

TEXTE

50/2012

Studie zur Charakterisierung und Quantifizierung der räumlichen Herkunft der PM₁₀-Belastung an hoch belasteten Orten

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 312 01 283
UBA-FB 001668

Studie zur Charakterisierung und Quantifizierung der räumlichen Herkunft der PM₁₀-Belastung an hoch belasteten Orten

von

Wolfram Birmili, Christa Engler
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V., Leipzig

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4359.html>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung
der Studie: Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V.
Permoserstrasse 15
04318 Leipzig

Abschlussdatum: März 2011

Herausgeber: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet II 4.2 Beurteilung der Luftqualität
Arno Graff

Dessau-Roßlau, Oktober 2012

1. Fragestellung

Seit Inkrafttreten der EU-Richtlinie 1999/30/EG wurden vielerorts Überschreitungen der PM_{10} -Tagesmittelwerte von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über das erlaubte Maß von 35 Tagen hinaus festgestellt. Damit ist konkreter Erklärungs- und Handlungsbedarf bei Kommunen, Landesumweltämtern und auch beim Umweltbundesamt entstanden. Eine präzise Zuordnung dieser Grenzwertüberschreitungen, etwa an bestimmte lokale Ursachen oder großräumige Prozesse hat sich wegen der diffusen Verteilung der Quellen und der Langlebigkeit bestimmter Komponenten des Feinstaubes als generell schwierig erwiesen. Maßnahmen zur Verringerung der Feinstaubbelastung erfordern jedoch ein Mindestverständnis der beitragenden örtlichen, regionalen bzw. auch entfernter gelegenen Quellen, welche von Standort zu Standort verschieden sein können. Insbesondere in Grenzgebieten zu benachbarten Staaten ist es wichtig, das Verhältnis der Beiträge lokaler und entfernter Quellen zu kennen, um auf geeignete örtliche, nationale bzw. europäische Reduktionsmaßnahmen hinwirken zu können.

2. Methode

2.1. Datengrundlage

Diese Studie untersucht die Ursachen von PM_{10} -Grenzwertüberschreitungen anhand der PM_{10} -Tagesmittelwerte an deutschen Luftgütemessstationen. Der betrachtete Zeitraum ist 2005-2009.

Zur objektiven Klassifizierung der Witterungseinflüsse wurden zum einen numerisch berechnete Rückwärtstrajektorien, zum anderen Indikatoren der atmosphärischen Stabilität aus experimentellen Radiosondendaten verwendet.

Die Rückwärtstrajektorien wurden mit einer Laufdauer von 96 Stunden mit dem NOAA-HYSPLIT-Modell berechnet. Die Rückwärtstrajektorien geben eine mittlere Zugbahn der ankommenden Luft während der letzten 4 Tage an und liefern damit Hinweise auf die räumliche Herkunft der ankommenden Luftmassen. Startzeit der Trajektorien ist täglich um 13:00 MEZ. Die Starthöhe im NOAA-Wettermodell wurde auf 500 m festgelegt, also innerhalb einer durchmischten planetaren Grenzschicht. Die methodische Unsicherheit der berechneten Rückwärtstrajektorien wird mit 10 % horizontaler Abweichung pro zurückgelegter Strecke abgeschätzt.

In unserer meteorologischen Analyse wurden ebenso Vertikalprofile der pseudopotentiellen Temperatur (θ) aus dem troposphärischen Höhenbereich bis 3 Kilometer aus Radiosonden des DWD verarbeitet. Diese Profile ermöglichen es, zwischen einer vertikal gut durchmischten Atmosphäre, mit neutraler Schichtung oder sogar leicht instabiler Schichtung, oder einer schlecht durchmischter Atmosphäre mit stabiler Schichtung zu unterscheiden. Diese Stabilität ist unter anderem entscheidend für die Stärke der räumlichen Dispersion des am Boden emittierten Feinstaubes. In der Summe ermöglichen Rückwärtstrajektorien und Radiosondenprofile eine objektive Bewertung der Herkunft und des Zustandes der an einem Messort ankommenden Luftmasse.

2.2. Trajektorienclusteranalyse

Die Rückwärtstrajektorien wurden mittels einer Trajektorienclusteranalyse verarbeitet. Ein Cluster ist sinngemäß ein Bündel ankommender Trajektorien, die sich stark bezüglich Windrichtung und Windgeschwindigkeit ähneln. Ziel der durchgeführten Clusteranalyse ist die Zuordnung der PM_{10} -Messdaten (hier 2005-2009) auf die verschiedenen entstehenden Trajektoriencluster, welche in der meteorologischen Praxis auch verschiedenen Wetterlagen entsprechen. Die entstehenden

Trajektoriencluster sollen in sich möglichst homogen sein, also scharf definiert sein. Andererseits sollen sich die Trajektoriencluster untereinander möglichst scharf abgrenzen bezüglich

- der Richtung der ankommenden Trajektorien (d.h. Luftmassen)
- der vertikalen Schichtung der Atmosphäre (also labil/stabil)
- der durch die Einteilung entstehenden PM₁₀-Mittelwerte

Die Richtung der Trajektorien erlaubt in grenznahen Gebieten zumindest teilweise eine Erklärung der beobachteten PM₁₀-Werte durch grenzüberschreitenden Transport. Die Betrachtung der vertikalen Atmosphärenschichtung erlaubt in vielen Fällen eine Erklärung von bodennahen Schadstoffniveaus durch Inversionswetterlagen.

Die Trajektorienclusteranalyse ist vom Prinzip her eine rezeptororientierte Analyse. Sie betrachtet die an einem festen Ort beobachteten Schadstoffniveaus als Funktion der ankommenden Luftmassen bzw. meteorologischen Parameter. Der hier verwendete *k*-Mittelwert-Clusteralgorithmus geht auf den Ansatz von Dorling *et al.* (1992) zurück; er wurde in Kombination mit Aerosoldaten z.B. von Melpitz (Engler *et al.*, 2007), Zugspitze (UBA, 2007), Augsburg (Birmili *et al.*, 2010) und Sibirien (Heintzenberg *et al.*, 2011) erfolgreich angewandt. In allen Fällen hat sich die Mitverwendung der Radiosondeninformationen als ein entscheidender Faktor für die Erklärung des bodennahen Feinstaubniveaus erwiesen. Wie bereits genannt, charakterisieren die Radiosondenprofile die vertikale Schichtung der Atmosphäre, welche eine zentrale Rolle für die bodennahe Ausbreitung von emittierten Schadstoffen, wie auch PM₁₀ darstellt.

Mittlerweile wurde der Trajektoriencluster-Algorithmus auch so erweitert, dass an mehreren Orten ankommende Trajektorien und Radiosondendaten gleichzeitig verarbeitet werden können. Jene erweiterte Clusteranalyse liefert also Informationen über die Wetterlage in einem größeren Gebiet.

2.3. Analyse von fünf Regionen und PM₁₀-Datenmittelung

Um den Einfluss von städtischen Quellen und Verkehrsquellen zu charakterisieren, wurde die Trajektorienclusteranalyse auf fünf abgegrenzte Regionen angewendet. Die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Stationen in je einer Analyse hat den Vorteil, dass die gewonnenen Interpretationen robuster bezüglich der zu ermittelnden Wettereinflüsse auf die PM₁₀-Werte ausfallen.

In hier nicht dargestellten Vorarbeiten zu unserer Studie wurde anstatt mit Regionen zunächst mit Stationstripeln gearbeitet, welche aus je einer ländlichen Hintergrundstation, einer städtischen Hintergrundstation und einer verkehrsnahen Station bestanden. Eine derartige Kombination von Messstationen erlaubt im Prinzip eine Abschätzung der überregionalen, der allgemeinen städtischen sowie der verkehrsnahen Quellbeiträge auf die beobachteten PM₁₀-Niveaus (Lenschow *et al.*, 2001). Leider erwiesen sich die Ergebnisse bezüglich der entsprechenden Quellbeiträge in Ihrer Gesamtheit als zu anfällig bezüglich der Auswahl bestimmter Messstationen. Daher sind wir dazu übergegangen, ganze Regionen mit einer Trajektorienclusteranalyse zu untersuchen, in welchen zur Erlangung einer robusteren Statistik stets mehrere Messstationen eines Typs vertreten waren.

Abbildung 1 zeigt die Definition der betrachteten Fallstudien. Die Regionen sind: A) Ostbrandenburg und Ostsachsen, B) Berlin mit Umland, C) Mitteldeutschland, D) Westliches Nordrhein-Westfalen, E) Mittelrheinebene zwischen Karlsruhe und Frankfurt/M. Unsere Ausführungen im Ergebnisteil beginnen mit Region A, Ostbrandenburg und Ostsachsen. Diese Region ist wegen der Grenznähe zu Polen und Tschechien von größtem Interesse wegen des grenzüberschreitenden PM₁₀-Transports.

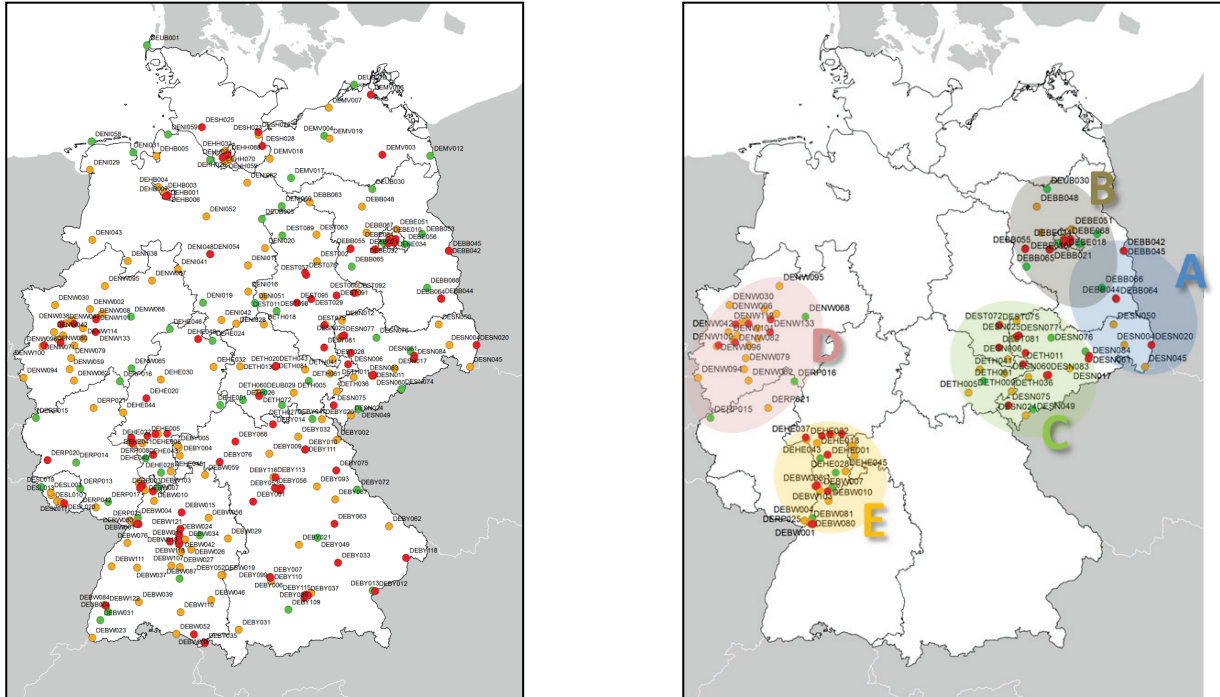


Abb. 1: Links: Gesamtheit der Messstationen für PM₁₀ in Deutschland. Rechts: Die fünf in diesem Projekt schwerpunktmäßig auf PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen untersuchten Regionen A-E.

2.4. Bewertung von Grenzwertüberschreitungen aus regionalen PM₁₀-Messwerten

Laut EU-Richtlinie ist im Falle des PM₁₀-Tagesmittelwertkriteriums der Grenzwert überschritten, wenn an einer Station innerhalb eines Kalenderjahrs ein PM₁₀-Wert von 50 µg/m³ häufiger als 35 Mal überschritten wird. Grenzwerte können daher streng gesehen immer nur bezogen auf die Messwerte an Einzelstationen überschritten werden.

Unsere Analyse betrachtet jedoch umfassende Regionen mit mehreren Messstationen (Abb. 1). Für diese Regionen soll eine Zuordnung hoher PM₁₀-Werte auf bestimmte Trajektoriencluster (Wetterlagen) erfolgen. Aus meteorologischer Sicht erscheint es als günstig, räumliche PM₁₀-Mittelwerte über eine Stationskategorie zu betrachten. Als Kompromiss zwischen der strengen Definition des Grenzwerts und der Notwendigkeit einer einfacheren Beschreibung haben wir uns daher entschlossen, in den Darstellungen des Ergebnisteils (Abbildungen, Tabellen) die PM₁₀-Werte eines Tages in jeder Region für jede der drei Stationskategorien (ländlich, städtischer Hintergrund, verkehrsnah) zu mitteln. Wenn aus dieser Datenlage heraus von „Überschreitungen“ des Tagesmittelwertes die Rede ist, dann gilt dies immer für den Mittelwert einer Stationskategorie, in der Regel die verkehrsnahen Stationen, wo bekanntermaßen die höchsten Werte auftreten. Tagesmittelwerte > 50 µg/m³ sind in der Regel ein sehr guter Indikator dafür, dass in einer Region auch an mehreren Stationen PM₁₀-tatsächlich über 50 µg/m³ liegen. Gleichzeitig entsprechen diese „Überschreitungen“ aber nicht der gesetzlichen Definition.

3. Ergebnisse der Trajektorienclusteranalyse für den Zeitraum 2005-2009.

3.1. Region A (Ostbrandenburg und Ostsachsen)

Die Anwendung des Trajektorienclusteralgorithmus für die Region A (Ostbrandenburg und Ostsachsen) für den Zeitraum 2005-2009 lieferte in der optimalen Simulation 12 möglichst verschiedene Trajektoriencluster (Wetterlagen). Abbildung 2 zeigt die mittleren Rückwärtstrajektorien für diese 12 Cluster. Man erkennt, dass die Cluster verschiedene Himmelsrichtungen der ankommenden Luftmassen, aber auch Transportgeschwindigkeiten vertreten. Es ist jedoch anzumerken, dass jedem Trajektoriencluster auch eine gewisse Streuung seiner Einzeltrajektorien zugrunde liegt. Eine willkürlich herausgegriffene Einzeltrajektorie kann daher teilweise erheblich von den gezeigten mittleren Trajektorien abweichen. Gleichzeitig sieht man auch starke Unterschiede bezüglich der mittleren Windgeschwindigkeit, die einerseits aus der zu optimierenden Abgrenzung der Cluster resultiert, andererseits auch klimatisch bedingt ist. Z.B. sind West und Nordwestwinde in Deutschland im Mittel stärker als Ost- und Südostwinde. Für Region A können zwei dieser Cluster (Nr. A2 und A4) direkt als Luftmassen interpretiert werden, die über das Nachbarland Polen nach Deutschland gekommen sind. Weitere Cluster (Nr. A6 und A1) beinhalten Wetterlagen, bei denen ein grenzüberschreitender Transport aus Polen bzw. Tschechien möglich erscheint. Bei allen anderen Trajektorienclustern dominiert aus geographischen Gründen bei Region A in erster Linie der Transport über Deutschland, dann aus den zeitlich dahinterliegenden Regionen (Westeuropa, Atlantik, Skandinavien). Abbildung 3 zeigt weitere Ergebnisse dieser Clusteranalyse bezüglich absoluter und saisonaler Häufigkeit der Wetterlagen, sowie der resultierenden PM_{10} -Zuordnung.

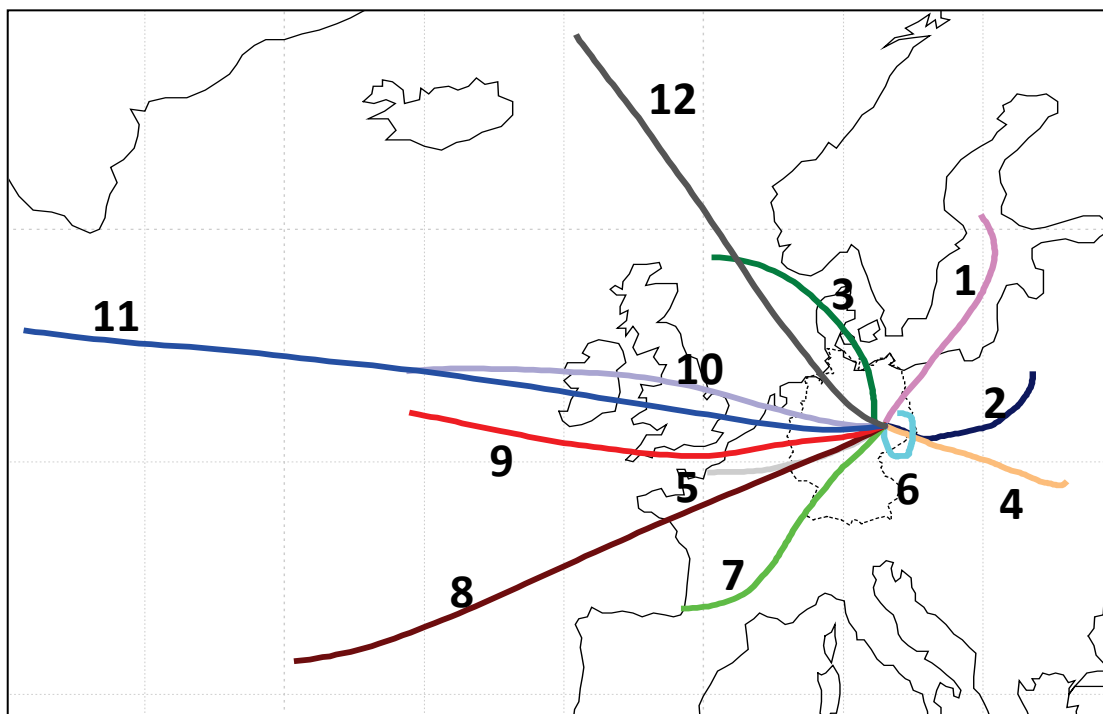


Abb. 2: Mittlere Rückwärtstrajektorien (96 h) für die 12 Cluster aus der Clusteranalyse für Region A.

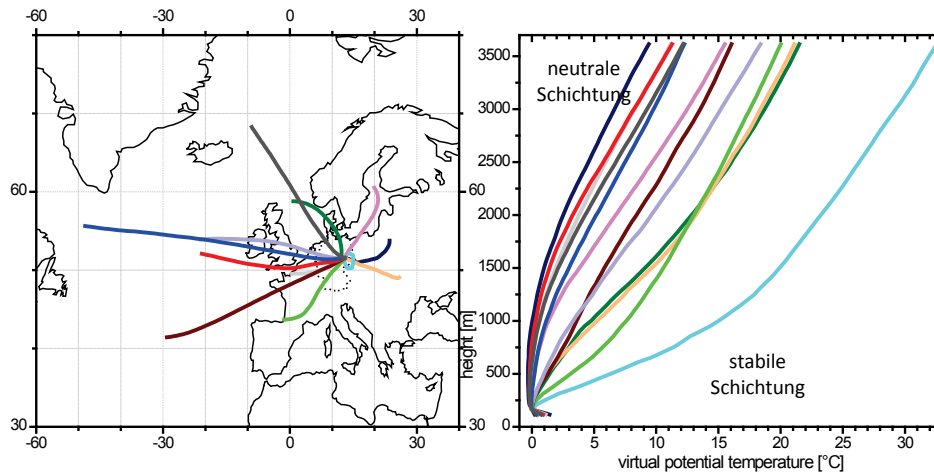


Abb. 3a: Links: mittlere Rückwärtstrajektorien (wie Abb.2). Rechts: mittlere Profile der pseudo-potentiellen Temperatur (θ_v) über Grund, aus Radiosonden um 13:00 MEZ.

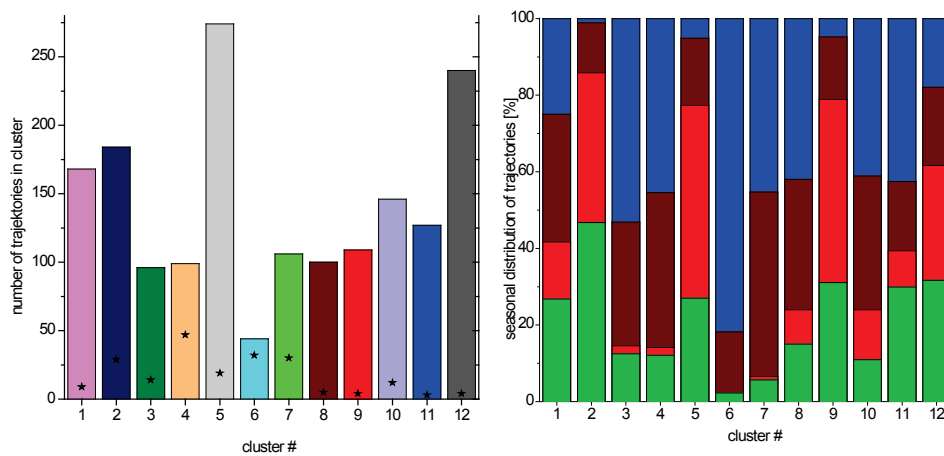


Abb. 3b: Links: Absolute Häufigkeit der 12 Trajektoriencluster (Balken) inklusive der Zahl der Tage, an denen der mittlere Messwert an verkehrsnahen Stationen $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreitet. (*). Rechts: saisonales Auftreten jedes Clusters (grün: Frühjahr, rot: Sommer, braun: Herbst, blau: Winter)

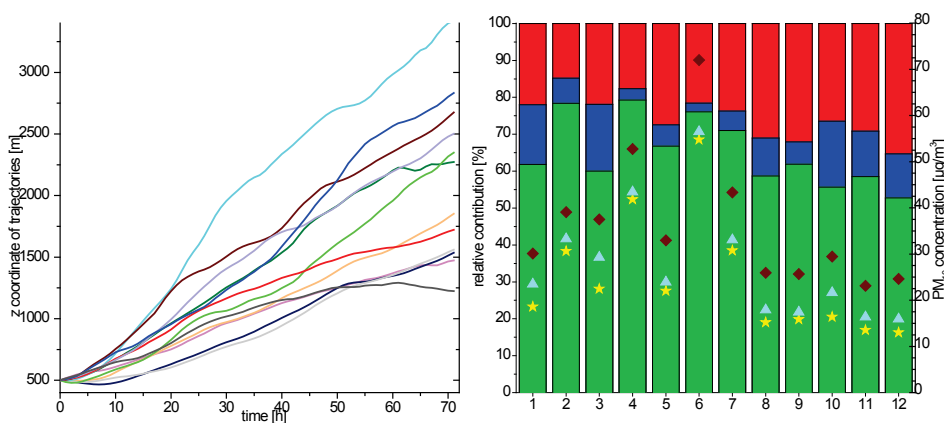


Abb. 3c: Links: Mittlere Vertikaltendenz der Rückwärtstrajektorien. Rechts: relative Anteile an PM₁₀ (Balken; nach Lenschow et al., 2001): ländlicher Hintergrund (grün), städtisches Inkrement (blau), verkehrsnahes Inkrement (rot); gepunktet auf rechter y-Achse: Mittelwerte von PM₁₀ an Verkehrsstationen (rot) sowie im städtischem (türkis) bzw. ländlichen Hintergrund.

Abb. 3a zeigt die durch die Clusteranalyse beförderte Kombination von Luftmassenherkunft und vertikaler Schichtung. Am stabilsten ist die Atmosphäre bei Cluster Nr. A6 geschichtet. (Hier ist θ_v um 20 K wärmer in 1000 m Höhe als am Boden). Die stagnierende Trajektorie und die saisonale Häufigkeit von über 80 % im Winter (Abb. 3b) deutet auf eine winterliche Hochdruckwetterlage hin. Dem Stabilitätsmaß nach folgen Cluster Nr. A7, A4 und A3 als nächst stabile Wetterlagen. Diese hängen mit Trajektorien aus Südwesten (Südfrankreich), Osten (Südpolen) und Norddeutschland/Dänemark zusammen. All diese Wetterlagen sind winterlich und herbstlich geprägt, mit jeweils etwa 50 % Häufigkeit im Winter bzw. ca. 90 % Winter und Herbst zusammengekommen (Abb. 3b). In diesen Trajektorien wird auch zumeist eine antizyklonale Tendenz deutlich, die auf absinkende Luftmassen hindeutet. Die absinkende Tendenz wird in diesen vier Extremfällen auch durch die Höhenkomponente der Rückwärtstrajektorie deutlich (Abb. 3c), wobei kleinere Unterschiede in dieser Komponente wegen der begrenzten Eindimensionalität der Trajektorienrechnung keine signifikante Bedeutung haben müssen. Dann gibt es ausgeprägte Sommer- und Frühjahrs-wetterlagen (Cluster A2, A5, A9, A12), eine aus östlicher Richtung (Nr. A2), die anderen aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen. Diese sind durch eine gute Durchmischung der Grenzschicht, meist mit Grenzschichthöhen von 1000-3000 m, gekennzeichnet.

Abb. 4 und auch bereits Abb. 3c schlüsseln die PM_{10} -Belastung als Funktion der Wetterlagen (Trajektoriencluster) auf. Zunächst sieht man deutliche Kontraste im PM_{10} zwischen den Wetterlagen: Die höchsten Werte treten bei Cluster A6 auf, der winterlichen Hochdruckwetterlage. Hier liegt der PM_{10} -Mittelwert im ländlichen Bereich über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, verkehrsnah über $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Naturgemäß besteht bei dieser Wetterlage auch die höchste Wahrscheinlichkeit von Grenzwertüberschreitungen. Dieser Wetterlage folgen Cluster Nr. A4, A7, A2 und A3, nach absteigendem PM_{10} -Mittelwert an den verkehrsnahen Stationen geordnet. Cluster A4 kann als winterliche Ostanströmung, mit Quellgebieten in Südpolen charakterisiert werden (vgl. Abb. 3a-b). Cluster A7 ist die winterliche Südwestanströmung. In der Reihenfolge der PM_{10} -Werte folgt dann bereits die sommerliche Ostanströmung (Cluster A2), dann erst die winterliche antizyklonale Nordanströmung (Cluster A3).

Wesentlich für die entstehenden PM_{10} -Niveaus ist also eine Kombination von stabiler vertikaler Schichtung, welche das bodennahe Mischungsvolumen klein hält, sowie einer Anströmung der Luftmasse aus kontinentalen Quellgebieten. Ein interessantes Resultat ist, dass Grenzwertüberschreitungen auch in Luftmassen aus südwestlicher Richtung zu verzeichnen sind (Cluster A7).

Gleichzeitig ist zu erkennen, dass bei jeder Wetterlage immer signifikante lokale (also städtische bzw. verkehrsnah) Beiträge zu erkennen sind (Abb. 4a). Es ist sogar so, dass diese Inkremente mit zunehmender Hintergrundbelastung selbst noch zunehmen. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, denn es bedeutet, dass der absolute lokale Beitrag zur Belastung wie die Hintergrundbelastung in ähnlicher Weise von der Wetterlage abhängt.

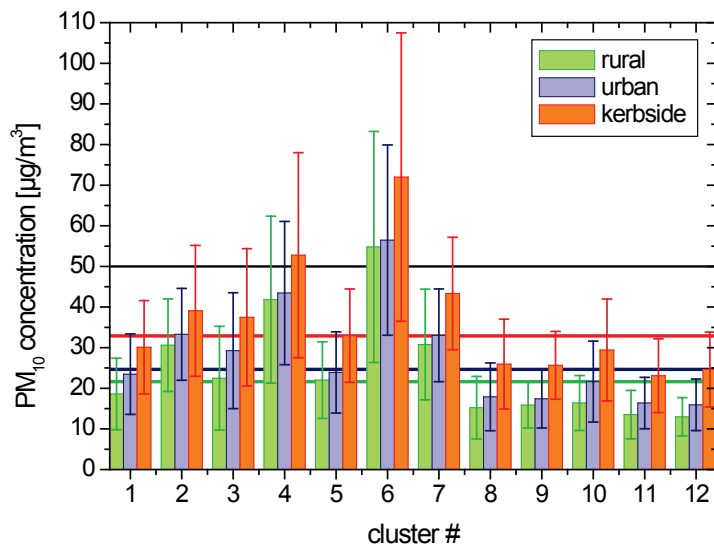


Abb. 4a:

PM₁₀-Konzentrationsmittelwerte für Region A, getrennt nach ländlichen (1 Station, DEBB066 Spreewald), städtischen (5) und verkehrsnahen (3) Stationen). Fehlerbalken geben 1 Standardabweichung des Ensembles an.

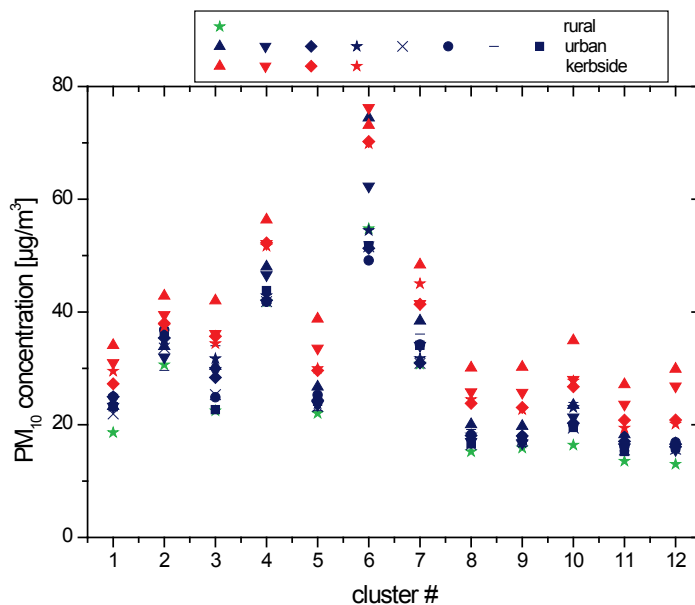


Abb. 4b: Wie Abb. 4a, jedoch mit PM₁₀-Konzentrationsmittelwerten für jede Station (Liste siehe Anhang A) einzeln.

Der Aspekt der Einzelmessstationen wird in Abb. 4b sowie nochmals deutlicher in Abb. 5 beleuchtet. Generell erscheinen die Messstationen der Region A Konzentrationen entsprechend ihrer Kennzeichnungen aufzuweisen (ländlich < städtisch < verkehrsnah). Insbesondere die städtischen Stationen weisen sehr ähnliche mittlere Belastungen auf (Abb. 5 oben). Abb. 5 (unten) gibt einen Eindruck über die Variabilität der PM₁₀-Werte innerhalb der Wetterlagen. In einigen Fällen scheren die Mittelwerte einzelner Stationen aus noch zu klärenden Gründen aus dem Ensemble aus, z.B. die ländliche Hintergrundstation DEBB042 bei Cluster A6. Die Differenzierung nach Einzelmessstationen belegt auf jeden Fall den Nutzen der regionalen Herangehensweise im Gegensatz zur Verwendung von Stationstripeln (je 1 Station ländlich, städtisch, verkehrsnah), deren Ergebnisse empfindlich von der konkreten Stationswahl abhängen.

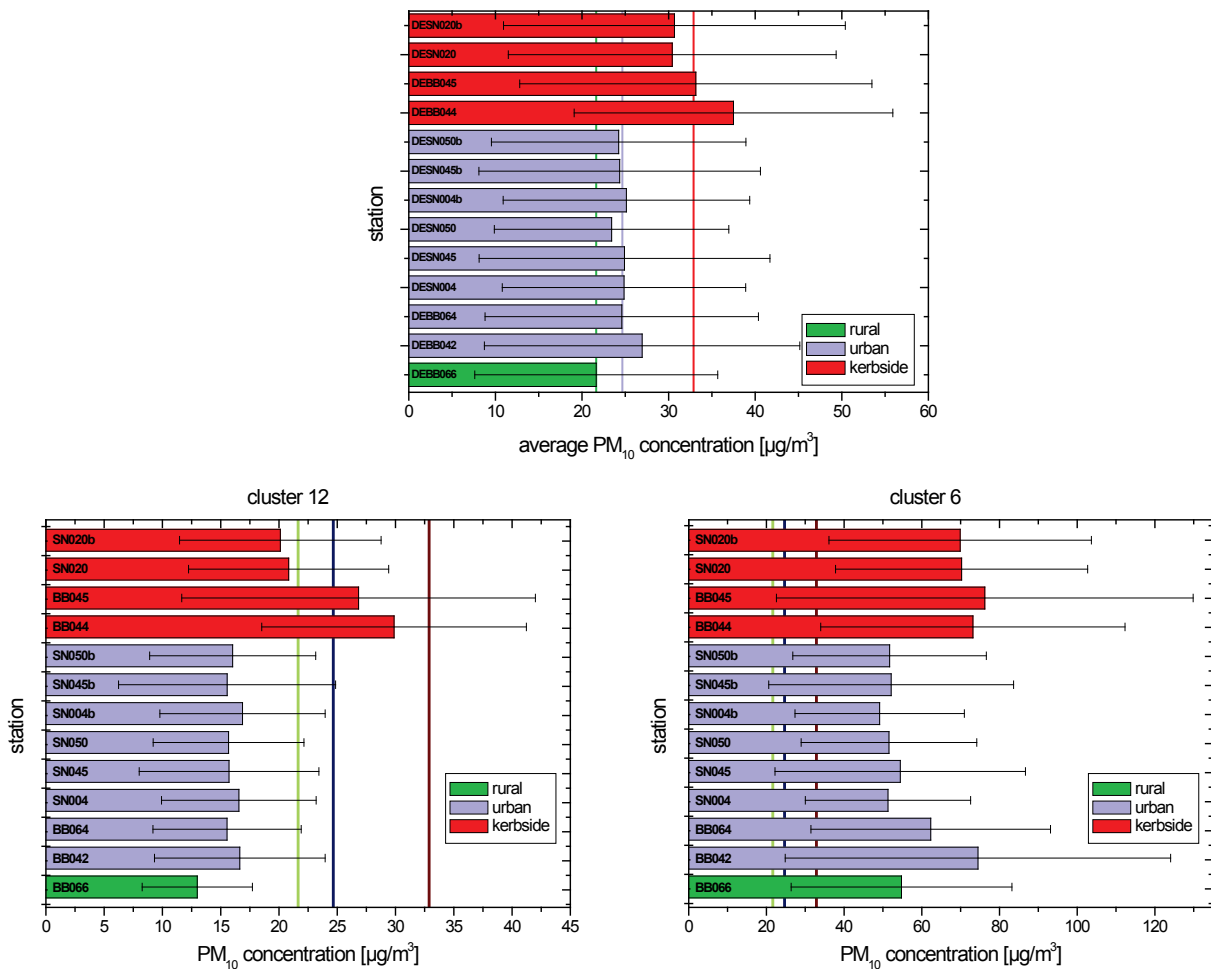


Abb. 5: Oben: PM_{10} -Mittelwerte für alle Stationen der Region A einzeln mit Standardabweichung. (Liste der Stationen siehe Anhang A). Unten: PM_{10} -Mittelwerte aller Station für die beiden Trajektoriencluster Nr. 12 (Nordwestanströmung) und 6 (winterliche Hochdruckwetterlage).

Analog zu Abb. 3b rechts teilt Abb. 6 die Wetterlagen in Monatszeiträume ein. Das dominanteste Auftreten eines Einzelmonats ist der Januar mit 50 % relativer Häufigkeit bei der winterlichen Hochdruckwetterlage, Cluster A6 (Abb. 6, links). Bezüglich der PM_{10} -Überschreitungen ergibt sich ein facettenreiches Bild (Abb. 6, rechts): Die absolut häufigsten Grenzwertüberschreitungen treten zwischen Oktober und März bei Wetterlage A4, der winterlichen Ostanströmung auf. Danach folgt die stagnierende Hochdruckwetterlage (Cluster A6) mit einem Schwerpunkt im Dezember und Januar. Den dritten Platz bezüglich der Überschreitungseignisse nimmt die Wetterlage A7 (winterliche Südwestanströmung) ein, mit einer nahezu gleichmäßigen Abdeckung zwischen Oktober und März. Zahlreiche Grenzwertüberschreitungen außerhalb des Winterhalbjahrs liefert die sommerliche Ost-anströmung, Cluster Nr. A2. Hier sind März, April sowie August bis Oktober vertreten. Weitere Überschreitungen werden durch die Cluster A5 (winterliche Westanströmung von Benelux/Westdeutschland), A3 (antizyklonale Lage mit Anströmung über Dänemark/Norddeutschland), A10 (Britische Inseln) und A1 (Ostsee, Baltikum) geliefert. Alle anderen vier Wetterlagen tragen nur unwesentlich zur Zahl der Überschreitungen von $50 \mu g/m^3$ bei.

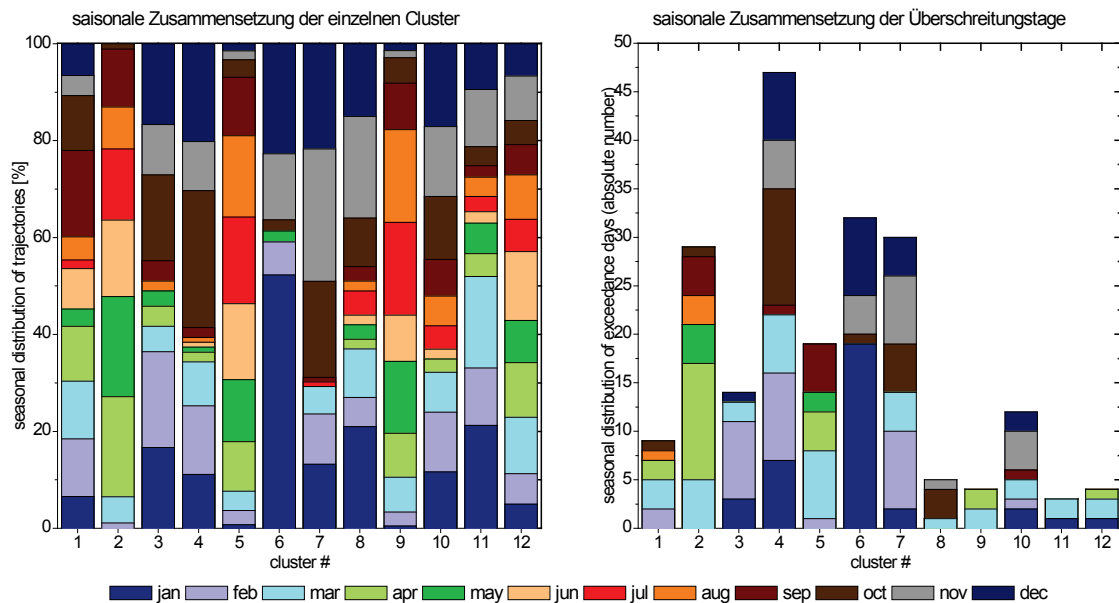


Abb. 6: Trajektoriencluster in monatlicher Auflösung. Links: relative Häufigkeit der Cluster. Rechts: Absolute Zahl von PM_{10} -Tageswerten $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über alle Verkehrsstation, 2005-2009 in Region A.

Tabelle 1 liefert konkrete Zahlen zu der Zahl der Überschreitungen eines Tagesmittelwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über die verkehrsnahe Messstationen, in Region A: Insgesamt traten von 2005 bis 2009 an 208 Tagen derartige Überschreitungen auf, also etwa 42/Jahr. Die zahlenmäßig meisten Überschreitungen traten während Wetterlage A4 (9,6/Jahr), A6 (6,5/Jahr), A7 (6,1/Jahr) und A2 (5,9/Jahr) auf.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	Häuf. (d)	Rel. Häuf.	ÜS-Er.	ÜS-Wahrsch.	Anteil Ges-ÜS	ÜS-Er./Jahr	Kumulativ
A4	Wi/He	Polen (Süd)	99	6%	47	47%	23%	9.6	9.6
A6	Wi	D/PL/CZ	44	2%	32	73%	15%	6.5	16.1
A7	Wi/He	Frankreich (Süd)	106	6%	30	28%	14%	6.1	22.2
A2	Frü/So	Polen (Mitte)	184	10%	29	16%	14%	5.9	28.1
A5	So	Benelux	274	15%	19	7%	9%	3.9	32.0
A3	Wi/He	Dänemark	96	5%	14	15%	7%	2.8	34.8
A10	Wi/He	Atlantik (UK)	146	8%	12	8%	6%	2.4	37.3
A10	Wi/He	Ostsee	168	9%	9	5%	4%	1.8	39.1
A8	Wi/He	Atlantik (Süd)	100	6%	5	5%	2%	1.0	40.1
A9	So	Atlantik (Mittel)	209	12%	4	2%	2%	0.8	40.9
A12	-	Atlantik (Nord)	240	13%	4	2%	2%	0.8	41.7
A11	Wi/He	Atlantik (Mitte)	127	7%	3	2%	1%	0.6	42.3
GESAMT			1793	100%	208	12%	100%	42.3	

Tabelle 1: Beiträge verschiedener Wetterlagen zu den Überschreitungen eines PM_{10} -Tagesmittelwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über alle verkehrsnahe Messstationen, 2005-2009 in Region A. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungen geordnet. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit (0-100 %) gibt den Anteil der Grenzwertüberschreitungen an der tatsächlichen Häufigkeit einer Wetterlage an. Die kumulative Spalte summiert die Überschreitungseignisse zeilenweise und normiert auf 1 Jahr auf.

Drei dieser Wetterlagen entsprechen extrem kontinental geprägter Luft mit stagnierender bzw. östlicher Anströmung (A4, A6, A2), die vierte (A7) der langsamen winterlichen Südwestanströmung. Kumulativ machen östliche und stagnierende Anströmungen nur 22 Überschreitungen/Jahr aus, unter Hinzunahme der kontinental geprägten Südwestanströmung 28 Überschreitungen/Jahr. Es stellt sich heraus, dass die PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen an den verkehrsnahen Messstationen in Region A nur begrenzt durch die großräumige Wetterphänomenologie erklärbar sind. Das systematische Auftreten eines städtischen und verkehrsnahen Inkrements (Abb. 4-5) legt auf jeden Fall nahe, dass viele PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen ihre Ursache in den örtlichen Emissionsquellen haben.

Tabelle 2 schlüsselt die Grenzwertüberschreitungen an den verkehrsnahen Messstationen der Region A nochmals nach Einzeljahren auf. (Einzeljahre sind maßgeblich bezüglich eines Maximums von 35 Überschreitungen des Tagesmittelwertes pro Jahr). Es wird deutlich, dass es 3 Jahre gab, in denen Grenzwertüberschreitungen häufiger als 35 Mal pro Jahr auftraten (2005, 2006, 2009) sowie 2 Jahre mit einer Häufigkeit unter 35 (2007 und 2008). Auch die Aufschlüsselung nach Wetterlagen ergibt ein facettenreiches Bild. In allen Jahren mit einer Häufigkeit über 35 kann jedoch festgestellt werden, dass sich die Grenzwertüberschreitungen trotz bestimmter Präferenzen auf die Wetterlagen A4, A6, A7, A2 und A5 stets auf eine Vielzahl von Wetterlagen, sowohl östlicher als auch westlicher Anströmung, winters wie sommers verteilen. Wenn man A4 und A6 zusammenfasst, kann man in jedem Jahr ähnliche relative Anteile aller Wetterlagen zu den Grenzwertüberschreitungen feststellen.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	ÜS-Er.	2005	2006	2007	2008	2009
A4	Wi/He	Polen (Süd)	47	15	10	2	9	11
A6	Wi	D/PL/CZ	32	1	13	8	5	5
A7	Wi/He	Frankreich (Süd)	30	10	9	7	1	3
A2	Frü/So	Polen (Mitte)	29	12	5	9	0	3
A5	So	Benelux	19	11	2	1	0	5
A3	Wi/He	Dänemark	14	2	3	2	3	4
A10	Wi/He	Atlantik (UK)	12	3	4	2	1	2
A1	Wi/He	Ostsee	9	3	3	2	0	1
A8	Wi/He	Atlantik (Süd)	5	3	1	0	0	1
A9	So	Atlantik (Mittel)	4	0	3	0	0	1
A12	-	Atlantik (Nord)	4	0	2	1	1	0
A11	Wi/He	Atlantik (Mitte)	3	0	2	0	0	1
GESAMT			208	60	57	34	20	37

Tabelle 2: Aufschlüsselung der Überschreitungen an verkehrsnahen Messstationen in Region A nach Einzeljahren. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungseignisse insgesamt geordnet.

3.2. Region B (Berlin und Umland)

Die Anwendung des Trajektorienclusteralgorithmus für die Region B (Berlin und Umland) erfolgte analog zur Region A. Die Einteilung in Luftmassen erfolgte jedoch nicht exakt analog zur Clusteranalyse der Region A, sondern es wurde ein neuer Durchlauf des Algorithmus gestartet. Hauptgrund ist, dass das Clusterverfahren (siehe Abschnitt 2) insgesamt darauf optimiert ist, einen möglichst großen Kontrast zwischen den Trajektorienclustern (Luftmassen, Wetterlagen) bei den PM_{10} -Werten zu erzeugen. Dieser optimale Kontrast kann prinzipiell für eine ganz unterschiedliche Luftmasseneinteilung entstehen, wird aber in der Praxis bei benachbarten Regionen aufgrund ähnlicher Meteorologie bzw. Klimatologie sehr ähnlich ausfallen. An der Anzahl der Cluster (12) wurde jedoch schon aus Konsistenzgründen für alle Regionen festgehalten.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Ergebnisse der Regionen A und B werden die Ergebnisse für Region B im Folgenden jedoch stets im engen Vergleich zu den Ergebnissen für Region A (siehe Abschnitt 3.1) beschrieben. Die Abbildungen 7-10 liefern dabei für die Region B die analogen Ergebnisse zu den Abbildungen 3-6 (Region A). Meist lassen sich Parallelen zwischen bestimmten Trajektorienclustern für die Region A (A1, A2, A3 etc.) und Region B (B1, B2, B3 etc.) ziehen. Parallele Cluster (etwa A6 und B5) sind in der Regel nicht exakt deckungsgleich, stimmen aber meist in der klaren Mehrheit der Einzeltage überein und repräsentieren somit die gleiche Wetterlage.

Für Region B werden zwei Cluster (Nr. B4 und B7) direkt als Luftmassen interpretiert, die über das Nachbarland Polen nach Deutschland gekommen sind. (Diese entsprechen den Wetterlagen bei den Clustern A2 und A4 aus Kapitel 3.1.) Weitere Cluster (Nr. B5 und B3) beinhalten Wetterlagen, bei denen ein grenzüberschreitender Transport aus Polen bzw. Tschechien möglich erscheint. (Diese entsprechen den Wetterlagen bei den Clustern A6 und A1 aus Kapitel 3.1.). Die höchsten PM_{10} -Werte sind in Cluster B5 (winterliche Stagnationswetterlage), B7 (winterliche Ostwetterlage), B4 (frühlingshafte und herbstliche Ostwetterlage) und B8 (winterliche Südwestwetterlage) anzutreffen (Abb. 8a und b). Abb. 9 zeigt die Messdaten in der vollen Auflösung einzelner Messstationen. Abb. 10 bestätigt die saisonale Zuordnung der Wetterlagen.

Die Tabellen 3 und 4 fassen die Ergebnisse nochmals in Form der Überschreitungshäufigkeiten zusammen. Im Mittel fanden sich an den Verkehrsstationen der Region B pro Jahr 36,2 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von $50 \mu g/m^3$. Hiervon sind im Mittel ca. 26 den östlichen Anströmungen bzw. der stagnierenden Wetterlage zuzuordnen. Demnach resultiert ein wesentlicher Anteil der Überschreitungseignisse aus anderen Anströmungen, insbesondere Südwesten (Cluster B8) und Westen (Cluster B6).

Tabelle 4 zeigt überdeutlich die zwischenjährlichen Schwankungen in der Zahl der Grenzwertüberschreitungen, die weitgehend von der Ausprägung der Wetterlagen in den Wintern abhängen (siehe auch in Kapitel 5).

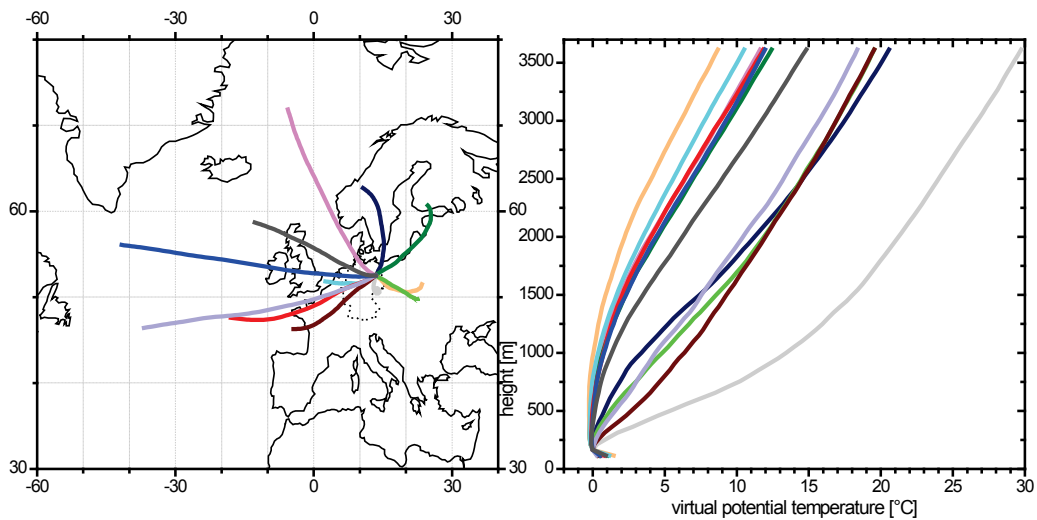


Abb. 7a: Mittlere Rückwärtstrajektorien und Profile der pseudopotenziellen Temperatur für Region B.

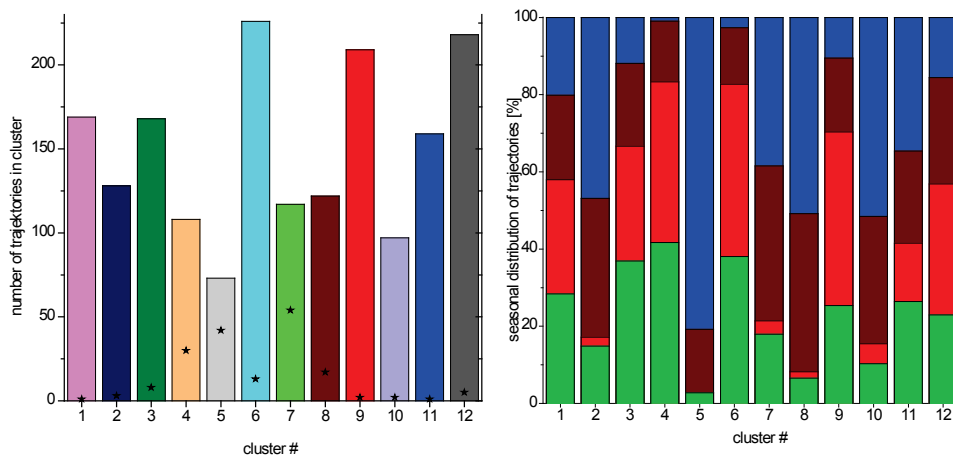


Abb. 7b: Links: Absolute Häufigkeit der 12 Trajektoriencluster (Balken) inklusive der Zahl der Tage, an denen der mittlere Messwert an verkehrsnahen Stationen $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreitet. (*). Rechts: saisonales Auftreten jedes Clusters (grün: Frühjahr, rot: Sommer, braun: Herbst, blau: Winter)

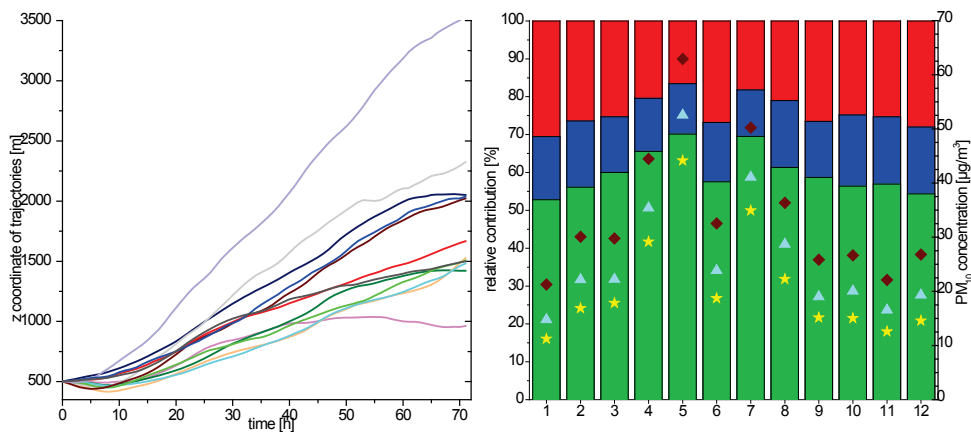


Abb. 7c: Links: Mittlere Vertikaltendenz der Rückwärtstrajektorien. Rechts: relative Anteile von ländlichem Hintergrund (grün), städtischem Inkrement (blau) und verkehrsnahem Inkrement (rot); gepunktet auf rechter y-Achse: Absolutwerte.

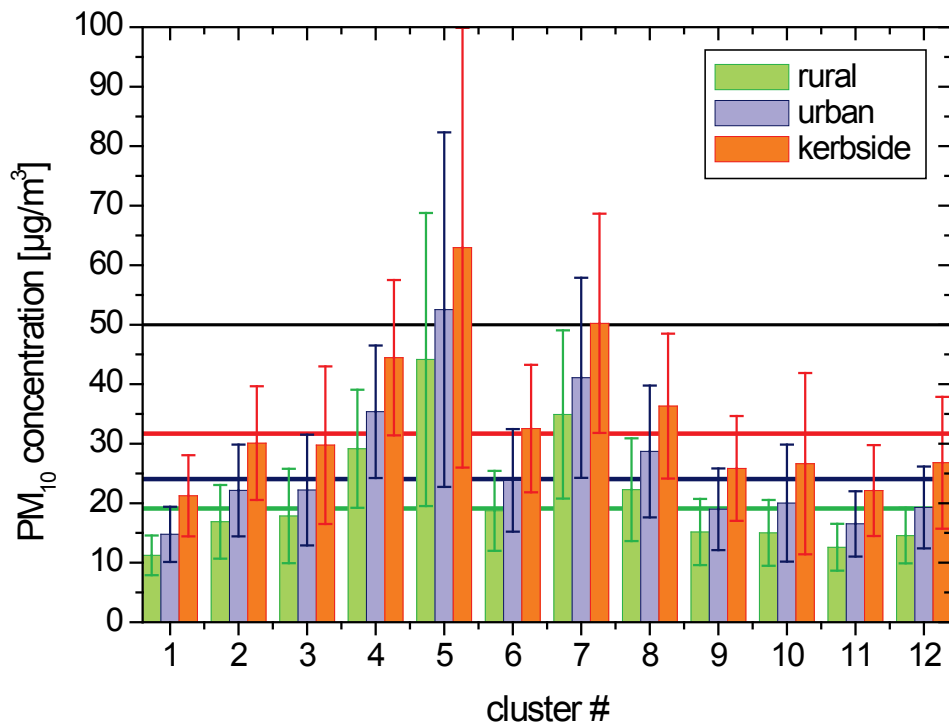


Abb. 8a: PM_{10} -Konzentrationsmittelwerte für Region B, getrennt nach ländlichen (6 Stationen), städtischen (9) und verkehrsnahen (7) Stationen). Fehlerbalken geben 1 Standardabweichung des Ensembles an.

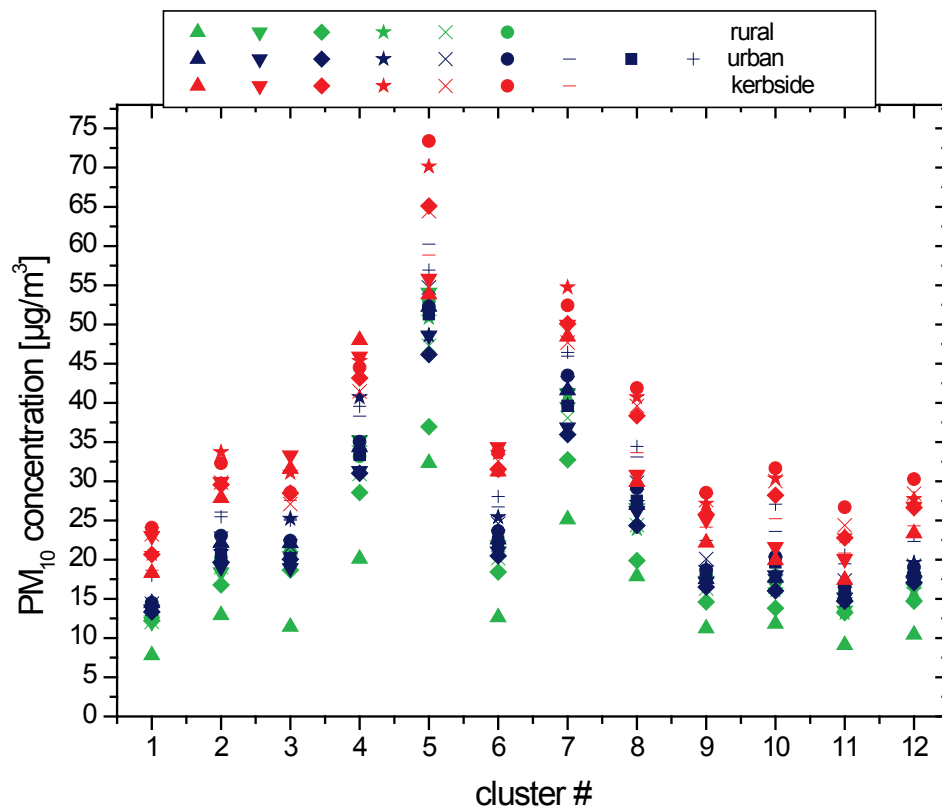


Abb. 8b: Wie Abb. 8a, jedoch mit PM_{10} -Konzentrationsmittelwerten für jede Station (Liste siehe Anhang A) einzeln.

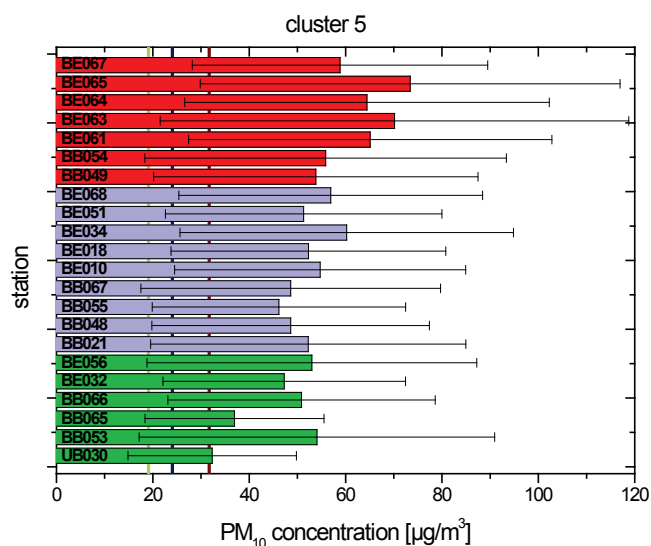
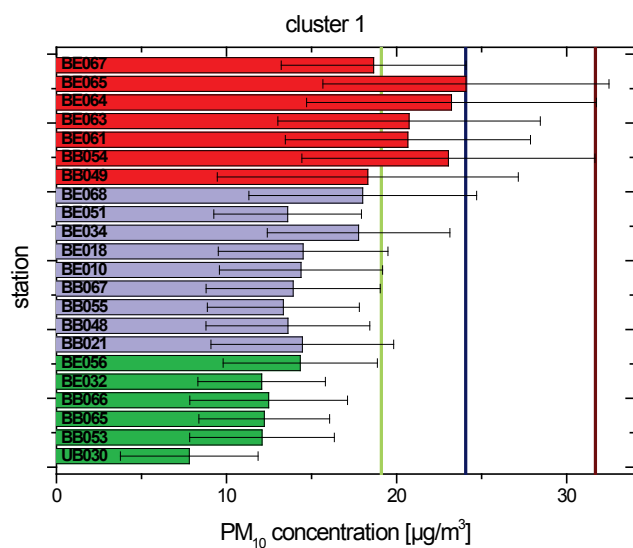
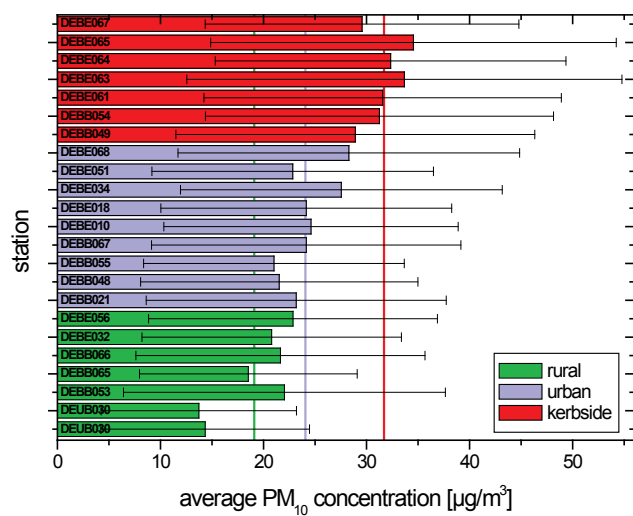


Abb. 9: Oben: PM_{10} -Mittelwerte für alle Stationen der Region B einzeln mit Standardabweichung. (Liste der Stationen siehe Anhang A), sowie im Speziellen für die beiden Trajektoriencluster B1 (maritime Nordwestanströmung) und B5 (winterliche Hochdruckwetterlage).

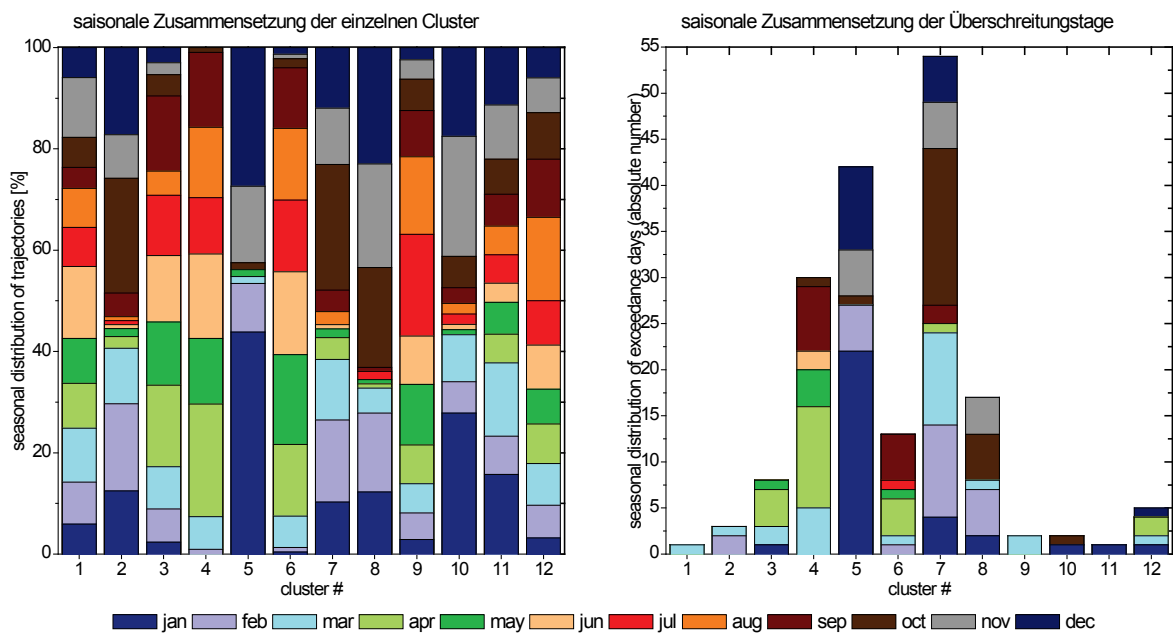


Abb. 10: Trajektoriencluster in monatlicher Auflösung. Links: relative Häufigkeit der Cluster. Rechts: Absolute Zahl von PM_{10} -Tageswerten $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über alle Verkehrsstationen, 2005-2009 in Region B.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	Häuf. (d)	Rel. Häuf.	ÜS-Er.	ÜS-Wahrsch.	Anteil Ges-ÜS	ÜS-Er./Jahr	Kumulativ
B7	Wi/He	Polen (Süd)	117	6.52%	54	46%	30%	11.0	11.0
B5	Wi	D/PL/CZ	73	4.07%	42	58%	24%	8.5	19.5
B4	Frü/So	Polen (Mitte)	108	6.02%	30	28%	17%	6.1	25.6
B8	Wi/He	Frankreich (Süd)	122	6.80%	17	14%	10%	3.5	29.1
B6	Frü/So	Benelux	226	12.60%	13	6%	7%	2.6	31.8
B3	Frü/So	Baltikum	168	9.36%	8	5%	4%	1.6	33.4
B12	-	Nordsee (UK)	218	12.15%	5	2%	3%	1.0	34.4
B2	Wi/He	Skandinavien	128	7.13%	3	2%	2%	0.6	35.0
B10	Wi/He	Atlantik (Süd)	97	5.41%	2	2%	1%	0.4	35.4
B9	Frü/So	Atlantik (Süd)	209	11.65%	2	1%	1%	0.4	35.8
B1	-	Atlantik (Nord)	169	9.42%	1	1%	1%	0.2	36.0
B11	Wi/He	Atlantik (Mitte)	159	8.86%	1	1%	1%	0.2	36.2
GESAMT			1794	100%	178	10%	100%	36.2	

Tabelle 3: Beiträge verschiedener Wetterlagen zu den Überschreitungen eines PM_{10} -Tagesmittelwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über alle verkehrsnahen Messstationen, 2005-2009 in Region B. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungen geordnet. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit (0-100 %) gibt den Anteil der Grenzwertüberschreitungen an der tatsächlichen Häufigkeit einer Wetterlage an. Die kumulative Spalte summiert die Überschreitungsergebnisse zeilenweise und normiert auf 1 Jahr auf.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	ÜS-Er.	2005	2006	2007	2008	2009
B7	Wi/He	Polen (Süd)	54	17	14	4	8	11
B5	Wi	D/PL/CZ	42	6	15	8	5	8
B4	Frü/So	Polen (Mitte)	30	10	10	6	0	4
B8	Wi/He	Frankreich (Süd)	17	6	8	1	1	1
B6	Frü/So	Benelux	13	8	4	0	0	1
B3	Frü/So	Baltikum	8	4	1	2	1	0
B12	-	Nordsee (UK)	5	3	1	0	0	1
B2	Wi/He	Skandinavien	3	1	2	0	0	0
B10	Wi/He	Atlantik (Süd)	2	1	1	0	0	0
B9	Frü/So	Atlantik (Süd)	2	2	0	0	0	0
B1	-	Atlantik (Nord)	1	0	1	0	0	0
B11	Wi/He	Atlantik (Mitte)	1	0	0	1	0	0
GESAMT			178	58	57	22	15	26

Tabelle 4: Aufschlüsselung der Überschreitungen an verkehrsnahen Messstationen in Region B nach Einzeljahren. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungsergebnisse insgesamt geordnet.

3.3. Region C (Mitteldeutschland)

Die Anwendung des Trajektorienclusteralgorithmus für die Region C (Berlin und Umland) erfolgte analog zu den Regionen A und B (siehe auch Anmerkungen in Kapitel 3.2).

Die Abbildungen 11-14 liefern dabei für Region C die analogen Ergebnisse zu den Abbildungen 3-6 (Region A) und 7-10 (Region B).

Für Region C sind drei Cluster erkennbar (Nr. C2, C3 und C4), in denen Luftmassen über das Nachbarland Polen nach Deutschland gekommen sind (Abb. 11a). Des Weiteren taucht auch hier die stagnierende winterliche Hochdruckwetterlage (C5) mit maximalem vertikalen Temperaturgradienten (Abb. 11a) wieder auf. Bei C5 besteht auch die höchste Wahrscheinlichkeit einer Grenzwertüberschreitung an den Verkehrsstationen (Abb. 11b). Auch die bei weitem höchsten PM_{10} -Mittelwerte finden sich hier wieder (Abb. 11c). Danach folgen entsprechend C2 (winterliche Ostwetterlage), C3 (frühlingshafte und herbstliche Ostwetterlage), C8 (winterliche Südwestwetterlage) und C4 (sommerliche Ostwetterlage) (Abb. 12a und b). Die Betrachtung der einzelnen Messstationen (Abb. 13) macht eine Unschärfe der Messstationskategorien, beispielsweise bei Cluster C5 deutlich. Die Schwankungen innerhalb der ländlichen Kategorie rühren im Wesentlichen von der Höhenlage einzelner Stationen her.

Die Tabellen 5 und 6 fassen erneut die Ergebnisse in Form der Überschreitungshäufigkeiten zusammen. Im Mittel fanden sich an den Verkehrsstationen der Region C pro Jahr 27,9 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von $50 \mu g/m^3$. Hiervon sind im Mittel ca. 20 den östlichen Anströmungen bzw. der stagnierenden Wetterlage zuzuordnen. Ein wesentlicher Anteil der Überschreitungsergebnisse findet unter anderen Anströmungen statt, insbesondere Südwesten (Cluster C8) und Westen (Cluster C6 und C11). Auch bei Region C ist eine hohe zwischenjährliche Variabilität festzustellen (Tabelle 6).

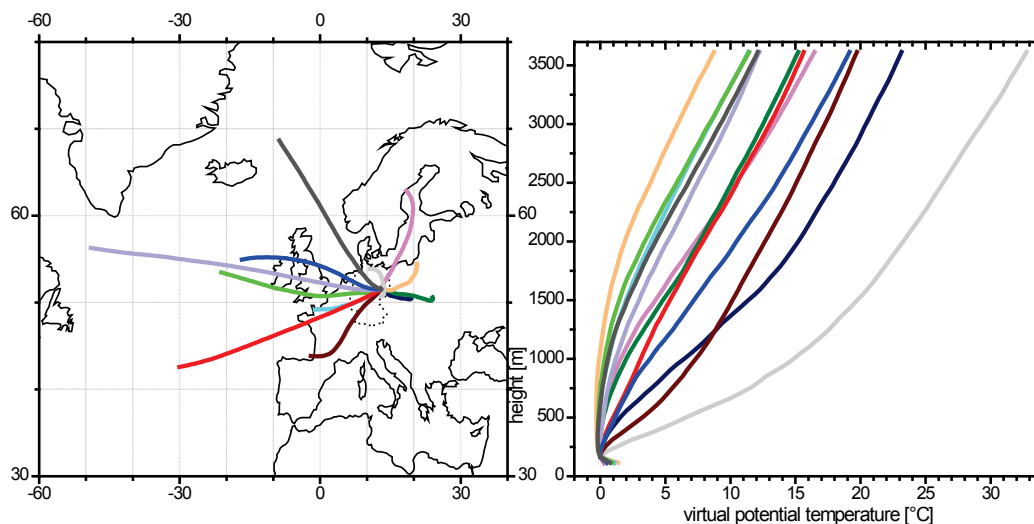


Abb. 11a: Mittlere Rückwärtstrajektorien und Profile der pseudopotentiellen Temperatur der Clusteranalyse für Region C.

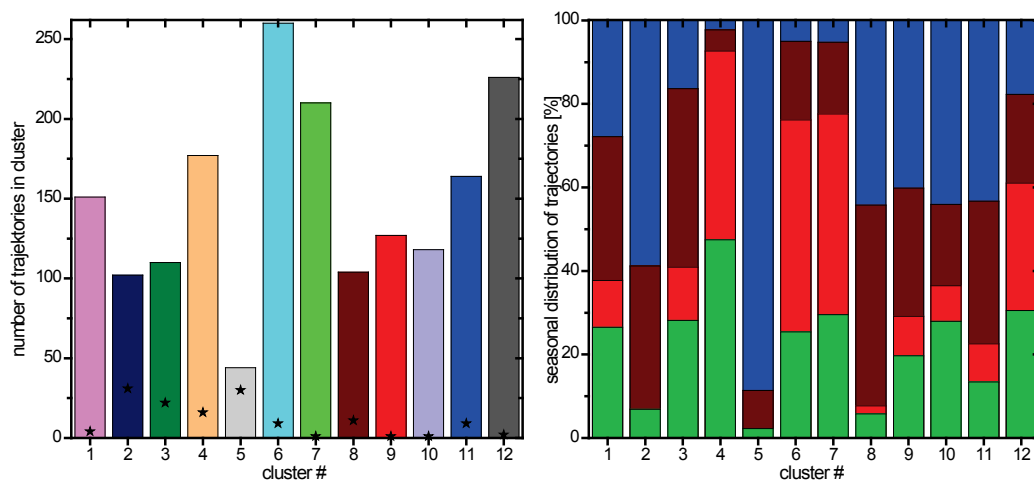


Abb. 11b: Links: Häufigkeit der 12 Trajektoriencluster (Balken) inklusive der Zahl der Tage, an denen der mittlere Messwert an verkehrsnahen Stationen $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreitet. (*). Rechts: saisonales Auftreten jedes Clusters (grün: Frühjahr, rot: Sommer, braun: Herbst, blau: Winter)

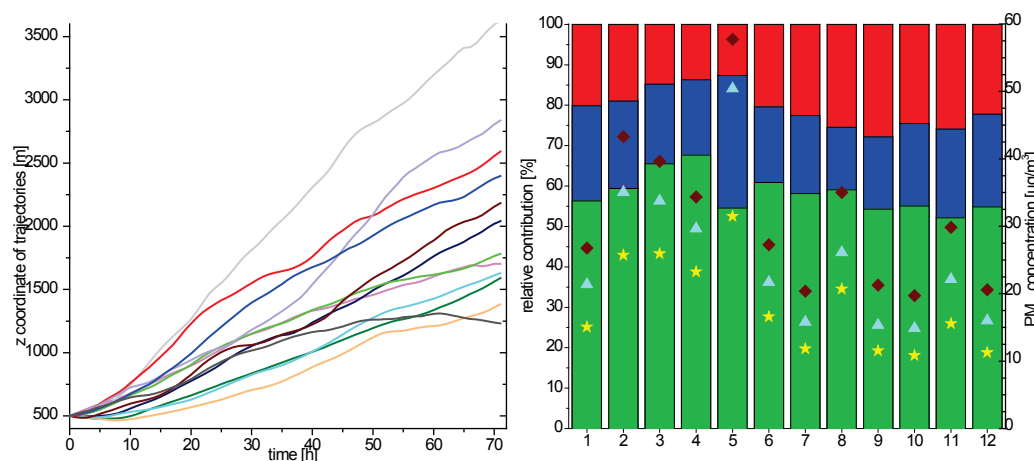


Abb. 11c: Links: Mittlere Vertikaltendenz der Rückwärtstrajektorien. Rechts: relative Anteile von ländlicher Hintergrund (grün), städtischem Inkrement (blau) und verkehrsnahem Inkrement (rot); gepunktet auf rechter y-Achse: Absolutwerte.

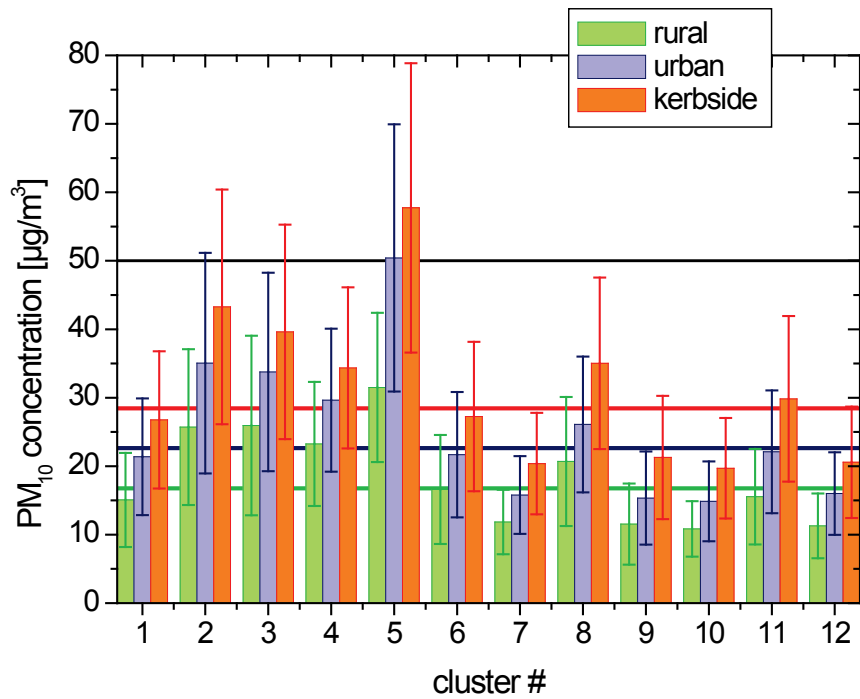


Abb. 12a: PM_{10} -Konzentrationsmittelwerte für Region C, getrennt nach ländlichen (4), städtischen (12) und verkehrsnahen (11) Stationen. Fehlerbalken geben 1 Standardabw. des Ensembles an.

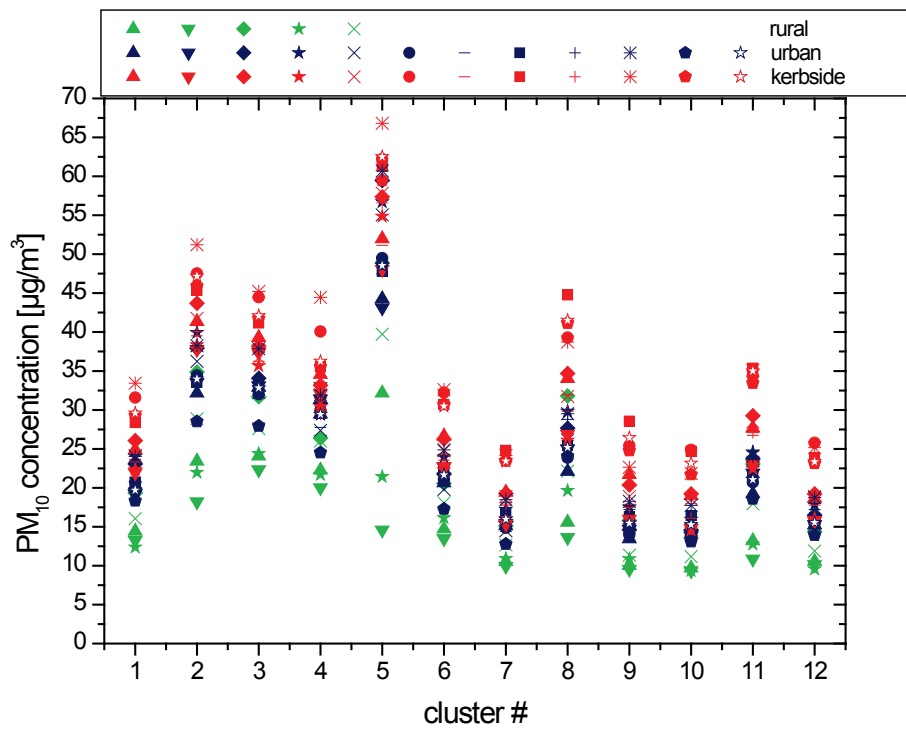


Abb. 12b: Wie Abb. 12a, jedoch mit PM_{10} -Konzentrationsmittelwerten für jede Station (Liste siehe Anhang A) einzeln.

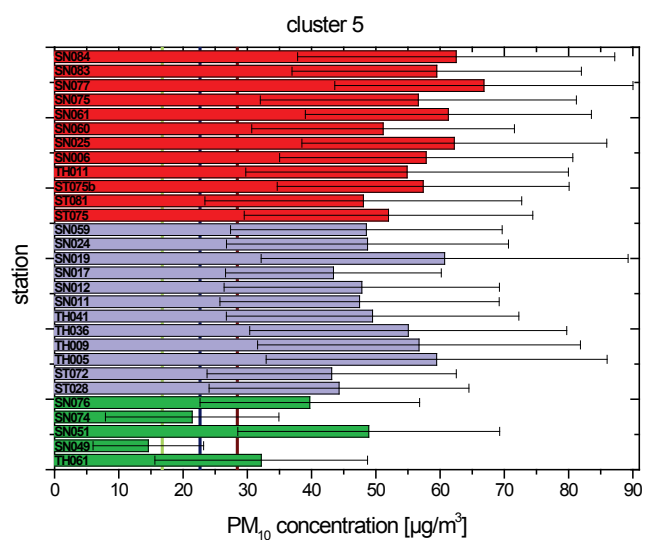
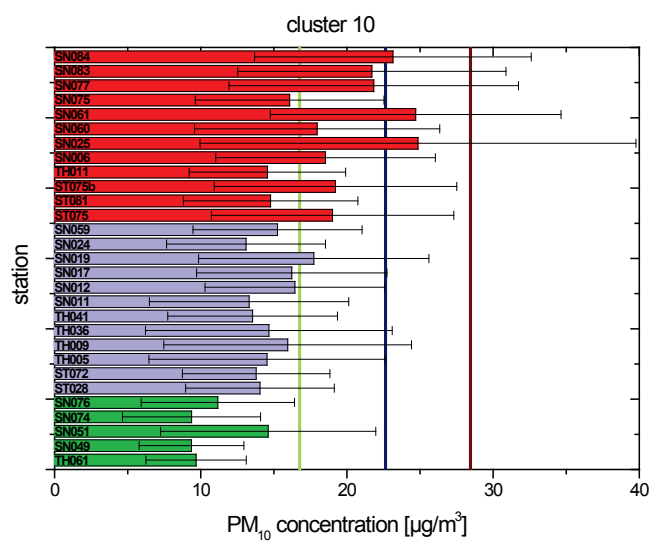
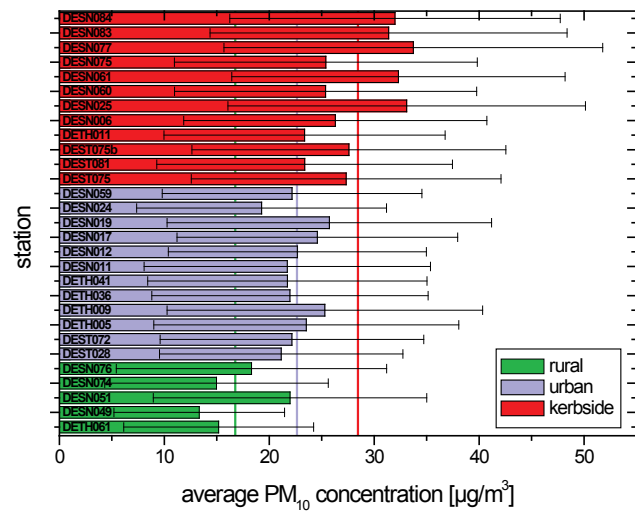


Abb. 13: Oben: PM_{10} -Mittelwerte für alle Stationen der Region C einzeln mit Standardabweichung. (Liste der Stationen siehe Anhang A), sowie im Speziellen für die beiden Trajektoriencluster C10 (Westanströmung) und C5 (winterliche Hochdruckwetterlage).

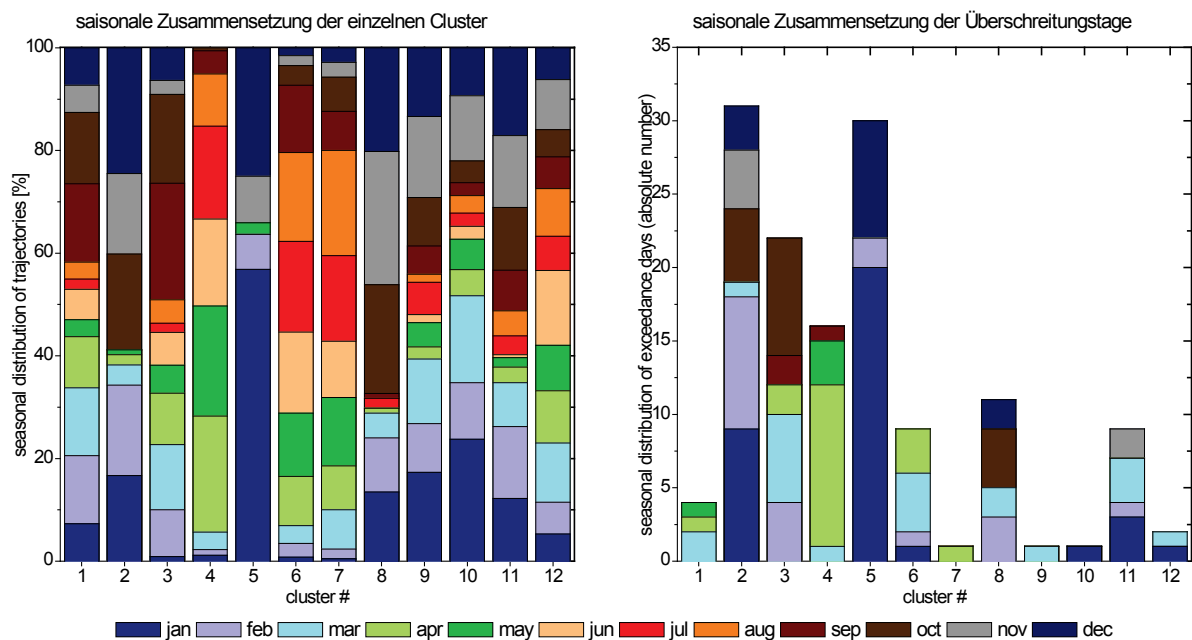


Abb. 14: Trajektoriencluster in monatlicher Auflösung. Links: relative Häufigkeit der Cluster. Rechts: Absolute Zahl von PM_{10} -Tageswerten $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über alle Verkehrsstationen, 2005-2009 in Region C.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	Häuf. (d)	Rel. Häuf.	ÜS-Er.	ÜS-Wahrsch.	Anteil Ges-ÜS	ÜS-Er./Jahr	Kumulativ
C2	Wi	Polen (Süd)	102	5.69%	31	30%	23%	6.3	6.3
C5	Wi	D (Nord)	44	2.45%	30	68%	22%	6.1	12.4
C3	Wi/He	Polen (Mitte)	110	6.13%	22	20%	16%	4.5	16.9
C4	Frü/So	Polen (Nord)	177	9.87%	16	9%	12%	3.3	20.2
C8	Wi/He	Frankreich (Süd)	104	5.80%	11	11%	8%	2.2	22.4
C11	Wi/He	Atlantik (UK)	164	9.15%	9	5%	7%	1.8	24.2
C6	So	Benelux	260	14.50%	9	3%	7%	1.8	26.1
C1	Wi/He	Ostsee	151	8.42%	4	3%	3%	0.8	26.9
C12	-	Atlantik (Nord)	226	12.60%	2	1%	1%	0.4	27.3
C10	Wi/He	Atlantik (Mitte)	118	6.58%	1	1%	1%	0.2	27.5
C7	So	Atlantik (Mitte)	210	11.71%	1	0%	1%	0.2	27.7
C9	Wi/He	Atlantik (Süd)	127	7.08%	1	1%	1%	0.2	27.9
GESAMT			1793	100%	137	8%	100%	27.9	

Tabelle 5: Beiträge verschiedener Wetterlagen zu den Überschreitungen eines PM_{10} -Tagesmittelwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über alle verkehrsnahen Messstationen, 2005-2009 in Region C. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungen geordnet. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit (0-100 %) gibt den Anteil der Grenzwertüberschreitungen an der tatsächlichen Häufigkeit einer Wetterlage an. Die kumulative Spalte summiert die Überschreitungseignisse zeilenweise und normiert auf 1 Jahr auf.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	ÜS-Er.	2005	2006	2007	2008	2009
C2	Wi	Polen (Süd)	31	7	10	1	6	7
C5	Wi	D (Nord)	30	0	14	5	3	8
C3	Wi/He	Polen (Mitte)	22	15	4	1	0	2
C4	Frü/So	Polen (Nord)	16	6	5	1	0	4
C8	Wi/He	Frankreich (Süd)	11	4	3	3	1	0
C11	Wi/He	Atlantik (UK)	9	2	3	2	1	1
C6	So	Benelux	9	5	0	1	0	3
C1	Wi/He	Ostsee	4	1	1	1	0	1
C12	-	Atlantik (Nord)	2	0	1	0	1	0
C10	Wi/He	Atlantik (Mitte)	1	0	1	0	0	0
C7	So	Atlantik (Mitte)	1	0	1	0	0	0
C9	Wi/He	Atlantik (Süd)	1	1	0	0	0	0
GESAMT			137	41	43	15	12	26

Tabelle 6: Aufschlüsselung der Überschreitungen an verkehrsnahen Messstationen in Region C nach Einzeljahren. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungsergebnisse insgesamt geordnet.

3.4. Region D (Westliches Nordrhein-Westfalen)

Die Anwendung des Trajektorienclusteralgorithmus für die Region D erfolgte analog zu den Regionen A-C (vgl. Anmerkungen in Kapitel 3.2). Die Abbildungen 15-18 liefern dabei die für Region D relevanten Ergebnisse.

Für Region D sind durch die räumliche Entfernung zu den Regionen A, B und C leicht abgewandelte meteorologische Verhältnisse erkennbar. Es gibt eine winterlich-herbstliche Ostwetterlage (D3), eine sommerliche Ostwetterlage (D5) und eine stagnierende winterliche Hochdruckwetterlage mit einer mittleren Windkomponente aus Norden (D4) (Abb. 15 a und b). Des Weiteren treten weitere Anströmungen aus allen westlichen und nördlichen Richtungen auf (Abb. 15a) auf. Die bei weitem höchsten PM_{10} -Mittelwerte finden sich bei der winterlichen Stagnationswetterlage wieder (D4) (Abb. 15c, Abb. 16a und b).

Auch hier fassen die Tabellen 7 und 8 die Ergebnisse in Form der Überschreitungshäufigkeiten zusammen. Im Mittel fanden sich an den Verkehrsstationen der Region D pro Jahr 22,6 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von $50 \mu g/m^3$, dies ist wesentlich weniger als in den Regionen A, B und C. In keinem der Jahre 2005-2009 wurde die maximal erlaubte Zahl der Überschreitungen (35) in Anspruch genommen (Tabelle 8). Der wesentliche Teil der Überschreitungsergebnisse fand unter stagnierenden winterlichen Bedingungen statt (D4), der Rest verteilt sich auf eine Vielzahl von Wetterlagen (vor allem D6, D3, D7, D12, D11) in allen Jahreszeiten und bei verschiedenen Anströmungen (Tabelle 7). Für Region D kann man keine Vorzugswindrichtung für verschmutzte Luftmassen erkennen; insofern kommen wir zum Schluss, dass in Nordrhein-Westfalen lokale und regionale PM_{10} -Quellen die höchste Bedeutung für die Erklärung der lokalen Messwerte besitzen.

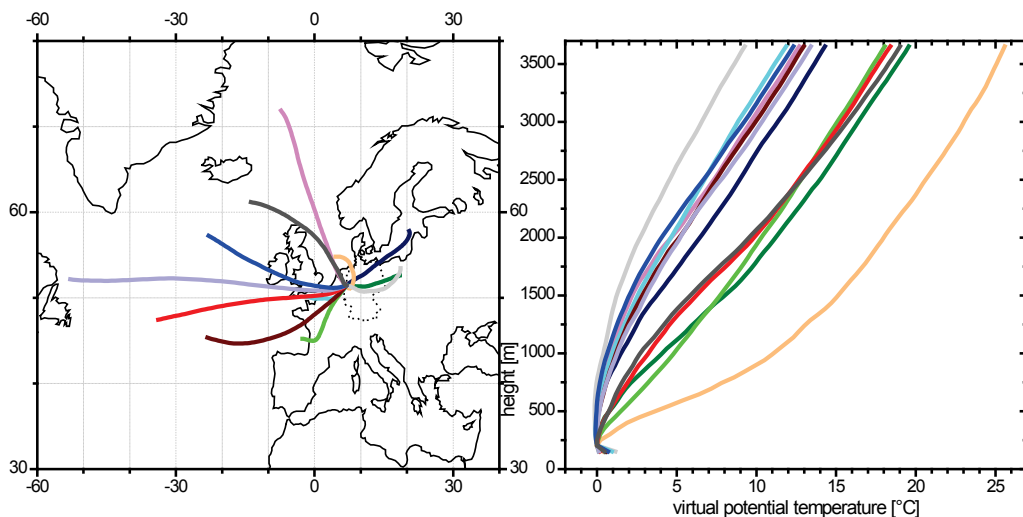


Abb. 15a: Mittlere Rückwärtstrajektorien und Profile der pseudopotenitiellen Temperatur der Clusteranalyse für Region D.

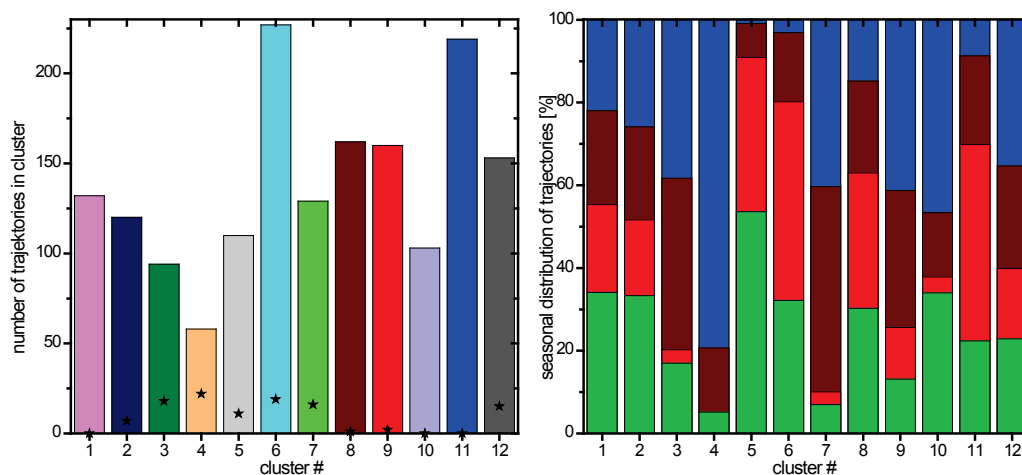


Abb. 15b: Links: Häufigkeit der 12 Trajektoriencluster (Balken) inklusive der Zahl der Tage, an denen der mittlere Messwert an verkehrsnahen Stationen $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreitet. (*). Rechts: saisonales Auftreten jedes Clusters (grün: Frühjahr, rot: Sommer, braun: Herbst, blau: Winter)

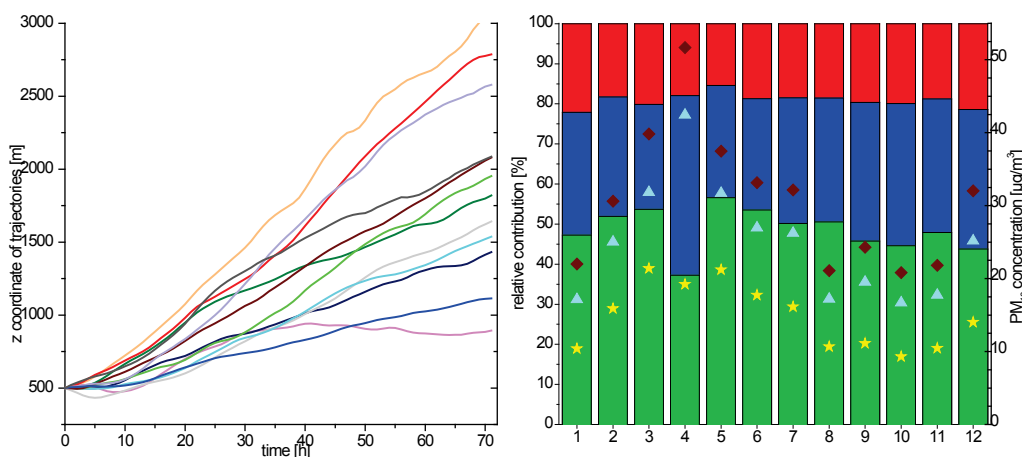


Abb. 15c: Links: Mittlere Vertikaltendenz der Rückwärtstrajektorien. Rechts: relative Anteile von ländlichem Hintergrund (grün), städtischem Inkrement (blau) und verkehrsnahem Inkrement (rot); gepunktet auf rechter y-Achse: Absolutwerte.

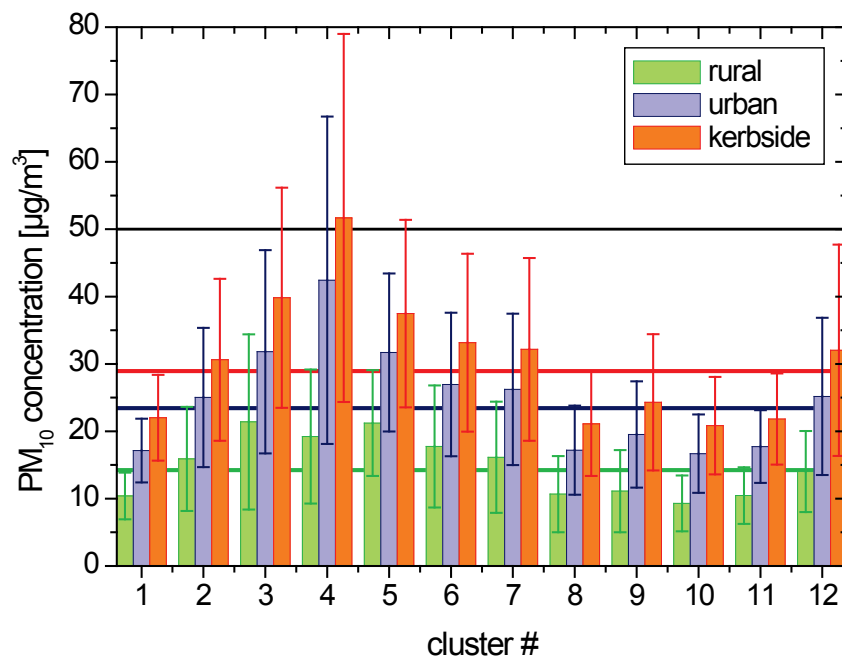


Abb. 16a: PM_{10} -Konzentrationsmittelwerte für Region D, getrennt nach ländlichen (3), städtischen (19) und verkehrsnahen (7) Stationen. Fehlerbalken geben 1 Standardabw. des Ensembles an.

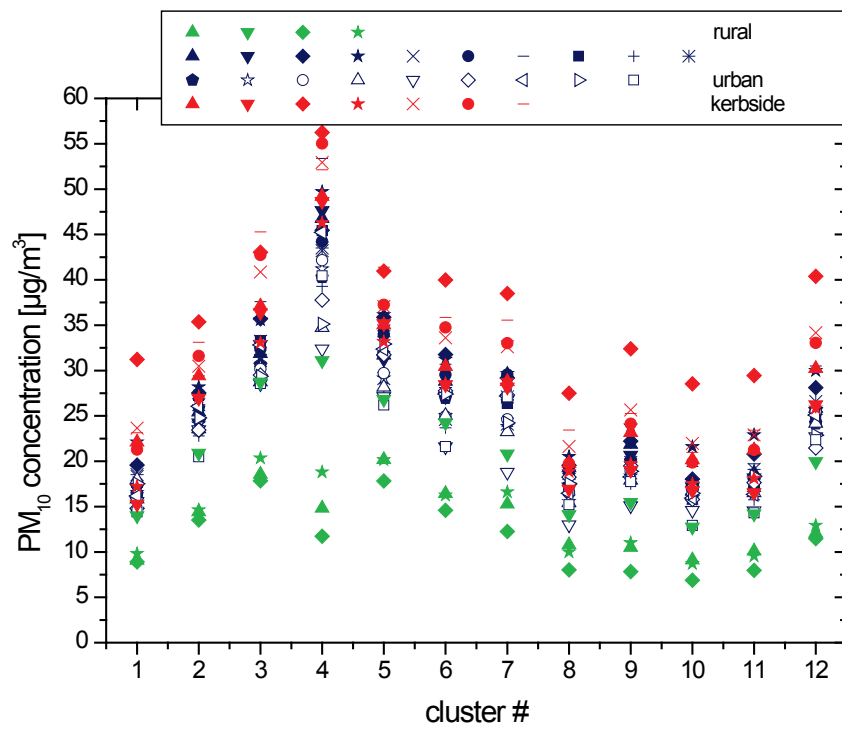


Abb. 16b: Wie Abb. 16a, jedoch mit PM_{10} -Konzentrationsmittelwerten für jede Station (Liste siehe Anhang A) einzeln.

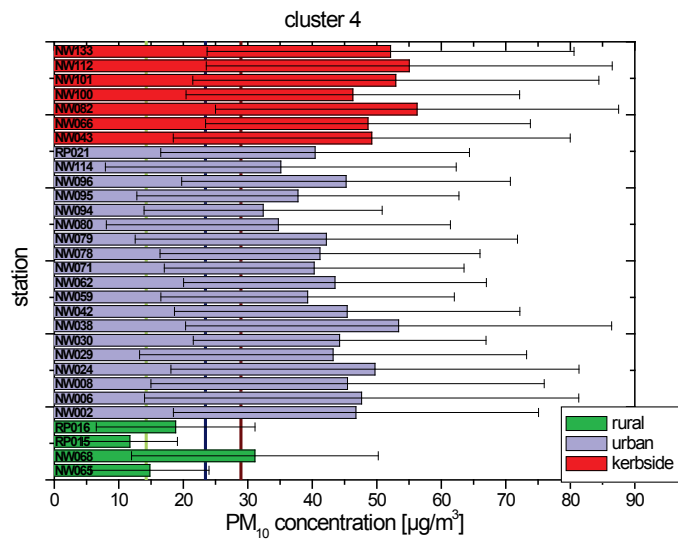
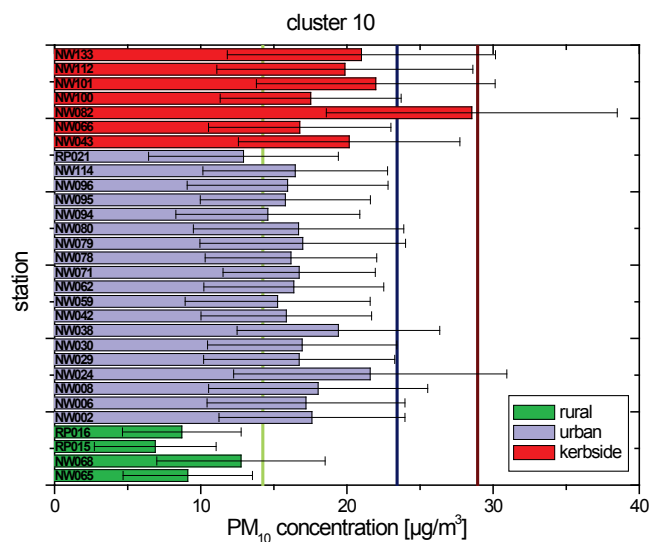
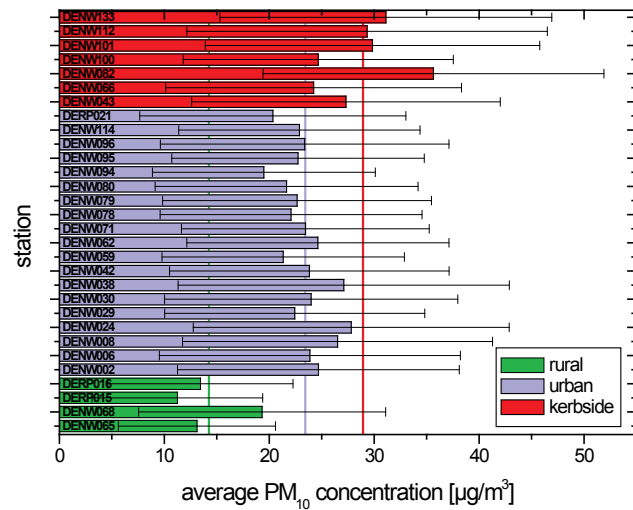


Abb. 17: Oben: PM_{10} -Mittelwerte für alle Stationen der Region D einzeln mit Standardabweichung. (Liste der Stationen siehe Anhang A), sowie im Speziellen für die beiden Trajektoriencluster D12 (Westanströmung) und D4 (winterliche Hochdruckwetterlage).

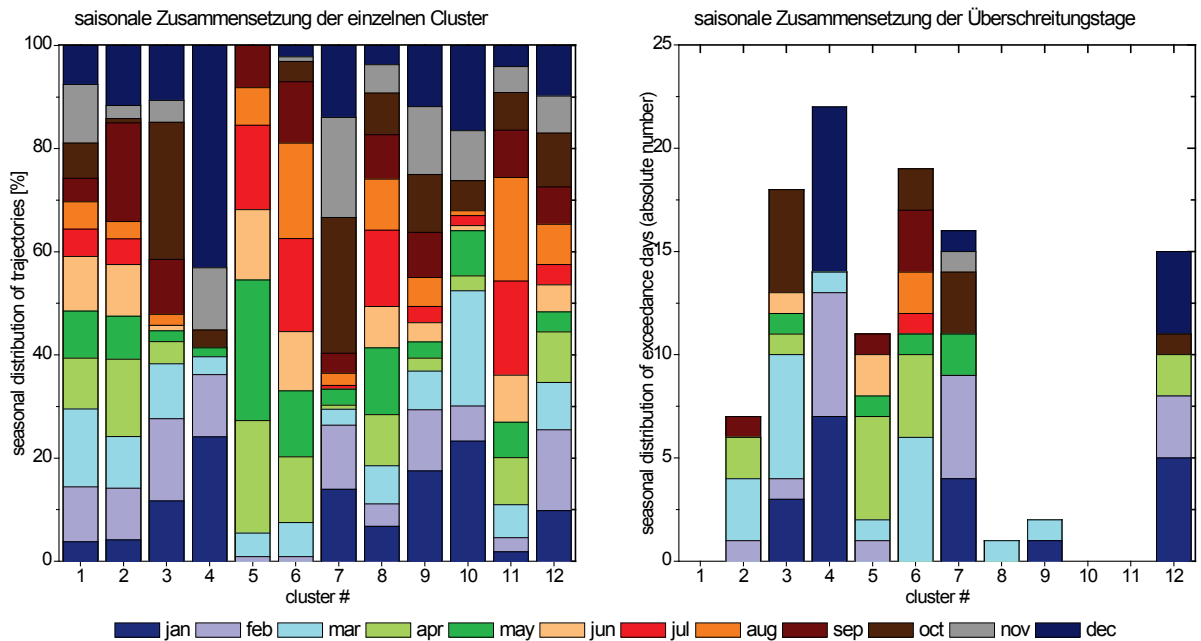


Abb. 18: Trajektoriencluster in monatlicher Auflösung. Links: relative Häufigkeit der Cluster. Rechts: Absolute Zahl von PM₁₀-Tageswerten > 50 µg/m³, gemittelt über alle Verkehrsstationen, 2005-2009 in Region D.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	Häuf. (d)	Rel. Häuf.	ÜS-Er.	ÜS-Wahrsch.	Anteil Ges-ÜS	ÜS-Er./Jahr	Kumulativ
D4	Wi	D (stagn.)	58	3%	22	38%	20%	4.5	4.5
D6	So	Benelux	227	14%	19	8%	17%	3.9	8.3
D3	Wi/He	D/Polen	94	6%	18	19%	16%	3.7	12.0
D7	Wi/He	Frankreich (Süd)	129	8%	16	12%	14%	3.3	15.3
D12	-	Atlantik (Antiz.)	153	9%	15	10%	14%	3.1	18.3
D5	So	D/Polen	110	7%	11	10%	10%	2.2	20.6
D2	-	Ostsee	120	7%	7	6%	6%	1.4	22.0
D9	-	Atlantik (Mittel)	160	10%	2	1%	2%	0.4	22.4
D8	So	Atlantik (Süd)	162	10%	1	1%	1%	0.2	22.6
D11	Fr/Wi	Atlantik (UK)	219	13%	0	0%	0%	0.0	22.6
D1	-	Atlantik (Nord)	132	8%	0	0%	0%	0.0	22.6
D10	-	Atlantik (fern)	103	6%	0	0%	0%	0.0	22.6
GESAMT			1667	100%	111	7%	100%	22.6	

Tabelle 7: Beiträge verschiedener Wetterlagen zu den Überschreitungen eines PM₁₀-Tagesmittelwertes von 50 µg/m³, gemittelt über alle verkehrsnahen Messstationen, 2005-2009 in Region D. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungen geordnet. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit (0-100 %) gibt den Anteil der Grenzwertüberschreitungen an der tatsächlichen Häufigkeit einer Wetterlage an. Die kumulative Spalte summiert die Überschreitungseignisse zeilenweise und normiert auf 1 Jahr auf.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	ÜS-Er.	2005	2006	2007	2008	2009
D4	Wi	D (stagn.)	22	0	7	5	6	4
D6	So	Benelux	19	5	3	7	1	3
D3	Wi/He	D/Polen	18	3	4	6	1	4
D7	Wi/He	Frankreich (Süd)	16	3	3	2	6	2
D12	-	Atlantik (Antiz.)	15	4	4	4	1	2
D5	So	D/Polen	11	1	1	4	0	5
D2	-	Ostsee	7	3	1	3	0	0
D9	-	Atlantik (Mittel)	2	2	0	0	0	0
D8	So	Atlantik (Süd)	1	0	0	1	0	0
D11	Fr/Wi	Atlantik (UK)	0	0	0	0	0	0
D1	-	Atlantik (Nord)	0	0	0	0	0	0
D10	-	Atlantik (fern)	0	0	0	0	0	0
GESAMT			111	21	23	32	15	20

Tabelle 8: Aufschlüsselung der Überschreitungen an verkehrsnahen Messstationen in Region D nach Einzeljahren. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungseignisse insgesamt geordnet.

3.5. Region E (Mittelrheinebene Karlsruhe bis Frankfurt)

Die Anwendung des Trajektorienclusteralgorithmus für die Region E erfolgte analog zu den Regionen A-D (vgl. Anmerkungen in Kapitel 3.2). Die Abbildungen 19-22 liefern dabei die für Region E relevanten Ergebnisse.

Für Region E sind durch die räumliche Entfernung zu den Regionen A, B und C und auch D leicht abgewandelte meteorologische Verhältnisse erkennbar. Es gibt eine winterlich-herbstliche Nordostwetterlage (E2), eine sommerliche Ostwetterlage (E5) und zwei winterliche Inversionswetterlagen, mit Windtendenz Süd (E5) sowie Nord (E6) (Abb. 19a-b). Wie üblich treten weitere Anströmungen aus allen westlichen und nördlichen Richtungen zahlreich auf (Abb. 19a). Die bei weitem höchsten PM_{10} -Mittelwerte finden sich bei den beiden winterlichen Inversionswetterlagen (E5 und E6) wieder (Abb. 19c). Ansonsten sind die Messwerte fast generell auf einem einheitlich niedrigen Niveau (Abb. 20a-b). Auch in Region E scheint die Höhenlage der ländlichen Hintergrundstationen entscheidend für die winterlichen Messwerte zu sein (Abb. 21, unteres Bild). Grenzwertüberschreitungen an den Verkehrsstationen konzentrieren sich fast ausschließlich auf die Monate Dezember bis Februar (Abb. 22).

Die Tabellen 9 und 10 machen die relativ seltenen Überschreitungshäufigkeiten des Tagesmittelwertes an den Verkehrsstationen in Region E deutlich (17,7 pro Jahr). In keinem der Jahre 2005-2009 wurde in Region E für die von uns räumlich gemittelten, synthetischen PM_{10} -Werte die maximal erlaubte Zahl der Überschreitungen (35) in Anspruch genommen (Tabelle 10). Die Überschreitungseignisse konzentrieren sich fast ausschließlich auf die beiden winterlichen Inversionswetterlagen (E5 und E6), eine ganzjährig vertretene Stagnationswetterlage (E4) und eine antizyklonale Winterwetterlage mit Transport aus Richtung England, Benelux und NRW (E1) (Tabelle 9).

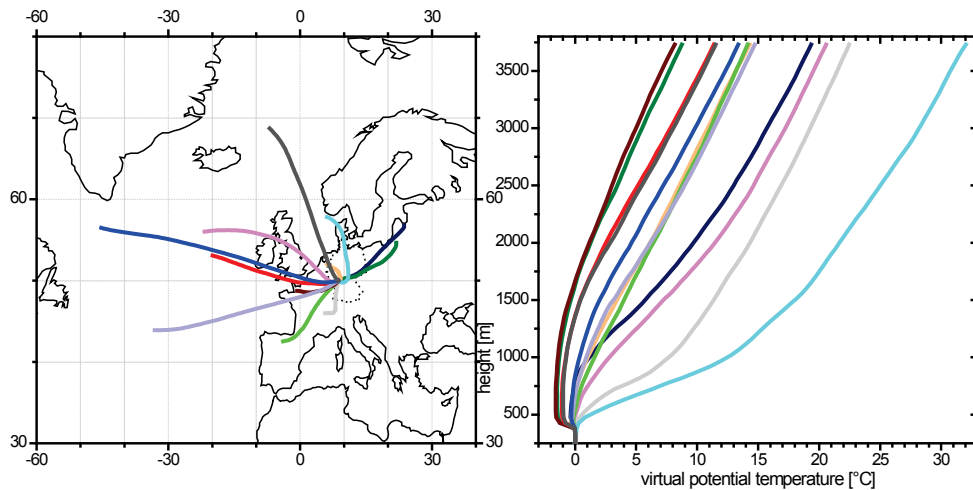


Abb. 19a: Mittlere Rückwärtstrajektorien und Profile der pseudopotentiellen Temperatur der Clusteranalyse für Region E.

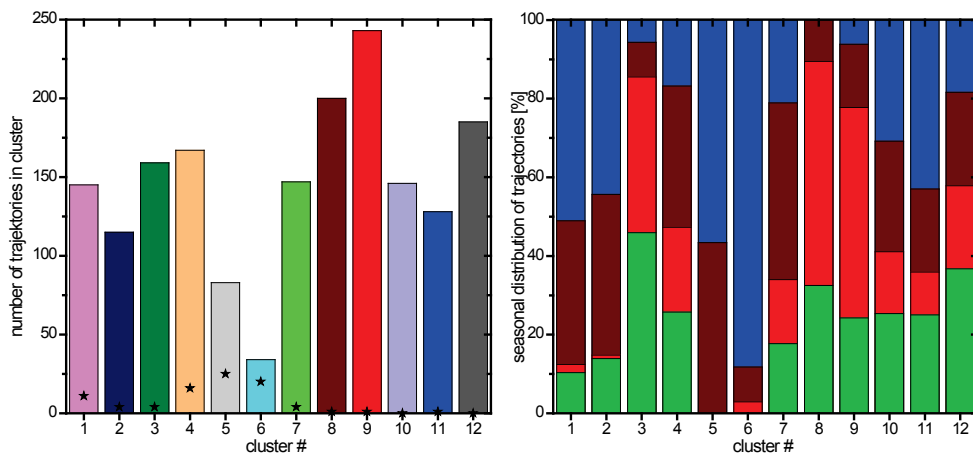


Abb. 19b: Links: Häufigkeit der 12 Trajektoriencluster (Balken) inklusive der Zahl der Tage, an denen der mittlere Messwert an verkehrsnahen Stationen $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschreitet. (*). Rechts: saisonales Auftreten jedes Clusters (grün: Frühjahr, rot: Sommer, braun: Herbst, blau: Winter)

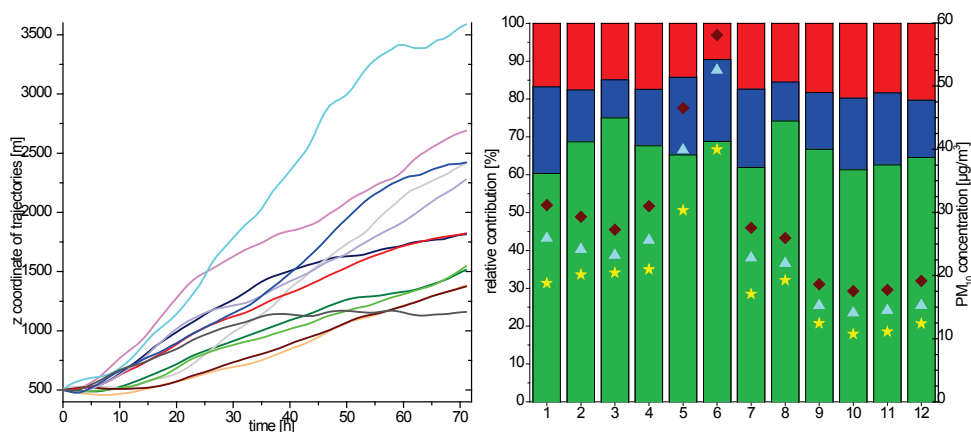


Abb. 19c: Links: Mittlere Vertikaltendenz der Rückwärtstrajektorien. Rechts: relative Anteile von ländlichem Hintergrund (grün), städtischem Inkrement (blau) und verkehrsnahem Inkrement (rot); gepunktet auf rechter y-Achse: Absolutwerte.

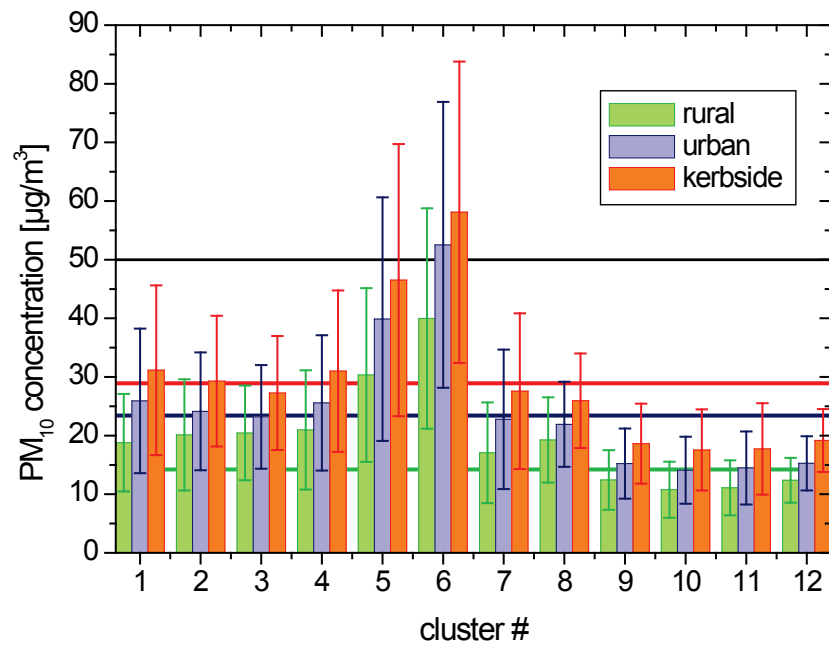


Abb. 20a: PM_{10} -Konzentrationsmittelwerte für Region E, getrennt nach ländlichen (4), städtischen (13) und verkehrsnahen (10) Stationen. Fehlerbalken geben 1 Standardabw. des Ensembles an.

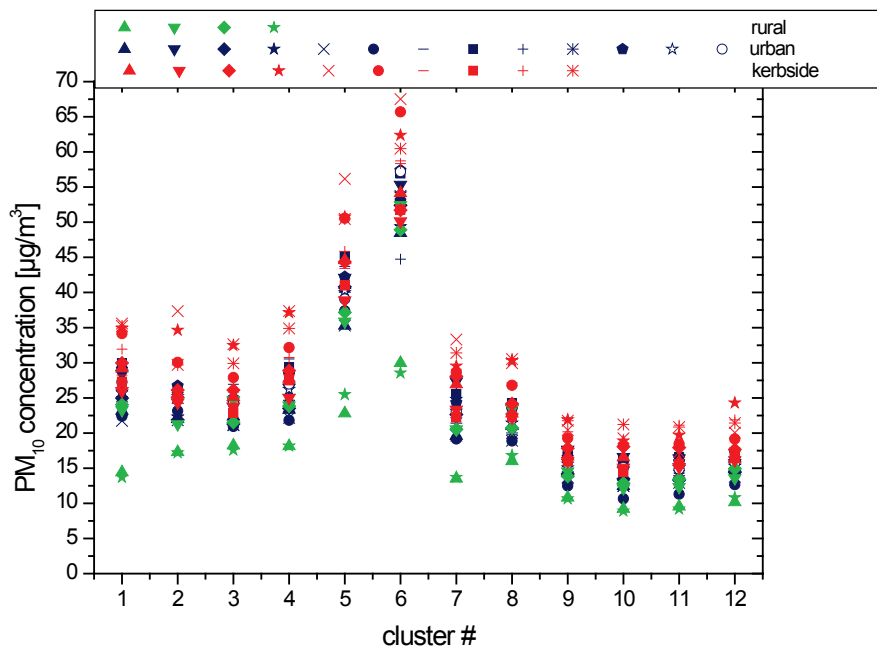
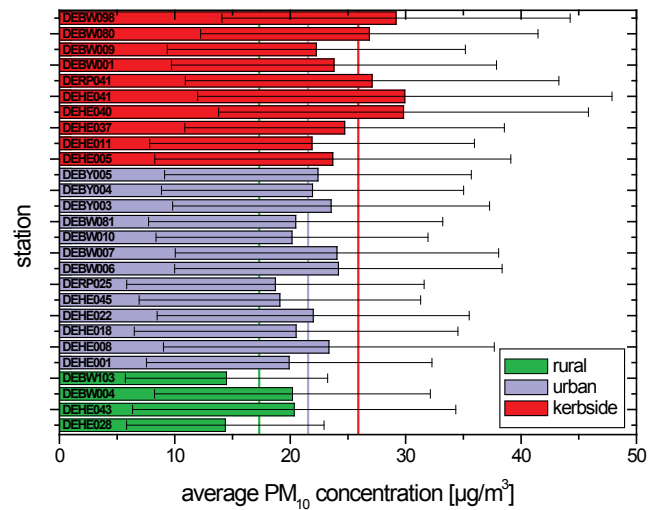
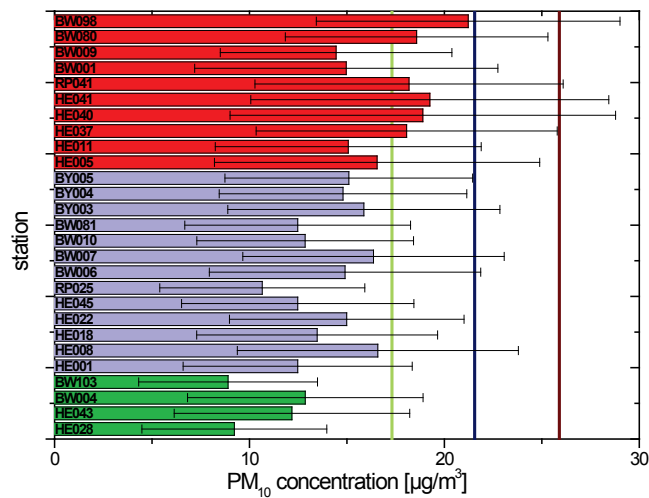


Abb. 20b: Wie Abb. 20a, jedoch mit PM_{10} -Konzentrationsmittelwerten für jede Station (Liste siehe Anhang A) einzeln.



cluster 10



cluster 6

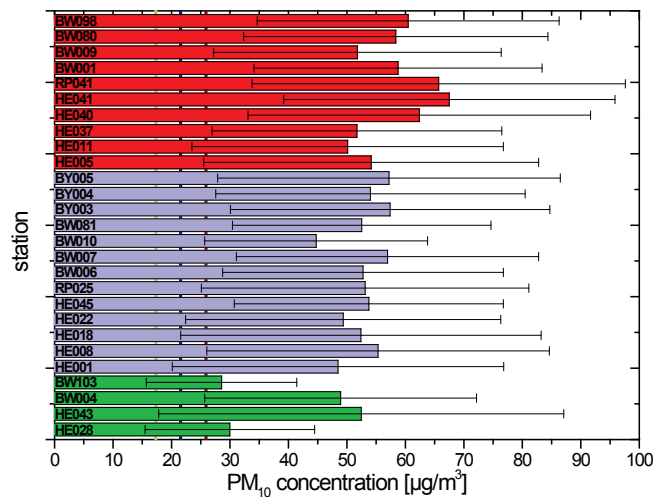


Abb. 21: Oben: PM_{10} -Mittelwerte für alle Stationen der Region E einzeln mit Standardabweichung. (Liste der Stationen siehe Anhang A), sowie im Speziellen für die beiden Trajektoriencluster E10 (Westanströmung) und E6 (winterliche Hochdruckwetterlage).

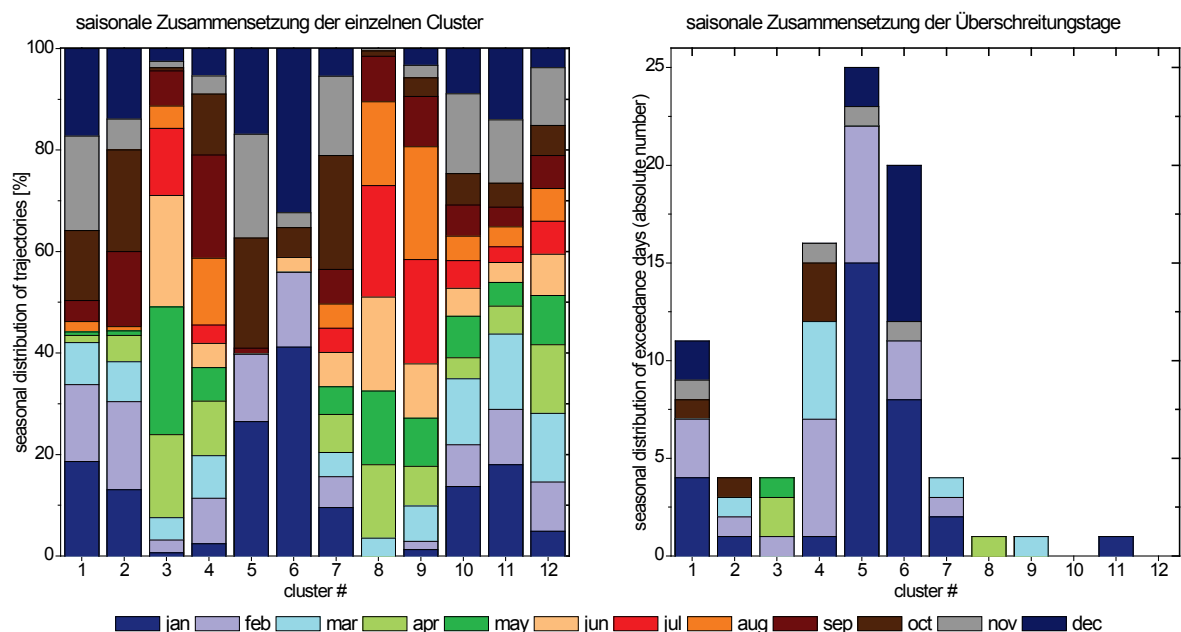


Abb. 22: Trajektoriencluster in monatlicher Auflösung. Links: relative Häufigkeit der Cluster. Rechts: Absolute Zahl von PM_{10} -Tageswerten $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über alle Verkehrsstationen, 2005-2009 in Region E.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	Häuf. (d)	Rel. Häuf.	ÜS-Er.	ÜS-Wahrsch.	Anteil Ges-ÜS	ÜS-Er./Jahr	Kumulativ
E5	Wi/He	D (Süd)	83	4.74%	25	30%	29%	5.1	5.1
E6	Wi	Dänemark	34	1.94%	20	59%	23%	4.1	9.2
E4	-	D (Nord)	167	9.53%	16	10%	18%	3.3	12.4
E1	Wi/He	Atlantik (UK)	145	8.28%	11	8%	13%	2.2	14.7
E2	Wi/He	Baltikum	115	6.56%	4	3%	5%	0.8	15.5
E3	Frü/So	Polen (Nord)	159	9.08%	4	3%	5%	0.8	16.3
E7	Wi/He	Frankreich (Süd)	147	8.39%	4	3%	5%	0.8	17.1
E8	So	Benelux	200	11.42%	1	1%	1%	0.2	17.3
E9	So	Atlantik (Mitte)	243	13.87%	1	0%	1%	0.2	17.5
E11	Wi/He	Atlantik (Mitte)	128	7.31%	1	1%	1%	0.2	17.7
E10	Wi/He	Atlantik (Süd)	146	8.33%	0	0%	0%	0.0	17.7
E12	-	Atlantik (Nord)	185	10.56%	0	0%	0%	0.0	17.7
GESAMT			1752	100%	87	5%	100%	17.7	

Tabelle 9: Beiträge verschiedener Wetterlagen zu den Überschreitungen eines PM_{10} -Tagesmittelwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, gemittelt über alle verkehrsnahen Messstationen, 2005-2009 in Region E. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungen geordnet. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit (0-100 %) gibt den Anteil der Grenzwertüberschreitungen an der tatsächlichen Häufigkeit einer Wetterlage an. Die kumulative Spalte summiert die Überschreitungsergebnisse zeilenweise und normiert auf 1 Jahr auf.

Cluster	Jahreszeit	Herkunft	ÜS-Er.	2005	2006	2007	2008	2009
E5	Wi/He	D (Süd)	25	2	10	2	3	8
E6	Wi	Dänemark	20	1	7	6	1	5
E4	-	D (Nord)	16	10	2	3	1	0
E1	Wi/He	Atlantik (UK)	11	1	1	4	3	2
E2	Wi/He	Baltikum	4	3	1	0	0	0
E3	Frü/So	Polen (Nord)	4	2	0	0	1	1
E7	Wi/He	Frankreich (Süd)	4	2	1	0	0	1
E8	So	Benelux	1	0	0	0	0	1
E9	So	Atlantik (Mitte)	1	0	0	1	0	0
E11	Wi/He	Atlantik (Mitte)	1	0	1	0	0	0
E10	Wi/He	Atlantik (Süd)	0	0	0	0	0	0
E12	-	Atlantik (Nord)	0	0	0	0	0	0
GESAMT			87	21	23	16	9	18

Tabelle 10: Aufschlüsselung der Überschreitungen an verkehrsnahen Messstationen in Region E nach Einzeljahren. Die Wetterlagen sind in absteigender Reihenfolge der Überschreitungsergebnisse insgesamt geordnet.

4. Regionaler Vergleich der Regionen A-E

Generell kann man feststellen, dass die Problematik der Grenzwertüberschreitungen des Tagesmittelwertes in den westlichen Regionen Deutschlands (D und E) weniger ausgeprägt ist als in den östlichen Regionen (A, B und C). Dies ersieht man direkt aus den 2005-2009 auftretenden Überschreitungsergebnisse – definiert auf Basis der über alle Verkehrsstationen gemittelten Tagesmittelwerte ab: 87 (Region E) und 111 (Region D) gegenüber 208 (Region A), 178 (Region B) und 137 (Region C).

In den westlichen Regionen D und E führen vor allem schwachwindige Winterwetterlagen zu hohen PM₁₀-Werten. Eine bemerkenswerte Ausnahme ist die Sommersmogwetterlage D6 in Region D (Nordrhein-Westfalen). In Region D ist auch am ehesten erkennbar, dass regionale Quellen zu hohen PM-Werten führen.

In den Regionen A, B und C hingegen tritt zu diesen Mechanismen der Feinstaubeintrag aus Quellgebieten in östlicher Richtung hinzu. Grenzwertüberschreitungen sind in den Regionen A-C bei östlicher Luftströmung am wahrscheinlichsten. Diese können am ehesten im Winter, aber auch im Frühjahr und Herbst auftreten. Hinzu kommt die in allen Regionen A-C vorkommende stagnierende Winterwetterlage (Hochdruckeinfluss), bei der ein wesentlicher Beitrag örtlicher und regionaler Quellen nicht ausgeschlossen werden kann.

Generell machen die als grenzüberschreitend definierbaren Wetterlagen nur ca. 2/3 der Grenzwertüberschreitungen der Tagesmittelwerte an den Verkehrsstationen in Region A, B und C aus. Die Verletzung der EU-Richtlinie (mehr als 35 ÜS/Jahr) ist nicht ohne die Beteiligung regionaler bzw. lokaler Quellen erklärbar.

5. Besonderheiten des Januar/Februar 2010

Im Januar und Februar 2010 traten flächendeckend und über längere Zeit PM_{10} -Tagesmittelwerte oberhalb von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf (siehe Beispiel in Abb. 23). Die meteorologischen Begleitumstände - extrem niedrige Temperaturen, eine starke Temperaturinversion mit Schwachwind am Boden - sind typisch für ähnliche Episoden früherer Jahre gewesen (z.B. 2006). Leider kann derzeit noch nicht auf die Clusteranalyse für Region A und das Jahr 2010 zurückgegriffen werden, so dass an dieser Stelle die bisherige Wetterklassifizierung leicht geändert wird. Stattdessen zeigen wir gleichwertige Ergebnisse aus einer Clusteranalyse mit Laufdauer 1/2005-5/2010 unter Benutzung von 9, über ganz Deutschland verteilten Trajektorienstartpunkten. Bei der Analyse zeigte sich deutlich die Bedeutung der Wetterlagen CS-A2 (winterliche Ostwetterlage) und CS-ST (winterliche Stagnationswetterlage), welche weitgehend den Trajektorienclustern A4 und A6 aus Kapitel 3 entsprechen, für die hohen Messwerte. Vom 21. bis 27.1.2010 herrschten durchgängig diese beiden Wetterlagen. Auch für die beiden PM_{10} -Maxima um den 12.1.2010 und vom 7.-12.2.2010 war die Wetterlage CS-A2 verantwortlich. In diesen zwei Monaten spielt zweifelsfrei die winterliche Ostanströmung die Hauptrolle für die extrem hohen PM_{10} -Werte. Die Wetterlage CS-A2 trat in beiden Monaten insgesamt an 13 Tagen, CS-ST an vier Tagen auf.

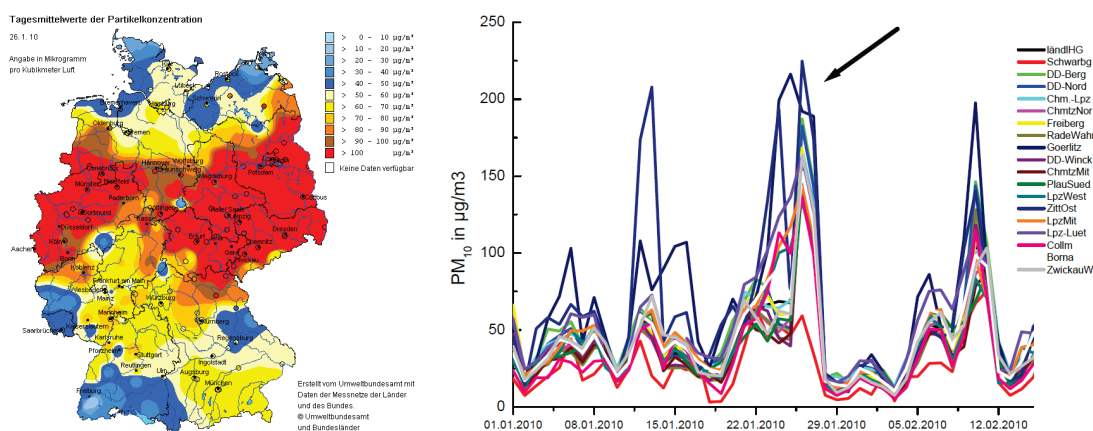


Abb. 23: Links: Exemplanische hohe PM_{10} -Konzentrationen in Deutschland am 26.1.2010. Rechts: Tagesmittelwerte der PM_{10} -Konzentration an Messstationen in Sachsen. Die Hauptepisode um den 27.1.2010, die aus Wetterlagen vom Typ CS-AS und CS-ST (entsprechend A4 und A6 in Kapitel 3) gebildet wird, ist durch einen Pfeil markiert.

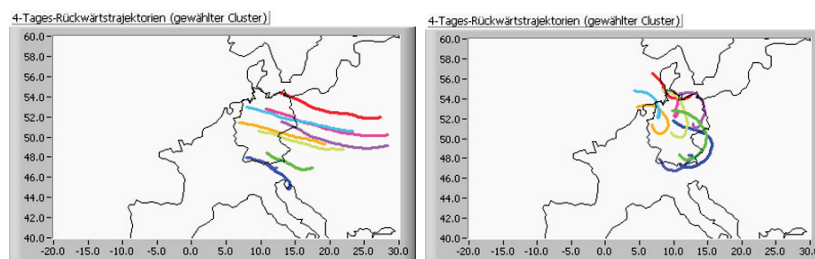


Abb. 24: Anströmung bei den Wetterlagen CS-A2 (links) und CS-ST (rechts).

	CS-ST		CS-A2		CS-C3	
	Stagnierend (Winter)		Polen (Winter)		Südfrankreich (Winter)	
	Häuf.	> 50 µg/m ³	Häuf.	> 50 µg/m ³	Häuf.	> 50 µg/m ³
Dez 2005-Feb 2006	19	10	8	NN	3	1
Dez 2006-Feb 2007	6	0	0	0	14	3
Dez 2007-Feb 2008	9	4	2	0	10	0
Dez 2008-Feb 2009	11	4	12	5	10	2
Dez 2009-Feb 2010	4	4	14	11	15	6

Tabelle 11: Hat die Klimatologie der Wetterlagen einen Einfluss auf die Anzahl der Überschreitungstage an einer ländlichen Hintergrundstation? Eine Analyse der fünf aufeinanderfolgenden Winter (2005/06-2009/10) zeigt, dass die kritischen Wetterlagen CS-ST (winterliche Stagnationswetterlage) und CS-A2 (winterliche Ostwetterlage) in den Wintern 2005/06, 2008/09 und 2009/10 häufiger auftraten, analog auch die PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen an der ländlichen Hintergrundstation Hasenholz (DEBB066).

Tabelle 11 zeigt eine Häufigkeitsanalyse der kritischen Wetterlagen CS-ST (winterliche Stagnationswetterlage) und CS-A2 (winterliche Ostwetterlage) für die fünf aufeinanderfolgenden Winter 2005/06-2009/10. Während der beiden milden Winter 2006/07 und 2007/08 traten die Wetterlagen CS-ST und CS-A2 nur relativ selten auf (insgesamt 6 und 11 mal), während der anderen Winter (inklusive 2009/10) wesentlich häufiger (27, 23 und 18 mal). Während der beiden milden Winter traten auch entsprechend weniger Überschreitungstage auf.

Wir gelangen zur eindeutigen Schlussfolgerung, dass die Häufigkeit der Überschreitungen des Tagesmittelwertes in einem einzelnen Winter wesentlich durch das Auftreten der stagnierenden Winterwetterlage bzw. der östlichen Winterwetterlage gesteuert ist.

Zusammenfassung

Die Studie untersucht die Ursachen von PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen anhand der PM₁₀-Tagesmittelwerte an deutschen Luftgütemessstationen, betrachtet wurde dabei der Zeitraum 2005-2009, sowie das Frühjahr 2010. Zur objektiven Klassifizierung der Witterungseinflüsse wurden zum einen numerisch berechnete Rückwärtstrajektorien (Laufdauer 4 Tage), zum anderen Indikatoren der atmosphärischen Stabilität aus experimentellen Radiosondendaten (pseudopotentielle Temperatur) verwendet. In der Summe ermöglichen Rückwärtstrajektorien und Radiosondenprofile eine objektive Bewertung der Herkunft und des Zustandes der an einem Messort ankommenden Luftmasse. Diese Clusteranalyse ermöglicht somit die Zuordnung der PM₁₀-Messdaten auf zwölf verschiedene Trajektoriencluster (Wetterlagen). Die kombinierte Betrachtung von Stationen im ländlichen und städtischen Hintergrund sowie verkehrsnaher Stationen innerhalb einer Region erlaubt eine Abschätzung der überregionalen, der städtischen sowie der verkehrsnahen Quellbeiträge auf die beobachteten PM₁₀-Niveaus.

Untersucht wurden fünf Regionen Deutschlands: A) Ostbrandenburg und Ostsachsen, B) Berlin mit Umland, C) Mitteldeutschland, D) Westliches Nordrhein-Westfalen und E) Mittelrheinebene zwischen Karlsruhe und Frankfurt/M:

Insgesamt traten in Region A von 2005 bis 2009 an 208 Tagen Überschreitungsfälle an städtisch verkehrsnahen Stationen auf, also etwa 42/Jahr. Die meisten Überschreitungsfälle traten während der Wetterlage *winterliche Ostanströmung* (9,6/Jahr), *stagnierende Hochdruckwetterlage* (6,5/Jahr), *winterliche Südwestanströmung* (6,1/Jahr) und *sommerliche Ostanströmung* (5,9/Jahr) auf. Kumulativ machen östliche und stagnierende Anströmungen 22 Überschreitungen/Jahr aus, unter Hinzunahme der kontinental geprägten Südwestanströmung 28 Überschreitungen/Jahr. Es stellte sich heraus, dass die PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen an den verkehrsnahen Messstationen in Region A nur begrenzt durch die großräumige Wetterphänomenologie erklärbar sind. Das systematische Auftreten eines städtischen und verkehrsnahen Inkrements legt auf jeden Fall nahe, dass viele PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen ihre Ursache in den örtlichen Emissionsquellen haben. Im Mittel fanden sich an den Verkehrsstationen der Region B pro Jahr 36,2 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von 50 µg/m³. Hiervon sind im Mittel ca. 26 den östlichen Anströmungen bzw. der stagnierenden Wetterlage zuzuordnen. Ein wesentlicher Anteil der Überschreitungseignisse resultiert aus anderen Anströmungen, insbesondere Südwesten und Westen. Im Mittel fanden sich an den Verkehrsstationen der Region C pro Jahr 27,9 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von 50 µg/m³. Hiervon sind im Mittel ca. 20 den östlichen Anströmungen bzw. der stagnierenden Wetterlage zuzuordnen. Ein wesentlicher Anteil der Überschreitungseignisse findet unter anderen Anströmungen statt, insbesondere Südwesten und Westen.

Im Mittel fanden sich an den Verkehrsstationen der Region D pro Jahr 22,6 Überschreitungen des Tagesmittelwertes von 50 µg/m³, dies ist wesentlich weniger als in den Regionen A, B und C. Der wesentliche Teil der Überschreitungseignisse fand unter

stagnierenden winterlichen Bedingungen statt, der Rest verteilt sich auf eine Vielzahl von Wetterlagen in allen Jahreszeiten und bei verschiedenen Anströmungen. Für Region D kann man keine Vorzugswindrichtung für verschmutzte Luftmassen erkennen; insofern kommen wir zum Schluss, dass in Nordrhein-Westfalen lokale und regionale PM₁₀-Quellen die höchste Bedeutung für die Erklärung der lokalen Messwerte besitzen. In Region E traten im Vergleich Überschreitungen des Tagesmittelwertes an den Verkehrsstationen seltener auf (17,7 pro Jahr). Die Überschreitungseignisse konzentrieren sich fast ausschließlich auf zwei winterliche Inversionswetterlagen, eine ganzjährig vertretene Stagnationswetterlage und eine antizyklonale Winterwetterlage mit Transport aus Richtung England, Benelux und NRW. Generell kann man feststellen, dass die Problematik der Grenzwertüberschreitungen des Tagesmittelwertes in den westlichen Regionen Deutschlands (D und E) weniger ausgeprägt ist als in den östlichen Regionen (A, B und C). In den westlichen Regionen D und E führen vor allem schwachwindige Winterwetterlagen zu hohen PM₁₀-Werten. Eine bemerkenswerte Ausnahme ist die Sommersmogwetterlage in Region D (Nordrhein-Westfalen). In Region D ist auch am ehesten erkennbar, dass regionale Quellen zu hohen PM-Werten führen. In den Regionen A, B und C hingegen tritt zu diesen Mechanismen der Feinstaubeintrag aus Quellgebieten in östlicher Richtung hinzu. Grenzwertüberschreitungen sind in den Regionen A-C bei östlicher Luftströmung am wahrscheinlichsten. Diese können am ehesten im Winter, aber auch im Frühjahr und Herbst auftreten. Hinzu kommt die in allen Regionen A-C vorkommende stagnierende Winterwetterlage (Hochdruckeinfluss), bei der ein wesentlicher Beitrag örtlicher und regionaler Quellen nicht ausgeschlossen werden kann. Generell machen die als grenzüberschreitend definierbaren Wetterlagen nur ca. 2/3 der Grenzwertüberschreitungen der Tagesmittelwerte an den Verkehrsstationen in Region A, B und C aus. Die Verletzung der EU-Richtlinie (mehr als 35 Überschreitungen/Jahr) ist nicht ohne die Beteiligung regionaler bzw. lokaler Quellen erklärbar.

Die meteorologischen Begleitumstände im Januar/Februar 2010 waren durch extrem niedrige Temperaturen und starke Temperaturinversion mit Schwachwind am Boden gekennzeichnet. Bei der Analyse zeigte sich deutlich die Bedeutung der Wetterlagen winterliche Ostwetterlage und winterliche Stagnationswetterlage für die hohen Messwerte. Vom 21. bis 27.1.2010 herrschten durchgängig diese beiden Wetterlagen. Auch für die beiden PM₁₀-Maxima um den 12.1.2010 und vom 7.-12.2.2010 war die Wetterlage winterliche Ostwetterlage verantwortlich. In diesen zwei Monaten spielt zweifelsfrei die winterliche Ostanströmung die Hauptrolle für die extrem hohen PM₁₀-Werte. Die Wetterlage winterliche Ostwetterlage und winterliche Stagnationswetterlage traten in beiden Monaten insgesamt an 17 Tagen auf. Während der beiden milden Winter 2006/07 und 2007/08 traten diese Wetterlagen nur relativ selten auf (6 und 11 mal), während der anderen Winter (inklusive 2009/10) wesentlich häufiger (27, 23 und 18 mal). Während der beiden milden Winter traten entsprechend weniger Überschreitungstage auf.

Literatur

- Birmili, W., Heinke, K., Pitz, M., Matschullat, J., Wiedensohler, A., Cyrys, J., Wichmann, H.-E., and Peters, A. (2010) Particle number size distributions in urban air before and after volatilisation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 4643-4660.
- Engler, C., D. Rose, B. Wehner, A. Wiedensohler, E. Brüggemann, T. Gnauk, G. Spindler, T. Tuch, W. Birmili (2007) Size distributions of non-volatile particle residuals ($D_p < 800$ nm) at a rural site in Germany and relation to air mass origin. *Atmos. Chem. Phys.* 7: 5785-5802.
- Dorling, S.R., Davies, T.D. & Pierce, C.E. (1992) Cluster Analysis: A Technique for Estimating the Synoptic Meteorological Controls on Air and Precipitation Chemistry - Results from Eskdalemuir, S. Scotland. *Atmos. Environ.*, 26A, 2583-2602.
- Heintzenberg, J., Birmili, W., Otto, R., Andreae, M. O., Mayer, J.-C., Chi, X., and Panov, A. (2011) Aerosol particle number size distributions and particulate light absorption at the ZOTTO tall tower (Siberia), 2006–2009, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 1153-1188, doi:10.5194/acpd-11-1153-2011.
- Lenschow, P., H.-J. Abraham, K. Kutzner, M. Lutz, J.-D. Preuß and W. Reichenbacher (2001) Some ideas about the sources of PM₁₀, *Atmos. Environ.*, 35, 23-33.
- UBA (2007) *Ermittlung des nordhemisphärischen Hintergrunds an der GAW-Station Zugspitze unter besonderer Berücksichtigung des Ferntransportes von Feinstäuben*. Abschlussbericht für den Projektzeitraum 12/2004-06/2007. UFOPLAN Projekt FKZ 204 42 202/01 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, bearbeitet durch das Institut für Troposphärenforschung e.V., Leipzig. Autoren: Dr. Wolfram Birmili, Korinna König, André Sonntag, Dr. Ya Fang Cheng, Dr. Thomas Tuch, Prof. Alfred Wiedensohler, 12. Oktober 2007, Ergänzte und erweiterte Version vom August 2008, 132 S.

Anhang A: Übersicht der behandelten Regionalstudien A, B, C, D und E

Region	Stationscode	Stationsname	Kategorie	Lage
A Ost- Brandenburg/ Sachsen	BEBB066	Spreewald	Hintergrund	ländlich
	DEBB042	Frankfurt (Oder)	Hintergrund	urban
	DEBB064	Cottbus	Hintergrund	urban
	DESN004	Bautzen	Hintergrund	urban
	DESN045	Zittau	Hintergrund	urban
	DESN050	Hoyerswerda	Hintergrund	urban
	DEBB044	Cottbus, Bahnhofstr.	Verkehr	urban
	DEBB045	Frankfurt (Oder), Leipziger Str.	Verkehr	urban
	DESN020	Görlitz	Verkehr	urban
B Großraum Berlin	DEUB030	Neuglobsow	Hintergrund	ländlich
	DEBB053	Hasenholz	Hintergrund	ländlich
	DEBB065	Lütke (Belzig)	Hintergrund	ländlich
	DEBB066	Spreewald	Hintergrund	ländlich
	DEBE032	B Grunewald	Hintergrund	ländlich (stadtnah)
	DEBE056	B Friedrichshagen	Hintergrund	ländlich (stadtnah)
	DEBB021	Potsdam Zentrum	Hintergrund	urban
	DEBB048	Neuruppin	Hintergrund	urban
	DEBB055	Brandenburg (Havel)	Hintergrund	urban
	DEBB067	Nauen	Hintergrund	urban
	DEBE010	B Wedding	Hintergrund	urban
	DEBE018	B Schöneberg	Hintergrund	urban
	DEBE034	B Neukölln (Nansenstr.)	Hintergrund	urban
	DEBE051	B Buch	Hintergrund	urban
	DEBE068	B Brückenstr.	Hintergrund	urban
	DEBB049	Brandenburg Neuendorfer Str.	Verkehr	urban
	DEBB054	Potsdam Zeppelinstr.	Verkehr	urban

	DEBE061	B Steglitz	Verkehr	urban
	DEBE063	B Neukölln (Silbersteinstr.)	Verkehr	urban
	DEBE064	B Neukölln (Karl-Marx-Str.)	Verkehr	urban
	DEBE065	B Friedrichshain	Verkehr	urban
	DEBE067	B Hardenbergplatz	Verkehr	urban
C Mittel- deutschland	DETH061	Hummelshain	Hintergrund	ländlich
	DESN049	Carlsfeld	Hintergrund	ländlich
	DESN051	Radebeul-Wahnsdorf	Hintergrund	ländlich
	DESN076	Collmberg	Hintergrund	ländlich
	DEST028	Zeitz	Hintergrund	urban
	DEST072	Halle Ost	Hintergrund	urban
	DETH005	Saalfeld	Hintergrund	urban
	DETH009	Gera Fridericistr.	Hintergrund	urban
	DETH036	Greiz Mollbergstr.	Hintergrund	urban
	DETH041	Jena Dammstr.	Hintergrund	urban
	DESN011	Chemnitz Mitte	Hintergrund	urban
	DESN012	Delitzsch	Hintergrund	urban
	DESN017	Freiberg	Hintergrund	urban
	DESN019	Glauchau	Hintergrund	urban
	DESN024	Klingenthal	Hintergrund	urban
	DESN059	Leipzig West	Hintergrund	urban
	DEST075	Halle Merseburger Str.	Verkehr	urban
	DEST081	Weißenfels	Verkehr	urban
	DETH011	Altenburg	Verkehr	urban
	DESN006	Borna	Verkehr	urban
	DESN025	Leipzig Mitte	Verkehr	urban
	DESN060	Chemnitz Nord	Verkehr	urban
	DESN061	Dresden Nord	Verkehr	urban
	DESN075	Plauen	Verkehr	urban
	DESN077	Leipzig Lützner Str.	Verkehr	urban
	DESN083	Chemnitz Leipziger Str.	Verkehr	urban

	DESN084	Dresden Bergstr.	Verkehr	urban
D NRW	DENW068	Soest Ost	Hintergrund	ländlich (stadtnah)
	DERP015	Westeifel	Hintergrund	ländlich
	DERP016	Westerwald	Hintergrund	ländlich
	DENW002	Datteln	Hintergrund	urban
	DENW006	Lünen	Hintergrund	urban
	DENW008	Dortmund Eving	Hintergrund	urban
	DENW024	Essen Vogelheim	Hintergrund	urban
	DENW029	Hattingen	Hintergrund	urban
	DENW030	Wesel	Hintergrund	urban
	DENW038	Mülheim-Styrum	Hintergrund	urban
	DENW042	Krefeld	Hintergrund	urban
	DENW059	Köln Rodenkirchen	Hintergrund	urban
	DENW062	Bonn Auerberg	Hintergrund	urban
	DENW071	Düsseldorf Lörick	Hintergrund	urban
	DENW078	Ratingen	Hintergrund	urban
	DENW079	Leverkusen	Hintergrund	urban
	DENW080	Solingen	Hintergrund	urban
	DENW094	Aachen	Hintergrund	urban
	DENW095	Münster	Hintergrund	urban
	DENW096	Mönchengladbach Rheydt	Hintergrund	urban
	DENW114	Wuppertal	Hintergrund	urban
	DERP021	Neuwied	Hintergrund	urban
	DENW043	Essen Ost	Verkehr	urban
	DENW066	Nettetal	Verkehr	ländlich (stadtnah)
	DENW082	Düsseldorf Corneliusstr.	Verkehr	urban
	DENW100	Mönchengladbach Düsseldorf Str.	Verkehr	urban
	DENW101	Dortmund Steinstr.	Verkehr	urban
	DENW112	Duisburg Kardinal-Galen-Str.	Verkehr	urban

	DENW133	Hagen	Verkehr	urban
E Rhein-Main- Gebiet	DEHE028	Fürth Odenwald	Hintergrund	ländlich
	DEHE043	Riedstadt	Hintergrund	ländlich (stadtnah)
	DEBW004	Eggenstein	Hintergrund	ländlich (stadtnah)
	DEBW103	Odenwald	Hintergrund	ländlich
	DEHE001	Darmstadt	Hintergrund	urban
	DEHE008	Frankfurt Ost	Hintergrund	urban
	DEHE018	Raunheim	Hintergrund	urban
	DEHE022	Wiesbaden Süd	Hintergrund	urban
	DEHE045	Michelstadt	Hintergrund	urban
	DERP025	Wörth	Hintergrund	urban
	DEBW006	Mannheim Mitte	Hintergrund	urban
	DEBW007	Mannheim Süd	Hintergrund	urban
	DEBW010	Wiesloch	Hintergrund	urban
	DEBW081	Karlsruhe Nordwest	Hintergrund	urban
	DEBY003	Aschaffenburg Schweinheimer Str.	Hintergrund	urban
	DEBY005	Aschaffenburg Bussardweg	Hintergrund	urban
	DEBY004	Kleinwallstadt	Hintergrund	urban
	DEHE005	Frankfurt Höchst	Verkehr	urban
	DEHE011	Hanau	Verkehr	urban
	DEHE037	Wiesbaden Ringkirche	Verkehr	urban
	DEHE040	Darmstadt Hügelstr.	Verkehr	urban
	DEHE041	Frankfurt Friedb. Landstr.	Verkehr	urban
	DERP041	Ludwigshafen	Verkehr	urban
	DEBW001	Karlsruhe Mitte	Verkehr	urban
	DEBW009	Heidelberg	Verkehr	urban
	DEBW080	Karlsruhe Straße	Verkehr	urban
	DEBW098	Mannheim Straße	Verkehr	urban