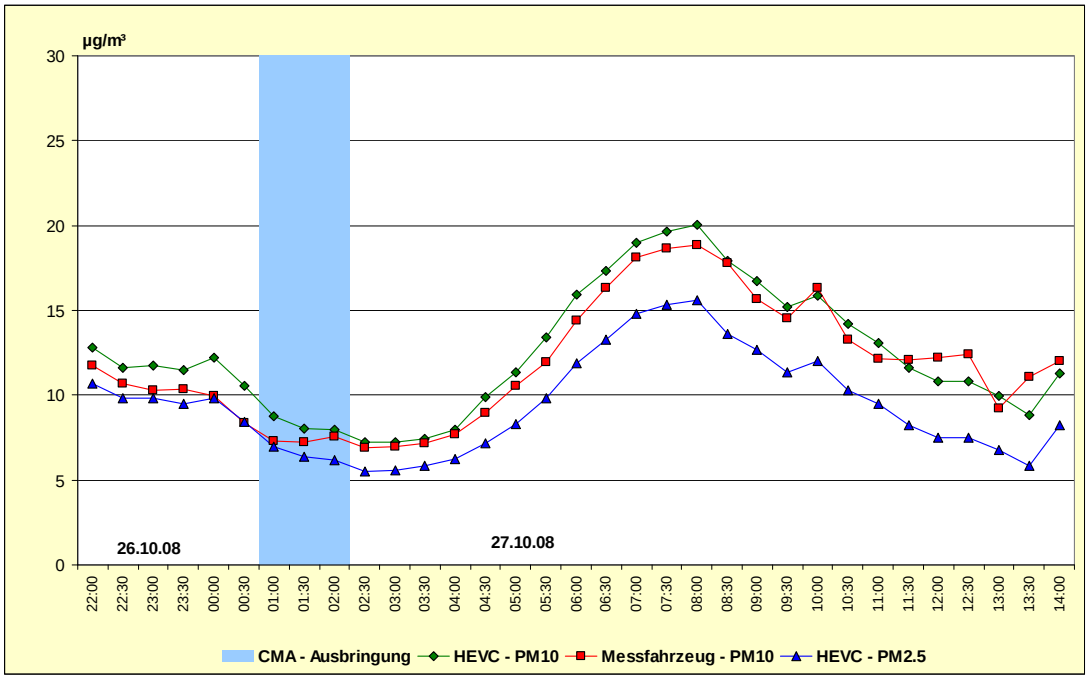

Abbildung 4.3.10: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 26./27.10.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

Die nachfolgende Abbildung 4.3.11 visualisiert eine Situation von Anfang November 2008. Sehr gut erkennbar ist der gleichlaufende Anstieg der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen, wobei die Partikel-Belastung an der Verkehrsmessstation etwas niedriger liegt. Nach der CMA-Ausbringung erreichen die PM_{10}-Konzentrationen an der Verkehrsmessstation das Niveau des Messfahrzeugs bzw. liegen zeitweise sogar darüber.

Bei der $PM_{2,5}$-Konzentration zeigt sich ab 4:00 Uhr für einige Stunden ein völlig anderer Verlauf mit teils abnehmenden Werten. Erst ab 11:00 Uhr verläuft diese Kurve dann wieder annähernd parallel zur PM_{10}-Konzentration.

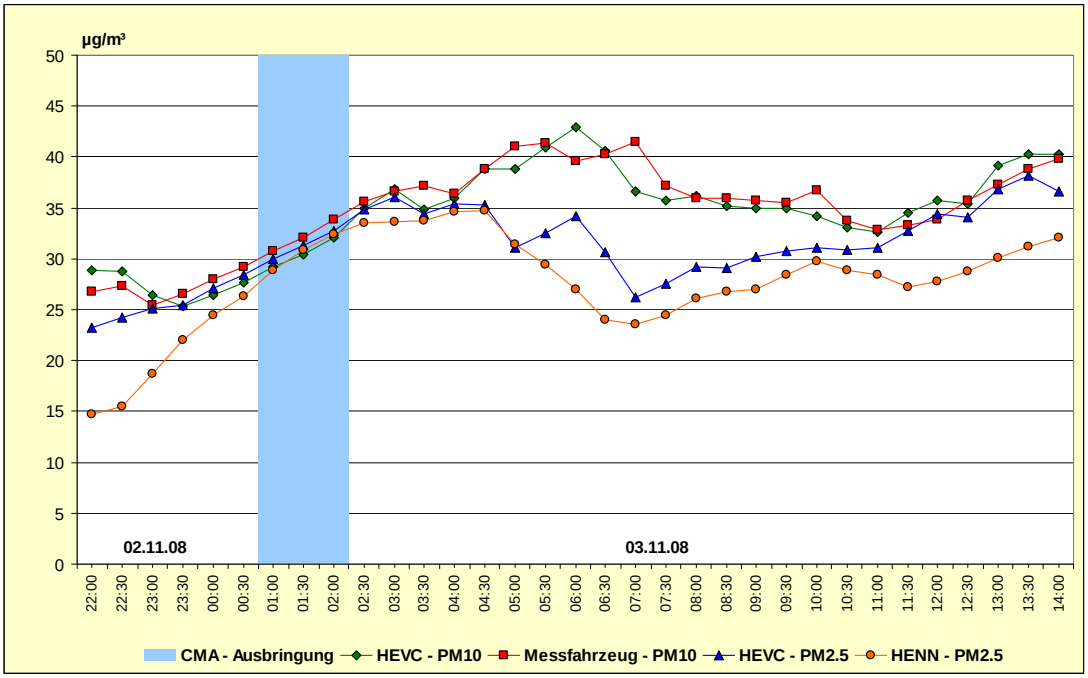

Abbildung 4.3.11: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 02./03.11.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC), Messfahrzeug und Halle/Nord (HENN)

Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass der Belastungsrückgang beim $PM_{2,5}$ auf den CMA-Einsatz zurückzuführen ist, denn dieser würde sich erwartungsgemäß eher auf die gröbere Staubfraktion hinsichtlich einer Reduzierung der Wiederaufwirbelung auswirken und nicht auf die primär auspuffbedingte, feinere Partikelfraktion. Darüber hinaus zeigt sich im Vergleich mit der $PM_{2,5}$-Kurve an der Station Halle/Nord ein ähnlicher Verlauf, der Belastungsrückgang ist dort sogar noch deutlicher ausgeprägt. Die Analyse der meteorologischen Bedingungen lieferte allerdings auch keine plausiblen Erklärungen für den Rückgang der $PM_{2,5}$-Konzentrationen.

Dass die $PM_{2,5}$-Konzentrationen vom CMA-Einsatz im Wesentlichen unbeeinflusst bleiben, zeigt das folgende Beispiel. Zum Vergleich wurde in Abbildung 4.3.12 zusätzlich der Verlauf der $PM_{2,5}$-Konzentrationen an der Stadtgebietsmessstation Halle/Nord mit dargestellt.
Erkennbar ist ein nahezu gleicher Verlauf der $PM_{2,5}$-Konzentrationen, wobei die Belastungsunterschiede von der Verkehrsmessstation zur Stadtgebietsmessstation erwartungsgemäß mit dem morgendlich ansteigenden Kfz-Verkehr größer werden.
Interessantes Detail dabei, vor dem CMA-Einsatz waren die $PM_{2,5}$-Konzentrationen nahezu identisch, unmittelbar während des Einsatzes und danach waren die Konzentrationen an der Verkehrsmessstation höher, obwohl in der Zeit nach Mitternacht bis etwa 3:00 Uhr kein hohes Verkehrsaufkommen zur unterstellen ist.

Die PM_{10}-Konzentrationen weisen ebenfalls einen nahezu parallelen Verlauf auf, jedoch waren die Werte an der Verkehrsmessstation während des CMA-Einsatzes und auch danach geringfügig (im Mittel um 1,9 µg/m³) höher als am Messfahrzeug.

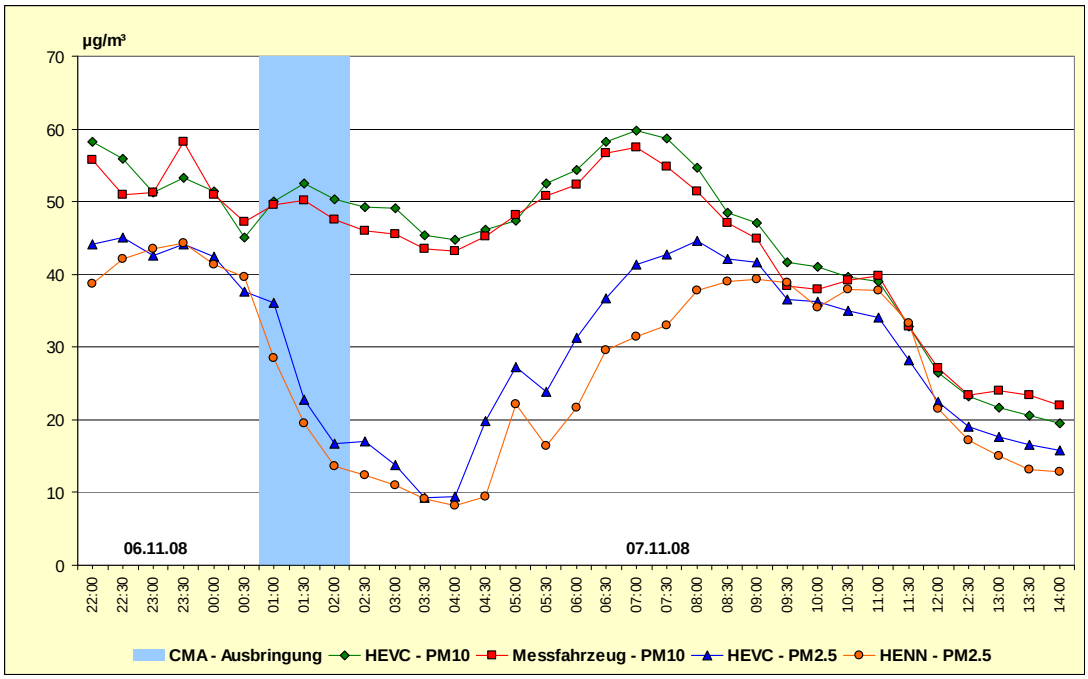

Abbildung 4.3.12: Verlauf der $PM_{10/2,5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 06./07.11.2008 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC), Messfahrzeug und Halle/Nord (HENN)

Neben der Betrachtung dieser konkreten Einzelsituationen erfolgte in einem weiteren Schritt die Berechnung der mittleren Tagesgänge (Zeitbasis: MEZ) der Partikelkonzentrationen für beide Messstandorte auf Basis der Halbstundenmittelwerte (Zeitraum: 15.09. bis 17.11.2008). Anhand dieser gemittelten Zeitverläufe sollten die sichtbaren Effekte des CMA-Einsatzes noch stärker herausgearbeitet werden. Dazu wurden die Tagesgänge getrennt für die Tage mit und ohne CMA-Einsatz ermittelt. Um die Betrachtung auf den Anteil der „coarse-fraction" zu beschränken, wurde die Differenz PM_{10} – $PM_{2,5}$ gebildet und als mittlerer Tagesgang dargestellt. In Ermangelung einer $PM_{2,5}$-Messreihe am Messfahrzeug erfolgte diese Berechnung für beide Standorte mit den $PM_{2,5}$-Daten der Verkehrsmessstation.

Das Ergebnis der Berechnungen für die CMA-Einsatztage ist in Abbildung 4.3.13 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Zeitverläufe beider Standorte insbesondere zwischen 4:00 und 12:00 Uhr deutlich voneinander abgrenzen. Ab 13:00 Uhr zeigt sich hingegen über mehrere Stunden hinweg ein nahezu paralleler und deutlich ansteigender Verlauf.
Inwieweit die deutlichen Belastungsunterschiede innerhalb des ersten Zeitfensters auf eine CMA-Wirkung zurückzuführen sind, zeigt der Vergleich mit Abbildung 4.3.14. Diese visualisiert eine analoge Berechnung für den Referenzzeitraum vom 18.11.2008 – 20.02.2009. Berücksichtigung fanden in diesem Fall nur die Werktage, da das CMA mit Ausnahme von zwei Samstagen nicht an Wochenenden eingesetzt worden ist.

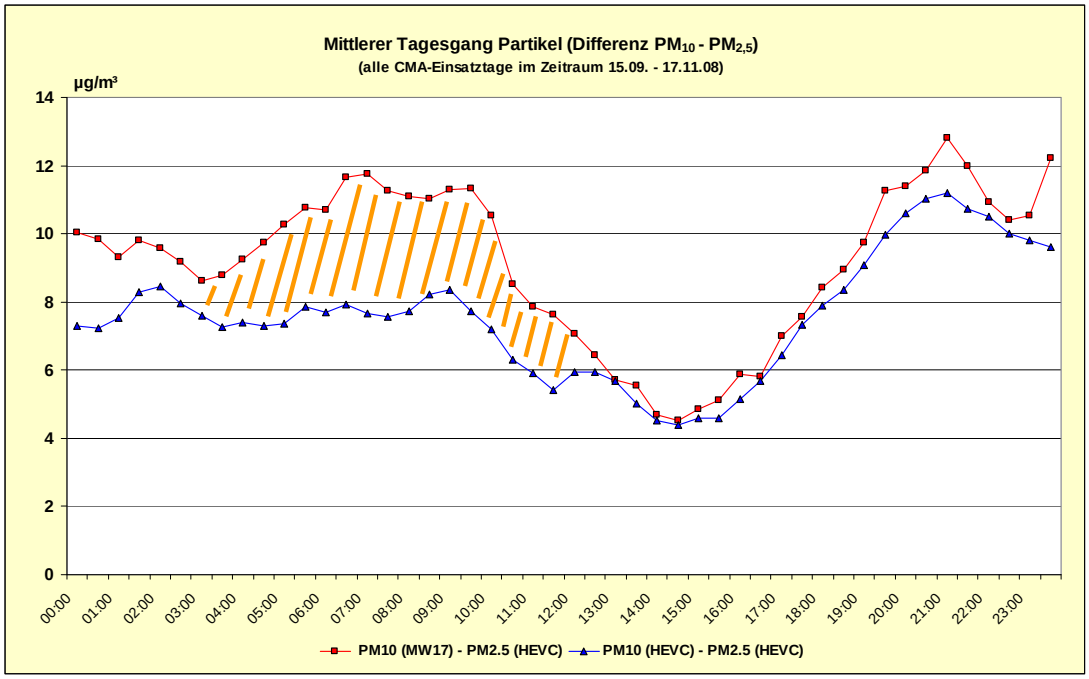

Abbildung 4.3.13: Mittlerer Tagesgang für Partikel (Differenz PM_{10} – $PM_{2.5}$) an CMA-Einsatztagen (15.09. – 17.11.2008)

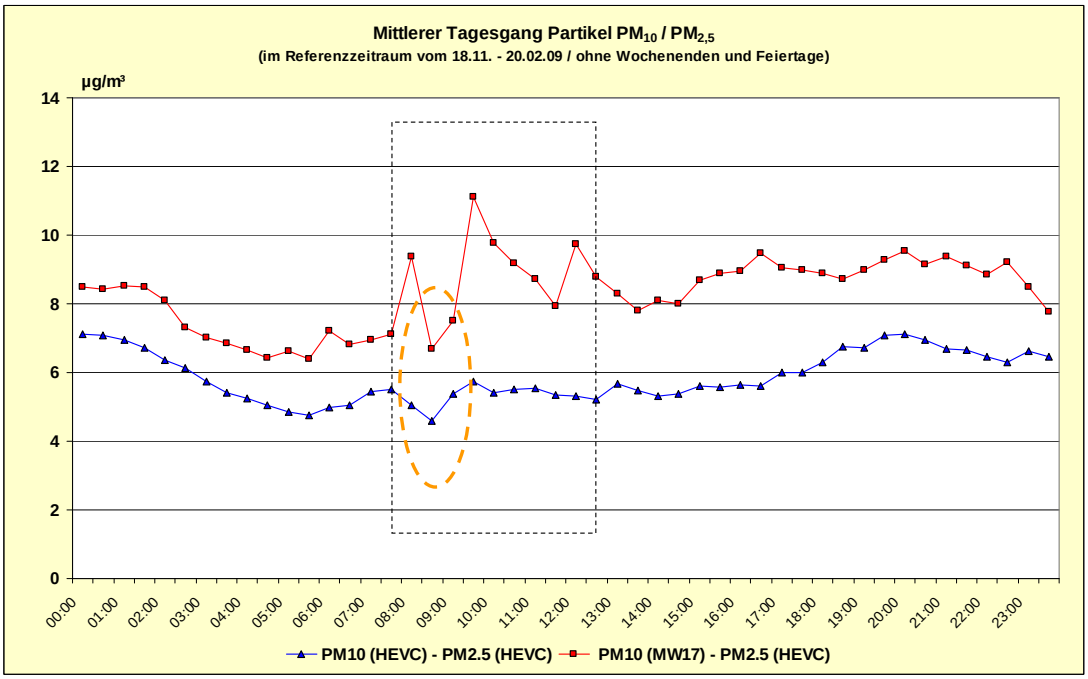

Abbildung 4.3.14: Mittlerer Tagesgang für Partikel (Differenz PM_{10} – $PM_{2.5}$) an Werktagen im Referenzzeitraum (18.11.08 – 20.02.2009)

In Auswertung von Abbildung 4.3.14 wird neben dem unterschiedlichen Belastungsniveau ein größtenteils paralleler Verlauf der Kurven beider Standorte deutlich. Die größten Differenzen treten in der Zeit von 8:00 bis 12:00 Uhr auf (rechteckiger Bereich) und es gibt keine so starke Annäherung im Kurvenverlauf wie am Nachmittag der CMA-Einsatztage. Auffällig dabei ist auch der an beiden Standorten ausgeprägte Belastungsrückgang um 8:30 Uhr (ovaler Bereich). Dieser Rückgang erklärt sich aus dem zeitweiligen Einbruch der Verkehrsbelegungszahlen und korrespondiert sehr gut mit dem in Abbildung 4.3.17 dargestellten Tagesgang des Fahrzeugverkehrs in der Merseburger Straße.

Insgesamt gesehen zeigen sich somit auch ohne CMA-Einsatz, insbesondere im Zeitfenster der morgendlichen Verkehrsspitze und am Vormittag größere Belastungsunterschiede zwischen beiden Standorten. Folgerichtig kann der Belastungsrückgang (orange schraffierter Bereich) in Abbildung 4.3.13 nur teilweise als CMA-Wirkung interpretiert werden.

Der Vergleich des mittleren Tagesganges (Tage ohne CMA-Einsatz) innerhalb der aktiven Versuchsphase vom 15.09. bis 17.11.2008 mit dem mittleren Tagesgang des Referenzzeitraumes (18.11.08 – 20.02.09) zeigt ein höheres Belastungsniveau im Referenzzeitraum. Darüber hinaus ist für den Referenzzeitraum ein deutlich geglätteter Verlauf der Konzentrationen am Messfahrzeug erkennbar (Abbildung 4.3.15).

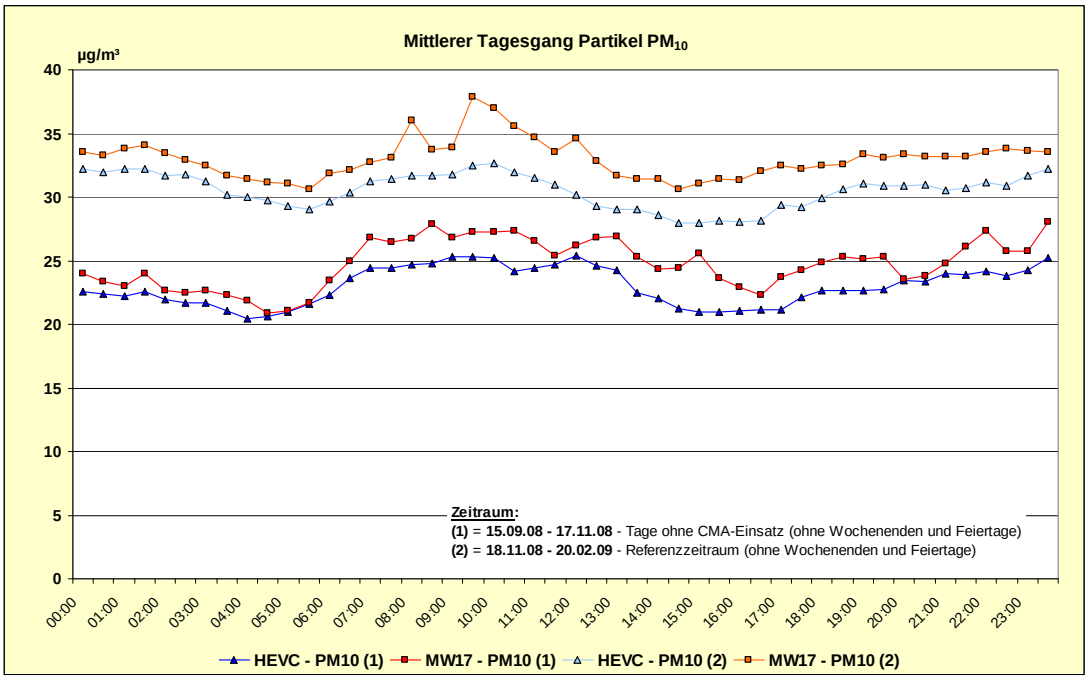

Abbildung 4.3.15: Mittlerer Tagesgang für Partikel PM_{10} an Werktagen (Zeitbezug: MEZ)

Der bereits beschriebene Belastungsrückgang zwischen 8:00 und 9:00 Uhr ist jeweils im Tagesgang des Messfahrzeugs deutlicher erkennbar. Bei den Tagesgängen im Zeitraum (1) ist für eine korrekte Interpretation jedoch der Einfluss der Sommerzeit zu berücksichtigen, da aufgrund der Zeitverschiebung der Berufsverkehr früher einsetzt.

Insgesamt gesehen ist der Vergleich zwischen CMA-Einsatztagen und Tagen ohne CMA-Ausbringung nicht unproblematisch, da sich diese beiden Datenkollektive in mehr als nur der Tatsache unterscheiden, ob nun CMA angewendet worden ist oder nicht.

Zunächst ist festzustellen, dass sich beide Datenkollektive hinsichtlich der Anzahl an Messtagen unterscheiden. Für den Zeitraum vom 15.09. bis 17.11.2008 lagen 23 auswertbare Tage[4] mit CMA-Einsatz und nur 17 Tage ohne CMA vor. Hinzu kommt, dass sich die einzelnen Wochentage in unterschiedlicher Häufigkeit in den Datenkollektiven widerspiegeln. Dies ist insofern von Bedeutung, da sich die Belastung an den verschiedenen Wochentagen, insbesondere in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke, durchaus unterschiedlich darstellt (Wochengang). In welcher Anzahl die einzelnen Wochentage in den beiden Datenkollektiven jeweils vorhanden sind zeigt Abbildung 4.3.16.

Die CMA-Ausbringung erfolgte überwiegend montags und freitags, dementsprechend entfällt nur jeweils ein Tag ohne CMA auf diese beiden Wochentage. Innerhalb des Wochenganges zeichnet sich der Montag im Allgemeinen durch die niedrigste Belastung aller Werktage aus. Ursache dafür ist das im Normalfall deutlich geringere Belastungsniveau am Wochenende. Im Laufe der Woche steigt die Belastung zumeist weiter an und erreicht am Donnerstag/Freitag ein Maximum. Mithin ist es im Sinne des angestellten Vergleiches sicher etwas nachteilig, wenn die Montage und Freitage in einem Daten-

[4] 24 Tage mit vollständigen Datensätzen, aber der 31.10.2008 wurde als Feiertag (Reformationstag) nicht mit berücksichtigt.

kollektiv überrepräsentiert sind. Dies mag auch ein Grund dafür sein, dass die CMA-Effekte nicht deutlicher hervortreten.

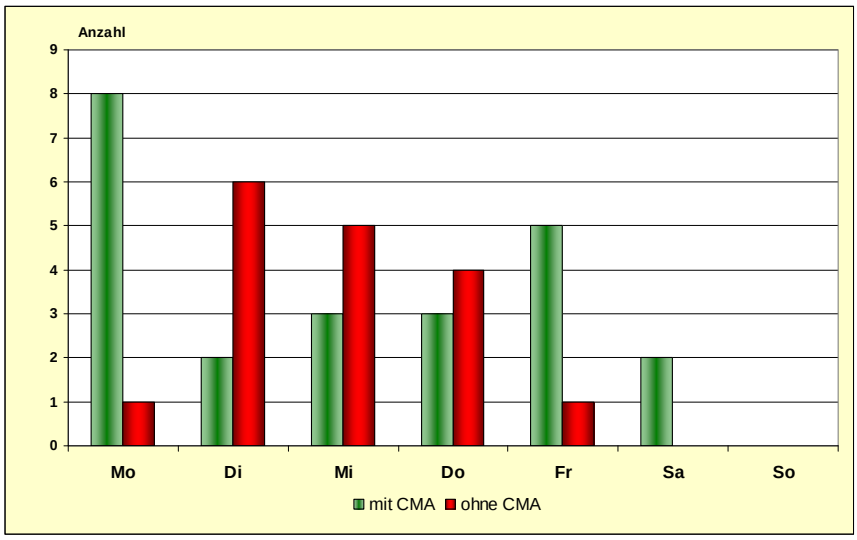

Abbildung 4.3.16: Anzahl der ausgewerteten Wochentage

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Datenkollektiven besteht auch hinsichtlich der meteorologischen Bedingungen, speziell was den Niederschlag anbelangt. Das CMA wurde nur bei trockenen Fahrbahnbedingungen ausgebracht. Mithin sind die CMA-Einsatztage zumindest in diesem Punkt als weitgehend homogen zu betrachten. Die Tage ohne CMA-Einsatz sind hingegen oftmals niederschlagsbeeinflusst.

Die nachfolgende Grafik visualisiert den mittleren Tagesgang des Fahrzeugverkehrs auf der Merseburger Straße im Bereich der Verkehrsmessstation in Fahrtrichtung Süden. Dargestellt ist die Summe aller erfassten Pkw und Lkw über jeweils eine halbe Stunde.

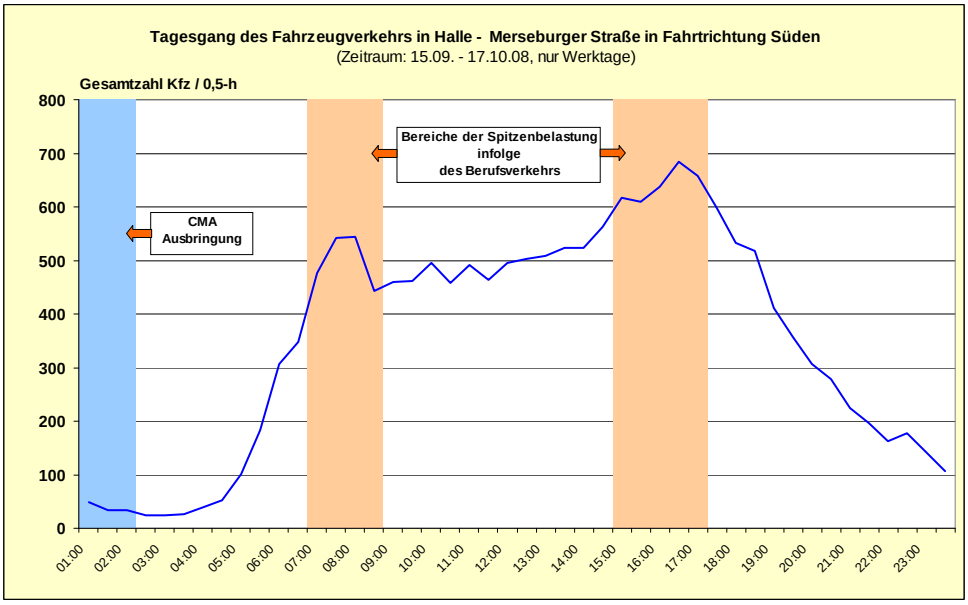

Abbildung 4.3.17: Tagesgang des Fahrzeugverkehrs auf der Merseburger Straße für alle Werktage im Zeitraum vom 15.09. – 17.10.2008

Erwartungsgemäß heben sich die Zeiträume der durch den Berufsverkehr bedingten Verkehrsspitzen deutlich heraus. Beginnend ab etwa 5 Uhr morgens steigen die Fahrzeugzahlen deutlich an. Das absolute Tagesmaximum wird jedoch erst am Nachmittag gegen 16.30 Uhr erreicht. Zu diesem Zeitpunkt passieren im Mittel rd. 680 Kfz / 0,5-h die Messstation.

Somit sind insgesamt gesehen die in Auswertung der zeitlich höher aufgelösten Partikel-Messwerte im Hinblick auf den Nachweis bzw. die Quantifizierung einer Wirkung des ausgebrachten CMA gewonnenen Erkenntnisse als positiv zu werten. Folgendes **Zwischenfazit** lässt sich aus diesen Erkenntnissen ableiten.

- Eine sofortige Wirkung des CMA auf die Partikelkonzentrationen in der Außenluft unmittelbar nach der Ausbringung (zwischen 01:00 Uhr und 02:00 Uhr) in dem Sinne, dass ein Rückgang der Konzentrationen zu beobachten gewesen wäre, konnte im Versuchszeitraum nicht nachgewiesen werden. Grund dafür ist die ausbleibende Wiederaufwirbelung, da zum Ausbringungszeitraum nur eine geringe Verkehrsbelegung (siehe Abbildung 4.3.17) zu unterstellen ist.
- Anhand einiger Situationen ist jedoch eine Wirkung des CMA insofern nachzuweisen, dass durch dessen Ausbringung der Anstieg der Partikel-Belastung im Vergleich zur nahegelegenen Referenzstation (Messfahrzeug) deutlich gedämpft werden konnte und dies sowohl Steigung als auch absolute Höhe betreffend.
- Bei Auswertung der Zeitverläufe wurde erwartungsgemäß deutlich, dass eine Wirkung des CMA sofern überhaupt erst mit dem Einsetzen des Berufsverkehrs erkennbar wird.
- Die überwiegende Mehrzahl der ausgewerteten Situationen erbrachte durchaus im Sinne einer möglichen CMA-Wirkung interpretier- und auswertbare Erkenntnisse.

4.4 Bewertung und Diskussion

Zunächst ist festzustellen, dass anhand der Auswertung der vorliegenden Daten die erwarteten positiven Effekte des Einsatzes von CMA zur Minderung der Feinstaubbelastung nachweisbar waren.

Es konnte für die Tage des CMA-Einsatzes ein etwas größerer Belastungsunterschied zwischen Messfahrzeug und Verkehrsmessstation abgeleitet werden als für die Tage ohne CMA-Ausbringung. Der Belastungsunterschied betrug im Mittel 3,7 µg/m³ bei einer Spannweite von minimal 0,3 µg/m³ und maximal 9,7 µg/m³. Die Differenz zum Referenzzeitraum lag bei 0,7 µg/m³. Diese Differenz lässt sich der feinstaubbindenden Wirkung des CMA zuordnen und beschreibt das durchschnittliche Minderungspotential bezogen auf den Versuchszeitraum (Basis Tagesmittelwerte PM_{10}) unter den gewählten, nicht optimalen Projektbedingungen.
Das o.g. Minderungspotential ergibt sich in gleicher Höhe auch bei der Verfolgung eines zweiten Ansatzes, bei dem in der aktiven Versuchsphase keine Trennung in CMA-Einsatztage und Nicht-CMA-Tage erfolgt ist. Aus dem Vergleich der jeweils für die Aktivphase und den Referenzzeitraum ermittelten Belastungsunterschiede zwischen Verkehrsmessstation und Messfahrzeug leitet sich ebenfalls ein Minderungspotential in Höhe von 0,7 µg/m³ ab.

Weitere Effekte konnten durch die Auswertung der zeitlich höher aufgelösten Partikel-Messwerte dargelegt werden. Die Mehrzahl der untersuchten Einzelsituationen, in denen der Zeitraum einige Stunden vor und einige Stunden nach der CMA-Ausbringung im Detail betrachtet und ausgewertet wurde, zeigte in unterschiedlich starker Ausprägung eine messbare Beeinflussung der Partikelkonzentrationen durch den CMA-Einsatz. Diese Beeinflussung erstreckte sich zumeist über einen Zeitraum von 4:00 Uhr bis etwa maximal 17:00 Uhr des CMA-Ausbringungstages.

Insgesamt gesehen wurden in Auswertung des Projektes Minderungseffekte festgestellt, die höchstwahrscheinlich auf den CMA-Einsatz zurückzuführen sind. Diese Minderungseffekte sind ähnlich den Klagenfurter Untersuchungsergebnissen mit einem durchschnittlichen Reduktionspotential von 0,5 bis 1,0 µg/m³, dort allerdings bezogen auf den PM_{10}-Jahresmittelwert, zu bewerten (siehe 2).

Nachfolgend sollen einige potentielle Einflussgrößen diskutiert werden, die mögliche Ursachen dafür sein könnten, dass hier in Halle nicht deutlich größere Minderungseffekte nachgewiesen werden konnten.

Da wäre zunächst der **Projektzeitraum** zu nennen. Wie bereits unter 4.2 beschrieben, ist der Zeitraum vom 15.09. bis zum 17.11.2008 hinsichtlich der Feinstaubbelastung als vergleichsweise niedrig belastet einzustufen. In dieser Zeit wurden an der Verkehrsmessstation und am Messfahrzeug nur zwei moderate Überschreitungen des Tagesmittelwertes von 50 µg/m³ gemessen (jeweils am gleichen Tag). Während des Versuches gab es darüber hinaus keine einzige überregionale Belastungssituation, die zu großflächigen Überschreitungen geführt hätte. Auch temporär aufgetretene bodennahe Temperaturinversionen führten nicht zu einer länger anhaltenden Anreicherung der PM_{10}-Konzentrationen in den bodennahen Luftschichten. Mithin traten keine wirklich hohen Partikelkonzentrationen auf.
Der Projektzeitraum ist aber auch insofern von Bedeutung, da ähnliche Projekte meist unter winterlichen Straßenbedingungen, d.h. im Winterhalbjahr durchgeführt wurden. Hauptgrund war, dass eine Überschneidung mit dem regulären Winterdienst in der Merseburger Straße und dem in diesem Zusammenhang ausgebrachten Taumittel (NaCl/MgCl*)* vermieden werden sollte. Darüber hinaus wurde die CMA-Ausbringungs-Technik für den Winterdienst benötigt.
Zur Frage, ob das Projekt im Winterhalbjahr mit potentiell höherer Belastung erfolgreicher gewesen wäre, kann keine Aussage getroffen werden.

Des Weiteren ist möglicherweise der **Ausbringungszeitpunkt** von Bedeutung, welcher überwiegend in der Zeit um Mitternacht bis 2:00 Uhr gelegen hat. Dies bedeutet, dass bis zu dem Zeitpunkt, wo der Berufsverkehr einsetzte, bereits etwa 4 Stunden vergangen waren. In dieser Zeit (Nassphase) erfüllte das CMA angesichts der niedrigen Verkehrszahlen praktisch keinen messbaren Effekt. In der sich anschließenden Trockenphase entfaltet das CMA gemäß den Herstellerangaben ebenfalls seine feinstaubbindende Wirkung. Die Dauer der Wirkung ist jedoch von der Befahrungshäufigkeit durch Fahrzeuge und sicher auch von Witterungseinflüssen abhängig.
Unterstellt man nun, dass die Wirkung des CMA in der Nassphase eventuell sogar noch höher einzuschätzen ist als in der Trockenphase, war der Zeitpunkt für die Ausbringung möglicherweise zu früh gewählt, um gerade die durch die morgendliche Verkehrsspitze entstehenden Partikelbelastung zu beeinflussen.

Als ein weiterer Grund ist auch die Tatsache zu diskutieren, dass eine CMA-Benetzung des **Gleisbettes der Straßenbahn** (Ergebnisse aus den Bremsversuchen siehe 3.1) bei der Ausbringung vermieden werden musste. Dies war nur mit der eingeschränkten Streubreite am Ausbringungsfahrzeug realisierbar. Eine vollständige und flächendeckende CMA-Benetzung über die gesamte Fahrbahnbreite konnte damit nicht gewährleistet werden. Die nicht zu unterschätzenden Quellen für die Aufwirbelung von Partikeln im Straßenraum insbesondere durch die Straßenbahn blieben damit erhalten. Ein Einsatz in Bereichen mit Gleisbett im Straßenverlauf scheint somit wenig sinnvoll.

In diesem Zusammenhang ist auch die eingesetzte **Ausbringungstechnik** zu hinterfragen, denn diese konnte im Rahmen dieses Versuches nicht speziell für die Ausbringung von CMA angepasst werden. Die eingesetzte Anhänge-Streumaschine vom Typ STRATOS A ist normalerweise für die Ausbringung von Feuchtsalz und Sole konzipiert. Das CMA trat zwar in diesem Fall an die Stelle der sonst verwendeten Sole, aber für die Komponente Feuchtsalz gab es keinen adäquaten Ersatz. Darüber hinaus weist das CMA eine andere Viskosität als die üblicherweise eingesetzte Sole auf, denn es ist deutlich zähflüssiger und klebriger, was wiederum technische Probleme zur Folge hat. Eine gleichmäßige Ausbringung des CMA wurde dadurch erschwert und es waren in der Regel mehrere Fahrten notwendig um einen gleichmäßigen Auftrag auf der Fahrbahndecke zur erzielen.
Insofern ist aus dieser Erfahrung heraus festzustellen, dass herkömmliche Ausbringungstechnik wie sie üblicherweise im regulären Winterdienst eingesetzt wird, nicht zwangsläufig auch optimal für die CMA-Ausbringung geeignet ist.

Der CMA-Einsatz erfolgte in Kombination mit einer lt. Luftreinhalte- und Aktionsplan für den Ballungsraum Halle für das Versuchsgebiet vorgeschriebenen **Geschwindigkeitsreduzierung** auf ein Tempo von 30 km/h. Diese Geschwindigkeitsbegrenzung gilt jeweils im Zeitraum vom 01.09. bis zum 30.04. des Folgejahres. Insofern wäre zunächst zu unterstellen, dass die herausgearbeiteten Minderungseffekte auf die **Kombination beider Maßnahmen** zurückzuführen wären. Dies ist jedoch nicht der Fall, da die Geschwindigkeitsbegrenzung auch im Referenzzeitraum noch Gültigkeit hatte. Folglich können diesbezüglich vergleichbare Versuchbedingungen unterstellt werden.
Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass bei höheren gefahrenen Geschwindigkeiten, beispielsweise im Bereich der regulär erlaubten 50 km/h, noch größere Minderungseffekte auftreten können, da mit höheren Geschwindigkeiten auch eine größere Wiederaufwirbelung verbunden ist und das CMA möglicherweise unter diesen Bedingungen auch eine breitere Wirkung entfalten könnte.

Allerdings sind die Befolgungsraten für die Geschwindigkeitsbegrenzung ohnehin als gering einzustufen. Die Auswertung der in beiden Fahrtrichtungen angebrachten Geschwindigkeitsmesstafeln erbrachte Befolgungsraten von rd. 6 % in der Fahrtrichtung Süden und von rd. 24 % in Richtung Norden. Die überwiegende Mehrzahl der Fahrzeuge fuhr im Geschwindigkeitsbereich zwischen 35 – 50 km/h und dies trotz häufig durchgeführter Kontrollen und optischer Anzeige der gefahrenen Geschwindigkeit.

Im Zeitraum vom 29.09.2008 bis zum 10.10.2008 galt die Geschwindigkeitsbegrenzung auf einer Strecke von ca. 350 m Länge, beginnend an der Kurvenausfahrt am Bahnhof bis in Höhe der Polizeidirektion, zusätzlich auch für die Straßenbahn. In diesen beiden Wochen wurde CMA an fünf Tagen zum Einsatz gebracht. Die mittlere Differenz der PM_{10}-Tagesmittelwerte zwischen dem Messfahrzeug und der Messstation betrug an diesen Tagen **5,3 µg/m³** und lag damit um **2 µg/m³** höher als an den übrigen CMA-Einsatztagen (gilt für Tage mit TMW PM_{10} Messfahrzeug > TMW PM_{10} Verkehrsmessstation). Innerhalb des genannten Zeitraumes wurden mit 9,2 µg/m³ (29.09.2008) und 9,7 µg/m³ (09.10.2008) die höchsten Belastungsunterschiede zwischen der Messstation und dem Messfahrzeug innerhalb des CMA-Einsatzzeitraumes ermittelt. Dies legt zumindest die Vermutung nahe, dass sich die Temporeduzierung für den Straßenbahnverkehr positiv auf die Feinstaub-Belastungssituation im Bereich der Messstation ausgewirkt haben könnte. Der Zeitraum für die Temporeduzierung war insgesamt gesehen jedoch etwas zu kurz gewählt. Mithin standen für den direkten Vergleich nur fünf Tage zur Verfügung – zu wenig für eine sicherere Aussage.

Abschließend bleibt als ein wesentliches Fazit der Diskussion festzuhalten, dass die Ergebnisse unter optimaler gestalteten Projektbedingungen durchaus wohl auch anders hätten ausfallen können. Es ist jedoch mehr als legitim, die Versuchsbedingungen analog zu den potentiellen Einsatzbedingungen zu gestalten. Somit ist weitgehend ausgeschlossen, dass sich die unter speziellen Versuchbedingungen gewonnenen Ergebnisse später unter Praxisbedingungen nicht verifizieren lassen.
Aus fachlicher Sicht bleibt dennoch festzuhalten, dass es zu viele Kompromisse in der Versuchsdurchführung gegeben hat bzw. geben musste, um das Projekt überhaupt realisieren zu können. Als sehr wesentliche Randbedingung wirkt sich dabei vor allem die ungünstige Jahreszeit aus. Wie bereits dargelegt, zeichnete sich der eigentliche Projektzeitraum durch ein relativ niedriges PM_{10}-Belastungsniveau aus. Damit war insbesondere auch der Anteil der „coarse-fraction“ niedrig, so dass der durch das CMA beeinflussbare Anteil der Feinstaubbelastung von vornherein ebenfalls gering war.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zur Vorbereitung der Versuchsdurchführung war es erforderlich, die Arbeit mehrerer Stellen (siehe Anhang Tabelle A 1) zu koordinieren. Obwohl die Mitarbeit ausnahmslos gut war, erforderte die Koordinierung einen entsprechend hohen Arbeitsaufwand.

Neben den Vorbereitungsarbeiten wie u.a. die Anordnung und Aufstellung von Verkehrszeichen, Bereitstellung der Gerätetechnik zur Ausbringung des CMA, Bereitstellung der Messtechnik, Erarbeitung von Einsatzplänen sowie die Erarbeitung von Pressemitteilungen war die Vorbereitung insbesondere durch die im Vorfeld abzuklärenden sicherheitstechnischen Aspekte sehr aufwändig.

Bei den sicherheitstechnischen Aspekten galt es insbesondere mögliche Veränderungen der Bremseigenschaften bei Straßenbahn und Kraftfahrzeug durch das aufgesprühte CMA auszuschließen. Im Ergebnis der Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass der Bremsweg der Straßenbahn bei CMA-benetzten Gleisen gegenüber Wasser und trockenem Zustand erheblich verlängert wurde, so dass eine Benetzung der Straßenbahngleise im Versuchsgebiet mit der Einstellung der Streubreite vermieden werden musste. Der Bremsversuch mit dem Pkw dagegen brachte keine signifikanten Veränderungen der Haftung zwischen Reifen und Fahrbahn bei der CMA-Anwendung. Dennoch erfolgte die Überwachung der Verkehrssicherheit während der Versuchsdurchführung durch die Polizei.

Bei der Durchführung des Versuches, bestand darüber hinaus für die Stadtwirtschaft GmbH Halle das Problem, die Einsätze der CMA-Ausbringung im Vorfeld nicht genau planen zu können, da das CMA auf Grund der vorgegebenen Versuchsbedingungen nur bei trockener Witterung ausgebracht werden sollte.

Der CMA-Einsatz erfolgte in Kombination mit einer lt. Luftreinhalte- und Aktionsplan für den Ballungsraum Halle für das Versuchsgebiet vorgeschriebenen **Geschwindigkeitsreduzierung** auf ein Tempo von 30 km/h. Diese Geschwindigkeitsbegrenzung gilt jeweils im Zeitraum vom 01.09. bis zum 30.04. des Folgejahres.

Die Auswertung der Projektergebnisse erfolgte durch die Wahl unterschiedlicher Ansätze, um der vielfältigen Problematik, die sich aus der Art und Weise der Versuchsdurchführung- und überwachung und dem Einfluss äußerer Bedingungen, wie beispielsweise unterschiedliche Luftschadstoffbelastung und Meteorologie, ergeben hat, Rechnung zu tragen.

Als wesentlichste Erkenntnis des durchgeführten Projektes lässt sich festhalten, dass eine feinstaubbindende Wirkung des CMA nachgewiesen werden konnte. Bezogen auf den Untersuchungszeitraum ergab sich ein mittleres Minderungspotential in Höhe von 0,7 µg/m³ bei einer Spannweite von minimal 0,3 µg/m³ und maximal 9,7 µg/m³.

Ein mittleres Minderungspotential < 1,0 µg/m³ erscheint zwar als gering, jedoch steht dieses Ergebnis durchaus im Kontext mit Erkenntnissen aus den bereits zitierten Klagenfurter Untersuchungen. Dort wurde ein durchschnittliches Reduktionspotential in Höhe von 0,5 bis 1,0 µg/m³ bezogen auf den PM_{10}-Jahresmittelwert ausgewiesen.

Bei der detaillierten Auswertung der Zeitverläufe im Untersuchungszeitraum wurde weiterhin deutlich, dass durch den CMA-Einsatz in einigen Situationen der Anstieg der Partikel-Belastung an der Verkehrsmessstation im Vergleich zur nahegelegenen Referenzstation (Messfahrzeug) gedämpft werden konnte. Eine mögliche Wirkung des CMA wird erst mit dem Einsetzen des morgendlichen Berufsverkehrs erkennbar.

Die wesentlichste Schlussfolgerung des Projektes ist, dass unter den hier gewählten, nicht optimalen Rahmenbedingungen ein CMA-Einsatz in der Merseburger Straße nur einen geringen Beitrag zur Verminderung der Feinstaubbelastung leisten kann.

Danksagung

Dieser Bericht entstand aus einem gemeinsamen Projekt der Stadt Halle und des Landesamtes für Umweltschutz des Landes Sachsen-Anhalt.
Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Gobsch für sein Engagement bei der Kontaktaufnahme zum Hersteller des Calcium-Magnesium-Acetats und bei der unentgeltlichen Bereitstellung des Streumaterials für die Stadt Halle.
Außerdem wird dem Hersteller NORDISK ALUMINAT A/S für die unentgeltliche Bereitstellung des Calcium-Magnesium-Acetats und Herrn Wittstock, der RAW Handel und Beratungs GmbH, deutscher Vertreter des dänischen Herstellers NORDISK ALUMINAT A/S für die Vermittlung gedankt.
Der Dank gilt auch der Halleschen Verkehrs AG (HAVAG) und der DEKRA Automobil GmbH für die Möglichkeit der Abklärung sicherheitstechnischer Aspekte bei Straßenbahnen und Kraftfahrzeugen ebenfalls im Vorfeld des Projektversuches.
Nicht zuletzt geht der Dank an die Stadtwirtschaft GmbH Halle für die Vorbereitung und reibungslose Ausführung des Versuches und das Polizeirevier Halle für die Überwachung der Verkehrssicherheit im Vorfeld und während des Versuchsablaufs.

Literaturverzeichnis

/1/ M. Norman, C. Johansson „Studies of some measures to reduce road dust emissions from paved roads in Scandinavia“, Atmospheric Environment 40 (2006) 6154-6164

/2/ Produktinformation „Ice & Dust-Away“, NORDISK/ALUMINAT, vertreten in Deutschland durch RAW Handel und Beratungs GmbH

/3/ TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik „Ausbringung von CM Austrosafe als Maßnahme zur Reduktion der Wiederaufwirbelung von Straßenstaub in Klagenfurt“, Bericht Nr. I-27/2007 VU06/06/I-619 vom 20.11.2007

/4/ Vortrag Dr. W. Hafner „PM_{10}-Reduktion im städtischen Bereich durch Verwendung von CMA als Feinstaubkleber“, Bundesanstalt für Straßenwesen vom 05.03.2008

/5/ Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt „Luftreinhalte- und Aktionsplan für den Ballungsraum Halle 2005“, März 2005 (http://www.halle.de/DownLoads/3139/Luftreinhalteplan.pdf)

/6/ Fachinformation des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 9/2008 „Feinstaub und Stickstoffdioxid im Stadtgebiet Halle und Magdeburg“

/7/ Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Ges. „Griffigkeitsmessungen in Klagenfurt am Auenweg vor und nach Aufbringung von CMA-Auftaumittel“; Projekt Nr. 2.05.00381.1.0-21 vom 14.11.2007

Anhang

Tabelle A 1: Zuständigkeiten bei der Versuchsdurchführung

Institution	Aufgaben
NORDISK ALUMINAT A/S RAW Handel und Beratungs GmbH Grünstraße 5 79232 March-Hugstetten	- kostenlose Bereitstellung des CMA und Vermittlung
Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt Fachbereich 3 Immissionsschutz/Klimaschutz Reideburger Straße 47 06116 Halle (Saale)	- messtechnische Versuchsbegleitung - Auswertung und Beurteilung der Messdaten - Erarbeitung eines Fachberichts
Ämter der Stadt Halle (Saale): Umweltamt Straßen- und Tiefbauamt Ordnungsamt Stadtplanungsamt	- Organisation und Koordination - Erarbeitung von Pressemitteilungen - Anordnung und Aufstellung von Verkehrszeichen und Geschwindigkeitsmesstafeln - Überwachung des fließenden Verkehrs - Mitarbeit am Fachbericht des LAU
Stadtwirtschaft GmbH Halle Äußere Hordorfer Straße 12 06114 Halle (Saale)	- Ausbringung des CMA mit geeigneter Gerätetechnik im Versuchszeitraum sowie bei den vorbereitenden sicherheitstechnischen Tests
Polizeirevier Halle Verkehrsorganisation An der Fliederwegskaserne 17 06130 Halle	- Beratung und Klärung von Fragen der Verkehrssicherheit - Überwachung der Verkehrssicherheit
Hallesche Verkehrs-AG Freiimfelder Straße 74 06112 Halle/Saale	- Bremsversuche Straßenbahn
DEKRA Automobil GmbH Niederlassung Halle Schieferstr. 2 06126 Halle	- Bremsversuche Fahrbahn

Tabelle A 2: *Übersicht über die CMA-Ausbringung in der aktiven Versuchsphase*

Datum	Wochentag	CMA-Auf-bringung ja/nein	von	bis	Menge [Liter]	Temperatur (12:00 Uhr)	Bemerkungen
15.09.2008	Montag	ja	0:30	1:30	160	11°C	planmäßig
16.09.2008	Dienstag	nein				9°C	planmäßig
17.09.2008	Mittwoch	ja	0:45	1:45	210	11°C	planmäßig
18.09.2008	Donnerstag	nein				13°C	planmäßig
19.09.2008	Freitag	ja	1:30	2:30	210	14°C	planmäßig
20.09.2008	Samstag	nein				13°C	planmäßig
21.09.2008	Sonntag	nein				13°C	keine Kapazitäten
22.09.2008	Montag	ja	1:00	2:20	230	11°C	planmäßig
23.09.2008	Dienstag	nein				12°C	planmäßig
24.09.2008	Mittwoch	ja	1:00	2:00	210	12°C	planmäßig
25.09.2008	Donnerstag	ja	1:00	2:00	200	13°C	Regen am Vortag
26.09.2008	Freitag	ja	1:00	2:00	210	10°C	Aufbringung, da am WE keine Kapazitäten
27.09.2008	Samstag	nein				10°C	planmäßig
28.09.2008	Sonntag	nein				15°C	keine Kapazitäten
29.09.2008	Montag	ja	1:00	2:00	150	15°C	planmäßig
30.09.2008	Dienstag	nein				12°C	planmäßig
01.10.2008	Mittwoch	nein				14°C	Regen
02.10.2008	Donnerstag	ja	1:00	2:00	220	13°C	planmäßig
03.10.2008	Freitag	nein				12°C	planmäßig
04.10.2008	Samstag	ja	1:00	2:00	250	13°C	planmäßig
05.10.2008	Sonntag	nein				12°C	planmäßig
06.10.2008	Montag	nein				12°C	Fahrbahn feucht
07.10.2008	Dienstag	ja	1:00	2:00	230	15°C	planmäßig
08.10.2008	Mittwoch	nein				14°C	planmäßig
09.10.2008	Donnerstag	ja	1:00	2:00	200	14°C	planmäßig
10.10.2008	Freitag	nein				12°C	planmäßig
11.10.2008	Samstag	ja	0:30	1:30	250	15°C	planmäßig
12.10.2008	Sonntag	nein				16°C	planmäßig
13.10.2008	Montag	ja	1:00	2:00	200	15°C	planmäßig
14.10.2008	Dienstag	nein				17°C	planmäßig
15.10.2008	Mittwoch	ja	1:00	2:00	190	14°C	planmäßig
16.10.2008	Donnerstag	nein				14°C	planmäßig
17.10.2008	Freitag	ja	2:30	3:30	170	11°C	planmäßig (zeitlich ver-lagert wegen Nässe)
18.10.2008	Samstag	nein				11°C	planmäßig
19.10.2008	Sonntag	nein				11°C	keine Kapazitäten
20.10.2008	Montag	ja	1:00	2:00	210	14°C	planmäßig
21.10.2008	Dienstag	nein				19°C	planmäßig
22.10.2008	Mittwoch	nein				10°C	Regen
23.10.2008	Donnerstag	ja	1:00	2:00	210	10°C	planmäßig
24.10.2008	Freitag	ja	1:00	2:00	200	9°C	Aufbringung, da am WE keine Kapazitäten

Datum	Wochentag	CMA-Auf-bringung ja/nein	von	bis	Menge [Liter]	Temperatur (12:00 Uhr)	Bemerkungen
25.10.2008	Samstag	nein				11°C	planmäßig
26.10.2008	Sonntag	nein				14°C	keine Kapazitäten
27.10.2008	Montag	ja	1:00	2:00	230	10°C	planmäßig
28.10.2008	Dienstag	ja	3:00	4:00	170	9°C	Regen am Vortag (zeitlich verlagert wegen Nässe)
29.10.2008	Mittwoch	nein				6°C	planmäßig
30.10.2008	Donnerstag	nein				3°C	Regen
31.10.2008	Freitag	ja	23:00	0:00	220	8°C	Regen am Morgen am Abend planmäßig
01.11.2008	Samstag	nein				4°C	planmäßig
02.11.2008	Sonntag	nein				5°C	planmäßig
03.11.2008	Montag	ja	1:00	2:00	240	9°C	planmäßig
04.11.2008	Dienstag	nein				9°C	planmäßig
05.11.2008	Mittwoch	ja	1:00	2:00	230	10°C	planmäßig
06.11.2008	Donnerstag	nein				11°C	planmäßig
07.11.2008	Freitag	ja	1:00	2:00	280	12°C	planmäßig
08.11.2008	Samstag	nein				11°C	planmäßig
09.11.2008	Sonntag	nein				13°C	keine Kapazitäten
10.11.2008	Montag	ja	1:00	2:00	160	15°C	planmäßig
11.11.2008	Dienstag	nein				15°C	planmäßig
12.11.2008	Mittwoch	ja	2:00	3:00	200	9°C	planmäßig
13.11.2008	Donnerstag	nein				7°C	planmäßig
14.11.2008	Freitag	ja	2:00	3:00	220	8°C	planmäßig
15.11.2008	Samstag	nein				10°C	planmäßig
16.11.2008	Sonntag	nein				11°C	keine Kapazitäten
17.11.2008	Montag	ja	1:00	2:00	280	6°C	planmäßig

Quelle: Stadtwirtschaft GmbH Halle

Tabelle A 3: Auswertung der Geschwindigkeitsmesstafel in Richtung Riebeckplatz

Geschwindigkeit in km/h	Summe Fahrzeuge im Erfassungszeitraum (12.09.2008 bis 03.12.2008)	Prozentualer Anteil
< 15 km/h	5630	1,64
< 20 km/h	9725	2,84
< 25 km/h	15250	4,45
< 30 km/h	51071	14,90
< 35 km/h	71250	20,79
< 40 km/h	65354	19,07
< 45 km/h	55655	16,24
< 50 km/h	43102	12,57
< 55 km/h	15301	4,46
< 60 km/h	6197	1,81
< 65 km/h	2390	0,70
< 70 km/h	968	0,28
< 75 km/h	428	0,12
< 80 km/h	234	0,07
< 85 km/h	97	0,03
< 90 km/h	54	0,02
< 95 km/h	24	0,01
< 100 km/h	14	0,00
< 105 km/h	13	0,00
< 110 km/h	5	0,00
< 115 km/h	7	0,00
< 120 km/h	3	0,00
< 125 km/h	3	0,00
< 130 km/h	0	0,00
< 135 km/h	0	0,00
< 140 km/h	0	0,00
< 145 km/h	0	0,00
< 150 km/h	0	0,00
> 150 km/h	1	0,00
Gesamtanzahl	342776	

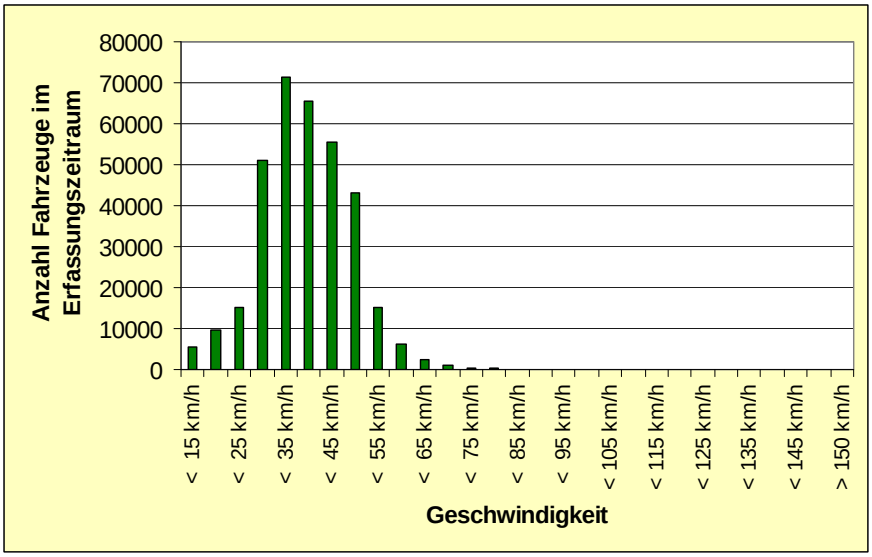

Abbildung A 1: Erfassung der Anzahl der Fahrzeuge und deren Geschwindigkeit (Ri Riebeckplatz)

Tabelle A 4: *Auswertung der Geschwindigkeitsmesstafel in Richtung Pfännerhöhe*

Geschwindigkeit in km/h	Summe Fahrzeuge im Erfassungszeitraum (12.09.2008 bis 03.12.2008)	Prozentualer Anteil
< 15 km/h	293	0,23
< 20 km/h	462	0,36
< 25 km/h	816	0,64
< 30 km/h	5998	4,69
< 35 km/h	17839	13,94
< 40 km/h	24509	19,15
< 45 km/h	25366	19,82
< 50 km/h	28180	22,01
< 55 km/h	14472	11,31
< 60 km/h	6373	4,98
< 65 km/h	2341	1,83
< 70 km/h	768	0,60
< 75 km/h	287	0,22
< 80 km/h	150	0,12
< 85 km/h	70	0,05
< 90 km/h	39	0,03
< 95 km/h	23	0,02
< 100 km/h	17	0,01
< 105 km/h	7	0,01
< 110 km/h	2	0,00
< 115 km/h	2	0,00
< 120 km/h	0	0,00
< 125 km/h	0	0,00
< 130 km/h	0	0,00
< 135 km/h	0	0,00
< 140 km/h	0	0,00
< 145 km/h	0	0,00
< 150 km/h	0	0,00
> 150 km/h	0	0,00
Gesamtanzahl	128014	

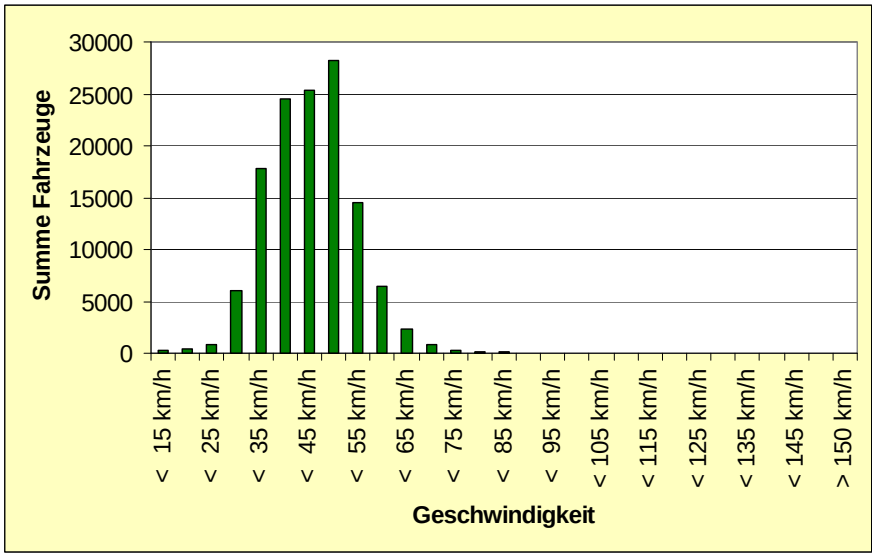

Abbildung A 2: *Erfassung der Anzahl der Fahrzeuge und deren Geschwindigkeit (Ri Pfännerhöhe)*

Tabelle A 5: *Auswertung der Geschwindigkeitsüberwachung (Richtung Pfännerhöhe)*

Datum	Dauer der Über-wachung	durch-fahrende Fahrzeuge	Festge-stellte Geschwin-digkeits-über-schreitung	Geschwindigkeitsüberschreitung (Angaben in km/h)								
				< 11	11 bis 15	16 bis 20	21 bis 25	26 bis 30	31 bis 40	41 bis 50	51 bis 60	> 60
16.09.2008	08:15-09:50	1165	75	22	36	13	3	1	0	0	0	0
22.09.2008	09:34-11:06	1149	129	49	53	18	8	1	0	0	0	0
24.09.2008	15:39-18:16	2359	169	73	64	20	7	3	1	1	0	0
25.09.2008	17:10-18:30	1129	49	18	17	10	3	1	0	0	0	0
30.09.2008	19:33-20:04	253	144	42	58	31	10	1	2	0	0	0
30.09.2008	20:08-21:09	422										
07.10.2008	09:15-11:08	1447	0*	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17.10.2008	15:46-16:52	962	74	27	25	15	4	1	2	0	0	0
22.10.2008	16:28-17:30	882	44	19	14	9	2	0	0	0	0	0
24.10.2008	09:31-10:51	1049	119	32	51	22	10	4	0	0	0	0
28.10.2008	09:37-10:39	726	57	23	20	9	4	1	0	0	0	0
07.11.2008	18:57-19:32	320	57	14	28	9	5	0	1	0	0	0
12.11.2008	15:06-15:13	63	124	56	46	15	6	1	0	0	0	0
12.11.2008	15:16-17:28	2003										
Summen		13929	1041	375	412	171	62	14	6	1	0	0
prozentuale Anteile bezogen auf die Zahl der durchfahrenden Fahrzeuge			7,47	2,69	2,96	1,23	0,45	0,10	0,04	0,01	0,00	0,00
prozentuale Anteile bezogen auf die Zahl der gemessenen Ge-schwindigkeits-überschreitungen				36,02	39,58	16,43	5,96	1,34	0,58	0,10	0,00	0,00

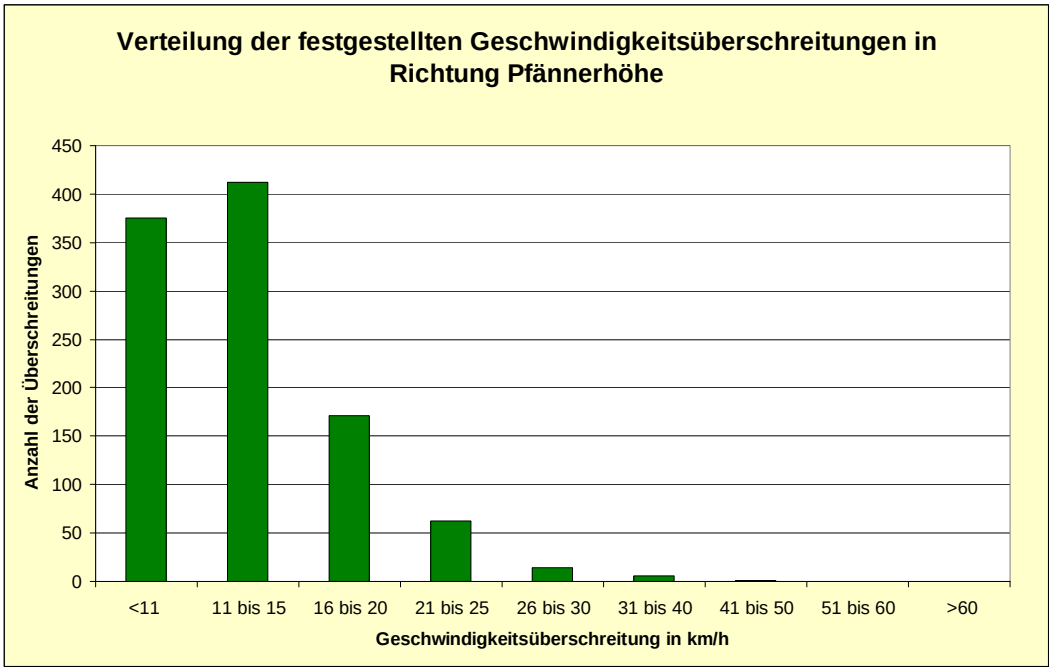

Abbildung A 3: *Verteilung der festgestellten Geschwindigkeitsüberschreitungen (Richtung Pfännerhöhe)*

Tabelle A 6: Auswertung der Geschwindigkeitsüberwachung (Richtung Riebeckplatz)

Datum	Dauer der Über-wachung	durch-fahrende Fahrzeuge	Festge-stellte Geschwin-digkeits-über-schreitung	Geschwindigkeitsüberschreitung (Angaben in km/h)								
				< 11	11 bis 15	16 bis 20	21 bis 25	26 bis 30	31 bis 40	41 bis 50	51 bis 60	> 60
26.09.2008	09:38-11:08	977	79	42	58	31	10	1	2	0	0	0
02.10.2008	09:11-10:53	1112	87	29	31	21	3	2	1	0	0	0
Summen		2089	166	71	89	52	13	3	3	0	0	0
prozentuale Anteile bezogen auf die Zahl der durchfahrenden Fahrzeuge			7,95	3,40	4,26	2,49	0,62	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00
prozentuale Anteile bezogen auf die Zahl der gemessenen Ge-schwindigkeits-überschreitungen				42,77	53,61	31,33	7,83	1,81	1,81	0,00	0,00	0,00

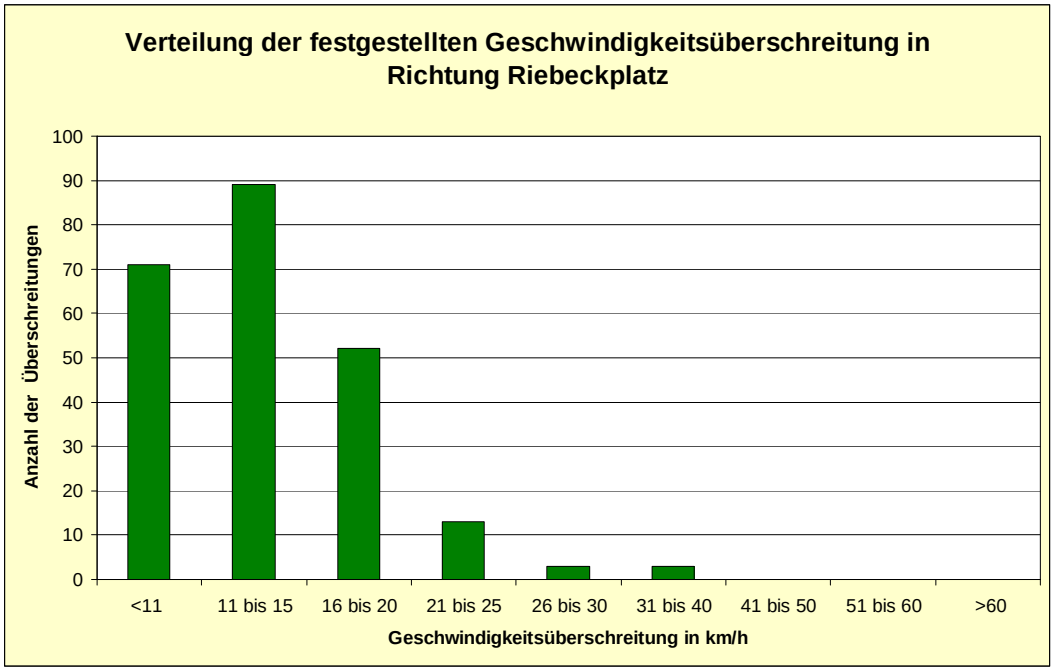

Abbildung A 4: Verteilung der festgestellten Geschwindigkeitsüberschreitungen (Richtung Riebeckplatz)

Tabelle A 7: *Übersicht der Ergebnisse des Straßenbahnbremsversuches*

Bremsprüfung - Straßenbahn				**Twg. / Twg. / Bwg. -Nr.**		
Grund der Bremsprobe :	**Einsatz von Feinstaubbindemittel CMA**					
durchgeführt am :	**20.08.2008**			**Fahrer :**	**Herr Vogt**	
Teilnehmer :	**Herr Martin, Herr Winkler**					
Leergewicht [t] :	**18,1 / 18,1 / --,-**			**Versuchsstrecke :**		
Schienenzustand :	**s. Bremsprotokoll**			**Schienenart :**		
elektronische Messung	**trocken**		**CMA (nass)**		**Wasser**	**CMA (ange-trocknet)**
	V1	**V2**	**V1**	**V2**	**V1**	**V1**
Geschwindigkeit (km / h)	46,0	33,2	44,9	33,5	44,8	45,7
Bremsweg (m) max. Soll	82,4	47,5	79,5	48,8	79,5	81,0
Bremsweg ist (m) IST	51,9	30,6	71,6	40,5	48,6	**95,8**
Bemerkungen			Gleitschutzeingriff			Gleitschutz-eingriff
Art der Bremsung: jeweils maximale E-Bremse						

gez. R. Vogt

Quelle: Hallesche Verkehrs AG

Tabelle A 8: *Übersicht der Ergebnisse der Pkw-Bremsversuche*

Mittelwertvergleich

				a.min[m/s²]	a.m[m/s²]	a.max[m/s²]
1. Trockene ebene Schwarzdecke	**n=**	**16**		**8,05**	**9,16**	**10,32**
			sigma=	0,86	0,17	0,21
4. Trockene ebene Schwarzdecke	**n=**	**12**		**7,34**	**8,15**	**9,21**
abgetrocknet nach CMA-Ausbringung			sigma=	1,45	0,82	0,89
			Differenz:	**-0,71**	**-1,00**	**-1,12**
Prüfung der Mitelwerte auf signifikante Unterschiede			t=	1,61	2,29	2,55
			t (a;m)=	**2,46**	**2,46**	**2,46**
doppelter t-Test:	sd=	2,279	**dtt =**	**-0,85**	**-0,17**	**0,09**

t < t(a;m) --> Mittelwerte nicht verschieden

Freiheitsgrad 28

t (a;m)= 2,46

Irrtumswahrscheinlichkeit a = 0,02 (= 2%)

dtt < 0 : Mittelwerte nicht verschieden

Tendenz zu niedrigeren Reibungswerten bei aufgetrocknetem CMA liegt vor. Die Unterschiede sind nicht signifikant!

				a.min[m/s²]	a.m[m/s²]	a.max[m/s²]
2. nasse ebene Schwarzdecke	Versuc	**n=**	**5**	**7,56**	**6,92**	**7,85**
			sigma=	0,62	2,04	2,36
3. nasse ebene Schwarzdecke mit CMA		**n=**	**9**	**6,36**	**8,01**	**9,38**
			sigma=	1,41	0,48	0,62
			Differenz:	**-1,20**	**1,09**	**1,53**
Prüfung der Mittelwerte auf signifikante Unterschiede			t=	1,79	1,62	2,27
			t (a;m)=	**2,62**	**2,62**	**2,62**
doppelter t-Test:	sd=	1,484	**dtt =**	**-0,83**	**-1,00**	**-0,35**

t < t(a;m) --> Mittelwerte nicht verschieden

Freiheitsgrad 14

t (a;m)= 2,62

Irrtumswahrscheinlichkeit a = 0,02 (= 2%)

dtt < 0 : Mittelwerte nicht verschieden

Tendenz zu niedrigeren Reibungswerten bei aufgetrocknetem CMA liegt vor. Die Unterschiede sind nicht signifikant!

Quelle: DEKRA Automobil GmbH, Sachverständiger: Herr Dr. Matzen

Abbildungen zum Verlauf der PM-Konzentrationen an den CMA-Einsatztagen in chronologischer Reihenfolge (sofern nicht bereits im Abschnitt 4.3.2 verwendet)

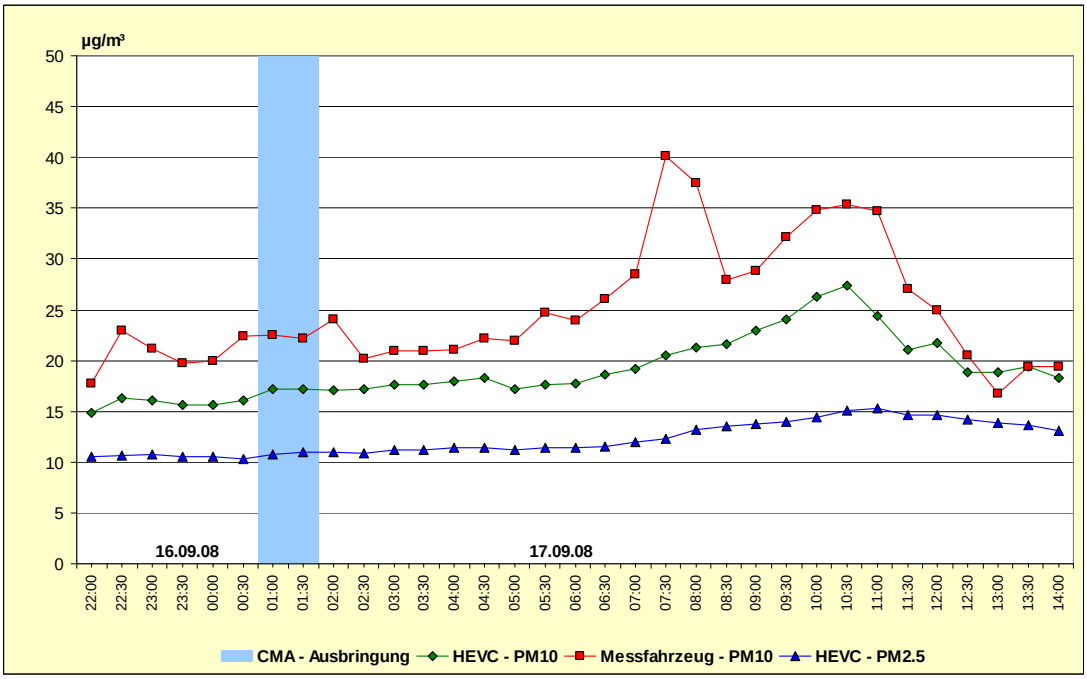

Abbildung A 5: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 16./17.09.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

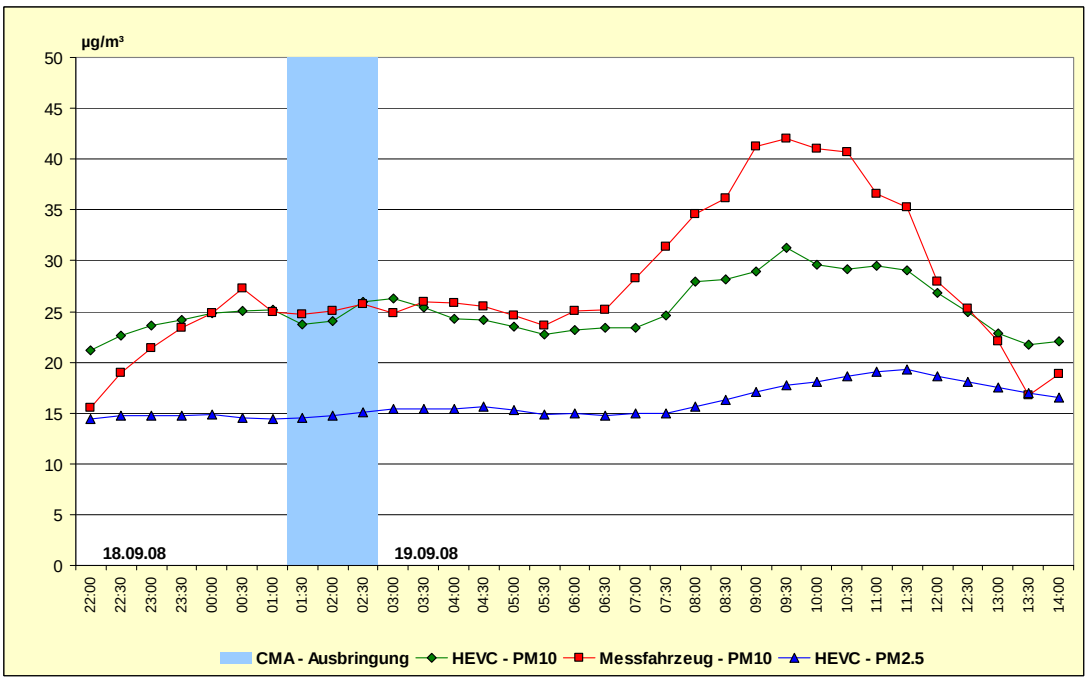

Abbildung A 6: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 18./19.09.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

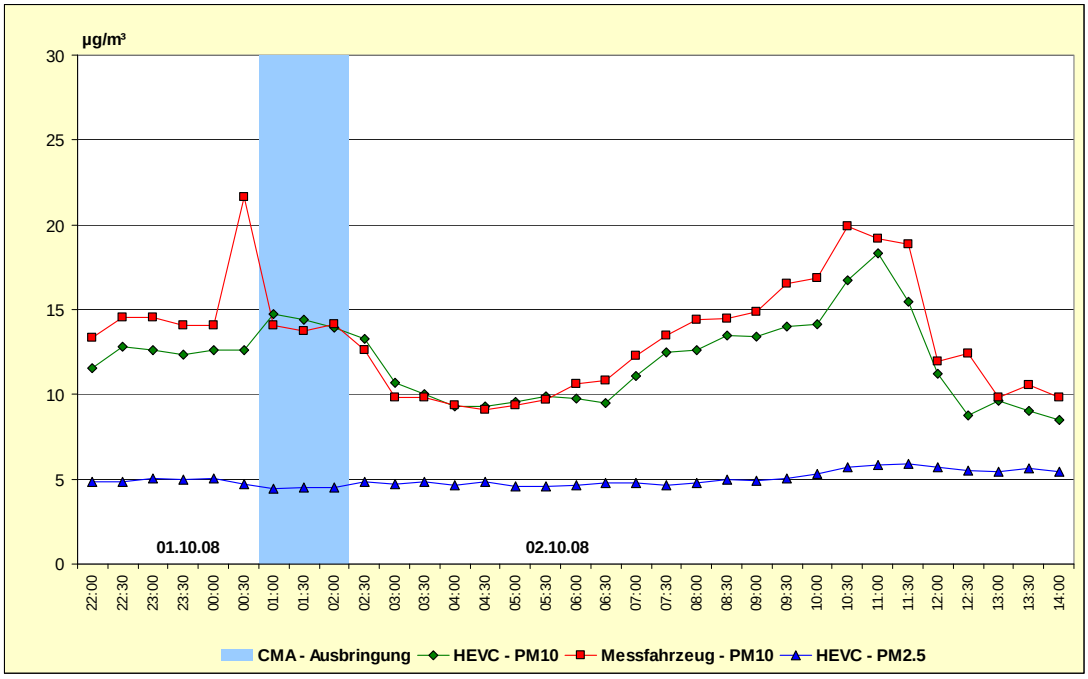

Abbildung A 7: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 01./02.09.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

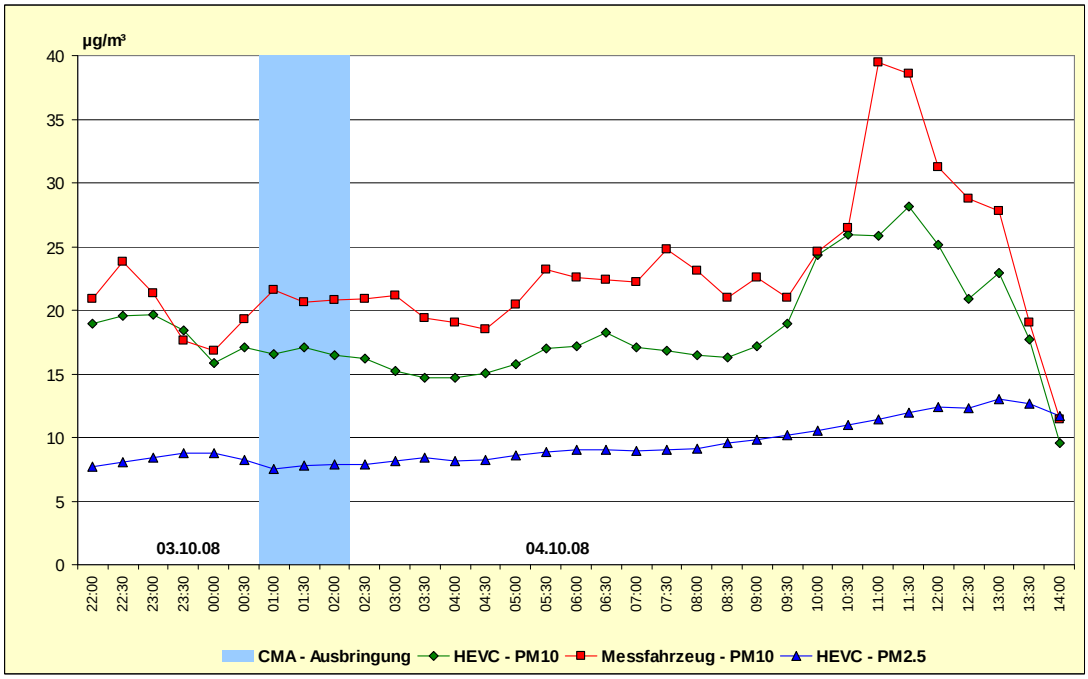

Abbildung A 8: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 03./04.10.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

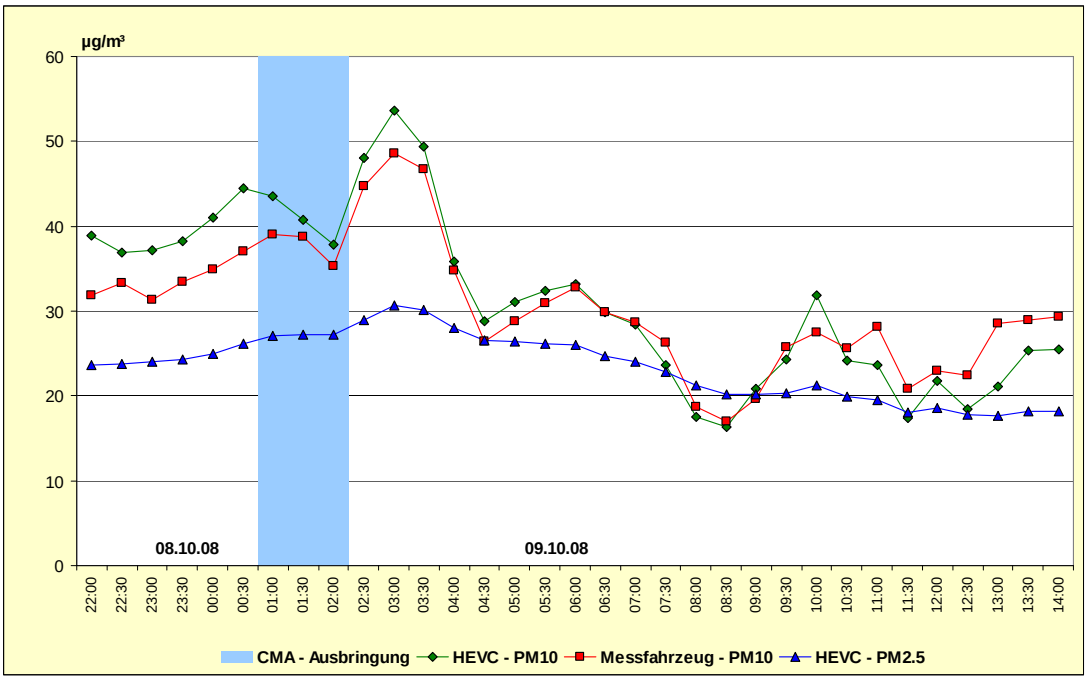

Abbildung A 9: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 08./09.10.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

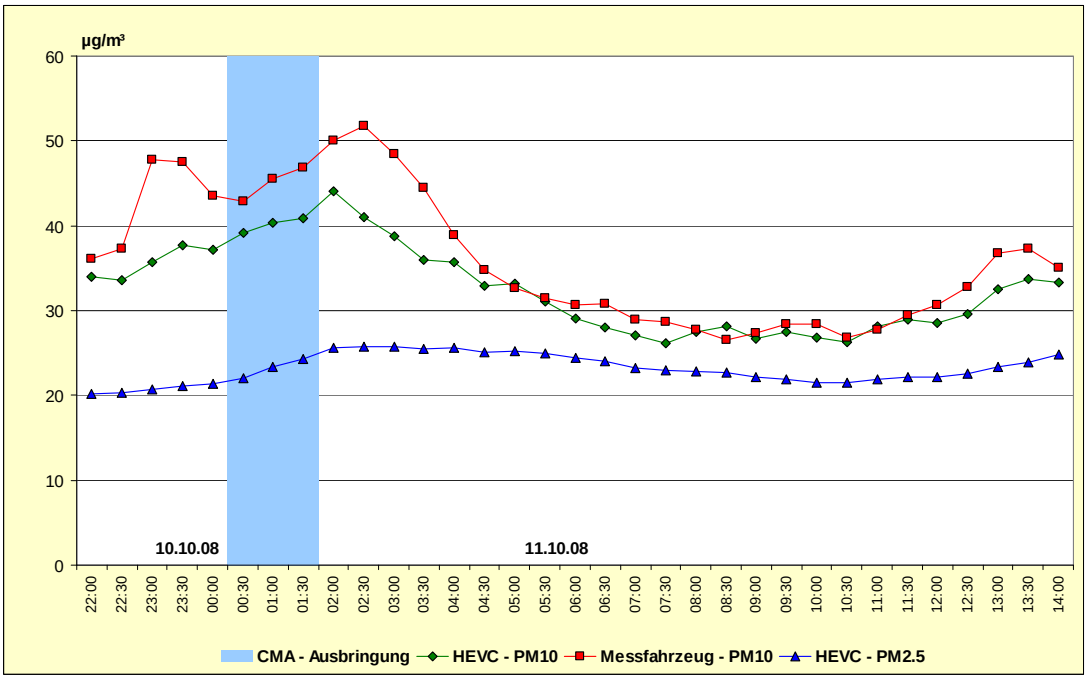

Abbildung A 10: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 10./11.10.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

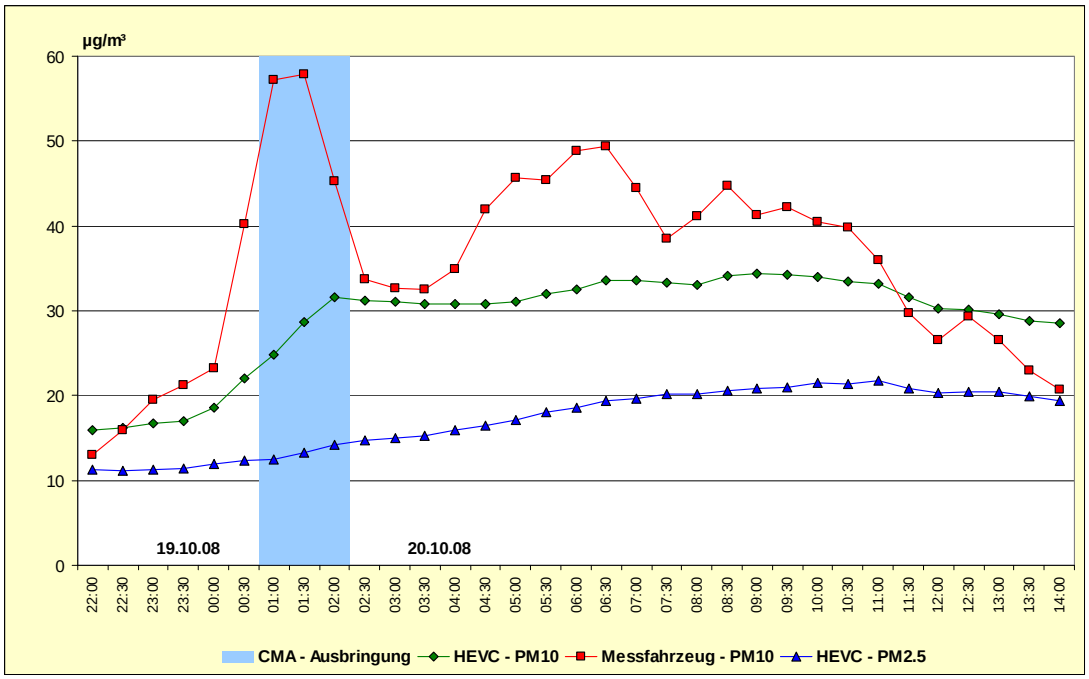

Abbildung A 11: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 19./20.10.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

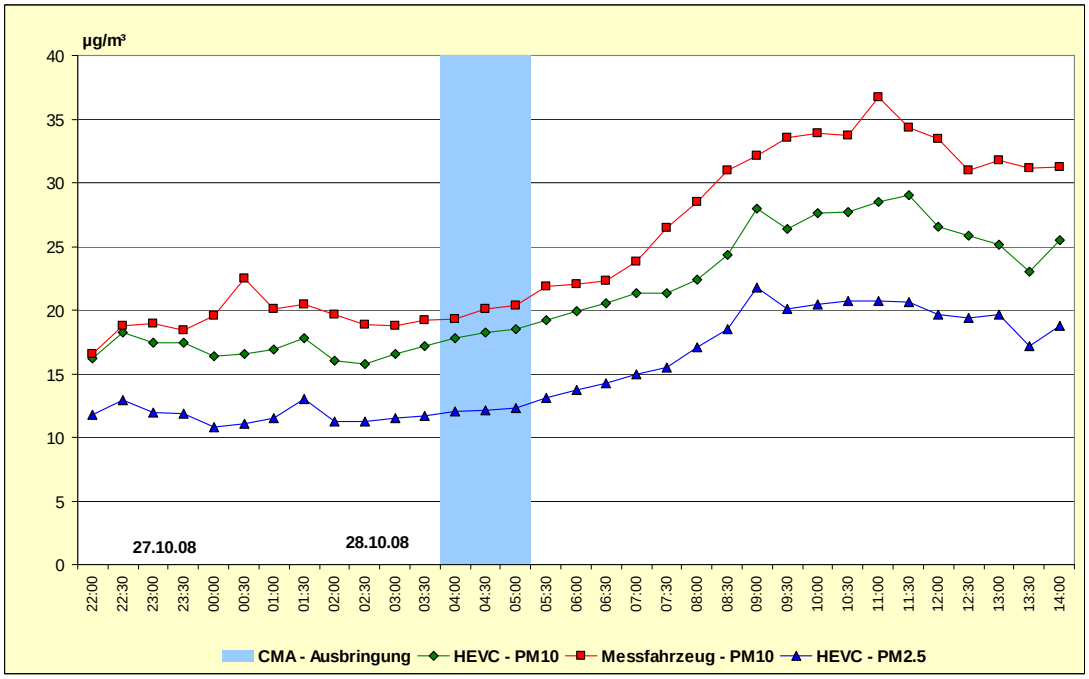

Abbildung A 12: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 27./28.10.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

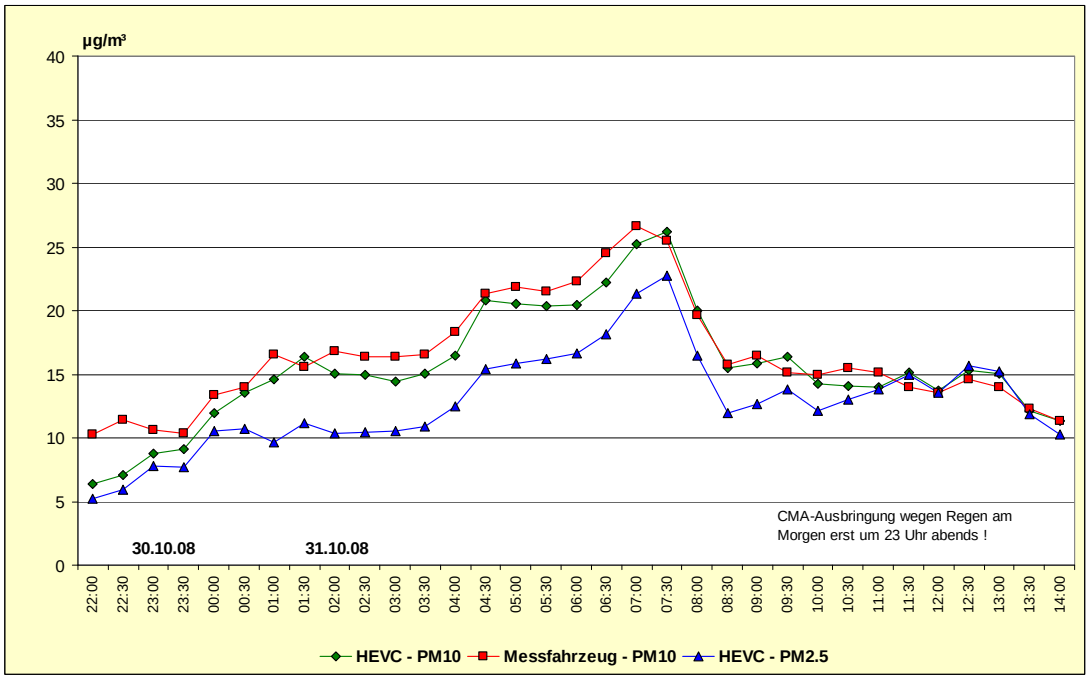

Abbildung A 13: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 30./31.10.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

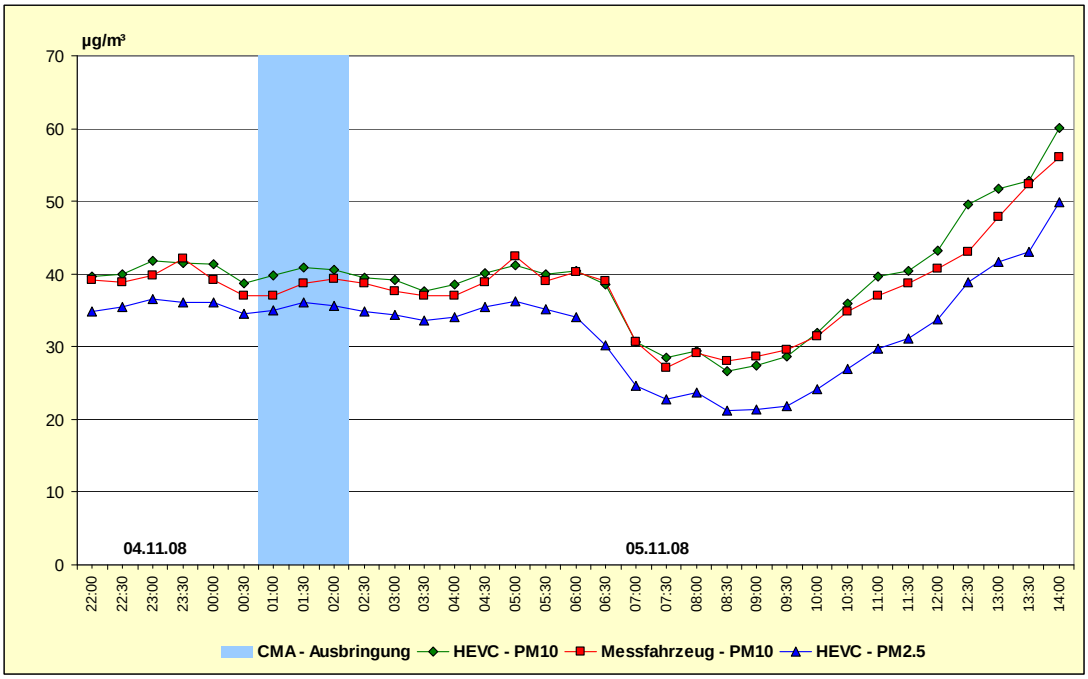

Abbildung A 14: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 04./05.11.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

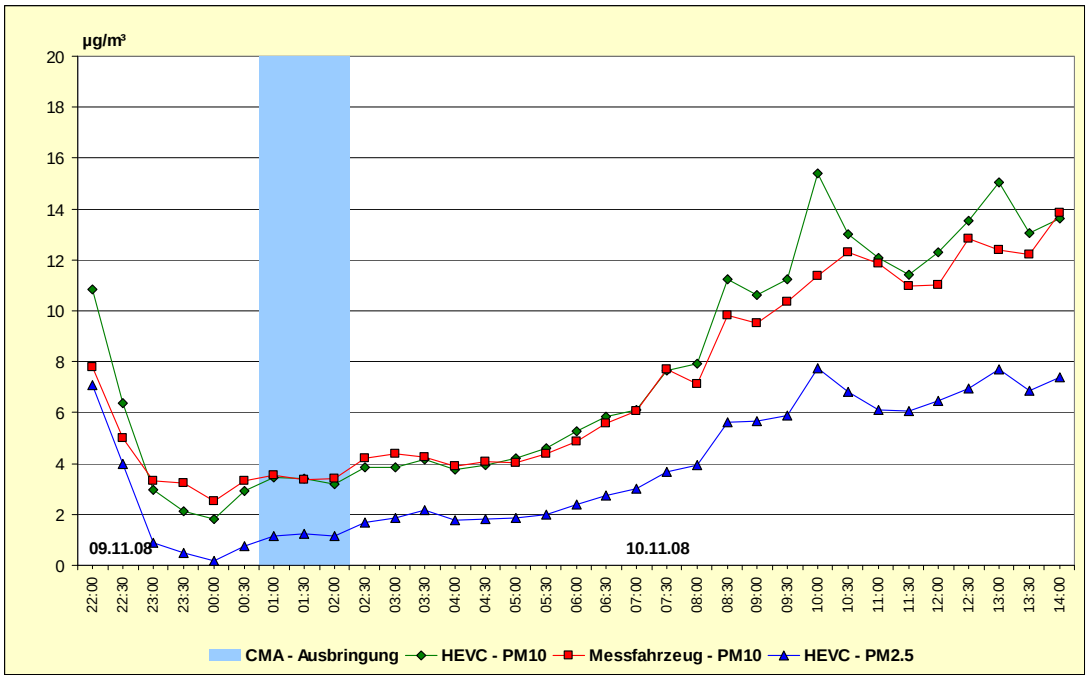

Abbildung A 15: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 09./10.11.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

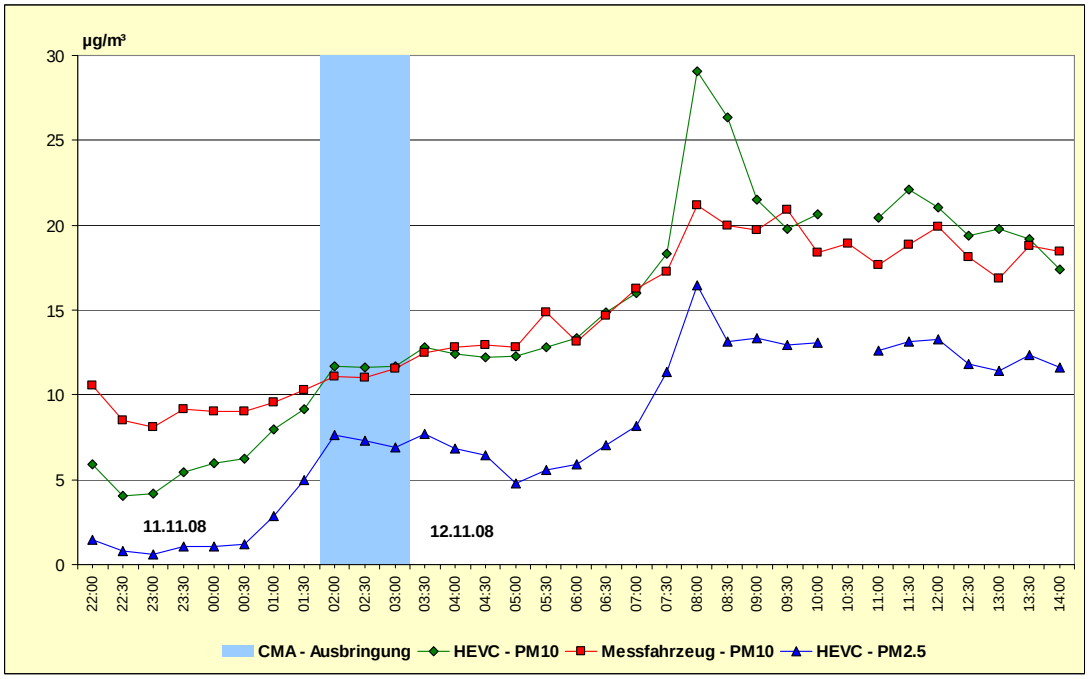

Abbildung A 16: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 11./12.11.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

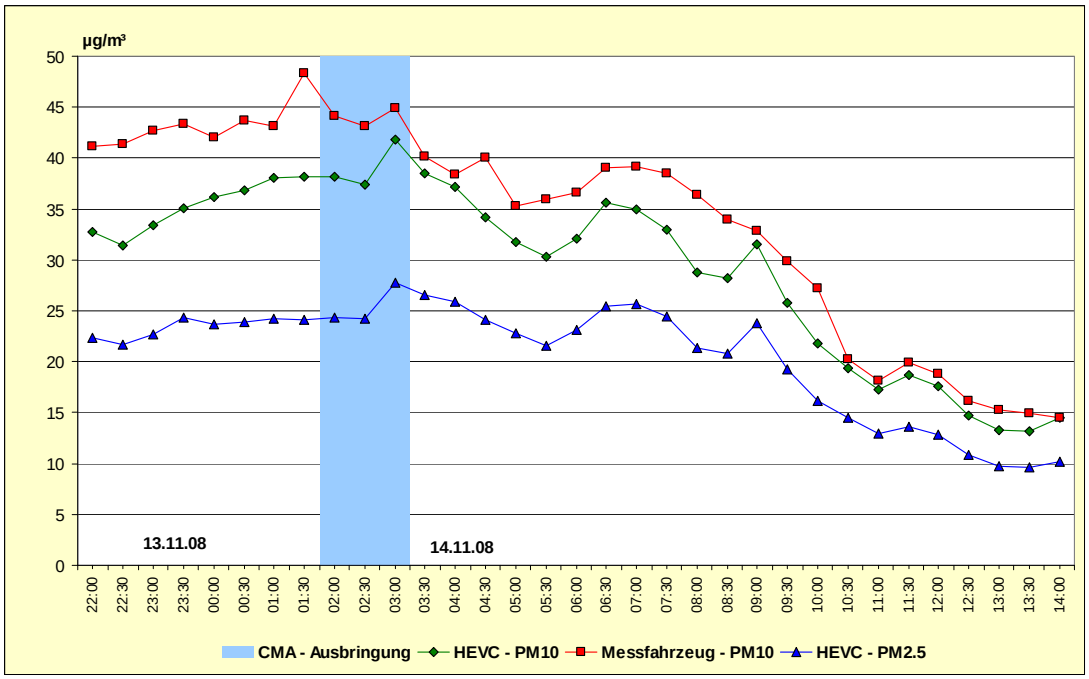

Abbildung A 17: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 13./14.11.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

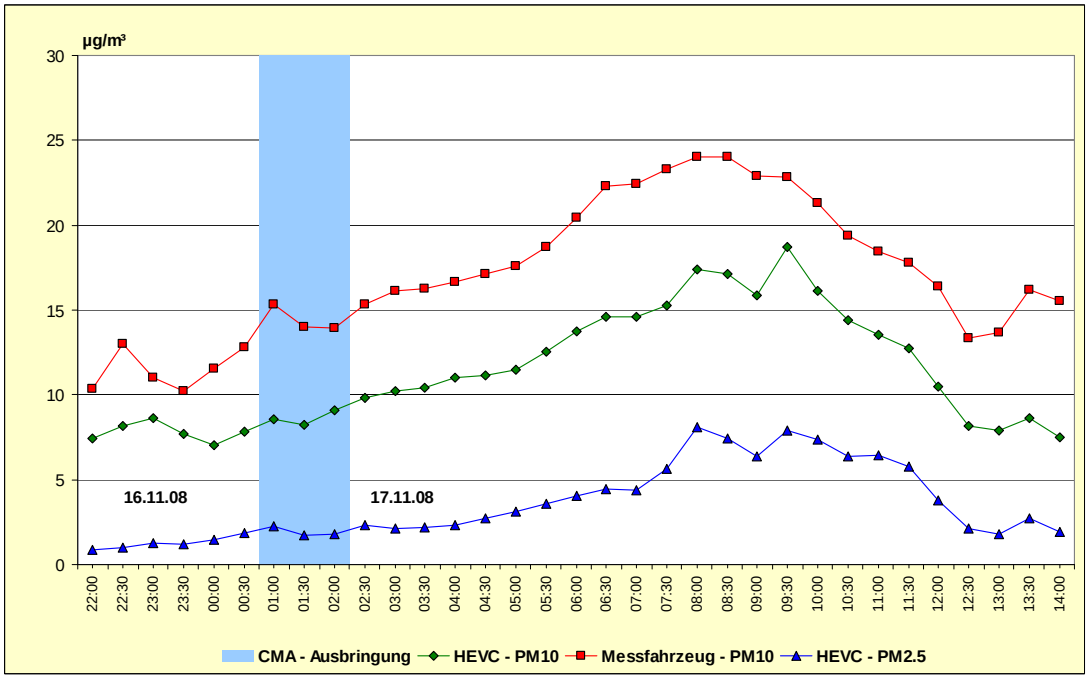

Abbildung A 18: Verlauf der $PM_{10/2.5}$-Konzentrationen (0,5-h-Mittelwerte) am 16./17.11.08 im Vergleich Verkehrsmessstation (HEVC) und Messfahrzeug

Tabelle A 9: *Tagesmittelwerte Partikel PM_{10} (Gravimetrie) in µg/m³ für den Zeitraum 15.09.08 bis 23.02.09*

Datum	Verkehrsmessstation	Messfahrzeug	Datum	Verkehrsmessstation	Messfahrzeug
15.09.08	17,9	17,4	**10.11.08**	15,8	14,1
16.09.08	16,4	*k.A.*	**11.11.08**	14,8	15,2
17.09.08	27,4	28,7	**12.11.08**	17,4	18,0
18.09.08	26,0	28,7	**13.11.08**	31,5	38,1
19.09.08	21,2	24,8	**14.11.08**	30,2	30,1
20.09.08	14,2	17,0	**15.11.08**	20,7	18,8
21.09.08	15,6	18,0	**16.11.08**	15,2	16,6
22.09.08	13,9	15,5	**17.11.08**	23,1	26,9
23.09.08	10,5	13,7	**18.11.08**	26,0	25,0
24.09.08	20,3	21,8	**19.11.08**	19,3	19,9
25.09.08	30,1	30,4	**20.11.08**	12,2	14,0
26.09.08	32,2	39,2	**21.11.08**	7,1	8,4
27.09.08	29,9	35,2	**22.11.08**	9,8	11,5
28.09.08	30,7	35,5	**23.11.08**	10,7	12,2
29.09.08	32,4	41,6	**24.11.08**	23,5	24,2
30.09.08	17,3	19,9	**25.11.08**	26,9	32,7
01.10.08	8,6	9,9	**26.11.08**	25,4	26,2
02.10.08	10,4	12,5	**27.11.08**	25,0	26,8
03.10.08	10,2	11,8	**28.11.08**	41,7	41,4
04.10.08	13,7	17,6	**29.11.08**	38,0	38,7
05.10.08	9,5	10,9	**30.11.08**	41,5	41,0
06.10.08	15,5	18,5	**01.12.08**	33,9	34,8
07.10.08	23,7	25,2	**02.12.08**	25,0	*k.A.*
08.10.08	30,8	32,4	**03.12.08**	19,6	*k.A.*
09.10.08	22,1	31,9	**04.12.08**	21,5	*k.A.*
10.10.08	30,3	38,9	**05.12.08**	14,4	13,7
11.10.08	30,2	33,4	**06.12.08**	16,5	17,9
12.10.08	29,5	33,8	**07.12.08**	20,3	23,6
13.10.08	29,2	35,9	**08.12.08**	27,9	29,5
14.10.08	31,0	39,2	**09.12.08**	32,9	*k.A.*
15.10.08	*k.A.*	36,6	**10.12.08**	27,1	31,7
16.10.08	12,7	16,5	**11.12.08**	21,8	22,6
17.10.08	16,9	20,6	**12.12.08**	30,7	35,6
18.10.08	29,5	32,0	**13.12.08**	34,3	34,5
19.10.08	23,0	25,8	**14.12.08**	22,4	22,3
20.10.08	28,8	31,6	**15.12.08**	45,6	48,8
21.10.08	20,7	20,1	**16.12.08**	51,3	55,5
22.10.08	17,3	19,8	**17.12.08**	44,8	52,5
23.10.08	33,7	39,2	**18.12.08**	24,2	29,9
24.10.08	30,2	36,2	**19.12.08**	19,9	24,3
25.10.08	40,6	46,8	**20.12.08**	15,5	15,9
26.10.08	24,8	28,3	**21.12.08**	19,0	20,5
27.10.08	15,6	18,4	**22.12.08**	14,1	16,0
28.10.08	26,1	34,2	**23.12.08**	24,8	30,3
29.10.08	28,0	30,9	**24.12.08**	17,4	19,9
30.10.08	8,7	12,3	**25.12.08**	11,0	11,9
31.10.08	17,8	18,1	**26.12.08**	16,6	17,7
01.11.08	43,6	45,2	**27.12.08**	18,3	19,0
02.11.08	29,0	30,6	**28.12.08**	35,3	31,5
03.11.08	39,3	40,3	**29.12.08**	55,9	54,3
04.11.08	k.A.	40,2	**30.12.08**	94,5	97,9
05.11.08	53,7	51,9	**31.12.08**	75,4	96,1
06.11.08	57,6	58,0	**01.01.09**	96,2	153,8
07.11.08	43,5	46,5	**02.01.09**	55,3	60,4
08.11.08	41,0	43,5	**03.01.09**	20,3	22,0

Datum	Verkehrsmessstation	Messfahrzeug	Datum	Verkehrsmessstation	Messfahrzeug
09.11.08	24,6	25,5	**04.01.09**	29,2	26,0
05.01.09	18,2	21,7	**30.01.09**	36,8	33,4
06.01.09	63,1	68,1	**31.01.09**	27,1	28,7
07.01.09	46,4	52,5	**01.02.09**	24,8	24,3
08.01.09	41,0	43,1	**02.02.09**	38,1	36,0
09.01.09	35,1	38,5	**03.02.09**	51,2	47,6
10.01.09	59,3	60,6	**04.02.09**	44,0	47,2
11.01.09	56,6	61,3	**05.02.09**	43,7	40,8
12.01.09	56,0	59,1	**06.02.09**	46,9	44,1
13.01.09	*k.A.*	53,4	**07.02.09**	42,0	45,9
14.01.09	51,4	59,6	**08.02.09**	20,8	26,3
15.01.09	48,1	107,2	**09.02.09**	33,3	33,7
16.01.09	43,5	60,8	**10.02.09**	12,7	12,6
17.01.09	40,0	42,3	**11.02.09**	21,1	22,1
18.01.09	23,1	23,8	**12.02.09**	18,5	25,0
19.01.09	11,8	13,6	**13.02.09**	22,9	32,1
20.01.09	19,1	21,6	**14.02.09**	23,1	29,6
21.01.09	37,8	41,7	**15.02.09**	32,8	35,3
22.01.09	34,3	37,9	**16.02.09**	27,2	33,4
23.01.09	18,7	19,2	**17.02.09**	16,9	17,0
24.01.09	17,4	19,1	**18.02.09**	20,6	27,0
25.01.09	42,2	42,2	**19.02.09**	38,7	45,3
26.01.09	42,0	42,3	**20.02.09**	28,5	31,9
27.01.09	69,9	75,8	**21.02.09**	19,6	22,7
28.01.09	46,8	51,7	**22.02.09**	14,9	16,1
29.01.09	39,5	38,7	**23.02.09**	8,9	12,0

Tabelle A 10: *Tagesmittelwerte Partikel $PM_{2,5}$ an der Verkehrsmessstation in µg/m³ für den Zeitraum 15.09.08 bis 23.02.09 (automatische Messung)*

Datum	TMW $PM_{2,5}$	Datum	TMW $PM_{2,5}$	Datum	TMW $PM_{2,5}$	Datum	TMW $PM_{2,5}$
15.09.08	12,2	**04.11.08**	28,2	**24.12.08**	12,4	**12.02.09**	11,8
16.09.08	11,8	**05.11.08**	37,2	**25.12.08**	8,9	**13.02.09**	13,9
17.09.08	14,5	**06.11.08**	36,5	**26.12.08**	16,1	**14.02.09**	14,6
18.09.08	19,2	**07.11.08**	26,9	**27.12.08**	16,8	**15.02.09**	20,1
19.09.08	14,3	**08.11.08**	30,7	**28.12.08**	33,1	**16.02.09**	18,1
20.09.08	9,7	**09.11.08**	16,4	**29.12.08**	53,7	**17.02.09**	11,2
21.09.08	11,8	**10.11.08**	6,2	**30.12.08**	76,9	**18.02.09**	10,9
22.09.08	9,0	**11.11.08**	7,1	**31.12.08**	62,6	**19.02.09**	24,2
23.09.08	9,7	**12.11.08**	11,0	**01.01.09**	97,2	**20.02.09**	23,7
24.09.08	12,0	**13.11.08**	22,0	**02.01.09**	47,7	**21.02.09**	14,9
25.09.08	17,7	**14.11.08**	17,6	**03.01.09**	14,7	**22.02.09**	10,0
26.09.08	22,7	**15.11.08**	15,5	**04.01.09**	18,8	**23.02.09**	4,7
27.09.08	22,8	**16.11.08**	7,6	**05.01.09**	14,7		
28.09.08	25,0	**17.11.08**	10,5	**06.01.09**	50,6		
29.09.08	24,7	**18.11.08**	15,4	**07.01.09**	30,6		
30.09.08	14,0	**19.11.08**	9,3	**08.01.09**	32,7		
01.10.08	4,1	**20.11.08**	7,0	**09.01.09**	27,2		
02.10.08	5,3	**21.11.08**	1,7	**10.01.09**	50,3		
03.10.08	6,5	**22.11.08**	*k.A.*	**11.01.09**	50,4		
04.10.08	9,1	**23.11.08**	5,9	**12.01.09**	*k.A.*		
05.10.08	6,7	**24.11.08**	*k.A.*	**13.01.09**	39,8		
06.10.08	9,5	**25.11.08**	19,5	**14.01.09**	43,9		
07.10.08	17,8	**26.11.08**	*k.A.*	**15.01.09**	37,8		
08.10.08	20,9	**27.11.08**	12,0	**16.01.09**	31,8		
09.10.08	18,1	**28.11.08**	24,7	**17.01.09**	32,4		
10.10.08	17,4	**29.11.08**	26,5	**18.01.09**	16,8		
11.10.08	23,0	**30.11.08**	*k.A.*	**19.01.09**	5,7		
12.10.08	22,8	**01.12.08**	25,0	**20.01.09**	12,0		
13.10.08	21,4	**02.12.08**	18,2	**21.01.09**	26,4		
14.10.08	23,3	**03.12.08**	10,2	**22.01.09**	21,5		
15.10.08	*k.A.*	**04.12.08**	16,2	**23.01.09**	12,7		
16.10.08	*k.A.*	**05.12.08**	9,6	**24.01.09**	8,4		
17.10.08	8,5	**06.12.08**	12,2	**25.01.09**	22,6		
18.10.08	16,4	**07.12.08**	*k.A.*	**26.01.09**	30,8		
19.10.08	15,6	**08.12.08**	12,8	**27.01.09**	56,5		
20.10.08	17,2	**09.12.08**	22,2	**28.01.09**	35,7		
21.10.08	13,6	**10.12.08**	20,1	**29.01.09**	29,8		
22.10.08	9,9	**11.12.08**	17,7	**30.01.09**	25,5		
23.10.08	16,9	**12.12.08**	24,9	**31.01.09**	22,0		
24.10.08	27,7	**13.12.08**	30,7	**01.02.09**	20,2		
25.10.08	37,9	**14.12.08**	17,9	**02.02.09**	32,0		
26.10.08	19,3	**15.12.08**	40,6	**03.02.09**	42,3		
27.10.08	9,4	**16.12.08**	47,6	**04.02.09**	*k.A.*		
28.10.08	14,1	**17.12.08**	41,0	**05.02.09**	*k.A.*		
29.10.08	19,1	**18.12.08**	17,2	**06.02.09**	31,4		
30.10.08	4,5	**19.12.08**	9,9	**07.02.09**	35,8		
31.10.08	13,7	**20.12.08**	7,6	**08.02.09**	12,1		
01.11.08	39,1	**21.12.08**	10,5	**09.02.09**	16,8		
02.11.08	19,2	**22.12.08**	7,3	**10.02.09**	8,4		
03.11.08	26,8	**23.12.08**	12,4	**11.02.09**	13,2		