



# BESTIMMUNG DES BEITRAGS VON ABRIEBEMISSIONEN VON STRAßENBAHNEN ZUR PM<sub>10</sub>-BELASTUNG AN STRAßEN

Untersuchung der durch Straßenbahnen verursachten  
Beiträge zur PM<sub>10</sub>-Konzentration

Senatsverwaltung  
für Umwelt, Mobilität,  
Verbraucher- und Klimaschutz

**BERLIN**



# IMPRESSUM

## **HERAUSGEBERIN**

Senatsverwaltung  
für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz  
Öffentlichkeitsarbeit  
Am Köllnischen Park 3, 10179 Berlin  
[www.berlin.de/sen/umvk](http://www.berlin.de/sen/umvk)

## **AUSGEFÜHRT DURCH**

UlrichConsulting Max Ulrich e.K.  
Fabrikstraße 10  
04178 Leipzig  
Registriert im Handelsregister am Amtsgericht zu Leipzig unter HRA 18650

## **TITELBILD**

BVG/Lambert

## **DIESER BERICHT SOLLTE SO ZITIERT WERDEN**

M. ULRICH, 2022: Bestimmung des Beitrags von Abriebemissionen von Straßenbahnen zur PM<sub>10</sub>-Belastung an Straßen. Abschlussbericht.  
UlrichConsulting Max Ulrich e.K.  
im Auftrag der Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz, Berlin

## **STAND**

22. März 2022

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
Berichtstruktur .....	6
<b>2 Forschungsansatz und Methodik</b> .....	<b>7</b>
2.1 Straßenbahnen als Emissionsquelle .....	7
2.2 Messstandorte .....	7
2.2.1 BE-117: Berlin, Schildhornstraße.....	8
2.2.2 BE-171: Berlin, Brückenstraße .....	8
2.2.3 BB-049: Brandenburg an der Havel, Neuendorfer Straße.....	9
2.3 Methodische Ansätze .....	9
2.3.1 Probennahme PM <sub>10</sub> .....	9
2.3.2 Chemische und Optische Analytik.....	9
2.3.3 Forensische Abriebprobennahme .....	11
2.3.4 Statistische Rezeptormodellierung .....	11
2.3.5 Stratifizierung und Zuordnung .....	12
2.4 Qualitätssicherung .....	13
2.4.1 Blindwertbestimmung.....	13
2.4.2 Ausschluss .....	13
2.4.3 Ergebnisse Rezeptormodellierung.....	14
<b>3 Meteorologische Verhältnisse und Luftreinheit während der Messperiode</b> .....	<b>15</b>
<b>4 Vorarbeiten</b> .....	<b>21</b>
4.1 Bisherige Studien und Forschungsprojekte .....	21
4.2 SPECIEUROPE.....	23
4.3 Zusammenfassung.....	24
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>25</b>
5.1 Forensische Abriebprobennahme.....	25
5.2 Chemische und optische Filteranalyse.....	32
5.2.1 Eisen (Fe) .....	32
5.2.2 Kalium (K).....	33
5.2.3 Zink (Zn).....	34
5.2.4 Kupfer (Cu).....	35
5.2.5 Blei (Pb).....	36
5.2.6 Strontium (Sr).....	37
5.2.7 Mangan (Mn).....	38
5.2.8 Barium (Ba).....	39
5.2.9 Titan (Ti).....	40
5.2.10 Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	41
5.2.11 Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ).....	42
5.2.12 Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ).....	44
5.2.13 Chlorid (Cl <sup>-</sup> ) .....	45
5.2.14 Natrium (Na <sup>+</sup> ).....	46
5.2.15 Kalzium (Ca <sup>2+</sup> ).....	48
5.2.16 Magnesium (Mg <sup>2+</sup> ) .....	49
5.2.17 Äquivalentes Black-Carbon (eBC).....	50

5.3	Statistische Rezeptformellierung .....	51
5.3.1	Ferntransport - Kohleverbrennung (F1).....	52
5.3.2	Ferntransport - Gealtertes Seesalz (F2).....	54
5.3.3	Hintergrund - Sekundäres Aerosol (F3).....	56
5.3.4	Hintergrund - Müllverbrennung (F4) .....	58
5.3.5	Hintergrund - Dieselölverbrennung (F5) .....	60
5.3.6	Verkehr - Benzinabgase (F6).....	62
5.3.7	Verkehr - Abrieb und aufgewirbelter Staub (F7) .....	64
5.3.8	Verkehr - Dieselabgase (F8) .....	66
5.3.9	Verkehr - Reifenabrieb (F9).....	68
<b>6</b>	<b>Auswertung und Diskussion .....</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>72</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>74</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>79</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>80</b>
<b>Anhang A-</b>	<b>Beschreibung der Anlagen.....</b>	<b>82</b>
A.1	Rohdaten zu PM <sub>10</sub> und NO <sub>2</sub> .....	82
A.2	Meteorologische Datensätze.....	82
A.3	Chemische Analysen .....	82
A.4	eBC-Analyse.....	82
A.5	Straßenbahnprofil.....	83
A.6	Ergebnisse der PMF-Analysen .....	83
A.7	Stratifizierte Daten zu Elementen und Faktoren .....	83
A.8	Ergebnisse von DELTA-SA.....	83

# ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht werden die Ergebnisse der statistischen Modellierung der chemischen Komposition des Anteils von Straßenbahnabrieben an der  $PM_{10}$ -Belastung dargestellt. Dazu wurden Messdaten an einer Luftgütemessstation in Brandenburg an der Havel, mit Straßenbahn vor Ort, mit Daten von Stationen aus dem städtischen und regionalen Hintergrund ohne Straßenbahn verglichen. Mithilfe der chemischen Analyse der Filter von rund 69 Tagen aus dem Zeitraum Ende Oktober 2020 bis Anfang Januar 2021 wird die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe bestimmt. Mittels statistischer Rezeptormodellierung wurden für das gesamte Ensemble an Filtern und ausgewählte meteorologische und verkehrliche Situationen Profile mit charakteristischen chemischen Zusammensetzungen erstellt. Diese wurden mit vorhandenen Profilen aus der Datenbasis der Europäischen Agentur für Umweltschutz sowie eigenen forensischen Profilmessungen an Straßenbahnen verglichen und entsprechend zugeordnet. Ein Profil konnte sowohl den Abrieben von Kfz-Bremsen als auch den Abrieben der Straßenbahn zugeordnet werden. Über die regionale Differenzenbildung der Mittelwerte der Zeitreihen an den drei Untersuchungsstandorten konnte eine Zusatzbelastung von 1,0 Mikrogramm pro Kubikmeter ermittelt werden. Dies entspricht einer Zusatzbelastung von 0,025 Mikrogramm pro Kubikmeter pro individuellem Straßenbahnfahrzeug. Es ist zu beachten, dass aufgrund der Lage der Messstation an einer Kurve und Straßenbahnhaltestelle dort eine Fahrsituation mit häufigem Bremsen - dem größten Beitrag zum Abrieb an Zugfahrzeugen - vorliegt. Die gemessenen Belastungen von 1,0 Mikrogramm pro Kubikmeter stellen also eine obere Abschätzung dar. Damit zeigt das Ergebnis dieser Studie, dass bisherige Emissionsfaktoren für Straßenbahnen, die direkt aus Messkampagnen zu Zügen abgeleitet wurden und zu größeren Zusatzbelastungen in Ausbreitungsrechnungen führen, überarbeitet werden müssen. Die bisherigen Emissionsfaktoren für den Abrieb der Straßenbahnen überschätzen die tatsächlich messbaren Immissionen deutlich.

# 1 EINLEITUNG

In dieser Studie soll die Frage untersucht werden, wie groß der Beitrag der Abriebemissionen der Straßenbahnen ist an der gesamten  $PM_{10}$ -Belastung. Diese Fragestellung wird mittels eines Ansatzes aus der Kombination von statistischen Erhebungen und chemischer Analytik beantwortet. Numerische Modellierung wird ausdrücklich nicht verwendet. Grundlage für die Analyse sind Messdaten von drei Stationen, einer in Brandenburg an der Havel (BB-049) und zwei in Berlin: Schildhornstraße (BE-117) sowie Berlin-Mitte, (BE-171). Die Station BB-049 liegt im Stadtzentrum an einer Straßenbahnhaltestelle, während BE-117 und BE-171 nicht in der Nähe von Straßenbahnen liegen. Nähere Informationen zur Lage als auch Abbildungen können im Internet nachgelesen werden auf den Webseiten des Umweltamtes des Landes Brandenburg und den Seiten des Luftmessnetzes der Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verbraucher- und Klimaschutz (SenUMVK) in Berlin.

Die Station BE-117 liegt an einer viel befahrenen Straße. Die durchschnittliche werktägliche Verkehrsstärke (DTVw) liegt in BE-117 bei 31.900 Kfz, mit 1,4 Prozent Lkw-Anteil (Stand 2019, Geoportal Berlin / Verkehrsmengen DTVw 2019). In der Nähe der Neuendorfer Straße in Brandenburg (BB-049) verläuft die Zanderstraße (B1) mit einem DTV von etwa 30.000 Kfz mit etwa 6,3 Prozent Lkw-Anteil (Hoffmann Leichter Ingenieurgesellschaft, 2017), während die Neuendorfer Straße selbst einen DTV von etwa 10.500 Kfz aufweist (Landesamt für Umwelt, Brandenburg, 2021). Die Messdaten stehen als 24-h Mittelwert der  $PM_{10}$ -Konzentration sowie der jeweils dazugehörigen Filter aus dem aktiven Luftmessverfahren zur Verfügung. Zusätzlich sind eigens forensische Messungen an einer Straßenbahn auf dem Gelände der Brandenburgischen Verkehrsbetriebe (VBB) durchgeführt, um die metallische Zusammensetzung der abriebrelevanten Bauteile zu ermitteln. Die chemische Analyse ermittelt die Konzentrationen von Metallen und Ionen. Die statistische Analyse mittels Positive Matrix Factorization (PMF) wurde durch einfache Stratifikation von Messdaten durch Randbedingungen aus Meteorologie und anthropogener Aktivität ergänzt. Dieser Ansatz wird durchgeführt, da die Emissionen beziehungsweise Beiträge zur Luftverschmutzung durch Straßenbahnen bisher nicht durch systematische Messergebnisse bekannt sind. Ansätze zur Beurteilung von Abrieben durch Straßenbahnen in Gutachten beruhen derzeit auf Skalierungen von Ergebnissen zu Zügen. Da Züge eine höhere Geschwindigkeit aufweisen, der größte Beitrag aus Bremsvorgängen stammt und diese wiederum in quadratisch proportionalen Verhältnis zur Geschwindigkeit stehen, besteht die Vermutung, dass die Emissionsfaktoren aus diesen Messungen möglicherweise die Abriebe aus Straßenbahnen überschätzen.

## Berichtstruktur

In diesem Bericht werden zunächst die Methodik beschrieben und im Anschluss die Meteorologie und Luftmesswerte ausgewertet. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse bisheriger Studien in einer Literaturrecherche erörtert. Im fünften Kapitel werden die forensischen Messungen näher erläutert. In Kapitel 6 befindet sich eine Beschreibung der chemischen und optischen Messungen sowie deren Ergebnisse. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der statistischen Rezeptormodellierung (PMF) präsentiert. In den letzten beiden Abschnitten werden die Ergebnisse zusammengeführt und bewertet.

## 2 FORSCHUNGSANSATZ UND METHODIK

Das Ziel der Studie ist es, den Beitrag der Straßenbahnen zur Belastung der Luft mit  $PM_{10}$  zu ermitteln. Aufgrund des Mangels an Vergleichsstudien ist es besonders wichtig, eine belastbare und an anderen Messorten in vergleichbarer Weise durchführbare Methodik zu verwenden. In dieser Studie wird eine Kombination von Ansätzen verwendet, sodass aus dem Vergleich der Messungen von Standorten mit und ohne Straßenbahn in Verbindung mit zusätzlichen Messungen aus Abstrichen direkt von der Emissionsquelle eine Ableitung des Beitrages der Straßenbahn zum  $PM_{10}$  bestimmt werden kann. Um dies zu ermöglichen, werden die  $PM_{10}$ -Filterproben aus den regulären 24-stündigen Messungen mittels verschiedener Laboranalytik auf ihre Bestandteile hin untersucht. Diese Zusammensetzung wird auch in Abhängigkeit von den meteorologischen Parametern und den anthropogenen Aktivitäten statistisch ausgewertet. Zusätzlich wird eine statistische Rezeptormodellierung durchgeführt, um die Quellen der  $PM_{10}$ -Belastung zuordnen zu können. In den weiteren Abschnitten dieses Kapitels sind die methodischen Grundlagen dieser Studie näher beschrieben.

Grund für diese Studie ist die Vermutung, dass in Luftschadstoffgutachten verwendete Emissionsfaktoren für Straßenbahnen zu hoch angesetzt sind, da sie aus Messungen zu bedeutend schwereren, längeren und schnelleren Schienenfahrzeugen abgeleitet wurden (Asfinag und AG, 2015). Der Zeitraum, aus dem Messungen analysiert werden, erstreckt sich vom 28. Oktober 2020 bis zum 04. Januar 2021.

### 2.1 Straßenbahnen als Emissionsquelle

Straßenbahnen im Strombetrieb emittieren keine Partikel durch Verbrennung, jedoch werden durch mechanischen Abrieb der Bauteile sowie Verwirbelungen Partikel freigesetzt. Dies geschieht hauptsächlich an den Bremsen, den Schienen, den Radreifen und dem Stromabnehmer (Burkhardt u. a., 2005). In Studien zu Abrieben von Zügen ist bekannt geworden, dass die Bremsen mit Abstand die stärksten Emittenten sind (Burkhardt u. a., 2005). Dieser direkte Materialabrieb führt somit in der Hauptsache metallische Partikel in die Luft ein, da die entsprechenden Bauteile aus Metallen hergestellt sind (Abbasi u. a., 2013). Zusätzlich zu den direkten Emissionen aus dem Abrieb sind auch durch die Aufwirbelung von Stäuben im Gleisbett und der direkten Umgebung der Straßenbahn Beiträge zum  $PM_{10}$  zu erwarten.

In Berlin gibt es keine Luftmessstation, die direkt an einer Straßenbahnlinie liegt, weshalb in dieser Studie die Station Neuendorfer Straße in Brandenburg an der Havel betrachtet wird. Dort beträgt die Verkehrsstärke der Straßenbahn etwa 48 Straßenbahnen pro Tag an Werktagen, etwa 36 an Samstagen und 28 an Sonn- und Feiertagen. Gemittelt über alle Tage des Messzeitraumes ergeben sich somit 40 Straßenbahnfahrten pro Tag. Dies ist aus den in den Anlagen bereitgestellten Fahrplänen des VBB für das Jahr 2020/21 ersichtlich.

### 2.2 Messstandorte

Als Messstandorte sind drei Orte ausgewählt worden, von denen eine Station eine Straßenbahn aufweist, eine Station eine starke Verkehrsbelastung und eine Station sich im urbanen Hintergrund in Berlin befindet. Dadurch ist sichergestellt, dass für die Rezeptormodellierung eine ausreichende Basis an Vergleichsdaten vorliegt. Die geografische Verteilung der Messstandorte in Berlin und Brandenburg an der Havel führt zu unterschiedlichen Belastungen der Luft, jedoch nicht zu starken meteorologischen oder klimatologischen Unterschieden. Dies geht aus der räumlichen Nähe und der geringen topografischen Gliederung der gesamten Region hervor.

Höhenunterschiede sind allesamt nur gering ausgeprägt, die Topografie befindet sich zwischen 30 und 100 Metern über dem Meeresspiegel. Im Folgenden sollen die einzelnen Standorte charakterisiert werden und deren Bedeutung für die Studie erläutert werden. Weitere Informationen können auch hier nachgelesen werden:

- BE-171 (UBA-Code: DEBE068):  
<https://luftdaten.berlin.de/station/mc171#station-info>
- BE-117 (UBA-Code: DEBE061):  
<https://luftdaten.berlin.de/station/mc117#station-info>
- BB-049 (UBA-Code: DEBB049):  
<https://luftdaten.brandenburg.de/home/-/bereich/messstationen/DEBB049>

### 2.2.1 BE-117: Berlin, Schildhornstraße

Die Station BE-117 liegt an einer viel befahrenen Straße mit einem DTVw von etwa 32.000 Fahrzeugen sowie einem Lkw-Anteil von 1,4 Prozent. Die Straße liegt etwa in WNW-OSO Ausrichtung und damit parallel zur häufig anzutreffenden Hauptwindrichtung. Somit ist vor Ort eine gute Belüftung häufig vorhanden. Die Standortdokumentation von Herenz u. a. (2019) beschreibt den Messort und die installierte Analytik. Dazu gehört eine Messung von  $PM_{10}$  sowie den darin enthaltenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Zusätzlich steht eine automatische Messung von  $PM_{10}$  und  $PM_{2,5}$  bereit sowie gasförmige Inhaltsstoffe wie Kohlenmonoxid, Benzol und Stickstoffoxide (Herenz u. a., 2019). Das Ziel der Verwendung der Messdaten von BE-117 ist der Abgleich der Abriebe aus dem Kfz-Verkehr mit denjenigen, die durch Straßenbahnen entstehen. Es ist zu erwarten, dass die chemische Signatur der Abriebe aus Straßenbahnen und Kfz-Verkehr sich unterscheiden, da die Bauteile anderen Ansprüchen genügen müssen – Straßenbahnen sind erheblich schwerer als gewöhnliche Kfz und Lkw – und daher unterschiedliche Materialzusammensetzungen verwendet werden dürften.

Die Schildhornstraße ist als vierspurige Straße ausgebaut und verbindet zwei Stadtautobahnen. Der Verkehr an der Messstation kann von Ampelrückstau betroffen sein (Herenz u. a., 2019). Der Einlass des Messgerätes für das  $PM_{10}$  befindet sich 2,0 Meter neben dem Fahrbahnrand in etwa 4,1 Meter Höhe über dem Boden. Der Abstand zu näheren Hindernissen, wie Bäumen und Gebäuden beträgt etwa 4 Meter (Herenz u. a., 2019).

### 2.2.2 BE-171: Berlin, Brückenstraße

Informationen zur Messstation BE-171 befinden sich auf der Internetseite der Stadt Berlin: <https://luftdaten.berlin.de/station/mc171#station-info>. Es handelt sich dabei um eine Messstelle im städtischen Hintergrund direkt an der Spree ohne direkte Exposition zu Verkehrsaktivitäten. Es werden  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  und Stickstoffoxide gemessen. Die relativ offene Lage nahe der Spree sorgt für eine gute Durchlüftung der Stationsumgebung. Es sind in nördlicher Richtung in etwa 80 Meter Entfernung die Gleise der S-Bahn vorhanden, deren Emissionsgeschehen sich jedoch nur bei nördlichen Winden auf BE-171 auswirken dürfte, welche gleichzeitig selten auftreten.

Die Messstation BE-171 erfüllt den Zweck, auch die städtischen Hintergrundbelastungen zu erfassen und über eine statistische Auswertung auch von den Emissionen der Straßenbahn abzugrenzen.



### 2.2.3 BB-049: Brandenburg an der Havel, Neuendorfer Straße

Die detaillierte Beschreibung der Messstation BB-049 sind auf den Internetseiten des Landes Brandenburg zu finden: <https://luftdaten.brandenburg.de/home/-/bereich/messstationen/DEBBO49>. Es wird  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  sowie Stickstoffoxide gemessen. Das Verkehrsaufkommen an der Neuendorfer Straße beträgt etwa 10.000 Kfz pro Tag. Es fahren werktäglich 48, an Samstagen 36 und an Sonn- und Feiertagen 28, im Mittel über die Messperiode 40 Straßenbahnen von zwei Typen: MGT6D und KNG6F (<https://www.vbbr.de/index.php/unternehmen/zahlen-fakten>). Ähnlich wie BE-117 befindet sich die Station an einer dicht bebauten Straßenschlucht in WSW-ONO-Ausrichtung. Circa 800 Meter weiter westlich verläuft die B1 auf der Zanderstraße, auf der DTVw wie in BE-117 mit über 30.000 Kfz pro Tag erreicht werden. Weiterhin befindet sich die Station BB-049 sehr nahe an einer Kurve in der Straßenbahnführung sowie an einer Haltestelle. Dies bedeutet, dass die Straßenbahnen hier häufig bremsen und beschleunigen. Die dadurch stattfindenden Kraftübertragungen dürften sich in erhöhten Reibungen und damit Abrieben zeigen. An den Daten dieser Messstation sollen die Belastungen durch die Straßenbahn ermittelt werden können.

## 2.3 Methodische Ansätze

Der hier verfolgte Ansatz kombiniert die chemische Analytik mit statistischen Methoden zur Rezeptormodellierung und darüber hinaus wird durch forensische Probenahmen ein Abgleich geschaffen, der zur Einordnung der aus der Rezeptormodellierung erhaltenen Profile dient. Zusätzlich werden die einzelnen chemischen Bestandteile statistisch untersucht und auch nach verschiedenen Kriterien stratifiziert. Diese Stratifizierung soll der Tatsache Rechnung tragen, dass in der Region Berlin-Brandenburg sowohl meteorologische Faktoren als auch menschliche Aktivitätsraten das Emissionsgeschehen maßgeblich beeinflussen (van Pinxteren u. a., 2017).

### 2.3.1 Probennahme $PM_{10}$

Die Probenahme erfolgte mit Kleinfiltersammlern, die mit automatischen Probenwechsler betrieben werden. Hierbei kamen an den beiden Berliner Messstationen Innenversionen zum Einsatz, was bedeutet, dass die Sammel- und Probenwechseleinheit in der auf 20 Grad Celsius temperierten Messstation arbeiten. An der Brandenburger Messstation wurde ein Außengerät verwendet. Die Probenahme erfolgte mit einem  $PM_{10}$ -Kopf gemäß DIN EN 12341. Die Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser  $\leq 10$  Mikrometer wurden auf geglähten Quarzfaserfiltern vom Typ MN QF-10 (50 mm Durchmesser, 11,58 Quadratmeter belegte Fläche) bei einem Volumenstrom von 2,3 Kubikmeter pro Stunde über einen Tag abgeschieden. Von allen Filterproben wurde eine gravimetrische Partikelmassenbestimmung gemäß DIN EN 12341 durchgeführt. Die Filter wurden vor dem Einsatz thermisch behandelt (650 Grad Celsius über mindestens 4 Stunden) und vor der Leerwägung zunächst für circa 48 Stunden in waserdampfgesättigter Atmosphäre und anschließend mindestens 48 Stunden bei  $20 \pm 1$  Grad Celsius und  $47,5 \pm 2,5$  Prozent relativer Feuchte im Wägebraum äquilibriert.

### 2.3.2 Chemische und Optische Analytik

Die Analyse der Filter auf Metalle und Ionen wurden im Labor des TROPOS in Leipzig durchgeführt und die optischen Untersuchungen auf schwarzen Kohlenstoff (equivalent black carbon - eBC) erfolgten im Labor der SenUMVK in Berlin. Der Zweck dieser Messungen ist es, die möglichen  $PM_{10}$ -Quellen später durch statistische Modellierung einzuordnen und zu quantifizieren. In diesem ersten Schritt sind die Filter auf ihre Bestandteile untersucht worden.

In Tabelle 2.1 sind die labortechnischen Messmethoden angegeben. Die vom TROPOS durchgeführten Messungen wurden übergeben in Form einer tabellarischen Aufstellung inklusive der Unsicherheit der Messmethoden sowie des Detektionslimits (LDL). Die in Feld- und Labor-messungen präparierten Blindfilter ohne Partikelbelegung sind ebenfalls analysiert worden. Die Blindwerte sind als Durchschnittswerte aller Blindfilter, die recht nahe beieinander lagen, ermittelt worden. Jeder Filter ist in zwei gleich große Hälften zerteilt worden, sodass beide Verfahren angewandt werden konnten. Die Blindwerte sind von den Rohdaten abgezogen worden. Nach Abzug der Blindwerte sind für Messwerte unterhalb des LDL innerhalb einer Toleranz von 1 mal LDL um den Wert 0 herum diese gemäß Standard des Umweltbundesamtes durch den Wert 0,5 mal LDL ersetzt worden. Werte unterhalb -1 mal LDL müssten theoretisch eliminiert werden, sind jedoch nicht aufgetreten. Einige Elemente konnten nach Abzug der Blindwerte und Betrachtung des LDL nicht berücksichtigt werden, da sie nicht nachweisbar waren. Die verbleibenden Messwerte sowie Unsicherheiten sind im Verlauf individuell und mithilfe der PMF-Methodik zwecks statistischer Rezeptormodellierung analysiert worden.

**Tabelle 2.1: Analytierte Bestandteile auf den für diese Studie erhobenen Filterproben**

Messmethode	Elemente
Ionenchromatographie (IC) Cl <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ionen: Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup>
Inverse Königswasserauflösung und TRFA K, V, As, Se	Fe, Cu, Zn, Ca, Al, Sb, Ni, Mn, Ba, Cr, Sn

### Ionenchromatographie

Für die Anwendung der Ionenchromatographie (IC) musste die Filterhälfte in Wasser gelöst werden. Dies wurde durch jeweils 15 Minuten langes Ultraschallbad und Schütteln der Probe auf einem Schüttelgerät dargestellt. Im Anschluss wurden die nicht löslichen Bestandteile durch Filtrierung abgesondert und in einem IC untersucht, in dem die Lösung eingeführt wird. Die Ladung und die Masse der Ionen bestimmt dabei den Auftreffpunkt und damit kann dann für verschiedene Ladungszustände die Masse bestimmt werden. Da Ladungszustand und Masse der jeweils bestimmten Ionen bekannt ist, können die Auftreffpunkte beziehungsweise Entfernungen im Voraus berechnet werden. Die festgestellten Stromstärken an den zugehörigen Auftreffpunkten kann dann der Konzentration zugeordnet werden. Eine regelmäßige Vierpunkt-Kalibration der IC-Methode wird durchgeführt. Eine nähere Beschreibung der Messmethode findet sich in Fomba u. a. (2013).

### Inverser Königswasserauflösung und TRFA

Die Konzentrationen der Metalle aus Tabelle 2.1 sind mithilfe Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse (TRFA) bestimmt worden, wobei eine Vorbehandlung der Filterhälften durch einen inversen Königswasserauflösung durchgeführt wurde, um die Metalle zu lösen (Fomba u. a., 2013). Zur Konzentrationsbestimmung wurden definierte Filterflächen in einer Lösung HNO<sub>3</sub>/HCl in einer Konzentration 3 zu 1 bei 180 Grad Celsius in einer Mikrowelle aufgeschlossen. Die Lösung wurde auf eine Trägerplatte pipettiert, eingetrocknet und mittels Totalreflexions-Röntgenfluoreszenzanalyse (TRFA) analysiert. Pro Trägerplatte wurden 6 Wiederholmessungen bei 2 Hauptwinkeln durchgeführt, aus denen die Metallkonzentrationen als Mittelwert mit zugehöriger Standardabweichung bestimmt wurden. Eine nähere Beschreibung der Messmethode findet sich in Fomba u. a. (2014).

### Messung von eBC

Die optischen eBC-Messungen der Filterproben erfolgten mit einem Transmissiometer vom Typ OT21. Das Messprinzip beruht auf der Lichtabsorption der Partikel auf dem Filter. Die relevante Wellenlänge ist hierbei 880 Nanometer. Als Messgröße wird ein Attenuation-Wert (ATN) ermittelt, der mit dem Volumen, der Filterfläche und einem spezifischen Konversionsfaktor in eine eBC-Konzentration umgerechnet wird. Die ATN-Werte sind ein Maß für die Abschwächung durch die Lichtabsorption der abgeschiedenen Partikel.

Die Umrechnungsfaktoren für die Ermittlung von eBC aus den ATN-Werten wurden durch Regression der thermooptischen EC-Daten gemäß DIN EN 16909, die die Referenz darstellen, von den Berliner Messcontainern DEBE034 (Hintergrund) und DEBE065 (Straße) in Berlin und ATN-Messungen aus Parallelproben ermittelt. Die Zeitspanne hierfür reichte von August 2020 bis Juli 2021, wobei an jedem 6. Tag sowohl eine EC-Analyse und die zugehörige ATN-Messung möglich waren. Dies ergab 111 Wertepaare. Mithilfe der erhaltenen Umrechnungsfaktoren können aus den ATN-Werten die entsprechenden eBC-Werte für jede Probe berechnet werden. Durch orthogonale Regression der EC-Messwerte als Referenzmethode (RM) und den berechneten eBC-Werten als Kandidatenmethode (CM) im Equivalence Tool der Europäischen Kommission, Version 3.1 02/07/20, wurden die erweiterten Unsicherheiten der eBC-Werte abgeschätzt. Als Grenzwert (Limit Value) wurde 1,0 Mikrogramm pro Kubikmeter gewählt und für den zufälligen Unsicherheitsbeitrag der Referenzmethode ( $u_{\text{bs, RM}}$ ) 0,10 Mikrogramm pro Kubikmeter ermittelt. Somit ergab sich für eBC-Werte eine erweiterte Unsicherheit von 33 Prozent.

### 1.3.3 Forensische Abriebprobennahme

Um Einblicke in die Materialzusammensetzung der eigentlichen Straßenbahnen zu erlangen, sind in Absprache mit den Verkehrsbetrieben Brandenburg an der Havel (VBB) am 03. Mai 2021 an den abriebrelevanten Kontaktflächen einer Straßenbahn Abstriche genommen worden. Diese Abstriche sind durch beidseitiges Reiben eines MN QF-10 Quarzfilters genommen worden. Es wurde festgestellt im Gespräch mit Mitarbeiter\*innen der VBB vor Ort, dass der Stromabnehmer aus Graphit (Kohlenstoff) besteht und dies für alle eingesetzten Fahrzeuge der Fall ist. In den Abbildungen 5.1 bis 5.5 sind die Kontaktflächen hervorgehoben, zusätzlich sind Filterabriebe von den Schienen genommen worden. Insgesamt wurden folgende Filterproben durchgeführt:

- Schiene (2 mal),
- Reifen (2 mal),
- Stromabnehmer (1 mal),
- Bremsscheibe (3 mal),
- Blindwertprobe (1 mal).

Die Probennahme ist mit metallfreien Latexhandschuhen erfolgt und im Anschluss an die Probennahme wurden die Filter im Labor in Berlin zunächst gewogen und dann ebenfalls an das TROPOS in Leipzig versendet, um der gleichen chemischen Analytik unterzogen zu werden, wie die anderen Filter. Eine optische Analyse auf elementare und organische Kohlenstoffe konnte aufgrund der ungleichmäßigen Filterbelastung nicht durchgeführt werden. Außerdem konnten manche Filter nicht in der Analyse berücksichtigt werden, da durch die Entnahmeprozedur Filtergewebe abhandengekommen ist. Dadurch bedingt, war es nicht mehr möglich, die Massebelastung festzustellen, beziehungsweise deren Werte waren negativ.

### 2.3.4 Statistische Rezeptformmodellierung

Die in diesem Projekt verwendete SRM Methode ist die sogenannte ‚Positive Matrix Factorisation‘ (PMF). Prinzipiell wird für jede Probe die folgende Bilanzgleichung mit iterativen Ansätzen gelöst:

$$x_{ij} = \sum_{(k=1)}^p g_{ij} f_{kj} + e_{ij} \quad (2.1)$$

Dabei sind folgende Bezeichnungen in Gleichung 2.1 von Bedeutung:

- i Probe, hier: ausgewerteter Filter
- j Spezies, hier: ausgewertetes Spurenelement, eBC
- p Faktoren, hier: Anzahl der Immissionsprofile
- $g_{ij}$  Massenbeitrag pro Profil und Filter
- $f_{kj}$  Anteil des Spurenelementes j am gesamten Immissionsprofil k
- $e_{ij}$  Residuum, nicht durch Profile erklärbar

In diesem Projekt wird die Version 5.0 der PMF-Software der Environmental Protection Agency (EPA) der Vereinigten Staaten verwendet (Norris u. a., 2008). Nach der Durchführung der PMF-Analyse mit der Anzahl von drei bis 15 Faktoren, wurde zunächst festgestellt, dass der 31. Dezember und der 01. Januar durch den Einfluss erheblicher Feuerwerke in der Neujahrsnacht zu unsicheren Ergebnissen führen. Deshalb wurden diese Tage entfernt. Es wurden auch diejenigen Elemente aus dem Datensatz entfernt, die nach Abzug der Blindwerte und Ersetzen der Werte unterhalb der Nachweisgrenze durch den Wert halbe Nachweisgrenzen nur wenige valide Datenpunkte liefern. Nach erneuter Durchführung der PMF-Analysen, sind anhand der im Anschluss durchgeführten Zufallsversuche (Bootstrapping), in denen die Faktoren geringfügig geändert werden, die daraus ableitbaren Robustheitsmaße verglichen worden. Das relevante Kriterium ist der Anteil der Bootstrapping-Läufe, die ein jeweiliges Profil wieder auf dieses abbilden. Je höher dieser Anteil, desto schärfer unterscheiden sich die einzelnen Profile. Generell ist ein Anteil von über 90 Prozent ein Zeichen für abgrenzbare Profile. Zusätzlich ist das DELTA-SA Werkzeug zum Abgleich der erhaltenen Profile mit in SPECIEUROPE und bei der EPA vorhandenen Profile genutzt worden. Unser Dank geht hier an Herrn Claudio Belis, der uns in der Nutzung des Tools unterstützt hat und auch seine Interpretationen der Ergebnisse geteilt hat. Auf der Basis der Ergebnisse des Bootstrapping sowie der Ergebnisse des DELTA-SA (Pernigotti und Belis, 2018), ist die Entscheidung für den Lauf mit 9 Faktoren getroffen worden, welcher im Weiteren ausgewertet wurde. Das DELTA-SA ordnet die Ergebnisse einer PMF-Analyse mittels Ähnlichkeitsmetriken bereits existierenden Einträgen in die Datenbanken von Profilen von Emissionsquellen zu (Pernigotti und Belis, 2018). Für die Auswertung wurden dann für jeden Faktor wiederum Zeitreihen erstellt, die für jede Station im Gesamtzeitraum als auch für die Situationen Ost/Westwinde oder Werkzeuge/Sonn- und Feiertage stratifiziert wurde. Dies dient einer Plausibilitätsprüfung und unterstützt die Quellzuordnung.

### 2.3.5 Stratifizierung und Zuordnung

Die Daten sind nach folgenden Kriterien stratifiziert worden:

- Windrichtung: Ostwinde versus Rest,
- Werkzeuge versus Rest.

Diese Stratifizierung ermöglicht es, den Zusammenhang zwischen der Windrichtung sowie der wöchentlichen Aktivitäten, das heißt, Verkehr mit den Bestandteilen der  $PM_{10}$ -Konzentration zu untersuchen. Die Unterscheidung der Windrichtung wurde dabei durch die Hauptwindrichtung des mittleren täglichen Windvektors bestimmt. Ostwinde werden dann zugeordnet, wenn sich der Windvektor in einem Sektor zwischen 22,5 Grad (NNO) und 157,5 Grad (SSO) befindet. Der Vergleich der Messstationen gibt auch Aufschluss über die Auswirkung der großen urbanen Agglomeration von Berlin auf einzelne Bestandteile des  $PM_{10}$ . Eine Stratifizierung in Tage mit und ohne Niederschlag wurde versuchsweise ebenfalls ausgeführt. Aus dieser Stratifizierung ergab sich keine statistisch signifikant unterschiedliche Verteilung oder Konzentration verschiedener Elemente. Grund dafür dürften die geringe Anzahl an Messtagen sowie die geringe Anzahl an Tagen mit flächendeckendem Niederschlag mit mindestens 1 Millimeter Tagesmenge sein. Deshalb wurde diese Stratifizierung auch verworfen für die Auswertung in dieser Studie. Mithilfe dieser Untersuchung können dann im Vergleich mit vorangegangenen Arbeiten bereits erste Ableitungen über die möglichen Quellen der einzelnen Inhaltsstoffe hergeleitet werden.

**Tabelle 2.2: Darstellung der Anzahl der Tage, stratifiziert nach verschiedenen meteorologischen und phänomenologischen Ausschlusskriterien, ohne 31. Dezember 2020 und 01. Januar 2021**

Kriterium	Anzahl erfüllt	Anzahl nicht erfüllt	Summe
Wind aus NO, O oder SO	25	35	60
Werkzeuge	42	18	60

Wie anhand von Tabelle 2.2 zu erkennen ist, sind die Anzahl der Tage in den einzelnen Kategorien nicht gleich verteilt. Jedoch sind in beiden beziehungsweise in den jeweils unterschiedlichen Kategorien eine ausreichende Anzahl an Tagen vorhanden, insbesondere, wenn man bedenkt, dass pro Tag Filterproben von drei unterschiedlichen Messstationen vorliegen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt im Anschluss als Box-Diagramm auf der Basis der statistischen Verteilung in Bezug auf Perzentile.

## 2.4 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung von Messdaten und Ergebnissen von numerischen Modellen ist ein essenzieller Faktor bei dem Nachvollziehen und der Replikation von Forschungsergebnisse. In dieser Studie sind die Qualitätskriterien zur statistischen Quellzuordnung von Belis u. a. (2014) angewandt worden. Deshalb sind Blindwertbetrachtungen der erste Schritt nach der chemisch-optischen Analyse der Filter, da diese im Rohzustand teilweise über beträchtliche Konzentrationen der gemessenen Stoffe enthalten (van Pinxteren u. a., 2017). Die Angabe von Ausschlusskriterien und den Kriterien zur Auswahl der Anzahl der Quellfaktoren müssen ebenfalls dargelegt werden.

### 2.4.1 Blindwertbestimmung

Die verwendeten MN-QF10 Filter sind bekannt dafür, dass sie teilweise erhebliche Blindwerte aufweisen (van Pinxteren u. a., 2017). Dies bedeutet, dass diese als erster Schritt vor jeder weiteren Auswertung abgezogen werden müssen. Dafür werden zunächst die Blindwerte für jedes Element beziehungsweise Ion durch das arithmetische Mittel aller Blindfiltermessungen ermittelt. Falls dieses über dem LDL liegt, wird der so ermittelte Blindwert von den Rohdaten abgezogen. Falls dann die Messwerte unter dem LDL liegen, werden sie durch 0,5 mal LDL ersetzt.

### 2.4.2 Ausschluss

Messwerte müssen dann ausgeschlossen werden, wenn sie entweder unplausibel, statistisch nicht belastbar oder ein Wert nicht festgestellt werden kann, wie etwa bei der Unterschreitung des Detektionslimits (LDL).

#### Niederschlag

Die Anzahl der Tage mit mindestens 1 Millimeter Niederschlag liegt bei nur 8 in etwa 60 Tagen. Aus diesem Grund und da sich an diesen Tagen keine relevanten Unterschiede in den Konzentrationen von chemischen Bestandteilen des  $PM_{10}$  feststellen lassen, muss die Stratifikation nach Niederschlagstagen verworfen werden. Eine größere Anzahl auswertbare Tage sollte durch eine längere Messperiode ermöglicht werden können.

#### Silvester und Neujahrstag

Durch das Verwenden von Feuerwerkskörpern an den Tagen 31. Dezember 2020 und 01. Januar 2021 werden zum einen große  $PM_{10}$ -Werte von bis über 50 Mikrogramm pro Kubikmeter registriert und zum anderen wird eine bestimmte Emissionsquelle nur an diesem Tag aktiviert. Um eine Verfälschung der Ergebnisse durch diesen Faktor zu verhindern, werden diese Tage von der Analyse ausgeschlossen.

### Unterschreitung des Detektionslimits (LDL)

Wenn das LDL unterschritten wird, muss der Messwert mit 0,5 mal LDL ersetzt werden. Überschreitet die Häufigkeit des Auftretens mehr als 50 Prozent in allen Messreihen, dann ist der jeweilige Inhaltsstoff entweder nicht vorhanden, oder die Messmethode nicht geeignet diesen nachzuweisen. In beiden Fällen ist es wenig sinnvoll, solche Messdaten statistisch auszuwerten und in die PMF-Analyse einzubeziehen. Deshalb sind die Messwerte von Metallen und Ionen dann ausgeschlossen worden, wenn mehr als 50 Prozent der Messwerte aller drei Messreihen das LDL unterschreiten. Dies ist der Fall für elementares Kalzium, Vanadium, Chrom, Arsen, Antimon sowie Bromid. In der genaueren Betrachtung der Inhaltsstoffe sind dann nur solche herangezogen worden, die mindestens 0,05 Prozent zur Gesamtmasse des PM<sub>10</sub> beitragen.

### 2.4.3 Ergebnisse Rezeptormodellierung

Die Ergebnisse der Rezeptormodellierung müssen auf Plausibilität geprüft werden (Belis u. a., 2014). Dazu wird zunächst die geeignete Anzahl der Profile bestimmt, was in dieser Studie durch die Durchführung von Bootstrapping-Läufen mit geringen Abweichungen von der analytischen Lösung der jeweiligen PMF-Simulation bewerkstelligt wird. Dabei wird die Unabhängigkeit der Faktoren voneinander betrachtet. Je größer die Anzahl der Faktoren, desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass einige Faktoren so ähnlich sind, dass sie aus den gleichen Quellen stammen. Deshalb müssen die Faktoren im Bootstrapping zu mindestens 85 Prozent auf sich selbst abgebildet werden und nur ein Faktor darf dieses Kriterium verfehlen, aber muss immer noch zu über 50 Prozent auf sich selbst abgebildet werden durch das Bootstrapping. Letzteres Kriterium wird deshalb gewählt, da es so als sehr wahrscheinlich gelten dürfte, dass alle wesentlichen Emissionsquellen erfasst werden. Die geringste Anzahl an Faktoren, die diese Kriterien erfüllen, wird ausgewählt, in dieser Studie sind es neun. Mithilfe des DELTA-SA werden dann die einzelnen Profile existierenden Profilen aus Messkampagnen gegenübergestellt, um eine Quellzuordnung zu erleichtern (Pernigotti und Belis, 2018). Oftmals fallen dabei mehrere Quellen mit sehr ähnlichen Ähnlichkeitsmaßen auf, weshalb eine subjektive Entscheidung auch im Vergleich mit relevanten Vorstudien wie zum Beispiel van Pinxteren u. a. (2017) getroffen werden muss. Dazu werden Quellen ausgeschlossen, die unplausibel scheinen, wie zum Beispiel Hafенbetrieb, und Quellen auch zusammengefasst, wie zum Beispiel Dieselölbrennung, welche aus Verbrennung aus Kfz und auch stationären Anlagen stammen kann.

### 3 METEOROLOGISCHE VERHÄLTNISSE UND LUFTREINHEIT WÄHREND DER MESSPERIODE

Die meteorologischen Verhältnisse können in der Region Berlin-Brandenburg die Zusammensetzung und Größe der Luftverschmutzung beeinflussen, durch verschiedene Mechanismen:

- Akkumulation lokaler Luftverschmutzung unterhalb von starken Inversionsschichten. Eine Inversion liegt dann vor, wenn die Temperatur in einer Schicht mit der Höhe zunimmt. Dies geschieht oftmals sprunghaft und ist im Winterhalbjahr eine oft anzutreffende Situation. Die Inversion vermindert den vertikalen Luftaustausch und stellt somit eine undurchlässige Schicht dar für die bodennahen Luftschichten, in denen sich folglich Aerosole anreichern können.
- Ferntransport von Luftinhaltsstoffen tritt dann auf, wenn das Luftpaket an einem Ort in seiner Rückwärtstrajektorie Luftbeimengungen an anderen Orten aufgenommen hat, die in teils gealterter, das heißt chemisch veränderter Form, immer noch im Luftpaket vorhanden sind. In der Region Berlin-Brandenburg wird bei östlichen Winden oftmals stark belastete Luft herangeführt, da in Osteuropa durch Hausbrand, Kraftwerke und industrielle Prozesse große Mengen an Schadstoffen ausgestoßen werden. Bei Winden von der Nord- oder Ostsee können auch gealterte Seesalzkristalle beigemischt sein.
- Chemische Alterungsprozesse von Ammonium-Nitrat und Ammonium-Sulfat, deren Vorläuferstoffe durch Verbrennungsprozesse und landwirtschaftlichen Prozesse freigesetzt werden, stellen eine große Fraktion der Gesamtbelastung. Diese können sich bei niederschlagsfreier Witterung und vorhandener Inversion stark anreichern.
- Niederschlag kann durch effektivere Auswaschung zu einer plötzlichen Deposition von Partikeln und damit einer Reduktion der Luftbelastung beitragen.

Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag sowie das vertikale Temperaturprofil sind daher die wichtigsten meteorologischen Parameter, die Einfluss auf den Ursprung und die Anreicherung bestimmter Schadstoffe haben. Deshalb wird in diesem Kapitel auf die meteorologische Situation im Untersuchungszeitraum vom 28. Oktober 2020 bis zum 04. Januar 2021 eingegangen werden. Im Anschluss werden die Zusammenhänge zwischen Witterung und  $PM_{10}$  für die Untersuchungsstandorte aufgezeigt.

In den Abbildungen 3.1 bis 3.3 sind die meteorologischen Messgrößen Temperatur, Niederschlag, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer aufgetragen. Die Daten stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und stellen das arithmetische Mittel der drei Wetterstationen Brandenburg an der Havel, Potsdam und Berlin-Tegel dar. Die Unterschiede zwischen diesen drei Stationen sind jeweils nur gering, wobei im Vergleich Potsdam etwas geringere Minimaltemperaturen sowie etwas höhere Windgeschwindigkeiten aufweist. Vom Beginn des Novembers bis Anfang Dezember sind die Temperaturen von etwa 10 Grad Celsius auf Werte nahe dem Gefrierpunkt gefallen, mit leichten Nachtfrost ab dem 20. November. Im Dezember nehmen die Temperaturen nach anfänglich kaltem Beginn wieder auf über 5 Grad Celsius zu und fallen dann wieder in Gefrierpunktnähe bis zum 10. Dezember. Ab dann steigen die Temperaturen wieder und liegen bis Weihnachten bei etwa 5 bis 10 Grad Celsius. Nach Weihnachten sinken die Temperaturen wieder vorübergehend auf etwa 2 bis 3 Grad Celsius. Insgesamt ist die Witterung relativ mild.

Niederschläge fallen am 01. und 02. November mit jeweils über 5 Millimeter, während vom 03. November bis zum 11. November neun trockene Tage folgen. Bis zum 30. November gibt es fast täglich, aber dafür nur geringfügige Niederschläge unter 1 Millimeter. Bis zum 09. Dezember herrscht dann wieder eine neuntägige Trockenperiode vor. Danach gibt es zunächst geringe, um Weihnachten herum auch mäßige Niederschläge mit bis zu 7 Millimeter. Alle

Niederschläge fallen zu Zeiten mit deutlich positiven Temperaturen und als Regen. Die Luftfeuchtigkeit liegt generell bei 80 bis 95 Prozent, nur nach Weihnachten wird vorübergehend eine trockene Luftmasse herangeführt. Die Anzahl der Sonnenscheindauer sowie die Windstärke verteilt sich relativ gleichmäßig über den gesamten Zeitraum. Mit 13 Tagen, mit mehr als vier Stunden Sonnenschein, ist diese Periode verhältnismäßig sonnig. Die Windstärke liegt in der Regel zwischen 2 und 5 Meter pro Sekunde. Anhand der Windrichtung sind längere Phasen mit östlichen Winden in Phasen mit überwiegend westlichen Winden eingebettet, so etwa vom 07. bis 12. November und vom 02. bis 13. Dezember.

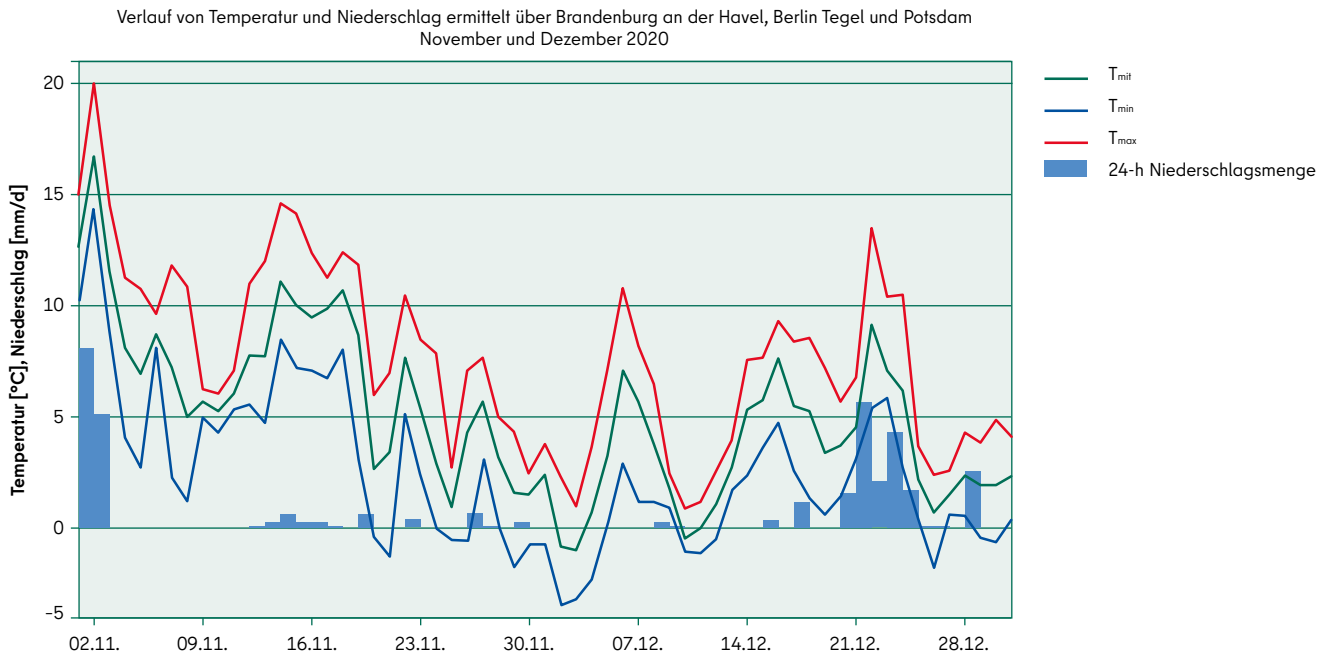


Abbildung 3.1: Zeitserie der Tageshöchst-, -mittel- und -tiefsttemperaturen sowie täglichen Niederschlagsmengen gemittelt über Standorte von DWD-Wetterstationen in Brandenburg an der Havel, Potsdam und Berlin Tegel

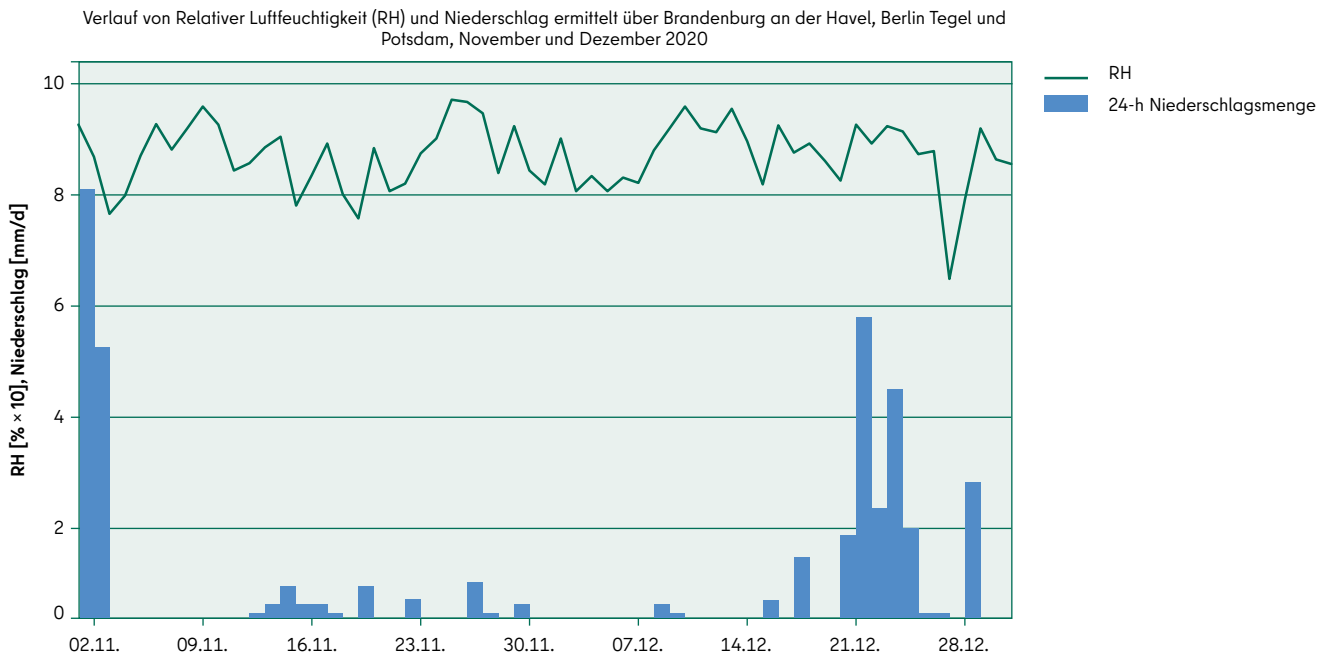
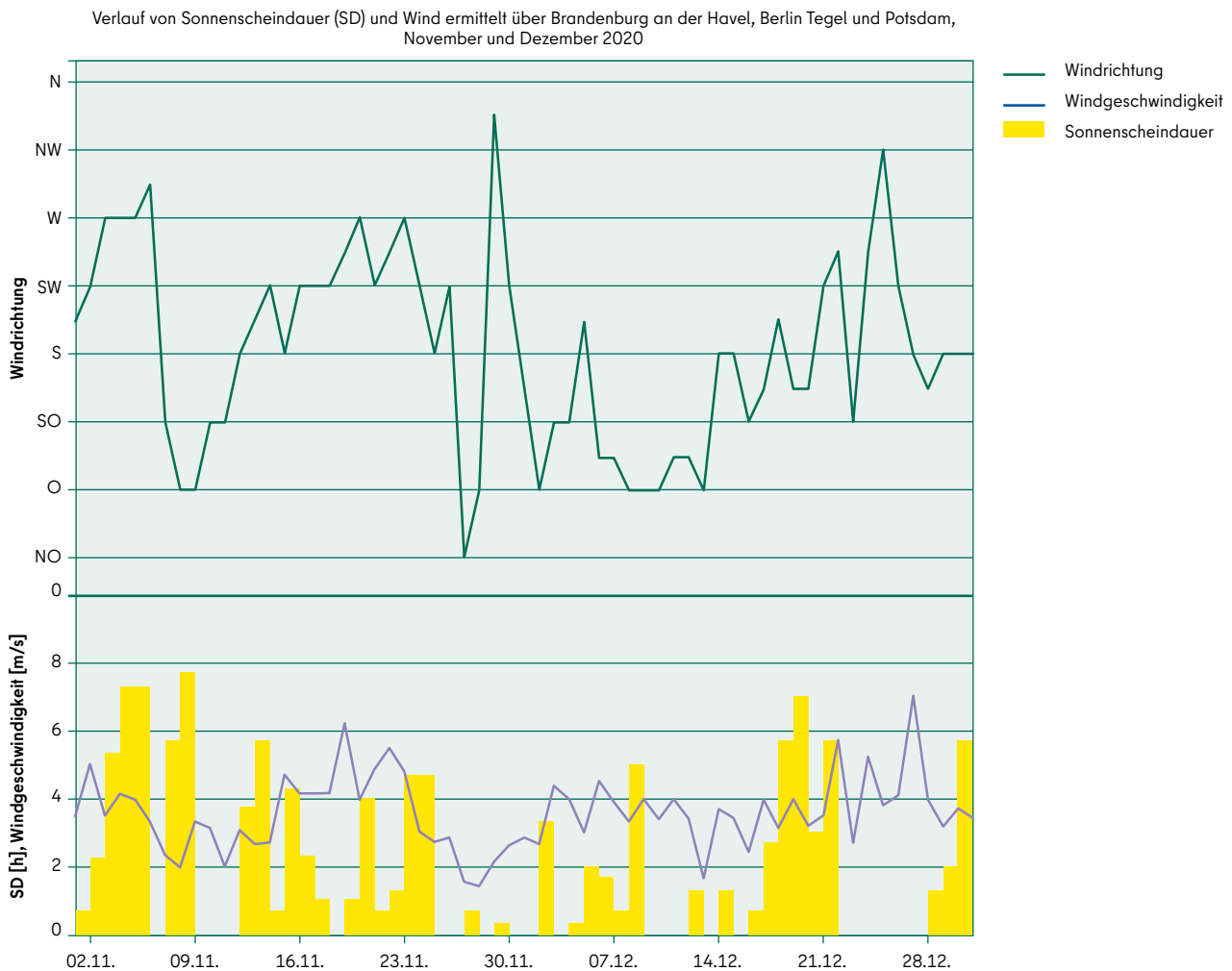


Abbildung 3.2: Zeitserie der relativen Luftfeuchtigkeit und täglichen Niederschlagsmengen gemittelt über Standorte von DWD-Wetterstationen in Brandenburg an der Havel, Potsdam und Berlin Tegel





**Abbildung 3.3:** Zeitserie der Windrichtung, -geschwindigkeit und täglichen Sonnenscheindauer gemittelt über Standorte von DWD-Wetterstationen in Brandenburg an der Havel, Potsdam und Berlin Tegel

Neben der meteorologischen Stratifizierung wird im weiteren Verlauf auch die Einteilung in Werktagen sowie Nicht-Werktagen, inklusive Samstag, wichtig sein. Diese Einteilung ergibt für die 69 Tage der gesamten Studie rund 46 Werktagen beziehungsweise 23 Nicht-Werktagen, was jeweils 67 beziehungsweise 33 Prozent entspricht. Rund 40 Tage weisen westliche und 29 Tage östliche Winde auf, was jeweils 58 beziehungsweise 42 Prozent entspricht. Der Anteil von Tagen mit Westwind an Werktagen (Nicht-Werktagen) liegt bei 59 Prozent (57 Prozent), der Anteil von Tagen mit Ostwind an Werktagen (Nicht-Werktagen) liegt entsprechend bei 41 Prozent (43 Prozent). Dies zeigt auf, dass die Unterteilung in Werktagen und die Windrichtung nicht (schein-)korreliert sind. Dies wird für weitere Auswertungen wichtig sein, denn damit lässt sich festhalten, dass der Einfluss der Windrichtung nicht vom Einfluss der Werktagen überlagert wird und umgekehrt.

Die Abbildungen 3.4 bis 3.8 zeigen den zeitlichen Verlauf der Luftbelastung durch  $PM_{10}$  und Stickstoffdioxid an den drei Untersuchungsstandorten sowie die Verteilung der  $PM_{10}$ -Konzentration in Abhängigkeit von Umgebungsvariablen. Es ist deutlich der zeitliche Verlauf und die geringen regionalen Unterschiede im Vergleich zu zeitlichen Verläufen zu erkennen. Weiterhin ist es deutlich, dass sowohl Inversion als auch Ostwind zu höheren  $PM_{10}$ -Konzentrationen führen. Auch an Werktagen ist die Konzentration deutlich höher als an anderen Tagen. Der Einfluss der Windrichtung liegt bei 12 bis 15 Mikrogramm pro Kubikmeter, der Einfluss der Werktagen bei 4 bis 5 Mikrogramm pro Kubikmeter und der Einfluss der Inversion bei circa 7 bis 8 Mikrogramm pro Kubikmeter.

Insgesamt ist zu erkennen, dass sich Phasen mit Luftbelastungen bis zu 40 Mikrogramm pro Kubikmeter  $PM_{10}$  mit Phasen geringer Belastung und Konzentrationen von unter 20 Mikrogramm pro Kubikmeter abwechseln. Die verkehrsbedingten Immissionen von  $NO_2$  sind in BB-049 und BE-117 größer als in BE-171, wobei in BE-117 die höchsten Werte auftreten.

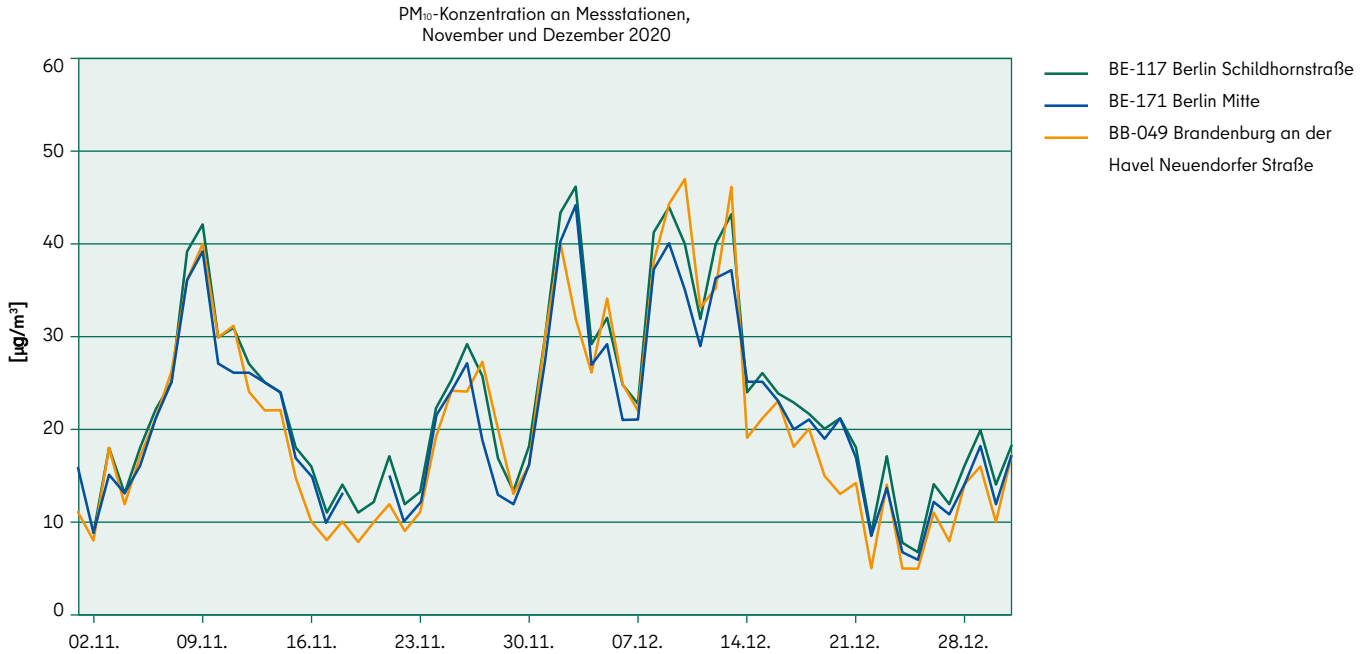


Abbildung 3.4: Zeitserie der täglichen Mittelwerte von  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

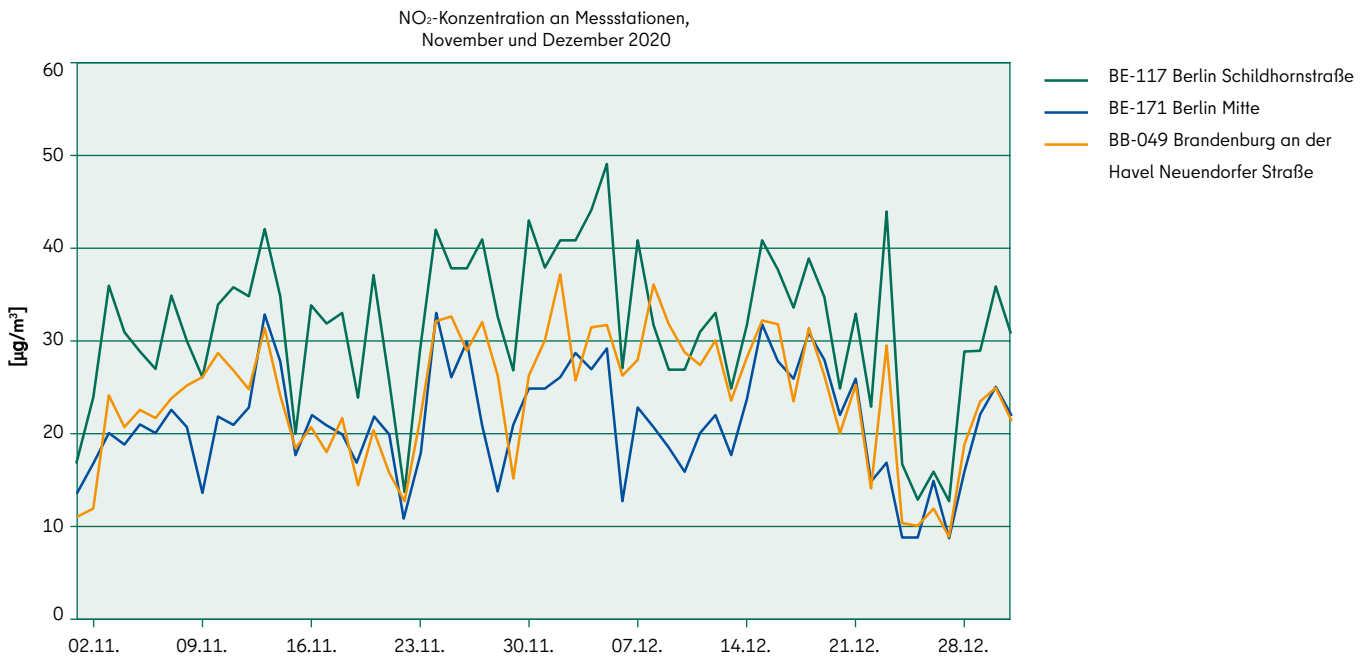


Abbildung 3.5: Zeitserie der täglichen Mittelwerte von  $NO_2$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

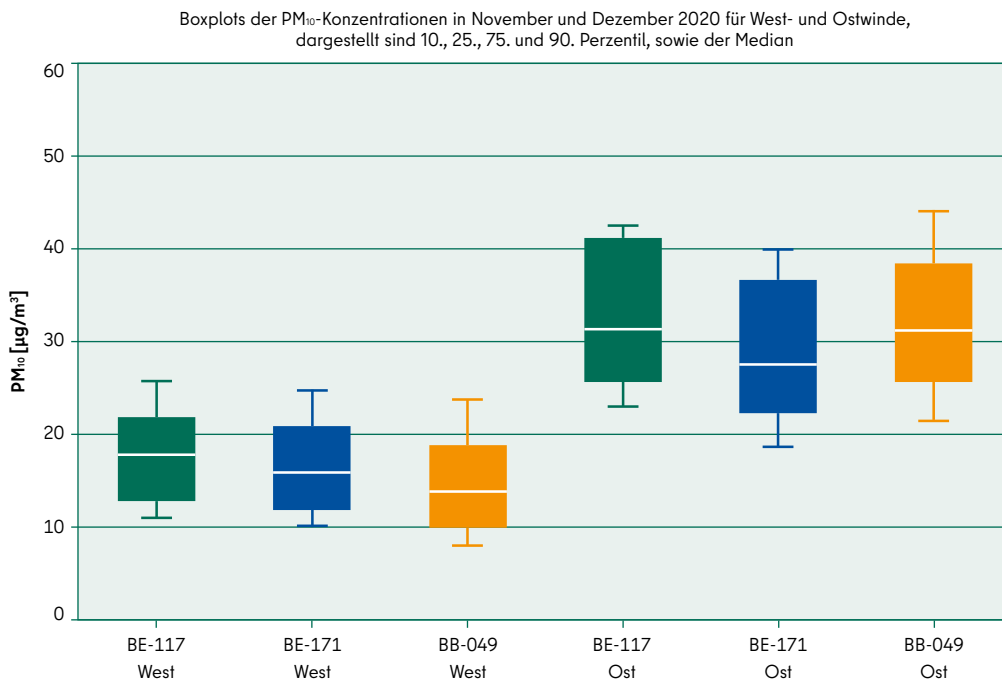


Abbildung 3.6: Boxplot der täglichen Mittelwerte von PM<sub>10</sub> an Tagen mit Wind aus westlichen und östlichen Richtungen für die drei betrachteten Luftmessstationen

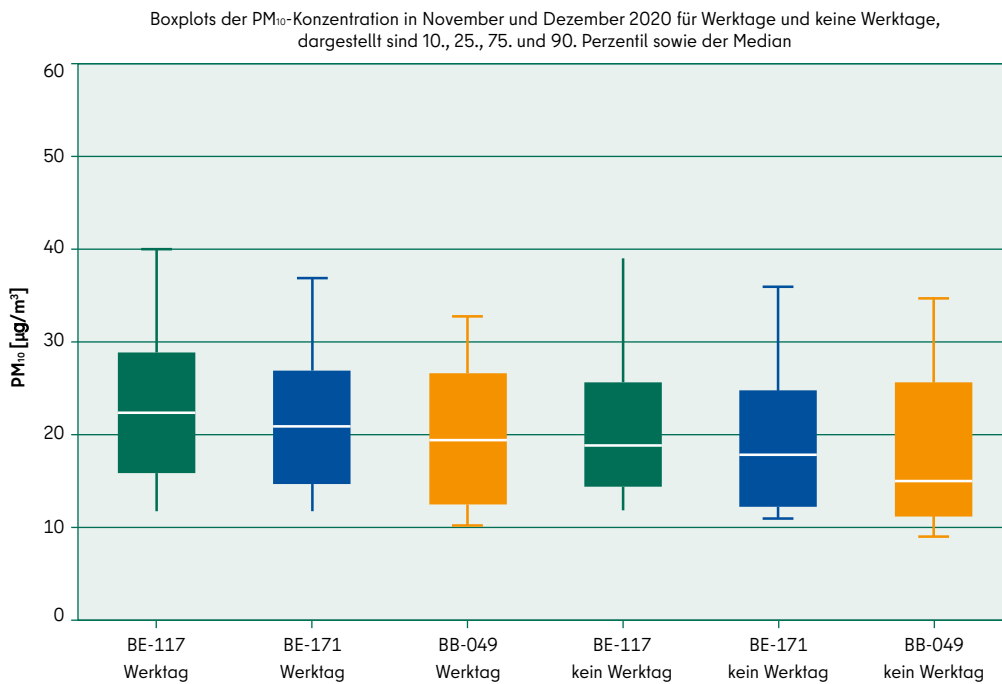


Abbildung 3.7: Boxplot der täglichen Mittelwerte von PM<sub>10</sub> an Werktagen und Sams-, Sonn- und Feiertagen für die drei betrachteten Luftmessstationen

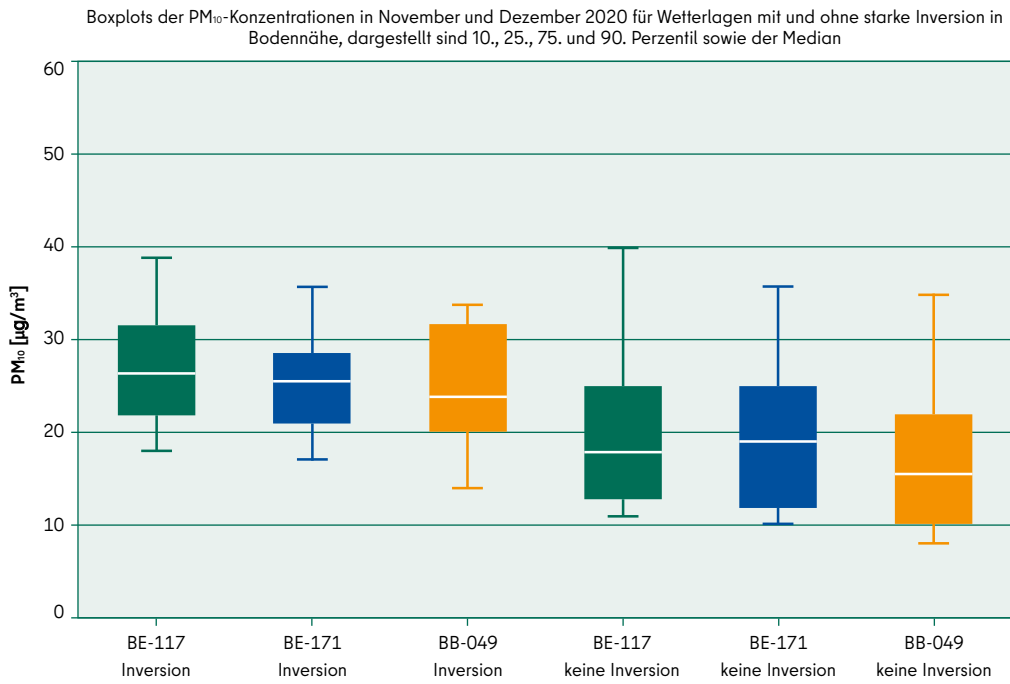


Abbildung 3.8: Boxplot der täglichen Mittelwerte von PM<sub>10</sub> an Tagen mit und ohne starke Inversion in Bodennähe für die drei betrachteten Luftmessstationen

## 4 VORARBEITEN

Zum jetzigen Zeitpunkt sind explizite Messungen und Modellierungen der Partikelabriebe durch Straßenbahnen nicht durchgeführt worden. Entsprechend sind aus der Literatur keine Profile der chemischen Zusammensetzung  $PM_{10}$  aus Straßenbahnabrieb vorhanden und auch keine Vorgehensweise zur Erstellung solcher Profile veröffentlicht worden. In einer Vielzahl von Studien wurden chemische Profile erhoben, die aufgewirbelten und Abriebpartikeln zugeordnet werden. In der Regel erfolgt keine eindeutige Quellzuordnung wie zum Beispiel Fahrzeugbremsen, Reifenabrieb, Schienenabrieb und so weiter dieser Profile. Nur eine sehr geringe Anzahl von Studien fasst aufgewirbelten Straßenstaub und Abriebpartikel von Straßenbahnen zusammen und charakterisiert diese chemisch.

Da Straßenbahnen technisch und bezüglich der verwendeten relevanten Materialien sehr ähnlich zu regulären Personenzügen sind, wurden Studien zur Analyse der chemischen Zusammensetzung der Abriebpartikel von Personenzügen ausgewertet auf die erhobenen chemischen Bestandteile sowie deren Anteile am Gesamtabrieb, um eine Basis für die in diesem Projekt durchzuführenden chemischen Auswertungen zu schaffen. Auch die Datenbank der Europäischen Union zu Quellprofilen von  $PM_{10}$ -Quellen ‚SPECIEUROPE‘ wurde nach relevanten Profilen durchsucht und in die Auswertung mit einbezogen. Die aus der Literatur und SPECIEUROPE gewonnenen Profile dienen als Basis für die chemische Auswertung der Probenfilter.

### 4.1 Bisherige Studien und Forschungsprojekte

Wie bereits erwähnt, sind bisher keine expliziten Messungen und Untersuchungen zum Thema Straßenbahnabriebe durchgeführt worden. Jedoch können die Erkenntnisse aus Forschungsprojekten zu Abrieben von Zügen teilweise übertragen werden. Diese Erkenntnisse sind übertragbar für die Art der Abriebe und die enthaltenen chemischen Inhaltsstoffe. Außerdem können Erkenntnisse zu den Beziehungen zwischen Geschwindigkeit und Abriebemissionen der Züge zumindest qualitativ auf Straßenbahnen übertragen werden. Qadir u. a. (2014) berücksichtigen in ihrer Studie zur Variabilität und Ursprüngen von  $PM_{10}$  für Augsburg als einzige die Abriebe durch Straßenbahnen, fassen diese jedoch in einem Emissionsprofil zusammen mit durch den Verkehr aufgewirbelten Partikeln. Für die Elemente Chrom, Kupfer, Eisen und Nickel zeigt sich, dass dieses Profil mit mehr als 60 Prozent der Emissionen in Verbindung steht. Insgesamt sind Metalle in diesem Profil eindeutig dominant und Ionen nicht vorhanden (Qadir u. a., 2014). Auch der Kohlenstoffanteil ist erheblich und wird möglicherweise durch den Abrieb der Stromabnehmer verursacht. An innerstädtischen Messstationen in der Nähe von Straßenbahnschienen wird der Anteil an der Gesamtbelastung mit bis zu 20 Prozent angegeben (Qadir u. a., 2014). In einer Studie von Burkhardt u. a. (2005) wurden die Anteile von Elementen in den Abrieben verschiedener abriebrelevanter Zugkomponenten untersucht mit folgenden Ergebnissen:

- Grauguss-Bremssohlen: 93 Prozent Eisen, 3 Prozent Kohlenstoff, 1,7 Prozent Silizium, 0,9 Prozent Blei;
- Sinter-Bremssohlen: 68 Prozent Eisen, 20 Prozent Kupfer, 6 Prozent Kohlenstoff, 5 Prozent Silizium;
- Kunststoff-Bremssohlen: 40 bis 50 Prozent Eisen, 10 bis 36 Prozent Bindemittel, 12 bis 18 Prozent Kalzium, 6 bis 8 Prozent Silizium, 2 bis 4 Prozent Magnesium, 4 bis 10 Prozent Kohlenstoff;
- Reifen: 96 Prozent Eisen, 1,2 Prozent Mangan, 0,7 Prozent Kohlenstoff, 0,5 Prozent Silizium, 0,3 Prozent Chrom, 0,3 Prozent Kupfer, 0,3 Prozent Nickel;
- Schiene: 97 Prozent Eisen, 1 Prozent Chrom, 1 Prozent Mangan, 0,7 Prozent Kohlenstoff, 0,3 Prozent Silizium.

Es ist erkennbar, dass Eisen, Kupfer und Kohlenstoff in allen Komponenten zu unterschiedlichen Anteilen vorkommen. Bei den Reifen und Schienen ist Eisen dominant, während der Eisenanteil bei den Bremsen abhängig von der Bauweise deutlich schwankt und auch die Zusammensetzung insgesamt sehr unterschiedlich ist. Deshalb ist eine Kenntnis der verwendeten Bremsysteme beziehungsweise eine Kontrollmessung der angelagerten Partikel durch forensischen Abstrich als sehr hilfreich anzusehen, um die Ergebnisse der statischen Modellierung einordnen zu können.

Eine Studie von Lorenzo u. a. (2006) hat durch Profilmessungen von  $PM_{10}$  festgestellt, dass die Abriebpartikel zu 67 Prozent aus Eisen, 23 Prozent aus Aluminium und 10 Prozent aus Kalzium bestehen. Ein gewisser Teil der Aluminium- und Kalzium-Emissionen ist laut den Forschern in Lorenzo u. a. (2006) durch Aufwirbelung und Bewegung des Schotterbettes verursacht worden. Im Verkehr von Straßenbahnen ist häufig kein Schotterbett vorhanden, jedoch bestätigt auch diese Studie das offensichtliche Faktum, dass der Großteil der Emissionen durch Straßenbahnen durch einen sehr hohen Eisengehalt gekennzeichnet sein dürften und die Zusatzbelastung durch den Schienenverkehr innerhalb von 100 Meter Abstand vom Gleiskörper weitestgehend abklingt (Lorenzo u. a., 2006). Im Gegensatz dazu haben Gehrig u. a. (2007) mit einem ähnlichen Messaufbau an den verkehrsreichsten Zugstrecken der Schweiz festgestellt, dass die Zusatzbelastung durch Abriebemissionen kaum Spuren von Kalzium, Aluminium oder Magnesium enthalten. Diese Tatsache weist darauf hin, dass der Schienenaufbau und die Windexposition des Schotterunterbaus an den Messpunkten von Lorenzo u. a. (2006) wahrscheinlich nicht repräsentativ sind für die Bauweisen und Strömungsverhältnisse in niedrig eingelassenen Gleisanlagen beziehungsweise in der Abwesenheit eines Schotterunterbaus. Gehrig u. a. (2007) haben ebenfalls festgestellt, dass die Zusatzbelastung durch Abriebemissionen in 120 Meter Abstand von der Gleisanlage um 75 Prozent abnimmt und in der Nähe der Gleisanlage im Jahresmittel maximal etwa 2 Mikrogramm pro Kubikmeter beträgt.

Die chemische Zusammensetzung der gefundenen  $PM_{10}$ -Partikel ist von Studie zu Studie sehr unterschiedlich und dies lässt sich darauf zurückführen, dass unterschiedliche eingesetzte Komponenten aus unterschiedlichen Materialien bestehen (Abbasi u. a., 2013). Die Kohlenstoffkonzentrationen können durch die Verwendung von Graphit-Stromabnehmern erhöht sein (Abbasi u. a., 2013). In Tabelle 4.1 findet sich eine Zusammenfassung der ausgewerteten Literatur zur chemischen Zusammensetzung.

Der Massenanteil metallischer Spurenelemente im  $PM_{10}$  beträgt in der Regel unter 5 Prozent im Jahresmittel (Burkhardt u. a., 2005; van Pinxteren u. a., 2017). Das Jahresmittel der  $PM_{10}$  Konzentrationen beträgt etwa 30 Mikrogramm pro Kubikmeter in städtischen Regionen in Berlin und Brandenburg (van Pinxteren u. a., 2017). Metallische Spurenelemente werden auch durch Abriebe aus Reifen und Bremsen von Kfz emittiert. In Tabellen 4.2 und 4.3 sind die Ergebnisse einiger Messkampagnen zu den chemischen Bestandteilen von Feinstäuben aus Kfz-Abrieben von Reifen und Bremsen aufgeführt.

**Tabelle 4.1: Chemische Zusammensetzung aus Emissionsprofilen für Abriebe aus dem Schienenverkehr. Es sind die Orte, Zeiten, Quellenangaben sowie die Spezieszusammensetzung angegeben. Elemente mit Anteilen von < 0,1 Prozent werden nicht berücksichtigt**

Quelle	Zusammensetzung
Abbasi u. a. (2012), in %	Al (5,3 bis 6,0), Ba (0,2 bis 0,3), Ca (5,0 bis 6,0), Cr (0,5 bis 1,2), Cu (7,4 bis 9,7), Fe (59,0 bis 63,9), Mg (4,0 bis 4,9), Mn (0,6 bis 0,7), Na (2,2 bis 3,7), Ni (0,5 bis 1,1), Sb (1,8 bis 2,6), Zn (3,1 bis 3,9)
Lorenzo u. a. (2006), in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Al (2,443), Ca (0,648), Fe (3,859)
Gehrig u. a. (2007), in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Al (0,062 bis 0,075), Ca (0,3 bis 0,4), Cr (0,006), Cu (0,053 bis 0,081), Fe (1,49 bis 1,76), K (0,29), Mg (0,067 bis 0,077), Mn (0,017 bis 0,018), Na (0,12), Ni (0,003), P (0,017 bis 0,018), Pb (0,012 bis 0,013), S (0,99 bis 1,03), Zn (0,036 bis 0,045)

**Tabelle 4.2: Chemische Zusammensetzung aus Emissionsprofilen für Abriebe aus Kfz-Reifen. Es sind die Orte, Zeiten, Quellenangaben sowie die Spezieszusammensetzung angegeben. Elemente mit Anteilen von < 0,1 Prozent werden nicht berücksichtigt**

Quelle	Zusammensetzung
Sjödín u. a. (2010), in %	Al (6,23), Ca (0,29), Fe (0,35), K (0,32), Si (27,57), Zn (3,48)
Amato u. a. (2010), in %	Ba (0,325), Cu (0,306), EC (3,21), OC (40,138), S (1,827), Zn (1)

Wie ersichtlich ist, gibt es bei den Abriebpartikeln aus Kfz und Schienenfahrzeugen starke Überschneidungen. Insgesamt ist die Abgrenzung deshalb schwierig, da auch die wöchentlichen Aktivitäten von Straßenbahn und Kfz-Verkehr ähnlich variieren dürfte. Jedoch könnte durch das Vorhandensein von spezifischen Metallen in erhöhter Konzentration in der Zusammensetzung der abriebrelevanten Bauteile der in Brandenburg fahrenden Straßenbahnen dazu führen, dass sich diese Metalle als Tracer herausstellen. Dies könnte durch eine auch im Vergleich zur deutlich stärker von Kfz befahrenen BE-117 höhere Konzentration solcher Elemente identifiziert werden, bleibt jedoch an dieser Stelle eine Arbeitshypothese, auf die sich allerdings der Erfolg dieser Studie stützt.

## 4.2 SPECIEUROPE

Die Datenbank SPECIEUROPE beinhaltet eine Sammlung von gemessenen Profilen der chemischen Zusammensetzung von Feinstäuben aus unterschiedlichsten Quellen, Studien und Regionen und ist abrufbar unter <https://source-apportionment.jrc.ec.europa.eu/>. Bisher sind keine Emissionsprofile aus dem Schienenverkehr in diese Datenbank eingepflegt. Die aus diesem Projekt erhaltenen Emissionsprofile werden in diese Datenbank eingepflegt.

In Tabellen 4.2 und 4.3 sind auch die in SPECIEUROPE enthaltenen chemische Profile für Abriebe aus Kfz-Reifen und Bremsen aus Messungen eingetragen. Es ist im Vergleich zu Tabelle 4.1 ersichtlich, dass die Profile Ähnlichkeiten in der Zusammensetzung aufweisen. Abriebe aus Kfz besitzen insgesamt jedoch einen niedrigeren Anteil eisenhaltiger Verbindungen und dafür einen größeren Anteil an Zink und Kupfer.

**Tabelle 4.3: Chemische Zusammensetzung aus Emissionsprofile für Abriebe aus Kfz-Bremsen. Es sind die Orte, Zeiten, Quellenangaben sowie die Spezieszusammensetzung angegeben. Elemente mit Anteilen von < 0,1 Prozent werden nicht berücksichtigt**

Quelle	Zusammensetzung
Colombi u. a. (2010), in %	Al (0,74), Ba (0,1), Ca (1,3), Cr (0,4), Cu (3,3) Fe (41), K (0,21), Mn (0,3), S (0,68), Si (2,2) Ti (0,11), Zn (0,99)
Wählin u. a. (2006), PM <sub>10</sub> in µg/m <sup>3</sup>	Al (2,4), Ba (1,11), Ca (1,1), Cr (0,36), Cu (4,4), Fe (41), Mn (0,22), Mo (0,18), Pb (0,46), S (3,6), Sb (0,86), Si (0,3), Sn (0,44), Zn (0,64), Zr (0,22)
Wählin u. a. (2006), PM <sub>10-2,5</sub> in µg/m <sup>3</sup>	Al (1,8), Ba (1,1), Ca (1,6), Cr (0,42), Cu (4,3), Fe (38), Mn (0,31), Mo (0,19), Pb (0,4), S (2,9), Sb (1,1), Si (3,3), Sn (0,51), Ti (0,3), Zn (0,9), Zr (0,31)

Die Datenbank SPECIEUROPE kann für die a-priori Untersuchungen in diesem Projekt wenig Aufschlussreiches beitragen zu den Immissionen durch Schienenfahrzeuge. Jedoch können die Profile für Abriebe aus dem Kfz-Verkehr mit den Profilen abgeglichen werden, die durch die PMF in diesem Projekt gewonnen werden. Dies trifft insbesondere zu auf Profile von aufgewirbeltem Staub, Fahrzeugemissionen und Hintergrundbelastung. Auf diese Weise wird eine Interpretation und Abgrenzung der Emissionsprofile erleichtert. Zusätzlich ist durch den Mangel an Profilen aus dem Schienenverkehr ein Bedarf für zusätzliche Forschungsarbeiten identifizierbar, speziell angesichts der Tatsache, dass der Schienenverkehr im Zuge verstärkter Anstrengungen zum Klimaschutz sowohl zum Transport von Gütern als auch Personen weiter ausgebaut werden wird.

### 4.3 Zusammenfassung

Insgesamt hat die obige Literaturrecherche zum einen aufgezeigt, dass das Thema Straßenbahnabriebe bisher nicht bearbeitet wurde und zum anderen, dass die umfangreichen Arbeiten zu Personen- und Güterzügen nur bedingt übertragbar sind auf Straßenbahnen. Diese Tatsache ergibt sich aus großen Unterschieden zwischen diesen Zugsystemen und Straßenbahnen in Bezug auf Gesamtmasse, Fahrgeschwindigkeit, Fahrprofil und der Häufigkeit von Bremsvorgängen. Straßenbahnen sind mit Gesamtmassen von deutlich unter 100.000 Kilogramm wesentlich leichter als reguläre Personen- und Güterzüge. Die Fahrgeschwindigkeit von Straßenbahnen überschreitet 50 Kilometer pro Stunde in der Regel nicht, während andere Zugsysteme mit mindestens 80 Kilometer pro Stunde verkehren, Schnellzüge auch deutlich über 200 Kilometer pro Stunde. Straßenbahnen bremsen im Vergleich zu Zügen deutlich häufiger und von niedrigeren Geschwindigkeiten. Da die Emissionen durch Bremsabrieb überproportional mit der Geschwindigkeit ansteigen und für mehr als die Hälfte des Gesamtabriebs verantwortlich sein dürften, ist zu vermuten, dass die Abriebemissionen durch Straßenbahnen deutlich geringer ausfallen als durch Züge bezogen auf die Fahrzeugmasse. Die Auswertung der Literatur und der Datenbank SPECIEUROPE hat ergeben, dass die Zusammensetzung der abriebelevanten Komponenten vielfältig sein kann, jedoch grundsätzlich nennenswerte Anteile von Eisen, Kupfer und Aluminium in den Abriebpartikeln zu erwarten sind. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten zur Zusammensetzung wie auch Komposition und Verhältnisse der Bestandteile der Straßenbahnbauteile wurden Proben von einer Straßenbahn im Depot der Brandenburgischen Verkehrsbetriebe nach Art von forensischer Methodik genommen.



## 5 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte beschrieben. Dabei werden zunächst die Ergebnisse der direkten forensischen Messungen an der Straßenbahn dargestellt. Im Anschluss werden dann die Ergebnisse der chemisch-optischen Analytik einzeln und dann die der PMF-Rezeptormodellierung erörtert.

### 5.1 Forensische Abriebprobennahme

Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, ist es aufgrund der dünnen Basis an Daten und der hohen Korrelation der Verkehrsstärken von Straßenbahnen und regulärem Kfz-Verkehr möglicherweise schwierig, die mittels PMF abgeleiteten Profile eindeutig zuzuordnen beziehungsweise zwischen Bremsabrieb und Straßenbahn-Abrieben zu unterscheiden. Deshalb sind in diesem Kapitel die Vorgehensweise und Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Messungen in Anlehnung an in der Forensik übliche Bestimmungsmethoden dargestellt.

Die an den oben gezeigten Stellen entnommenen Abriebproben sind chemisch analysiert worden und die Elementarkonzentration anschließend gewichtet worden. Dafür wurde zunächst für jede Messung eine normalisierte Konzentration berechnet, um den Einfluss der unterschiedlichen Massebeladung zu eliminieren. Die folgenden Wichtungsfaktoren wurden auf Basis der Literaturwerte für die jeweiligen Bauteile angewandt:

- Schiene 12 Prozent,
- Reifen 23 Prozent,
- Stromabnehmer 6 Prozent,
- Bremsscheibe 60 Prozent.

Im Anschluss wurden die gewichteten, normalisierten Konzentrationen der einzelnen Elemente berechnet und dargestellt.

Wie an der Abbildung 5.6 zu erkennen ist, sind folgende Metalle in relevanten Konzentration festgestellt worden: Kalium, Titan, Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel, Kupfer, Zink, Strontium, Barium und Blei. Abgesehen von Nitrit sind alle Ionen in relevanter Konzentration vorhanden. Die festgestellten Metalle dürften aus den Materialien der Bauteile stammen und damit direkt mit dem Fahrzeug in Verbindung stehen. Die nachgewiesenen Ionenkonzentrationen sind auf die in den Abbildungen zu sehenden Staubablagerungen zurückzuführen. Dadurch, dass es sich beim Fahrzeug um eine abgestellte Straßenbahn handelt, dürfte die Zusammensetzung der Stäube im Vergleich zu den im November und Dezember 2020 vorgenommenen Messungen deutlich abweichen. Auch die genauen normierten Konzentrationen der festgestellten Metalle hängen im Wesentlichen von den gewählten Wichtungsfaktoren ab, weshalb eine Diskussion beziehungsweise Sensitivitätsanalyse des in Abbildung 5.6 gezeigten Profils durchgeführt worden ist. Diese Analyse ist durch einfache Verschiebung der Wichtungsfaktoren um  $\pm 3$  Prozent durchgeführt worden. Wesentliche Unterschiede in puncto der feststellbar vorhandenen beziehungsweise dominanten Metalle oder Ionen konnten dabei jedoch nicht festgestellt werden. Deshalb ist das in Abbildung 5.6 abgebildete Profil als Indikation für die metallische Zusammensetzung der Straßenbahnbauteile hervorragend geeignet. Diese Eignung erstreckt sich nicht auf die Ionenkonzentrationen, die aufgrund sekundärer Prozesse beziehungsweise Staubablagerungen entstehen. Das in Abbildung 5.6 dargestellte Profil dient als Vergleichsprofil für die PMF-Analyse.



Abbildung 5.1: Aufnahme eines Stromabnehmers aus Graphit auf dem Betriebsgelände der VBBr (fotografiert durch Dr. Andreas Kerschbaumer)



Abbildung 5.2: Aufnahme eines Radreifens einer üblichen Straßenbahn auf dem Betriebsgelände der VBB (fotografiert durch Dr. Andreas Kerschbaumer)



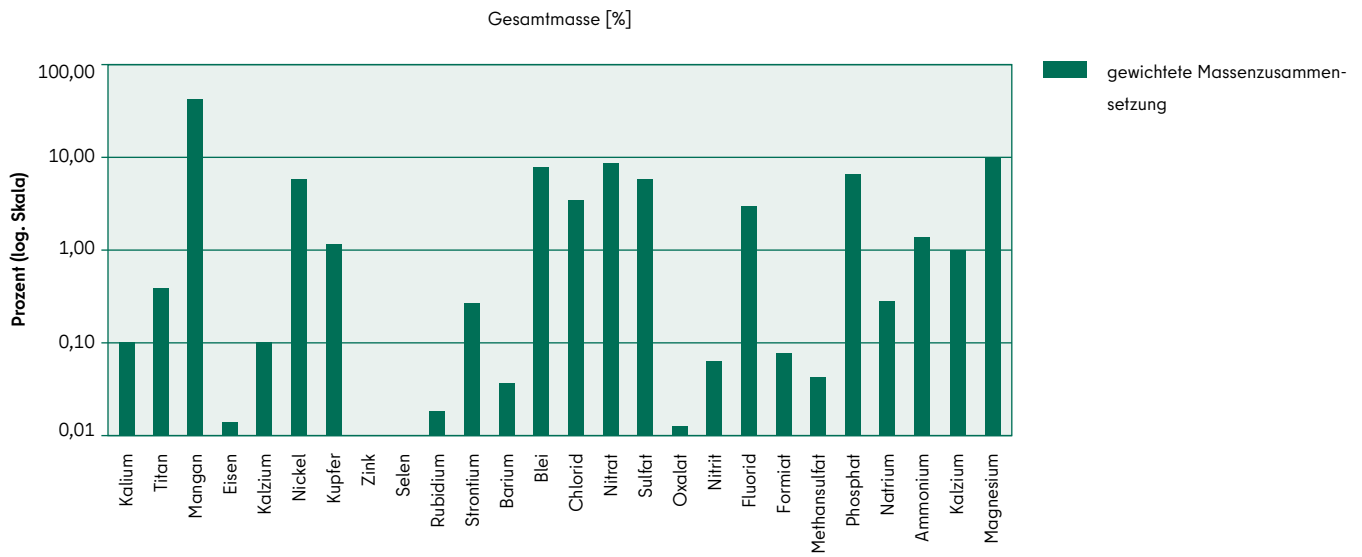
Abbildung 5.3: Aufnahme einer Bremsscheibe an einer angetriebenen Achse einer üblichen Straßenbahn auf dem Betriebsgelände der VBB (fotografiert durch Dr. Andreas Kerschbaumer)



Abbildung 5.4: Aufnahme einer Bremsscheibe an einer passiven Achse einer üblichen Straßenbahn auf dem Betriebsgelände der VBB, deutlich sichtbare Staubablagerungen sind erkennbar (fotografiert durch Dr. Andreas Kerschbaumer)



Abbildung 5.5: Aufnahme eines Schienengleises der VBB nahe Hauptbahnhof Brandenburg an der Havel (fotografiert durch Dr. Andreas Kerschbaumer)



**Abbildung 5.6:** Darstellung der normierten elementaren Konzentration der festgestellten Metalle und Ionen für die gewichteten Werte aus den forensischen Filtermessungen an der Straßenbahn, eBC konnte nicht ermittelt werden aufgrund der Beschädigungen an den Untersuchungsfiltren

## 5.2 Chemische und optische Filteranalyse

Die Analyse der Filter auf Metalle und Ionen wurden im Labor des TROPOS beziehungsweise auf Kohlenstoffäquivalent (eBC) im Labor der SenUMVK in Berlin durchgeführt. Der Zweck dieser Messungen ist es, die möglichen PM<sub>10</sub>-Quellen später durch statistische Modellierung einzuordnen und zu quantifizieren. In diesem ersten Schritt sind die Filter auf ihre Bestandteile untersucht worden. Im Folgenden sind zunächst die Metalle und im Anschluss die Ionen in absteigender Reihenfolge der Konzentrationen abgehandelt.

### 5.2.1 Eisen (Fe)

Eisen weist mit 0,3 bis 0,6 Mikrogramm pro Kubikmeter etwas höhere Konzentrationen auf und stellt rund 2 bis 3 Prozent der gesamten PM<sub>10</sub>-Masse. Wie in Abbildung 5.7 zu erkennen ist, sind die Eisenkonzentrationen an den verkehrsexponierten Messstellen größer, jedoch tritt auch in Berlin-Mitte eine messbare Konzentration auf. Eisen weist an den Verkehrsstationen einen eindeutigen Wochenrhythmus auf und die Werte sind in BE-117 etwas höher als in BB-049 (Abbildung 5.8). Eisen kommt teilweise in durch Verkehr und Wind aufgewirbelten Bodenpartikeln vor (Ntziachristos und Boulter, 2003), jedoch auch insbesondere ist es Bestandteil von Abrieben durch Reibung an Fahrzeugteilen, wie etwa Bremsen, was durch die erhöhten Konzentrationen an den Verkehrsstationen verdeutlicht wird (Rauterberg-Wulff, 1998; van Pinxteren u. a., 2017). Eisen ist ein Element, das auch im Straßenbahnprofil gemessen wurde.

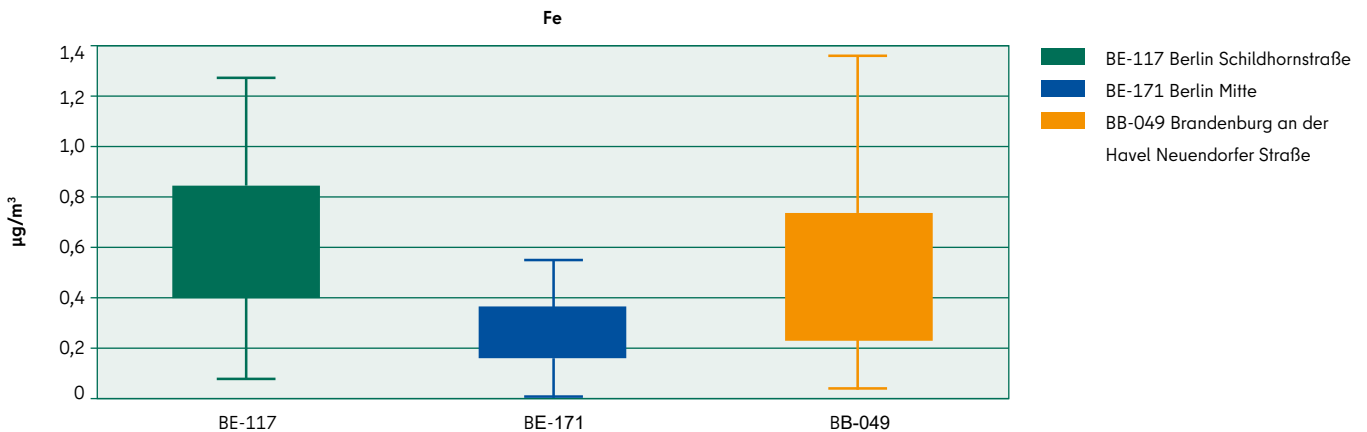


Abbildung 5.7: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Eisen (Fe) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

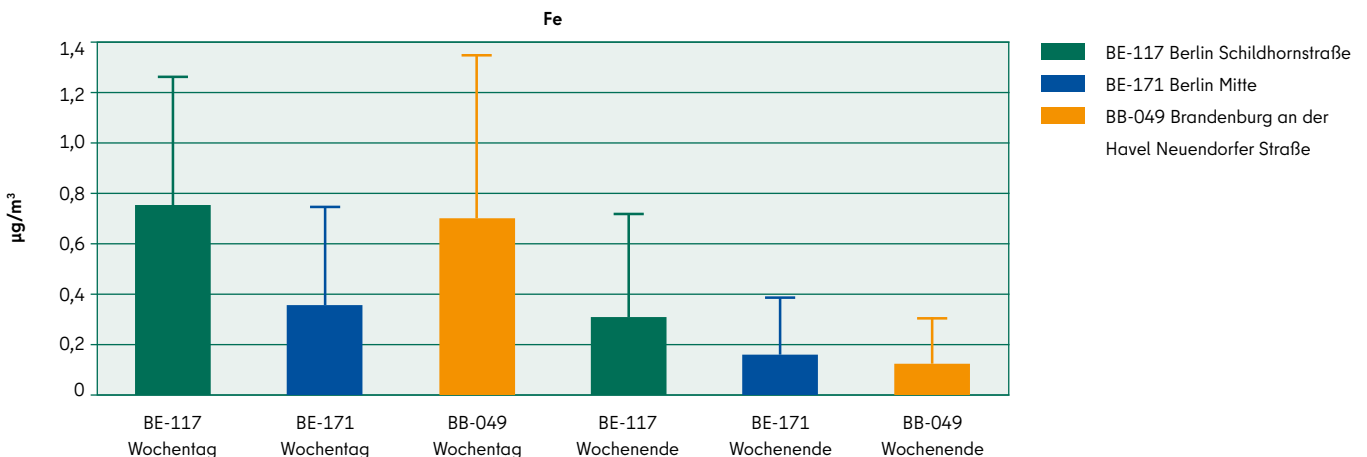


Abbildung 5.8: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Eisen (Fe) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen



## 5.2.2 Kalium (K)

Die Konzentrationen von Kalium liegen im Mittel zwischen 0,1 und 0,2 Mikrogramm pro Kubikmeter (Abbildung 5.9), was rund 0,5 Prozent des gesamten  $PM_{10}$  entspricht. In Berlin-Mitte treten teilweise etwas höhere Konzentrationen als an den anderen Stationen auf. Die Windrichtung spielt keine Rolle, während der Wochenrhythmus an allen Stationen etwa gleich ausgeprägt ist (Abbildung 5.10). Kalium stammt häufig aus Verbrennungsprozessen, wie sie zum Beispiel in Kraftwerken vorkommen, aber auch im Verkehr.

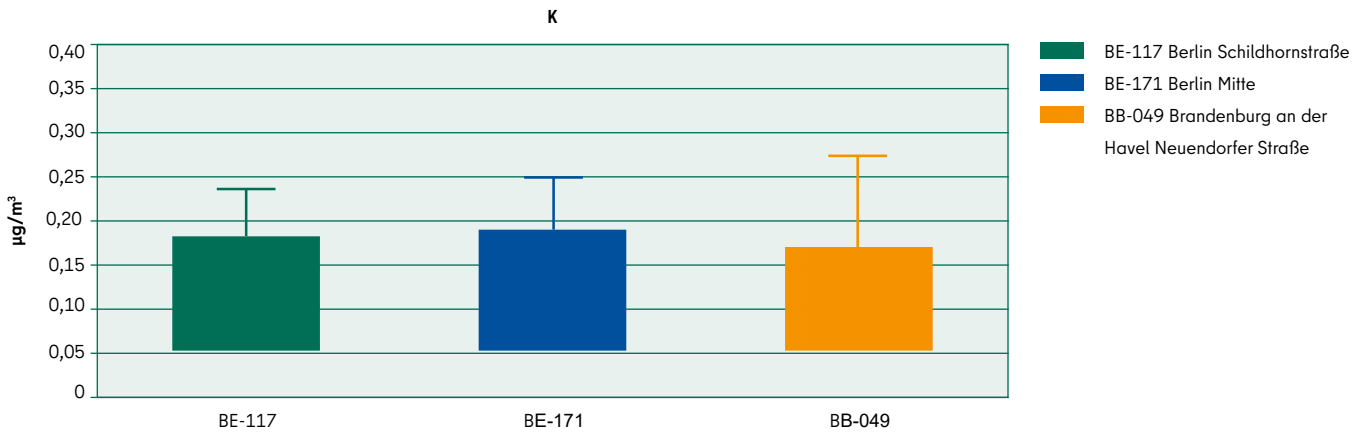


Abbildung 5.9: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Kalium (K) im  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

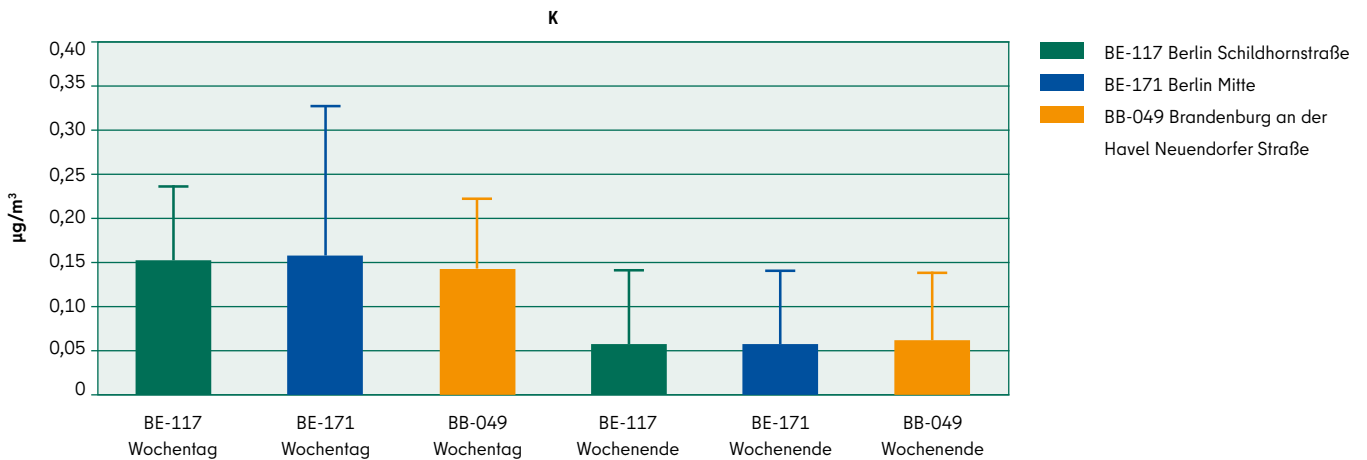


Abbildung 5.10: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Kalium (K) im  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.3 Zink (Zn)

Zink ist in Spurenkonzentration in Höhe von circa 0,01 bis 0,025 Mikrogramm pro Kubikmeter beziehungsweise 0,1 Prozent im PM<sub>10</sub> vorhanden. Es wird durch Reifenabrieb und in Heizkraftwerken freigesetzt (van Pinxteren u. a., 2017; Rauterberg-Wulff, 2000). Dies wird durch den Wochengang sowie die regional ähnlichen Konzentrationen bestätigt. Die etwas erhöhten Werte in BE-117 sind möglicherweise mit dem Anteil von Schwerverkehr und damit einem höheren Reifenabrieb zu erklären.

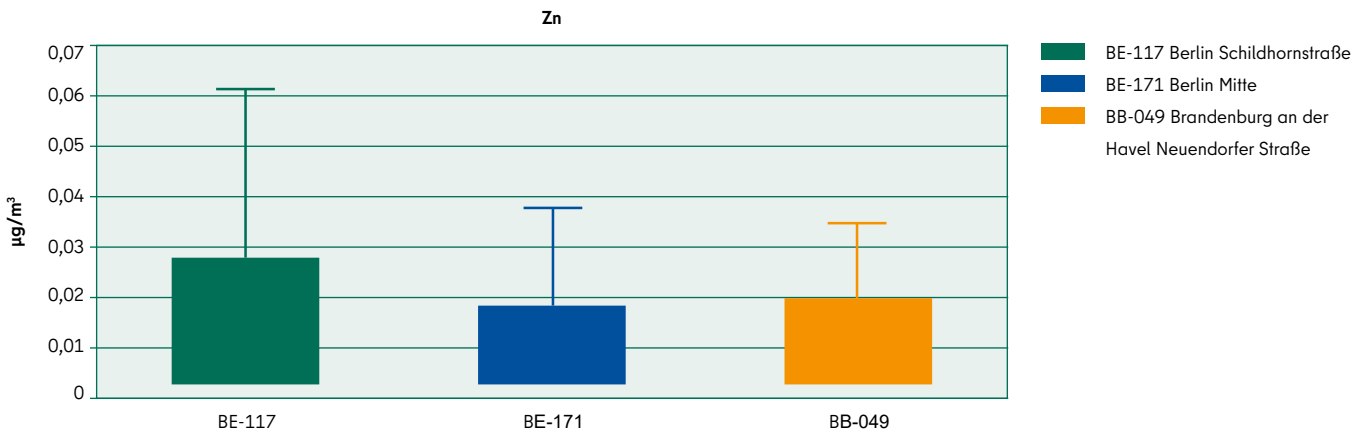


Abbildung 5.11: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Zink (Zn) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

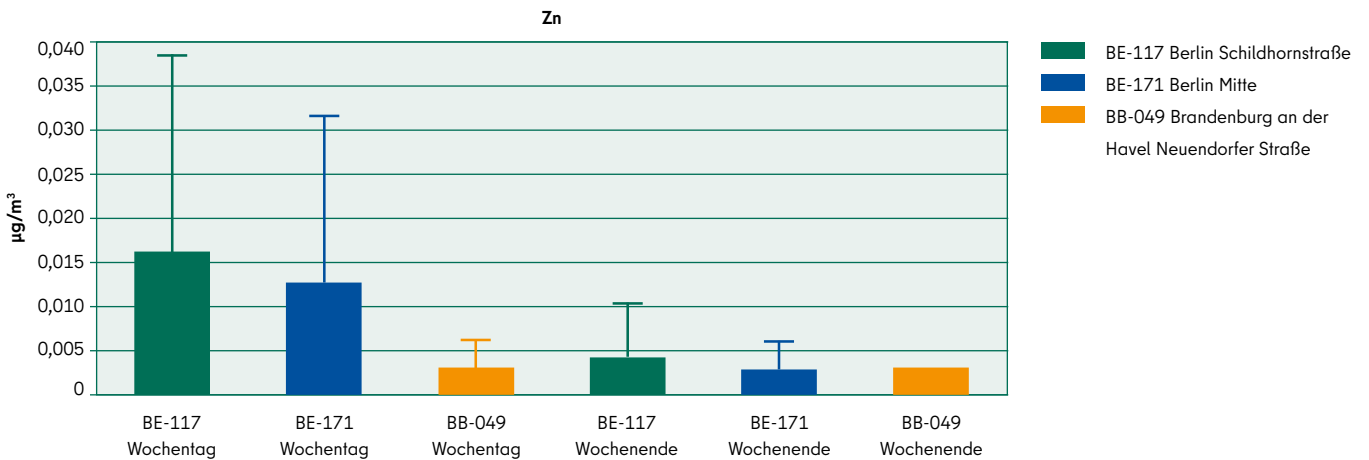


Abbildung 5.12: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Zink (Zn) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

## 5.2.4 Kupfer (Cu)

Für Kupfer sind in Abbildung 5.13 und 5.14 ebenfalls die Boxplots für die gesamte Periode sowie für die Stratifizierung nach Werktagen dargestellt. Die Verkehrsstationen weisen höhere Konzentrationen auf, insbesondere BE-117. Auch Kupfer ist mit maximal etwa 0,01 Mikrogramm pro Kubikmeter beziehungsweise 0,1 Prozent in BE-117 ein Spurenelement. Der Wochenrhythmus ist deutlich ausgeprägt an den Verkehrsstationen. Wie Barium, ist auch Kupfer ein Metall, das durch Abriebprozesse an Fahrzeugteilen in die Luft gerät, was durch die Stratifizierung deutlich wird (van Pinxteren u. a., 2017; Rauterberg-Wulff, 2000). Kupfer ist ebenfalls eines der Metalle, das in den forensischen Messungen an der Straßenbahn aufgefunden wurde.

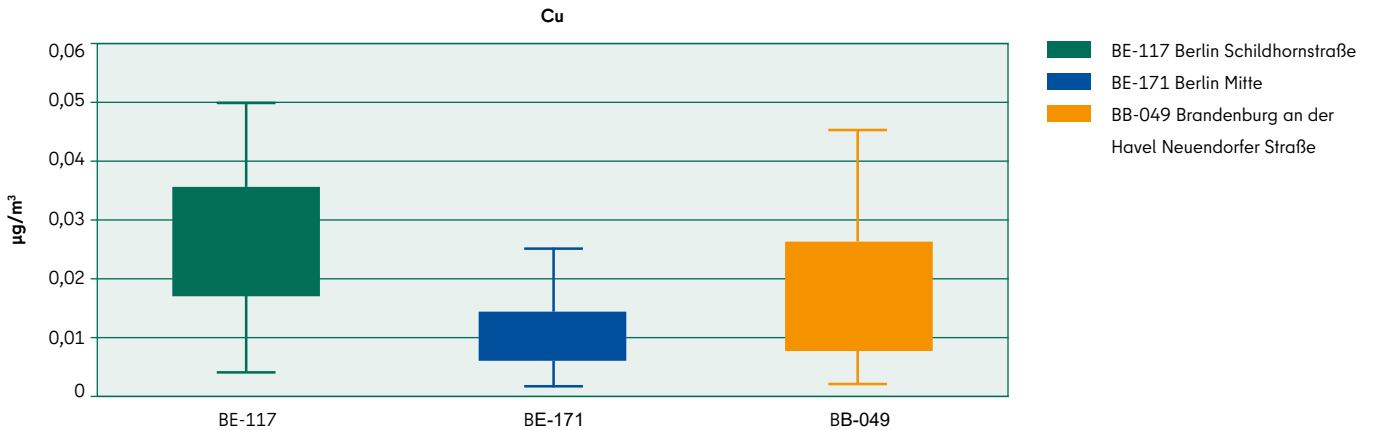


Abbildung 5.13: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Kupfer (Cu) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

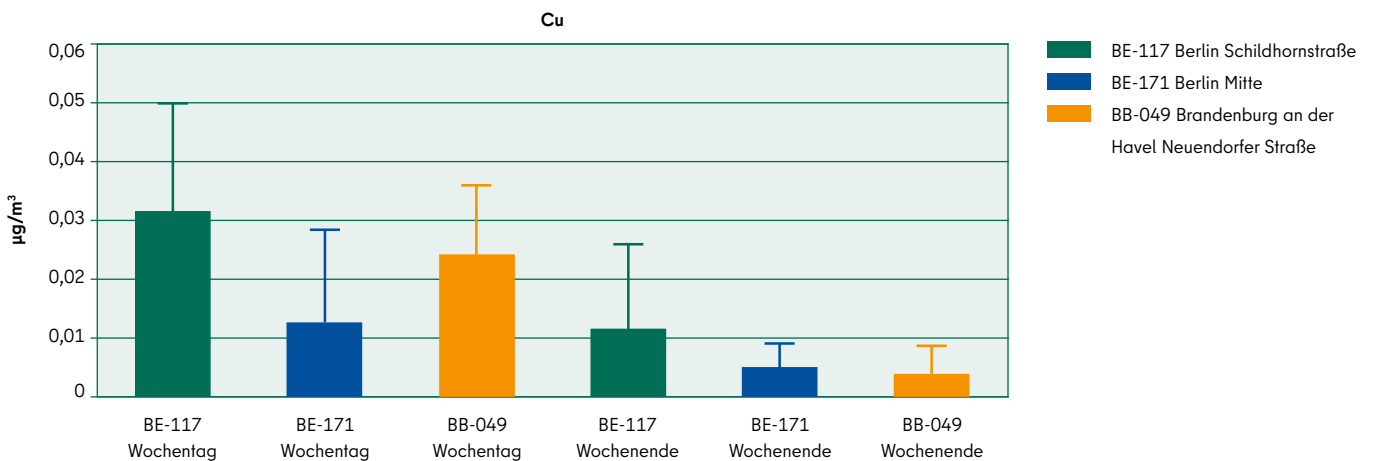


Abbildung 5.14: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Kupfer (Cu) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.5 Blei (Pb)

Blei wird in Spurenstärke an allen Standorten nachgewiesen, mit Werten ebenfalls von etwa 0,01 Mikrogramm pro Kubikmeter (0,06 Prozent). Die gleichmäßigere Verteilung von Blei auch an Wochentagen deutet darauf hin, dass der Verkehr die Hauptquelle ist, vornehmlich wohl durch die Aufwirbelung von durch Blei belastetem Material, welches ursprünglich auf Prozesse der Metallverarbeitung oder Kohleverbrennung zurückgehen dürfte (van Pinxteren u. a., 2017). Blei wird nicht chemisch abgebaut, sodass es über eine größere Verweildauer verfügt.

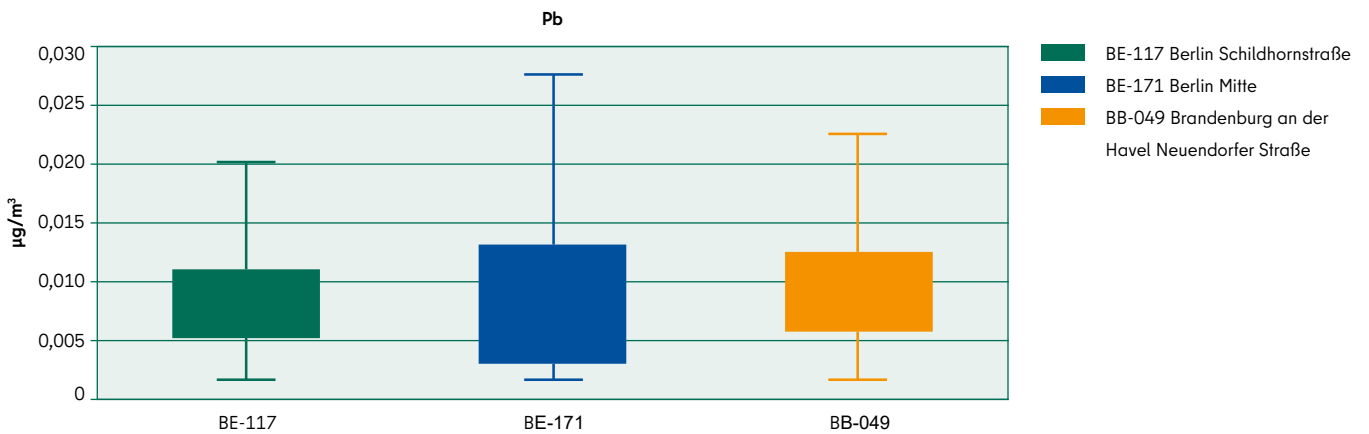


Abbildung 5.15: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Blei (Pb) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

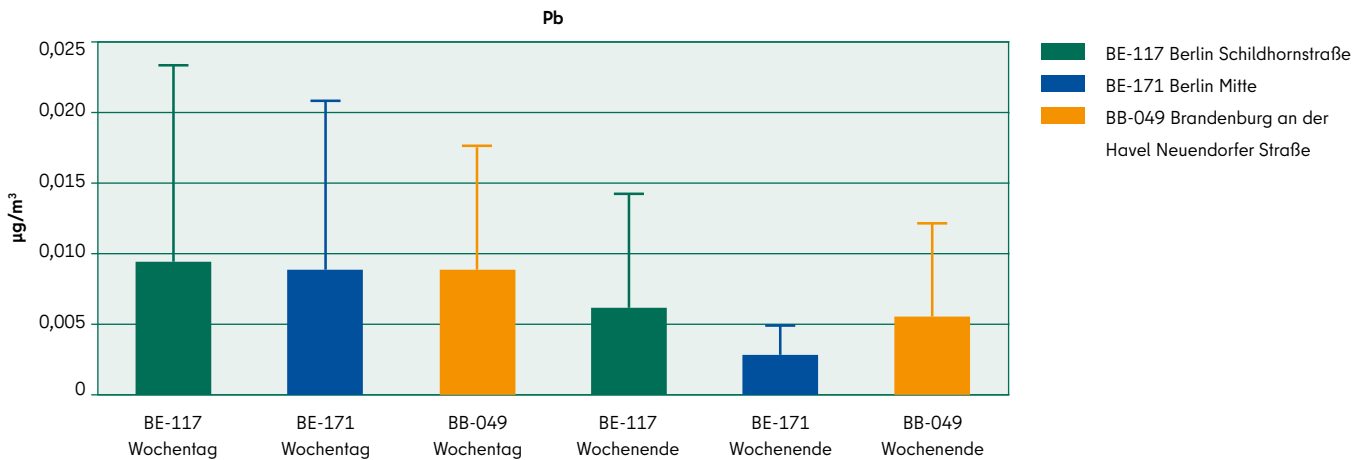


Abbildung 5.16: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Blei (Pb) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

## 5.2.6 Strontium (Sr)

Dass Strontium in Spuren Mengen vorliegt, liegt an den Nachwirkungen der Tschernobyl-Katastrophe in 1986 und der damit verbundenen Einlagerung in der Bodenkruste (van Pinxteren u. a., 2017). Die regional sehr ähnliche Verteilung unter den Stationen ist an Tagen mit Ostwind nicht mehr vorhanden, wenn an den Verkehrsstationen höhere Konzentrationen auftreten. Möglicherweise ist der Grund dafür, dass Strontium sich im Staub niederlässt und wieder aufgewirbelt wird durch den Verkehr. Ebenso wie Blei, ist Strontium in den Messungen an der Straßenbahn festgestellt worden, jedoch nicht in relevanten Konzentrationen von etwa 0,01 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 0,06 Prozent des  $PM_{10}$ .

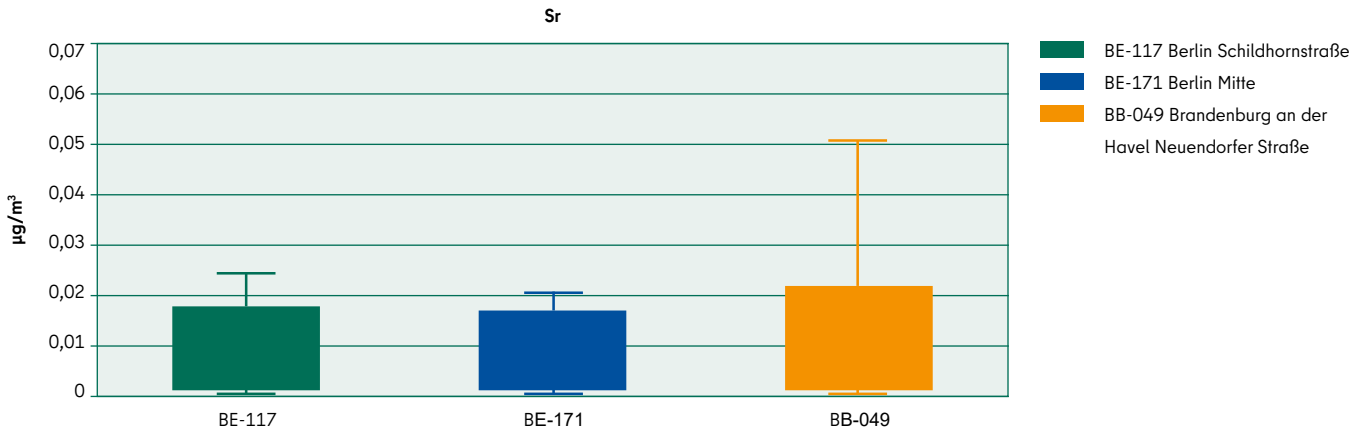


Abbildung 5.17: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Strontium (Sr) im  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

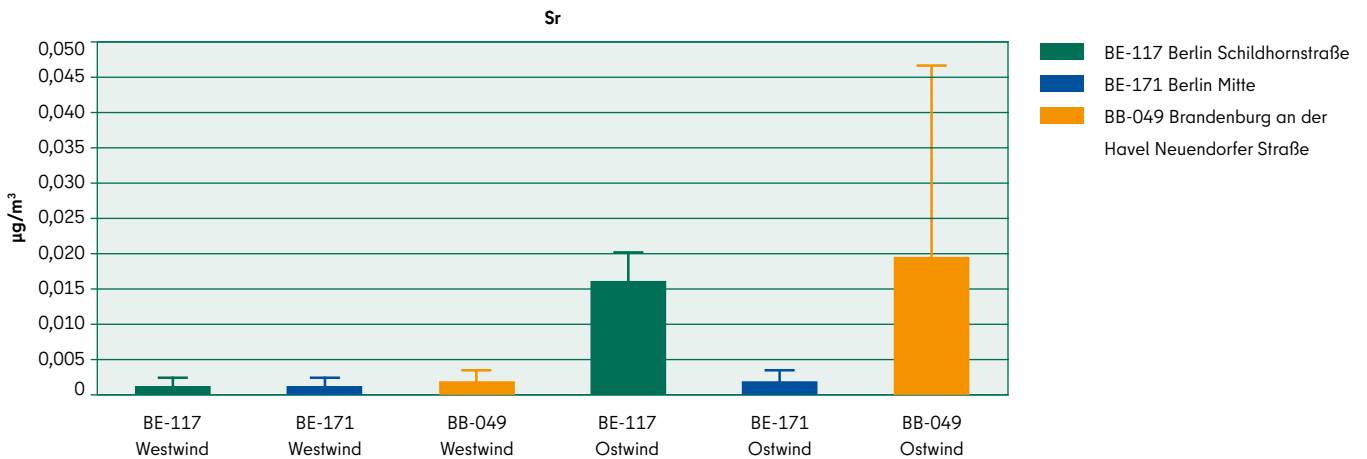


Abbildung 5.18: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit Westwind (links) und Ostwind (rechts) von Strontium (Sr) im  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.7 Mangan (Mn)

Mangan stellt mit Konzentrationen unter 0,02 Mikrogramm pro Kubikmeter beziehungsweise 0,05 Prozent sicherlich ein Spurenelement dar, jedoch ist die Tatsache auffallend, dass die Konzentration in BB-049 deutlich größer ist als in BE-117. Beide Verkehrsstationen weisen höhere Konzentrationen auf als Berlin-Mitte. Der Wochenrhythmus existiert auch für Mangan, was darauf hindeutet, dass der Verkehr die Hauptquelle darstellt. In diesem Zusammenhang ist es interessant, dass in BB-049 trotz der geringeren Verkehrsstärke eine erhöhte Konzentration an Werktagen auftritt. Dies könnte auf die Manganemissionen aus dem Abrieb der Straßenbahn zurückzuführen sein, da dieses auch in den Gleisen und Bremsen verarbeitet ist.

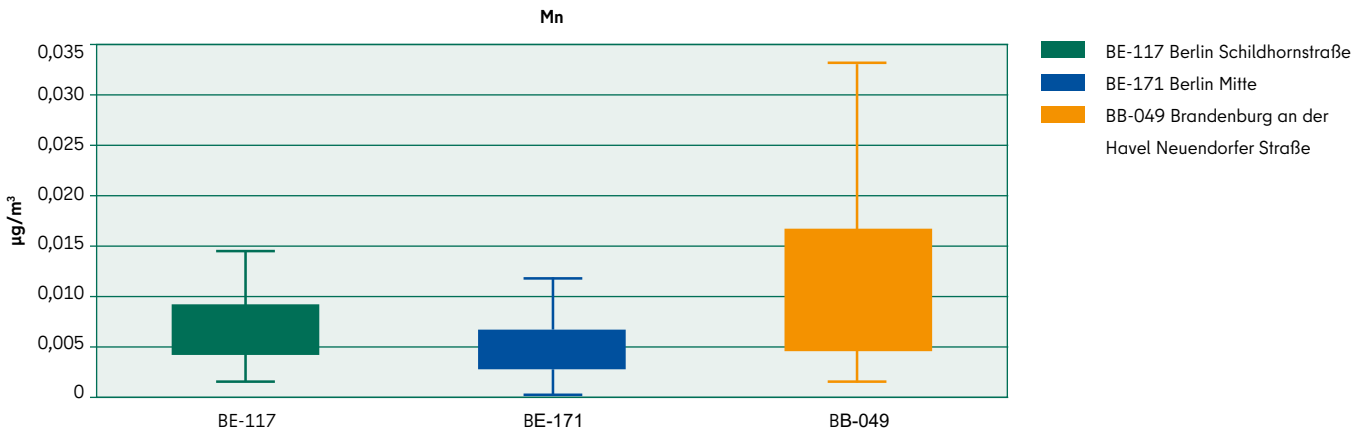


Abbildung 5.19: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Mangan (Mn) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

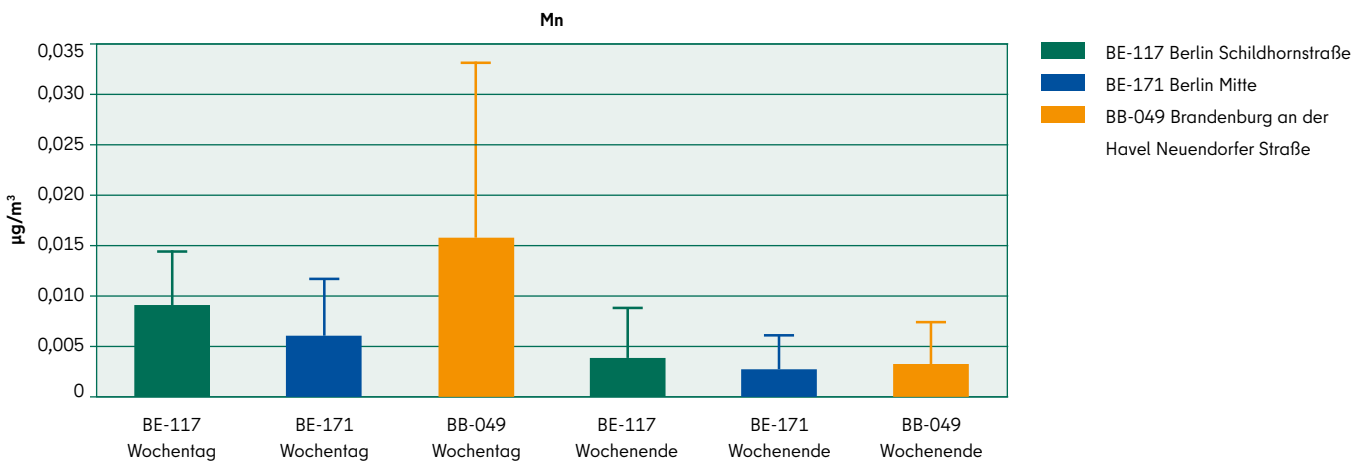


Abbildung 5.20: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Mangan (Mn) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

## 5.2.8 Barium (Ba)

Für das Element Barium sind in Abbildung 5.21 und 5.22 die Boxplots der Gesamtperiode sowie für die Stratifizierung in Wochentage dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein deutlicher Wochenrhythmus vorliegt. An den Verkehrsstationen liegt die Barium-Konzentration an Werktagen deutlich über denen in Berlin-Mitte. An der Station BE-117 ist die Konzentration auch im Vergleich zu BB-049 erhöht. Der Wochenrhythmus weist darauf hin, dass Barium als Metall aus verkehrsbedingten Abriebprozessen stammen dürfte (van Pinxteren u. a., 2017; Rauterberg-Wulff, 1998). Barium ist auch in den forensischen Proben der Straßenbahn nachgewiesen worden. Barium stellt mit Werten von im Mittel unter 0,01 Mikrogramm pro Kubikmeter oder unter 0,05 Prozent ein Spurenmetall dar.

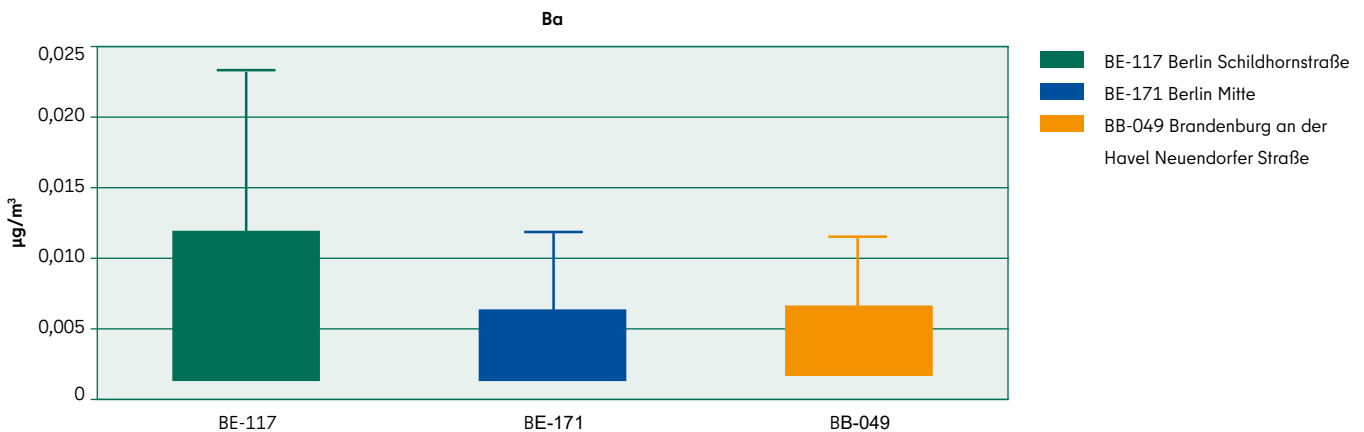


Abbildung 5.21: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Barium (Ba) im  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

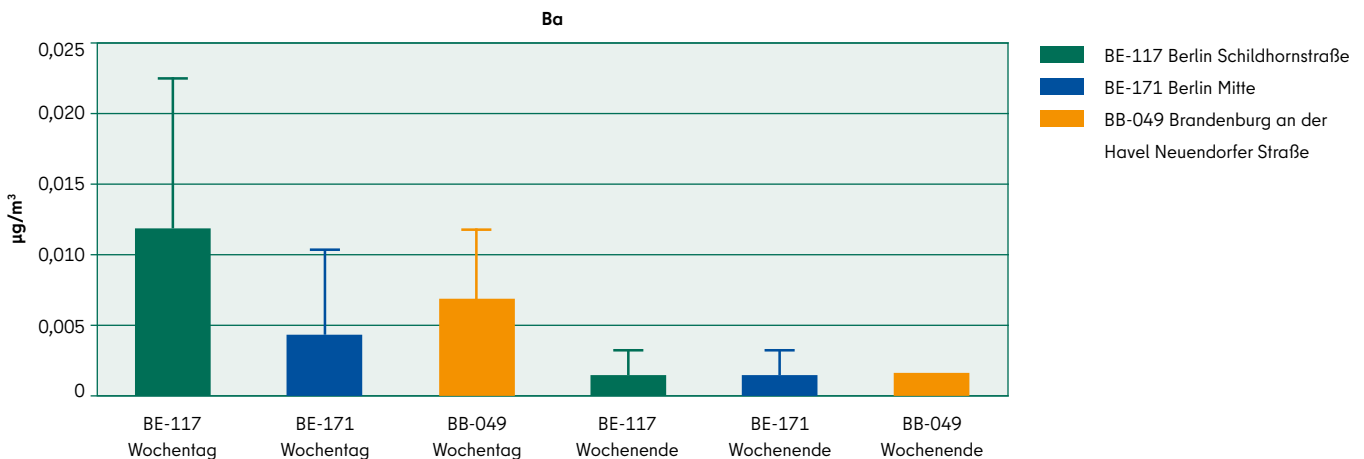


Abbildung 5.22: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Barium (Ba) im  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.9 Titan (Ti)

Beim Titan handelt es sich mit Konzentrationen bis etwa 0,01 Mikrogramm pro Kubikmeter beziehungsweise 0,05 Prozent ebenfalls um ein Spurenelement. Titan weist an den Verkehrsstationen höhere Konzentrationen auf und auch einen klaren Wochenrhythmus. Titan wird durch den Bremsabrieb erzeugt (Rauterberg-Wulff, 1998) und ist auch in den forensischen Messungen an der Straßenbahn nachgewiesen worden.

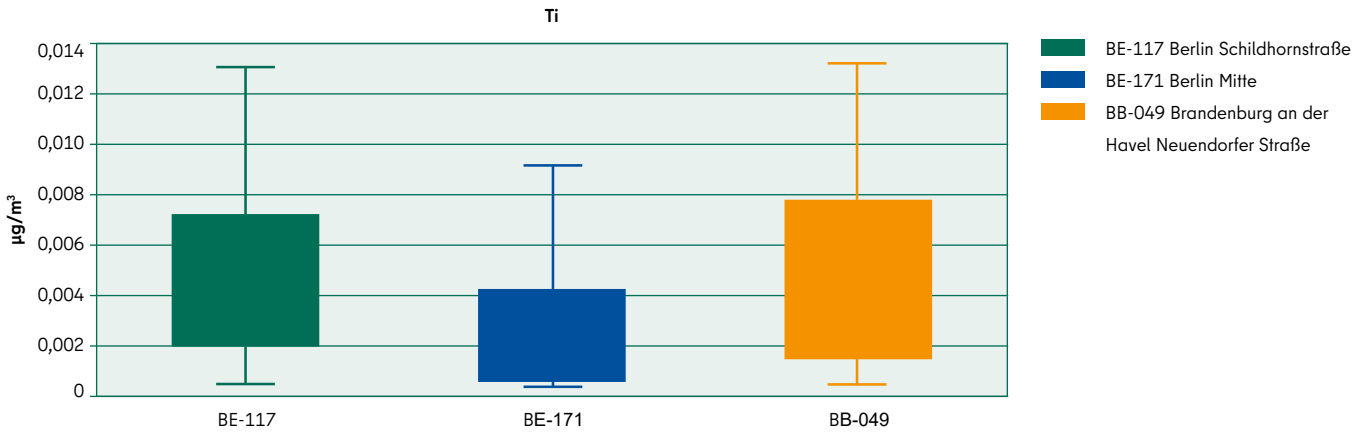


Abbildung 5.23: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Titan (Ti) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

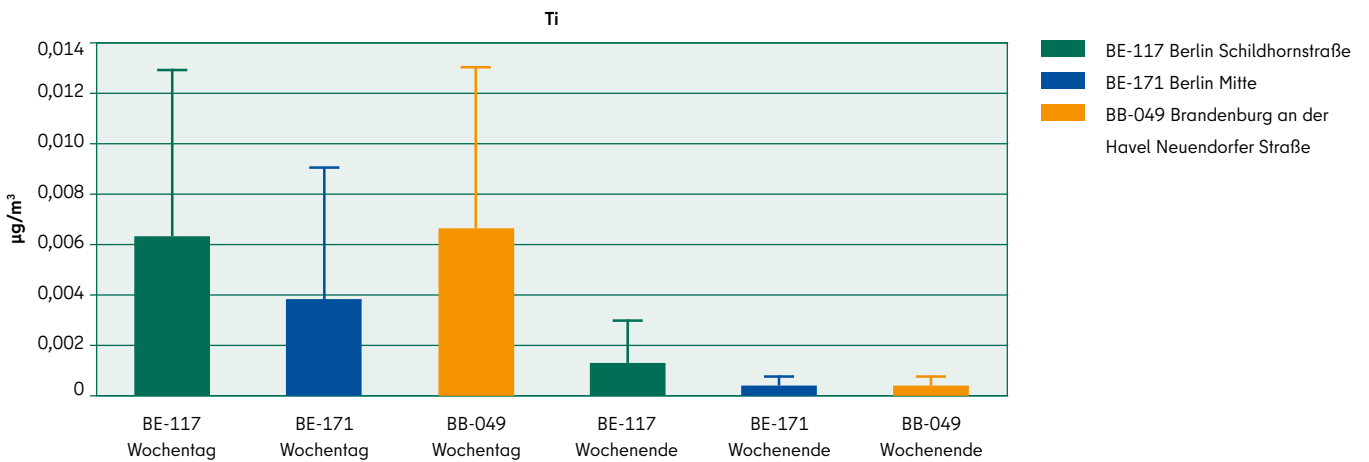


Abbildung 5.24: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentage (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Titan (Ti) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen



### 5.2.10 Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Nitrat wurde im Messzeitraum als größter individueller Bestandteil mit etwa 13 bis 18 Mikrogramm pro Kubikmeter im PM<sub>10</sub> festgestellt, was über 50 Prozent der gesamten Belastung ausmacht. In Berlin sind die Werte dabei höher als in Brandenburg. Es kann sowohl bei Ostwind (Westwind) als auch an Werktagen (Sonn- und Feiertagen) eine höhere (niedrigere) Konzentration festgestellt werden. Ersteres dürfte mit dem Ferntransport stark belasteter Luft aus Industrie- und Verbrennungsprozessen aus Osteuropa in Verbindung stehen (van Pinxteren u. a., 2017), während der Wochenrhythmus wahrscheinlich mit einer zusätzlichen Bildung durch die Oxidation des dann mehr vorhandenen NO<sub>2</sub> in Zusammenhang steht (van Pinxteren u. a., 2017).

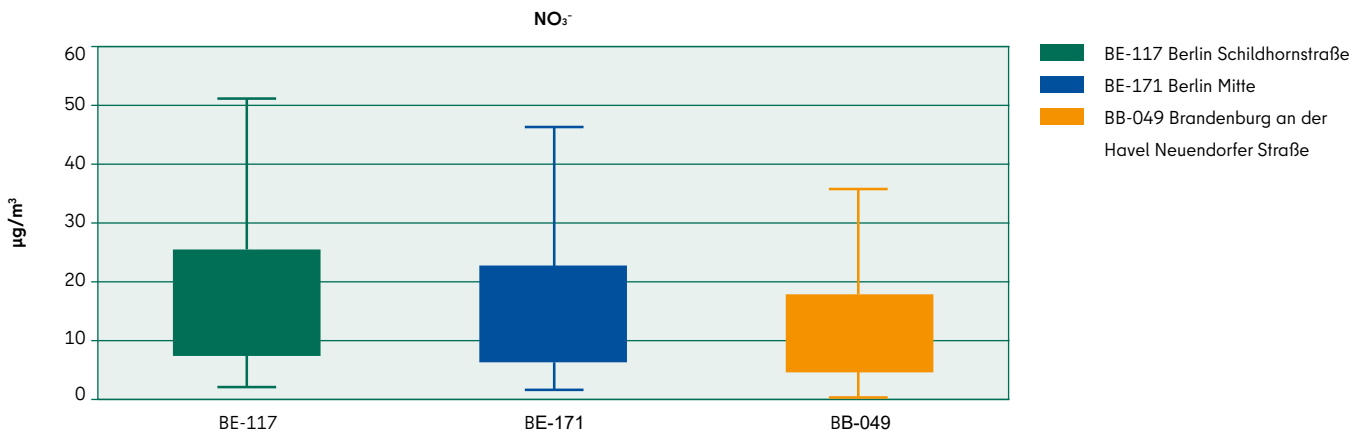


Abbildung 5.25: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

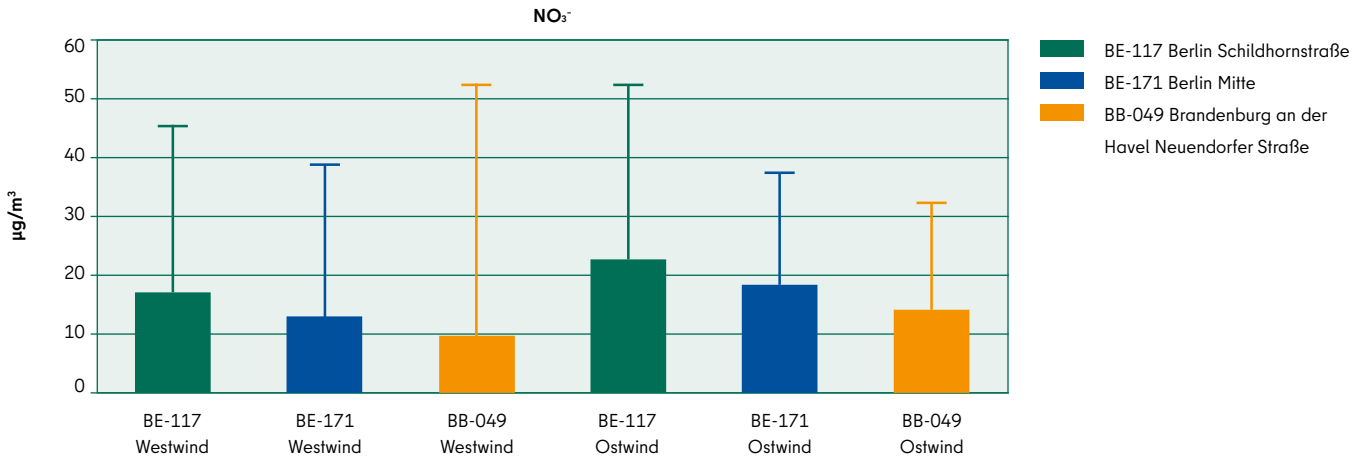


Abbildung 5.26: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

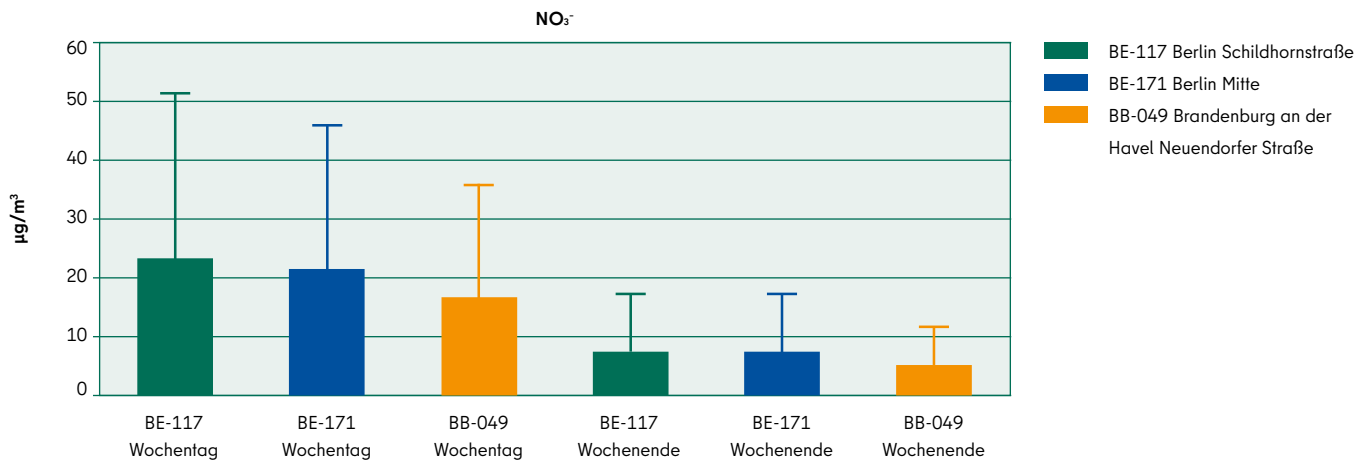


Abbildung 5.27: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.11 Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

Sulfat trägt rund 12 Mikrogramm pro Kubikmeter in Berlin und 7 Mikrogramm pro Kubikmeter in Brandenburg zum gesamten PM<sub>10</sub> bei und ist damit der zweithöchste individuelle Beitrag, mit etwa 30 bis 35 Prozent Anteil an der Gesamtbelastung. Die städtische Konzentration ist fast doppelt so hoch wie die in Brandenburg. An allen Standorten gibt es einen Wochenrhythmus und höhere Werte bei Winden aus Osten. Letzteres ist auf den Ferntransport belasteter Luft aus Osteuropa mit vielen Kohlekraftwerken zurückzuführen (van Pinxteren u. a., 2017). Der Wochenrhythmus könnte mit Aktivitätsraten von Kraftwerken oder Metallurgiebetrieben und der damit in Verbindung stehenden Verbrennung zusammenhängen (van Pinxteren u. a., 2017). Solche Betriebe sind in und um Berlin in größerer Zahl vorhanden als in und bei Brandenburg. Dies kann an dieser Stelle jedoch nur eine Spekulation bleiben.

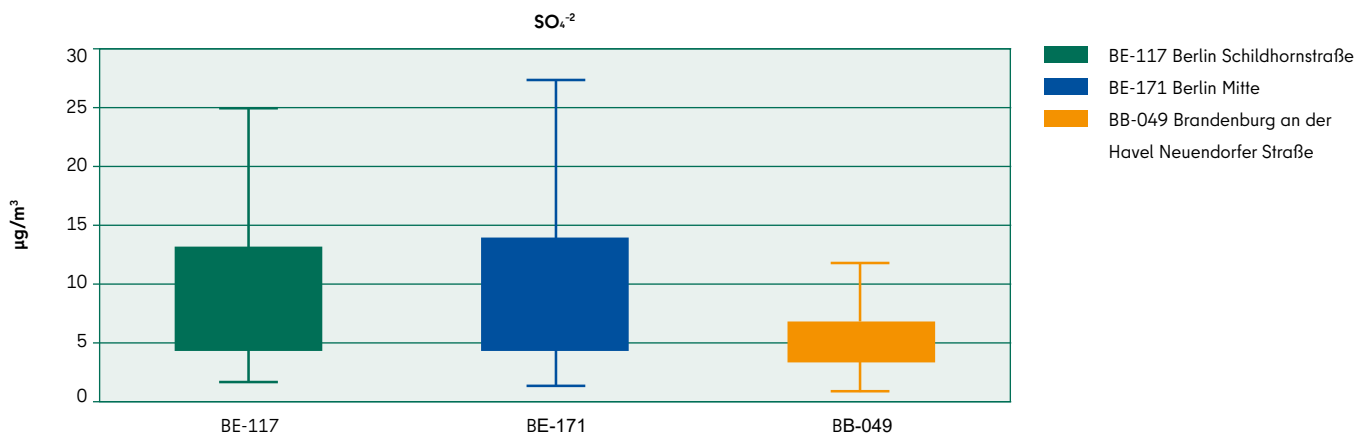


Abbildung 5.28: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

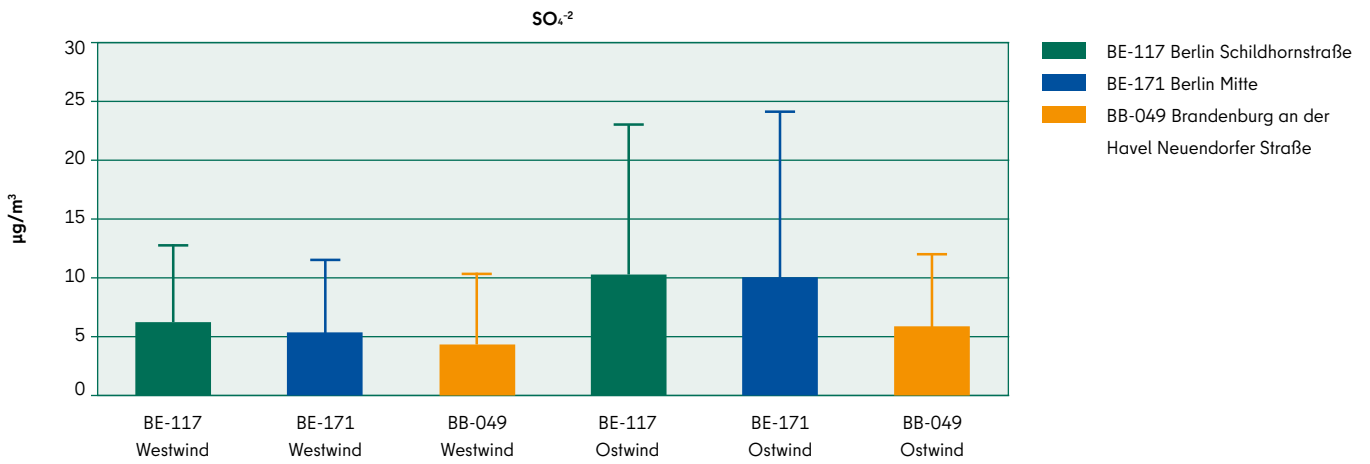


Abbildung 5.29: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

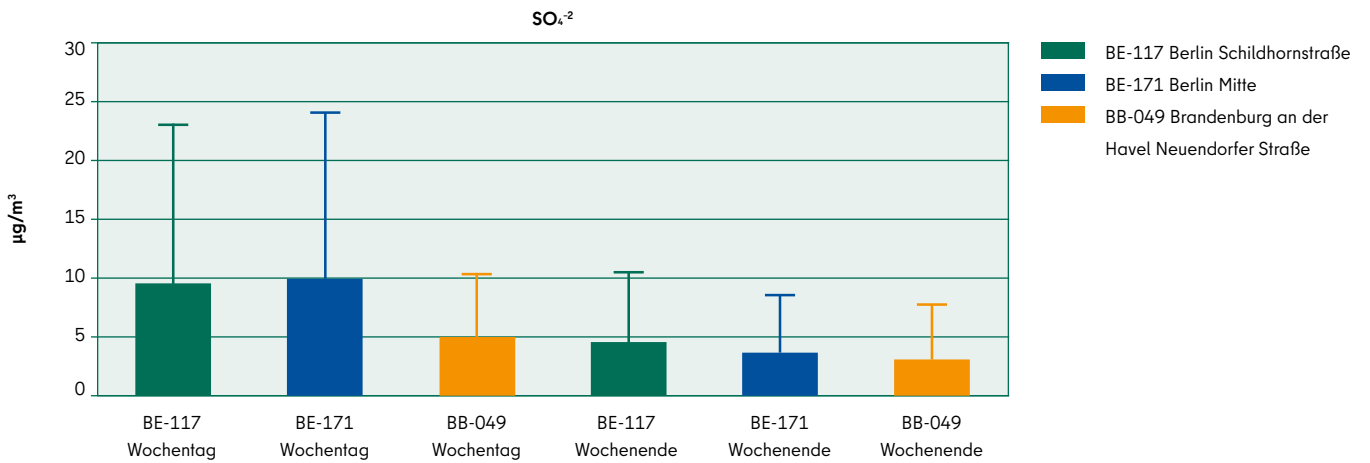


Abbildung 5.30: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.12 Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

Die Konzentration von Ammonium beträgt im Mittel zwischen 5 und 8 Mikrogramm pro Kubikmeter. Ammonium ist damit der drittgrößte Beitrag zum PM<sub>10</sub> und sein Anteil beträgt etwa 20 bis 25 Prozent der Gesamtmasse. Interessanterweise, treten die höchsten Konzentrationen im städtischen Raum in Berlin auf, noch höher sind sie bei der Kombination von Stadt und Verkehr in BE-117. Ein Wochenrhythmus ebenso wie erhöhte Konzentrationen bei östlichen Winden weisen darauf hin, dass Ammonium sowohl mit lokalen Prozessen als auch dem Ferntransport in Zusammenhang steht. Die Emissionen aus der Landwirtschaft dürften aufgrund im November und Dezember nur geringer Aktivitäten im Ackerbau etwas geringer ausgefallen sein, während die sekundäre Bildung von Ammonium als Ammonium-Nitrat aus dem NO<sub>2</sub> des dieselbetriebenen Verkehrs heraus dann mehr ins Gewicht fällt (van Pinxteren u. a., 2017).

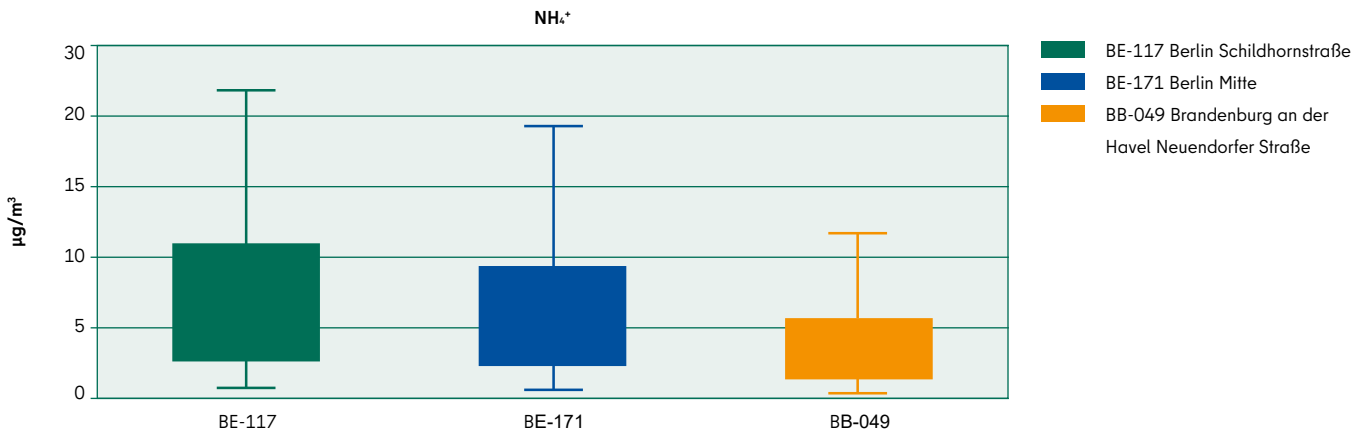


Abbildung 5.31: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

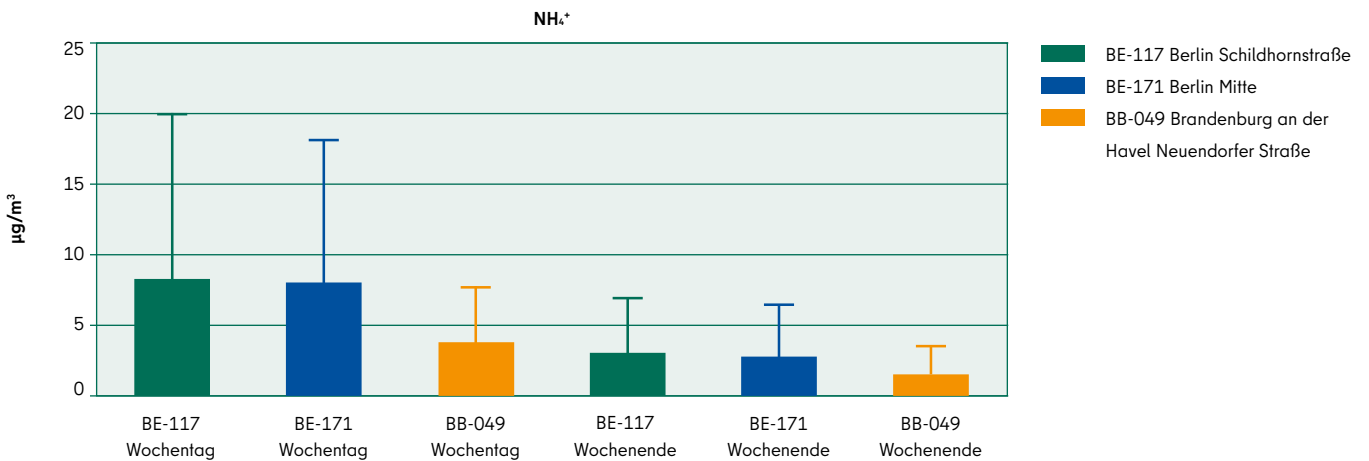


Abbildung 5.32: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.13 Chlorid (Cl<sup>-</sup>)

Chlorid ist als Bestandteil von Salz sowohl in Seesalz als auch in Streusalz vorhanden (van Pinxteren u. a., 2017). Für die Salzstreuung ist jedoch aufgrund der milden Witterung keine Indikation gegeben gewesen im Messzeitraum. Die Konzentrationen betragen im Mittel etwa 2 Mikrogramm pro Kubikmeter oder etwa 6 bis 10 Prozent der Gesamtbelastung. Die Windrichtung bestimmt die Höhe des Beitrages, bei Westwind liegen sie höher als bei Ostwind, da Luftmassen bei Westwind über das Meer streichen. Es gibt einen noch deutlicher ausgeprägten Wochenrhythmus. Dies hängt nicht mit der Verteilung der Windrichtung zusammen, es könnte sich dabei um eine Verstärkung durch Aufwirbelung handeln oder aber die Tatsache, dass die stärksten Winde, die über dem Meer geweht haben, die Region an Werktagen erreichten. Beides ist jedoch eher spekulativ und es wird in dieser Studie auch nicht tiefer betrachtet, da der Fokus ein anderer ist und das Chlorid bei der Identifikation des PM<sub>10</sub>-Beitrages der Straßenbahn keine entscheidende Rolle spielt.

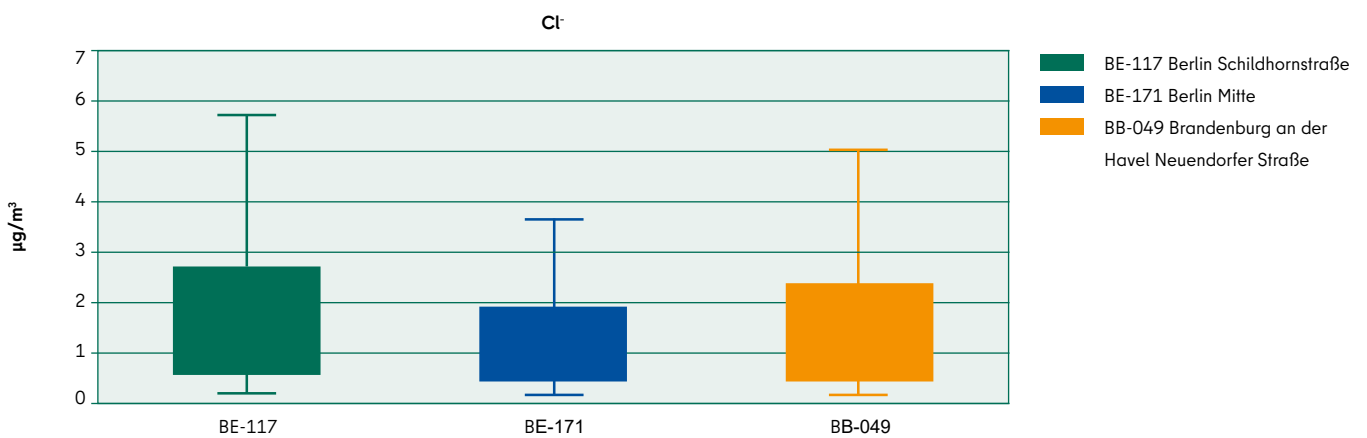


Abbildung 5.33: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Chlorid (Cl<sup>-</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

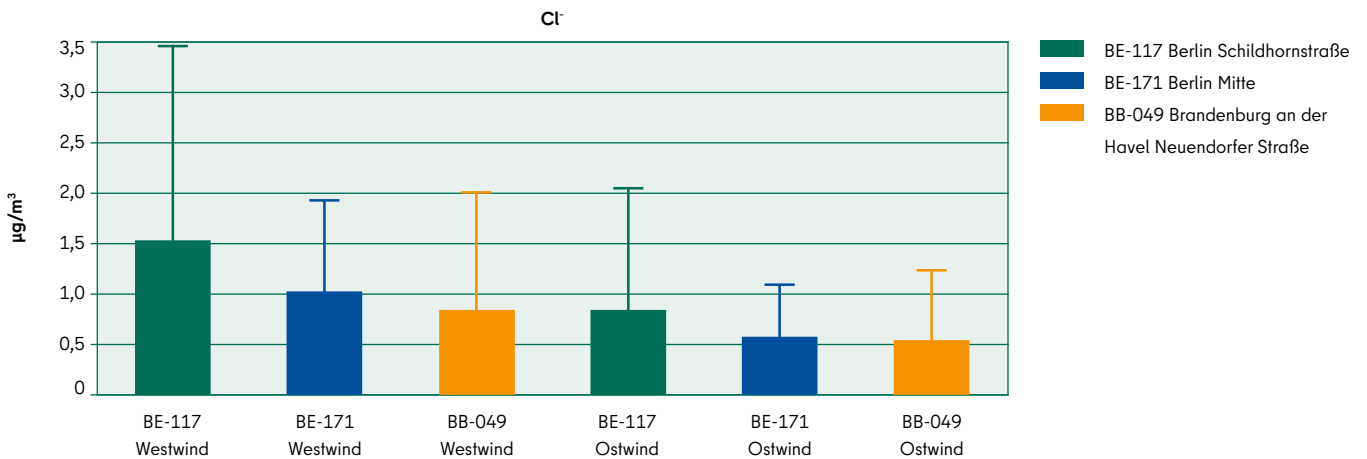


Abbildung 5.34: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Chlorid (Cl<sup>-</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

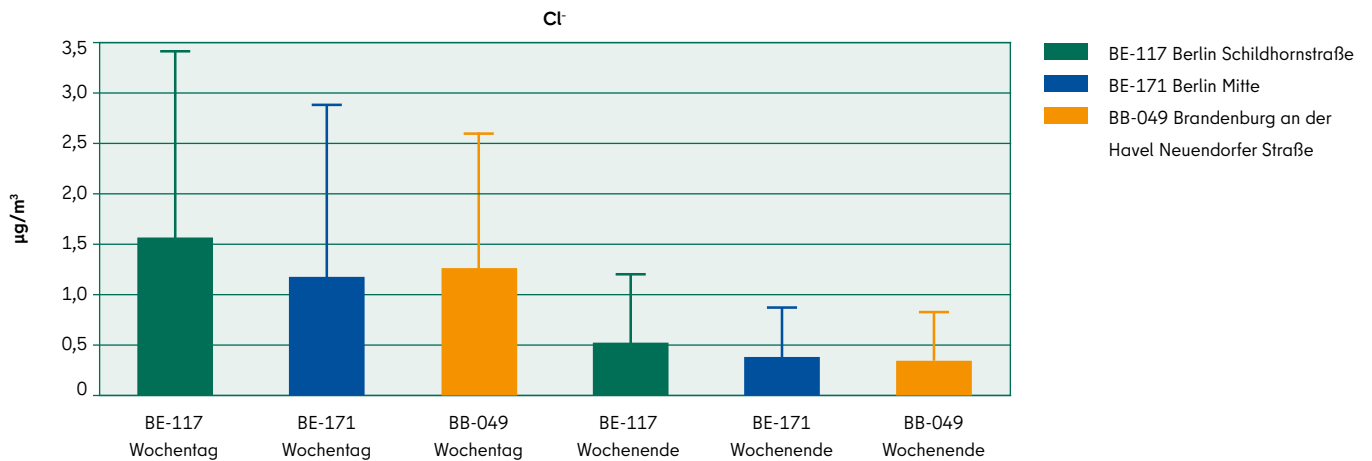


Abbildung 5.35: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Chlorid (Cl<sup>-</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.14 Natrium (Na<sup>+</sup>)

Das Natrium weist mit etwa 1,5 Mikrogramm pro Kubikmeter beziehungsweise etwa 5 Prozent einen beträchtlichen Beitrag auf und dürfte gemeinsam mit Magnesium und Chlorid zum geläuterten Seesalz beitragen (van Pinxteren u. a., 2017). Dieses Seesalz macht dann also etwa 3,5 Mikrogramm pro Kubikmeter insgesamt aus, oder etwa 15 bis 17 Prozent des gesamten PM<sub>10</sub>. Höhere Konzentrationen werden an Tagen mit Westwind festgestellt sowie auch an Werktagen. Erneut kann nur auf die bereits genannte Spekulation verwiesen werden für die Ursache des Wochenrhythmus.

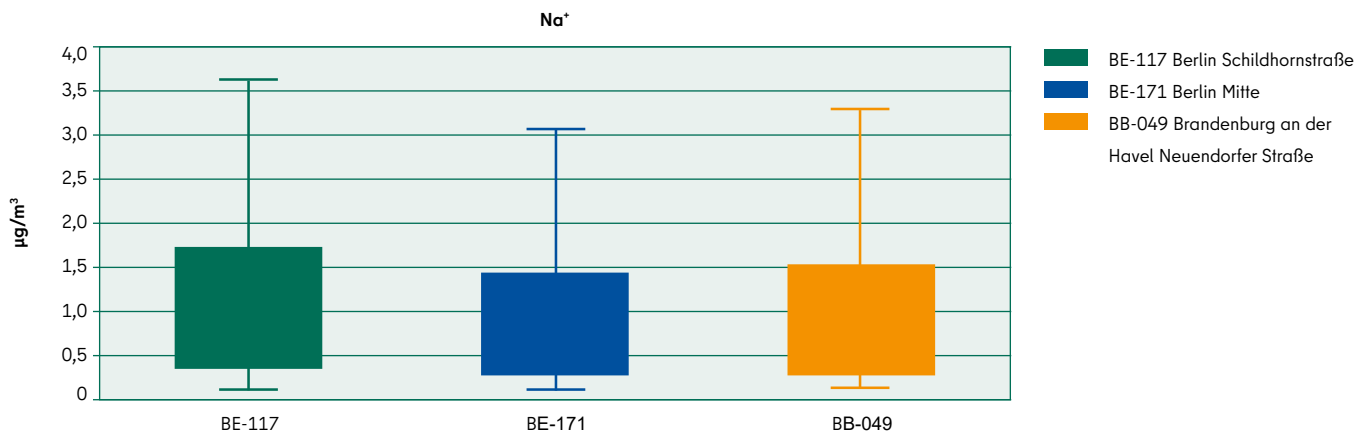


Abbildung 5.36: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Natrium (Na<sup>+</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

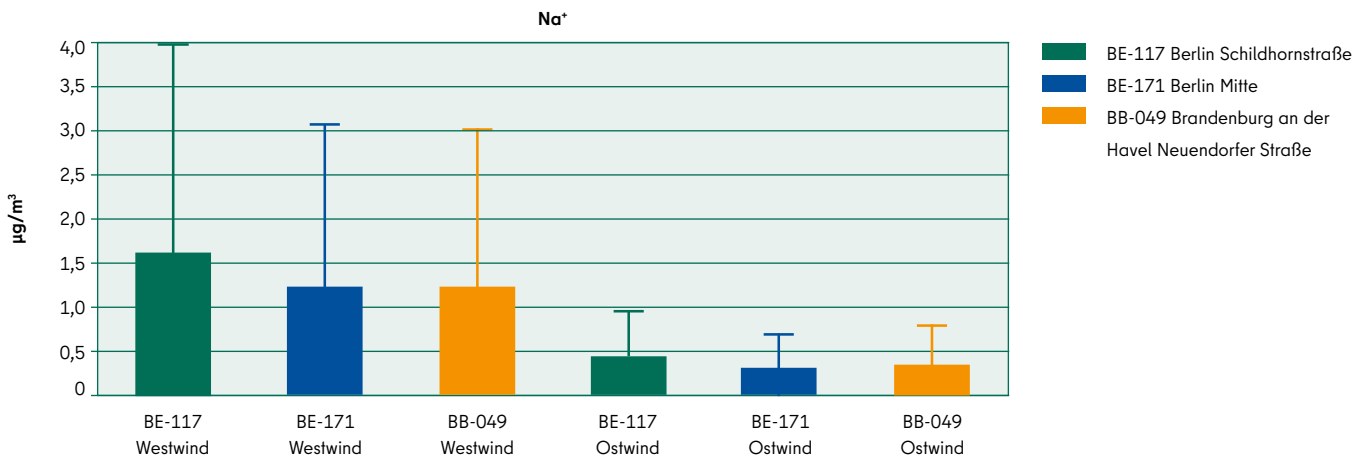


Abbildung 5.37: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Natrium (Na<sup>+</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

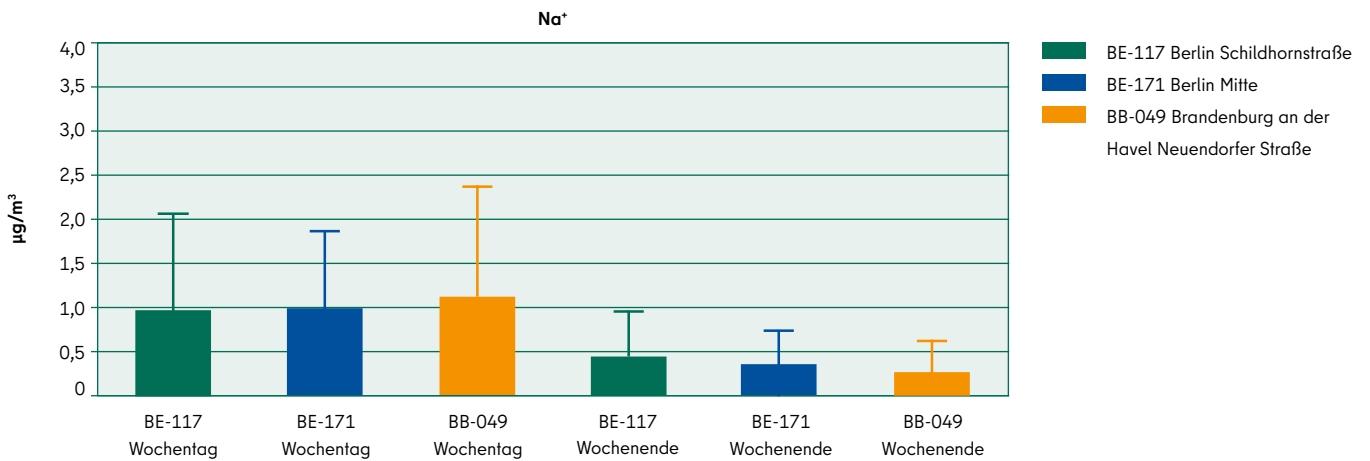


Abbildung 5.38: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Natrium (Na<sup>+</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.15 Kalzium (Ca<sup>2+</sup>)

Kalzium weist regional sehr ähnliche Beiträge auf in Höhe von durchschnittlich bis zu 1 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 4 bis 5 Prozent Anteil am PM<sub>10</sub>. Ein ausgeprägter Wochenrhythmus liegt an allen Standorten vor. Kalzium ist als Krustenelement wahrscheinlich durch Verkehr aufgewirbeltem Staub zuzuordnen (van Pinxteren u. a., 2017).

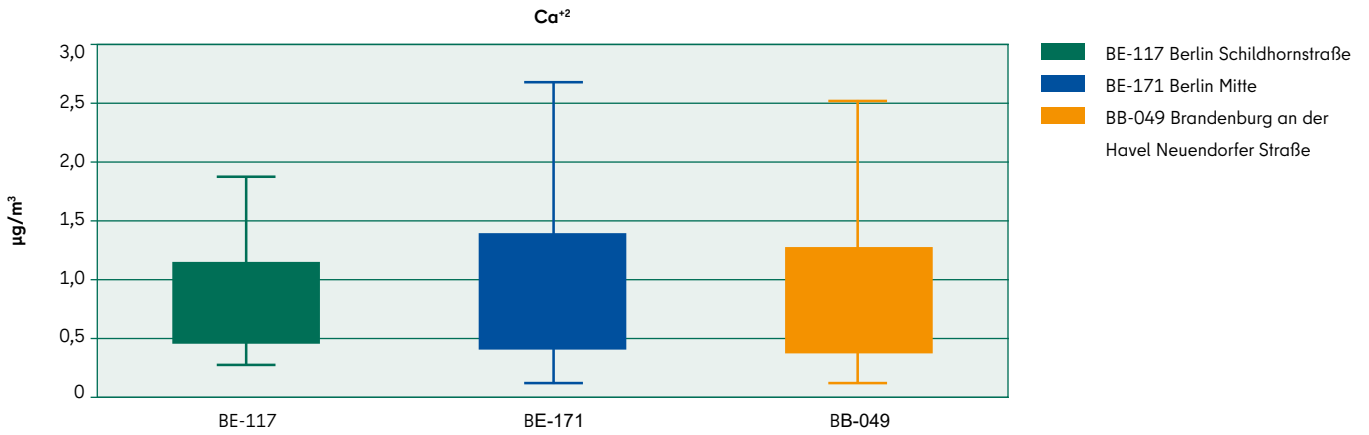


Abbildung 5.39: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Kalzium (Ca<sup>2+</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

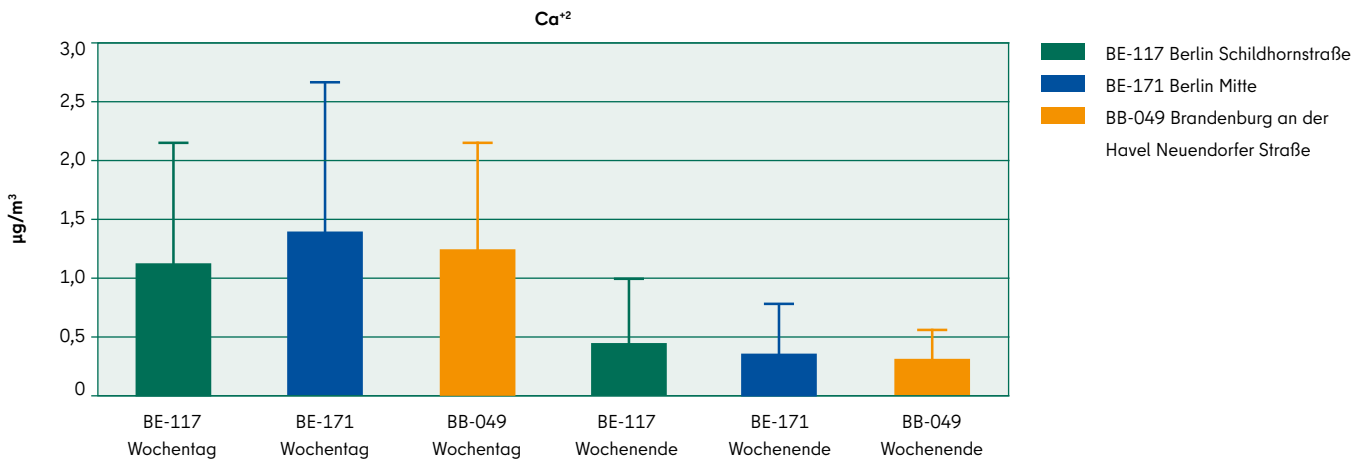


Abbildung 5.40: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Kalzium (Ca<sup>2+</sup>) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen



## 5.2.16 Magnesium ( $Mg^{2+}$ )

Mit etwa 0,2 bis 0,3 Mikrogramm pro Kubikmeter oder etwa 1 Prozent ist Magnesium zwar kein Spurenstoff, jedoch einer der weniger relevanten Beiträge zur  $PM_{10}$ -Konzentration. Die Konzentrationen weisen regional keine bedeutenden Unterschiede auf und höhere Werte treten an Tagen mit westlichen Winden auf. Dies deutet darauf hin, dass das hier festgestellte Magnesium Teil des gealterten Seesalzes ist (van Pinxteren u. a., 2017).

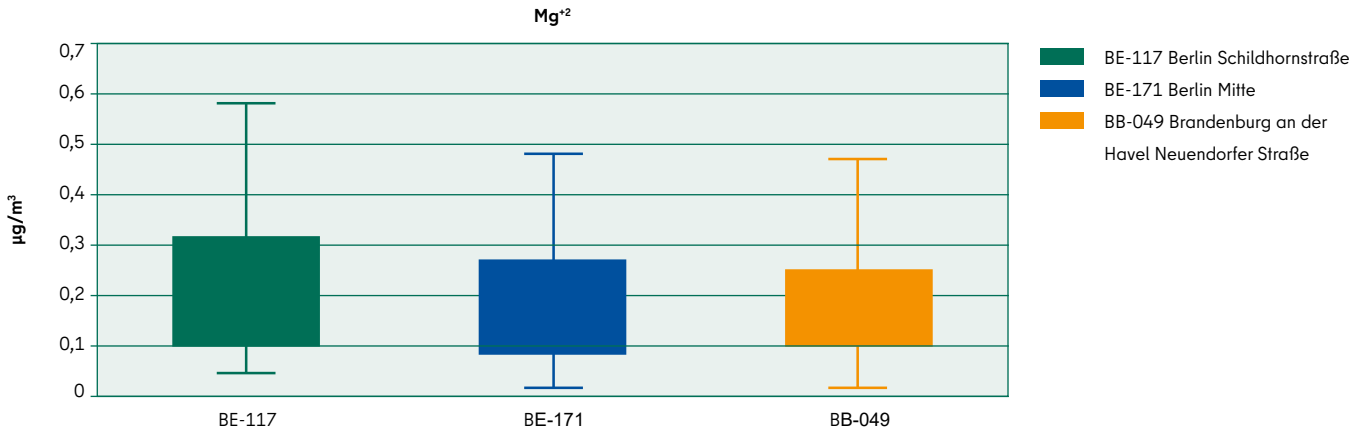


Abbildung 5.41: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Magnesium ( $Mg^{2+}$ ) im  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

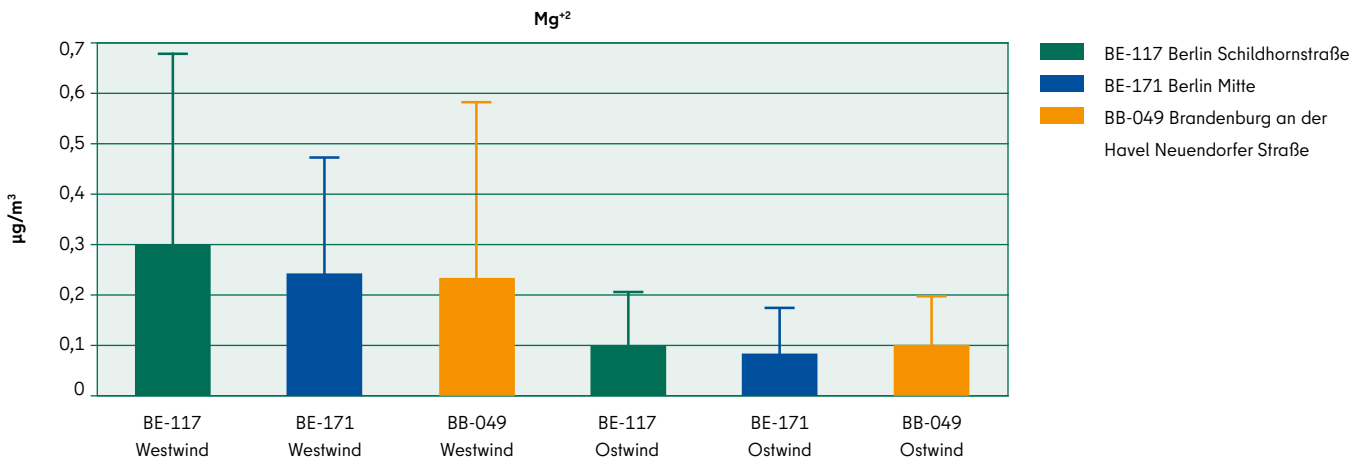


Abbildung 5.42: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Magnesium ( $Mg^{2+}$ ) im  $PM_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.2.17 Äquivalentes Black-Carbon (eBC)

Die Messung und der Nachweis von eBC ist aufgrund der hohen Nachweisgrenze von 0,5 Mikrogramm pro Kubikmeter problematisch. Die mittlere Konzentration beträgt etwa 1 Mikrogramm pro Kubikmeter, mit etwas höheren Werten an den Verkehrsstationen. Dies entspricht dort etwa 4 bis 5 Prozent der Gesamtmasse des PM<sub>10</sub>. Es lässt sich eine Erhöhung der Konzentration an Wochentagen und Tagen mit Ostwind ausmachen. Dass beide Voraussetzungen erfüllt sein müssen, zeigt auf, dass sich hier die Beiträge von Ferntransport und lokaler Rußemission durch Dieselverbrennung im Verkehr überlagern dürften (van Pinxteren u. a., 2017). Da das Graphit des Stromabnehmers nicht durch die Messung an den experimentellen Proben bestimmt wurde, kann keine Einordnung vorgenommen werden in Bezug auf die Abriebe der Straßenbahn, anders, als dass es nicht verwunderlich wäre, wenn sich in den in BB-049 festgestellten eBC-Konzentration auch die Abriebe der Straßenbahn wiederfinden.

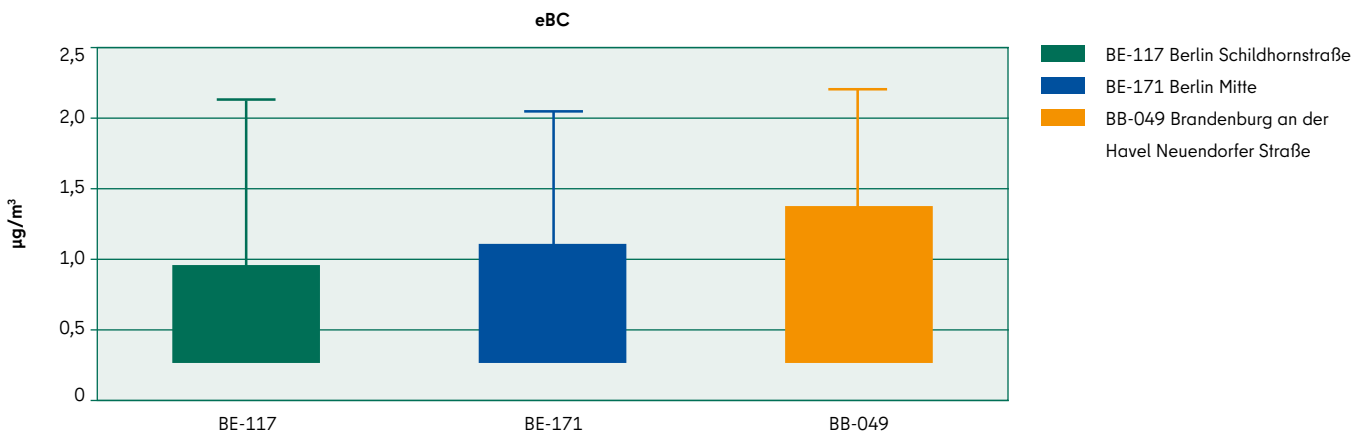


Abbildung 5.43: Boxplot der täglichen Mittelwerte von äquivalentem Black-Carbon beziehungsweise elementarem Kohlenstoff (eBC) im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

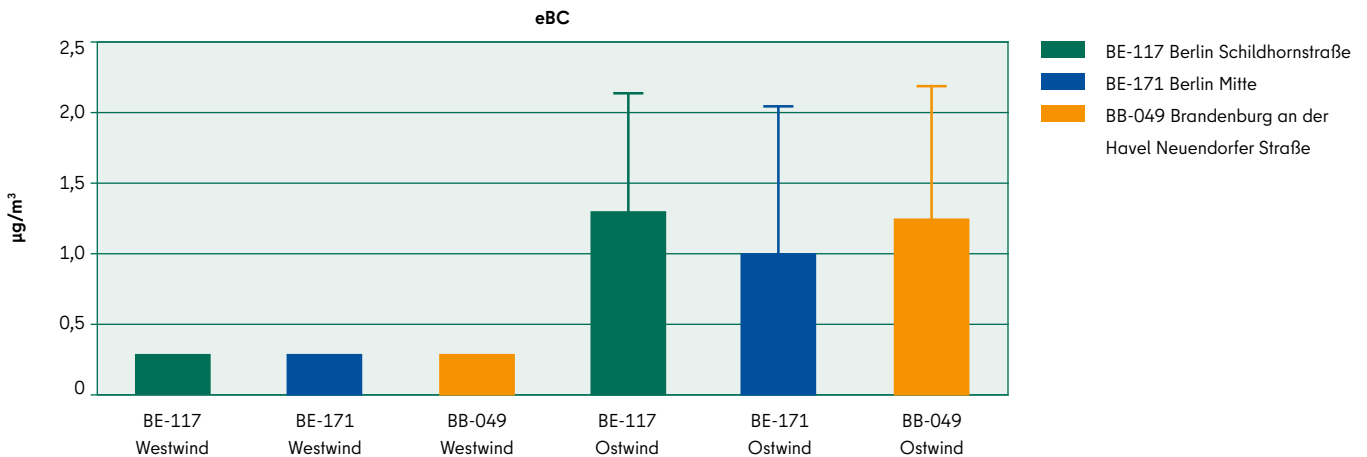


Abbildung 5.44: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von eBC im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

Insgesamt zeigt sich ein Bild, dass die Quellen Verkehr, lokale Verbrennung zum Beispiel in Kraftwerken mit Kohle- oder Gasverbrennung oder kommunalen Müllverbrennungsanlagen, Ferntransport und sekundäre Aerosolbildung durch Ammonium-, Stickoxid- und Schwefeloxidemissionen als Ammoniumnitrat und Ammoniumsulfat sowie gealtertes Seesalz sich in den Messungen wiederfinden. Alle in feststellbarer Konzentration in den forensischen Straßenbahnproben aufgefundenen Metalle konnten in vergleichsweise erhöhter Konzentration in BB-049, aber teilweise auch in BE-117 nachgewiesen werden. Lediglich für Mangan, ein Spurenmetall, wurden in BB-049 deutlich höhere Werte festgestellt. Dies deutet bereits darauf hin, dass der Abrieb der Straßenbahn sich nicht sehr auffällig in der Zusammensetzung oder der Höhe der Beiträge niederschlägt.

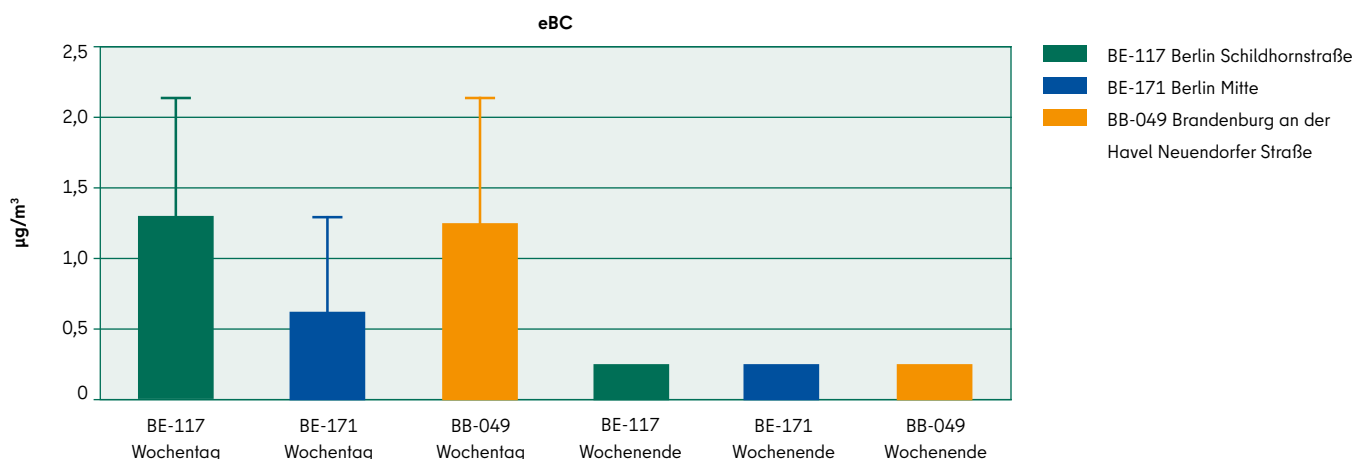


Abbildung 5.45: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von eBC im PM<sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen

### 5.3 Statistische Rezeptformmodellierung

Die statistische Rezeptformmodellierung (SRM) stellt den Kern dieser Studie dar, da aus den Ergebnissen dieser Modellierung die Schlussfolgerungen gezogen werden und die Emissionsfaktoren kritisch beleuchtet werden. Die Vorgehensweise und verwendete Software soll im Folgenden erläutert werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse beschrieben. Die Ergebnisse werden in Form von Profilen vorgestellt, die jeweils die normierten Konzentrationen der Spurenstoffe als Anteil am Profil darstellen, als auch der Beitrag des jeweiligen Profils an der Gesamtkonzentration eines Spurenstoffes.

Im Folgenden werden die neun Faktoren näher beschrieben und charakterisiert. Die Zuordnung zu den Quellen ist durch die Nutzung des DELTA-SA sowie durch eine raumzeitliche Betrachtung der Beiträge entstanden. Die Beiträge sind zum einen in die Kategorien Ferntransport, Verkehr und Hintergrund zusammengefasst und in absteigender Reihenfolge geordnet in Bezug auf ihren Gesamtbeitrag. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die einzelnen Faktoren teilweise durch Vorgänge in mehreren dieser Quellkategorien entstehen, weshalb keine vollkommen scharfe Trennung erfolgen kann. So sind zum Beispiel bei der Kohleverbrennung und dem sekundären Aerosol sicherlich lokale als auch herantransportierte Luftbeimengungen zusammengefasst. Dies wird auch anhand der Auswertung nach der Windrichtung, den Wochentagen und im regionalen Vergleich deutlich.

### 5.3.1 Ferntransport - Kohleverbrennung (F1)

In Faktor 1 (F1) sind nur sehr geringe Anteile von Schwermetallen enthalten. Die größten Einzelkomponenten sind Sulfat, Ammonium, Nitrat und eBC. Aufgrund des hohen Schwefel- und Rußanteils kommt als Quelle für diesen Faktor die Kohleverbrennung in Betracht, insbesondere auch mit Blick auf den Ferntransport, da in Osteuropa noch sehr viele aktive Kohlekraftwerke existieren (van Pinxteren u. a., 2017). Der mittlere Beitrag dieses Faktors liegt bei 4,5 Mikrogramm pro Kubikmeter beziehungsweise 22 Prozent in Brandenburg und 6 Mikrogramm pro Kubikmeter, etwa 25 Prozent des PM<sub>10</sub> in Berlin. Es besteht ein wöchentlicher Rhythmus, aber am stärksten ausgeprägt ist der Einfluss der Windrichtung. Da in diesem Projekt keine Rückwärtstrajektorien verwendet wurden, ist die Frage, ob der Wochenrhythmus durch die Ansammlung stärker belasteter Einzelereignisse an Tagen mit Ostwind hervorgerufen wurde, nicht mit Sicherheit zu beantworten. Dies liegt auch außerhalb des Umfangs dieser Studie. Die chemische Zusammensetzung mit hohem Anteil von sekundären Aerosolen spricht jedoch für einen besonders hohen Anteil von Ferntransport in diesem Faktor.

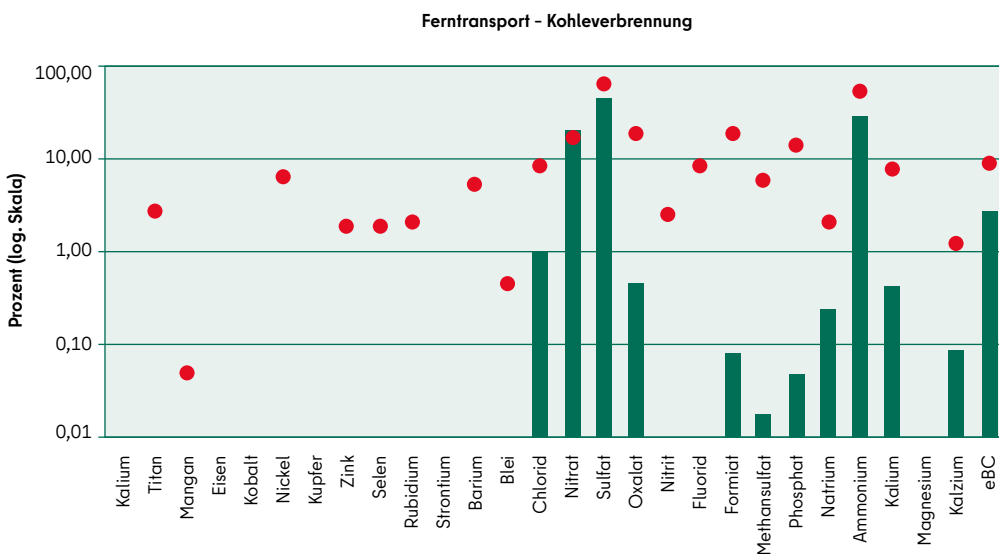


Abbildung 5.46: Chemische Zusammensetzung von F1 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

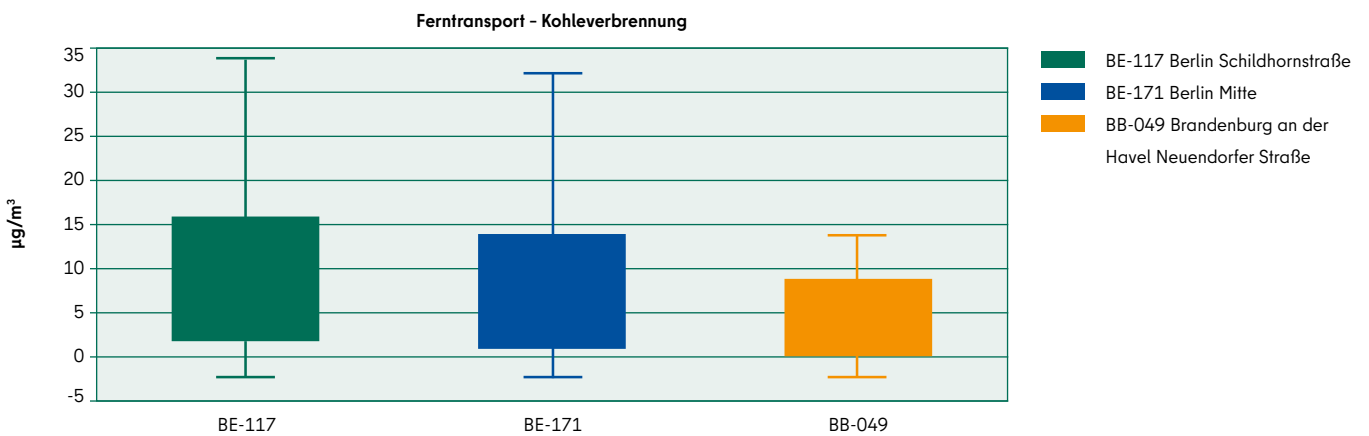


Abbildung 5.47: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F1.

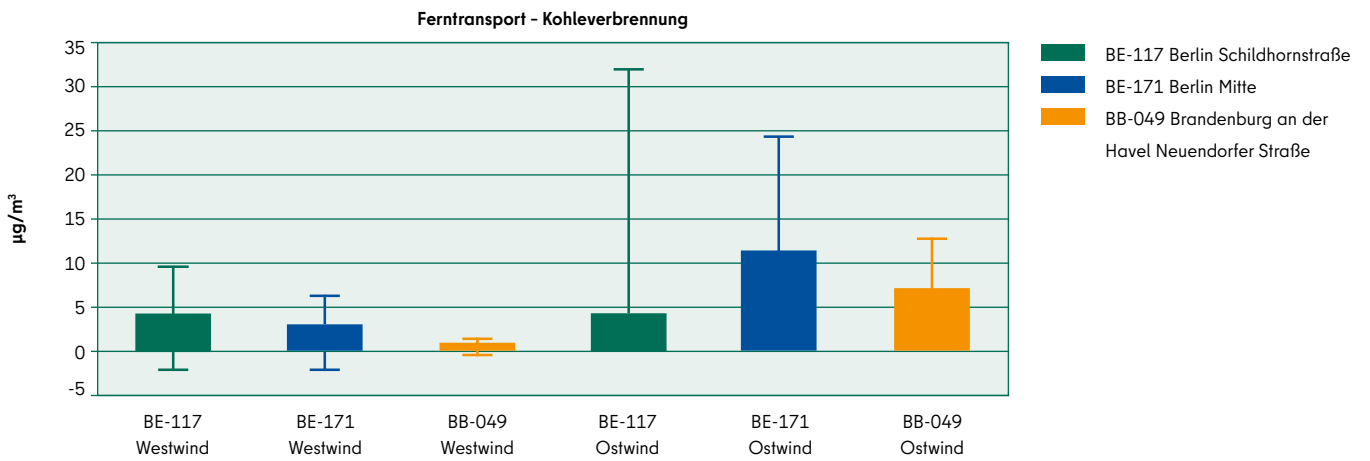


Abbildung 5.48: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F1

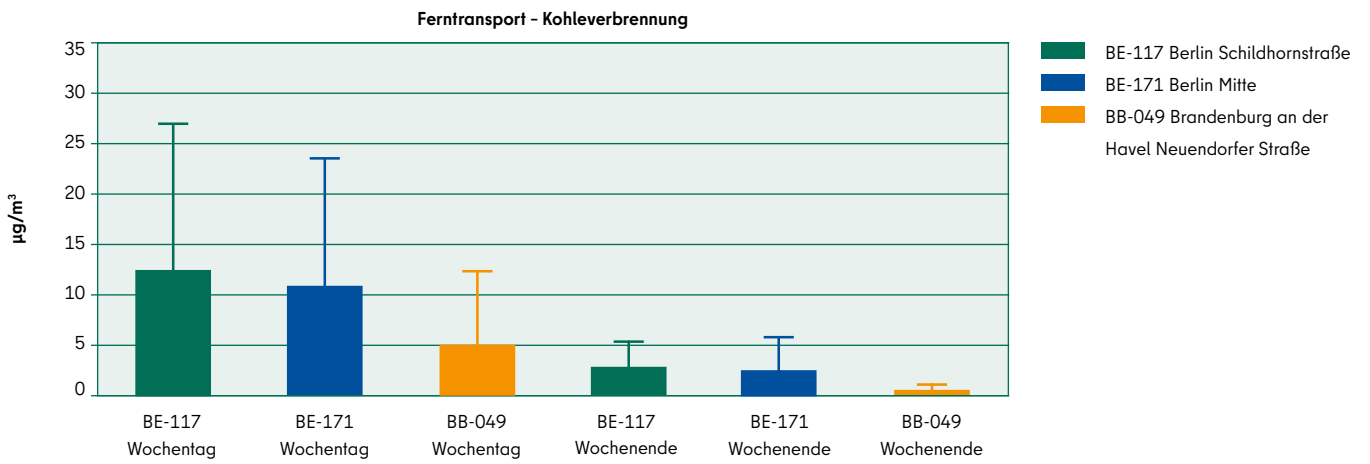


Abbildung 5.49: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F1

### 5.3.2 Ferntransport - Gealtertes Seesalz (F2)

Faktor 2 (F2) trägt hauptsächlich zu den gemessenen Konzentrationen von Chlorid, Natrium und Magnesium bei. Es handelt sich also um Seesalz, das aufgrund der Transportdistanz sicherlich gealtert ist, wie auch die beigemengten Konzentrationen von Nitrat und Sulfat zeigen (van Pinxteren u. a., 2017). Die regionale Verteilung zeigt keine Unterschiede auf und der Beitrag liegt bei etwa 1,7 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 6 bis 8 Prozent. Es besteht ein Wochenrhythmus, noch stärker ist jedoch der Einfluss der Windrichtung, bei Westwind liegen die Werte höher als bei Ostwind. Auch in diesem Fall geht die dezidierte Untersuchung der Ursachenmuster mithilfe von Rückwärtstrajektorien über den Umfang der Studie hinaus. Die ungleiche Verteilung von Werktagen (42) zu Nicht-Werktagen (18) könnte jedoch dazu führen, dass in den Werktagen mehr relevante Ereignisse enthalten sind.

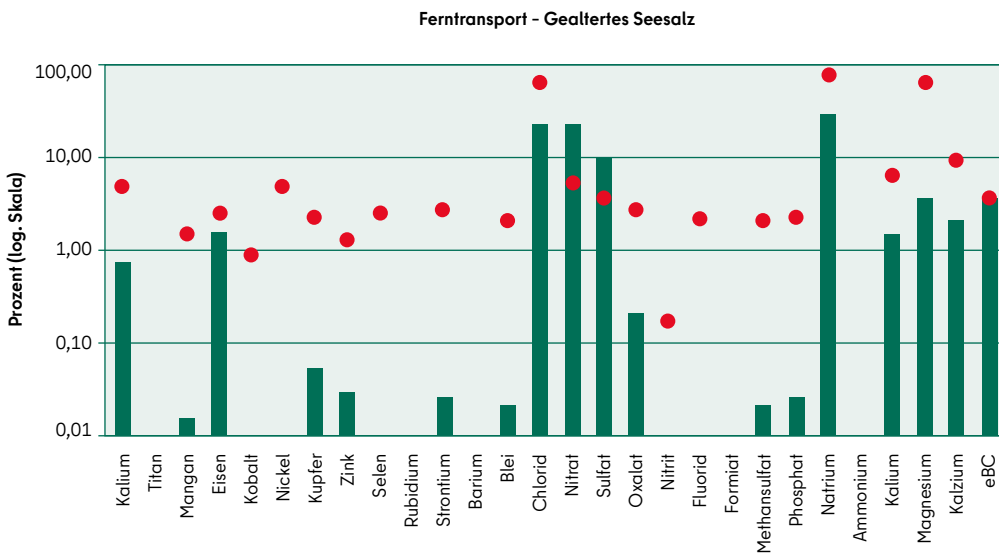


Abbildung 5.50: Chemische Zusammensetzung von F2 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

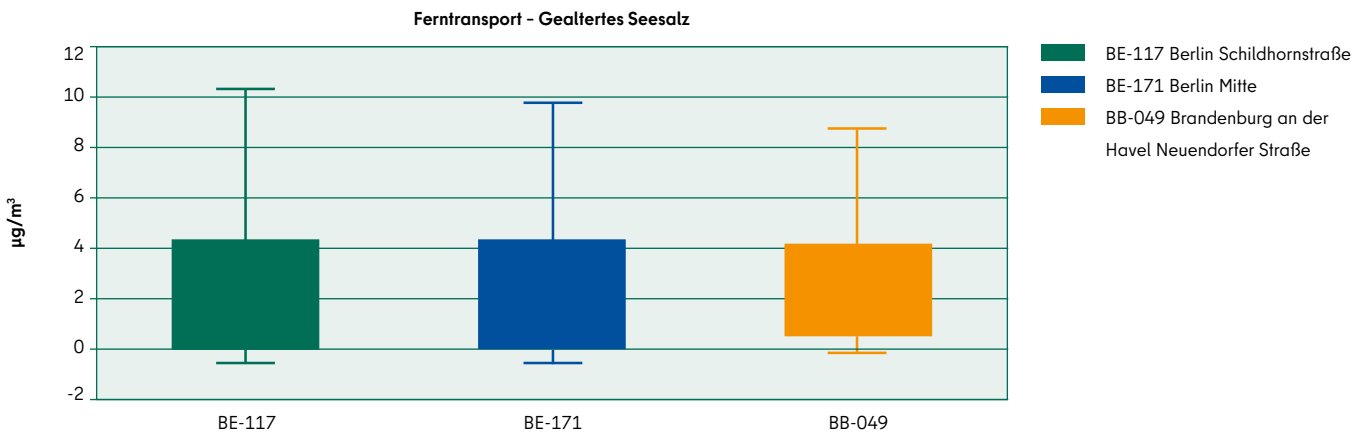


Abbildung 5.51: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F2

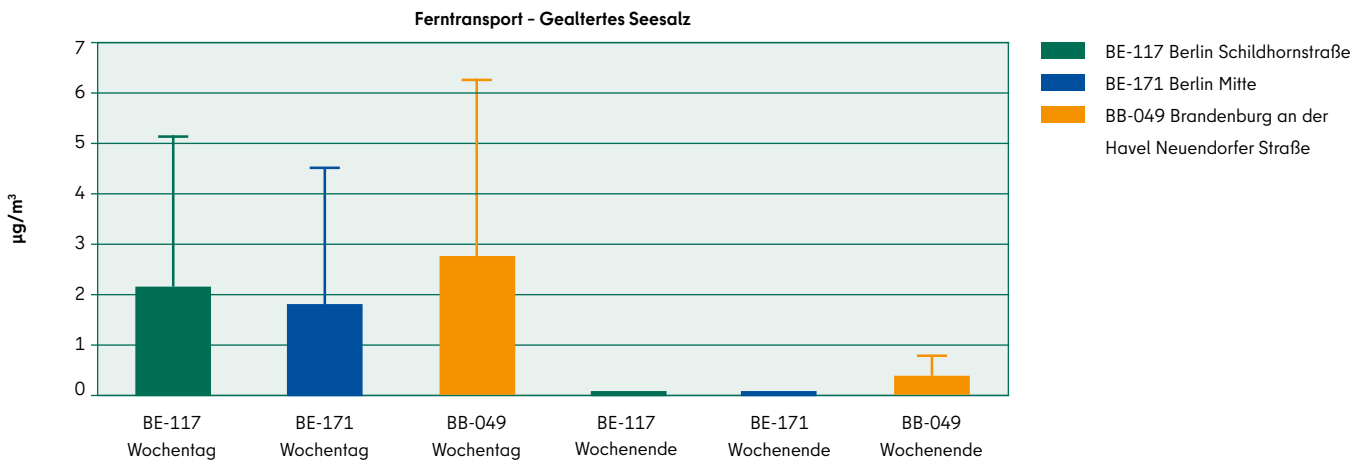


Abbildung 5.52: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F2

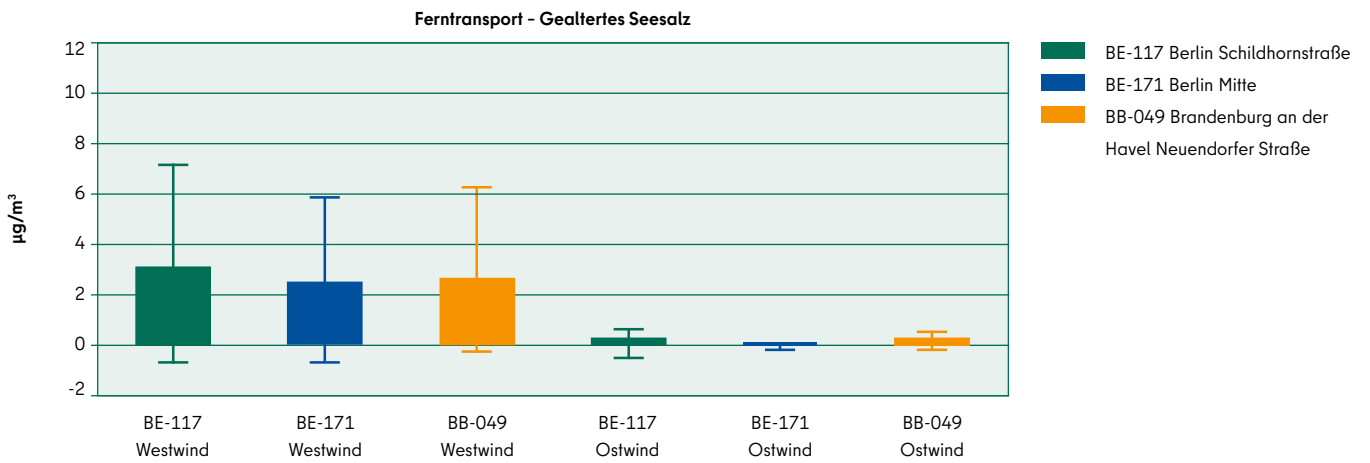


Abbildung 5.53: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F2

### 5.3.3 Hintergrund - Sekundäres Aerosol (F3)

Faktor 3 (F3) ist durch seine Zusammensetzung auf sekundäre Aerosolbildung zurückzuführen, insbesondere die Bildung von Nitrat. Dies ist in Berlin-Mitte stärker ausgeprägt als an den anderen Standorten. Die Werte liegen bei etwa 5 beziehungsweise 3 Mikrogramm pro Kubikmeter, also etwa 22 beziehungsweise 17 Prozent im Mittel. Die städtische Verstärkung könnte durch eine verstärkte sekundäre Bildung von Nitrat aufgrund der höheren akkumulierten NO<sub>2</sub> Konzentrationen liegen (van Pinxteren u. a., 2017). Diese liegen zwar am höchsten an den Verkehrsstationen, jedoch tritt die sekundäre Bildung auch durch einen Akkumulationseffekt auf, der in Stadtzentren besonders stark wirkt. Für F3 kann ein klarer Wochenrhythmus ohne stärkeren Einfluss der Windrichtung festgestellt werden. Dies spricht für die Dominanz der lokalen Bildung des sekundären Aerosols.

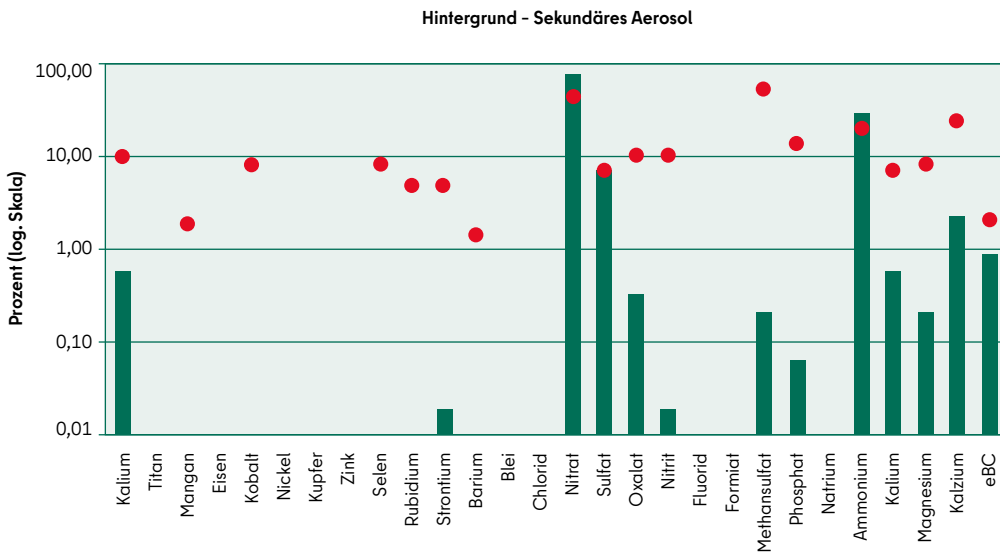


Abbildung 5.54: Chemische Zusammensetzung von F3 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

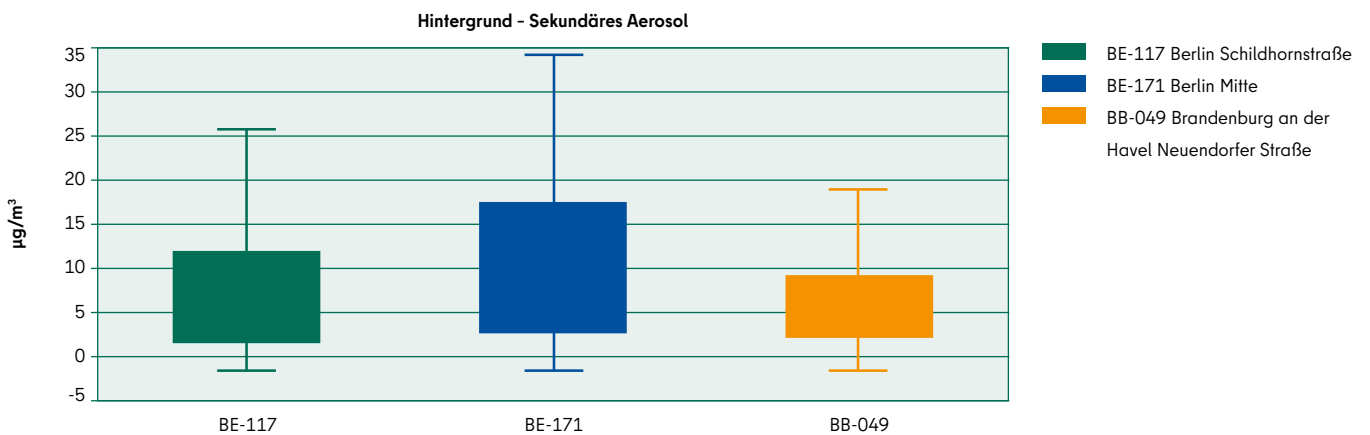


Abbildung 5.55: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F3



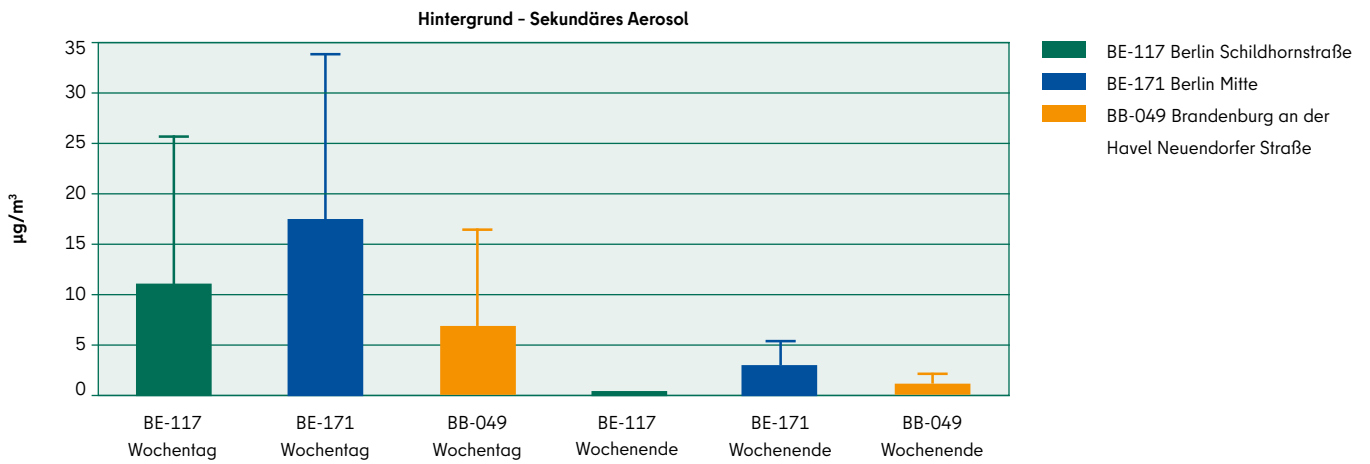


Abbildung 5.56: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktage sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F3

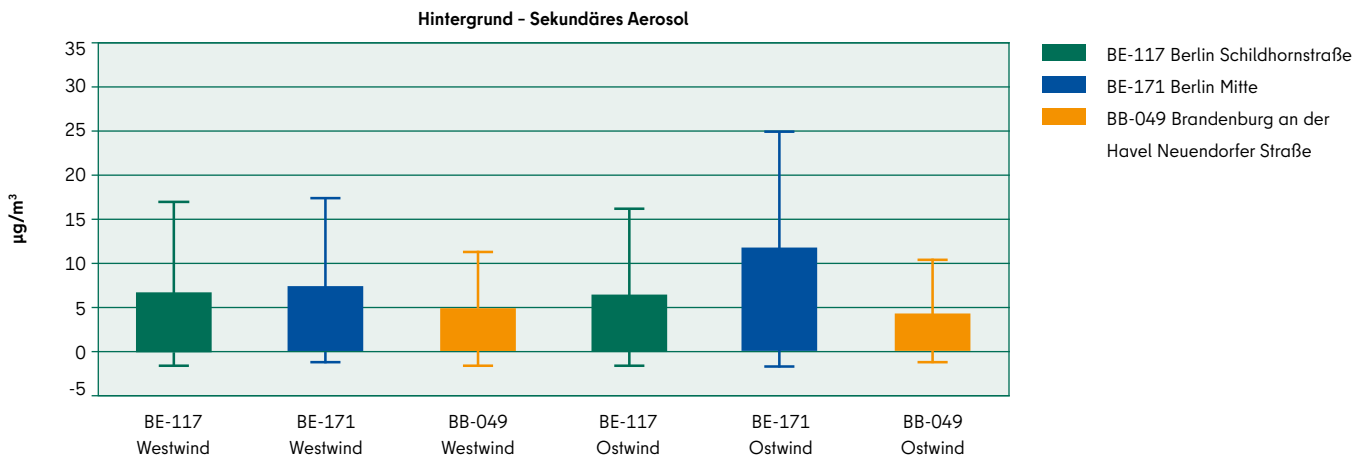


Abbildung 5.57: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F3

### 5.3.4 Hintergrund - Müllverbrennung (F4)

In den Abbildungen 5.58 bis 5.61 sind die Charakteristiken des vierten Faktors (F4) abgebildet. Die Zusammensetzung zeigt große Beiträge von Nitrat, Ammonium, eBC und Kalium. Diese Zusammensetzung weist auf die sekundäre Natur dieser Verbrennungsrückstände hin. In der Auswertung mit DELTA-SA ist eine Nähe zu bisherigen Faktoren von Müllverbrennungsanlagen zu erkennen. Die Gesamtbeiträge von Kalium, Blei und Fluorid werden durch F4 hervorgerufen. Müllverbrennung trägt zu etwa 2 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 8 Prozent zum PM<sub>10</sub> bei. Die regionale Verteilung zeigt in Berlin-Mitte die größte Belastung. Es gibt sowohl einen wöchentlichen Rhythmus als auch einen Einfluss der Windrichtung mit höheren Werten bei Ostwind. Dies bedeutet, dass F4 sowohl lokale Anteile als auch Anteile aus Ferntransport aufweist.

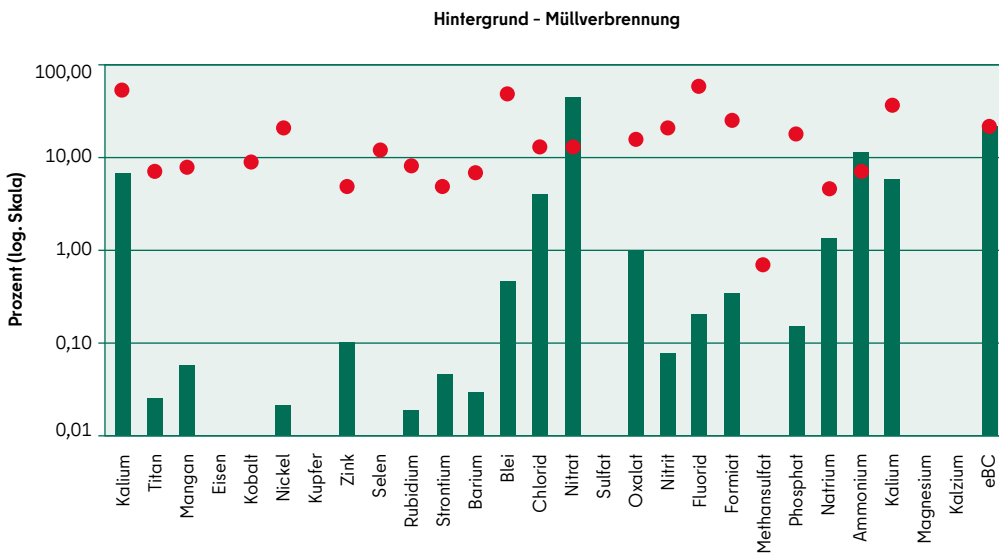


Abbildung 5.58: Chemische Zusammensetzung von F4 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

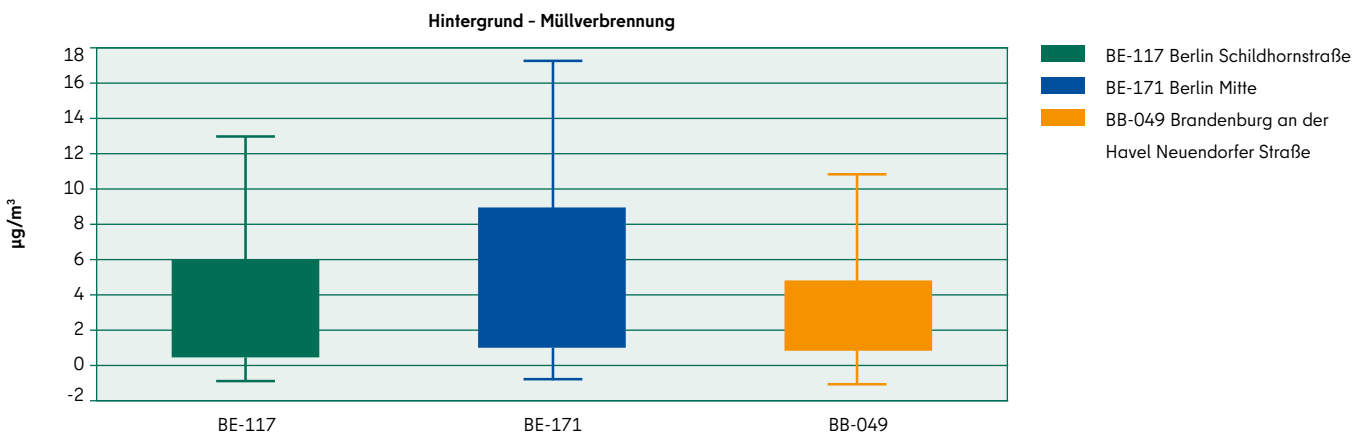


Abbildung 5.59: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F4

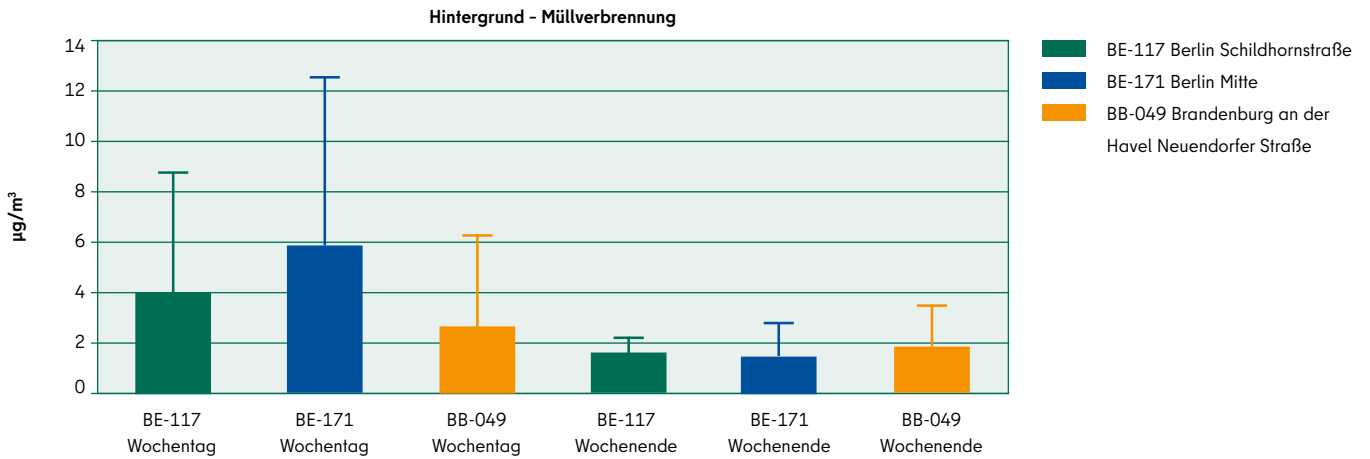


Abbildung 5.60: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F4

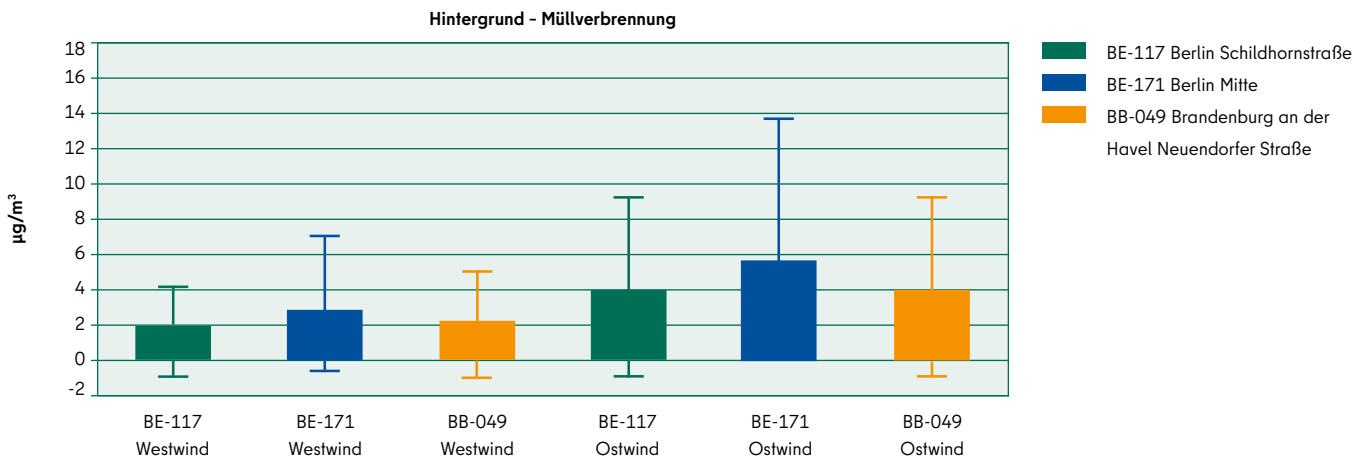


Abbildung 5.61: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F4

### 5.3.5 Hintergrund - Dieselölverbrennung (F5)

Faktor 5 (F5) zeigt hohe Konzentrationen von Sulfat und eBC. Die Beiträge sind in Berlin höher als in Brandenburg, und in Berlin ist der Beitrag an der Verkehrsstation BE-117 am größten. Die Zuordnung mit DELTA-SA ergibt Nähe zu Faktoren aus Verbrennung von Heizöl beziehungsweise Diesel. Im Mittel trägt Dieselölverbrennung mit etwa 0,7 Mikrogramm pro Kubikmeter (3 Prozent) in Brandenburg und etwa 2 Mikrogramm pro Kubikmeter (8 Prozent) in Berlin zum gesamten PM<sub>10</sub> bei. Es zeigt sich keine Abhängigkeit von der Windrichtung, jedoch ein moderater Wochenrhythmus. Es ist also möglich, dass in diesem Faktor sowohl Teile der Dieselverbrennung im Verkehr als auch durch Heizanlagen abgebildet wird (van Pinxteren u. a., 2017).

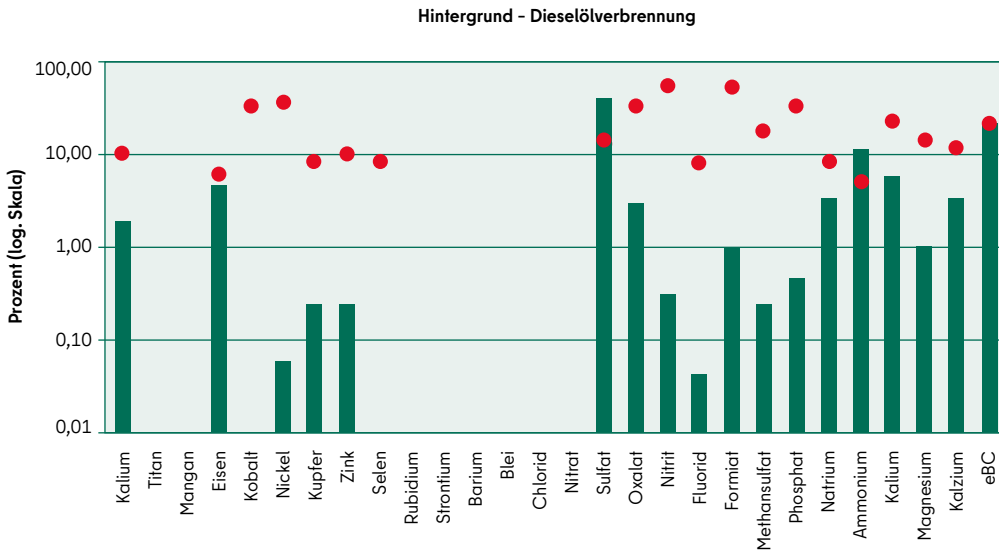


Abbildung 5.62: Chemische Zusammensetzung von F5 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

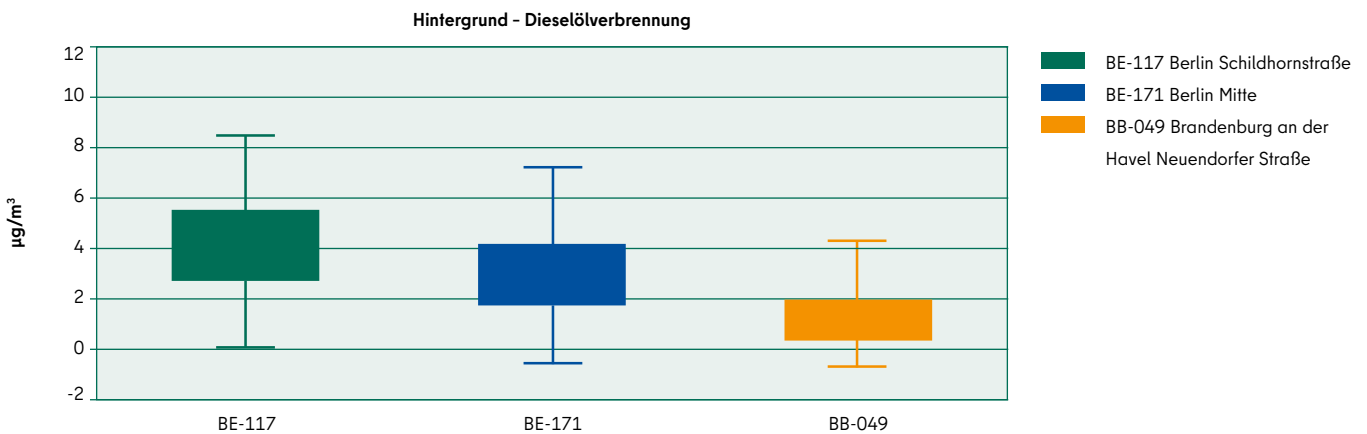


Abbildung 5.63: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F5

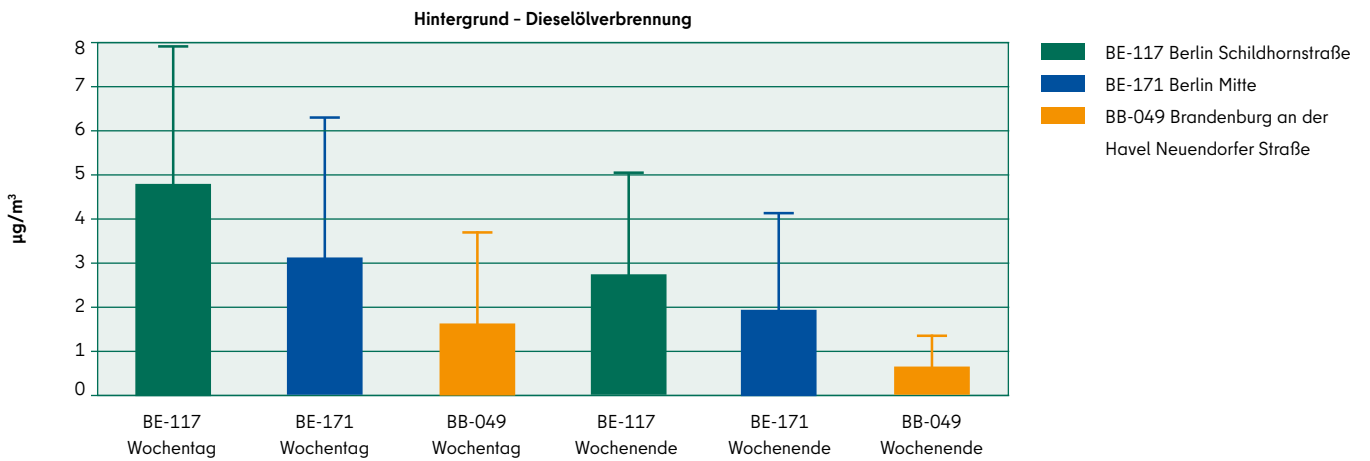


Abbildung 5.64: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F5

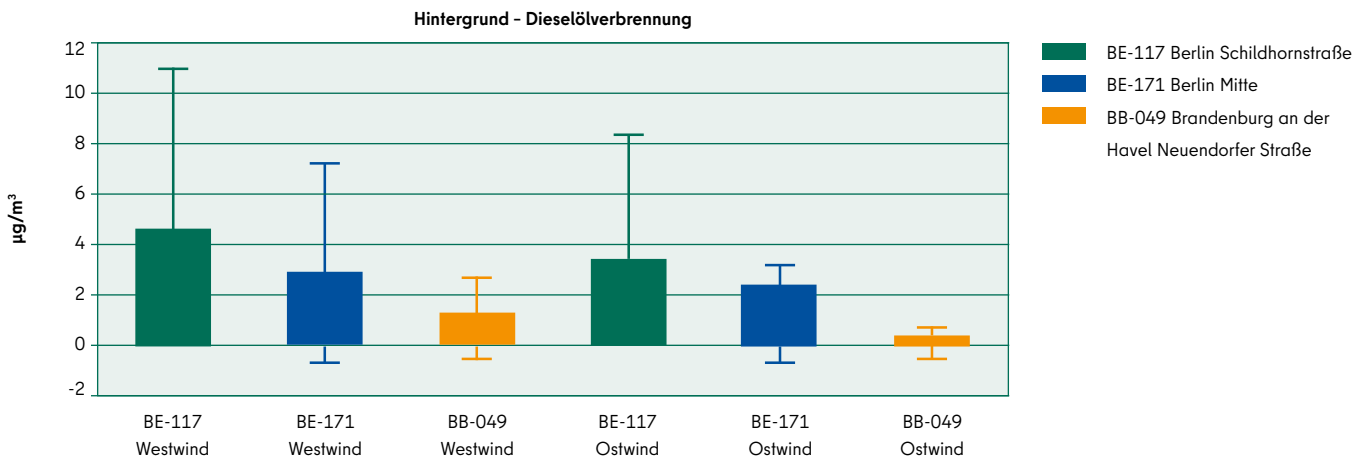


Abbildung 5.65: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F5

### 5.3.6 Verkehr – Benzinabgase (F6)

Die Zuordnung des Faktor 6 (F6) ist unklar und kann nicht trennscharf erfolgen, es handelt sich also um eine Mischquelle, die aus unterschiedlichen Vorgängen stammen dürfte. Dazu zählen gegebenenfalls Restaurants, Zigarettenrauch, Industrieprozesse oder Ähnliches. Jedoch ist davon auszugehen, dass Abgase aus benzinbetriebenen Verkehr am meisten dazu beitragen, da die Konzentration an den Verkehrsstationen deutlich größer ist als in BE-171. Sowohl für die Windrichtung als auch die Werkzeuge sind ein deutlicher Einfluss auszumachen, auch wenn daraus erneut keine endgültigen Schlüsse gezogen werden können. Der hohe Anteil von eBC deutet auch auf den Rußanteil in diesem Faktor hin, welcher aus Fahrzeugen ohne Partikelfilter stammen dürfte. Der Beitrag dieses Faktors liegt bei 2,2 Mikrogramm pro Kubikmeter (10 Prozent) an den Verkehrsstationen und 0,5 Mikrogramm pro Kubikmeter (2 Prozent) in Berlin-Mitte.

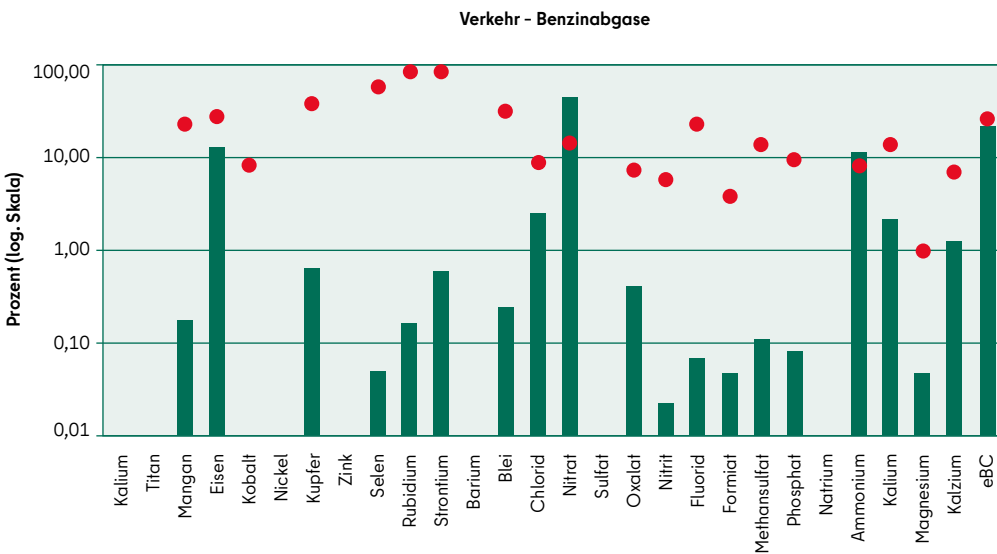


Abbildung 5.66: Chemische Zusammensetzung von F6 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

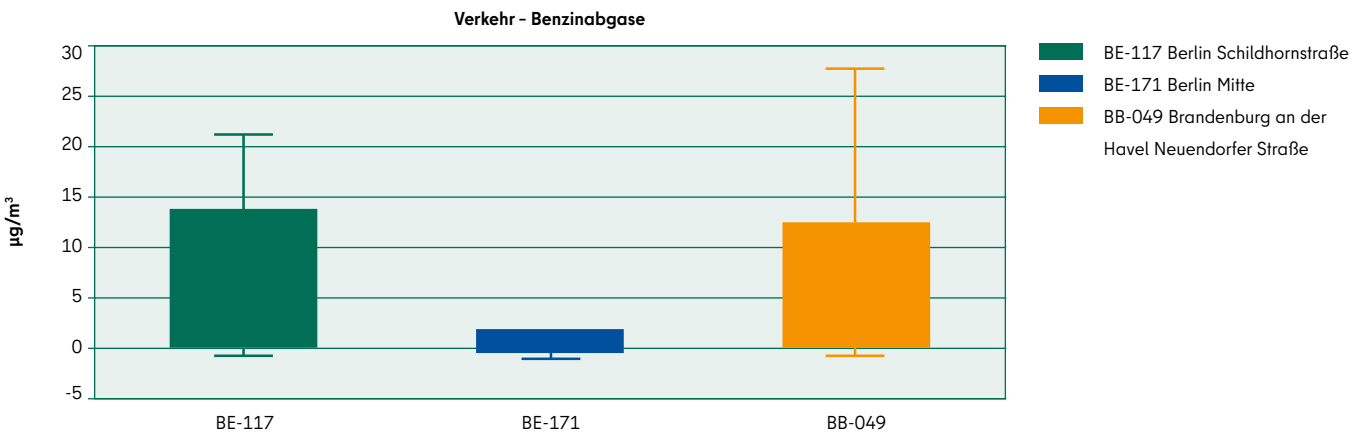


Abbildung 5.67: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F6

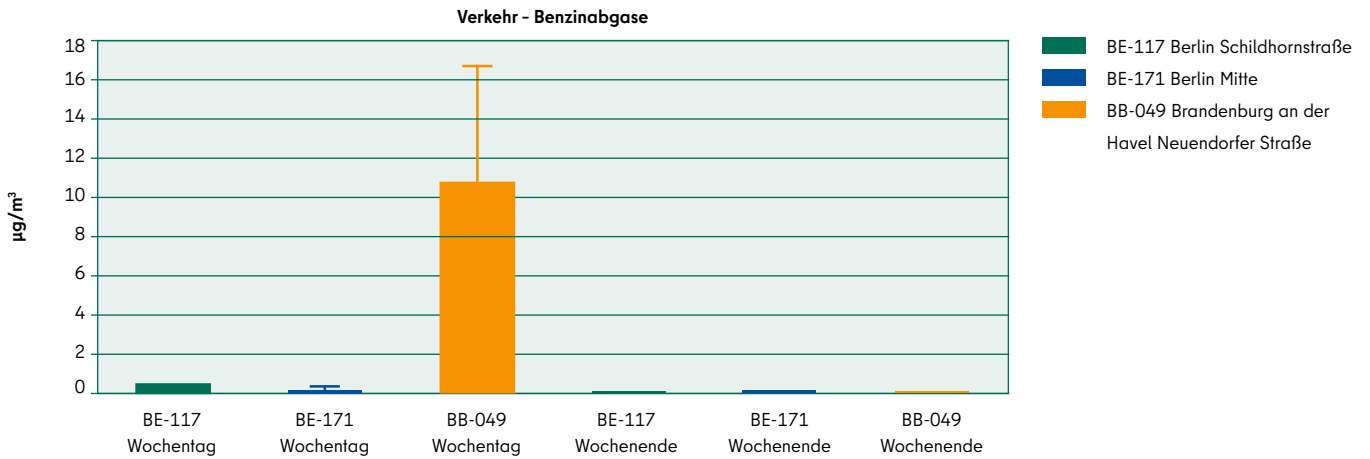


Abbildung 5.68: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F6

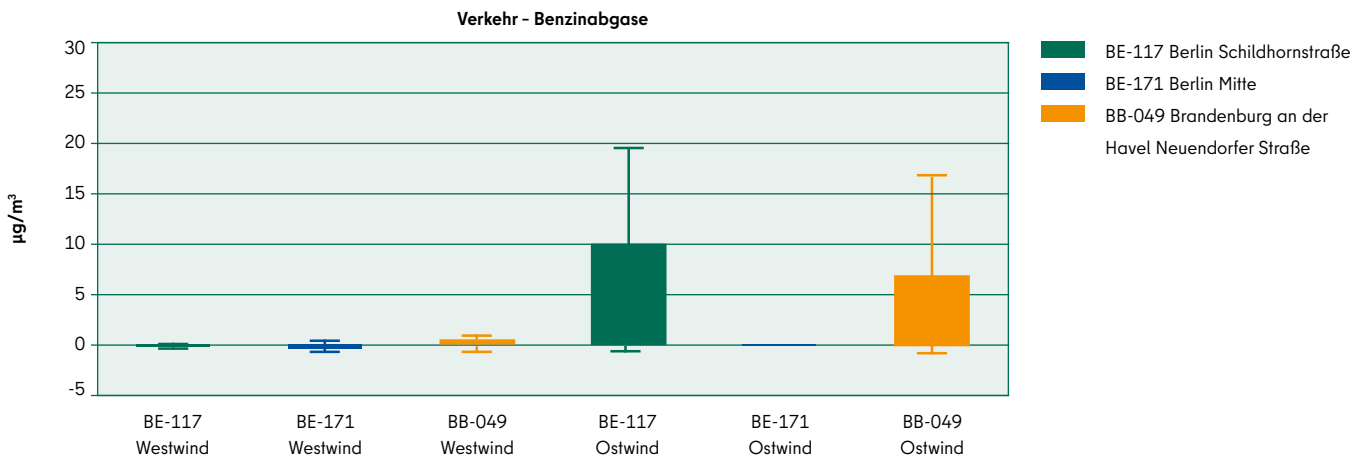


Abbildung 5.69: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F6

### 5.3.7 Verkehr - Abrieb und aufgewirbelter Staub (F7)

Faktor 7 (F7) weist in Berlin an beiden Stationen etwa ähnliche Werte auf und ist in BB-049 erhöht mit etwa 2 Mikrogramm pro Kubikmeter beziehungsweise 10 Prozent des PM<sub>10</sub>. Faktor 7 trägt viel zu Schwermetallen bei, insbesondere Titan, Eisen, Mangan, Nickel und Kupfer. Auch sekundäre Aerosole sind enthalten. Dies spricht stark für eine Mischung aus Metallabrieb zum Beispiel aus Bremsprozessen gemischt mit aufgewirbeltem Staub aus dem Verkehr (van Pinxteren u. a., 2017; Rauterberg-Wulff, 1998). Die festgestellten Metalle und die nicht festgestellten Metalle stimmen im Prinzip und sogar in Bezug auf die relative Verteilung hervorragend mit der Messung der Straßenbahn überein. Mit etwa 10 Prozent Massenanteil findet sich auch ein bedeutsamer Ruß-Anteil. F7 ist eindeutig durch den Wochenrhythmus bestimmt.

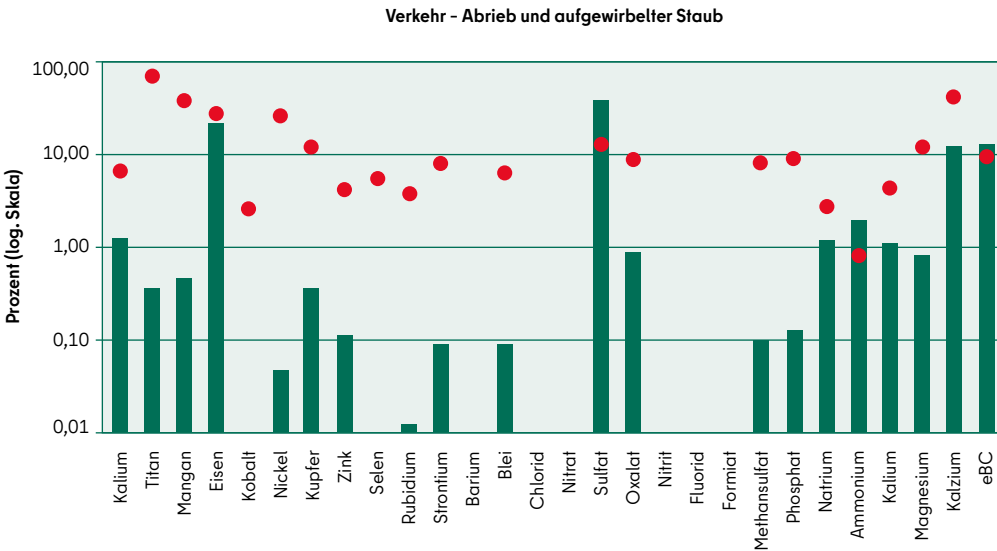


Abbildung 5.70: Chemische Zusammensetzung von F7 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

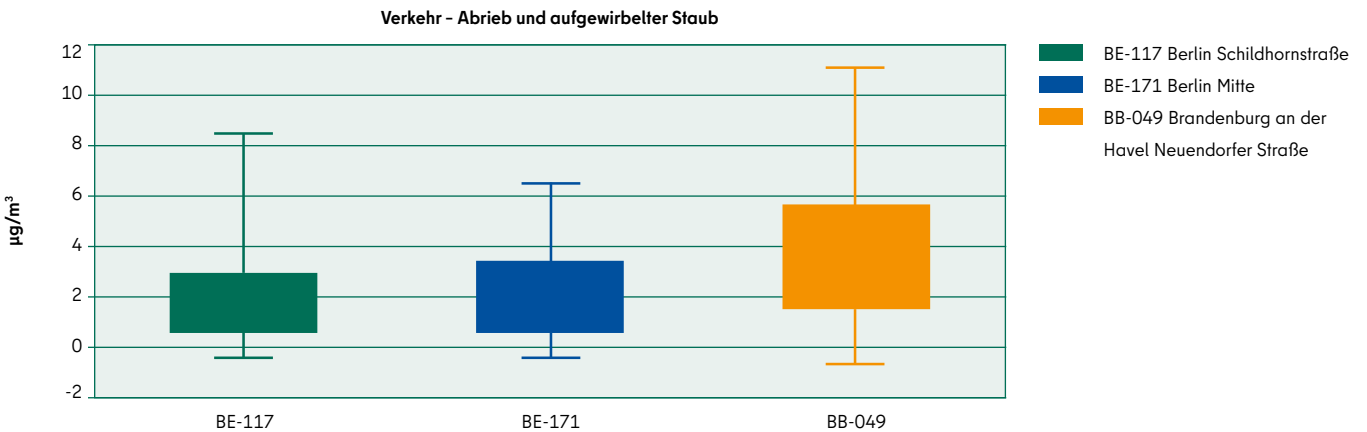


Abbildung 5.71: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F7



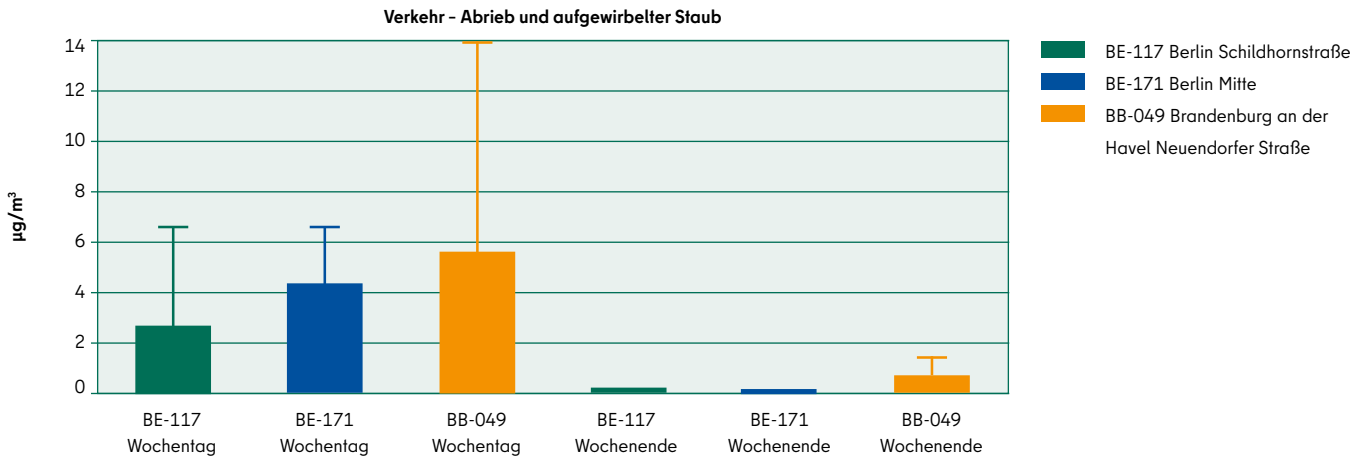


Abbildung 5.72: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktage sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F7

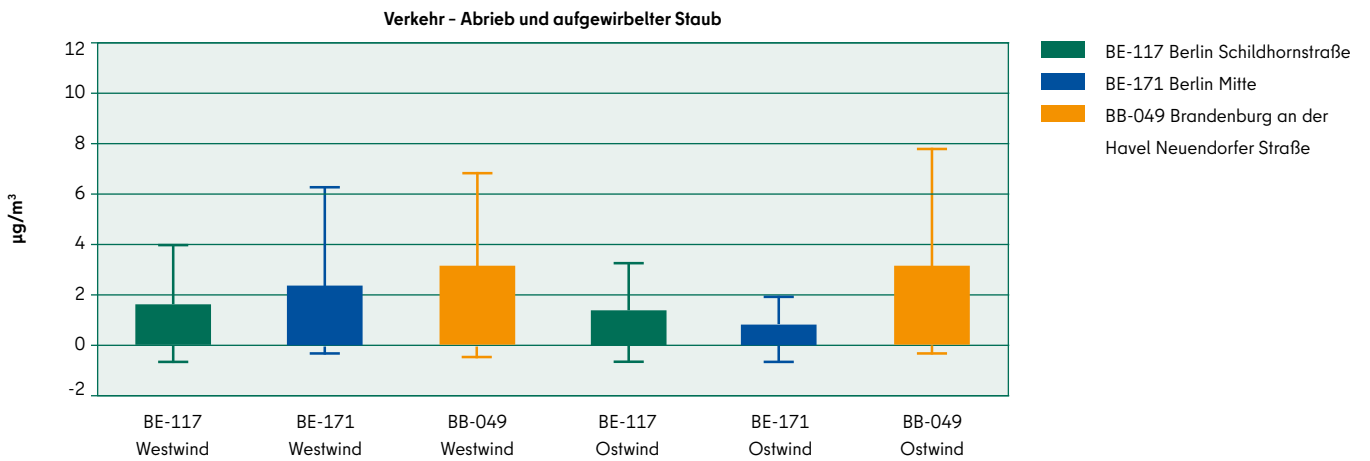


Abbildung 5.73: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F7

### 5.3.8 Verkehr - Dieselabgase (F8)

Faktor 8 (F8) ist aufgrund der Mischung von Rußbestandteilen und aus Abrieb stammenden Schwermetallen wohl auf Verkehr zurückzuführen, vorwiegend auf Abgase aus Dieselfahrzeugen (Abu-Allaban u. a., 2003). Es besteht ein deutlicher Wochenrhythmus. Der Faktor 8 ist in BE-117 am stärksten ausgeprägt und tritt in BE-171 und BB-049 in ähnlichen Konzentrationen auf, die etwa 0,5 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 2,5 Prozent betragen. In BE-117 beträgt die mittlere Konzentration etwa 1,5 Mikrogramm pro Kubikmeter und trägt damit etwa 6 bis 7 Prozent der Gesamtmasse des PM<sub>10</sub>. Möglicherweise ist dies auf den höheren Anteil des Schwerverkehrs zurückzuführen, der in BE-117 deutlich höher liegt als im Innenstadtbereich in BB-049.

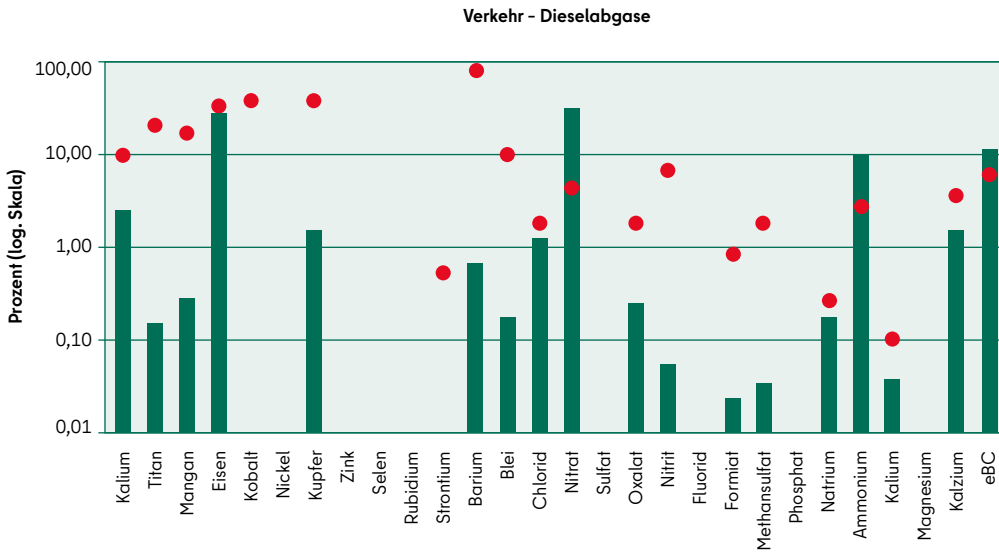


Abbildung 5.74: Chemische Zusammensetzung von F8 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

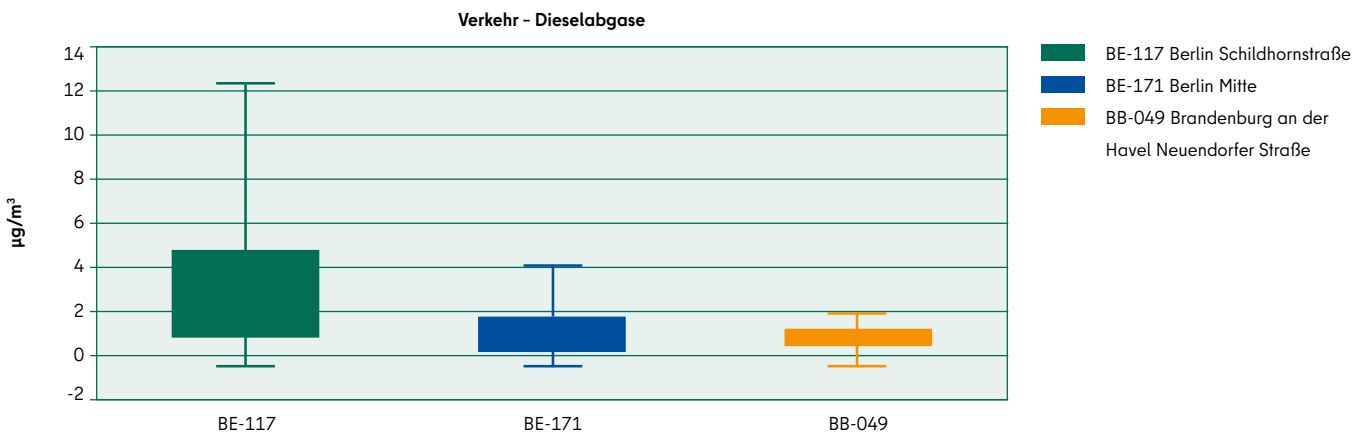


Abbildung 5.75: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F8

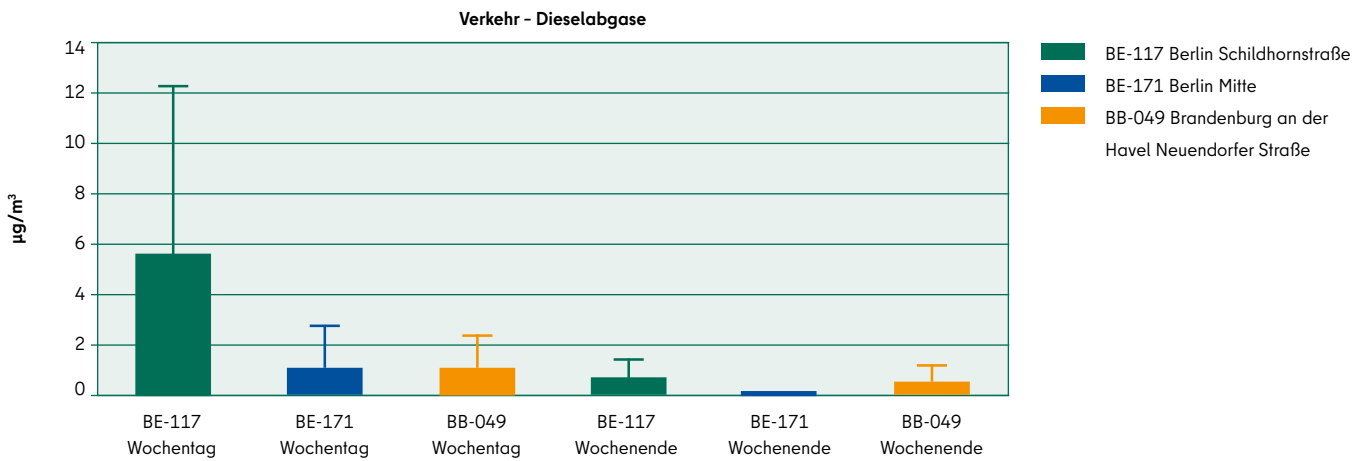


Abbildung 5.76: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F8

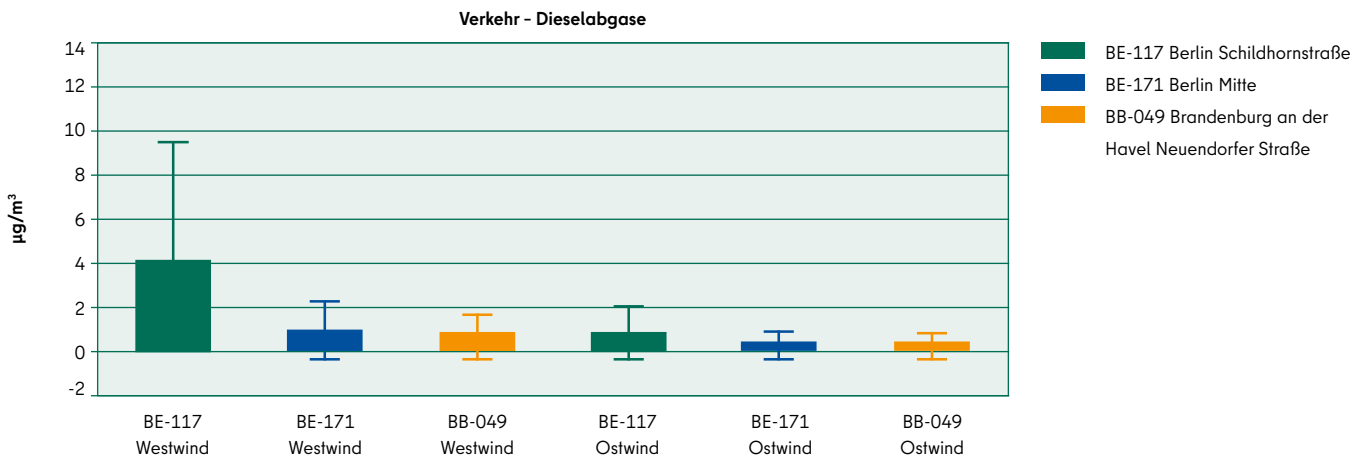


Abbildung 5.77: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F8

### 5.3.9 Verkehr - Reifenabrieb (F9)

F9 tritt am stärksten vom 03.11. bis 08.11. in Erscheinung und ist danach nicht mehr so stark präsent. Dies trifft zwar auch für die Größenordnung anderer Beiträge zu, ist aber für diesen Beitrag außergewöhnlich. F9 weist einen Wochenrhythmus auf und weist einen außergewöhnlich hohen Anteil an Zink auf, das oftmals mit Reifenabrieb in Verbindung steht (van Pinxteren u. a., 2017; Rauterberg-Wulff, 1998). Die genaue Ursache für diesen Faktor und die ungewöhnliche Verteilung kann ohne tiefgehendere Untersuchung nicht ermittelt werden. Möglicherweise könnte die Größe des Beitrages durch die austauscharme, windschwache Wetterlage mit starker Absinkinversion und ohne Niederschläge verursacht worden sein. F9 ist der geringste Beitrag aus den in der PMF analysierten Quellen. Die Größe des Beitrages beträgt im Mittel etwa 0,3 bis 0,5 Mikrogramm pro Kubikmeter und damit etwa 1,5 bis 2 Prozent des PM<sub>10</sub>.

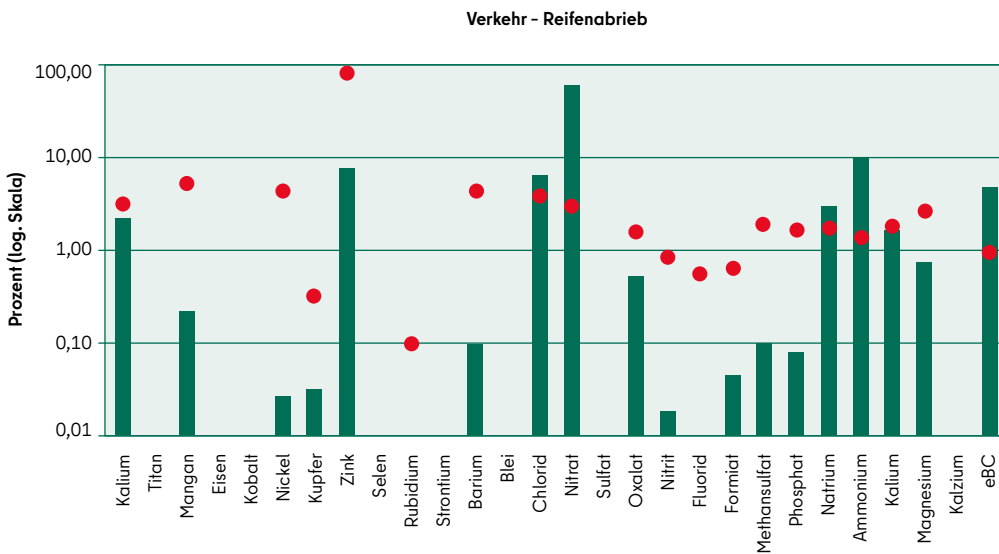


Abbildung 5.78: Chemische Zusammensetzung von F9 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (grüne Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)

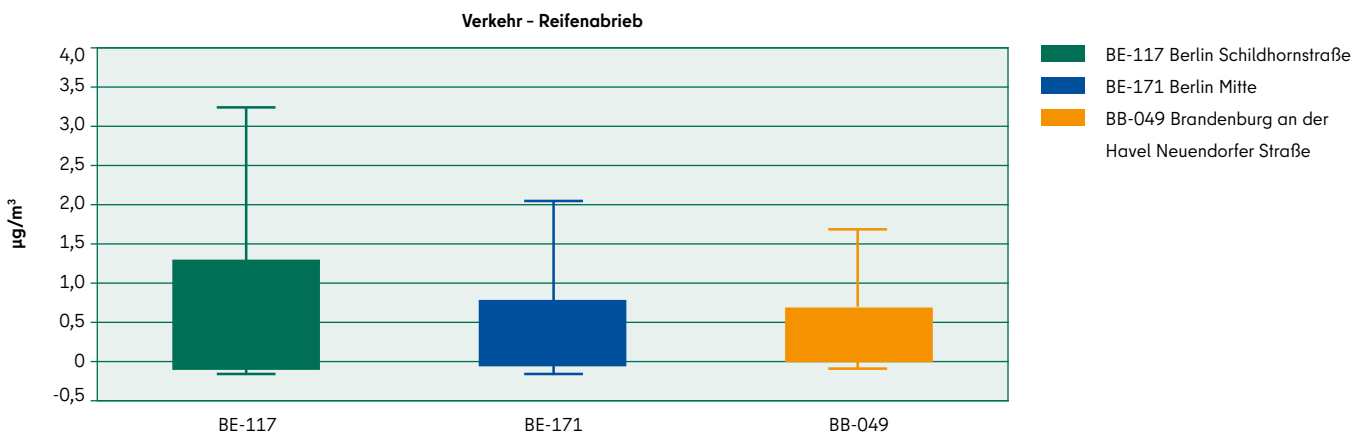


Abbildung 5.79: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F9

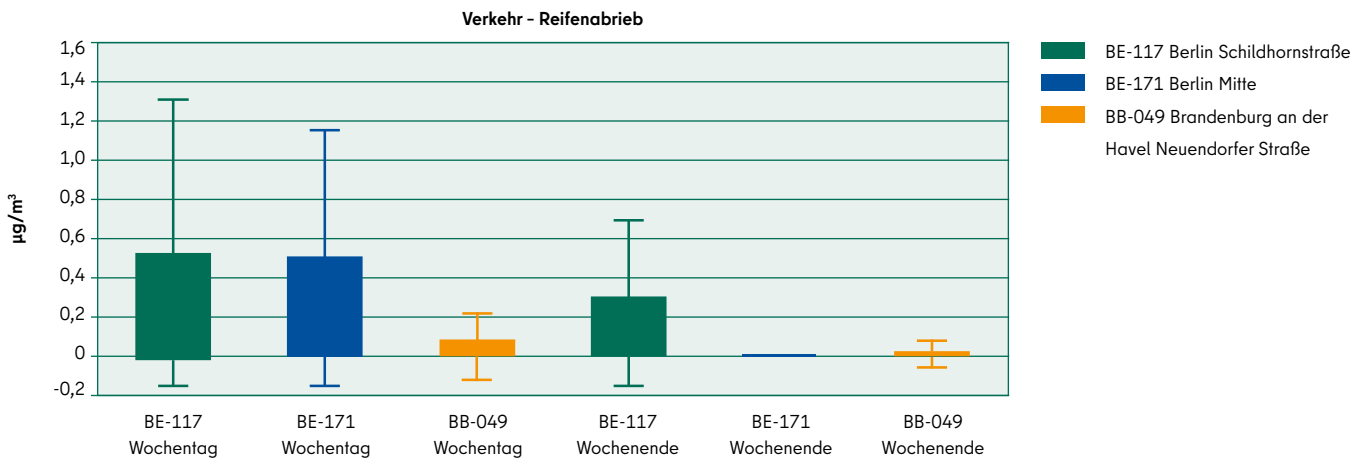


Abbildung 5.80: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F9

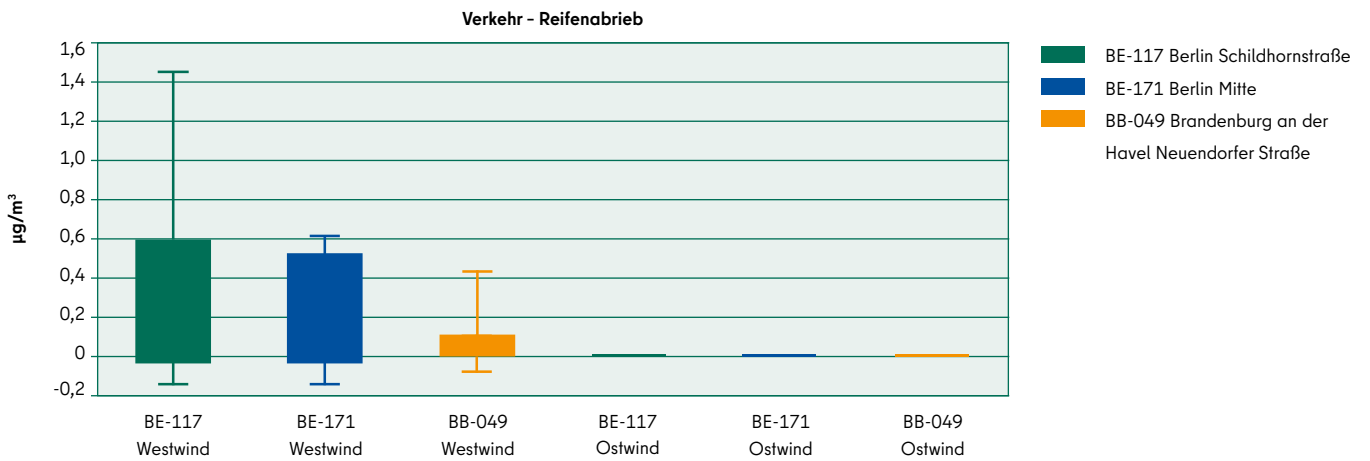


Abbildung 5.81: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F9

## 6 AUSWERTUNG UND DISKUSSION

### Warum wurde diese Studie durchgeführt?

Das Ziel dieser Studie ist es, den Beitrag der Straßenbahn zur PM<sub>10</sub>-Konzentration zu ermitteln. Es besteht keine große Datenbasis für die Beurteilung des Beitrages der Straßenbahn zur Luftverschmutzung. Zur Durchführung von Planungsvorhaben müssen die Emissionen von Straßenbahnen durch Abrieb und Aufwirbelung jedoch berücksichtigt werden. Dazu wird bisher auf Emissionsfaktoren zurückgegriffen, die auf Messungen oder Schätzungen von Zugsystemen stammen.

### Welche Arbeitshypothesen gab es?

In Gutachten zur Luftreinhalteplanung und Bauplanung wurde festgestellt, dass der Anteil der Emissionen der Straßenbahn durchaus Relevanz haben kann und zwischen einer hohen und geringen Wahrscheinlichkeit von Überschreitungen von gesetzlichen Grenzwerten entscheiden können. Da die bisherigen Emissionsfaktoren aus größeren, schwereren und schneller fahrenden Zugsystemen abgeleitet wurden, wurde vor Beginn der Studie davon ausgegangen, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit die wahren Emissionsfaktoren und damit die Beiträge der Straßenbahn zum PM<sub>10</sub> bisher überschätzt wurden. Aufgrund der technischen und baulichen Ähnlichkeit von Zügen und Straßenbahnen wird jedoch davon ausgegangen, dass die typischen Bestandteile der Metalllegierungen beider Systeme weitestgehend übereinstimmen.

### Welche Grundlagen gab es?

Bisher gibt es keine wissenschaftliche oder andere Studien zur Luftbelastung durch oberirdische Straßenbahnsysteme. In einer Studie von Qadir u. a. (2014) ist der Beitrag der Straßenbahn zusammen mit dem Beitrag durch Aufwirbelung von Partikeln geführt worden, ohne dass eine explizite Berechnung der Belastung durchgeführt worden ist. Zu den möglichen zu erwartenden Spurenstoffen sind viele Studien an Zügen durchgeführt worden. Dabei sind Eisen und Kupfer oftmals Hauptbestandteile und weitere Metalle wie etwa Mangan, Aluminium oder Titan in Spurenkonzentrationen vorgefunden worden.

### Wie wurde die Studie durchgeführt?

Die Messungen an drei verschiedenen Stationen in Berlin und Brandenburg an der Havel wurden für den Zeitraum vom 28. Oktober 2020 bis 04. Januar 2021 ausgewertet. Die Station BB-049 liegt direkt an einer Straßenbahnstrecke mit vor Ort vorhandener Haltestelle. Die Stationen in Berlin, BE-117 und BE-171 sind jeweils durch Luftbeimengungen, durch starken Verkehr beziehungsweise städtischen Hintergrund gekennzeichnet. BB-049 ist auch durch Verkehrseinfluss gekennzeichnet. Es sind Messungen aus Kleinfilteranlagen für 24-Stunden Messungen des PM<sub>10</sub> betrachtet worden. Dabei sind die Filter optisch nach eBC und chemisch auf Ionen und Metalle untersucht worden. Die Datensätze sind einer Qualitätssicherung unterzogen worden, darunter der Bereinigung von Blindwerten aus auf den Filtern auch ohne Luftbelastungen vorhandene Spurenstoffen. Weiterhin wurden nur Inhaltsstoffe mit mehr Messwerten über dem LDL an mehr als 50 Prozent des Messzeitraumes berücksichtigt. Weitere Maßnahmen zur Qualitätssicherung beinhalten das Verwerfen der Stratifizierung nach Niederschlägen aufgrund geringer Datenmenge sowie den Ausschluss des 31. Dezember 2020 und des 01. Januar 2021 aufgrund der starken Luftbelastung durch die Benutzung von Feuerwerkskörpern. Auch an den abriebsrelevanten Bauteilen der Straßenbahn wurden forensische Messungen durchgeführt. Die einzelnen Inhaltsstoffe sind anhand der Kriterien der Windrichtung (östliche Winde) und der Werkzeuge der jeweils anderen Gruppe statistisch gegenübergestellt worden. Zur Bestimmung der Quellen der Luftbelastung ist eine PMF-Analyse mit der Software EPA-PMFv5.0 (Norris u. a., 2008) durchgeführt worden. Anhand von statistischen Plausibilitätsbetrachtungen aufgrund der Ergebnisse der Modellierung als auch Überlegungen auf der Basis des DELTA-SA (Pernigotti und Belis, 2018) wurde mit der Auswertung des Laufes mit 9 Faktoren weiter vorgefahren.

### Welche Ergebnisse gibt es?

Die Auswertung der einzelnen Bestandteile und die Ergebnisse der PMF-Analyse ordnen sich plausibel ein in die Ergebnisse der regionalen Studie von van Pinxteren u. a. (2017). Die meteorologischen Verhältnisse haben Einfluss auf die Anreicherung und den Ferntransport von PM<sub>10</sub> aus verschiedenen Quellen. Die chemischen Profile der einzelnen Faktoren der PMF-Analyse sind mit den Bestandteilen der forensischen Messungen an der Straßenbahn verglichen worden. Im Faktor 7 Abrieb und aufgewirbelter Staub sind Konzentrationen von Eisen, Kupfer und Mangan sowie weiterer Schwermetalle festgestellt worden, die auch in den forensischen Messungen vorliegen. Außerdem ist die Konzentration dieses Faktors an der Station BB-049 etwa 1 Mikrogramm pro Kubikmeter höher als an der verkehrsbelasteten Station BE-117. Deshalb wurde dieser Faktor als derjenige identifiziert, der auch die Emissionen aus der Straßenbahn enthält.

### Welche Schlussfolgerungen können aus der Studie gezogen werden?

Die metallischen Abriebe in Faktor 7 dürften aus Fahrzeugbremsen und den metallischen Komponenten der Straßenbahn mit Reibungskontakt stammen, also Schienengleise, Reifen, Bremsen und Stromabnehmer. Der Faktor 7 enthält sowohl die Emissionen der Straßenbahn als auch die, die durch Kfz durch Bremsenabrieb und Aufwirbelung von Staub verursacht werden. Dies ist an der Konzentration von etwa 1 Mikrogramm pro Kubikmeter ablesbar in BE-117. Der Überschuss in BB-049 von etwa 1 Mikrogramm pro Kubikmeter stellt somit den durchschnittlichen Beitrag der Straßenbahnen dar. Da vor Ort pro Tag rund 40 Straßenbahnen fahren, eine Zahl, die sich aus den Fahrplänen der an der Station gelegenen Haltestelle ergibt, kann für die Ermittlung der Beiträge einer einzelnen Straßenbahn ein Beitrag von 0,025 Mikrogramm pro Kubikmeter ergibt. Da in der unmittelbaren Umgebung der Messstelle BB-049 eine Haltestelle und eine 90 Grad-Kurve liegt und somit häufig gebremst, angefahren und starker Schienenkontakt besteht, dürfte der hier ermittelte Beitrag als oberer Grenzwert für die Immissionen aus dem Abrieb der Straßenbahn gelten. Insbesondere begründet sich dies damit, dass auf der freien Strecke nicht gebremst wird und der Bremsprozess sicherlich den größten Beitrag zum Gesamtabrieb der Straßenbahn liefert. Diese Ergebnisse entsprechen den anfangs gestellten Arbeitshypothesen bezüglich der Einordnung der Emissionen von Straßenbahnen: Sie werden durch bisherige Emissionsfaktoren wahrscheinlich deutlich überschätzt. Um die genauen Emissionsfaktoren der Straßenbahnen bestimmen zu können, sind die Ergebnisse dieser Studie noch nicht hinreichend. Dazu sollten Messungen mit numerischer Modellierung nachgestellt werden, die die Emissionen der in dieser Studie gefundenen Quellen berechnen. Durch Sensitivitätsstudien mit variierenden Emissionsfaktoren für die Straßenbahn könnte dann ein Wertebereich für den Emissionsfaktor erstellt werden.

### Welche Limitationen haben die Ergebnisse dieser Studie?

Die Aussagen dieser Studie lassen sich nicht auf einen Emissionsfaktor direkt umrechnen, da dazu im Wesentlichen das Luftvolumen, in das sich die Emissionen ausbreiten, bekannt sein muss. Dies ist zum Beispiel bei Tunneln gegeben, weshalb sich gegebenenfalls Tunnelmessungen an einer geeigneten Messstelle anbieten könnten. Weiterhin lassen sich die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf alle Straßenbahnsysteme und Streckenabschnitte übertragen, da die jeweiligen Verhältnisse stark abweichen können. Allerdings kann wohl gesagt werden, dass die Wahrscheinlichkeit für eine größere Belastung durch Straßenbahnen gering ist, da an der Station BB-049 durch das Vorhandensein von Straßenbahnhaltestelle, 90 Grad-Kurve und Straßenschlucht gute Voraussetzungen für vergleichsweise hohe Belastungen gegeben sind.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde eine Messperiode von etwa 60 Tagen genutzt in Berlin und Brandenburg an drei Messstellen, wovon zwei an verkehrsreichen Straßen und eine an einer Straßenbahnhaltestelle positioniert sind. Die Messung der Inhaltsstoffe des PM<sub>10</sub> ist durch statistische Rezeptormodellierung sowie Stratifizierung nach Aktivitätsraten (Werktage) und Windrichtung verschiedenen Quellen zugeordnet worden. Dabei wurden neun relevante Quellen identifiziert, die jeweils den Kategorien Ferntransport, Hintergrund und Verkehr zugeordnet worden sind:

- Ferntransport, gesamt: 6 bis 8 Mikrogramm pro Kubikmeter (circa 38 Prozent);
  - F1: Ferntransport und Kohle, Beitrag: 4 bis 6 Mikrogramm pro Kubikmeter;
  - F2: Gealtertes Seesalz, Beitrag: 2 Mikrogramm pro Kubikmeter;
- Hintergrund, gesamt: 5 bis 9 Mikrogramm pro Kubikmeter (circa 38 Prozent);
  - F3: Müllverbrennung, Beitrag: 1,5 bis 2 Mikrogramm pro Kubikmeter;
  - F4: Sekundäres Aerosol, Beitrag: 3 bis 5 Mikrogramm pro Kubikmeter;
  - F5: Diesel (Heizung und Verkehr), Beitrag: 0,5 bis 2 Mikrogramm pro Kubikmeter;
- Verkehr, gesamt: 2,2 bis 6,5 Mikrogramm pro Kubikmeter (circa 24 Prozent);
  - F6: Verkehr (Benzin), Beitrag: 1 bis 2,5 Mikrogramm pro Kubikmeter;
  - F7: Verkehr (Abrieb und aufgewirbelter Staub), Beitrag: 1 bis 2 Mikrogramm pro Kubikmeter;
  - F8: Dieselabgase, Beitrag: 0,5 bis 1,5 Mikrogramm pro Kubikmeter;
  - F9: Reifenabrieb, Beitrag: 0,2 bis 0,5 Mikrogramm pro Kubikmeter.

Insgesamt lassen sich diese Quellen in die drei Kategorien aufteilen: Ferntransport, Hintergrund und Verkehr. Verkehr, inklusive Straßenbahn macht circa 2,2 bis 6,5 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 15 (BE-171) bis 40 Prozent (BE-117, BB-049) des PM<sub>10</sub> aus, je nach Exposition. Ferntransport, inklusive Seesalz, trägt rund 6 bis 8 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 30 bis 45 Prozent zum PM<sub>10</sub> bei. Stationäre Verbrennung aus Heizung, Müllverbrennung und Kraftwerken sowie andere Hintergrundemissionen tragen rund 5 bis 9 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 25 bis 55 Prozent zum PM<sub>10</sub> bei. Diese Zuordnung ist in guter Übereinstimmung mit der Vorstudie von van Pinxteren u. a. (2017). Die Trennschärfe der Quellen und Kategorien ist nicht völlig gegeben, das heißt, so können zum Beispiel Emissionen aus der Ölverbrennung lokal entstehen oder durch Ferntransport zum PM<sub>10</sub> beitragen. Jedoch stimmen die Arten und Größenordnungen der Quellkategorien mit denen voriger Studien überein (van Pinxteren u. a., 2017). Die Abriebe der Straßenbahn tragen an Stellen mit hoher Brems- und Anfahraktivität bis zu 1 Mikrogramm pro Kubikmeter oder 4 Prozent zur gesamten Konzentration bei. Jede einzelne Straßenbahn löst eine Erhöhung des Tagesmittelwertes um bis zu 0,025 Mikrogramm pro Kubikmeter aus. Im Vergleich mit numerischen Simulationen für Luftreinhaltegutachten ist diese Belastung deutlich geringer. In diesen Gutachten sind Werte von bis zu 5 Mikrogramm pro Kubikmeter mittels der zugrunde gelegten Emissionsfaktoren festgestellt worden. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie geben Anlass zu starken Zweifeln an der Gültigkeit dieser Emissionsfaktoren, die aus Messungen und Schätzungen zu Emissionen beziehungsweise Materialverbräuchen an Zügen hergeleitet werden. Dies ist nicht verwunderlich, da Züge unter Annahme der Skalierung der Emissionsfaktoren mit der Fahrzeugmasse aufgrund der höheren Geschwindigkeit deutlich größere kinetische Energien aufweisen und daher auch größere Kräfte und damit Abriebe zur Bremsung benötigen. Die quadratische Zunahme der kinetischen Energie mit der Geschwindigkeit verdeutlicht dies, gerade wenn man bedenkt, dass Züge mit Geschwindigkeiten von weit über 100 Kilometer pro Stunde verkehren und Straßenbahnen maximal etwa 55 Kilometer pro Stunde erreichen aufgrund des städtischen Tempolimits von 50 Kilometer pro Stunde.



Die in dieser Studie ermittelten Daten können auch für weitere Untersuchungen genutzt werden. Dazu gehören Arbeiten zur Interpretation und Zuordnung von Quellprozessen für PM<sub>10</sub>. Es sind auch weitere Arbeiten nötig, um den Emissionsfaktor für Straßenbahnen besser festlegen zu können. Mit der Feststellung, dass Straßenbahnen etwa 0,025 Mikrogramm pro Kubikmeter pro Straßenbahn zum 24-Stunden Mittelwert beitragen und somit deutlich weniger als durch die Anwendung der bisherigen Emissionsfaktoren, besteht für diese ein Überarbeitungsbedarf. Dazu ist aus unserer Sicht eine weitere Studie auf der Basis der vorliegenden Daten nötig, in der für den vorliegenden Zeitraum Emissionsmodellierung mit unterschiedlichen Emissionsfaktoren betrieben wird und der Emissionsfaktor durch den Vergleich der Messwerte und der simulierten Immission bestimmt wird. Dies stellt ein indirektes Modellierungsverfahren dar, was im Falle der Straßenbahn jedoch eine deutliche einfachere und genauere Methode der Festlegung eines Emissionsfaktors darstellen dürfte, als die Nutzung von Faktoren aus Messungen mit Zügen. Weitere Ansätze für die genauere Bestimmung der Emissionsfaktoren und der Einzelbeiträge könnten sich auch auf Studien über längere Zeiträume hinweg mit größerer, etwa stündlicher, Auflösung der Messung erstrecken. Jedoch ist für Studien mit größerer Auflösung, mit höherer Unsicherheit zu rechnen und gegebenenfalls ist die chemische Ermittlung von Spurenstoffen aufgrund der geringen Mengen an Material auch mit großen Unsicherheiten verbunden. Eine Verlängerung der hier durchgeführten Messreihe sowie eine Beschränkung der Analysen auf die festgestellten Metalle könnte ebenfalls wertvolle Erkenntnisse liefern.

Insgesamt liefert diese Studie zwei wesentliche Erkenntnisse:

1. Die Belastung der Luft durch PM<sub>10</sub> aus den Abrieb- und Verwirbelungsprozessen durch Straßenbahnen beträgt bis zu 1 Mikrogramm pro Kubikmeter an Stellen, in denen Bremsungen und Anfahrprozesse stattfinden. Einzelne Straßenbahnen tragen etwa 0,025 Mikrogramm pro Kubikmeter zur 24-Stunden PM<sub>10</sub>-Konzentration bei.
2. Der Vergleich dieser Werte mit den Ergebnissen von Gutachten unter der Verwendung üblicher Emissionsfaktoren kommt zu dem Ergebnis, dass diese Emissionsfaktoren die Emissionen um den Faktor 3 bis 5 überschätzen. Daraus leitet sich die Notwendigkeit her, diese Emissionsfaktoren zu überarbeiten, mit geeigneten Methoden. Es wird eine Kombination aus kollozierter Messung und numerischer Simulation empfohlen.

Die einfache und leicht nachvollziehbare Methodik der Studie ist nicht ohne Unsicherheiten, was allerdings eine Aussage ist, die sich zu allen Messungen oder Modellierungen von Luftschadstoffen treffen lässt. Die Unsicherheit durch fehlerhafte Erkennung des Faktors 7 (Straßenbahn) ist durch statistische Methoden untersucht worden und äußert gering. Der Betrag der Emissionen zu den gemessenen Konzentrationen weist eine Unsicherheit von etwa 25 Prozent aus und wird durch die Messunsicherheit der Instrumente, der chemischen Bestimmung und durch äußere Einflüsse verursacht. Eine solche Unsicherheit ist als akzeptabel einzuschätzen. Die erhobenen forensischen Messungen der Straßenbahnabstriche unterliegen einer größeren Unsicherheit, können aber trotzdem qualitativ genutzt werden und bestätigen die Erkenntnisse und Interpretation der PMF-Analyse. Wir möchten uns bedanken bei Dr. Claudio Belis für seine hilfreichen Kommentare und die Durchführung der DELTA-SA Vergleiche.

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 3.1:	Zeitserie der Tageshöchst-, -mittel- und -tiefsttemperaturen sowie täglichen Niederschlagsmengen gemittelt über Standorte von DWD-Wetterstationen in Brandenburg an der Havel, Potsdam und Berlin Tegel .....	16
Abbildung 3.2:	Zeitserie der relativen Luftfeuchtigkeit und täglichen Niederschlagsmengen gemittelt über Standorte von DWD-Wetterstationen in Brandenburg an der Havel, Potsdam und Berlin Tegel .....	16
Abbildung 3.3:	Zeitserie der Windrichtung, -geschwindigkeit und täglichen Sonnenscheindauer gemittelt über Standorte von DWD-Wetterstationen in Brandenburg an der Havel, Potsdam und Berlin Tegel .....	17
Abbildung 3.4:	Zeitserie der täglichen Mittelwerte von PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	18
Abbildung 3.5:	Zeitserie der täglichen Mittelwerte von NO <sub>2</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	18
Abbildung 3.6:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von PM <sub>10</sub> an Tagen mit Wind aus westlichen und östlichen Richtungen für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	19
Abbildung 3.7:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von PM <sub>10</sub> an Werktagen und Sams-, Sonn- und Feiertagen für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	19
Abbildung 3.8:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von PM <sub>10</sub> an Tagen mit und ohne starke Inversion in Bodennähe für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	20
Abbildung 5.1:	Aufnahme eines Stromabnehmers aus Graphit auf dem Betriebsgelände der VBBR .....	26
Abbildung 5.2:	Aufnahme eines Radreifens einer üblichen Straßenbahn auf dem Betriebsgelände der VBBR.....	27
Abbildung 5.3:	Aufnahme einer Bremsscheibe an einer angetriebenen Achse einer üblichen Straßenbahn auf dem Betriebsgelände der VBBR.....	28
Abbildung 5.4:	Aufnahme einer Bremsscheibe an einer passiven Achse einer üblichen Straßenbahn auf dem Betriebsgelände der VBBR, deutlich sichtbare Staubablagerungen sind erkennbar .....	29
Abbildung 5.5:	Aufnahme eines Schienengleises der VBBR nahe Hauptbahnhof Brandenburg an der Havel .....	30
Abbildung 5.6:	Darstellung der normierten elementaren Konzentration der festgestellten Metalle und Ionen für die gewichteten Werte aus den forensischen Filtermessungen an der Straßenbahn, eBC konnte nicht ermittelt werden aufgrund der Beschädigungen an den Untersuchungsfiltern .....	31
Abbildung 5.7:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Eisen (Fe) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	32
Abbildung 5.8:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Eisen (Fe) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	32
Abbildung 5.9:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Kalium (K) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	33

Abbildung 5.10:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Kalium (K) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	33
Abbildung 5.11:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Zink (Zn) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	34
Abbildung 5.12:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Zink (Zn) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	34
Abbildung 5.13:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Kupfer (Cu) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	35
Abbildung 5.14:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Kupfer (Cu) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	35
Abbildung 5.15:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Blei (Pb) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	36
Abbildung 5.16:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Blei (Pb) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	36
Abbildung 5.17:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Strontium (Sr) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	37
Abbildung 5.18:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit Westwind (links) und Ostwind (rechts) von Strontium (Sr) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	37
Abbildung 5.19:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Mangan (Mn) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	38
Abbildung 5.20:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Mangan (Mn) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	38
Abbildung 5.21:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Barium (Ba) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	39
Abbildung 5.22:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Barium (Ba) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	39
Abbildung 5.23:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Titan (Ti) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	40
Abbildung 5.24:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentage (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Titan (Ti) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	40
Abbildung 5.25:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	41
Abbildung 5.26:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	41
Abbildung 5.27:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Nitrat (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	42
Abbildung 5.28:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	42
Abbildung 5.29:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	43
Abbildung 5.30:	Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen .....	43
Abbildung 5.31:	Boxplot der täglichen Mittelwerte von Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) im PM <sub>10</sub> für die drei betrachteten Luftmessstationen.....	44

Abbildung 5.32: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen.....44

Abbildung 5.33: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen ..... 45

Abbildung 5.34: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen..... 45

Abbildung 5.35: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen..... 46

Abbildung 5.36: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Natrium ( $\text{Na}^+$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen ..... 46

Abbildung 5.37: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Natrium ( $\text{Na}^+$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen .....47

Abbildung 5.38: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Natrium ( $\text{Na}^+$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen .....47

Abbildung 5.39: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Kalzium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen ..... 48

Abbildung 5.40: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von Kalzium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen..... 48

Abbildung 5.41: Boxplot der täglichen Mittelwerte von Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen.....49

Abbildung 5.42: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen .....49

Abbildung 5.43: Boxplot der täglichen Mittelwerte von äquivalentem Black-Carbon beziehungsweise elementarem Kohlenstoff (eBC) im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen ..... 50

Abbildung 5.44: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Tagen mit westlichen (links) und östlichen Winden (rechts) von eBC im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen..... 50

Abbildung 5.45: Boxplot der täglichen Mittelwerte an Wochentagen (links) und Wochenend- beziehungsweise Feiertagen (rechts) von eBC im  $\text{PM}_{10}$  für die drei betrachteten Luftmessstationen..... 51

Abbildung 5.46: Chemische Zusammensetzung von F1 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte).....52

Abbildung 5.47: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F1. ....52

Abbildung 5.48: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F1 ..... 53

Abbildung 5.49: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F1 ..... 53

Abbildung 5.50: Chemische Zusammensetzung von F2 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte)..... 54

Abbildung 5.51: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F2..... 54

Abbildung 5.52: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktag sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F2..... 55

Abbildung 5.53: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F2..... 55

Abbildung 5.54: Chemische Zusammensetzung von F3 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte) ..... 56

Abbildung 5.55: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F3 ..... 56

Abbildung 5.56: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werkstage sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F3.....57

Abbildung 5.57: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F3.....57

Abbildung 5.58: Chemische Zusammensetzung von F4 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte) ..... 58

Abbildung 5.59: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F4..... 58

Abbildung 5.60: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werkstage sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F4..... 59

Abbildung 5.61: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F4..... 59

Abbildung 5.62: Chemische Zusammensetzung von F5 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte) ..... 60

Abbildung 5.63: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F5..... 60

Abbildung 5.64: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werkstage sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F5..... 61

Abbildung 5.65: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F5..... 61

Abbildung 5.66: Chemische Zusammensetzung von F6 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte) ..... 62

Abbildung 5.67: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F6 ..... 62

Abbildung 5.68: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werkstage sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F6..... 63

Abbildung 5.69: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F6..... 63

Abbildung 5.70: Chemische Zusammensetzung von F7 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte) ..... 64

Abbildung 5.71: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F7 ..... 64

Abbildung 5.72: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werkstage sowie Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F7..... 65

Abbildung 5.73: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind für die Beiträge von F7 ..... 65

Abbildung 5.74: Chemische Zusammensetzung von F8 der PMF-Analyse mit 9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen Elements oder Ions (rote Punkte) ..... 66

Abbildung 5.75: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F8 ..... 66

Abbildung 5.76: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktage sowie  
Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F8 .....67

Abbildung 5.77: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und Ostwind  
für die Beiträge von F8.....67

Abbildung 5.78: Chemische Zusammensetzung von F9 der PMF-Analyse mit  
9 Profilen, dargestellt sind die Anteile eines Elements oder Ions  
an der gesamten Faktorkonzentration (graue Balken) sowie  
der Anteil des Faktors an der Gesamtkonzentration des jeweiligen  
Elements oder Ions (rote Punkte) ..... 68

Abbildung 5.79: Darstellung der Boxplots für die Beiträge von F9 ..... 68

Abbildung 5.80: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Werktage sowie  
Sonn- und Feiertage für die Beiträge von F9..... 69

Abbildung 5.81: Darstellung der Boxplots stratifiziert für Westwind und  
Ostwind für die Beiträge von F9..... 69

# TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Analysierte Bestandteile auf den für diese Studie erhobenen Filterproben .....	10
Tabelle 2.2:	Darstellung der Anzahl der Tage, stratifiziert nach verschiedenen meteorologischen und phänomenologischen Ausschlusskriterien, ohne 31. Dezember 2020 und 01. Januar 2021.....	12
Tabelle 4.1:	Chemische Zusammensetzung aus Emissionsprofilen für Abriebe aus dem Schienenverkehr. Es sind die Orte, Zeiten, Quellenangaben sowie die Spezieszusammensetzung angegeben. Elemente mit Anteilen von < 0,1 Prozent werden nicht berücksichtigt .....	23
Tabelle 4.2:	Chemische Zusammensetzung aus Emissionsprofilen für Abriebe aus Kfz-Reifen. Es sind die Orte, Zeiten, Quellenangaben sowie die Spezieszusammensetzung angegeben. Elemente mit Anteilen von < 0,1 Prozent werden nicht berücksichtigt .....	23
Tabelle 4.3:	Chemische Zusammensetzung aus Emissionsprofile für Abriebe aus Kfz-Bremsen. Es sind die Orte, Zeiten, Quellenangaben sowie die Spezieszusammensetzung angegeben. Elemente mit Anteilen von < 0,1 Prozent werden nicht berücksichtigt .....	24

# LITERATURVERZEICHNIS

- [Abbasi u. a., 2013] ABBASI, Saeed; JANSSON, Anders; SELLGREN, Ulf; OLOFSSON, Ulf: Particle emissions from rail traffic: A literature review. In: *Critical reviews in environmental science and technology* 43 (2013), Nr. 23, Seite 2511 bis 2544.
- [Abbasi u. a., 2012] ABBASI, Saeed; OLANDER, Lars; LARSSON, Christina; OLOFSSON, Ulf; JANSSON, Anders; SELLGREN, Ulf: A field test study of airborne wear particles from a running regional train. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 226 (2012), Nr. 1, Seite 95 bis 109.
- [Abu-Allaban u. a., 2003] ABU-ALLABAN, Mahmoud; GILLIES, John A.; GERTLER, Alan W.; CLAYTON, Russ; PROFFITT, David: Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles. In: *Atmospheric environment* 37 (2003), Nr. 37, Seite 5283 bis 5293.
- [Amato u. a., 2010] AMATO, F.; PANDOLFI, M.; MORENO, T.; FURGER, M.; PEY, J.; ALASTUEY, A.; BUKOWIECKI, N.: 635 Prevot, ASH, Baltensperger, U., and Querol, X.: Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities. In: *Atmos. Environ* 45 (2010), Seite 6777 bis 6787.
- [Asfinag und AG 2015] ASFINAG, BMG; AG, ÖBB I.: Ermittlung von aktuellen Emissionsfaktoren für limitierte und nicht limitierte Schadstoffkomponenten des Straßen- und Schienenverkehrs. (2015).
- [Belis u. a., 2014] BELIS, Claudio A.; LARSEN, Bo R.; AMATO, Fulvio; EL HADDAD, Imad; FAVEZ, Olivier; HARRISON, Roy M.; HOPKE, Philip K.; NAVA, Silvia; PAATERO, Pentti; PREVOT, Andre u. a.: European guide on air pollution source apportionment with receptor models. In: *JRC reference reports EUR26080 EN* (2014).
- [Burkhardt u. a., 2005] BURKHARDT, Michael; ROSSI, Luca; BOLLER, Markus: Stoffemissionen durch Bahnanlagen und Bahnbetrieb. In: *Magnesium* 2 (2005), Nr. 4, Seite 4.
- [Colombi u. a., 2010] COLOMBI, Cristina; GIANELLE, V.; BELIS, Claudio A.; LARSEN, Bo R.: Determination of local source profile for soil dust, brake dust, and biomass burning sources. In: *Chemical Engineering Transactions* 22 (2010), Seite 233 bis 238.
- [Fomba u. a., 2013] FOMBA, K. W.; MÜLLER, K.; VAN PINXTEREN, D.; HERRMANN, H.: Aerosol size-resolved trace metal composition in remote northern tropical Atlantic marine environment: case study Cape Verde islands. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 13 (2013), Nr. 9, Seite 4801 bis 4814.
- [Fomba u. a., 2014] FOMBA, K. W.; MÜLLER, K.; VAN PINXTEREN, D.; POULAIN, L.; VAN PINXTEREN, M.; HERRMANN, H.: Long-term chemical characterization of tropical and marine aerosols at the Cape Verde Atmospheric Observatory (CVAO) from 2007 to 2011. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 14 (2014), Nr. 17, Seite 8883 bis 8904.
- [Gehrig u. a., 2007] GEHRIG, Robert; HILL, Matz; LIENEMANN, Peter; ZWICKY, Christoph N.; BUKOWIECKI, Nicolas; WEINGARTNER, Ernest; BALTENSPERGER, Urs; BUCHMANN, Brigitte: Contribution of railway traffic to local PM10 concentrations in Switzerland. In: *Atmospheric Environment* 41 (2007), Nr. 5, Seite 923 bis 933.



Geoportal Berlin / Verkehrsmengen DTVw 2019

- [Herenz u. a., 2019] HERENZ, Paul; GRUNOW, Dr. K.; KAUPP, Dr. H.; NOTHARD, Rainer: Standortdokumentation der Ortswahl gemäß der 39. BImSchV Teil 1 Verkehrsnahe Messstellene. In: *Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz* (2019).
- [Hoffmann Leichter Ingenieurgesellschaft, 2017] Hoffmann Leichter Ingenieurgesellschaft: Schallschutzgutachten für den B-Plan Nr. 26 „Mulit-Service-Center“ in 14770 Brandenburg an der Havel (2017), Seite 8.
- [Landesamt für Umwelt, Brandenburg, 2021] Landesamt für Umwelt, Brandenburg. Stationsdatenblatt Messstation Brandenburg, Neuendorfer Str. Stationscode DEBB049 (2021)
- [Lorenzo u. a., 2006] LORENZO, Ronny; KAEGI, R.; GEHRIG, R.; GROBÜTY, Bernard: Particle emissions of a railway line determined by detailed single particle analysis. In: *Atmospheric Environment* 40 (2006), Nr. 40, Seite 7831 bis 7841.
- [Norris u. a., 2008] NORRIS, Gary; DUVALL, Rachelle; BROWN, Steve; BAI, Song: EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide. In: *Prepared for the US Environmental Protection Agency, Washington, DC, by the National Exposure Research Laboratory, Research Triangle Park* (2008).
- [Ntziachristos und Boulter, 2003] NTZIACHRISTOS, Leonidas; BOULTER, Paul: Road vehicle tyre and brake wear. Road surface wear. In: *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook, 3rd edition, index to methodology chapters ordered by SNAP97 Activity, Group 7 Road transport, Copenhagen, Denmark* (2003).
- [Pernigotti und Belis, 2018] PERNIGOTTI, D.; BELIS, C.A.: DeltaSA tool for source apportionment benchmarking, description and sensitivity analysis. In: *Atmospheric Environment* 180 (2018), Seite 138 bis 148.
- [van Pinxteren u. a., 2017] PINXTEREN, Dominik van; MOTHESE, Falk; SPINDLER, Gerald; FOMBA, Kanneh W. ; HERRMANN, Hartmut: Auswertung der gravimetrischen PM<sub>10</sub>-Messungen in Sachsen, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Berlin zur Identifikation des Anteils verschiedener Quellen an der Feinstaubbelastung anhand der Inhaltsstoffe und anhand von Rezeptormodellierungen. In: *Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt - IX C 57* (2017).
- [Qadir u. a., 2014] QADIR, R. M.; SCHNELLE-KREIS, J.; ABBASZADE, G.; ARTEAGA-SALAS, J. M.; DIEMER, J.; ZIMMERMANN, R.: Spatial and temporal variability of source contributions to ambient PM<sub>10</sub> during winter in Augsburg, Germany using organic and inorganic tracers. In: *Chemosphere* 103 (2014), Seite 263 bis 273.
- [Rauterberg-Wulff, 1998] RAUTERBERG-WULFF, A.: The contribution of tyre and brake abrasion to soot levels in streets; Beitrag des Reifen- und Bremsenabriebs zur Rußemission an Strassen. (1998).
- [Rauterberg-Wulff, 2000] RAUTERBERG-WULFF, Eng A.: Investigation into Significance of Dust Resuspension for the PM<sub>10</sub> Emission on a Main Road. (2000).
- [Sjödín u. a., 2010] SJÖDÍN, Ake; FERM, Martin; BJÖRK, Anders; RAHMBERG, Magnus; GUDMUNDSSON, IVL A. ; SWIETLICKI, Erik: Wear particles from road traffic. (2010).
- [Wählin u. a., 2006] WÄHLIN, Peter; BERKOWICZ, Ruwim; PALMGREN, Finn: Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen. In: *Atmospheric Environment* 40 (2006), Nr. 12, Seite 2151 bis 2159.

# ANHANG A

## BESCHREIBUNG DER ANLAGEN

Bei den Anlagen zu Bericht handelt es sich um die folgenden Datensätze, die jeweils in Excel-Tabellen zur Verfügung gestellt werden, um weiteren Analysen dienlich zu sein:

1. Rohdaten zu PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub>
2. Meteorologische Datensätze
3. Chemische Analysen
4. eBC-Analyse
5. Straßenbahnprofil
6. Ergebnisse der PMF-Analysen
7. Stratifizierte Daten zu Elementen und Faktoren
8. Ergebnisse von DELTA-SA

### A.1 Rohdaten zu PM<sub>10</sub> und NO<sub>2</sub>

Aus den Daten der Stationen BE-117, BE-171 und BB-049 sind für den 28. Oktober 2020 bis zum 04. Januar 2021 die validierten Rohdaten bereitgestellt worden, welche auch analysiert worden sind. Diese Daten finden sich in einem einfachen Tabellenformat, mit Spalten für die Luftbeimengungen und Zeilen für jedes Datum. Bereitgestellt wurden die 24-Stunden Mittelwerte in Mikrogramm pro Kubikmeter ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

### A.2 Meteorologische Datensätze

Aus den Daten der Wetterstationen Brandenburg an der Havel, Berlin Tegel und Potsdam sind für den 28. Oktober 2020 bis zum 04. Januar 2021 die validierten Rohdaten für Tageshöchsttemperatur, Tagestiefsttemperatur, 24-Stunden Niederschlagssumme und Sonnenscheindauer bereitgestellt worden, welche auch analysiert worden sind. Zusätzlich ist die dominante Bodenwindrichtung aus den täglichen Beobachtungen der Wetterstationen der Region ermittelt worden. Diese Daten finden sich in einem einfachen Tabellenformat, mit Spalten für die Parameter und Zeilen für jedes Datum.

### A.3 Chemische Analysen

Die Ergebnisse der Ionen-Chromatographie und der TRFA mit inversem Königswasseraufschluss sind durch das TROPOS bereitgestellt worden. Es stehen Rohdaten und Daten zur Unsicherheit jeweils in einem Reiter desselben Tabellendokumentes bereit. Die Daten sind mit Datum und Stationskennung versehen und enthalten auch die Analysen der jeweiligen Blindfilter, die nochmals in einem separaten Dokument bereitgestellt werden.

### A.4 eBC-Analyse

Die Ergebnisse der eBC-Analysen sind ebenfalls in einem Tabellendokument durch die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz bereitgestellt worden. Angegeben sind hier die Abschwächungsrate von Licht bei den Wellenlängen 370 und 880 Nanometer.

## A.5 Straßenbahnprofil

Die Daten für die forensischen Probenahmen sind auch in einer separaten Tabelle bereitgestellt. Sie enthalten die Messungen für Metalle und Ionen. Eine Bestimmung des eBC war aufgrund der physischen Zerstörung durch die Reibung nicht möglich. Die Messdaten jeder einzelnen Probe sind in dieser Tabelle enthalten, ebenso wie das gewichtete Gesamtprofil.

## A.6 Ergebnisse der PMF-Analysen

Die aus dem EPA-PMFv5.0 hervorgehenden Tabellen werden bereitgestellt. Sie enthalten die Ergebnisse der Rechenläufe, deren statistische Ausgaben sowie die ermittelten Profile. Es werden alle Ergebnisse des Laufes für 9 Profile bereitgestellt.

## A.7 Stratifizierte Daten zu Elementen und Faktoren

Die einzelnen Elemente und die Faktoren aus der PMF-Analyse sowie die Auswahl der Stratifizierungsdaten werden bereitgestellt. In diesen Tabellen befinden sich auch zur Auswertung erstellten Grafiken.

## A.8 Ergebnisse von DELTA-SA

Von Dr. Claudio Belis sind die Datensätze, die durch das Vergleichstool DELTA-SA erstellt wurden, bereitgestellt worden. Darin enthalten sind für alle Faktoren der PMF-Analyse mit 9 Profilen die beiden verwendeten Metriken zur Ähnlichkeitsbestimmung ebenso wie die Interpretation bezüglich der Ergebnisse durch Dr. Claudio Belis.

Senatsverwaltung  
für Umwelt, Mobilität,  
Verbraucher- und Klimaschutz

**BERLIN**



Öffentlichkeitsarbeit  
Am Köllnischen Park 3  
10179 Berlin

[www.berlin.de/sen/umvk](http://www.berlin.de/sen/umvk)



[twitter.com/senumvkberlin](https://twitter.com/senumvkberlin)



[instagram.com/senumvkberlin](https://www.instagram.com/senumvkberlin)

Berlin, 03/2022