

GUTACHTEN

ENTWICKLUNG EINES MESSKONZEPTES MIT DEM ZIEL DER ERZEUGUNG EINER QUALITÄTSGESICHERTEN DATENBASIS FÜR ULTRAFEINE PARTIKEL INSBESONDERE IN DER GEGENÜBERSTELLUNG VON UNTERSCHIEDLICH BELASTETEN GEBIETEN IM LAND BRANDENBURG

Maik Merkel, Kay Weinhold, Alfred Wiedensohler (TROPOS)

Helmut Lorentz, Ingo Düring, Wolfram Schmidt (Lohmeyer GmbH & CO. KG)

Projektnummer / Antragsnummer: VV-0032-2018

Projektlaufzeit: 28.01.2019 – 30.11.2020

Datum: 07.12.2020

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungsverzeichnis | IV |
| Abkürzungen | IV |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Aktueller Wissensstand über Quellen sowie die räumliche und zeitliche Verteilung ultrafeiner Partikel und Black Carbon in Deutschland, Europa und der Welt..... | 6 |
| 2.1 Zusammenfassung..... | 6 |
| 2.2 Ultrafeine Partikel..... | 7 |
| 2.3 Black Carbon | 9 |
| 2.4 Entstehung und Quellen..... | 10 |
| 2.5 Beispiele für UFP- und BC-Emissionen..... | 16 |
| 2.6 Einfluss meteorologischer Bedingungen auf Emission und Ausbreitung..... | 26 |
| 2.7 Gesundheitliche Auswirkungen ultrafeiner Partikel | 30 |
| 3 UFP- und Black Carbon-Messungen..... | 35 |
| 3.1 Zusammenfassung..... | 35 |
| 3.2 Aktueller Stand aus Richtlinien und Vorschriften | 36 |
| 3.3 Zeitliche Aggregation | 37 |
| 3.4 Qualitätsanforderungen/Harmonisierung | 37 |
| 3.5 Messaktivitäten in der EU und in Deutschland..... | 40 |
| 3.6 GUAN – German Ultrafine Aerosol Network..... | 41 |
| 4 Aktueller Stand der Messtechnik..... | 47 |
| 4.1 Zusammenfassung..... | 47 |
| 4.2 Messtechnik zur Bestimmung der Anzahlkonzentration | 48 |
| 4.3 Messtechnik zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung..... | 50 |
| 4.4 Messung von nicht-flüchtigen Bestandteilen der UFP | 53 |
| 4.5 Messtechnik zur Bestimmung der äquivalenten Rußmassenkonzentration (eBC) 55 | |
| 4.6 Anforderungen und Ziele an die Messtechnik..... | 57 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 4.7 | Qualitätssicherungsmaßnahmen im Messnetz | 58 |
| 5 | Konzeptionelle Messstrategie für das Flächenland Brandenburg..... | 60 |
| 5.1 | Zusammenfassung..... | 60 |
| 5.2 | Standortkriterien für Messstandorte | 62 |
| 5.3 | Varianten für die zukünftige Messstrategie | 67 |
| 5.4 | Eignung vorhandener ortsfester Standorte | 76 |
| 5.5 | Temporäre Messungen im verursacherbezogenen Bereich | 81 |
| 6 | Messzeiträume für repräsentative Datensätze | 83 |
| 6.1 | Zusammenfassung..... | 83 |
| 6.2 | Erfordernis repräsentativer Datensätze | 83 |
| 6.3 | Anforderungen für stationäre Messungen..... | 84 |
| 6.4 | Anforderungen für temporäre Messungen..... | 87 |
| 6.5 | Anforderungen an Messungen für epidemiologische Untersuchungen | 88 |
| 7 | Auswertestrategie und Datenveröffentlichung | 89 |
| 7.1 | Zusammenfassung..... | 89 |
| 7.2 | Grundlegende Auswertestrategien..... | 89 |
| 7.3 | Datenveröffentlichung am Beispiel Sachsen..... | 97 |
| 7.4 | Datenveröffentlichung am Beispiel Hessen | 99 |
| 7.5 | Veröffentlichung von GUAN-Daten..... | 101 |
| 7.6 | Möglichkeiten für Brandenburg..... | 103 |
| 8 | Konkrete Umsetzungen im Land Brandenburg..... | 105 |
| 8.1 | Zusammenfassung..... | 105 |
| 8.2 | Geeignete Messgeräte..... | 105 |
| 8.3 | Handlungsempfehlung für Plausibilitätsprüfung und Qualitätssicherung..... | 119 |
| 8.4 | Empfehlungen zur Interpretation und Präsentation von Messdaten | 120 |
| 8.5 | Kostenrahmen | 125 |
| 9 | Anhang..... | 127 |
| 9.1 | Erkenntnisse aus dem Workshop Januar 2020..... | 127 |
| 9.2 | Folien zum Workshop im Januar 2020 | 139 |

| | |
|--|-----|
|  Schema des Datenflusses anhand der Beispiele Sachsen und Hessen..... | 183 |
| Literaturverzeichnis..... | 191 |
| Abbildungsverzeichnis | 200 |
| Tabellenverzeichnis | 207 |
| Projektpartner | 209 |

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGEN

| | |
|------------------------|--|
| ACTRIS | Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure |
| BC | Black Carbon |
| BfUL | Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft |
| EMEP | European Monitoring and Evaluation Programme |
| EUSAAR | European Supersites for Atmospheric Aerosol Research |
| GAW | Global Atmospheric Watch |
| GUAN | German Ultrafine Aerosol Network |
| HLNUG | Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie |
| LfULG | Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie |
| MC | Messcontainer |
| µm | Mikrometer |
| MPSS | Mobility Particle Size Spectrometer |
| N, PN | Anzahlkonzentration in 1/cm ³ |
| nm | Nanometer |
| PM _{1/2.5/10} | Particulate Matter kleiner 1 / 2.5 / 10 µm aerodynamischer Durchmesser |
| PMF | Positive Matrix-Faktorisierung |
| PNSD | Partikelanzahlgrößenverteilung |
| TROPOS | Leibniz-Institut für Troposphärenforschung |
| UBA | Umweltbundesamt |
| UFP | Ultrafeine Partikel |
| WMO | World Meteorological Organization |

1 EINLEITUNG

Ultrafeine Partikel (UFP) sind in den vergangenen Jahren sowohl in den Blickpunkt der Öffentlichkeit als auch der Umwelt- und Gesundheitsforschung gerückt. Sie stehen im Verdacht, als Bestandteil des Schwebstaubes in der Atmosphäre gesundheitliche Auswirkungen zu haben. Auf der anderen Seite gibt es für UFP derzeit nur eine limitierte Anzahl längerer und repräsentativer Messreihen, insbesondere in belasteten Gebieten. Grenzwerte existieren momentan noch nicht und werden in naher Zukunft nicht realisiert werden. Allerdings gibt es auf der CEN-Ebene schon Standardisierungen von Messmethoden bzgl. der Anzahlkonzentration und der Anzahlgrößenverteilung.

UFP sind kleine Aerosolpartikel mit einem Durchmesser kleiner als $0.1 \mu\text{m}$. Sie tragen dadurch nur zu einem sehr geringen Anteil zu den Massenkonzentrationen der derzeit gesetzlich EU-weit zu messenden und zu beurteilenden Feinstaubfraktionen $\text{PM}_{2.5}$ und PM_{10} bei. Die durch die UFP definierte Größenfraktion dominiert allerdings im Allgemeinen die Anzahlkonzentration der Aerosolpartikel in der Atmosphäre. In städtischen Gebieten kann der Anteil an der Anzahlfraktion 90% betragen.

Ultrafeine Partikel entstehen bei Verbrennungsprozessen, entweder direkt emittiert oder als Folge der Partikelbildung bei der Nukleation von Gasen. Besonders in urban geprägten Gebieten bestehen die Partikel zu einem großen Anteil aus elementarem und organischem Kohlenstoff. Daher wird im Zusammenhang mit ultrafeinen Partikeln als gut messbare Größe für den emittierten Kohlenstoffanteil (Ruß) auch die Massenkonzentration des sogenannten schwarzen Kohlenstoffes (Black Carbon, BC) untersucht. BC-Partikel (Rußpartikel) stehen als Bestandteil der Feinstaubfraktionen $\text{PM}_{2.5}$ und PM_{10} im Verdacht, ein Gesundheitsrisiko darzustellen.

BC ist dabei ein guter Indikator für die direkten Emissionen von Verbrennungspartikeln eines speziellen Verursachers, z.B. des motorisierten Verkehrs, und folglich auch für die Wirkung von Maßnahmen, z.B. im Verkehrsbereich, auf die Exposition der Bevölkerung mit ultrafeinen Partikeln.

Vor allem in Straßennähe ist der motorisierte Straßenverkehr eine der wichtigsten Quellen für ultrafeine Partikel und Ruß. Weitere verkehrsbedingte UFP- und BC-Emissionen stammen vom Flugverkehr, dem Eisenbahnverkehr oder der Schifffahrt. Hinzu kommen Partikelemissionen aus Kraftwerken und Industrieanlagen sowie aus der Verbrennung von Holz, Kohle und Gas zur Wärmegegewinnung. Beide Messgrößen unterliegen weder einer gesetzlichen Regelung noch existieren Grenzwerte.

UFP können als Partikel auch aus der Gasphase gebildet werden. Die Partikelneubildung entsteht durch Photooxidation von z.B. Schwefeldioxid (SO_2) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) vor allem im Frühjahr und Sommer. Dieses Phänomen tritt überregional an sonnigen Tagen auf, ist durch signifikante Anstiege der UFP-Konzentration insbesondere im Bereich unter 50 nm gekennzeichnet und unterscheidet sich deutlich in der Größenverteilung von lokalen Quellen.

Die Immissionswerte und die Ausbreitung von UFPs und BC hängt sehr stark von den meteorologischen Bedingungen ab. Entscheidend dafür ist die Wetterlage mit der entsprechenden Windrichtung, die Windgeschwindigkeit und die Temperatur. Vor allem im Winter bei einer Hochdruckwetterlage mit einer östlichen Anströmung und niedrigen Windgeschwindigkeiten treten erhöhte Konzentrationen an ultrafeinen Partikeln auf. Bei Tiefdruckwetterlagen mit westlichen Winden findet ein schnellerer Luftmassenaustausch und somit eine Verdünnung von UFP- und BC-Konzentrationen statt.

Epidemiologische und toxikologische Studien weisen auf die gesundheitsschädliche Wirkung von ultrafeinen Partikeln hin. Sie erhöhen das Risiko für Krankheits- und Todesfälle durch Entzündungsprozesse, Herzinfarkte und Schlaganfälle. UFPs gelangen durch den Atemtrakt in die Lunge, können dort zelluläre Membranen überwinden, gelangen schließlich in den Blutkreislauf und somit in alle Organe des Körpers. Besonders für Langzeitstudien bildet die langfristige Erfassung von Parametern wie die Anzahlgrößenverteilung von ultrafeinen Partikeln in Kombination mit anderen Luftschadstoffen die Grundlage an Messdaten. Jedoch werden diese UFP-Daten nur an einer überschaubaren Anzahl an Messstationen erfasst.

Um die Relevanz von UFP und BC bezüglich ihrer raumzeitlichen Verteilung, dem langjährigen Trend und der gesundheitlichen Wirkung auf den Menschen näher verstehen zu können, wurde 2008 das deutsche Messnetz für ultrafeine Partikel (German Ultrafine Network; GUAN) durch TROPOS und dem UBA initiiert. Seither werden an 17 behördlichen und wissenschaftlichen Messstationen in verschiedenen belasteten Umgebungen UFP (Anzahlgrößenverteilungen) und BC routinemäßig in Deutschland gemessen (3x straßennah, 8 urbaner Hintergrund, 3x regionaler Hintergrund, 2x Mittelgebirge und 1x Hochgebirge).

Dabei hat sich insbesondere das Land Sachsen in Kooperation mit dem TROPOS engagiert, um die Auswirkung der Umweltzone als auch den grenzüberschreitenden Aerosoltransport und deren Gesundheitswirkungen zu untersuchen. Die in Sachsen betriebenen Messstationen gehören damit bezüglich der Anzahlgrößenverteilung und der BC-Massenkonzentration GUAN an. In den letzten Jahren hat sich das Land Hessen entschlossen, an mehreren Messstationen im Umfeld des internationalen Flughafens Frankfurt Anzahlkonzentrationen und -Größenverteilungen zu bestimmen. Ziel ist es hier den Einfluss der UFP vom Flughafen auf die Bevölkerung zu ermitteln. Im Jahr 2021 wird das Land Bayern ebenfalls ein Messprogramm mit Anzahlgrößenverteilungen an drei Stationen starten.

Zur Erfassung von UFP- und BC-Konzentrationen werden Mobilitätsspektrometer (Anzahlgrößenverteilung) sowie Absorptionsphotometer eingesetzt. Für Partikel-Mobilitätsspektrometer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung wurde eine CEN technische Spezifikation entwickelt. In dieser CEN/TS 17434 ist u.a. der Partikelgrößenbereich (10-800 nm), die Lufttrocknung (<40%) und die Rückführung der Messungen auf zertifizierte Standards definiert. Aus der gemessenen Partikelgrößenverteilung kann die UFP-Konzentration von 10-100 nm somit genau berechnet werden. Es wird

zudem empfohlen, die Gesamtanzahlkonzentration mit einem Partikelzähler (Condensation Particle Counter; CPC) parallel zum Partikel-Mobilitätsspektrometer zur Qualitätssicherung zu erfassen. Die CPCs sollten nach der aktuellen Vorschrift CEN/TS 16976 betrieben werden.

Für die Bestimmung der BC-Konzentration werden Absorptionsphotometer verwendet, die die zeitliche Abschwächung der Lichttransmission durch ein ständig beladenes Partikelfilter bestimmen. Die zeitliche Abnahme der Lichttransmission ist ein Maß für die Lichtabsorption z.B. durch schwarze Rußpartikel. Für die Rückführung der Partikel-Lichtabsorption auf zertifizierte Standards wurde am TROPOS ein Referenzmethode entwickelt. Für die BC-Konzentration gibt es noch keine Rückführung. Absorptionsphotometer verwenden deshalb einen konstanten Faktor (Massenabsorption-Querschnitt) um die BC-Konzentration aus der Lichtabsorption zu berechnen.

Alle GUAN-Messungen werden an den Messstationen mit einer zeitlich hohen minütlich Auflösung erfasst. Zusätzlich werden jährlich Qualitätssicherungen am Weltkalibrierzentrum (World Calibration Center for Aerosol Physics; WCCAP) am TROPOS in Leipzig durchgeführt. Die Messgeräte werden gegenüber den Referenzgeräten verglichen, die wiederum auf zertifizierte Standards zurückgeführt werden. Die finalen, qualitätsgesicherten Daten werden dann als stündliche Mittelwerte in nationalen Datenbanken für behördliche Zwecke bzw. am europäischen Datenzentrum EBAS in Norwegen hinterlegt, wo sie für wissenschaftliche Auswertungen zur Verfügung stehen. Die GUAN-Messungen und -Standards sind in enger Abstimmung mit der europäischen wissenschaftliche Infrastruktur ACTRIS entwickelt worden.

Da es für UFP-Messungen im Vergleich zu den Schadstoffen der 39. BImSchV derzeit keine rechtlichen Vorschriften auf EU-, Bundes- oder Landesebene gibt, ihre Relevanz in der Öffentlichkeit und der Umweltüberwachung jedoch größer wird, hat sich das Land Brandenburg deshalb auf Grundlage des Vorsorgeprinzips dazu entschlossen, langfristig Informationen über die UFP-Konzentrationen zu generieren, auszuwerten und zu veröffentlichen. Um repräsentative Langzeitmessungen durchzuführen, sollen UFP- (Anzahlgrößenverteilungen & -konzentrationen) und Rußmessungen im städtischen Hintergrund erfolgen. Vor allem die Hauptstadtregion eignet sich für solch ein Messkonzept. Hier haben verschiedene Partikelquellen einen Einfluss auf die Luftqualität. Dies sind unter anderem der generelle Beitrag des städtischen Aerosols zur urbanen Hintergrundbelastung. Hinzu kommen Emissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen, die in Eigenheimgebieten immer beliebter werden. Weitere Anteile stammen aus dem Verkehrssektor. Beispiele dafür sind die verkehrsstarke Autobahn 10, vor allem im südlichen Bereich, aber auch der Flughafen Berlin-Brandenburg.

Aus diesen Gründen werden stationäre Messungen von UFP und BC für diese Region empfohlen. Dazu wird empfohlen, eine neue Messstation im städtischen Hintergrund von Königs Wusterhausen einzurichten. Die Beurteilung der Luftqualität und deren Überwachung soll damit durch die zusätzlichen Messgrößen Anzahlgrößenverteilung und BC-Konzentration langfristig erfolgen. In Verbindung mit temporären Messungen an quellen nahen Messstandorten kann dann der Quellbeitrag anderer Emittenten, beispielsweise des Straßenverkehrs, näher quantifiziert werden.

In einer zweiten empfohlenen Variante würde die Luftqualität im Südosten Brandenburgs auf lange Sicht überwacht werden. Stationäre Messungen im urbanen Hintergrund würden dann in Cottbus durchgeführt werden. Durch zusätzliche temporäre UFP- und BC-Messungen entlang der Bundesgrenze zu Polen sowie der Landesgrenze zu Sachsen können die Anteile des Ferntransportes aus Osteuropa weiter untersucht und quantifiziert werden.

Aus diesen beiden Messvarianten lässt sich vor allem ein Ziel ableiten. Dieses liegt hauptsächlich im Erkenntnisgewinn der Umweltbehörden, welche Quellen von ultrafeinen Partikeln die Luftqualität in repräsentativen Gebieten des Flächenlandes Brandenburg bestimmen. Zusätzlich soll eine Vergleichbarkeit zu anderen Messstationen, zum Beispiel aus GUAN hergestellt werden, aber auch zusätzliche Kenntnissgewinne erzielt werden. Aus langen Messreihen können Berichte zur Immissionsituation erstellt werden und es lassen sich Trends der Partikelbelastung berechnen. Dafür müssen jedoch Messstationen und die entsprechenden Messzeiträume sorgfältig ausgewählt werden.

Um belastbare Aussagen in Abhängigkeit des Quellsektors machen zu können, müssen unterschiedliche Messzeiträume in Betracht gezogen werden. Für stationäre Messungen soll die Exposition der Bevölkerung hinsichtlich ultrafeiner Partikel charakterisiert werden. Zudem müssen diese Messungen die Immissionsstruktur eines repräsentativen Gebietes abbilden. Eine Interpretation von Daten der UFP-Belastung ist umso belastbarer, je länger die betrachteten Zeiträume sind. Werden solche Daten über mehrere Jahre aufgenommen und ausgewertet, ergibt sich der Vorteil, dass der Einfluss der natürlichen meteorologischen Schwankungen auf das Immissionsniveau herausgemittelt wird. Trendanalysen können zudem nur aus langfristig aufgenommenen Daten berechnet werden. Hier ist der Zeitraum von etwa 10 Jahren sinnvoll, da sonst unterschiedliche Faktoren das Niveau einer Partikelgrößenverteilung oder die Höhe von Partikelanzahlkonzentrationen bestimmen können.

Da temporär eingerichtete Messstellen eine geeignete Möglichkeit zur Quellenanalyse sind, können sie vom Messzeitraum her kürzer gehalten werden. Für zukünftige, temporäre UFP-Messungen im Land Brandenburg sollen vor allem bestimmter Quellgruppen charakterisiert werden, sie finden also in Quellnähe statt. Für die Bestimmung des Anteils des Straßenverkehrs an der UFP-Belastung sollten Messzeiträume von mindestens einem Jahr gewählt werden. Damit werden jahreszeitliche Unterschiede untersucht und es können Vergleiche mit anderen Schadstoffen erfolgen.

Der Messzeitraum von einem Jahr stellt eine Mindestanforderung dar. Je nach Einfluss der Quellgruppe können deutlich längere Messzeiträume erforderlich sein um belastbare Ergebnisse zu erhalten. Dabei spielt die direkte Abhängigkeit von den meteorologischen Verhältnissen die entscheidende Rolle. Die Untersuchung des Ferntransportes aus Osteuropa ist ein Beispiel dafür.

Längere Messreihen können zudem für die allgemeine UFP-Risikobewertung einer bestimmten Region auf Grundlage von existierenden epidemiologischen Daten benutzt werden.

Die Auswertung von Messdaten soll in erster Linie den umweltbehördlichen Belangen folgen. In Luftgütemessnetzen reicht es mitunter, bestimmte Größenbereiche zu Größenklassen zusammenzufassen. So kann in Anlehnung an die Messnetze Sachsen und Hessen die Partikelgrößenverteilung auf 7 Größenklassen reduziert werden.

Für die Prüfung der Plausibilität von Messdaten eignen sich Konturplots, Zeitreihen sowie mittlere Partikelgrößenverteilungen, welche mit anderen Bezugsreihen verglichen werden können. Diese Aufgabe erfordert jedoch den Einsatz von qualifiziertem Personal. Durch programmtechnische Hilfsmittel sowie eigenständigen Programmierungen können Arbeitsabläufe optimiert werden. Dennoch darf die nötige Arbeitszeit vor allem in der Anfangszeit der Messungen nicht unterschätzt werden.

Eine Veröffentlichung von Messdaten kann zunächst ausschließlich in Berichtsform erfolgen. Für die gewonnenen Datensätze steht der Erkenntnisgewinn und der Bezug zu anderen Reihen im Vordergrund. Wenn der routinemäßige Einsatz der UFP-Messgeräte erfolgt und die Datenauswertung vertraut ist, können weitere Informationen der Öffentlichkeit und Wissenschaft zugänglich gemacht werden. Dies kann eine Darstellung der täglichen Zeitreihe der Partikelanzahlkonzentration, eines Konturplots der Partikelgrößenverteilung oder die Reihe der äquivalenten Ruß-Massenkonzentration sein.

Allerdings muss auch erwähnt werden, dass die Gewinnung reproduzierbarer Daten ohne eine wissenschaftliche Begleitung im Vorfeld im sogenannten Routinebetrieb nicht umsetzbar ist. Die vollautomatische Erfassung und Qualitätssicherung von Partikelgrößenverteilungen ist nicht möglich.

2 AKTUELLER WISSENSSTAND ÜBER QUELLEN SOWIE DIE RÄUMLICHE UND ZEITLICHE VERTEILUNG ULTRAFEINER PARTIKEL UND BLACK CARBON IN DEUTSCHLAND, EUROPA UND DER WELT

2.1 ZUSAMMENFASSUNG

Ultrafeine Partikel beschreiben Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner 100 nm (0.1 μm). Im Gegensatz zu den üblicherweise in Luftmessnetzen erfassten Parametern PM_{2.5} und PM₁₀ werden sie nicht in einer Massenkonzentration, sondern in einer Anzahlkonzentration in Partikel pro cm^3 angegeben. Aufgrund ihrer geringen Größe stehen ultrafeine Partikel im Verdacht, negative gesundheitliche Wirkungen zu haben. Eine weitere Messgröße in diesem Zusammenhang ist Black Carbon (BC), die äquivalente Rußmassenkonzentration. Im Gegensatz zu Filtermessungen (OC/EC) werden bei der Messung von BC die optischen Eigenschaften der Rußpartikel analysiert.

Ultrafeine Partikel und vor allem Rußpartikel entstehen bei unvollständigen Verbrennungsprozessen. In städtischen Gebieten ist der motorisierte Straßenverkehr dabei eine der wichtigsten Quellen, vor allem in Straßennähe (HEI, 2013). Weitere Emissionen aus dem Verkehrssektor stammen vom Flugverkehr, dem Eisenbahnverkehr oder der Schifffahrt. Hinzu kommen die Partikelemissionen aus Kraftwerken und Industrieanlagen sowie aus der Verbrennung von Holz, Kohle und Gas zur Wärmegewinnung. BC ist dabei ein guter Indikator für die direkten Emissionen von Verbrennungspartikeln eines speziellen Verursachers, z.B. des motorisierten Verkehrs, und folglich auch für die Wirkung von Maßnahmen, z.B. im Verkehrsbereich, auf die Exposition der Bevölkerung mit ultrafeinen Partikeln (WHO, 2012).

Sekundär können Partikel auch aus der Gasphase gebildet werden. Ein solcher Nukleationsprozess ist die sog. Partikelneubildung die durch Photooxidation von kondensierbaren Gasen, z.B. Schwefeldioxid (SO_2) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), vor allem im Frühjahr und Sommer stattfindet. Er tritt überregional auf und ist durch markante Anstiege der Partikelanzahlkonzentration gekennzeichnet, die sich von lokalen Quellen wie dem städtischen Verkehrsaerosol, deutlich unterscheiden (Ma und Birmili 2015).

Die Ausbreitung ultrafeiner Partikel hängt sehr stark von den meteorologischen Rahmenbedingungen ab (von Bismarck-Osten et al., 2013). Entscheidend dafür ist die jeweils vorherrschende Wetterlage mit der entsprechenden Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperatur. Für Ostwetterlagen vor allem im Winter mit östlichen Anströmungsrichtungen und niedrigen Windgeschwin-

digkeiten treten erhöhte Konzentrationen an ultrafeinen Partikeln auf. Für westliche Anströmungen hingegen findet ein schnellerer Austausch der Luftmassen und damit verbunden eine Verdünnung von UFP- und BC-Konzentrationen statt.

Durch ihre geringe Größe können UFP bis in tiefe Körperregionen vordringen. Über den menschlichen Atemtrakt gelangen sie in die Lungenperipherie, können dort zelluläre Membranen überwinden und gelangen schließlich in den Blutkreislauf und damit zu allen Organen des Körpers. Mehrere epidemiologische und toxikologische Studien weisen auf die gesundheitsschädliche Wirkung von ultrafeinen Partikeln hin. Sie erhöhen das Risiko für Entzündungsprozesse (HEI, 2013), Herzinfarkte und Schlaganfälle (Rückerl et al., 2011) und stehen in Verbindung mit Krankheits- und Todesfällen, welche die Atemwege und des Herz-Kreislaufsystem betreffen.

2.2 ULTRAFEINE PARTIKEL

Ultrafeine Partikel (auch gelegentlich Ultrafeinstaub genannt) sind per Definition luftgetragene Partikel mit einem Durchmesser zwischen 1 und 100 Nanometern (nm) (VDI 2009). Sie sind damit eine Teilfraktion der feinen Partikel, welche den Größenbereich kleiner einem Mikrometer (μm) abdecken. Die Trennung der Partikelfraktionen bei 100 nm kann dadurch begründet werden, dass sich unterhalb dieser Partikelgröße die mikrophysikalischen und chemischen Eigenschaften ändern und die Quellen der Partikel im Vergleich zu größeren andere sind. Die Abbildungen 1 und 2 erläutern die Größenbereiche sowie deren Herkunft, Entstehungsprozesse und die chemische Zusammensetzung der Partikel.

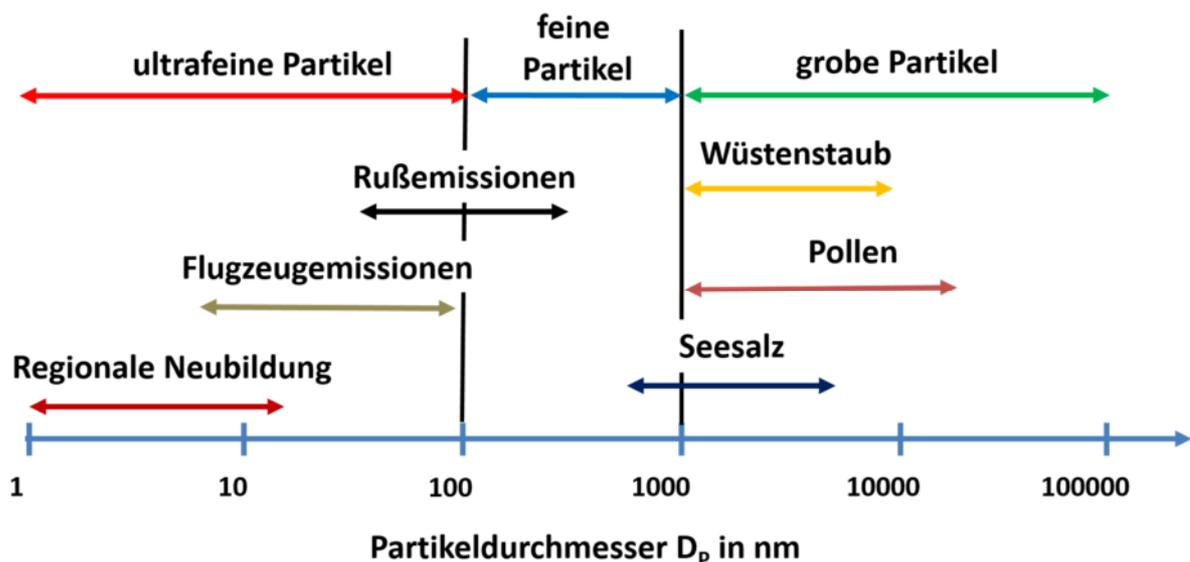


Abb. 1: Aufteilung der atmosphärischen Aerosolpartikel in drei Größenklassen und nach ihrer Herkunft.

Feste und flüssige Partikel schwebend in einem Gas

Grobe Partikel

Partikel von 1 μm bis 100 μm im Durchmesser

Primär: Seesalz, Wüstenstaub, Pollen etc.

Feine Partikel

Partikel von 0,1 μm bis 1 μm im Durchmesser

Sekundär: Kondensation (Sulfat, Nitrat, Ammonium, organischer Kohlenstoff)

Verbrennung: elementarer und org. Kohlenstoff

Ultrafeine Partikel

Partikel kleiner als 0,1 μm im Durchmesser

Sekundär: Bildung neuer Partikel
Kondensation (Sulfat, Nitrat, Ammonium, organischer Kohlenstoff)

Verbrennung: elementarer und organischer Kohlenstoff

Abb. 2: Herkunft und Bildungsprozesse für die atmosphärischen Aerosolpartikel.

Die kleinsten Partikel mit einem Durchmesser kleiner 10 nm werden aus der Gasphase gebildet (homogene Nukleation oder Partikelneubildung). Die Partikel wachsen durch Kondensation und Koagulation an, sodass sie innerhalb eines Tages eine Größe zwischen 50 und 100 nm erreichen können. Durch weitere Kondensation von wenig flüchtigen Dämpfen sowie durch Wolkenbildungsprozesse wachsen sie in den Bereich des feinen Aerosols über 100 nm. Diese Partikel besitzen die größte atmosphärische Lebensdauer (Tage bis ca. 2 Wochen) und können über weite Strecken transportiert werden. Partikel größer als 1 μm werden dem groben Partikelgrößenbereich zugeordnet. Diese Partikel entstehen hauptsächlich aus Dispersions- oder Zerkleinerungsprozessen (Seesalz oder Mineralstaub) oder sind biologischen Quellen zugeordnet.

Da sich die mikrophysikalischen Eigenschaften der UFPs wegen der oben genannten Prozesse sehr schnell ändern (Größe und Anzahlkonzentration), werden sie zu den sehr kurzlebigen Schadstoffen zugeordnet.

In der Atmosphäre dominieren ultrafeine Partikel die Partikelanzahlkonzentration, wogegen feine und grobe Partikel die Partikelmassenkonzentration bestimmen. Dies bedeutet, dass ultrafeine Partikel bezogen auf ihre Masse wenig relevant sind, und mit den gesetzlich geregelten Parametern PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ unzureichend erfasst werden. Im Unterschied zu diesen Größen PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ werden ultrafeine Partikel in einer Partikelanzahlkonzentration (Anzahl je Kubikzentimeter) angegeben. Meist bestehen feine und ultrafeine Partikel aus verschiedenen Komponenten. So können beispielsweise kohlenstoffhaltige Partikel mit volatilen Bestandteilen umgeben sein. Durch Erhitzen können diese flüchtigen Bestandteile verdampft werden und es bleiben die nichtflüchtigen Residuen übrig, welche überwiegend aus rußartigen Komponenten bestehen (Burtscher et al., 2000).

2.3 BLACK CARBON

Bei unvollständigen Verbrennungsprozessen entstehen Partikel, die verschiedene Komponenten enthalten können. Das können zum Beispiel elementarer Kohlenstoff (EC) und organische Kohlenstoffverbindungen (OC) sein. Eine weitere Größe ist der schwarze Kohlenstoff/Black Carbon (BC), eine operationell definierte Bezeichnung kohlenstoffhaltiger Partikel.

Die Bezeichnungen werden anhand der verwendeten Messverfahren benutzt. OC und EC werden durch thermische Verfahren bestimmt. Black Carbon hingegen ist durch optische Messverfahren definiert, bei dem die lichtabsorbierenden Bestandteile gemessen werden. Messwerte von BC und EC sind miteinander korreliert, können jedoch nicht unmittelbar verglichen werden. Sowohl EC als auch BC werden oft synonym als Ruß bezeichnet.

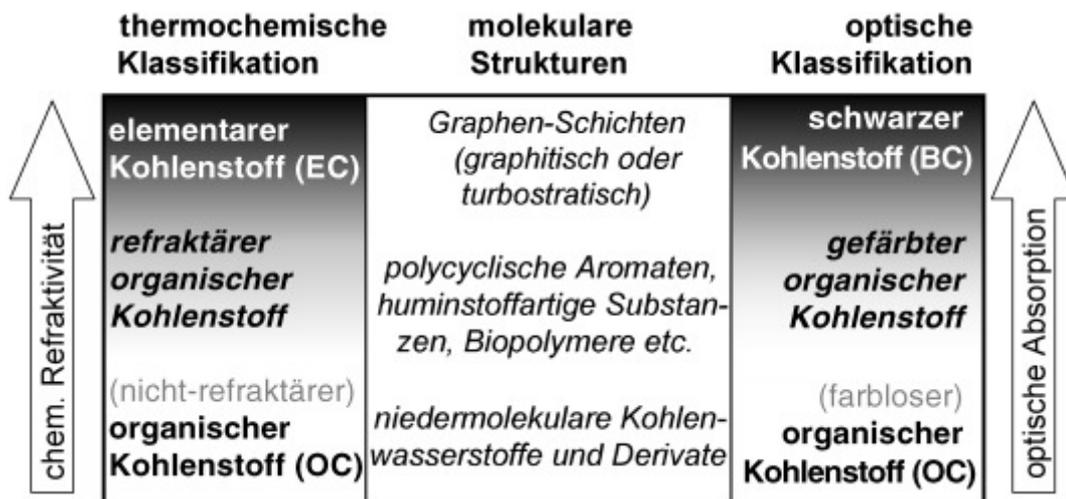


Abb. 3: Optische und thermochemische Klassifizierung sowie molekulare Strukturen von schwarzem Kohlenstoff (BC) oder elementarem Kohlenstoff (EC) und organischem Kohlenstoff, Pöschl, 2005.

Black Carbon zeichnet sich durch seine Mikrostruktur aus. Durch die Ähnlichkeit zu Graphit ist es in der Atmosphäre chemisch gesehen wenig aktiv und baut sich nur langsam ab. Durch fraktal-ähnliche Ketten besitzt es die Kapazität, andere Stoffe zu absorbieren. BC ist thermisch stabil und hat damit eine längere Verweilzeit in der Atmosphäre. Dieser Punkt wird auch mit der nicht vorhandenen Löslichkeit unterstrichen. Black Carbon zeichnet sich durch seine starke Lichtabsorption im Spektralbereich des sichtbaren Lichts aus und führt somit in der Atmosphäre zu einer Verringerung der Albedo und ist damit in Bezug auf klimarelevante Fragen ein entscheidender Parameter.

2.4 ENTSTEHUNG UND QUELLEN

Ultrafeine Partikel und vor allem Rußpartikel können durch unvollständige Verbrennungsprozesse gebildet werden. Einen großen Anteil haben dabei die Emissionen aus dem Verkehrssektor wie z.B. von Kraftfahrzeugen, vom Flugverkehr, dem Eisenbahnverkehr oder der Schifffahrt. In städtischen Gebieten ist der motorisierte Straßenverkehr eine der wichtigsten Quellen (HEI, 2013). Hinzu kommen die Emissionen aus Kraftwerken und Industrieanlagen. Ebenso entstehen UFP aus der Verbrennung von Holz (vor allem im ländlichen Raum stammen Partikelemissionen auch aus der zunehmenden Wärmegewinnung durch Holzfeuerungen), Kohle und Gas zur Wärmegewinnung, bei der Verbrennung von Biomasse sowie bei Waldbränden. Aber auch durch die Verbrennung von Feuerwerkskörpern zum Jahreswechsel werden vor allem Partikel größer 50 nm in die Atmosphäre rund um den Globus emittiert und führen zu erhöhten Partikelmassekonzentrationen.

Ultrafeine Partikel können auch natürlichen Ursprungs sein. Durch intensive Sonneneinstrahlung vor allem im Frühjahr und Sommer entstehen durch Photooxidation (z.B. Entstehung von Schwefelsäure aus SO_2) kondensierbarer Gase, die Partikel mit einem Durchmesser von wenigen Nanometern bilden. Über den Zeitraum von mehreren Stunden wachsen sie zu größeren Partikeln an (Größ et al. 2018). Dieser sog. Partikelneubildungsprozess spielt sich auf einer räumlichen Skala von bis zu mehreren hundert Kilometern ab. Sowohl an verkehrsnahen Messpunkten als auch im urbanen und ländlichen Hintergrund sind bei Partikelneubildungsereignissen markante Anstiege der Partikelanzahlkonzentration zu verzeichnen und lassen sich deutlich von lokalen Quellen, wie dem städtischen Verkehrsaerosol, abgrenzen (Ma und Birmili 2015).

Die Abbildung 4 zeigt beispielhaft den prozentualen Anteil verschiedener Quellen zur Partikelanzahlkonzentration in unterschiedlichen räumlichen Skalen. Für drei Größenklassen des ultrafeinen Partikelspektrums (Größenklassen N(5-100nm), N(20-100nm) sowie N(5-20nm)) sind diese Anteile an der verkehrsbelasteten Messstelle Leipzig-Mitte, im städtischen Hintergrund Leipzig-TROPOS sowie im regionalen Hintergrund an der Forschungsstation Melpitz in Abhängigkeit von der Jahreszeit dargestellt. Bei Betrachtung des UFP-Bereiches 5-100 nm resultieren für die verkehrsnahen Messstelle Leipzig-Mitte gut die Hälfte der UFP aus dem örtlichen Verkehr. Ein Beitrag von etwa 20 Prozent bilden die angewachsenen (gealterten) Verkehrsemissionen und andere städtische Quellen. Ebenfalls etwa 20 Prozent stammen aus dem regionalen Hintergrundaerosol. Der Rest wird aus Partikelneubildungsprozessen, vor allem während der Sommermonate, geliefert.

Im urbanen Hintergrund (Beispielstation: Leipzig, TROPOS) spielt der motorisierte Straßenverkehr als direkter Emittent kaum eine Rolle. Diese Station ist zu etwa 40 bis 50 Prozent durch den regionalen Hintergrund beeinflusst, der Rest des Partikelspektrums stammt aus den gealterten Verkehrsemissionen sowie anderen urbanen Quellen. Dieser Anteil wird während der Sommermonate durch den Anteil der Partikelneubildung etwas gemindert. In Melpitz können die UFP vollständig als regionaler Hintergrund klassiert werden. Auch hier gibt es von März bis Oktober einen Beitrag an neugebildeten Partikeln, welcher durchschnittlich bis zu 40 Prozent beträgt.

Auch auf größeren räumlichen Skalen trägt der Straßenverkehr den größten Anteil zu den globalen Emissionen an ultrafeinen Partikeln bei (Paasonen et al., 2016). Die berechneten Emissionsdaten

von 2010 zeigen hier den stärksten Eintrag für die Anzahl ultrafeiner Partikel und damit auch die Gesamtpartikelanzahlkonzentration für den Quellsektor 7 Straßenverkehr („Road transport“) in Abbildung 5, gefolgt von Verbrennungsprozessen im privaten Bereich sowie der Emission von ultrafeinen Partikeln aus Industrieanlagen.

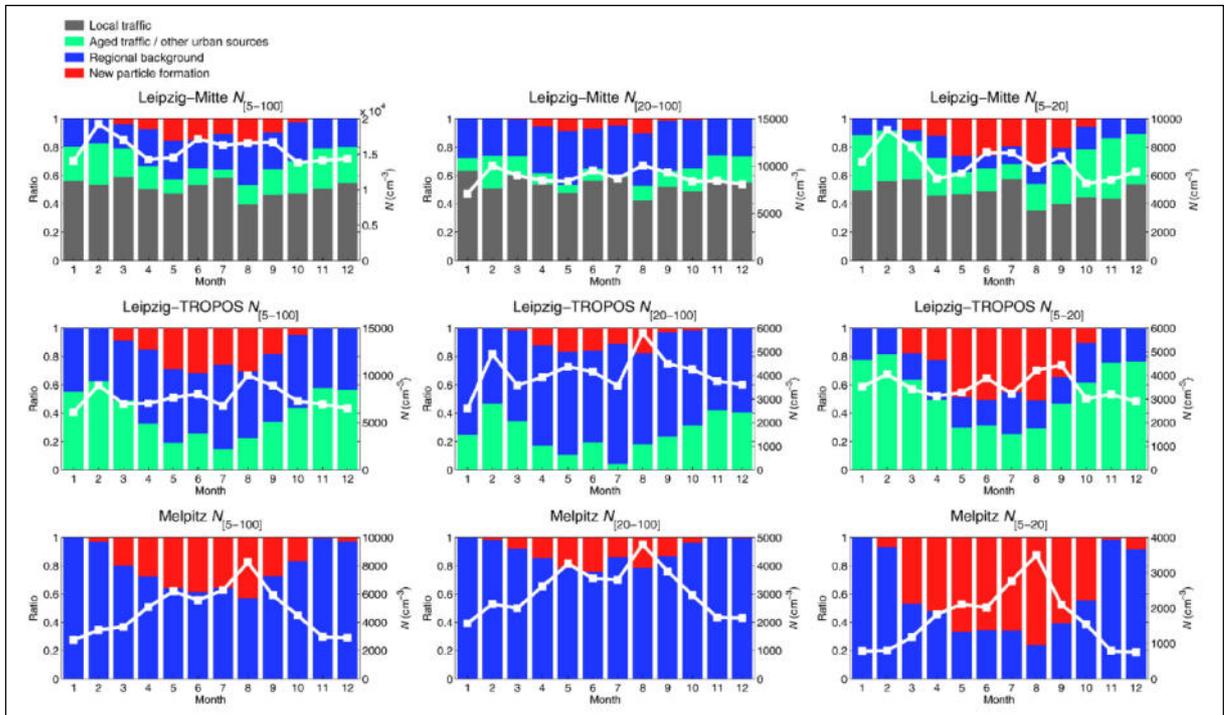


Abb. 4: Monatsmittelwert der Beiträge verschiedener Quellen zur Partikelanzahlkonzentration für die verkehrsnahen Messstelle Leipzig-Mitte, den urbanen Hintergrund Leipzig-TROPOS sowie den regionalen Hintergrund Melpitz.

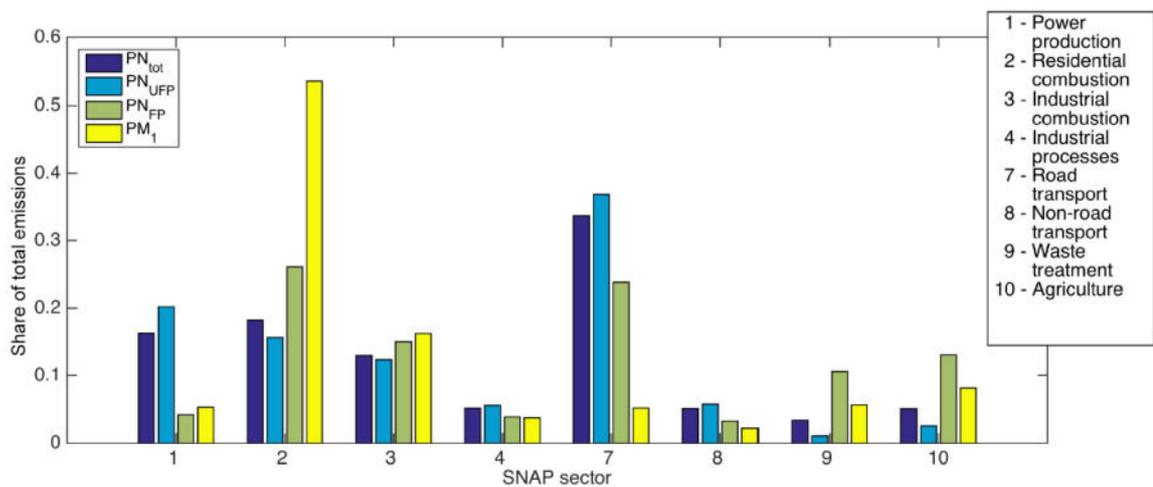


Abb. 5: Anteil wichtiger Quellsektoren an der globalen Emission von Partikeln für das Jahr 2010 (Anzahlen PN_{tot} = alle Partikel, PN_{UFP} = ultrafeine Partikel $< 0.1 \mu m$, PN_{FP} = feine Partikel $0.1-2 \mu m$ und PM_1 = Partikelmassenkonzentration $< 1 \mu m$).

Obwohl der UFP-Anteil aus Sektor 8 („Non-road transport“ – Nicht-Straßenverkehr) vergleichsweise gering gegenüber dem Sektor 7 (Straßenverkehr) ist, weisen neuere Studien zur Exposition ultrafeiner Partikel auch auf den Flugverkehr als eine weitere bedeutende Quelle von UFP im Umkreis von Flughäfen hin (Hudda et al., 2014; Keuken et al., 2015).

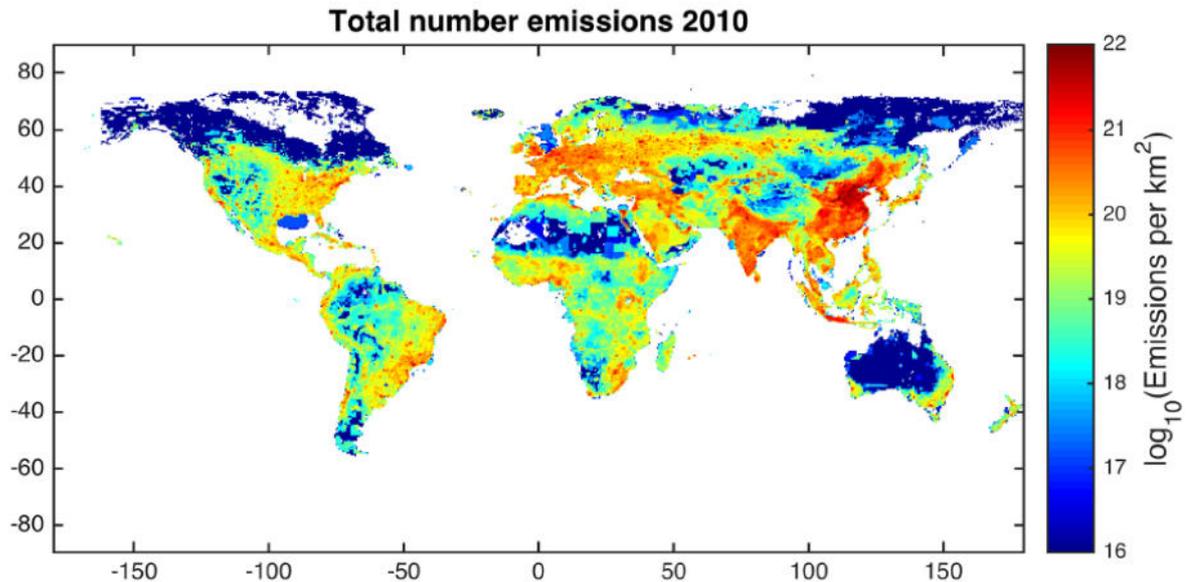


Abb. 6: Räumliche Verteilung globaler kontinentaler anthropogener Partikelanzahl-Emissionen in der Einheit Emission pro km² und Jahr.

Die räumliche Verteilung der globalen anthropogenen Partikelanzahl-Emissionen ist in Abbildung 6 dargestellt. Eine hohe Emissionsdichte zeigt sich vor allem über Südost-Asien und Indien, wo große Bevölkerungs- und damit auch sehr hohe Verkehrsdichten zur Freisetzung hoher Partikelanzahlen führen. Aber auch Zentral- und Südeuropa tragen erheblich zur Partikelemission bei (Paasonen et al, 2015). Generell sind die höchsten Emissionen auch in den am dichtesten besiedelten Gebieten zu erkennen.

Der Vollständigkeit halber seien auch die im Innenbereich auftretenden Quellen von UFP zu benennen. So kommt es bei Verbrennungsprozessen wie durch das Abbrennen von Kerzen, bei Verwendung von Kaminöfen sowie durch thermische Prozesse wie Kochen, Backen und Toasten zur signifikanten Freisetzung einer großen Anzahl ultrafeiner Partikel. Auch durch die Benutzung elektrischer Gerätschaften wie z.B. Drucker können UFP emittiert werden. Eine kürzlich durchgeführte Studie zu den Verhältnissen zwischen Innenraum- und Außenmessungen der Partikelanzahlgrößenverteilung und Partikelanzahlkonzentration in mehreren Haushalten in Leipzig und Berlin liefert Ergebnisse zur Bestimmung der Exposition von UFP in privaten Wohnungen (Zhao et al., 2018).

Konzentrationsniveaus und Trendanalysen von UFP

Generell gibt es eine deutliche Abnahme der Anzahlkonzentration an UFP von der verkehrsnahen Messstelle über den Städtischen Hintergrund bis hin zur ländlichen Region und den Bergstationen. Die Langzeitmittelwerte liegen dabei zwischen 1.000 Partikel pro Kubikzentimeter an Hintergrundstationen bis hin zu mehreren 10.000 Partikeln pro cm^3 an verkehrreichen Messpunkten. Auch die Form der Partikelgrößenverteilung unterscheidet sich deutlich zwischen den einzelnen Stationstypen. Während an verkehrsnahen Standorten ein breites Maximum in der Verteilung bei 10 bis 30 nm liegt, verschiebt es sich zu größeren Partikeldurchmessern, je ländlicher und unbeeinflusster der Messpunkt von jeglichen anthropogenen Quellen ist (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Aber auch das Konzentrationsniveau sinkt deutlich nach unten.

Die Abbildung 8 zeigt die Mittelwerte der Partikelanzahlkonzentration für den Größenbereich 20 bis 100 nm für den Bezugszeitraum 2009 bis 2014. Die städtischen, verkehrsnahen Messstellen in Leipzig und Dresden erreichen dabei mittlere Werte von mindestens 7.000 Partikeln pro cm^3 . Im urbanen Hintergrund reicht die Spanne von 4.000 Partikel pro cm^3 in Leipzig bis zu 6.000 Partikel pro cm^3 in Augsburg, in Mühlheim-Styrum bis knapp 8000 Partikel pro cm^3 . Der ländliche Hintergrund liegt zwischen 2.000 Partikel pro cm^3 in Neuglobsow und doppelt so hohen Werten in Bösel. Auf den Gebirgsstationen reicht das Spektrum von 500 (Zugspitze) bis zu knappen 2.000 Partikeln pro cm^3 . Die Aussagekraft solcher Gesamtanzahlkonzentrationen hängt jedoch auch vom Mittelungszeitraum ab. Prinzipiell können aus Kurzzeitmessungen keine Aussagen zur Partikelbelastung in Abhängigkeit von beispielsweise meteorologischen Parametern oder auch des Standortes gezogen werden. Deshalb erweist es sich als wichtiges Ziel von UFP-Messungen, auf langjährige Zeitreihen zurückgreifen zu können und diese auch für Trendanalysen zur Luftqualität zu nutzen.

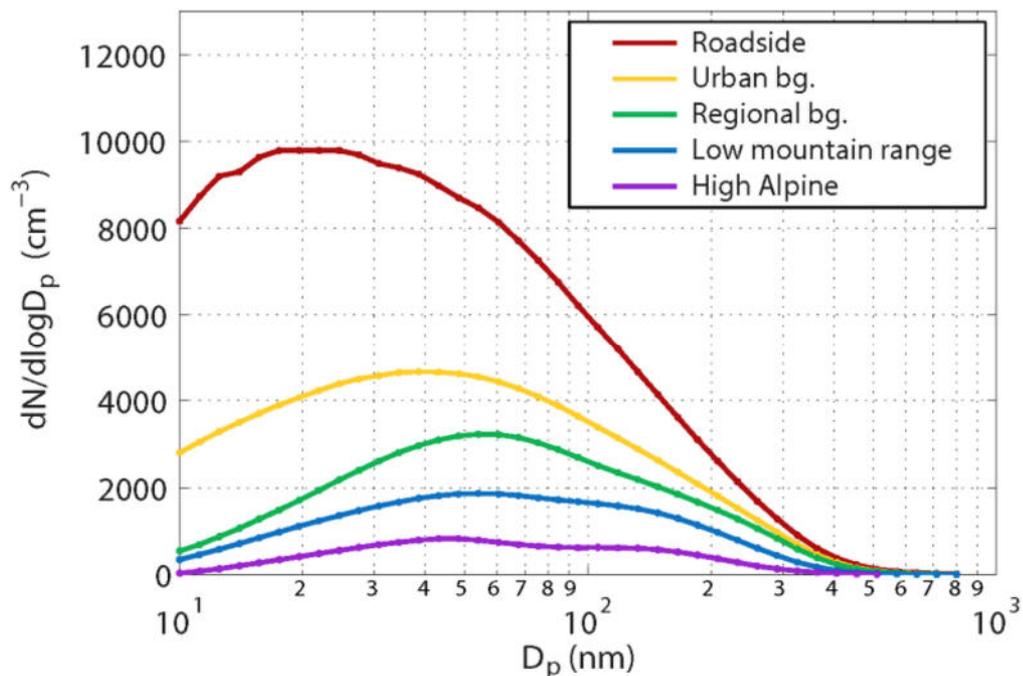


Abb. 7: Median-Partikelanzahlgrößenverteilungen für die 5 Stationstypen im GUAN-Netzwerk.

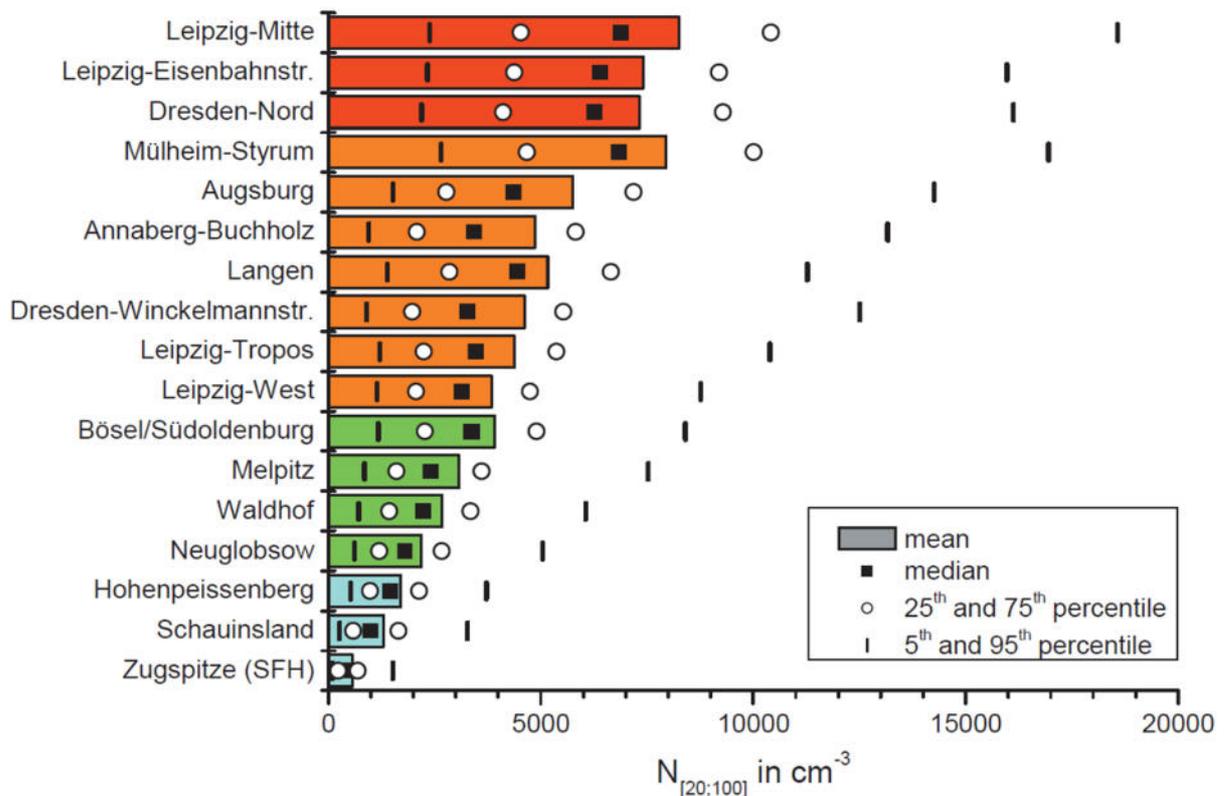


Abb. 8: Mittlere Partikelanzahlkonzentrationen für ultrafeine Partikel ($20 \text{ nm} < D_p < 100 \text{ nm}$) an den 17 Messstationen im GUAN-Netzwerk für den Zeitraum 2009-2014.

Inzwischen liegen an mehreren Stationen ausreichend lange Zeitreihen vor, so dass Trendanalysen durchgeführt werden können. Ein Beispiel hierfür sind die Untersuchungen und begleitenden Sondermessungen zu Partikeln nach Einführung der Umweltzone in Leipzig (Löschau et al. 2017). Durch die Erneuerung der Fahrzeugflotte und dem Einsatz emissionsmindernder Maßnahmen (Dieselpartikelfilter) konnte die Anzahlkonzentration im Bereich zwischen 30 und 200 nm seit 2010 um etwa 45 Prozent für die Messstation Leipzig-Mitte gesenkt werden. In Abbildung 9 ist dies für den Tagesgang der Woche und der Partikelanzahlkonzentration dargestellt.

In den vergangenen Jahren konnten durch die Erfassung von ultrafeinen Partikeln Trendanalysen gemacht werden. Ein wesentliches Ergebnis war die Abnahme der Partikelanzahlkonzentration in vielen deutschen Städten (Löschau et al. 2017). Ein Beispiel hierfür sind die Untersuchungen und begleitenden Sondermessungen zu Partikeln nach Einführung der Umweltzone in Leipzig. Durch die Erneuerung der Fahrzeugflotte und dem Einsatz emissionsmindernder Maßnahmen (Dieselpartikelfilter) konnte die Anzahlkonzentration im Bereich zwischen 30 und 200 nm seit 2010 um etwa 45 Prozent für die Messstation Leipzig-Mitte gesenkt werden. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist dies für den Tagesgang der Woche und der Partikelanzahlkonzentration dargestellt.

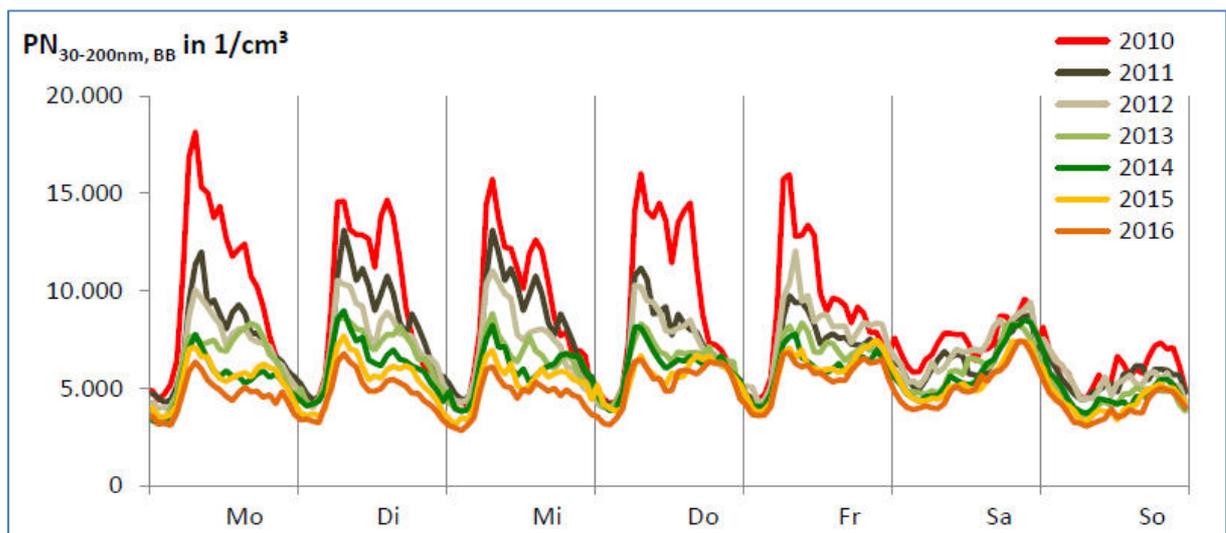


Abb. 9: Mittlerer Tagesgang der Woche für die Partikel-Anzahlkonzentration im Bereich von 30 bis 200 nm in Leipzig-Mitte von 2010 vor Einführung der Umweltzone bis 2016.

Eine Ausweitung dieser Trendanalysen ultrafeiner Partikel auf weitere zwei Jahre für die Messstationen des Deutschen Messnetzes für ultrafeine Partikel zeigt die Tabelle 1. Dabei wurden zwei statistische Modelle auf die Zeitreihen der Messdaten bis in das Jahr 2018 angewandt: Die sog. „Verallgemeinerte-Kleinste-Quadrate-Schätzung“, beider unbekannte wahre Regressionsparameter in einer linearen Regressionsgleichung unter problematischen Voraussetzungen effizient geschätzt werden können (GLS slope), und eine Trendschätzung nach Sen (Sen slope). Dabei werden für alle möglichen Wertepaare die Steigungen ermittelt. Der Median dieser Steigungen ist dann nach Sen der Schätzwert für die Trendstärke der gesamten Zeitreihe. Diese statistische Berechnung ist im Vergleich zu anderen Modellen robust gegen Ausreißer in der Datenreihe.

An den verkehrsnahen Orten Dresden-Nord, Leipzig-Eisenbahnstraße und Leipzig-Mitte liegt die jährliche Abnahme der Anzahlkonzentration für N_{30-200} zwischen 3 und 5 Prozent. Im städtischen Hintergrund variierte die Abnahme von guten zwei Prozent in Mühlheim-Styrum bis hin zu sieben Prozent in Augsburg. Im regionalen Hintergrund gab es ebenfalls Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen. In Melpitz und Neuglobsow wurde so gut wie keine Änderung beobachtet, in Waldhof gab es eine Abnahme um drei Prozent pro Jahr. Ein möglicher Grund könnten die Abhängigkeiten von ultrafeinen Partikeln hinsichtlich der meteorologischen Bedingungen sein. So könnte der Prozess der Partikelneubildung in den vergangenen Jahren vor allem im regionalen Hintergrund in den östlichen Bundesländern häufiger aufgetreten sein. Insgesamt wird die tendenzielle Abnahme im regionalen Hintergrund durch Partikelneubildung auf ein konstantes Niveau ausgeglichen. Ein gleiches Bild wie in Melpitz zeigt sich auch am Hohenpeißenberg, während sich an den anderen beiden höher gelegenen Messpunkten Minderungen von knapp drei Prozent an der Station Schauinsland und vier Prozent auf der Zugspitze/Schneefernerhaus ergaben.

Tab. 1: Ergebnisse der mehrjährigen Trendanalyse für die Anzahlkonzentrationen verschiedener Größenbereiche $N_{(10-30nm)}$ und $N_{(30-200nm)}$ mit zwei verschiedenen Statistikmodellen (Sun et al., 2019).

| Stationstyp | Station | $N_{[10-30]}$ | | $N_{[30-200]}$ | |
|------------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------------|-----------|
| | | Sen slope | GLS slope | Sen slope | GLS slope |
| verkehrsnahe | Dresden-Nord | -5.7% | -5.2% | -5.0% | -4.3% |
| | Leipzig-Eisenbahnstraße | -4.1% | -3.8% | -3.2% | -2.9% |
| | Leipzig-Mitte | 0.3% | 0.0% | -4.2% | -5.1% |
| urbaner Hintergrund | Mühlheim-Styrum | --- | --- | -2.4% | -2.2% |
| | Leipzig-TROPOS | -3.6% | -5.1% | -3.4% | -4.1% |
| | Annaberg-Buchholz | -6.3% | -5.4% | -4.7% | -4.9% |
| | Augsburg | -5.0% | -6.3% | -7.0% | -6.5% |
| | Dresden-Winkelmannstraße | -3.8% | -6.1% | -3.9% | -6.3% |
| | Langen | -0.1% | -0.6% | -3.2% | -3.2% |
| regionaler Hintergrund | Bösel | -1.0% | -4.6% | -4.8% | -4.6% |
| | Melpitz | 2.7% | 1.6% | -0.4% | 0.1% |
| | Waldhof | -2.6% | -2.2% | -3.7% | -3.1% |
| Mittelgebirge | Neuglobsow | -1.1% | 0.2% | -0.4% | -0.4% |
| | Hohenpeißenberg | 1.9% | 0.3% | -0.9% | -0.9% |
| hochalpin | Schauinsland | 4.3% | -2.7% | -2.0% | -2.7% |
| | Zugspitze/Schneefernerhaus | --- | --- | -3.6% | -3.9% |

2.5 BEISPIELE FÜR UFP- UND BC-EMISSIONEN

Straßenverkehr – Auspuffemissionen und Bremsabriebe

Durch unvollständige Verbrennungsprozesse werden durch Kraftfahrzeuge Partikel mit einem Durchmesser zwischen 10 und 20 nm in die Atmosphäre entlassen und zeichnen sich durch ein deutliches Maximum in der Partikelgrößenverteilung aus. Dies ist sowohl für Benzin- als auch für Dieselmotoren der Fall. Ein zweites Maximum ergibt sich für Dieselfahrzeuge bei etwa 80 nm, für Benzinmotoren bei etwa 40 nm. Die entsprechenden Partikelgrößenverteilungen wurden in den Untersuchungen durch Burtscher und Mayer (2015) bestimmt (Abbildung 10).

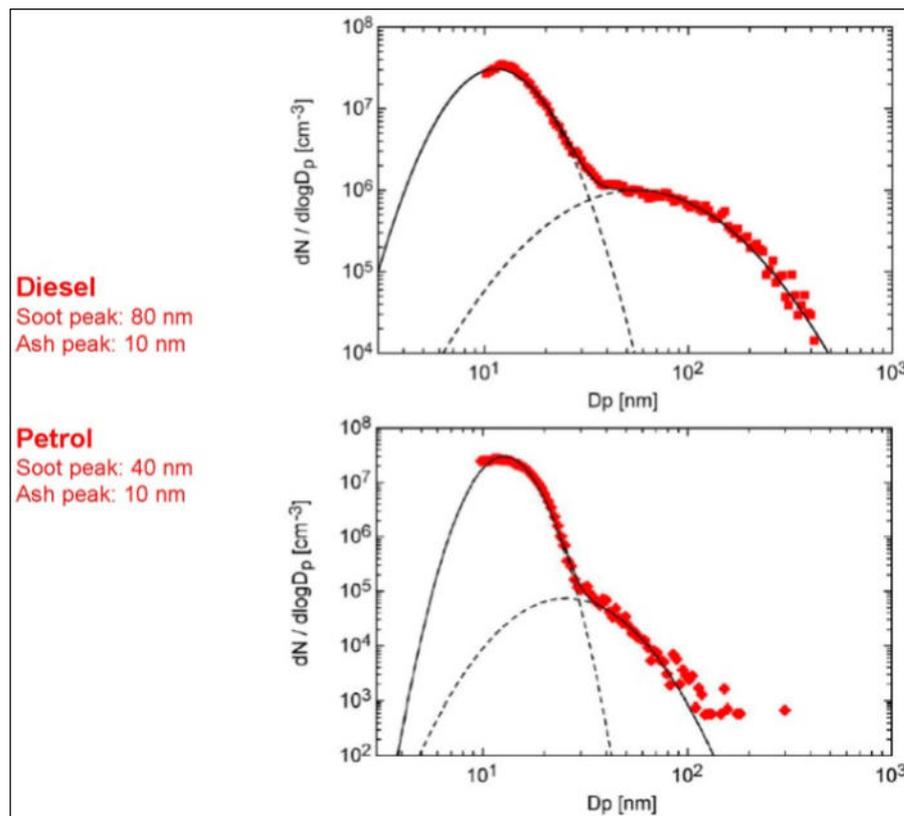


Abb. 10: Partikelgrößenverteilung sowie zugehörige Moden bei der unvollständigen Verbrennung von Dieselfahrzeugen (oben) sowie Benzinern (unten); Burtscher und Mayer (2015).

Wie bereits eingangs beschrieben, zählen ultrafeine Partikel zu den Luftschadstoffen, welche ihre physikalischen Eigenschaften durch dynamische Prozesse wie Diffusion und Koagulation schnell ändern. So ändert sich die am Auspuff gemessene Partikelgrößenverteilung in der Umgebungsluft sehr schnell. In zunehmender Entfernung zur Straße und damit zu den Partikelquellen (ca. 10-50m) nehmen die Anzahlkonzentrationen etwas ab, da auch eine Mischung mit dem städtischen Hintergrundaerosol stattfindet. Ein Beispiel einer solch straßennahen Messung ist für die Messstation Dresden-Nord in Abbildung 11 dargestellt. Die Messstation befindet sich etwa fünf Meter von der Straße entfernt. Das Maximum der Partikelgrößenverteilung liegt auch hier unterhalb 20 nm, allerdings ist die Amplitude deutlich geringer als bei Messungen direkt am Auspuff.

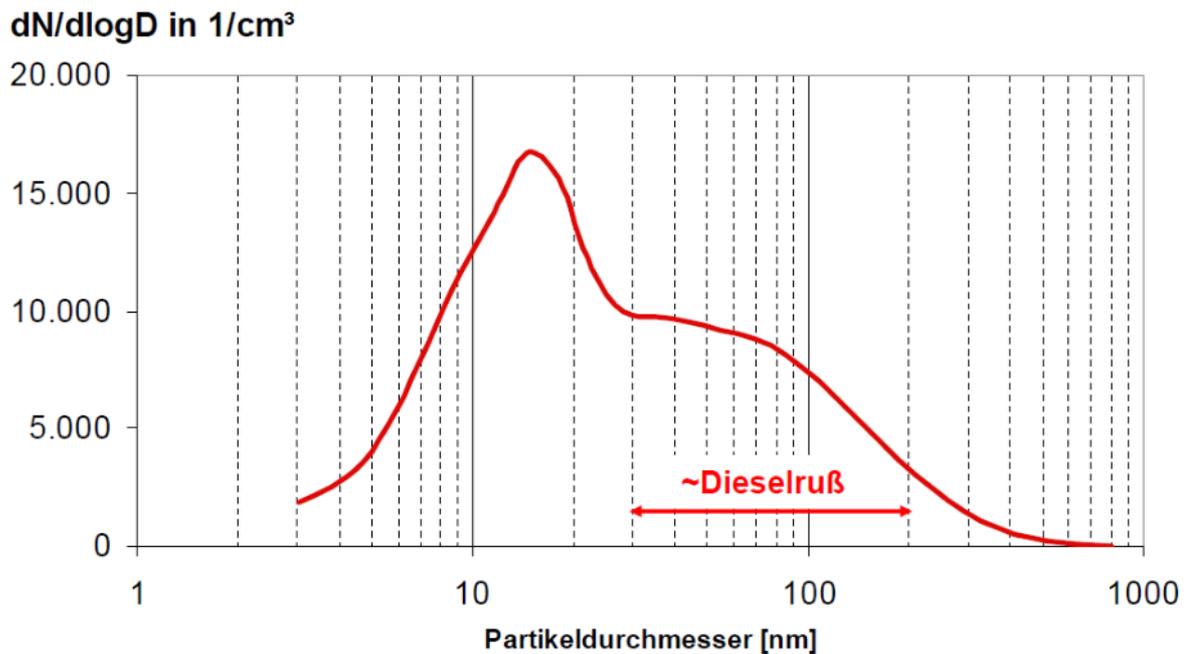


Abb. 11: Mittlere Partikelgrößenverteilung der verkehrsnahen Messstation Dresden-Nord über einen Zeitraum von sechs Monaten (09/2006-02/2007).

Neben den Auspuffemissionen nehmen beim Verkehr Partikelemissionen durch Abriebprozesse sowie der fahrzeuginduzierten Aufwirbelung eine nicht zu vernachlässigende Rolle ein. Häufig werden diese Nicht-Abgas-Partikelemissionen auch als Aufwirbelungs- und Abriebemissionen (AWAR) bezeichnet.

Die Partikel aus AWAR resultieren aus

- Abrießen (Reifen, Bremsen, Straße, Kupplung) sowie aus
- akkumuliertem Straßenstaub (Aufwirbelungspotenzial), der sich hier im Wesentlichen aus von Fahrzeugen abfallenden Verunreinigungen bzw. Ladungen, aus atmosphärischem Eintrag (Deposition) infolge der Emissionsprozesse im Umkreis der Straße und der Hintergrundbelastungen, aus Schmutzeintrag aus straßenbegleitenden Bereichen sowie aus deponierten Abrießen und aus Einträgen des Winterdienstes (Sand, Salz) bildet.

Die Prozesse zur Bildung der Abriebe und des Aufwirbelungspotenzials, die Menge des dann tatsächlich emittierten Materials sowie die Partikelanzahlen sind komplex, zeitabhängig und von verschiedenen Einflussgrößen abhängig und beeinflussen sich zum Teil noch untereinander. Stellvertretend seien hierbei genannt: Zusammensetzung der Fahrzeugflotte, Fahrzeuggeschwindigkeiten und Beschleunigungsverhalten, die Eigenschaften des Fahrweges und der umliegenden Flächen (Material, Beschaffenheit), Verschmutzungsgrad der Fahrwege, meteorologische Größen, wie Temperatur, Luftfeuchte, Regenhäufigkeit und -mengen, Reinigung bzw. Befeuchtung der Fahrwege bzw. andere Minderungsmaßnahmen (siehe z. B. Denby et al., 2012 und 2013; Düring und Lohmeyer, 2011; Lohmeyer, 2016).

Die AWAR-Emissionen werden derzeit maßgeblich den massebezogenen Partikelemissionen zugeordnet. Neuere Untersuchungen zeigen, dass auch Abriebprozesse zu nennenswerten Partikelanzahlen im Ultrafeinen Größenbereich führen können (Abbildung 12).

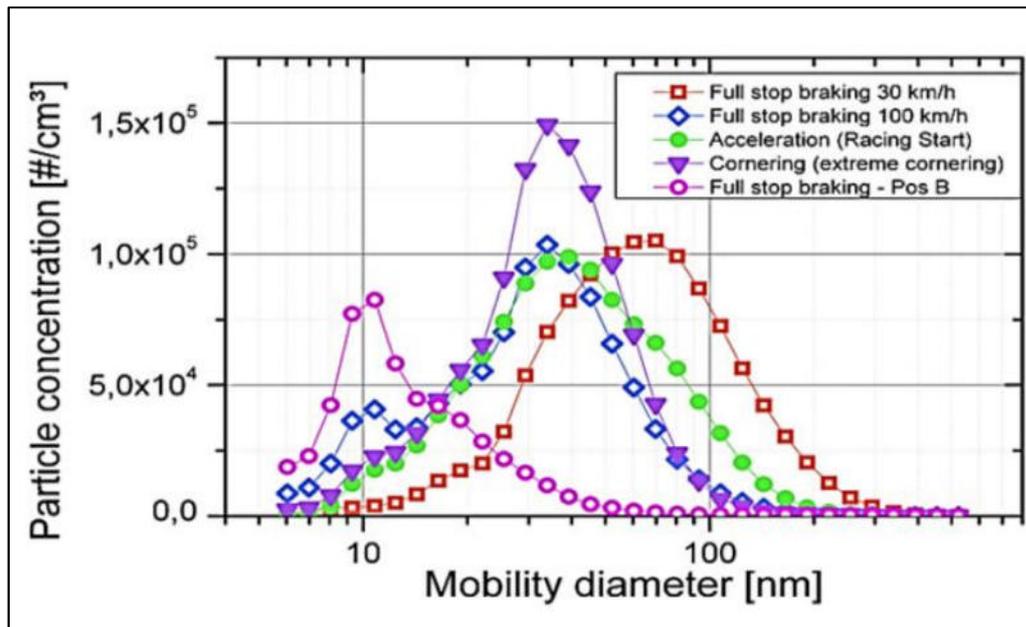


Abb. 12: Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser für Bremsmanöver von 100 km/h sowie 30 km/h. Pos B ist eine Messung nahe der Bremsscheibe, die anderen Messungen wurden im Radkasten durchgeführt. (Entnommen aus Grigoratos und Martini, 2014.)

Die Abbildung 12 zeigt, dass durch Bremsen signifikante Konzentrationen an ultrafeinen Partikeln gebildet werden können. Allerdings wurden die Messungen entweder nahe der Bremsscheibe oder im Radkasten durchgeführt. In städtischen Umgebungen, wo eine hohe Verkehrsdichte herrscht, spiegeln die getesteten Fahrstile nicht immer die Realität wieder. Zudem greifen auch hier aerosoldynamische Prozesse und verändern die Partikelgrößenverteilung sehr schnell. Deshalb scheinen diese Emissionen von ultrafeinen Partikeln von geringerer Bedeutung als die Emissionen aus Verbrennungsprozessen in den Fahrzeugmotoren.

Neben dem Straßenverkehr kann die Holzverbrennung in Kleinfeuerungsanlagen als Beispiel für Black Carbon-Emissionen genannt werden. Um die Zusatzbelastung durch solche Anlagen zu bestimmen, hat das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Zusammenarbeit mit dem TROPOS umfangreiche Messungen im Ort Melpitz sowie an der am Ortsrand gelegenen Forschungsstation durchgeführt. Neben den üblichen UFP-Messungen wurde die BC-Konzentration mit Multi Angle Absorption Photometern und Aethalometern aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Zeitreihen sind in Abbildung 13 dargestellt. Dabei bilden die grauen Linien die Messwerte im Ort selbst ab, während die Referenzmessungen an der Forschungsstation in schwarz gehalten sind. Besonders in den Wintermonaten ist eine deutliche Zusatzbelastung im Ort wahr-

nehmbar. Generell zeigen die optischen Messgeräte zur Bestimmung der äquivalenten Rußmassenkonzentration eine gute Übereinstimmung, unabhängig davon, ob die Messungen mit einem MAAP oder einem Aethalometer stattgefunden haben.

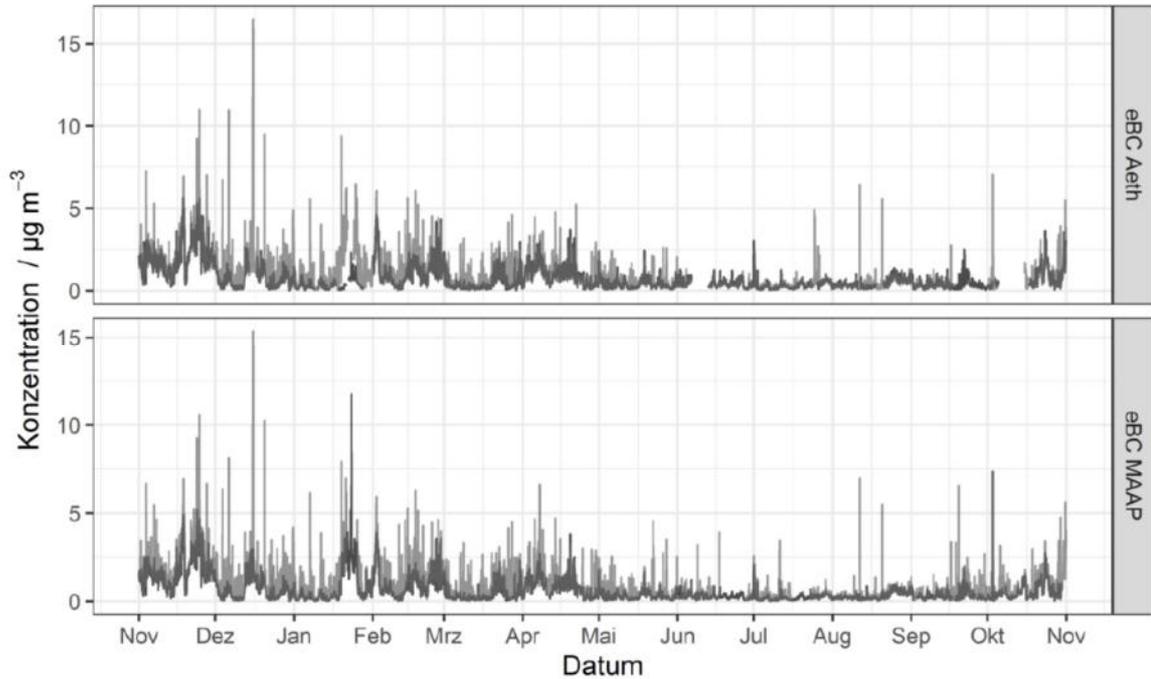


Abb. 13: Konzentrationen des schwarzen Kohlenstoffes gemessen mit Aethalometer und MAAP dargestellt als Zeitreihen; Messwerte im Ort Melpitz sind als hellgraue Linien, die an der Referenz Melpitz Station als schwarze Linien dargestellt (Quelle: LfULG Schriftenreihe, Heft 12/2020).

UFP im Umkreis von Flughäfen

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) untersucht seit einiger Zeit die Ultrafeinstaubbelastung im Umfeld des Flughafens Frankfurt und welche Rolle der Flugbetrieb als Quelle für ultrafeine Partikel spielt. Bereits ein erster Zwischenbericht aus dem Jahr 2018 wies deutlich darauf hin, dass der Flughafen Frankfurt eine bedeutende Quelle für UFP ist. In Abhängigkeit der Windrichtung werden von dort die UFP-Emissionen in die Umgebung transportiert und führen im Umfeld des Flughafens zu erhöhten Anzahlkonzentrationen. Im Folgenden seien die mittleren Partikelgrößenverteilungen für die Messstellen Frankfurt-Schwanheim (einige Kilometer nördlich des Flughafens), der direkt am Flughafen gelegenen Messstelle Frankfurt-Flughafen – A3 sowie der Station Raunheim, einige Kilometer südwestlich vom Flughafen, dargestellt.

Die Auswertung der Messdaten hat ergeben, dass die höchste mittlere Anzahlkonzentration am Standort Frankfurt-Flughafen-A3 auftritt (33.000 Partikel pro cm^3). Sie liegt dort etwa viermal so hoch wie in Frankfurt-Schwanheim (7.900 Partikel pro cm^3) oder Raunheim (8.600 Partikel pro cm^3). An diesen Standorten ist im Mittel mindestens die Hälfte der Partikel kleiner als 30 nm.

An allen drei Standorten treten bei Wind aus Richtung des Flughafens (Abbildungen 14 bis 16) stark erhöhte Partikelkonzentrationen auf. Der Windrichtungsbereich ist scharf abgegrenzt; sobald der Wind nur geringfügig aus dem Sektor Flughafen herausdreht, sinkt die Konzentration auf einen Bruchteil. Die mittleren Konzentrationen bei Wind aus Richtung des Flughafens liegen am Standort Frankfurt-Flughafen-A3 etwa 6,5-mal, an den Standorten Raunheim, Frankfurt-Schwanheim und Frankfurt-Sachsenhausen etwa 2,5-mal, 4-mal, bzw. 3,5-mal so hoch wie die mittlere Hintergrundkonzentration. Zudem korreliert der Tagesgang der Partikelanzahlkonzentration mit der Betriebszeit des Flughafens.

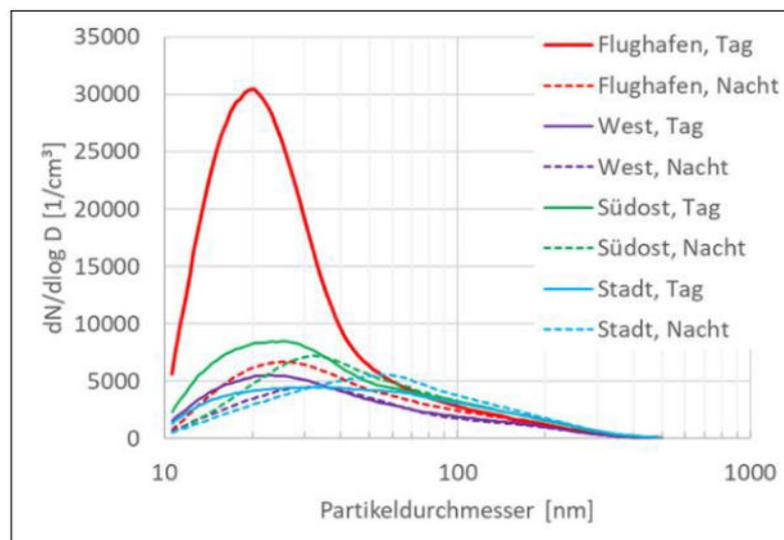


Abb. 14: Mittlere Anzahlgrößenverteilung für verschiedene Anströmungsrichtungen an der Station Frankfurt-Schwanheim nach Tag (5-23 Uhr) und Nacht (23-5 Uhr) getrennt.

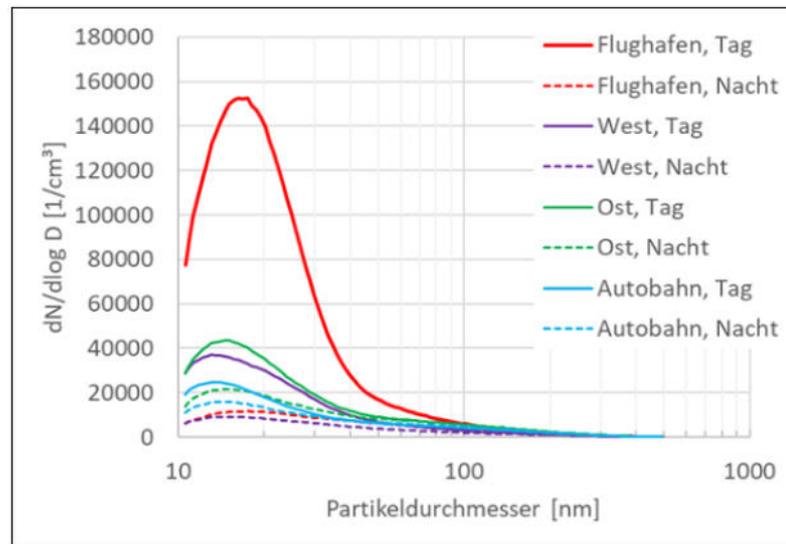


Abb. 15: Mittlere Anzahlgrößenverteilung für verschiedene Anströmungsrichtungen an der Station Frankfurt-Flughafen, A3 nach Tag (5-23 Uhr) und Nacht (23-5 Uhr) getrennt.

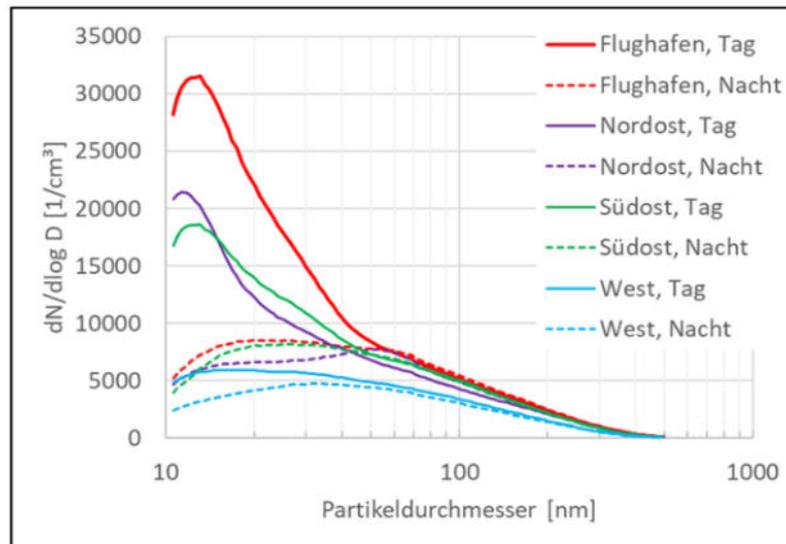


Abb. 16: Mittlere Anzahlgrößenverteilung für verschiedene Anströmungsrichtungen an der Station Raunheim nach Tag (5-23 Uhr) und Nacht (23-5 Uhr) getrennt.

Weiterführende Messungen an zusätzlichen Standorten (Frankfurt-Flughafen-Ost, Frankfurt-Oberad, Frankfurt-Niedwald und Raunheim-Mönchhof) wurden im Jahr 2019 etabliert. Zusätzlich wurden temporäre Messungen im Umfeld des Flughafens durchgeführt, um den Einfluss der Landeanflüge auf die UFP-Belastung zu erfassen (Abbildung 17).

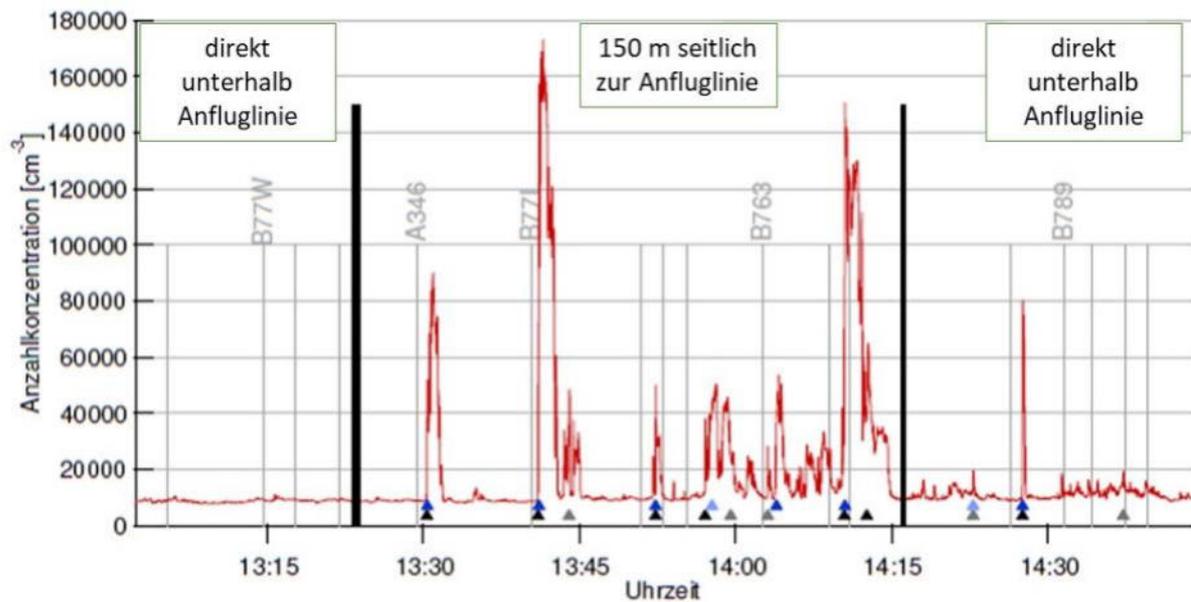


Abb. 17: Kurzzeitmessungen mit mobilem Partikelzähler an einem Standort im Umfeld des Flughafens Frankfurt mit einer Überflughöhe von 100 m (Masterarbeit J. Freund).

Beim Anflug der Flugzeuge werden kurzzeitig Konzentrationsspitzen gemessen, die um ein Vielfaches höher im Vergleich zum Hintergrund sind. Die Messstrategie des HLNUG liefert anschauliche Ergebnisse zur Ausbreitung ultrafeiner Partikel am Beispiel des Großflughafens Frankfurt. Weiterführende Betrachtungen und Ergebnisse zu dieser Problematik können aus den Berichten 2 (Rose und Jacobi, 2019) und 3 (Rose und Jacobi, 2020) des HLNUG entnommen werden.

Auch andere Studien zur Feinstaubbelastung an Flughäfen haben Partikelgrößenverteilungen publiziert. Als weiteres Beispiel sei hier die Studie (Keuken et al, 2015) für den Flughafen Amsterdam genannt (Abbildung 18).

Die markante Form der Partikelgrößenverteilung mit einem Maximum bei etwa 20 nm für die unmittelbare Windrichtung vom Flughafen Schiphol zum Messpunkt „Adamse Bos“ (Entfernung etwa 7 km) ist mit den Ergebnissen aus Frankfurt vergleichbar. Für andere Windrichtungen sowie nachts sind die Konzentrationen in diesem Bereich um ein Vielfaches niedriger. Auch im etwa 40 km entfernten Cabauw kann noch eine Erhöhung der Anzahl ultrafeiner Partikel beobachtet werden, sofern der Wind aus Richtung des Flughafens Schiphol weht. Möglicherweise sind ebenfalls hohe Messwerte unterhalb der Partikeldurchmesser von 10 nm zu verzeichnen. Die hier eingesetzten Geräte messen jedoch erst zuverlässig ab 10 nm.

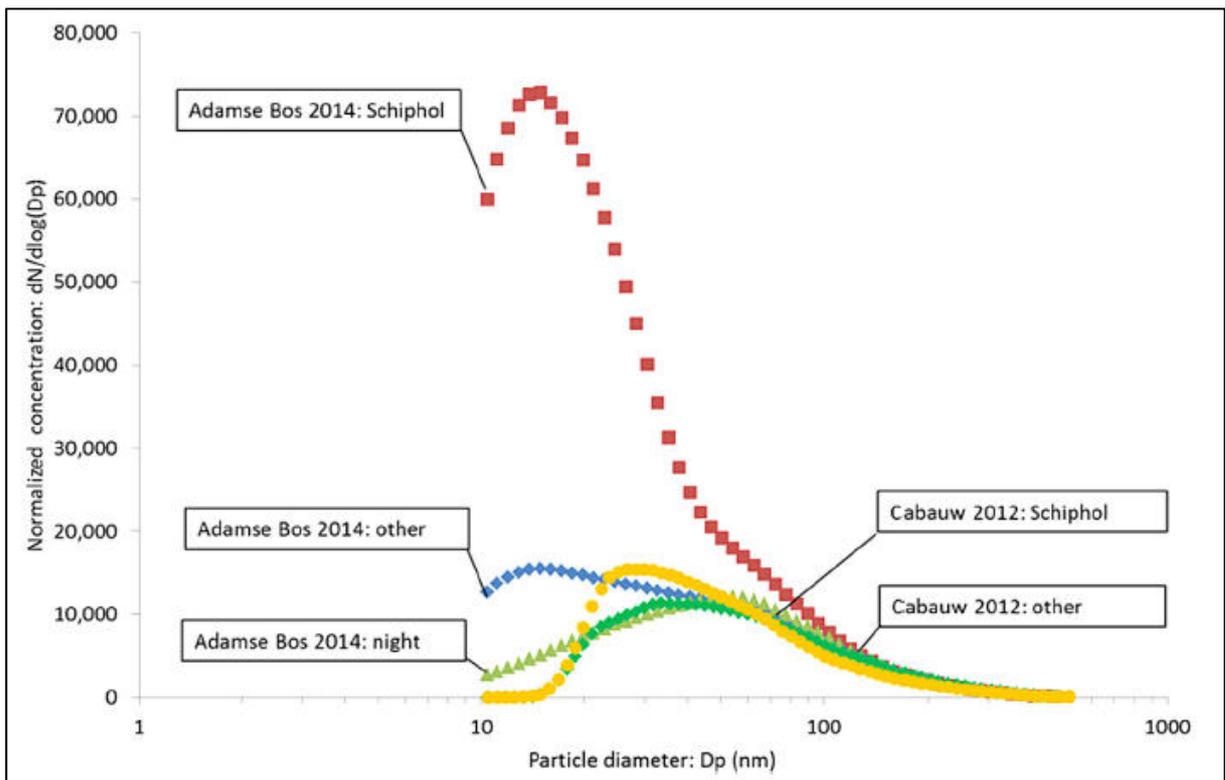


Abb. 18: Flughafen Amsterdam - Schiphol (Keuken et al., 2015). Mittlere Partikelgrößenverteilungen gemessen im Zeitraum März bis Mai 2014 an zwei Messstellen in der unmittelbaren bzw. näheren Umgebung des Flughafengeländes zu verschiedenen Tageszeiten und Windrichtungsverhältnissen. © Keuken et al. (2015)

In der Literatur finden sich typische Mittelwerte von UFP-Konzentrationen über einen längeren Zeitraum (mindestens ein Tag) von 2.000 bis 40.000 Partikel/cm³ in wenigen 100 m Abstand zum Flughafen (Zhu et al., 2011; Hsu et al., 2013) oder auf dem Flughafengelände (Buonno et al., 2013; Ellermann et al. 2011).

Kurzzeitige Spitzenwerte in Quellnähe können um einige Größenordnungen höher liegen, zum Beispiel 300.000 bis 600.000 Partikel pro cm³ (Ellermann et al., 2011) oder 1.000.000 Partikel pro cm³ (Zhu et al., 2011).

Partikelneubildungsereignisse

Ultrafeine Partikel entstehen auch auf natürliche Weise in der Atmosphäre. Diese Form der Partikelneubildung tritt großflächig auf und lässt sich deutlich von lokalen anthropogenen Quellereignissen abgrenzen.

Die Abbildung 19 zeigt ein solches Fallbeispiel im Verlaufe eines Tages für die regionale Hintergrundstation Melpitz im Sommer 2018. Die Partikelgrößenverteilung (linke Seite) ändert sich innerhalb weniger Stunden markant. Die nächtliche Hintergrundverteilung mit einem Maximum bei etwa 70 nm wird nur zwei Stunden später durch ein deutliches Maximum im Bereich von 10 nm

geprägt. Im Verlauf der nachfolgenden drei Stunden wachsen diese kleinen Partikel an und verschieben das Maximum der Partikelgrößenverteilung zu etwa 30 nm. Das weitere Anwachsen der Partikel kann teilweise bis in den darauffolgenden Tag beobachtet werden. Bei Betrachtung der Gesamtanzahlkonzentration (rechte Seite) ist ein deutlicher Sprung von unter 5.000 Partikeln pro Kubikzentimeter am Morgen bis auf über 25.000 Partikel pro Kubikzentimeter innerhalb weniger Stunden zu verzeichnen. Der dann folgende Rückgang der Anzahlkonzentration erfolgt dagegen nur langsam.

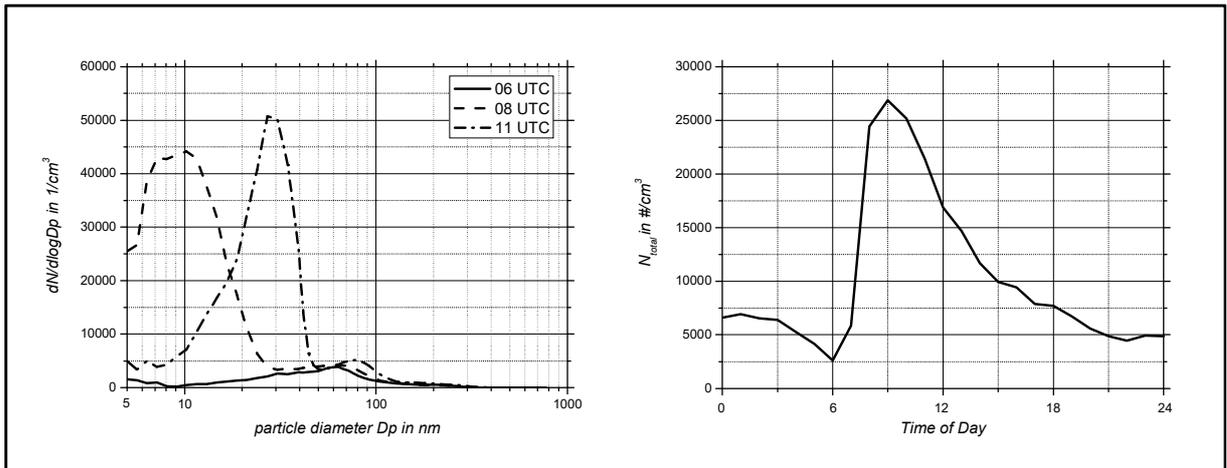


Abb. 19: Partikelgrößenverteilung (links) und Gesamtanzahlkonzentration (rechts) in Abhängigkeit der Zeit für den Fall der Partikelneubildung für die Messstation Melnitz im Sommer 2018.

Ein weiteres Beispiel eines Partikelneubildungsereignisses ist in Abbildung 20 zu sehen. Hier sind die Partikelgrößenverteilungen als Konturplot in Abhängigkeit der Zeit (x-Achse) und des Partikeldurchmessers D_p auf der Ordinate für die zwei Messstationen Leipzig-Mitte (städtisch und verkehrsnah) sowie Leipzig-TROPOS (urbaner Hintergrund) für einen Tag im Juli 2012 gezeigt. Deutlich zu erkennen ist die plötzliche Bildung von Partikeln mit einem Durchmesser kleiner 10 nm kurz nach 9 Uhr lokaler Zeit. Im Laufe des Vormittags bis in den Nachmittag wachsen die Partikel an beiden Stationen in nahezu gleichem Maße an, unabhängig vom Einfluss lokaler Verkehrsquellen in Leipzig-Mitte.

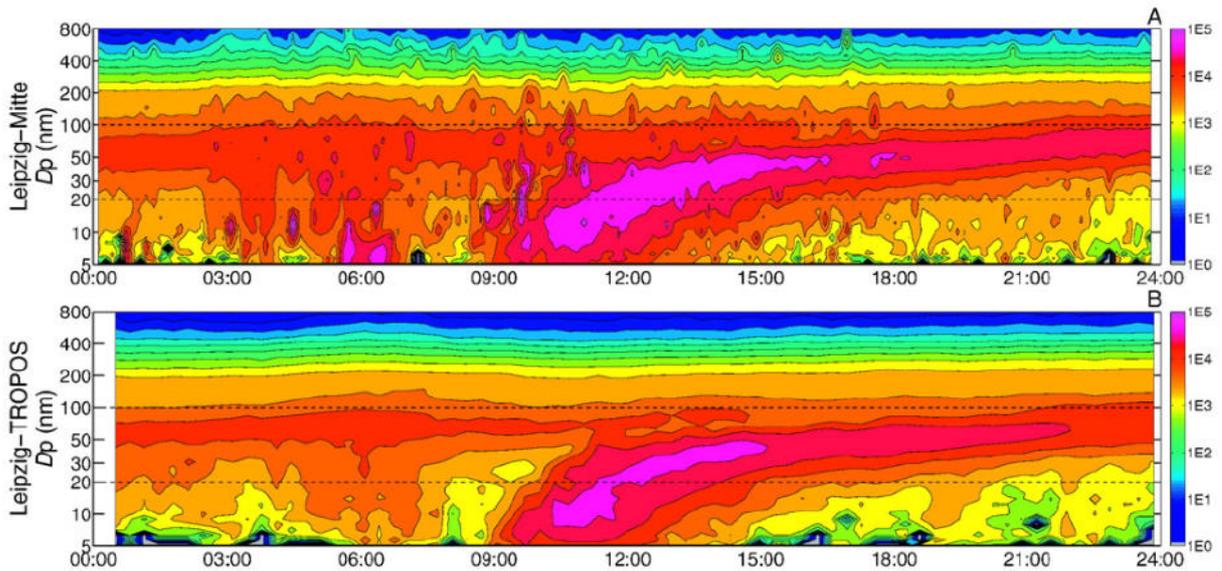


Abb. 20: Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Zeit für den Fall der Partikelneubildung für die Messstation Leipzig-Mitte und Leipzig-TROPOS im Juli 2012 (Ma und Birmili, 2015).

In der Atmosphäre können zudem biogene Partikel gebildet werden. Eine bedeutende Quelle biogener Emissionen ist der boreale Wald. So kommt es durch biogene flüchtige Bestandteile zur Bildung von biogenen sekundären organischen Aerosolen. Vor allem in Zentral- und Nordfinland sind große Produktionsraten dieser Aerosole vorhanden.

2.6 EINFLUSS METEOROLOGISCHER BEDINGUNGEN AUF EMISSION UND AUSBREITUNG

Die Emission und die Ausbreitung feiner und ultrafeiner Partikel hängen sehr stark von den meteorologischen Rahmenbedingungen ab (von Bismarck-Osten et al., 2013). So spielt die Wetterlage sowie die damit verbundene Windrichtung eine der wesentlichsten Rollen. Beispiele hierfür sind die West- und die Ostwetterlage. Erstere tritt in Deutschland am meisten auf und ist durch maritim wechselhaft geprägtes Wetter gekennzeichnet. Dabei befindet sich ein Hochdruckgebiet meist über Südeuropa (Azorenhoch) und ein Tiefdruckgebiet über Nordeuropa (Abbildung 21).

Die mitunter rasche Folge von Tiefdruckgebieten ist zudem durch einen steten Wechsel der Luftmassen sowie einer besseren Durchmischung der Grenzschicht gekennzeichnet. UFP und andere Luftschadstoffe werden schneller in ihrer Konzentration reduziert.

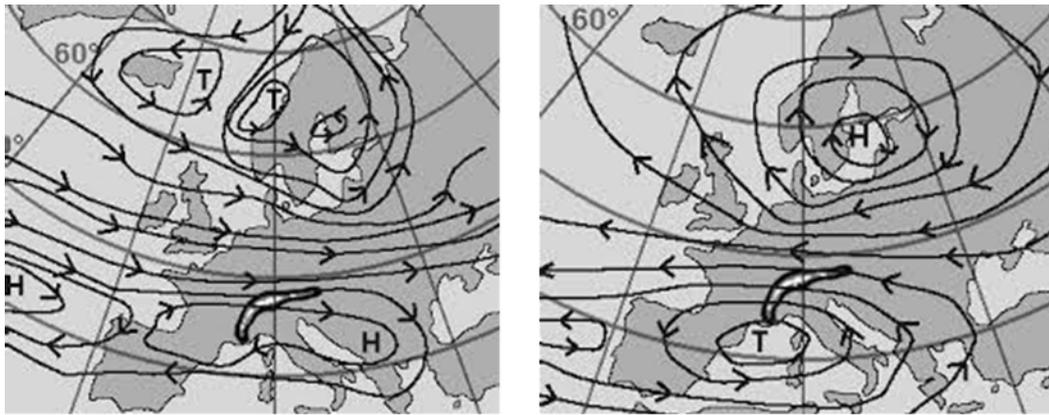


Abb. 21: Typische Großwetterlagen über Deutschland; links: Westlage; rechts: Ostlage (Quelle: Uni Regensburg, Europäische Wetterlagen).

Im Gegensatz dazu befindet sich bei einer Ostwetterlage das Tiefdruckgebiet über Südeuropa, während Nordeuropa unter Hochdruckeinfluss liegt. Da Ostwetterlagen eine große Erhaltungsneigung aufweisen, kann sich über mehrere Tage, manchmal über Wochen eine markante Witterung mit Ostwind einstellen. Die kontinental geprägte Luft ist sehr trocken und geht im Sommer mit hohen, im Winter mit teils sehr niedrigen Temperaturen einher. Im Winter kann es durch den vermehrten Ausstoß von Luftschadstoffen, beispielsweise durch starkes Heizen, zu einer deutlichen Verschlechterung der Luftqualität kommen. Zusätzlich verhindert die Bildung einer Inversion den vertikalen Austausch der bodennahen Luft mit höheren Schichten und führt zu einer Akkumulation von Schadstoffen und Partikeln. Das Auswaschen der Partikel durch Regen findet nicht mehr statt. Diese Eigenschaftsprägung beginnt im Quellgebiet der Luftmasse und setzt sich unter teilweiser Verstärkung bis Mitteleuropa fort. Messstationen mit einem geringen horizontalen Abstand, jedoch mit unterschiedlichen Höhen weisen dabei große Unterschiede in der Partikel- und Schadstoffbelastung auf. Ein gutes Beispiel hierfür sind Messungen im sächsisch-tschechischen Grenzgebiet. Während in Ortschaften wie Deutschneudorf (Höhe: 660 m ü. NN) eine hohe Belastung herrscht, kann auf dem Schwartenberg in knapp 790 m Höhe ü. NN eine deutlich niedrigere Belastung festgestellt werden, da sich die Bergkuppe oberhalb der Inversionsschicht befindet. Speziell für ultrafeine Partikel bedeutet dies eine Akkumulation unterhalb der Inversion mit höheren Anzahlkonzentrationen. Höher gelegene Messstationen weisen hingegen geringe Anzahlkonzentrationen auf, da hier der Ferntransport von Partikeln gegenüber bodennahen Quellen dominiert. Speziell für die östlichen Bundesländer Brandenburg und Sachsen kann bei Ostwetterlagen ein Eintrag von polnischen und tschechischen Partikelquellen verzeichnet werden. Vor allem Windrichtungen aus Südost liefern deutlich höhere Schadstoffwerte in Trendanalysen auch außerhalb der Grenzregionen. Dies konnte in mehreren Publikationen über das windrichtungsabhängige Verhalten beispielsweise von PM_{10} bis hin zu PM_1 an der Forschungsstation Melpitz gezeigt werden (Spindler et al., 2013). In diesen Studien wurden Filterproben mit den Abscheidecharakteristiken PM_{10} (kontinuierlich seit 1992), $PM_{2,5}$ und PM_1 (seit 2003 kontinuierlich) hinsichtlich der Partikelmasse, wasserlöslichen Ionen, elementarem und organischem Kohlenstoff untersucht und mit der Herkunft der

Luftmasse interpretiert. Dabei wurden deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Witterung gefunden (Abbildung 22). Anhand dieser Daten und der Berücksichtigung der Wetterlagen wurden die höchsten PM₁₀, PM_{2.5} und PM₁-Werte für Windrichtungen aus Südost vernommen, während die geringsten Massenkonzentrationen für Richtungen um Nordwest zu verzeichnen waren. Für PM₁₀ können hier beispielhaft die Werte 34 µg pro m³ für Südost und 17 µg pro m³ für Nordwest als Mittel für den Zeitraum 2003-2011, für PM₁ 22 zu 11 µg pro m³ angegeben werden. Vor allem Anteile an Sulfat, organischem sowie elementarem Kohlenstoff sind bei Windrichtungen aus Südost deutlich höher in der Konzentration.

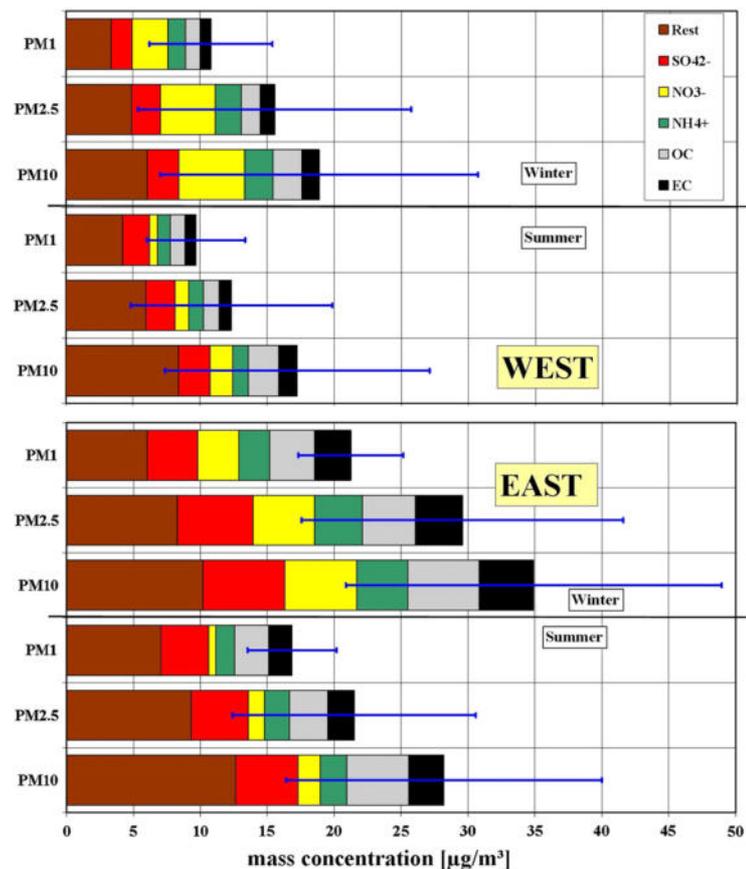


Abb. 22: Mittelwerte der PM₁₀, PM_{2.5} und PM₁ Massenkonzentrationen im Vergleich zwischen Winter und Sommer sowie zwischen westlichen und östlichen Anströmungen für den Zeitraum Mai 2004 bis April 2008.

In einer neueren Studie wurde eine Ursachenanalyse von PM₁₀-Feinstaubimmissionen an zehn Messstationen in den Ländern Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen sowie des Umweltbundesamtes zwischen September 2016 und März 2017 durchgeführt (van Pinxteren et al., 2017). Dabei wurden die Tageswerte der PM₁₀-Massekonzentration und der darin enthaltenen Inhaltsstoffe, wasserlöslicher anorganischer Ionen sowie Kohlenstoffsummenparameter untersucht. Ein wichtiges Ergebnis war, dass bei meteorologischen Randbedingungen, welche zu einer hohen

Belastung von $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ führen, der grenzüberschreitende Eintrag bei etwa 50 Prozent liegt. Dieser antransportierte Anteil konnte mittels PMF-Analyse¹ als Verbrennungsemissionen aus den östlich angrenzenden Ländern charakterisiert werden.

Bei diesen Studien wurden jeweils die Partikelmassenkonzentrationen von PM₁₀ untersucht. Daraus können nur bedingt Rückschlüsse auf UFP gezogen werden. Für weitere Untersuchungen hierzu wären Zeitreihen von Partikelgrößenverteilungen erforderlich.

Kleine Partikel wachsen während des Transportes von den Quellen an. Zudem koagulieren sie gut mit feinen und groben Partikeln, was ihre Anzahl reduziert. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass bei entsprechenden meteorologischen Bedingungen, beispielsweise Inversionswetterlagen im Winter, auch die Konzentration ultrafeiner Partikel bei östlichen Anströmungsrichtungen deutlich ansteigt. Mitunter sind Verdopplungen oder Verdreifachungen der Gesamtpartikelanzahlkonzentration zu beobachten und liegen dabei deutlich über den Mittelwerten des Hintergrundes.

Bei Betrachtung der Verteilung von ultrafeinen Partikeln spielt auch die Windgeschwindigkeit eine wesentliche Rolle. So kann sich in deren Abhängigkeit ein Gradient der Partikelanzahlkonzentration, vor allem in städtischer Umgebung von verkehrsnahen Punkten bis in den Hintergrund mit unterschiedlicher Stärke ausbilden. Prinzipiell ergibt sich ein Konzentrationsgefälle der Anzahlkonzentrationen $N_{\text{(verkehrsnah)}} > N_{\text{(urbaner Hintergrund)}} > N_{\text{(regionaler Hintergrund)}}$. Bei geringen Windgeschwindigkeiten akkumulieren sich in wenig belüfteten städtischen Gebieten UFPs. Dies kann zu relativ hohen Anzahlkonzentrationen von mehreren 10.000 Partikeln pro cm^3 führen. Mit steigender Windgeschwindigkeit kann eine bessere Durchmischung der Grenzschicht und somit eine Senkung der Partikelbelastung erreicht werden.

Die Abhängigkeit der Partikelbelastung von der Temperatur wurde bereits indirekt bei der Betrachtung der Wetterlagen erwähnt. Vor allem für die Wintermonate treten bei niedrigen Temperaturen erhöhte Anzahlkonzentrationen auf. Das hängt zum einen mit den höheren Emissionen aus dem Verkehrssektor infolge der Kondensation von Vorläufergasen zusammen und resultiert in charakteristischen Moden der Partikelgrößenverteilung von 20 bis 100 nm. Zusätzlich kommt es durch Heizen in der kalten Jahreszeit zum vermehrten Ausstoß von Partikeln, welche für die urbane aber auch regionale Hintergrundbelastung mit verantwortlich sind.

Als letzte wichtige Einflussgröße auf die Partikelgrößenverteilung und die damit verbundene Partikelanzahlkonzentration sei die Solarstrahlung erwähnt. Bei intensiver Sonneneinstrahlung finden photochemische Reaktionen der Gasmoleküle statt, welche zur Partikelneubildung führen. Vor allem im Frühjahr und in den Sommermonaten findet dieses großräumige Phänomen statt und lässt sich deutlich im Tagesgang der Partikelgrößenverteilung sowie der Anzahlkonzentration erkennen und von anderen Quellen unterscheiden.

¹ Die Positive Matrix-Faktorisierung (PMF) ist eine Rezeptormodellierungstechnik, um den Ursprung und den quantitativen Beitrag von verschiedenen Aerosolquellen zu bestimmen.

2.7 GESUNDHEITLICHE AUSWIRKUNGEN ULTRAFEINER PARTIKEL

Die gesundheitlichen Wirkungen von UFP sind mehr denn je Gegenstand aktueller Untersuchungen. Hier zeigt sich die prinzipielle Schwierigkeit, die Effekte durch UFP von den Wirkungen anderer verkehrsbedingter Luftschadstoffe zu trennen. Die Weltgesundheitsorganisation hat im Jahr 2016 festgehalten, dass es Hinweise auf negative Gesundheitswirkungen von UFP gibt. Allerdings sind diese nicht eindeutig genug für die Festlegung von Richt- bzw. Grenzwerten (WHO, 2016). Auch bestehen methodische Schwierigkeiten, für UFP einen Richtwert zu entwickeln. Dafür bedarf es Langzeitstudien, die die Wirkung von UFP auf die menschliche Gesundheit untersuchen.

Aufgrund ihrer geringen Größe können ultrafeine Partikel durch die menschliche Atmung leicht aufgenommen werden. Parameter wie die Partikelanzahlkonzentration oder auch die Partikelmassekonzentration sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Partikel spielen hinsichtlich der gesundheitlichen Wirkung auf den Menschen eine wesentliche Rolle.

Entsprechend der Partikelgröße können drei Bereiche im Atemtrakt unterschieden werden, in denen Partikel deponiert werden (Abb. 23).

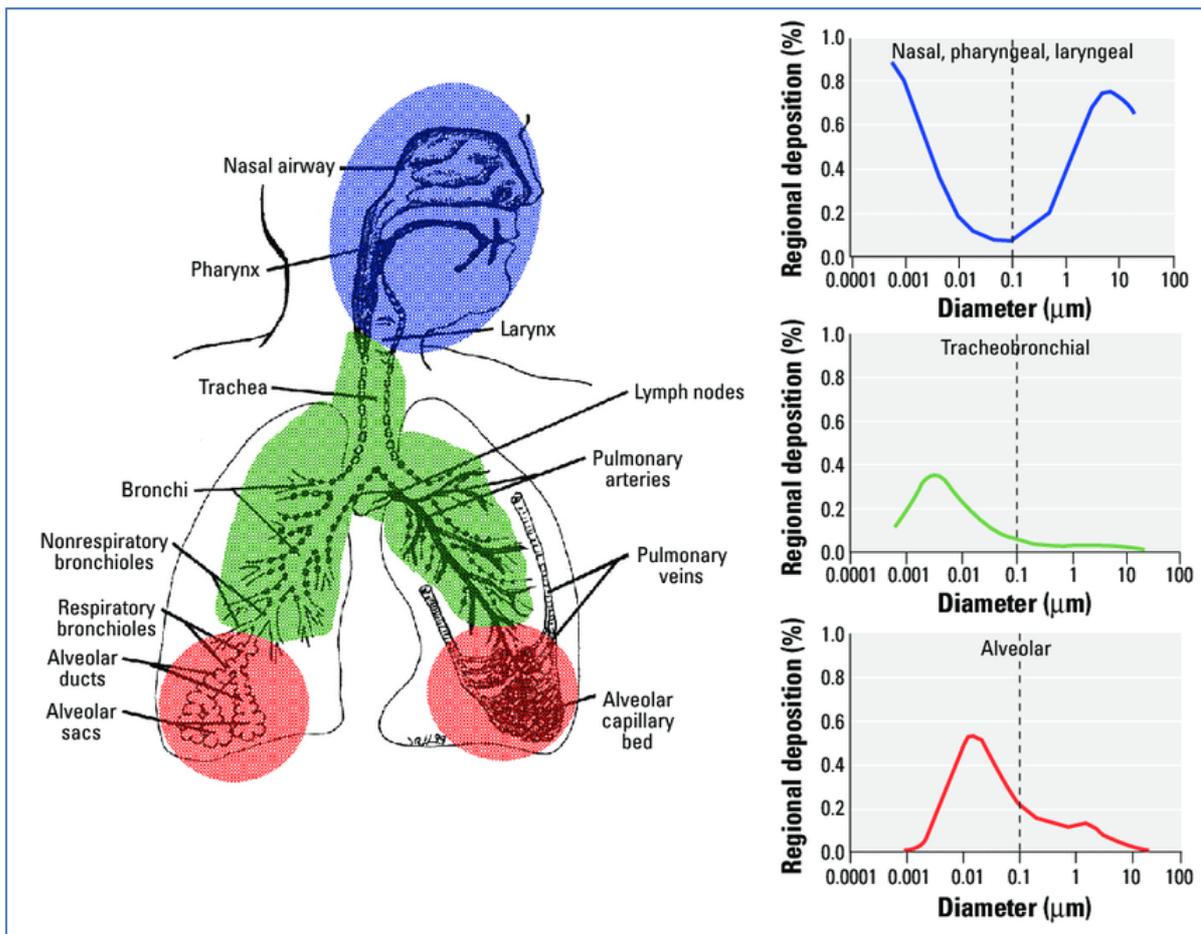


Abb. 23: Partikeldeposition im menschlichen Atemtrakt als Funktion des Partikeldurchmessers

Partikel, welche zwar inhalierbar sind, aber eine Größe von etwa $2.5 \mu\text{m}$ nicht unterschreiten, verbleiben im Nasen- und Rachenraum oder erreichen maximal den oberen Bereich der Bronchien. Durch Flimmerhaare und der Bildung von Schleimsekretionen werden diese Partikel wieder zurück in Richtung Kehlkopf befördert, wo sie entweder abgehustet werden oder durch Verschlucken in den Magen gelangen. Lungengängig hingegen sind Partikel mit einer Partikelgröße kleiner $2.5 \mu\text{m}$. Diese können bis in die Bronchien gelangen (grüner Bereich in Abb. 23) und verbleiben mitunter mehrere Wochen, bis sie ebenfalls durch Schleimsekretionen und durch Flimmerhaare wieder abgesondert werden. Die geringe Eigenbeweglichkeit der Partikel zwischen 0.1 und $1 \mu\text{m}$ führt zu einem Minimum der Deposition im Atemtrakt. Dies ist auch anhand der blauen Kurve in Abb. 23 erkennbar. Diese Partikel verbleiben somit im Luftstrom der ein- und ausgeatmeten Luft. Ultrafeine Partikel können durch ihre geringe Größe bis in die Lungenperipherie gelangen, wo sie auf die Alveolen treffen und sich am Gewebe festsetzen können. Eine Deposition unlöslicher Partikel über mehrere Jahre ist hier wahrscheinlich und stellt somit eine hohe Gesundheitsgefahr dar. In Abhängigkeit ihrer Eigenschaften können sie Reizwirkungen und Entzündungen auslösen. Zudem können zellgängige Partikel in die Blutbahn übergehen und zu verschiedenen Organen transportiert werden. Damit besteht eine erhöhte Gefahr von Herz-Kreislaufkrankungen.

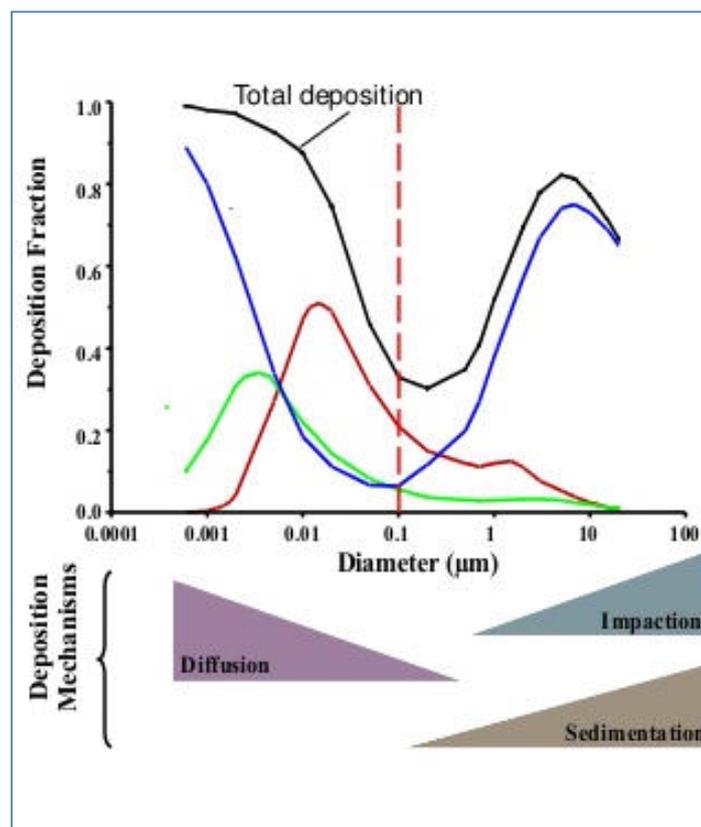


Abb. 24: Zusammenfassung der Wahrscheinlichkeit der Partikeldeposition im menschlichen Atemtrakt als Funktion des Partikeldurchmessers sowie der Einfluss verschiedener Depositionsmechanismen.

Partikel aus dem Verkehrssektor, vor allem Dieselrußpartikel können durch die Anlagerung weiterer Stoffe wie Metalle und polyzyklisch-aromatische Kohlenwasserstoffe krebserzeugend wirken. Weiterhin haben UFPs im Verhältnis zu ihrer Masse eine große Oberfläche und können somit toxischer wirken als große Partikel (HEI 2013). Aus den beiden Kurven für die bronchiale und die alveolare Deposition von Partikeln wird die erhöhte Rate vor allem im ultrafeinen Bereich deutlich. So beträgt die Wahrscheinlichkeit der Deposition eines 10 nm-Partikels in den Alveolen immerhin um 50 Prozent.

Eine Zusammenfassung der vorangegangenen Partikeldepositionen in den unterschiedlichen Bereichen des menschlichen Atemtraktes zeigt die Abb. 24. Die Partikeldepositionswahrscheinlichkeit ist sowohl für Partikel kleiner 50 nm als auch für Partikel größer 1 µm sehr hoch. Hier zeigen die Mechanismen der Diffusion für kleine Partikel sowie Impaktion und Sedimentation für große Partikel ihre Wirkung. Bei der Diffusion heften sich sehr kleine UFPs durch ihre Brown'sche Molekularbewegung schnell an Oberflächen im oberen Atemtrakt an. Partikel größer 1 µm können dem Volumenstrom nicht folgen und bleiben quasi schon in der Nase und dem Rachenraum hängen (Impaktion) oder sedimentieren aufgrund ihrer Gewichtskraft.

Viel bedeutsamer ist allerdings der Bereich von 100 nm und kleiner, wo die drei genannten Depositionsmechanismen an Wirkung verlieren. Diese Partikel werden mit dem Luftstrom eingeatmet, gelangen so bis in die tiefsten Regionen der Lunge und können durch den Blutkreislauf in Organen abgelagert werden und Erkrankungen hervorrufen.

Erste epidemiologische Studien haben signifikante Zusammenhänge zwischen der Partikel-/Feinstaubbelastung und der Morbidität sowie Mortalität aufgezeigt (Rückerl et al. 2011). Da sich solche Studien zumeist auf die Fraktionen PM_{2.5} und PM₁₀ bezogen haben, blieb die eigentliche Wirkung der UFP-Fraktion auf die Gesundheit noch weitestgehend ungeklärt.

Im Jahr 2013 veröffentlicht das Health Effect Institute (HEI) einen Übersichtsbericht zum aktuellen Kenntnisstand zu den Gesundheitswirkungen von ultrafeinen Partikeln (HEI, 2013). Bis dato stellte dieser Bericht die umfangreichste und vollständigste Datenbasis zur Wirkung von UFP auf die Gesundheit dar. Darin wird erläutert, dass es wissenschaftliche Hinweise auf eine gesundheitsschädigende Wirkung von ultrafeinen Partikeln gibt. Auf einen Zusammenhang zwischen ultrafeinen Partikeln mit kardiovaskulärer und respiratorischer Morbidität und Mortalität sowie auf die Entstehung von lokalen und systemischen Entzündungsprozessen und adversen Effekten auf Gehirn und Stoffwechsel wird ebenfalls hingewiesen. Allerdings reicht die Evidenz dieser Wirkungen noch nicht aus, dass Empfehlungen zur gesetzlichen Regulierung von UFP's gegeben werden können. Weiterhin gibt es zwar Untersuchungen zur Kurzzeitexposition, Studien zur Langzeitexposition fehlen jedoch noch gänzlich.

Baldauf et al. (2016) fassen in ihrem Artikel die Ergebnisse eines Expertenworkshops zu UFP im Jahr 2015 zusammen. Auch hier wird der Zusammenhang zwischen ultrafeinen Partikeln und Gesundheitseffekten aufgezeigt, diese sind aber im Vergleich zu den Effekten durch PM_{2.5} deutlich schwächer. Da UFP mit anderen verkehrsbedingten Luftschadstoffen sehr gut korrelieren, kann keine eindeutige Trennung zwischen beiden gemacht werden. Es kann nicht zwangsweise davon

ausgegangen werden, dass sich die Effekte und Wirkungen von Massekonzentrationen auch auf ultrafeine Partikel übertragen lassen. Eine Schlussfolgerung aus diesem Workshop war die Fortführung von Messungen unter Berücksichtigung der Partikelgröße, um deutlichere Hinweise auf die Wirkung von UFP auf die menschliche Gesundheit zu erlangen.

Wolf et al. (2015) führten in Augsburg eine Studie zum Zusammenhang zwischen der PM₁₀- und UFP-Belastung und Herzinfarkten durch. Für hohe PM₁₀-Werte konnte ein Zusammenhang zu Herzinfarkten hergestellt werden. Für eine erhöhte UFP-Belastung konnte dies hauptsächlich für neuerliche Herzinfarkte gezeigt werden. Das Risiko einen weiteren Infarkt zu erleiden, steigt demnach um sechs Prozent bei einer Erhöhung der Belastung um 5.500 Partikel pro cm³.

Auch in der in Europa durchgeführten UFIREG-Studie wurde die Exposition mit ultrafeinen Partikeln an verschiedenen Messpunkten in fünf europäischen Städten untersucht. Die epidemiologischen Analysen wiesen auf ein erhöhtes Risiko für Atemwegserkrankungen durch ultrafeine Partikel hin. Steigt beispielweise die tägliche Anzahl dieser Partikel um Tausend pro Kubikzentimeter am Tag an, erhöht sich das relative Risiko für Krankheiten des Atemsystems um rund zwei Prozent. Diese Ergebnisse waren jedoch unabhängig von der Partikelmasse (Lanzinger et al., 2016). Gleichzeitig wurde aber auch auf weiteren Forschungsbedarf aufmerksam gemacht.

Grigoratos und Martini (2014) fassten in ihrer Literaturlauswertung die bis dahin bekannten gesundheitlichen Effekte von Partikeln, mit Fokus auf Brems- und Reifenpartikel, zusammen. Sie wiesen insbesondere darauf hin, dass viele Studien bestätigten, dass die Partikelgröße ein wichtiger Faktor für die Partikeldeposition im Atmungstrakt darstellt. Während grobe Aerosolpartikel hauptsächlich im oberen Atemtrakt (Nase und Rachen) abgeschieden werden, können UFPs bis tief in die Lunge eindringen. Dort stellen sie eine Gefahr in Bezug auf oxidativen Stress und Entzündungen dar. Dies resultiert aus deren ansteigendem Oberflächenanteil und der höheren Reaktionsrate der erzeugten freien Radikale. Weiterhin können schneller Arterienverkalkungen verursacht werden. Da die Bremsabriebe zu einem erheblichen Anteil aus Partikeln kleiner 100 nm bestehen, werden häufig Bremsabriebe als potentiell gesundheitsschädlich für den Menschen eingestuft. Unabhängig davon gibt es nach Ansicht der Autoren aber derzeit keinen direkten (kausalen) Nachweis.

Da in den letzten Jahren die Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen deutlich zugenommen hat, wurde durch das Umweltbundesamt eine Neubewertung der Evidenzlage durchgeführt und 2018 eine ausführliche Darstellung der aktuellen Studien zur Wirkung von ultrafeinen Partikeln auf die menschliche Gesundheit herausgebracht. In seinem Fazit schreibt das UBA, dass die Erforschung zu Gesundheitseffekten durch UFP in epidemiologischen Studien schnell zunimmt. Dabei wird der Fortschritt der Publikation von ersten Langzeitstudien genannt sowie die Durchführung von Studien beschrieben, bei denen mehrere Luftschadstoffe eine Rolle spielen, damit ein möglicher unabhängiger Effekt von UFP identifiziert werden kann (Mehrschadstoffmodelle mit weiteren Schadstoffen wie PM_{2.5} und NO₂). Es kann jedoch noch keine Aussage getroffen werden, welche Parameter, ob einer oder mehrere, die gesundheitlichen Wirkungen maßgebend beeinflussen. Die Evidenz zu Gesundheitseffekten bleibt weiter nicht eindeutig oder unzureichend. In Verbindung

mit der vorliegenden Anzahl an Studien kann die Unabhängigkeit von UFP-Effekten noch nicht abschließend bewertet werden. Es bedarf weiterer Studien mit der Berücksichtigung anderer Luftschadstoffe, vor allem auch qualitativ hochwertiger Langzeitstudien, um den Langzeiteffekt von UFP untersuchen zu können.

3 UFP- UND BLACK CARBON-MESSUNGEN

3.1 ZUSAMMENFASSUNG

Ultrafeine Partikel und Black Carbon gehören nicht zu den Luftschadstoffen, welche entsprechend der derzeit EU-weit gültigen gesetzlichen Vorgaben erfasst werden müssen. Für die Messung dieser Parameter in der Außenluft existieren keine Richt- oder Grenzwerte und die Messmethoden sind noch nicht abschließend einheitlich harmonisiert. Daher sind solche Messungen nur vereinzelt in Luftgütemessnetzen zu finden. Vor allem aus Forschungsprojekten entstehen derzeit Zeitreihen zu UFP und BC, welche zum Teil auch nur temporären Charakter haben.

Die Normung solcher Messungen befindet sich aktuell in der Entwicklung. Die wichtigsten bereits formulierten Richtlinien sind die Technische Spezifikation CEN/TS 16976:2016 mit dem Titel „Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols“ sowie die CEN/TS 17434:2020 „Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung des atmosphärischen Aerosols mit einem Mobilitätsgrößenspektrometer“. Darin sind die technischen Grundlagen für die Messung der Partikelanzahlkonzentration sowie der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung festgehalten. Für die BC-Konzentration gibt es noch keine Rückführung.

Die Bestimmung der UFP- und BC-Konzentrationen sollten in einer hohen zeitlichen Auflösung stattfinden. Für atmosphärische Messungen eignen sich fünf Minuten für einen Wert. Diese hohe zeitliche Auflösung sollte für die eventuelle Auswertung von Einzelereignissen vorgehalten werden. Für die Auswertung von Langzeitmessungen und der Ermittlung der UFP-Belastung für ein repräsentatives Gebiet und die Integration der Messdaten in die Datenbank von Messnetzen erweisen sich Halb- oder Stundenmittelwerte als sinnvoll.

Messwerte zu UFP und BC werden derzeit vor allem in den Ländermessnetzen von Sachsen und Hessen erfasst. Während in Sachsen UFP-Messungen an verschiedenen Standorten in langen Messreihen vorliegen und zur Überwachung der Luftqualität herangezogen werden, wurden UFP-Messaktivitäten im Land Hessen hauptsächlich in den letzten Jahren im Umfeld des Flughafens Frankfurt etabliert. Auch das Umweltbundesamt betreibt an verschiedenen Messstationen Messgeräte zur UFP-Überwachung. Durch die Initiative des UBA und des TROPOS wurde 2008 das Deutsche Messnetz für ultrafeine Aerosolpartikel (GUAN) etabliert. An insgesamt 16 Messstationen werden seither kontinuierlich Messdaten zu UFP und BC erfasst und dienen als Grundlage für wissenschaftliche Fragestellungen bezüglich Klimawirksamkeit und Gesundheitsaspekten von atmosphärischen Aerosolpartikeln.

3.2 AKTUELLER STAND AUS RICHTLINIEN UND VORSCHRIFTEN

Obwohl es für ultrafeine Partikel und Black Carbon keine Richt- bzw. Grenzwerte gibt, so existieren für deren Messung doch Vorschriften und Richtlinien. Für die Messung der Partikelanzahlkonzentration bildet die Technische Spezifikation CEN/TS 16976:2016 mit dem Titel „Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols“ die Grundlage. Sie beschreibt ein Standardverfahren zur Ermittlung der Partikelanzahlkonzentration in der Außenluft bis zu einem Wert von etwa 10^7 Partikel pro Kubikzentimeter und Mittelungszeiten größer gleich einer Minute. Dabei sind die untere und obere Partikelgröße definiert. Im unteren Bereich liegt sie bei 7 nm, als obere Grenze gelten einige Mikrometer. In dieser Spezifikation werden weiter die Probenahme, der Betrieb, die Datenverarbeitung sowie die Qualitätssicherungsmaßnahmen beschrieben.

Weiterhin existiert die ISO 27891:2015, welche die Durchführung einer gültigen Kalibrierung für Partikelzähler beschreibt. Konkret wird hier ein Verfahren zur Bestimmung der Nachweisempfindlichkeit eines Partikelzählers mit Silberpartikeln für definierte Partikelanzahlkonzentrationen beschrieben.

Für die Partikelanzahlkonzentration gibt es keinen direkten Standard, der als Referenz verwendet werden kann. Mit einem Elektrometer wird eine Referenzanzahlkonzentration bestimmt. Um eine Rückführbarkeit zu erreichen, ergibt sich eine Kalibrierfolge: Das Elektrometer, welches die Referenzkonzentration bestimmen soll, wird gegen eine femto-A-Quelle an einem metrologischen Institut kalibriert. Beispiele für solche Institute sind das National Institute of Standards and Technology (NIST), das National Physical Laboratory (NPL) oder die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Mithilfe der Referenzkonzentration für unterschiedliche Partikeldurchmesser wird ein Referenzpartikelzähler kalibriert und gefolgt von weiteren Prüflingen.

Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung wurde erst kürzlich in der Technischen Spezifikation mit dem Titel CEN/TS 17434 „Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung des atmosphärischen Aerosols mit einem Mobilitätsgrößenspektrometer“ veröffentlicht. Sie beschreibt ein Standardverfahren zur Ermittlung der Partikelanzahlgrößenverteilung in Außenluft für den Größenbereich 10 bis 800 nm mit Gesamtanzahlkonzentrationen bis zu einem Wert von etwa 10^5 Partikel pro Kubikzentimeter und einer Zeitauflösung von einigen Minuten. In dieser Spezifikation werden weiter die Probenahme, der Betrieb, die Datenverarbeitung sowie die Qualitätssicherungsmaßnahmen beschrieben.

Zusätzlich zu diesen Spezifikationen beschreiben die technischen Harmonisierungen nach Wiedensohler et al. (2012) die Anforderungen an die Messung von Partikelgrößenverteilungen mit einem Mobilitätspartikelgrößenspektrometer im ACTRIS-Netzwerk. Weiterhin werden in der Veröffentlichung von Wiedensohler et al. (2018) Kalibrierverfahren und Unsicherheiten für den Betrieb von Partikelgrößenspektrometern erläutert.

Viele Messstationen mit Messtechnik zu UFP und der Anzahlkonzentration arbeiten seit jeher nach diesen Prinzipien.

Für die BC-Konzentration gibt es derzeit noch keine Rückführung.

3.3 ZEITLICHE AGGREGATION

Messgeräte zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung, der Partikelanzahlkonzentration und der äquivalenten Rußmassenkonzentration liefern Daten in hoher zeitlicher Auflösung. Plausibel sind Werte im Bereich von fünf Minuten. Damit befinden sich solche atmosphärischen Messdaten auch außerhalb des Rauschens. Diese hohe zeitliche Auflösung sollte für eventuelle Auswertungen zu Einzelereignissen beibehalten werden. Ein Beispiel einer solchen Datenstruktur von Partikelgrößenverteilungen ist in Abbildung 25 gegeben.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------|---------|----|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 8.916667 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 8.732 | 8.980 | 9.498 | 10.046 | 10.626 | 11.240 | 11.890 | 12.578 | 13.307 | 14.079 | 14.896 | 15.762 | 16.680 | 17.652 | 18.682 | 19.774 | 20.932 | 22.159 |
| 8.916667 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9.000000 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 8.732 | 8.980 | 9.498 | 10.046 | 10.626 | 11.240 | 11.890 | 12.578 | 13.307 | 14.079 | 14.896 | 15.762 | 16.680 | 17.652 | 18.682 | 19.774 | 20.932 | 22.159 |
| 9.000000 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 0.000 | 0.000 | 0.533 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.030 | 0.000 | 0.000 | 0.122 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9.333333 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 8.732 | 8.980 | 9.498 | 10.046 | 10.626 | 11.240 | 11.890 | 12.578 | 13.307 | 14.079 | 14.896 | 15.762 | 16.680 | 17.652 | 18.682 | 19.774 | 20.932 | 22.159 |
| 9.333333 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9.416667 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 8.732 | 8.980 | 9.498 | 10.046 | 10.626 | 11.240 | 11.890 | 12.578 | 13.307 | 14.079 | 14.896 | 15.762 | 16.680 | 17.652 | 18.682 | 19.774 | 20.932 | 22.159 |
| 9.416667 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 2.650 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 258.411 |
| 9.500000 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 8.732 | 8.980 | 9.498 | 10.046 | 10.626 | 11.240 | 11.890 | 12.578 | 13.307 | 14.079 | 14.896 | 15.762 | 16.680 | 17.652 | 18.682 | 19.774 | 20.932 | 22.159 |
| 9.500000 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9.756389 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 8.732 | 8.980 | 9.498 | 10.046 | 10.626 | 11.240 | 11.890 | 12.578 | 13.307 | 14.079 | 14.896 | 15.762 | 16.680 | 17.652 | 18.682 | 19.774 | 20.932 | 22.159 |
| 9.756389 | 293.15 | 1000.00 | 71 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Abb. 25: Beispiel einer Datei mit Rohdaten einer Mobilitätsverteilung (Spalten: Zeit, Temperatur, Druck, Anzahl Bins, Durchmesser und Rohkonzentration fortlaufend).

Für die Übertragung der Daten in Datenbanken können die Messdaten zu UFP und BC zu Halbstunden- oder Stundenmittelwerten aggregiert werden. Dies muss durch programmtechnische Hilfsmittel passieren.

Für spätere Auswertungen und vor allem auch Veröffentlichungen spielen hohe zeitliche Auflösungen nur noch eine untergeordnete Rolle. Für die Darstellung von mittleren Partikelgrößenverteilungen, Zeitreihen der Anzahlkonzentration, Tagesgängen und Wochengängen der Anzahlkonzentrationen bilden Halbstunden- bzw. Stundenmittelwerte eine gute Grundlage. Durch Langzeitmessungen können belastbare Werte auf Stundenbasis verwendet werden und stellen den Bezug zum Verursacher dar.

3.4 QUALITÄTSANFORDERUNGEN/HARMONISIERUNG

In den Technischen Spezifikationen sind Anforderungen zur Qualität von UFP-Messungen sowie zur Harmonisierung von Messgeräten beschrieben. Für Messstationen müssen zudem Qualitätssicherungsmaßnahmen durchgeführt werden, damit einerseits die Messdaten auf einem hohen Niveau erzeugt werden, andererseits auch eine Vergleichbarkeit der Messgeräte untereinander hergestellt werden kann.

Seit der Initiierung von GUAN und der Erhebung von Aerosoldaten lag ein Fokus auf der Harmonisierung von Messinstrumenten. Dies zeigt sich im Einsatz von zumeist baugleichen Messgeräten im bisherigen GUAN-Netzwerk. Bis auf die Partikelgrößenspektrometer an den Stationen Langen

und Mülheim-Styrum werden hierausschließlich Mobilitätsgrößenspektrometer der Bauart TROPOS mit einem erfassten Größenbereich von 10 bis 800 nm eingesetzt. An den beiden genannten anderen GUAN-Stationen wie auch im Ländermessnetz Hessen werden Spektrometer von TSI verwendet, welche einen Bereich von 10 bis 600 nm erfassen.

Nach den Technischen Spezifikationen besitzen alle Messinstrumente Sensoren zur Erfassung von Geräteparametern wie Temperatur, relativer Feuchte und Volumenströmen für den Probenahmestrom. Diese werden neben der Erfassung der größenabhängigen Rohkonzentration ebenfalls in einer separaten Datei gespeichert. Damit auch hier die Vergleichbarkeit unter den Geräten schneller hergestellt werden kann, laufen auf fast allen Messstationen gleiche Softwareprogramme zur Erfassung der Partikelgrößenverteilung.

Weiter werden an allen Messstationen die gleichen Aspekte der Qualitätssicherung eingehalten. So finden für die UBA-Stationen, an den Stationen des Luftgütemessnetzes Sachsen sowie den UFP-Stationen des TROPOS einmal jährlich Vorort-Vergleichsmessungen sowie eine Messung im WCCAP-Labor statt. Dabei werden alle Geräteparameter geprüft und anschließend über einen definierten Vergleichszeitraum die Partikelgrößenverteilungen verglichen. Die Toleranz zwischen Referenz und Prüfling dürfen dabei die Grenzen von plus/minus zehn Prozent nicht übersteigen (Abbildung 26).

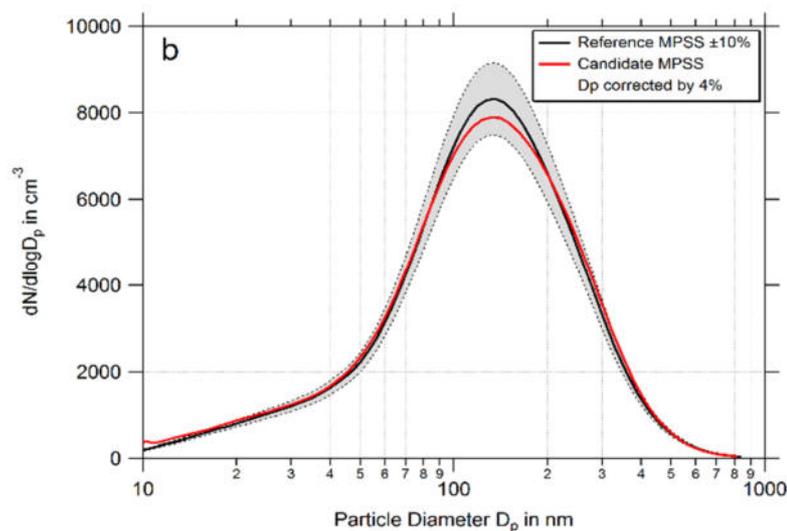


Abb. 26: Vergleich der Partikelgrößenverteilung eines Prüflings gegenüber eines Referenzpartikelgrößenspektrometers.

Hinzu kommen die folgenden Überprüfungen an den Messstationen in regelmäßigen Abständen. Im Stationsbetrieb müssen dann Geräteparameter monatlich überprüft werden. Dies beinhaltet die Kontrolle der relativen Feuchten in den Probenahmestromen. Optimal ist eine relative Feuchte kleiner 40 Prozent. Höhere relative Feuchten führen zu einem Anwachsen der Partikel im Gerät und können die Partikelgrößenverteilung verfälschen.

Damit die relative Feuchte im Gerät nicht über 40 Prozent steigt, werden Messgastrockner zur Trocknung der Probenahmestrome. Diese sind regelmäßig hinsichtlich ihrer Dichtheit zu prüfen.

Weiterhin ist die Prüfung der Volumenströme in den verwendeten Geräten notwendig. So muss der Durchflusswert des Probenahmestromes, des Partikelzählers sowie des Trocknerstromes für Messgas-/Nafiontrockner bestimmt werden.

Hinzu kommt die Prüfung der Dichtheit des Partikelgrößenspektrometers. Dafür wird ein Partikelfilter am Einlass des Gerätes oder idealerweise am Einlasskopf auf dem Containerdach angebracht, um das Nullpunktverhalten zu untersuchen. Weiterhin wird die Einhaltung der erforderlichen Spannungswerte am Klassierer/Differentiellen Mobilitätsanalysator mit einem Multimeter überprüft. Besonders an der unteren Detektionsgrenze wirken sich Verschiebungen in den Spannungen um nur wenige Volt negativ auf die Größenverteilung aus. Als letzter Punkt muss die Größenbestimmung überprüft werden. Dafür werden zertifizierte Partikel der Größe 203 nm (Latexpartikel) verwendet. Diese Latexpartikel werden zerstäubt und dem Partikelgrößenspektrometer zugeführt.

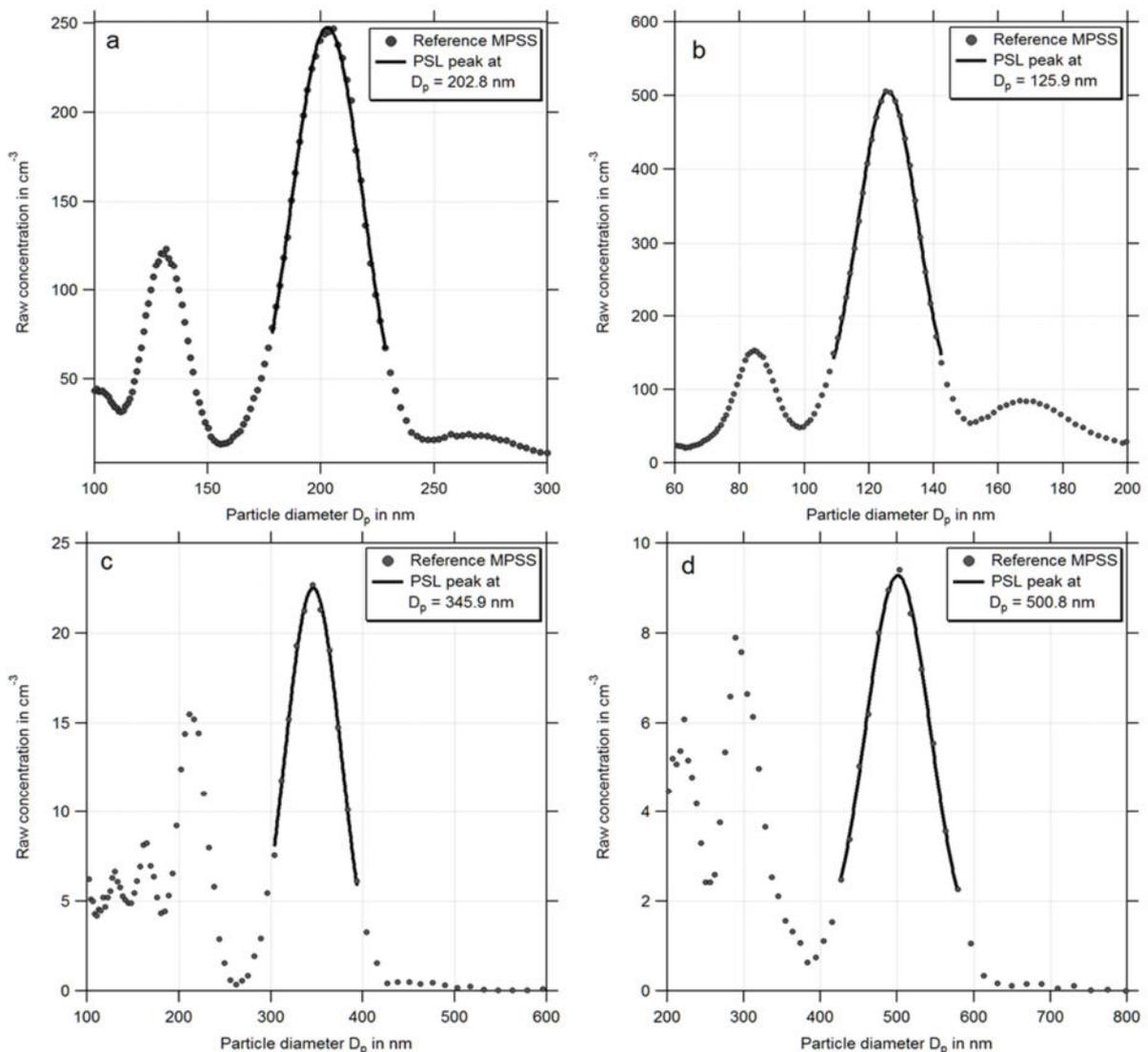


Abb. 27: Kalibrierung eines Partikelgrößenspektrometers mit standardisierten Partikeln: (a) 203 nm; (b) 125 nm; (c) 350 nm; (d) 500 nm (Wiedensohler et al., 2018)

Der im Scan gemessene Peak in der Partikelgrößenverteilung sollte dann die Abweichung von plus/minus drei Prozent nicht übersteigen. Ein Beispiel einer solchen Messung ist in Abbildung 27 dargestellt. Messungen im Labor haben gezeigt, dass bei Einhaltung der Toleranzgrenzen für den Durchmesser 203 nm auch andere Partikeldurchmesser (125 nm, 350 nm und 500 nm) innerhalb der Unsicherheiten liegen.

Durch diese Qualitätsanforderungen an UFP-Messungen kann ein routinemäßiger Netzbetrieb hergestellt werden und eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden. Die erfassten Messdaten müssen dann auf Plausibilität geprüft werden, um Fehlmessungen einzugrenzen oder gar auszuschließen.

3.5 MESSAKTIVITÄTEN IN DER EU UND IN DEUTSCHLAND

Im Rahmen der derzeit gültigen EU-weit gültigen gesetzlichen Regelungen gibt es keine Messverpflichtung bezüglich ultrafeiner Partikel und Ruß (Black Carbon). Dennoch werden in Deutschland in einigen Bundesländern und durch das UBA Aktivitäten zur Messung von UFP und Ruß/Black Carbon mit ähnlichen aber durchaus nicht gleichen Zielstellungen vorangetrieben.

Im Messnetz Sachsen finden in Zusammenarbeit des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) mit dem TROPOS nun mittlerweile schon seit zwanzig Jahren Partikelmessungen statt. Diese Langzeitmessungen begannen nach der Jahrtausendwende mit ersten Projekten zur Erfassung von Partikelgrößenverteilungen an einer verkehrsnahen Messstation in Dresden.

Aus nachfolgenden Projekten, zum Teil durch das LfULG, aber auch aus der Wissenschaft heraus, entstanden weitere Messstationen, welche mitunter noch heute Messdaten erfassen. Sachsen besitzt damit ein sehr dichtes Netz an Messstationen, welche Geräte zur UFP-Bestimmung enthalten. Aber auch hier gibt es Projekte, die zeitlich beschränkt sind und damit auch nur temporär die Messung von Partikelgrößenverteilungen und Black Carbon ermöglichen.

Die Feinstaubproblematik am Großflughafen Frankfurt/Main und die damit verbundenen Aktivitäten von Bürgerinitiativen haben das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) zunächst in Zusammenarbeit mit dem UBA veranlasst, ultrafeine Partikel im Umkreis des Flughafens zu messen. Die ersten Messgeräte gingen 2015 in Betrieb und das Stationsnetz wurde seitdem um mehrere UFP-Messstellen erweitert.

Das Umweltbundesamt überwacht ebenfalls seit geraumer Zeit an verschiedenen Messstellen in Deutschland die Partikelbelastung. Vor allem im ländlichen Hintergrund entstanden Messpunkte, an denen die Erzeugung langer Messreihen zu UFP begann. Ausführliche Informationen dazu werden im folgenden Kapitel gegeben.

Zukünftig wird auch das Bayerische Landesamt für Umwelt weitere UFP-Messungen ins Leben rufen. Langzeitmessungen zu UFP werden schon seit mehreren Jahren in Augsburg durch das Helmholtz-Zentrum München durchgeführt. Die Daten bilden dort die Grundlage für epidemiologische Studien.

In Brandenburg sollen zukünftige Messungen ebenfalls Langzeitcharakter haben. Erste Ansätze zur Messung von UFP sind bereits vorhanden. So wird seit kurzem an zwei Messstationen die Partikelanzahlkonzentration erfasst. Im LfU Brandenburg wird im Gegensatz zu forschenden Einrichtungen das unmittelbare Ziel verfolgt, die UFP-Messungen von Anfang an in die etablierten Routinen des Luftgütemessnetzes einzubinden.

Auf europäischer Ebene werden UFP- und BC Messungen in Forschungsprojekten z.T. auf zeitlich beschränkter Basis durchgeführt. Das Netzwerk ACTRIS ist allerdings ein Beispiel für die Durchführung von Langzeitmessungen zu verschiedenen in-situ Aerosolparametern. So gehören die Daten der Langzeitmessungen aus Melpitz und vom Hohenpeißenberg auch zu diesem Netzwerk. Ein weiteres Beispiel ist die Messstation in Ispra, die vom Joint Research Center der EU betrieben wird. Seit langer Zeit wird dort die Luftverschmutzung durch UFP-Messungen untersucht.

3.6 GUAN – GERMAN ULTRAFINE AEROSOL NETWORK

Im Rahmen des UFOPLAN-Projekts „Erfassung der Zahl feiner und ultrafeiner Partikel in der Außenluft“ wurde zwischen 2008 und 2010 das Deutsche Messnetz für Ultrafeine Aerosolpartikel (GUAN – *German Ultrafine Aerosol Network*), ein kooperativ betriebenes, aber maßgeblich durch das Umweltbundesamt unterstütztes Netzwerk, etabliert (Birmili et al., 2009). Eines der Hauptziele ist die Verbesserung des wissenschaftlichen Verständnisses der aerosolrelevanten Prozesse in der Troposphäre. Somit zielt es speziell auf wissenschaftliche Fragen hinsichtlich klimarelevanter Fragen sowie partikelbedingter Gesundheitseffekte. Das GUAN-Netz ist in seiner umfassenden Charakterisierung ultrafeiner Partikel bisher weltweit einzigartig: Ultrafeine Partikel werden durch physikalische Verfahren an einer Auswahl an Observatorien mikrophysikalisch gemessen und teilweise auch intensiv chemisch charakterisiert. Erste wissenschaftliche Analysen wiesen deutlich andere statistische Merkmale der Konzentrationen ultrafeiner Partikel als die der standardmäßig gemessenen PM₁₀ und PM_{2,5}-Massenkonzentrationen aus. Dies bedeutet, dass die traditionell gemessenen Schadstoffparameter für eine Bewertung der Exposition gegenüber ultrafeinen Partikeln aller Voraussicht nach nicht ausreichen. Diese Erkenntnisse bezüglich der statistischen Entkopplung ultrafeiner Partikel bestätigt auch eine Spanisch-Englisch-Schweizerische Studie (Reche et al., 2011).

Seit der Initiierung des GUAN-Messnetzes wurden klare Zusammenhänge zwischen ultrafeinen Partikeln und bestimmten Quellen (insbesondere Kfz-Verkehr) aufgezeigt und die toxikologischen Bedenken in der chemischen Zusammensetzung ultrafeiner Partikel bestätigt.

Die epidemiologische Nachweislage, von welchem Anteil der in der Außenluft vorkommenden Feinstäube das größte Gesundheitsrisiko ausgeht, ist lückenhaft. Aus Sicht der feinstaubbezogenen Gesundheitsforschung erscheint daher die Schaffung einer integralen Beschreibung des Vorkommens, der Eigenschaften und der Quellen des Ultrafeinstaubes unumgänglich. Aufbauend auf einer einheitlichen experimentellen Datengrundlage, erscheinen für die Zukunft vor allem modellhafte Beschreibungen oder Parametrisierungen der Ultrafeinstaubexposition als vorteilhaft, denn die raumzeitliche Variabilität ultrafeiner Partikel hat sich als so stark erwiesen, dass sie messtechnisch nicht flächenhaft zu erfassen ist. Mit dem Projekt „Erfassung der Zahl feiner und ultrafeiner Partikel in der Außenluft wurden 2008-2010 die ersten experimentellen und logistischen Grundlagen für ein Messnetz (GUAN) geschaffen.

Trotz einzigartiger raum-zeitlicher Abdeckung und Datenqualität waren diese Zeitreihen auf anfangs 3 Jahre begrenzt. Zur Verstetigung der räumlichen und saisonalen Trends und zur Ermittlung von Langzeittrends erfolgte dann eine zeitliche Ausdehnung der Datenbasis für drei weitere Jahre. Mit dem Nachfolgeprojekt „Trendanalysen gesundheitsgefährdender Fein- und Ultrafeinstaubfraktionen unter Nutzung der im German Ultrafine Aerosol Network (GUAN) ermittelten Immissionsdaten durch Fortführung und Interpretation der Messreihen“ (2011-2014) konnten die gesammelten Zeitreihen physikalischer und chemischer Aerosolparameter auf kleinskalige und großskalige Variabilitäten sowie die Zusammenhänge zu traditionellen Luftschadstoffparametern untersucht werden. (Sun et al. 2019)

Mit der Fortführung der atmosphärischen Partikelmessungen konnte einerseits das GUAN-Netzwerk stabilisiert und andererseits die gesammelten Daten in gezielter Weise im Hinblick auf eine mögliche Entwicklung von Grenzwertkriterien für ultrafeine Partikel ausgewertet werden. Zudem erfolgte die Optimierung der Aerosolparameter hinsichtlich:

- Harmonisierung von Instrumenten
- Tauglichkeit für den routinemäßigen Netzbetrieb
- Erreichbare Messgenauigkeit
- Eignung als Messparameter für zukünftige epidemiologische Studien
- Fortführung und Verbesserung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
- Datenvalidierung
- Trendanalysen (Wirkung von Minderungsmaßnahmen)

Eines der wichtigsten Ziele war und ist die quantitative Untersuchung der Messstellen im GUAN-Netz bezüglich der Repräsentativität ihrer Aerosolmessdaten. Dies betrifft die geographische Situation der Quellen in unmittelbarer Umgebung sowie die kleinskalige als auch großskalige Variabilität der ultrafeinen Partikel (Sun et al., 2019). Durch eine Analyse der Korrelationsmatrizen zwischen ultrafeinen Partikeln, Ruß, PM-Massenkonzentrationen und anderen Schadstoffparametern konnte eine Trennung der verschiedenen Quellbeiträge ultrafeiner Partikel ermöglicht werden. Ein weiteres Ziel liegt in der Ermittlung von Szenarien (Messstellen, Jahreszeiten, Tageszeiten), in denen die Konzentration ultrafeiner Partikel durch Parametrisierungen möglicherweise statistisch

vorhersagbar gemacht wird. Schließlich sollen unter Berücksichtigung der Kenntnisse zur gesundheitlichen Wirkung Szenarien für mögliche Grenzwertkriterien entwickelt werden.

Das deutsche Messnetz für Aerosolpartikel (GUAN) besteht bzw. bestand aus 17 deutschen atmosphärischen Messstationen (wissenschaftliche Institutionen und Behörden), welche seit 2009, einzelne Stationen wie Melpitz und Dresden-Nord auch länger, kontinuierlich Messdaten sammeln (Birmili et al. 2015, 2016; Sun et al. 2019). Im Gegensatz zu anderen Netzwerken in Europa oder weltweit zeichnet es sich durch seine hohe räumliche Verfügbarkeit an Messinstrumenten zur Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung (PNSD) sowie zur Bestimmung der Massenkonzentration an Rußpartikeln aus (Abbildung 28 und Tabelle 2). Diese Messdaten bilden das Herzstück von GUAN und werden derzeit für beschreibende Atmosphärenstudien sowie zur Validierung von Ausbreitung- und Vorhersagemodellen genutzt. Die Daten stellen auch einen Prüfstein für eine mögliche Regulierung ultrafeiner Partikel oder Ruß im Rahmen von Revisionen der EU-Luftreinhaltelinie dar.

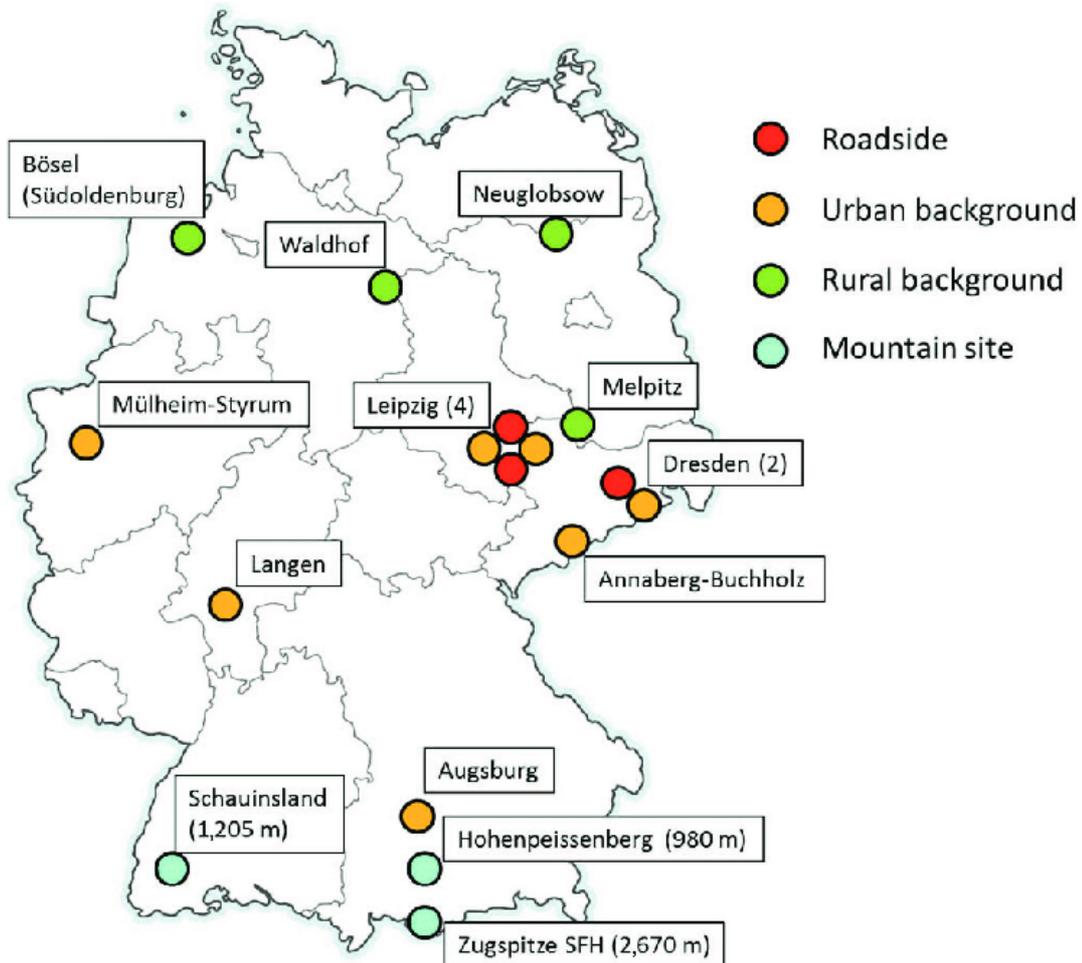


Abb. 28: Atmosphärische Messstationen im German Ultrafine Aerosol Network (GUAN).

Gemessen wird an Stationen unterschiedlichster Kategorien von städtisch straßennah bis hin zur hochalpinen Messstation. Detaillierte Angaben zur Kategorie und zur Höhe können Tabelle 2 entnommen werden. Die im GUAN-Netzwerk beteiligten Institutionen sind der Deutsche Wetterdienst mit dem Observatorium am Hohenpeißenberg, das Staatliche Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim mit der bis 2014 betriebenen Station Bösel, das Helmholtz-Zentrum München sowie die Universität Augsburg mit der Messstation Augsburg, das Institut für Energie- und Umwelttechnik Duisburg sowie das Landesamt für Umwelt, Natur und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen mit der Station Mühlheim-Styrum, das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie mit den Messstationen Dresden-Nord, Dresden-Winckelmannstraße, Leipzig-Mitte, Leipzig-West (bis Ende 2016) und Annaberg-Buchholz, das Leibniz-Institut für Troposphärenforschung mit Leipzig-TROPOS, Leipzig-Eisenbahnstraße und Melpitz sowie das Umweltbundesamt mit den Messstellen Langen, Zugspitze, Schauinsland, Waldhof und Neuglobsow.

Tab. 2: Messstationen im GUAN-Netzwerk

| Station | Status | Kategorie | Höhe |
|-------------------------|---------------|------------------------|--------|
| Annaberg-Buchholz | in Betrieb | urbaner Hintergrund | 545 m |
| Augsburg | in Betrieb | urbaner Hintergrund | 485 m |
| Bösel | bis Ende 2014 | urbaner Hintergrund | 17 m |
| Dresden-Nord | in Betrieb | urban, straßennah | 116 m |
| DD-Winckelmannstr. | in Betrieb | urbaner Hintergrund | 120 m |
| Hohenpeißenberg | in Betrieb | Mittelgebirge | 980 m |
| Langen | in Betrieb | urbaner Hintergrund | 130 m |
| Leipzig-Eisenbahnstraße | in Betrieb | urban, straßennah | 120 m |
| Leipzig-Mitte | in Betrieb | urban, straßennah | 111 m |
| Leipzig-TROPOS | in Betrieb | urbaner Hintergrund | 126 m |
| Leipzig-West | bis Ende 2016 | urbaner Hintergrund | 122 m |
| Melpitz | in Betrieb | regionaler Hintergrund | 86 m |
| Mühlheim-Styrum | in Betrieb | urbaner Hintergrund | 37 m |
| Neuglobsow | in Betrieb | regionaler Hintergrund | 70 m |
| Schauinsland | in Betrieb | Mittelgebirge | 1205 m |
| Waldhof | in Betrieb | regionaler Hintergrund | 75 m |
| Zugspitze | in Betrieb | Hochgebirge/Alpen | 2670 m |

Die in Tabelle 2 beschriebenen Kategorien lassen sich wie folgt charakterisieren. Urbane, straßennahe Messpunkte sind am Straßenrand oder in einer Straßenschlucht positioniert. Die Distanz zwischen Messpunkt und Straße beträgt dabei weniger als 10 m und die Partikelgrößenverteilung sowie die Partikelanzahlkonzentration werden maßgeblich durch den Verkehr bestimmt. Im urbanen Hintergrund gelegene Messstationen können sich beispielsweise in Parkanlagen, auf Hochschulanlagen, in Wohngebieten oder in verkehrsberuhigten Zonen befinden. Dabei sind die Schadstoffe in der Umgebungsluft gut durchmischt, sodass ihre Konzentration nicht durch einzelne Quellen beeinflusst wird. Messorte im regionalen Hintergrund sind durch Umgebungen wie naturbelassene Areale, Wälder, Felder und kleineren Ortschaften mit keinerlei Industrieinfluss sowie ganz geringem Verkehr gekennzeichnet. Zwischen 1000 und 1500 m vertikaler Höhe befinden sich die Messstationen im Mittelgebirge. Diese können je nach Wetterlage und Höhe der Inversionsschicht entweder die örtlichen Luftverschmutzungen oder die Charakteristik einer Luftmasse widerspiegeln. Luftgütemessstationen in Höhen über 2000 m (hochalpin) haben die Besonderheit, dass sie sich in der freien Troposphäre befinden. Damit können Partikel der vorherrschenden Luftmasse gemessen werden.

Das GUAN-Netzwerk zeichnet sich durch seine hohe räumliche Dichte an Messstationen zur wissenschaftlichen Erfassung von UFP sowie BC aus. Durch diese Vielzahl an Messstationen bildet es aber nicht nur ein eigenes Netzwerk, sondern trägt auch zu anderen, teilweise weltweiten Netzwerken bei (Tabelle 3).

Im Netzwerk der World Meteorological Organization (WMO) und des Global Atmospheric Watch (GAW) finden sich die Messstationen Hohenpeißenberg und Zugspitze/Schneefernerhaus als Globalstation für den atmosphärischen Hintergrund wieder. Auch die Regionalstationen mit dem ländlichen Hintergrund Leipzig-TROPOS, Melpitz, Neuglobsow, Schauinsland und Waldhof sind im GAW vertreten.

Tab. 3: Verbindung des GUAN-Netzwerkes zu anderen Luftqualitätsnetzwerken und Infrastrukturen

| Messstation GUAN-Netzwerk | WMO-GAW | EMEP | UBA | ACTRIS | Luftgüte Sachsen |
|------------------------------|-----------------|------|-----|--------|------------------|
| Annaberg-Buchholz | | | | | X |
| Augsburg | | | | | |
| Bösel (Südoldenburg) | Regionalstation | | | | |
| Dresden-Nord | | | | | X |
| Dresden-Winckelmannstraße | | | | | X |
| Hohenpeißenberg | Globalstation | X | | X | |
| Langen | | | X | | |
| Leipzig-Eisenbahnstraße | | | | | |
| Leipzig-Mitte | | | | | X |
| Leipzig-TROPOS | Regionalstation | | | | |
| Leipzig-West | | | | | X |
| Melpitz | Regionalstation | X | | X | |
| Mühlheim-Styrum | | | | | |
| Neuglobsow | Regionalstation | X | X | | |
| Schauinsland | Regionalstation | X | X | | |
| Waldhof | Regionalstation | X | X | | |
| Zugspitze (Schneefernerhaus) | Globalstation | | X | | |

Zum „European Monitoring and Evaluation Programme“ gehören ebenso die Hintergrundstationen Melpitz, Neuglobsow, Schauinsland und Waldhof sowie die Gebirgsstation Hohenpeißenberg. In der Infrastruktur ACTRIS (Aerosols, Clouds and Trace Gases Research InfraStructure) auf europäischer Ebene werden auch die Regionalstation Melpitz sowie die Globalstation Hohenpeißenberg zugeordnet. Zum Netzwerk des Umweltbundesamtes gehören die Stationen Langen, Neuglobsow, Schauinsland, Waldhof und Zugspitze. Doch auch auf kleinerer Ebene zählen einige Stationen zu einem separaten Netzwerk. So gehören die Stationen Annaberg-Buchholz, Dresden-Nord und Dresden-Winckelmannstraße, Leipzig-Mitte sowie bis Ende 2016 Leipzig West zum Luftgütemessnetz Sachsen, welches durch das LfULG betrieben wird.

4 AKTUELLER STAND DER MESSTECHNIK

4.1 ZUSAMMENFASSUNG

Zur Erfassung von UFP und BC werden Mobilitätsspektrometer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung sowie Mehrwinkel-Absorptionsphotometer zur Bestimmung von Black Carbon mittels optischer Methoden genutzt. Nach den Richtlinien der Technischen Spezifikation nach CEN (CEN/TS 17434) müssen Partikelgrößenspektrometer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Außenluft den Größenbereich zwischen 10 und 800 nm abdecken. Zudem sind weitere technische Harmonisierungen zu beachten. Dies betrifft zum Beispiel die Trocknung der Probenmeströme auf relative Feuchten kleiner 40 Prozent im Messgerät. Ihre zeitliche Auflösung beträgt nach derzeitigem Stand wenige Minuten für eine komplette Größenverteilung. Verschiedene Maßnahmen zur Qualitätssicherung spielen eine weitere wichtige Rolle.

Dabei kann es hilfreich sein, zusätzlich die Gesamtanzahlkonzentration mit einem Partikelzähler parallel zum Größenspektrometer zu erfassen. Dieser deckt ebenfalls den Partikelgrößenbereich zwischen 10 und etwa 2 μm in der Erfassung ab und sollte nach der Vorschrift CEN/TS 16976 betrieben werden. Im Vergleich zur Partikelgrößenverteilung können mit dieser Bestimmung der Konzentration in Außenluft keine zusätzlichen Informationen zu Partikelgröße und eventuellen Rückschlüssen auf Partikelquellen gezogen werden. Außerdem lassen sich berechenbare Werte zur Partikelmasse, dem Volumen oder der Oberfläche nicht abschätzen. Zeitlich lassen sich mit Partikelzählern hoch aufgelöste Messungen durchführen, allerdings sind für atmosphärische Messungen Mittelungsintervalle analog zu den Größenverteilungen oder gar Halb- bzw. Stundenmittelwerte für Datenbanken sinnvoll.

Eine weitere wichtige Erfassungsgröße bezüglich ultrafeiner Partikel ist eine äquivalente Rußmassenkonzentration. In Abhängigkeit vom betrachteten Messverfahren werden verschiedene Rußparameter bestimmt. In Verbindung mit der Partikelgrößenverteilung ist die Bestimmung der Rußmasse aus optischen Messmethoden am sinnvollsten. Dabei wird der Absorptionskoeffizient durch die Transmission von Licht bei einer Wellenlänge (z. B. 670 nm beim MAAP) an einer Aerosolprobe auf Glasfaserfiltern und der Reflektion bei mehreren Rückstreuwinkeln bestimmt. Neuere Messtechniken können dies für mehrere Wellenlängen durchführen. Durch ihre hohe zeitliche Auflösung eignen sie sich bestens für Rußmessungen in Messnetzen, für Verkehrsmessungen, aber auch anderen Aerosolstudien.

4.2 MESSTECHNIK ZUR BESTIMMUNG DER ANZAHLKONZENTRATION

Die Messung der Gesamtpartikelanzahlkonzentration kann direkt mit einem Kondensationspartikelzähler (Condensation Particle Counter, CPC) erfolgen. Das Prinzip ist in Abbildung 29 dargestellt. Das Aerosol wird im ersten Schritt im Sättiger mit Butanol-Dampf gesättigt. Die meisten CPC's arbeiten mit Alkoholen, beispielsweise n-Butanol als Arbeitsflüssigkeit, inzwischen gibt es jedoch auch Modelle, welche mit Wasser arbeiten. Allerdings muss deren Langzeitstabilität noch getestet werden und die Funktionsweise ist etwas anders. In einem zweiten Schritt wird das butanol-gesättigte Aerosol in eine gekühlte Kondensationsstrecke geleitet. Durch Abkühlung tritt eine Übersättigung auf und die Partikel wachsen in optisch erfassbare Tropfen von einigen Mikrometern auf und können dann im dritten Schritt mittels einer Streulichtmessung gezählt werden. Namhafte Hersteller von Kondensationspartikelzählern sind TSI, Grimm und Palas.

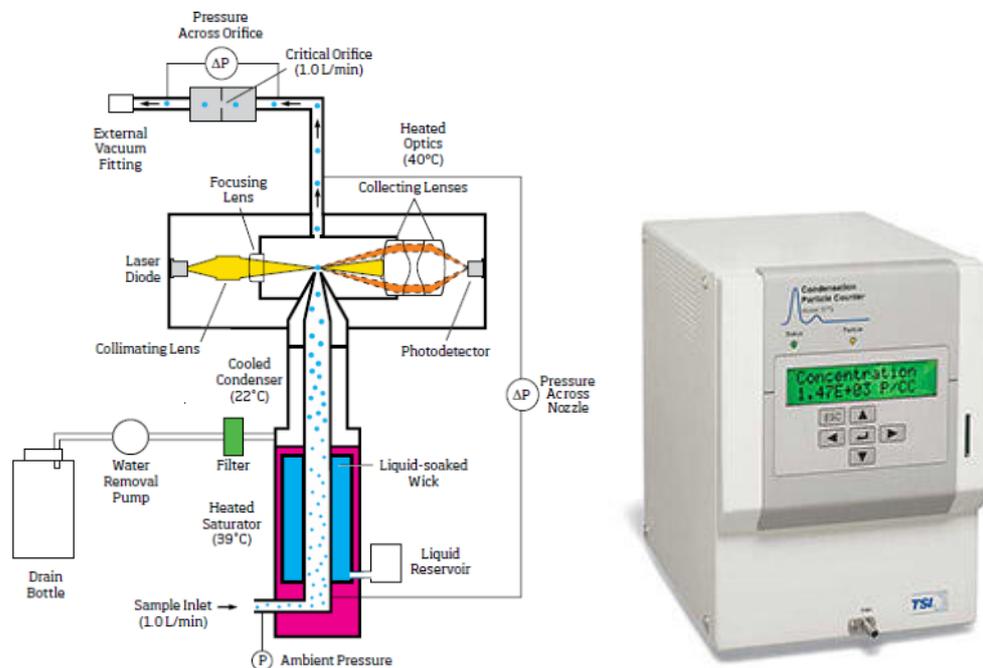


Abb. 29: Schema der Arbeitsweise eines Kondensationspartikelzählers (links) sowie ein Beispiel der Firma TSI, Modell 3772.

Für Kondensationspartikelzähler gibt es bereits internationale Normungen. So wurde durch das Technische Komitee CEN/TC 264 „Luftbeschaffenheit“ die technische Spezifikation CEN/TS 16976:2016 erarbeitet. Sie trägt den Titel „Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols“. Sie beschreibt ein Standardverfahren zur Ermittlung der Partikelanzahlkonzentration in Außenluft bis zu einem Wert von etwa 10^7 Partikel pro Kubikzentimeter und Mittelungszeiten größer gleich 1 Minute. Dabei sind die untere und obere Partikelgröße definiert. Sie liegt bei 7 nm im unteren Bereich und einigen Mikrometern als obere Grenze. Weiter werden in dieser Norm die Probenahme, der Betrieb, die Datenverarbeitung sowie die Qualitätssicherungsmaßnahmen beschrieben. Zudem existiert für Kondensationspartikelzähler die ISO 27891:2015. Darin enthalten ist das Verfahren zur Bestimmung der Nachweisempfindlichkeit eines

Zählers mit Silberpartikeln für definierte Partikelanzahlkonzentrationen. Es beschreibt also die Durchführung einer gültigen Kalibrierung für Partikelzähler.

Die durch das LfU beschaffte Messtechnik der Firma Grimm Aerosol Technik GmbH beinhaltet zwei Partikelzähler des Modells 5420 zur Messung der Gesamtpartikelanzahlkonzentration. Solche Geräte haben auch schon in der Vergangenheit an Kalibrierworkshops im WCCAP des TROPOS Leipzig teilgenommen. Bei diesen Messungen wurde die Zähleffizienzkurve bestimmt. Ein Beispiel ist in Abbildung 30 gezeigt.

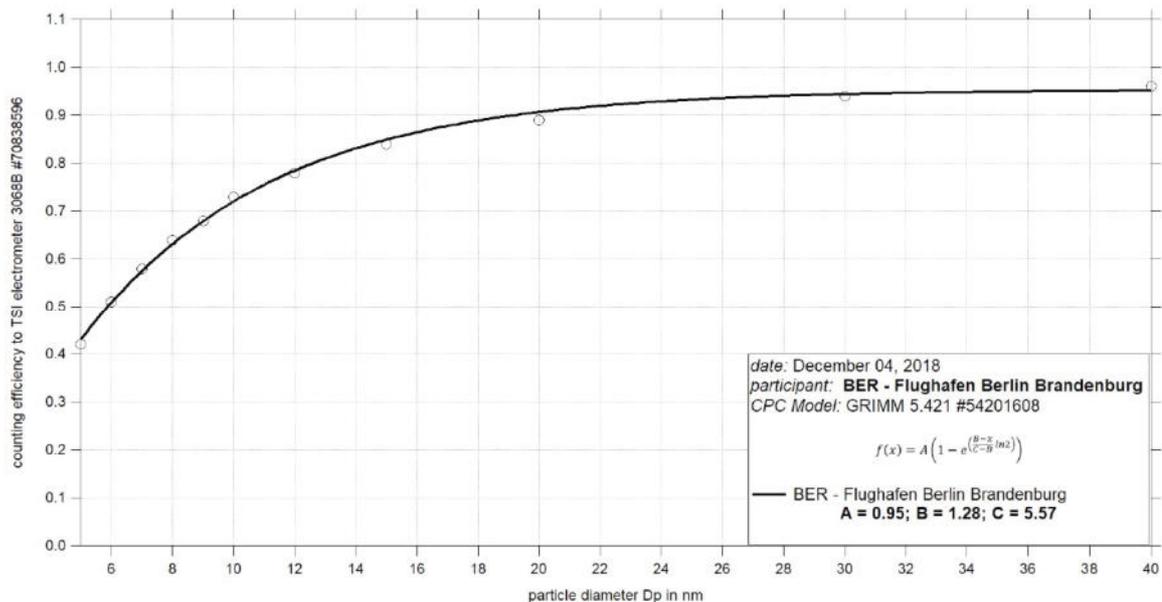


Abb. 30: Zähleffizienzkurve für einen Partikelzähler der Firma Grimm im Vergleich zum Elektrometer, für die Kalibrierung wurden Silberpartikel zwischen 5 und 40 nm verwendet.

Hierbei wurde eine Zähleffizienz für Silberpartikel der Größe 40 nm von 0.95 erreicht, was einer Differenz von 5 Prozent zum Sollwert entspricht. Die untere 50%-Nachweisgrenze liegt bei 5.6 nm deutlich unter den Werten anderer Partikelzählermodelle. Damit eignen sich diese Messinstrumente zur Erfassung der Gesamtanzahlkonzentration. Dies entspricht allerdings nicht der CEN-TS, die 2020 in eine EU-Norm überführt wurde.

Für eine generelle Darstellung der Partikelbelastung an verschiedenen Messpunkten kann mit diesen Grimm-Geräten zuverlässig gearbeitet werden. Sie sind schnell und unkompliziert zu installieren und können im Vergleich zu Mobilitätsgrößenspektrometern in höherer Zeitauflösung gefahren werden. Allerdings enthält die ausgegebene Partikelanzahlkonzentration keinerlei Information über die Partikelgröße und über mögliche Quellen. Eine Gesamtanzahlkonzentration von zum Beispiel 5.000 Partikel pro Kubikzentimeter kann durch sehr kleine Partikel hervorgerufen werden, wenn sich das Maximum der Größenverteilung bei etwa 20 bis 30 nm befindet. Ebenso kann dieser Wert auch im Winter erreicht werden, wenn für stagnierende Ostwetterlagen verschmutzte Luftmassen herantransportiert werden und das Maximum in der Partikelgrößenverteilung bei 60 bis 80 nm liegt.

4.3 MESSTECHNIK ZUR BESTIMMUNG DER PARTIKELGRÖßENVERTEILUNG

Nach dem Entwurf der CEN-Technischen Spezifikation 17434 (Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung des atmosphärischen Aerosols mit einem Mobilitätspartikelgrößenpektrometer) sowie den Veröffentlichungen von Wiedensohler et al. (2012 und 2018), kann ein Mobilitätspartikelgrößenpektrometer dafür verwendet werden, um die Partikelanzahlgrößenverteilung kontinuierlich zu erfassen. In GUAN werden Mobilitätsgrößenpektrometer mit einem Messbereich von etwa 10 nm bis hin zu 800 nm eingesetzt. Diese sind kommerziell von unterschiedlichen Firmen, aber auch von TROPOS als wissenschaftlicher Institution verfügbar. Dieser Größenbereich ist ebenfalls im Entwurf der momentan vorliegenden CEN-TS vorgegeben. So ist beispielsweise der Großteil der GUAN-Messstationen mit einem TROPOS – Mobility Particle Size Spectrometer (MPSS) ausgestattet. Das Messprinzip eines solchen MPSS basiert auf der physikalischen Eigenschaft der elektrischen Mobilität von Aerosolpartikeln (Abbildung 31).

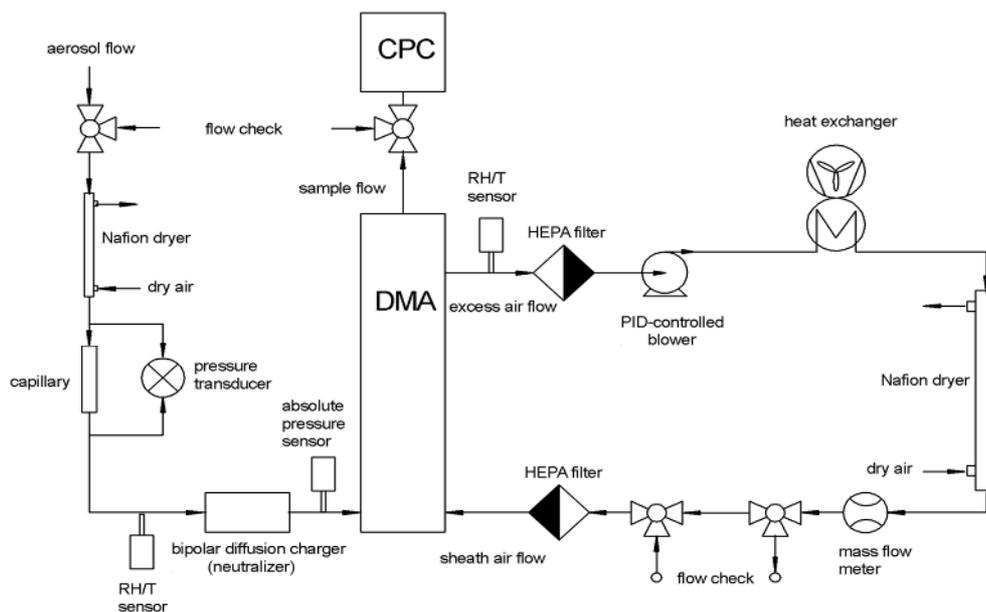


Abb. 31: Schema der Arbeitsweise eines Mobilitäts-Partikelgrößenpektrometers.

Die Partikel werden in einem bipolaren Diffusionsauflader in ein elektrisches Ladungsgleichgewicht gebracht. Häufig werden dafür Krypton85-Quellen mit einer Stärke von 370 MBq oder neuerdings auch Nickel63 mit einer Stärke von 100 MBq verwendet. Anschließend werden die Partikel im differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA) in einem elektrischen Feld nach ihrer elektrischen Mobilität klassiert und einem Kondensationspartikelzähler (CPC) zugeführt. Dort werden sie letztendlich gezählt. Mithilfe einer Ladungsinversionsroutine kann aus der gemessenen Mobilitätsverteilung eine Partikelanzahlgrößenverteilung bestimmt werden. Die Abbildung 32 zeigt ein Mobilitätsgrößenpektrometer vom Typ TROPOS.



Abb. 32: TROPOS - Mobilitätspartikelgrößenpektrometer.

Der Vorteil der Messung der Partikelanzahlgrößenverteilung liegt in der partikelgrößenabhängigen Konzentrationsbestimmung. Damit können mehr Informationen und Schlussfolgerungen zur Herkunft der Partikel entnommen werden im Vergleich zu einer reinen Partikelanzahlkonzentration-Messung. Die Partikelanzahlkonzentration wird hier aus dem Integral der Größenverteilung berechnet. Oberflächen-, Volumen- und Massenkonzentration sind ebenso einfach berechenbar. Durch die bessere Interpretation der Daten kann schneller auf Quellen von UFPs geschlossen werden. Zudem können die Verteilungen verschiedener Messstationen verglichen und die Partikelbelastung besser untersucht werden.

Die Tabelle 4 gibt einen Überblick zu den in GUAN eingesetzten Messtechniken hinsichtlich der Partikelgrößenverteilungen und des damit erfassten Größenbereiches sowie der Partikelanzahlkonzentration.

Tab. 4: Eingesetzte Messtechnik sowie erfasster Größenbereich an den einzelnen Messstationen in GUAN.

| Nr. | Stationsname | Partikelgrößenverteilung | Messtechnik | Größenbereich | Gesamtanzahlkonzentration |
|-----|------------------------------|--------------------------|-------------|---------------|---------------------------|
| 1 | Annaberg-Buchholz | x | MPSS | 10-800 nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 2 | Augsburg | x | TDMPSS | 5-800 nm | x |
| 3 | Bösel | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 4 | Dresden-Nord | x | TDMPSS | 5-800 nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 5 | Dresden-Winckelmannstr. | x | MPSS | 10-800 nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 6 | Hohenpeißenberg | x | MPSS | 10-800 nm | x |
| 7 | Langen | x | MPSS | 10-600 nm | x |
| 8 | Leipzig-Eisenbahnstraße | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 9 | Leipzig-Mitte | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 10 | Leipzig-Tropos | x | TDMPSS | 5-800 nm | |
| 11 | Leipzig-West | x | TDMPSS | 5-800 nm | |
| 12 | Melpitz | x | TDMPSS | 5-800 nm | |
| 13 | Mülheim-Styrum | x | MPSS | 14-750 nm | |
| 14 | Neuglobsow | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 15 | Schauinsland | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 16 | Waldhof | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 17 | Zugspitze (Schneefernerhaus) | x | MPSS | 10-600 nm | x |

Damit die Erfassung der Partikelgrößenverteilung für alle Messstationen gleichermaßen erfolgt, sollten die Partikelgrößenspektrometer den technischen Standards nach Wiedensohler et al. (2012) folgen. Dort ist beispielsweise festgehalten, dass alle Partikelgrößenverteilungen im trockenen Zustand gemessen werden sollten. Mithilfe von Messgastrocknern sowohl im Probenahmestrom als auch in der Schleierluft wird damit die relative Feuchte unter 40 Prozent gehalten. Dies ist einerseits wichtig, damit die unterschiedlichen Messstationen vergleichbar bleiben. Andererseits wachsen Partikel bei relativen Feuchten von über 40 Prozent an und verändern damit auch die Partikelgrößenverteilung.

Im Projekt AEROMET werden Methoden zur Rückführbarkeit und Kalibrierung von Aerosolmessinstrumenten entwickelt. Besonders Kalibrierverfahren für Mobilitätsgrößenspektrometer sollen dabei in einer Normung festgehalten werden.

Die Abbildung 33 zeigt ein Schema der Rückführbarkeit von Aerosolmessungen auf die Grundeinheiten. Für die Partikelanzahlkonzentration gibt es keinen direkten Standard. Die Referenzkonzentration wird durch ein kalibriertes Elektrometer bestimmt, welches im Vorfeld gegen eine femto-A-Quelle an einem metrologischen Institut (zum Beispiel PTB Braunschweig) kalibriert wurde. Damit wird dann ein Referenzpartikelzähler kalibriert, welcher im Nachgang zusammen mit dem Elektrometer für Kalibrierungen von weiteren Prüflingen verwendet wird. Der Referenzpartikelzähler wird zudem im Referenz-Partikelgrößenspektrometer verwendet, mit welchem dann Vergleichsmessungen mit anderen Größenspektrometern stattfinden. Wichtig ist zum einen eine regelmäßige Prüfung und Kalibrierung von eingesetzten Geräten, andererseits jedoch auch die ständige Überprüfung und das Sicherstellen der Referenzinstrumente. In der Europäischen Forschungsinfrastruktur ACTRIS werden die TROPOS-MPSS als Referenz verwendet.

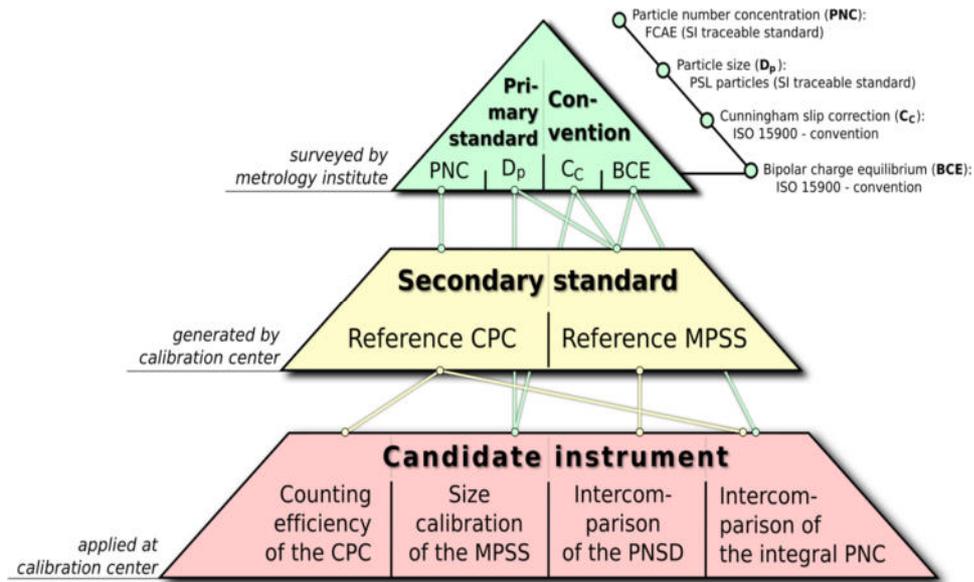


Abb. 33: Rückführbarkeit von Aerosolmessungen auf Grundeinheiten.

4.4 MESSUNG VON NICHT-FLÜCHTIGEN BESTANDTEILEN DER UFP

Um die nichtflüchtigen Bestandteile von UFP zu bestimmen, können Thermodenuder eingesetzt werden. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 34 dargestellt (Wehner et al., 2002). Das Proben-aerosol wird vor dem Partikelgrößenspektrometer alternierend bei jeder zweiten Messung mit dem Thermodenuder bei 300°C konditioniert (Verteilungsweg B in Abbildung 35).

Die Konditionierung bei 300°C im Thermodenuder entfernt eine Großzahl der chemischen Partikelinhaltsstoffe. Für den Partikelgrößensbereich kleiner 1 μm bleiben dann vor allem rußartige Bestandteile zurück (Burtscher, 2001). Durch den alternierenden Messvorgang mit/ohne Thermodenuder reduziert sich zwar die Zeitauflösung der Partikelgrößenspektromettermessungen auf die Hälfte, es werden jedoch Informationen über den nichtflüchtigen Partikelanteil im sub- μm -Bereich gewonnen.

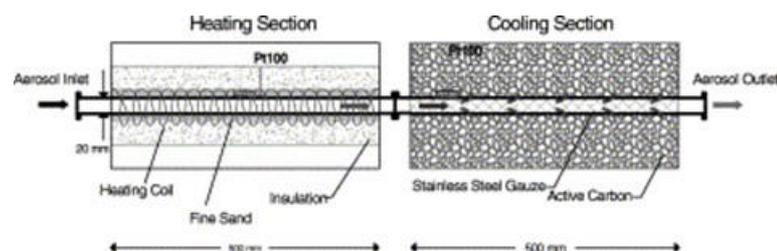


Abb. 34: Aufbau eines Thermodenuders nach Wehner et al., 2002.

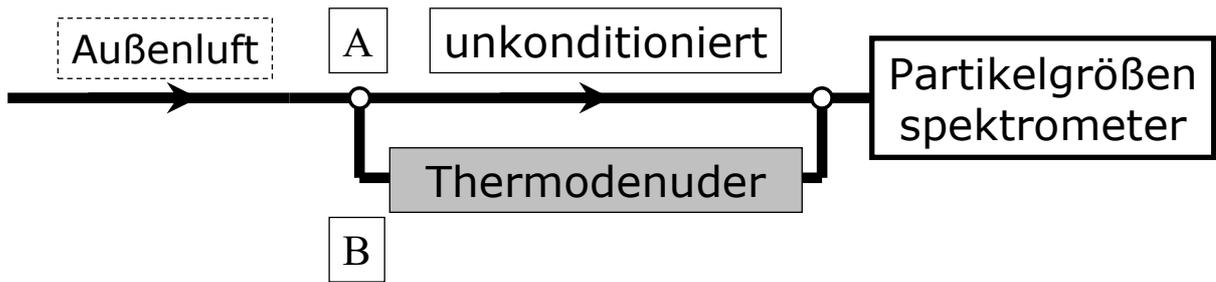


Abb. 35: Kopplung von Thermodenuder und Partikelgrößenpektrometer. Lange Messreihen liefern Informationen über die nichtflüchtigen Anteile des Fein- und Ultrafeinstaubes.

Ein Vergleich solcher Partikelgrößenverteilungen mit und ohne Thermodenuder ist in Abbildung 36 dargestellt. Es zeigt sich das deutliche Schrumpfen der Partikel zu geringeren Durchmessern nach Durchlaufen der konditionierten Heizstrecke und den damit verdampfenden flüchtigen Aerosolbestandteilen. Es bleiben nichtflüchtige Bestandteile zurück, welche oberhalb von 50 nm vornehmlich aus Ruß bestehen.

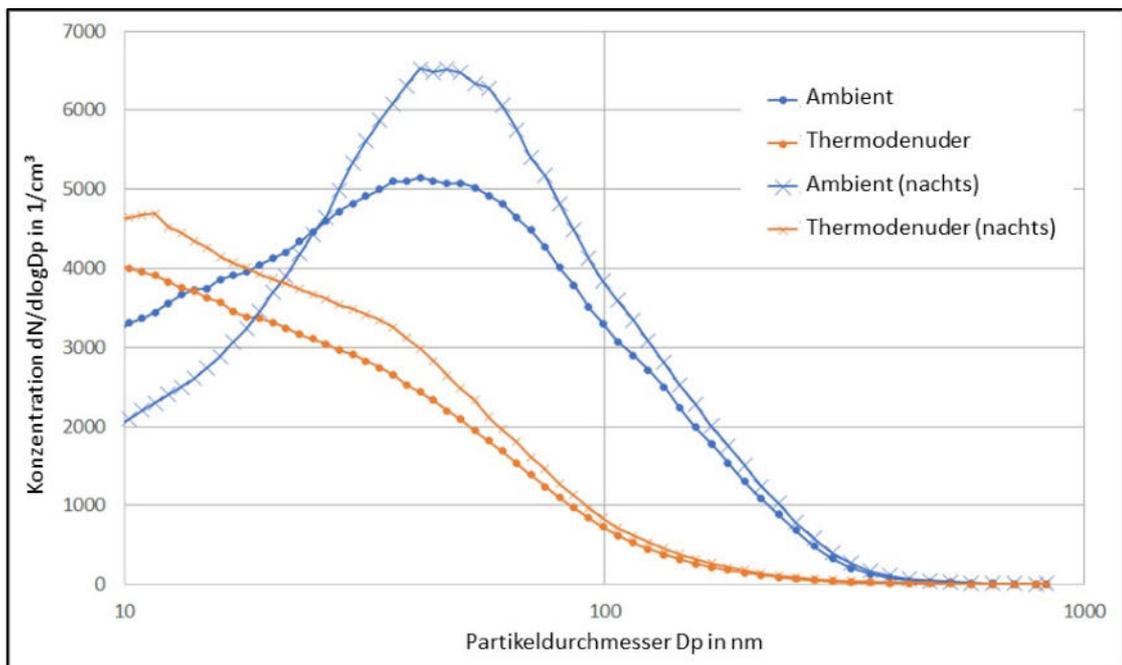


Abb. 36: Vergleich von Partikelgrößenverteilungsmessungen mit und ohne Thermodenuder. Ein deutliches Schrumpfen der Partikel zu geringeren Durchmessern ist zu erkennen.

4.5 MESSTECHNIK ZUR BESTIMMUNG DER ÄQUIVALENTEN RUßMASSENKONZENTRATION (EBC)

Die Bestimmung der äquivalenten Rußmassenkonzentration (eBC) erfolgt durch die Messung des Absorptionskoeffizienten durch ein optisches Verfahren. Hierbei handelt es sich nicht um Filtermessungen von organisch gebundenem Kohlenstoff (OC) und elementarem Kohlenstoff (EC), deren Konzentrationen aus chemischen Verfahren bestimmt werden. Vielmehr werden hier die optischen Eigenschaften untersucht. Die Äquivalenzmessungen haben den Vorteil, dass Messwerte sofort verfügbar sind und dienen so Aerosolstudien in Hinblick auf Lichtabsorption, Atmosphärische Optik, Strahlungstransport, Emissionen und besonders der Quellenzuordnung. Ebenso wird dabei eine sehr hohe zeitliche Auflösung erzielt. Die Ergebnisse sind jedoch nicht unmittelbar mit denen der OC/EC-Messungen zu vergleichen.

An vielen UFP-Messstationen, vor allem in GUAN, werden Mehrwinkelabsorptionsphotometer (MAAP, Modell 5012) standardmäßig benutzt. Dieses Gerät stellte lange Zeit den neuesten Stand der artefaktfreien Messung des Aerosolabsorptionskoeffizienten dar (Petzold und Schönlinner, 2004). Es misst die Transmission von Licht der Wellenlänge 670 nm an einer Aerosolprobe auf Glasfaserfiltern sowie die Reflektion bei mehreren Rückstreuwinkeln (Abbildung 37). Der Aerosolabsorptionskoeffizient kann damit ohne Einfluss von Streulichteffekten bestimmt werden. Der Aerosolabsorptionskoeffizient wird größtenteils durch schwarzen Ruß (*Black Carbon, BC*), mit Hauptbestandteil Graphit, bestimmt. Ein deutlich geringerer Teil wird durch braunen Kohlenstoff (*Brown Carbon*) verursacht, welcher aus organischen Bestandteilen besteht.

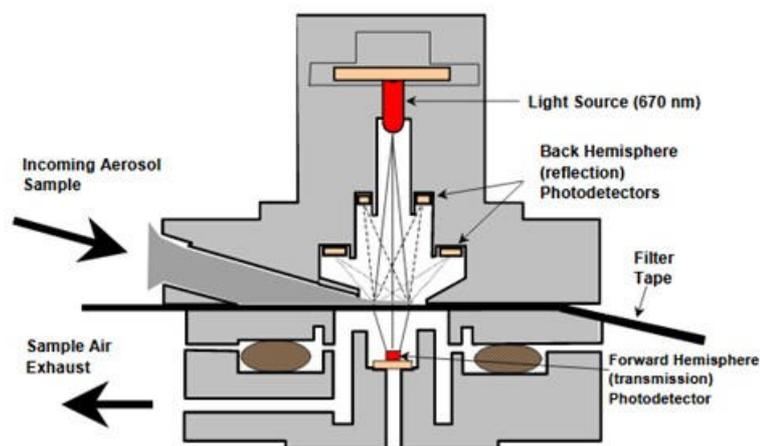


Abb. 37: Messprinzip eines Mehrwinkelabsorptionsphotometers des Modells MAAP 5012.

Diese Mehrwinkelabsorptionsphotometer der Firma Thermo Fisher Scientific (Waltham, USA; Modell 5012) werden jedoch nicht mehr produziert. Zur Bestimmung des Black Carbon-Gehaltes werden nun vermehrt Aethalometer (beispielsweise Modell AE 33 der Firma Magee Scientific) eingesetzt.

Bei insgesamt sieben Wellenlängen (370, 470, 520, 590, 660, 880 und 950 nm) erfolgt eine kontinuierliche Abscheidung auf einem Filterband. Gleichzeitig wird die Abschwächung des Lichtstrahls gemessen. Die Messung der Absorption bei 880 nm wird als Konzentration des Rußes interpretiert.

Das Aethalometer ist damit bestens für Messungen in Messnetzen zur Rußmessung, für Verkehrsmessungen, Aerosolstudien und zur Bestimmung des Rußanteils (beispielsweise bei der Biomasseverbrennung) geeignet.

4.6 ANFORDERUNGEN UND ZIELE AN DIE MESSTECHNIK

Der Einsatz von UFP-Partikelmessstechnik in den zur Überwachung der Luftqualität betriebenen Messnetzen ist eine anspruchsvolle Aufgabe.

Kondensationspartikelzähler eignen sich zur Erfassung der Partikelanzahlkonzentration in hoher zeitlicher Auflösung. Diese umfasst den Gesamtgrößenbereich von etwa 10 nm bis 2 µm. Geräte, die der CEN/TS 16976 entsprechen, haben eine untere Detektionsgrenzen von 7 nm. Die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration mit diesen Geräten ist die einfachste Variante, welche auch in der routinemäßigen Übertragung der Messwerte an die Messnetzzentrale die wenigsten Probleme bereitet. Dabei können Messwerte aus einer hohen zeitlichen Auflösung zu Halbstunden- oder Stundenmittelwerten aggregiert und die Datenbank transferiert werden. Die meisten kommerziell erhältlichen Kondensationspartikelzähler arbeiten nach der CEN/TS 16976 für eine richtlinienkonforme, kontinuierliche Umgebungsüberwachung oder lassen sich durch Änderung einzelner Parameter in einen solchen Messmodus umstellen. Der Wert der Partikelanzahlkonzentration ist ein Wert über die Höhe der Konzentration bzw. über die Höhe der Partikelbelastung. Sie gibt keinerlei Information über die Größe der Partikel und welcher Größenbereich die Partikelanzahlkonzentration bestimmt.

Die im LfU eingesetzten Partikelzähler der Firma Grimm können grundsätzlich zur Bestimmung der Gesamtanzahlkonzentration benutzt werden. Sie werden zudem an den Messstationen Berlin-Schönefeld und Bohnsdorf der FBB GmbH eingesetzt und lieferten in Kalibrierworkshops im Weltkalibrierzentrum für Aerosolphysik am TROPOS zufriedenstellende Ergebnisse.

Der Einsatz von Größenspektrometern liefert eine Partikelgrößenverteilung und damit eine Vielzahl von Informationen, welche aus der reinen Messung der Anzahlkonzentration mit Partikelzählern nicht erhalten werden kann. Aus Basis der Partikelgrößenverteilung können z. B. Rückschlüsse auf mögliche Quellen gezogen werden. Der zu erfassende Partikelgrößenbereich sollte für eine richtlinienkonforme Messung (nach CEN/TS 17434) zwischen 10 und 800 nm liegen. Dies ist herstellerabhängig noch nicht für alle Klassierer gegeben, wird jedoch in Zukunft realisiert werden. Auch ist weiterer technischer Harmonisierungsbedarf auf nationaler und europaweiter Ebene notwendig und ausstehend. So müssen die Probenahmestrome auf unter 40 Prozent relativer Feuchte getrocknet werden und unterliegen verschiedenen Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Aus Partikelgrößenverteilungen können neben der Berechnung der Gesamtpartikelanzahlkonzentration auch Werte hinsichtlich Gesamtpartikel-Volumenkonzentration und -Massenkonzentration bestimmt werden. Außerdem ist eine Zusammenfassung in Partikelklassen möglich, welche die ursprüngliche Größenverteilung in überschaubarer Form abbilden und als Werte in die Datenbank eines Ländermessnetzes gut zu integrieren sind. Statt einer hohen Anzahl an Bins werden lediglich Werte aus 7 Schadstoffklassen als Datenreihen abgespeichert. Es bedarf für eine Umwandlung in Klassen programmtechnischer Hilfsmittel, zusätzlicher Software oder Programmierungen durch qualifiziertes Personal. Der Aufwand für die Erfassung von Größenklassen im Routinedienst ist insgesamt erheblich höher als der für die Bestimmung der Gesamtanzahlkonzentration mit Kondensationspartikelzählern.

Für Messgeräte zur Bestimmung der äquivalenten Rußmassenkonzentration (eBC) ist die Auswahl an Messgeräten recht übersichtlich. Diese Geräte haben den Vorteil, dass sie zumeist schon für Luftgütemessnetze konzipiert sind und damit auch für den Routinedienst geeignet sind.

4.7 QUALITÄTSSICHERUNGSMÄßNAHMEN IM MESSNETZ

Sowohl die reine Messung der Partikelanzahlkonzentration als auch die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung müssen in regelmäßigen Abständen qualitätsgesichert werden. Dies schließt sowohl die Messgeräte als Technik selbst als auch die Qualität der Messungen ein. Das resultiert einerseits in der Vergleichbarkeit verschiedener Messstationen untereinander, andererseits im Vergleich der eingesetzten Messgeräte zu Referenzgeräten. In Wiedensohler et al. (2018) werden die notwendigen Kalibrierungen und Unsicherheiten von MPSS-Geräten dargestellt. Dabei wird für die Partikelgrößenbestimmung eine maximale Abweichung von 3 Prozent zugelassen. Erfolgt eine Vergleichsmessung mit Referenzgeräten über einen Zeitraum von mehreren Tagen, so darf dann die berechnete Partikelanzahlkonzentration die Amplitude von plus / minus 10 Prozent nicht überschreiten. Solche Grundanforderungen sind unabhängig vom Gerätetyp. Die Messinstrumente sollen nach einer Prüfung und Wartung Ergebnisse innerhalb der geforderten Grenzen liefern (nach der CEN-TS).

Für den regulären Stationsbetrieb im GUAN-Netz gibt es ebenfalls routinemäßige Prüfungen. Sofern dies machbar ist, sollte das Stationspersonal etwa alle zwei Wochen das Messinstrument sichten. Das kann das Prüfen der Statuswerte, der Flussparameter sowie der Temperaturen und relativen Feuchten im Gerät beinhalten. Weiterhin ist bei Benutzung von Kondensationspartikelzählern der Füllstatus der Arbeitsflüssigkeit (n-Butanol) zu sichten und gegebenenfalls aufzufüllen. Einige Schritte lassen sich auch durch eine Fernwartung der Messtechnik vereinfachen.

Monatliche Maßnahmen zur Wahrung der Qualität der Messinstrumente schließen die Überprüfung der Volumenströme mit einem Flussmesser ein. Weiterhin sollte das Nullpunktverhalten geprüft werden. Dazu wird ein Nullfilter an den Einlass des Messgerätes installiert. Die ermittelte Gesamtpartikelanzahlkonzentration darf dann 10 Partikel pro Kubikzentimeter im Integralwert nicht übersteigen. Hinzu kommt eine Überprüfung der Hochspannungsversorgung am Differentiellen Mobilitätsanalysator. Gerade für kleine Partikeldurchmesser kann eine Abweichung von nur wenigen Volt in der Amplitude eine Verschiebung der Partikelgrößenverteilung nach sich ziehen. Die Prüfung der Größenbestimmung mit standardisierten Partikeln (PSL, Durchmesser 203 nm) sollte mindestens einmal im Quartal durchgeführt werden. Wie bereits oben beschrieben darf die Abweichung nicht größer als 3 Prozent sein. Falls dies doch der Fall ist, muss der Anstieg der Schleierluft nachkalibriert werden.

Jährlich einmal sollte eine Vergleichsmessung mit einem Referenzgerät vor Ort durchgeführt werden. Auch hier werden alle erwähnten Prüf- und Kalibrierschritte für alle teilnehmenden Gerätschaften durchgeführt. Über den gesamten Prüfzeitraum darf die Gesamtanzahlkonzentration von 10 Prozent nicht über- oder unterschreiten.

Ebenso einmal jährlich sollte auch eine Wartung im Prüflabor stattfinden. Auch hier werden alle Kalibrierungen durchgeführt. Zudem können dabei nicht nur die Größenspektrometer als Gesamteinheit überprüft werden. Auch die Partikelzähler werden hinsichtlich ihrer Zähleffizienz untersucht.

Die Datenspeicherung der Partikelgrößenverteilung erfolgt im Rohformat. Es werden sowohl die Rohkonzentrationen als auch die gerätetechnischen Parameter aufgezeichnet. Mittels einer Mehrfachladungsinversion wird offline aus der Mobilitätsverteilung eine Partikelanzahlgrößenverteilung berechnet. Zusätzliche Korrekturen zu Diffusionsverlusten in Leitungen und im DMA werden ebenso berücksichtigt wie die Zähleffizienz des Partikelzählers. Je nachdem, ob die finalen Daten Umgebungsbedingungen oder standardisiert sein sollen, werden weitere Korrekturen nötig. Liegen diese Daten vor, so können weitere Berechnungen durchgeführt werden. So ist die Zusammenfassung in Größenklassen eine sinnvolle Variante für lokale Datacenter, um die Datenmenge etwas zu reduzieren. Allerdings gehen dabei mitunter auch wichtige Informationen verloren. Wie im Luftgütemessnetz Sachsen können 8 Größenklassen eingeteilt werden. Die Klasse N1 beschreibt die Partikelanzahlkonzentration von 5 bis 10 nm, N2 von 10 bis 20 nm, N3 von 20 bis 30 nm, N4 von 30 bis 50 nm, N5 von 50 bis 70 nm, N6 von 70 bis 100 nm, N7 von 100 bis 200 nm sowie N8 von 200 bis 800 nm. So könnten die Klassen N1 bis N3 deutliche Indikatoren für Partikelneubildungsprozesse sein, die Klassen N4 bis N7 für den Quellbeitrag des Verkehrs und die letzte Klasse N8 für den Ferntransport und die langlebigsten Partikel in der Troposphäre.

Im GUAN-Netz werden zudem alle Daten der Partikelgrößenspektrometer in ihrer vollen Auflösung und nach Validierung der internationalen Datenbank EBAS (NILU) zur Verfügung gestellt (<http://ebas.nilu.no/>). Sie stehen damit nicht nur dem eigenen Netzwerk zur Verfügung, sondern können auch für andere Studien verwendet werden.

5 KONZEPTIONELLE MESSSTRATEGIE FÜR DAS FLÄCHENLAND BRANDENBURG

5.1 ZUSAMMENFASSUNG

Für UFP-Messungen und UFP-Grenzwerte sind im Vergleich zu den Schadstoffen der 39. BImSchV derzeit keine rechtlichen Vorschriften auf EU-, Bundes- oder Landesebene gegeben. Das Land Brandenburg hat sich auf Grundlage des Vorsorgeprinzips von Umweltbeobachtungen dazu entschlossen, Informationen über die UFP-Konzentrationen zu generieren, auszuwerten und zu veröffentlichen. Dafür wird ein UFP-Messkonzept erarbeitet, das folgende Kriterien erfüllt:

- Im Sinne der Überwachung der Luftqualität sollen Langzeitmessungen zu UFP-Konzentrationen im ländlichen und städtischen Hintergrund erfolgen.
- Hoch belastete Standorte wie z.B. in verkehrsbeeinflussten Bereichen können durch temporäre Messungen charakterisiert werden.
- Das UFP-Messnetz soll mit GUAN, mit den Messnetzen der Nachbarbundesländer und der BER Flughafengesellschaft kompatibel sein.
- Für Messungen des Landes Brandenburg werden Mindestanforderungen an Messzeiträume definiert. Mit einer hohen zeitlichen Messauflösung sollen zusätzlich nichtflüchtige Partikelgrößenverteilungen für den Größenbereich 10 bis 800 nm bestimmt werden.
- Zur Beurteilung der UFP-Immission im Land Brandenburg sind repräsentative Kategorien entsprechend des Lenschow-Ansatzes zu betrachten.

Im Flächenland Brandenburg können verschiedene Gebiete charakterisiert werden, in denen die Belastungen an ultrafeinen Partikeln und Black Carbon möglicherweise unterschiedlich sein kann. Die Hauptstadtregion zeichnet sich durch eine hohe Bevölkerungsdichte aus. Mehr als jeder dritte Einwohner Brandenburgs lebt in dieser Region. Der sogenannte Speckgürtel um Berlin wird auch in Zukunft eine der bedeutendsten Regionen für die Siedlungs- und Wirtschaftsentwicklung und in der Folge auch für die Verkehrsentwicklung in Brandenburg bleiben. Damit dürfte auch die UFP-Belastung im Vergleich zu anderen Regionen höher sein. Vor allem die Nutzung von Kleinfeuerungsanlagen in Eigenheimgebieten liefert neben anderen Quellen einen Beitrag an Partikeln.

Der Beitrag des motorisierten Verkehrs an UFP, welcher von der stark frequentierten A10, vor allem dem südlichen Berliner Ring stammt, hat entscheidenden Einfluss auf die umliegenden Gebiete. Hinzu kommt noch der Flughafen Berlin-Brandenburg als eine weitere Partikelquelle aus dem Verkehrssektor.

Im Südosten Brandenburgs hingegen bestimmen mitunter noch Ferneinträge aus Osteuropa sowie die dortigen Kraftwerke die Luftqualität im Allgemeinen, auch wenn in den letzten Jahren keine Überschreitungen der Grenzwerte mehr zu verzeichnen waren.

Aus diesen Gründen werden zwei mögliche Messvarianten vorgestellt. Mit Messungen von ultrafeinen Partikeln und Ruß in der Hauptstadtregion wäre ein repräsentatives Gebiet für die Exposition der Bevölkerung gegeben. Dafür müsste eine neue Messstation im Bereich Königs Wusterhausen errichtet werden. In Kombination mit temporären Messungen zum Beispiel in Potsdam oder in der Umgebung des Flughafens könnte der verursacherbezogene Bereich charakterisiert werden.

In der zweiten Variante würde die Luftqualität im Südosten Brandenburgs auf lange Sicht überwacht werden. Eine stationäre Messung müsste in Cottbus durchgeführt werden. Temporäre Messungen würden dann entlang der Bundesgrenze zu Polen sowie der Landesgrenze zu Sachsen durchgeführt werden.

Flankiert würden diese Messvarianten durch Messwerte aus dem ländlichen Hintergrund, die bereits jetzt durch das LfULG in Melpitz nahe der Südwestgrenze Brandenburgs und in Neuglobsow im Norden durch das UBA gewonnen werden. Eine weitere Hintergrundmessstelle im Spreewald ist empfehlenswert.

5.2 STANDORTKRITERIEN FÜR MESSSTANDORTE

Das Land Brandenburg ist bezogen auf seine geographische Größe und Einwohnerzahlen das nach Mecklenburg-Vorpommern am wenigsten besiedelte Bundesland Deutschlands. Jedoch lebt ein großer Teil der Menschen in der Hauptstadtregion Berlin-Brandenburg, welche grob durch die Ringautobahn A10 begrenzt wird (Abbildung 38). Im so genannten „Speckgürtel“ konnte entgegen der ansonsten stagnierenden bzw. zurückgehenden Bevölkerungszahl des Landes Brandenburgs ein deutlicher Zuwachs verzeichnet werden.

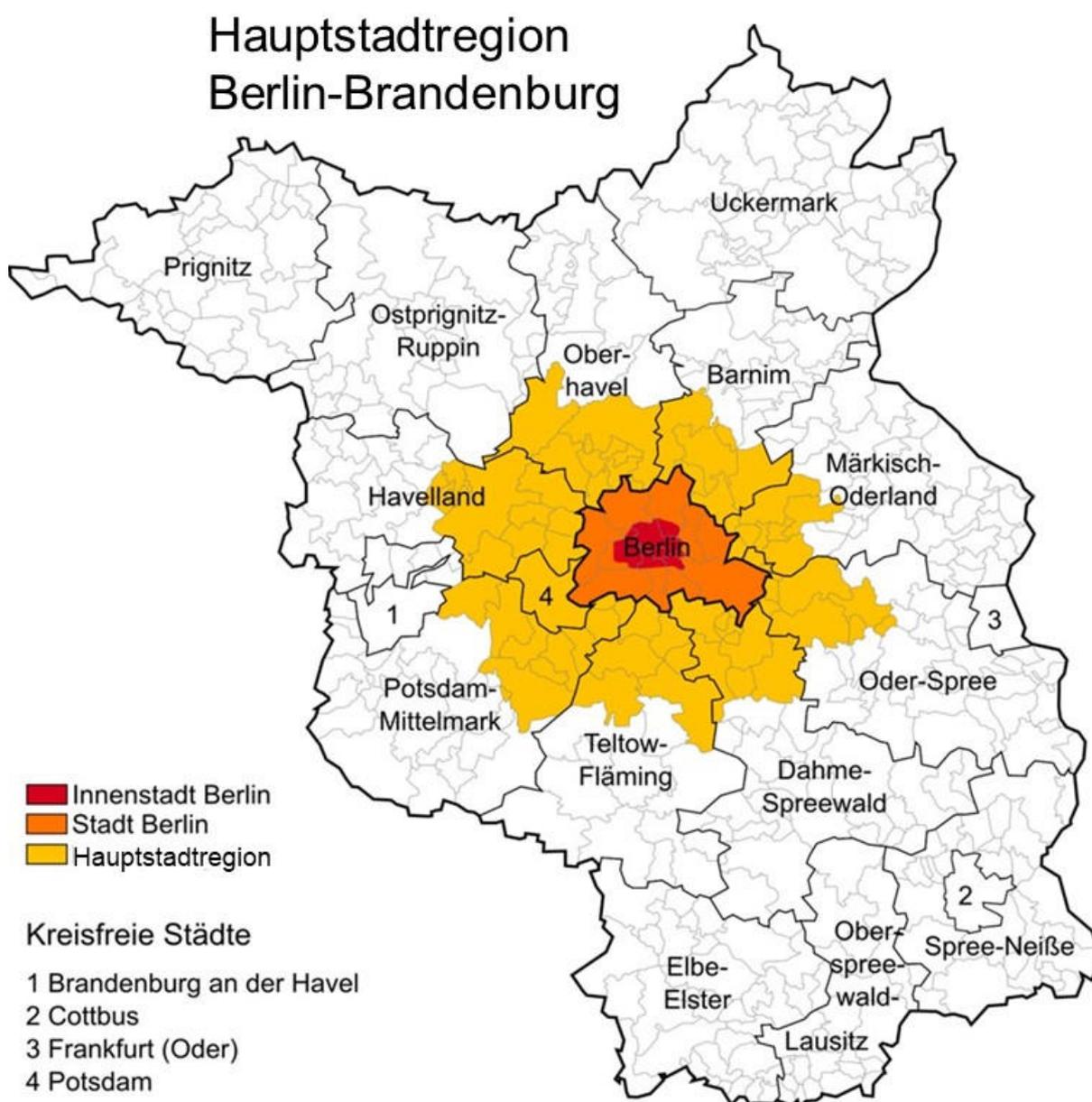


Abb. 38: Hauptstadtregion Berlin-Brandenburg mit gut 40 Prozent der Bevölkerung des Bundeslandes Brandenburg (Bildquelle: Wikipedia)

Im Berliner Umland, einschließlich der Landeshauptstadt Potsdam, leben etwa 1 Million Menschen und somit ungefähr 40 Prozent der Brandenburger Bevölkerung. Neben Potsdam verfügt lediglich Cottbus über eine Einwohnerzahl von (knapp) über 100.000. Die Einwohnerzahl aller anderen Städte ist deutlich geringer

Die Südhälfte Brandenburgs ist durch ein Nebeneinander großer natürlicher Flächen, Landwirtschaft und renaturierter Tagebaue, aber auch durch Industrie geprägt. Die wald- und wasserreichen Naturgebiete wie der Spreewald stellen dabei einen Gegensatz zu den industriellen Anlagen in den grenznahen Regionen dar. Während der Spreewald als Referenz für den regionalen Hintergrund in Bezug auf Luftqualität dient, befinden sich im Grenzbereich Brandenburg/Sachsen der Industriepark Schwarze Pumpe, das Kraftwerk Boxberg sowie das Kraftwerk Jämschwalde an der Grenze zu Polen (Abbildung 39 und 40). Sie gehören zu den größten Braunkohlekraftwerken Deutschlands.

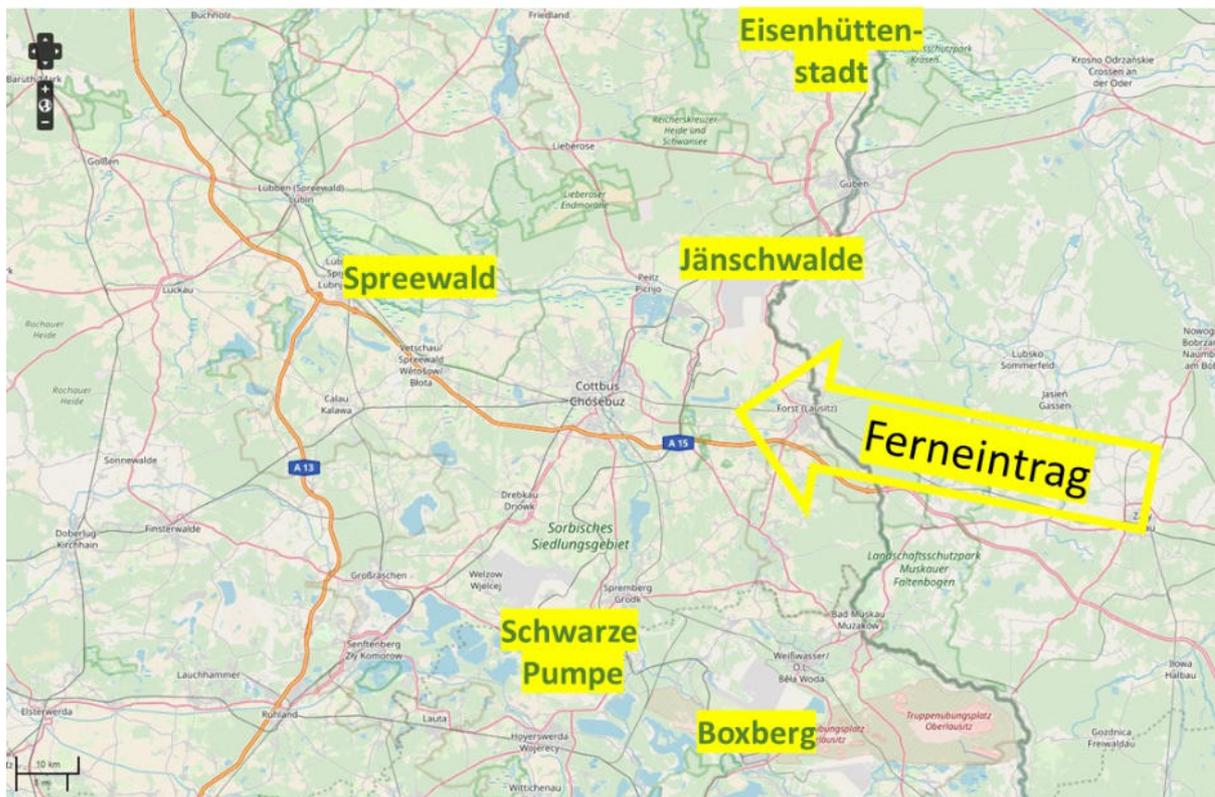


Abb. 39: Südost-Brandenburg mit einer landschaftlichen Mischung aus Industrie und Naturschutzgebieten (Bildquelle: OpenStreetMap)



Abb. 40: Braunkohlekraftwerk Jämschwalde im Südosten Brandenburgs mit seinen Kühltürmen (Bildquelle: leag.de)

Kraftwerke und speziell Braunkohlekraftwerke sind Quellen von Luftschadstoffen. Bei der Verbrennung von Kohle entstehen Feinstaub, Stickoxide und weitere Schadstoffe. Aufgrund der relativ großen Quellhöhe und der dadurch begünstigten Ausbreitungsbedingungen werden bei der bodennahen Messung der Luftqualität in der näheren Umgebung keine signifikant erhöhten Werte festgestellt. Vielmehr tragen die Kraftwerksemissionen zur Hintergrundbelastung bei.

Doch nicht nur von regionalen Kraftwerken sind Emissionen von Luftschadstoffen und Partikeln zu verzeichnen. Besonders bei stagnierenden Ostwetterlagen und vor allem im Winter ist die Luftschadstoffbelastung in Südost-Brandenburg erhöht. Dieser Ferntransport aus Osteuropa war schon mehrfach Gegenstand von Untersuchungen. So wurde bereits 2010 dessen Einfluss auf die PM-Konzentration im Bericht der IVU Umwelt GmbH (2012) „Analyse der PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen im Jahre 2010 im ländlichen und urbanen Hintergrund in Ostbrandenburg“ detailliert dokumentiert. Die höchsten PM-Konzentrationen wurden bei Ostwind-Wetterlagen registriert.

Auch die Studie zur Ursachenanalyse von PM₁₀-Feinstaubemissionen an zehn Messstationen in den Ländern Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen sowie an Messstationen des Umweltbundesamtes zwischen September 2016 und März 2017 liefert diese Ergebnisse (van Pinxteren et al., 2017, Abbildung 41, siehe auch Abbildung 22, Kapitel 2.6). Ein wichtiges Ergebnis war, dass bei meteorologischen Randbedingungen, welche zu einer Belastung im Tagesmittel von $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ führen, der grenzüberschreitende Eintrag bei etwa 50 Prozent liegt. Dieser Aerosol-

Ferntransport konnte mittels PMF-Analyse Verbrennungsemissionen (aus der Verbrennung von Festbrennstoffen) aus den angrenzenden östlichen Ländern zugeordnet werden. Die Auswertung von Rückwärtstrajektorien zeigte nur geringe Einträge aus dem grenznahen Gebiet, die Quellen lagen in deutlich größerer Entfernung. Die Problematik des Aerosol-Ferntransportes wird somit auch zukünftig nicht an Bedeutung verlieren, auch wenn seit Jahren, begünstigt durch die Meteorologie, keine Überschreitungen der Grenzwerte von Luftschadstoffen mehr zu verzeichnen sind und die Tendenz prinzipiell nach unten geht.

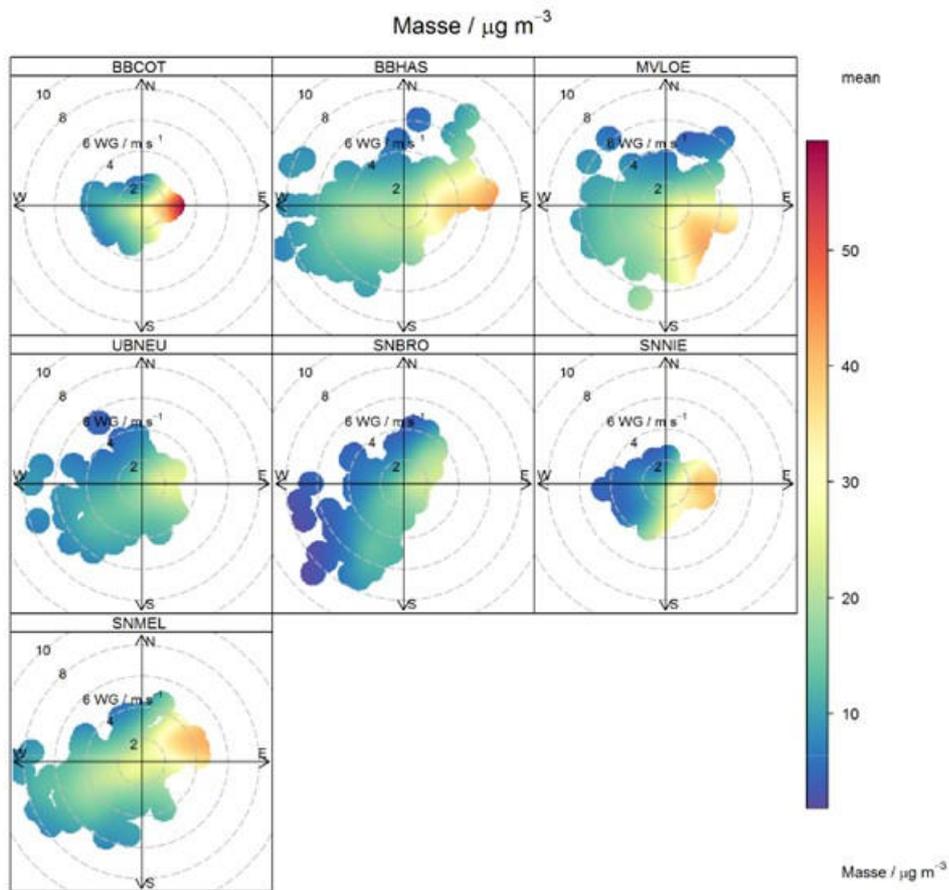


Abb. 41: Polardiagramme für die PM10-Massekonzentration in Abhängigkeit der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Messstation (Quelle: van Pinxteren et al., 2017)

Eine weitere bedeutsame Quelle hinsichtlich der Luftschadstoffemission und insbesondere für ultrafeine Partikel ist der Verkehrssektor. Vor allem im und um den Ballungsraum Berlin gibt es hohe Verkehrsdichten. Dabei ist die Bundesautobahn 10 („Berliner Ring“) mit knapp 200 km der längste Autobahnring Europas und hat auf den meisten Abschnitten die stärksten Verkehrsaufkommen im Land Brandenburg (Abbildung 42).

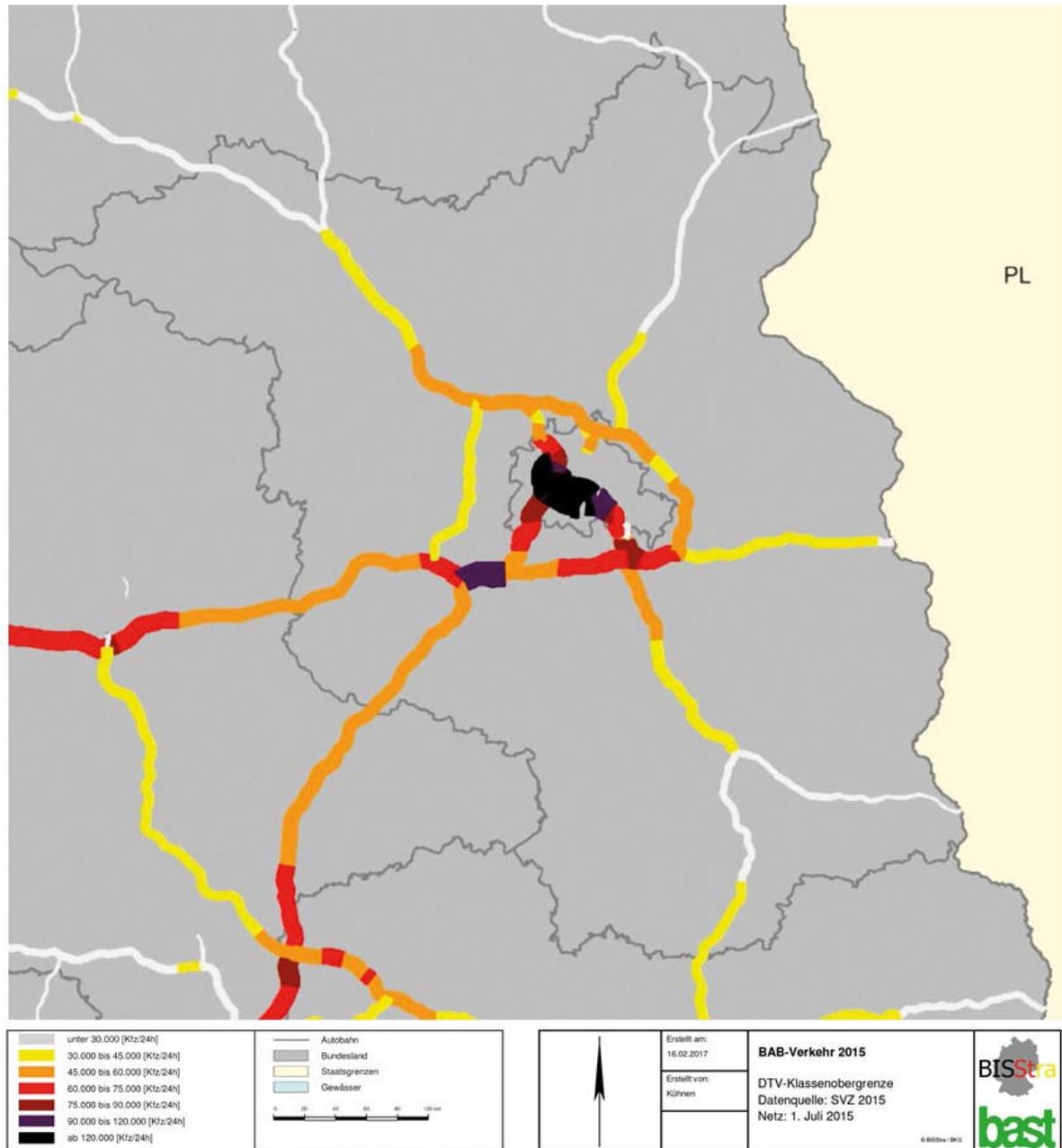


Abb. 42: Verkehrsmengenkarte für das Erfassungsjahr 2015 auf Bundesautobahnen (Straßenverkehrszählung 2015; Bundesanstalt für Straßenwesen)

Dabei spielt nicht nur der Individualverkehr eine wichtige Rolle, sondern auch der beachtliche Anteil des Schwerlastverkehrs. Besonders der südliche Berliner Ring mit seiner Ost-West-Verbindung ist für den grenzüberschreitenden Schwerverkehr eine attraktive Verbindung. Verkehrszählungen der Bundesanstalt für Straßenwesen ergaben für das Jahr 2015 mehr als 15.000 Fahrzeuge des Schwerlastverkehrs (> 3,5 t) in 24 Stunden.

Neben diesen Straßen-Verkehrsemissionen spielt der Flugverkehr möglicherweise in den angrenzenden Gemeinden eine bedeutende Rolle, wie die Untersuchungen in der Nähe des Frankfurter

Flughafens aufgezeigt haben. Auch Brandenburg ist davon betroffen, nach Eröffnung des Flughafens Berlin-Brandenburg werden die Emissionen in den kommenden Jahren am Standort des BER in Schönefeld zunehmen, weil das Passagieraufkommen der Berliner Flughäfen bereits vor der Öffnung den dritten Platz in Deutschland belegt und sich später der Betrieb von vorher zwei Flughäfen auf einen Standort konzentriert.

Für die Beurteilung der Immissionen ultrafeiner Partikel sind die genannten Quellgruppen als Hauptverursacher des Aerosols in Brandenburg einzuordnen. Damit können bisherige Erkenntnisse zu Gebietskategorien und deren Beitrag zur UFP-Belastung auch im Flächenland Brandenburg wiedergefunden werden. Um diese Belastung an feinen und ultrafeinen Partikeln zu dokumentieren, sollten stationäre Messstationen entstehen bzw. schon existierende Standorte genutzt werden und langfristig mit Partikelmessstechnik ausgestattet werden.

5.3 VARIANTEN FÜR DIE ZUKÜNFTIGE MESSSTRATEGIE

Im folgenden Kapitel werden Möglichkeiten für die zukünftige Messstrategie vorgeschlagen. Dabei stehen Varianten der Bestimmung der Anzahlkonzentration und der Partikelgrößenverteilung für zukünftige Standorte auf Grundlage der CEN/TS 17434 im Vordergrund. Zusätzlich schlagen wir die Bestimmung der Rußmassenkonzentration als weiteren Messparameter zusammen mit den UFP-Messungen vor.

Um Aussagen über Partikelbelastungen treffen zu können, muss ein geeigneter Standort für die Bestimmung der Hintergrundkonzentration geschaffen werden. Dieser Standort sollte sich in Anlehnung an die 39. BImSchV zur Beurteilung der Luftqualität und Lage der Probenahmestellen für Messungen von Partikeln (PM₁₀ und PM_{2.5}) mindestens in einem Abstand von fünf Kilometern zu Ballungsräumen oder Industriegebieten befinden. Außerdem sollen Messungen nicht nur diesen einen Ort charakterisieren, sondern auch für ähnliche Messstandorte im ländlichen Hintergrund repräsentativ sein.

Ein Blick auf die bereits vorhandenen UBA-Messstationen als Teil von GUAN zeigt für Brandenburg bereits eine existierende ländliche Hintergrundstation in Neuglobsow, die durch das Umweltbundesamt betrieben wird (Abbildung 43).

In der UBA-Messstation Neuglobsow wird ein Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer der Bauart TROPOS zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung verwendet. Mit einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten wird das Größenspektrum von 10 bis 800 nm abgedeckt. Seit 2010 werden hier kontinuierlich Messdaten erfasst und in Datenbanken gespeichert. Bisher erfolgte keine Trennung in Gesamt- sowie nichtflüchtige Partikelgrößenverteilungen durch den Einsatz eines Thermodensitometers. Dies ab 2021 geplant. Weiterhin wird in der Fortführung von GUAN nach den Anforderungen der Qualitätssicherung zukünftig ein zusätzlicher Partikelzähler zur Bestimmung Gesamtanzahlkonzentration betrieben.

Eine weitere regionale Hintergrundstation zur Charakterisierung der Hintergrundbelastung des zentraleuropäischen Aerosols befindet sich Melpitz in Sachsen, nahe der südwestlichen Landesgrenze von Brandenburg. Diese Forschungsstation wird von TROPOS betrieben. Melpitz ist Teil der europäischen Forschungsinfrastruktur ACTRIS & GUAN. Mit einem dualen Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer der Bauart TROPOS werden hier die Partikelgrößenverteilungen im Größenbereich von 5 und 800 nm bestimmt. Dies ist für die Untersuchung von Partikelneubildungsereignissen von großer Bedeutung. Mit einer zeitlichen Auflösung von zehn Minuten wird hier zwischen volatilen und nichtvolatilen Größenverteilungen unterschieden. Diese Messungen werden seit 2003 kontinuierlich durchgeführt.

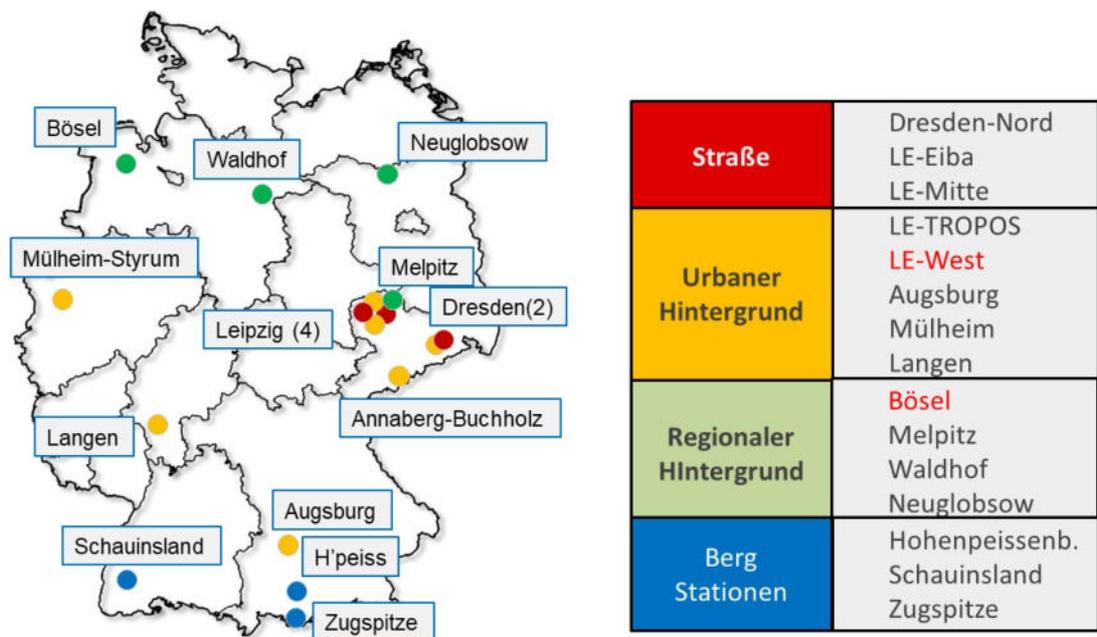


Abb. 43: Übersicht über die GUAN-Messstationen zu ultrafeinen Partikeln und Ruß (BC)

Sowohl die Messstation in Neuglobsow als auch die Station in Melpitz verfügen zudem über Absorptionsphotometer (MAAP 5012) zur Bestimmung der Rußmassenkonzentration. Diese Messungen werden mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute durchgeführt.

Im Rahmen der Messstrategie für das Land Brandenburg empfehlen wir eine weitere Messstation zur Bestimmung des regionalen Hintergrundes. In Anlehnung an die Messstationen in GUAN sollte die Partikelgrößenverteilung in einem Größenbereich zwischen 10 und 800 nm bestimmt werden. Ideal wäre diese Messung mit einem weiteren Partikelzähler zur Bestimmung der gesamten Partikelanzahlkonzentration und eines Absorptionsphotometers zur Bestimmung der Rußmassenkonzentration zu komplementieren. Für diese Hintergrundmessungen (Pegelmessungen) würde sich die Region Spreewald sehr gut eignen.

Die Bestimmung der eigentlichen Belastung von Luftschadstoffen und Partikeln auf die Bevölkerung kann mithilfe des Lenschow-Ansatzes berechnet werden. Der Lenschow-Ansatz beschreibt einen Ansatz, bei dem eine Quellenidentifizierung mittels getrennter Beiträge aus verschiedenen Quellregionen betrachtet wird. Die wesentlichen Quellregionen dabei sind der Hintergrund, der städtische Hintergrund und hoch belastete Regionen, beispielsweise der Straßenverkehr (Lenschow et al., 2001). Durch Berechnung der Inkremente zwischen den einzelnen Gebietskategorien, können die jeweiligen Beiträge zur Gesamtkonzentration bestimmt werden. Beispiele hierfür sind die Analysen zur Umweltzone Leipzig, Verursachernanalysen in Dresden oder auch die Quellenzuordnung für Feinstaub in Hessen.

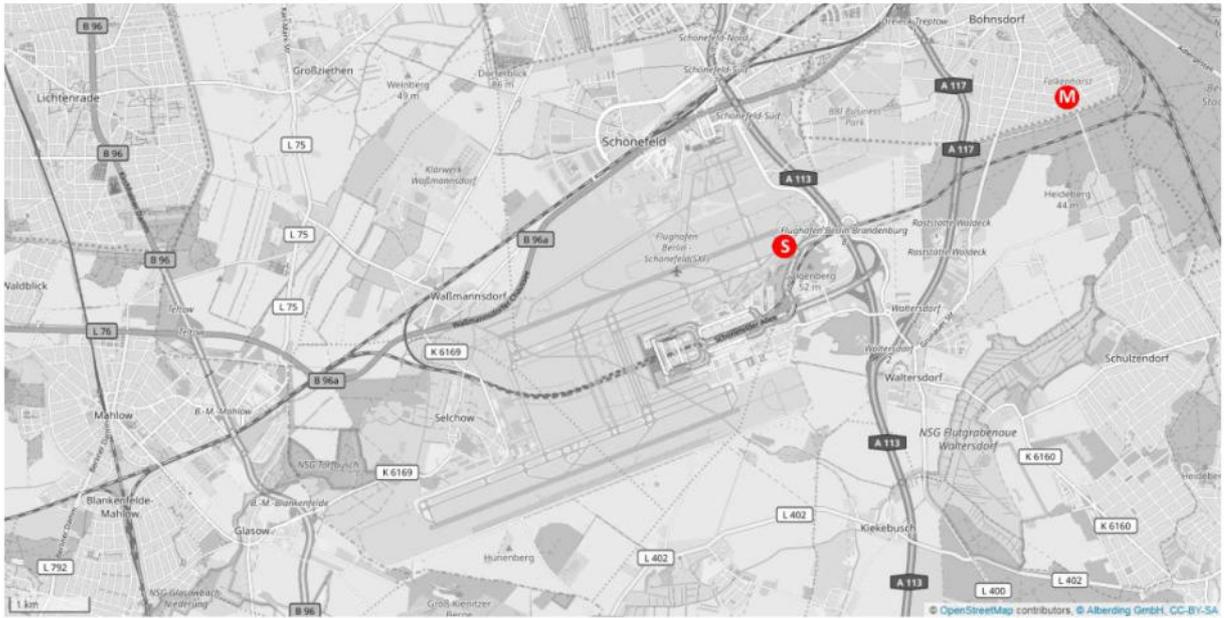
Dies erfordert jedoch auch Messungen im städtischen Hintergrund. Der städtische Hintergrund wird durch einen Beitrag von Emissionen städtischer Quellen sowie dem Hintergrund-Eintrag beschrieben. Die Bevölkerung ist diesen Beiträgen direkt ausgesetzt. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit sind Probenahmestellen so einzurichten, dass die Quellbeiträge im Luv der Hauptwindrichtung an der Messstation erfasst werden und ebenfalls eine Repräsentativität für eine größere Fläche darstellen (39. BImSchV).

Um den Beitrag industrieller Quellen zu ermitteln, beispielsweise im Südraum Brandenburgs, sollte sich die Probenahmestelle im nächstgelegenen Wohngebiet im Lee der Hauptwindrichtung von der Quelle befinden.

Um speziell auch die Beiträge bezüglich feiner und ultrafeiner Partikel aus dem Verkehr zu bestimmen, ist die Erfassung der Partikelgrößenverteilung in Straßennähe essenziell. Im Messnetz des Landes Brandenburg existieren aktuell sieben verkehrsnahen Messstationen, allerdings gibt es hier bisher keine Messungen zu ultrafeinen Partikelkonzentrationen bzw. Partikelgrößenverteilungen.

Durch die BER-Flughafengesellschaft wird eine Luftgütemessstation auf dem Betriebsgelände des Flughafens Berlin-Schönefeld betrieben (Abbildung 44). Mit dieser Messstation wird die Luft auf verkehrstypische Luftschadstoffe seit 2011 untersucht. Auswertungen und Veröffentlichungen erfolgen in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Umwelt (LfU). Seit Oktober 2016 werden zusätzlich UFP (Partikelanzahlkonzentration bzw. Partikelanzahlgrößenverteilung) an dieser stationären Messstation untersucht. Damit wird ein wesentlicher Beitrag zur Charakterisierung des komplexen Systems Flugverkehr und des bodenbezogenen Betriebs eines Flughafens geliefert. Um die Verbreitung von Luftschadstoffen durch den Luftverkehr sowie deren Auswirkungen auf die Umwelt im Umfeld des Flughafens zu beschreiben, wurde Anfang 2018 eine mobile Messstation im wenige Kilometer entfernten Bohnsdorf (Stadtgebiet Berlin) errichtet, die ebenfalls die UFP-Immission (Partikelanzahlkonzentration bzw. Partikelanzahlgrößenverteilung) erfasst.

Die dabei eingesetzten Geräte sind Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer (Firma Grimm) und sollen der Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung dienen (momentan nur zu Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration). Angedacht sind die Messgeräte für kontinuierliche Messungen, wie auch aus den Messdaten des Jahres 2019 entnommen werden kann (Abbildung 45; FBB-Luftgütebericht 2019). Eine Unterscheidung nach Gesamt- und nichtflüchtigen Partikeln sind an diesen Luftgütemessstationen nicht geplant.



S: stationäre Luftgüte (seit 07/11)
 M: mobile Luftgüte (seit 03/18)

Abb. 44: Übersicht zur UFP-Messtation zu ultrafeinen Partikeln in Berlin-Schönefeld (Karte: OpenStreetMap)

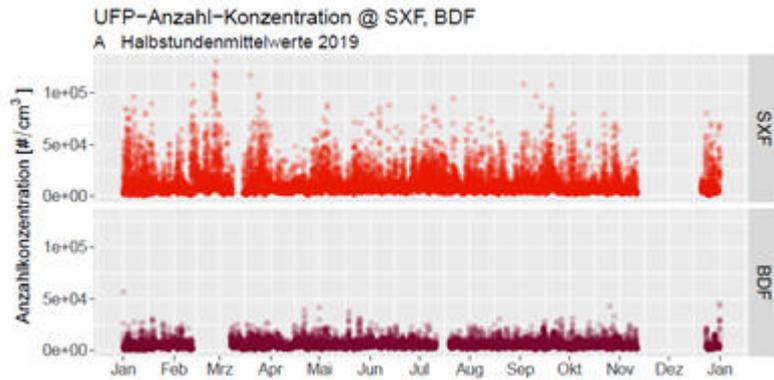


Abb. 45: Ergebnisse der Anzahlkonzentrationen der Messstationen Berlin-Schönefeld und Bohnsdorf für das Jahr 2019; FBB-Luftgütebericht 2019.

Vorschlag für Messstrategie 1 – Luftqualität im Berliner Speckgürtel.

Etwa 40 Prozent der Bewohner Brandenburgs leben in der Agglomeration Berlin. Somit könnten repräsentative Messungen zur Luftqualität in diesen städtischen und vorstädtischen Gebieten etabliert werden. Die Abbildung 46 zeigt den Kartenausschnitt der Hauptstadtregion sowie den Bezug zu Hintergrundmessungen in der Spreewaldregion und in Neuglobsow.

Der Idealfall neuer stationärer Messstellen würde sich an zwei Messpunkten im Berliner Umland orientieren. Diese konzentrieren sich auf den westlichen Randbezirk (Region Potsdam bis Dallgow-Döberitz) und den südöstlichen Bereich um Königs Wusterhausen. Durch den Bezug zum ländlichen Hintergrund im Spreewald und in Neuglobsow könnte der städtische Hintergrund beschrieben werden. Charakteristisch für die Umlandregion sind:

- In dicht besiedelten Gebieten ist die UFP-Konzentration im Allgemeinen höher.
- Die Hintergrundbelastung bei Westwind-Wetterlagen ist auf westlicher Seite geringer.
- Die Abluftfahne der Großstadt reicht in die windabgewandte Seite.
- Es ist ein Einfluss von Holzverbrennungen auf die Konzentrationen ultrafeiner Partikel zu vermuten, insbesondere durch die Umlandgemeinden (viele Eigenheime).
- Der verkehrsstarke Berliner Autobahnring hat einen Einfluss auf die nähere Umgebung.
- Der neue Flughafen BER wird einen Einfluss auf die nähere Umgebung haben.

Vor allem in Bezug auf den letzten Punkt hat diese Option den Vorteil, die UFP-Konzentrationen des Flughafens BER nicht nur an den Messstationen der FBB auf dem Flughafengelände und in Bohnsdorf zu erfassen, sondern diese auch auf lange Sicht im Südosten des Flughafens durch das LfU zu ergänzen.

Zur Bestimmung solcher Quellbeiträge kann auf eine Bestimmung der Hintergrundkonzentration nicht verzichtet werden. Deshalb müssen die Partikelgrößenverteilung und die Partikelanzahlkonzentrationen stets in Bezug zu den ländlichen Hintergrundstationen (Spreewald und Neuglobsow) betrachtet werden.

Messungen der Anzahlkonzentration und der Partikelgrößenverteilung im verursacherbezogenen Bereich könnten durch temporäre Messungen ergänzt werden. Diese wären in Abhängigkeit der Untersuchung zeitlich begrenzt. So könnte beispielsweise der Einfluss des Straßenverkehrs auf die Partikelbelastung im städtischen Gebiet (Beispiel Potsdam) untersucht werden.

Messgerätetechnisch wäre es erforderlich, drei Messstationen (zwei im urbanen Hintergrund und eine im ländlichen Hintergrund) mit je einem Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung zwischen 10 und 800 nm (CEN-TS 17434) auszustatten. Um eine gleichzeitige Qualitätskontrolle des Größenspektrometers durchzuführen, wäre eine zusätzliche Installation eines Partikelzählers zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration notwendig. Die integrierte Anzahlkonzentration des MPSS wird somit direkt mit der des Zählers verglichen und qualitätsgesichert. Für die Weiterführung des GUAN-Netzes wird dieses Verfahren bereits an den UBA-Stationen umgesetzt.

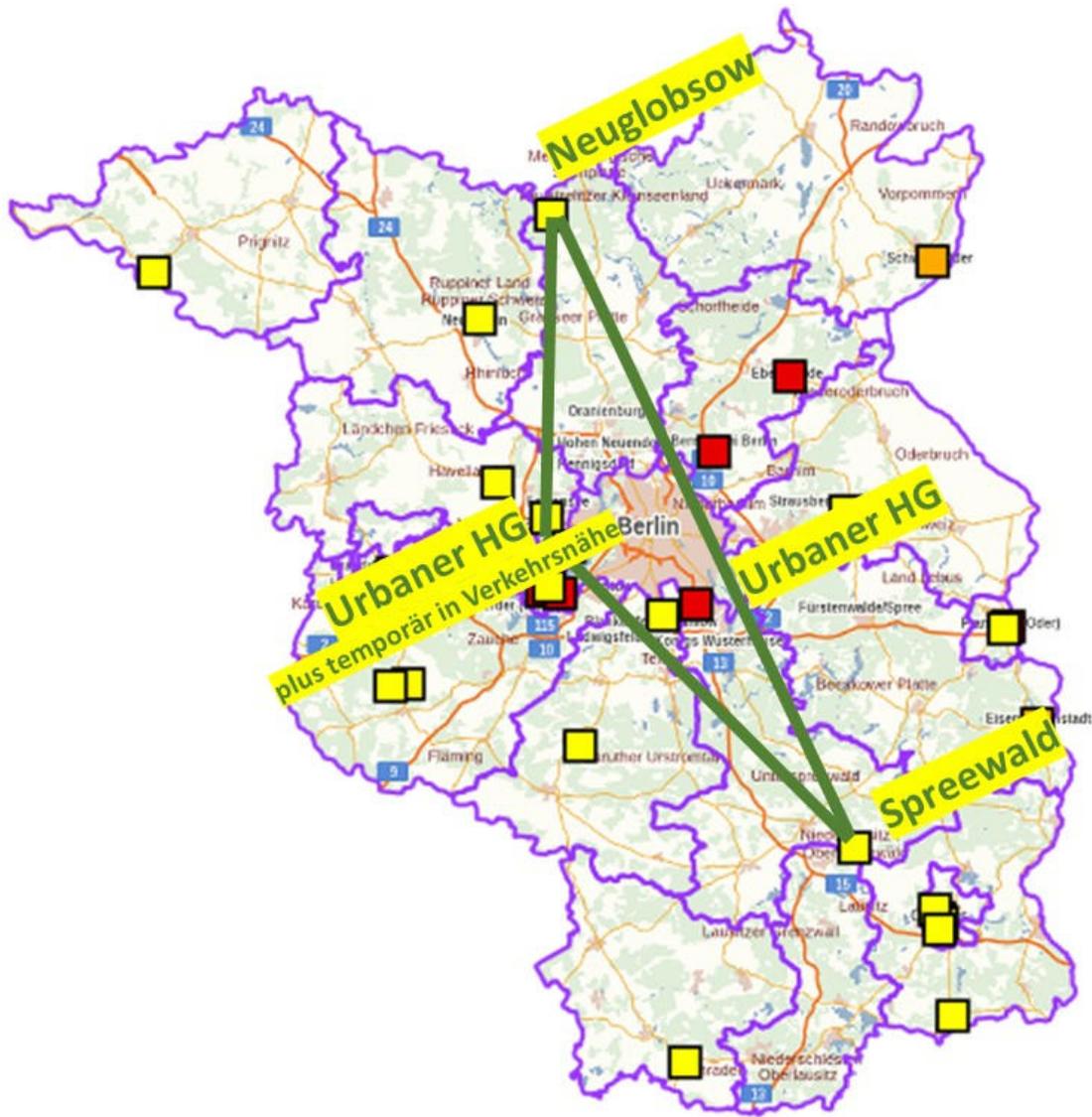


Abb. 46: Mögliches Messregime zur Überwachung der Luftqualität im Berliner Speckgürtel (Karte: LfU).

Als zusätzliche Option wäre für diese stationären Messungen die Untersuchung der nichtflüchtigen Partikel empfehlenswert. Durch Thermodesorption werden bei 300°C die flüchtigen Partikelbestandteile verdampft. Die resultierende Partikelgrößenverteilung beschreibt im Wesentlichen den Ruß. Um diese Messungen zu vervollständigen, sind Absorptionsphotometer zur Bestimmung der Rußmassenkonzentration notwendig.

Die Beurteilung der Luftqualität wird durch die Erfassung der Rußmassenkonzentration vervollständigt und sollte auch für zukünftige Messungen in Brandenburg berücksichtigt werden. Es wird empfohlen, diese Messungen mindestens an den stationären Messstationen durchzuführen. Da diese Messvariante zur UFP-Belastung repräsentativ für einen großen Teil der Bevölkerung ist, kann sie als Vorzugsvariante angesehen werden.

Vorschlag für Messstrategie 2 – Luftqualität im südöstlichen Brandenburg:

Als zweiten Vorschlag einer Messstrategie für langfristige UFP-Messungen empfehlen wir Messungen im Süden und Osten Brandenburgs. In dieser Region werden Braunkohlekraftwerke betrieben, die eine Beurteilung der Luftqualität bzgl. ultrafeiner Partikel sinnvoll erscheinen lässt, um auch deren Beitrag zur Hintergrundbelastung zu erfassen.

Außerdem können winterliche Ostwind-Wetterlagen die Luftqualität durch den Ferntransport aus Osteuropa deutlich beeinflussen. Stationäre Messstationen flankiert mit einer temporären Messstation (betrieben über Monate an einem Standort) würden Erkenntnisse über den städtischen Hintergrund, den Gradienten in der grenznahen Region bis hinein in den ländlichen Hintergrund liefern.

Das Messgebiet für eine solche Untersuchung umfasst den dargestellten Bereich in Abbildung 47. Stationäre Messorte wären im städtischen Hintergrund in der Stadt Cottbus sowie der ländliche Hintergrund im Spreewald. Diese stationären Standorte sollten analog des ersten Vorschlags mit einem Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer, einem Partikelzähler und einem Absorptionsphotometer ausgestattet werden, um die Partikelgrößenverteilung, die Anzahlkonzentration und die Rußmassenkonzentration zu bestimmen. Die Zeitauflösung für Größenverteilungen wäre fünf Minuten und für die Anzahlkonzentration und die Rußmassenkonzentration eine Minute. Für die Messungen empfehlen wir ebenfalls den Einbau eines Thermomodulators zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung nichtflüchtiger Partikel.

Eine temporäre Messstation im grenznahen Gebiet zu Polen sowie im Süden zu Sachsen könnten die Messungen ultrafeiner Partikel vervollständigen. Diese Messstation könnte für zeitbegrenzte Messungen, beispielsweise den Wintermonaten, in der Nähe der Industriebereiche Eisenhüttenstadt, Forst oder auch Spremberg eingesetzt werden.

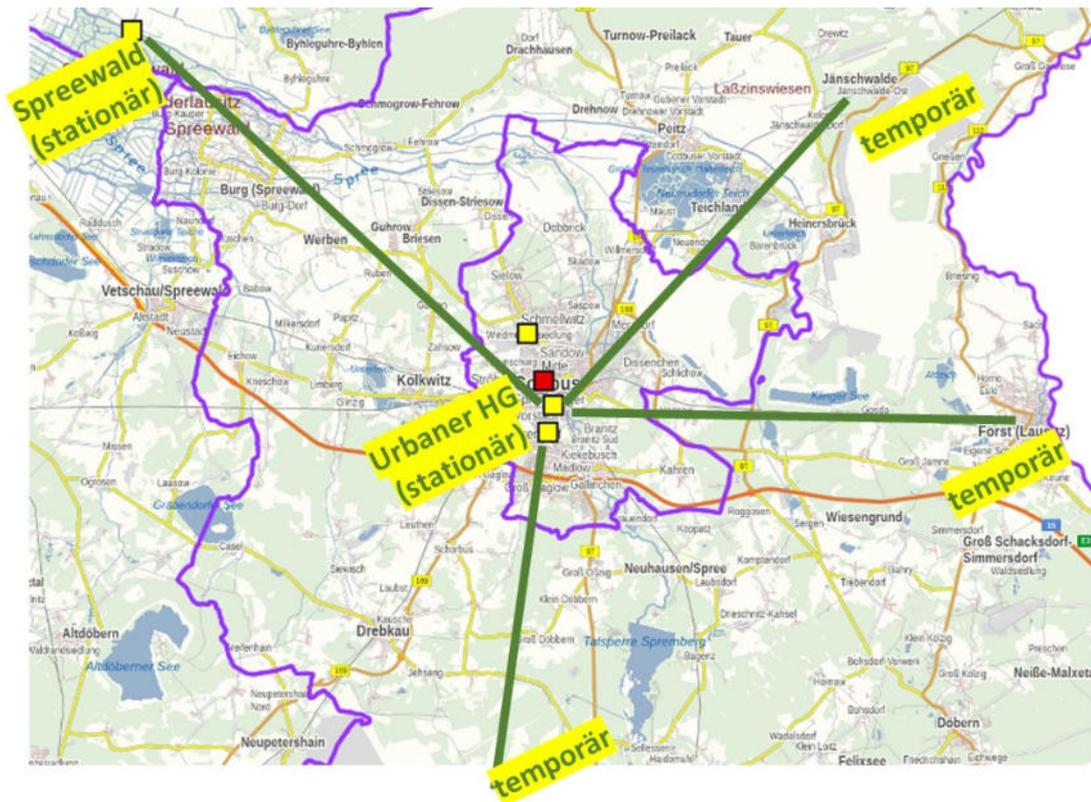
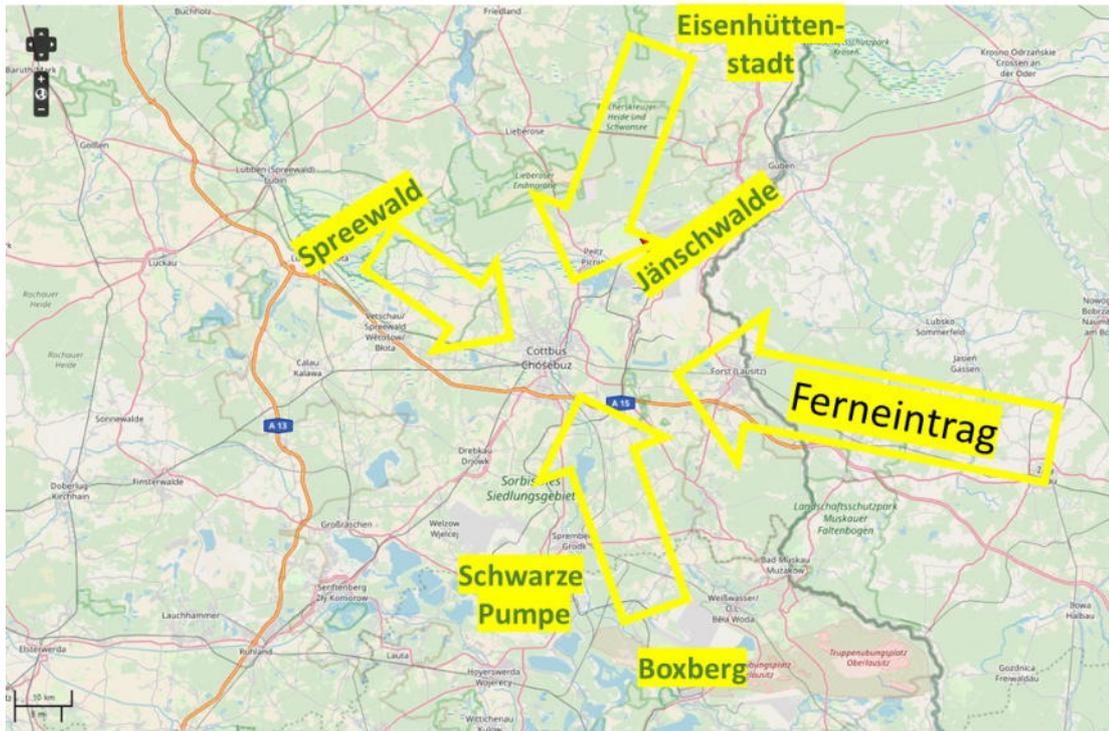


Abb. 47: Mögliches Messregime zur Überwachung der Luftqualität im südöstlichen Brandenburg (Karten: OpenStreetMap, LfU).

Die Tabelle 5 gibt einen Überblick zu den Mindest- und Idealanforderungen an die Messstrategie.

| Messstrategie | Gemessene Parameter | Bemerkungen |
|--|--|---|
| <p>Idealfall:</p> <p>Drei stationäre Messstationen, zwei im urbanen und eine im ländlichen Hintergrund (Messregime 1)</p> <p>Je eine stationäre Messstation im urbanen und ländlichen Hintergrund (Messregime 2)</p> <p>Ergänzung durch temporäre Messungen</p> | <p>Partikelgrößenverteilung in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten im Größenbereich 10-800 nm</p> <p>Bestimmung PGV für nichtflüchtige Partikel</p> <p>Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration zur Qualitätssicherung zumindest an den stationären Stationen</p> <p>Rußmassenkonzentration mit einer minütlichen Zeitauflösung</p> | <p>An den stationären Messstationen sollte in Anlehnung an das zukünftige ACTRIS/GUAN-Netz eine kontinuierliche Qualitätssicherung mit einem zusätzlichen Partikelzähler durchgeführt werden (kostenloser Service von ACTRIS für GUAN).</p> |
| <p>Idealvariante temporäre Messungen:</p> | <p>Partikelgrößenverteilung in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten im Größenbereich 10-800 nm</p> <p>Bestimmung PGV für nichtflüchtige Partikel</p> <p>Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration zur Qualitätssicherung</p> <p>Rußmassenkonzentration mit einer minütlichen Zeitauflösung</p> | <p>Idealerweise wird eine kontinuierliche Qualitätssicherung mit einem zusätzlichen Partikelzähler durchgeführt (kostenloser Service von ACTRIS für GUAN).</p> |
| <p>Je eine stationäre Messstation im urbanen und ländlichen Hintergrund</p> | <p>Partikelgrößenverteilung in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten im Größenbereich 10-800 nm</p> <p>Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration zur Qualitätssicherung</p> <p>Rußmassenkonzentration mit einer minütlichen Zeitauflösung</p> | <p>An beiden Messstationen wird in Anlehnung an das zukünftige ACTRIS/GUAN-Netz eine kontinuierliche Qualitätssicherung mit einem zusätzlichen Partikelzähler durchgeführt (kostenloser Service von ACTRIS für GUAN).</p> |
| <p>Minimalvariante stationär:</p> <p>Je eine stationäre Messstation im urbanen und ländlichen Hintergrund</p> | <p>Partikelgrößenverteilung in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten im Größenbereich 10-800 nm</p> <p>Rußmassenkonzentration mit einer minütlichen Zeitauflösung</p> | <p>Auf die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration mit einem Zähler wird verzichtet und somit auch auf eine kontinuierliche Qualitätssicherung</p> |
| <p>Minimalvariante temporär:</p> | <p>Partikelgrößenverteilung in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten im Größenbereich 10-800 nm</p> <p>Rußmassenkonzentration mit einer minütlichen Zeitauflösung</p> | <p>Auf die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration mit einem Zähler wird verzichtet und somit auch auf eine kontinuierliche Qualitätssicherung.</p> |

Tab. 5: Möglichkeiten der Generierung von Partikeldaten für die beiden vorgestellten Messregimes.

5.4 EIGNUNG VORHANDENER ORTSFESTER STANDORTE

Die Überwachung der Luftqualität im Land Brandenburg findet derzeit an 25 Messstationen mit einer kontinuierlichen Erfassung von Luftschadstoffen statt. Davon betreibt das Landesamt für Umwelt 17 Messstationen im ländlichen und städtischen Hintergrund ergänzt durch 7 Standorte im verkehrsnahen Bereich. Hinzu kommt die regionale Hintergrundstation des Umweltbundesamtes sowie die durch die Flughafengesellschaft Berlin-Brandenburg betriebene Messstation am Flughafen Berlin-Schönefeld. Letztere führt zudem temporäre Messungen in einer mobilen Messstation im Umkreis des Flughafens durch (Abbildung 44). Diesen beiden Messpunkten im Flughafenbereich obliegen bereits Sondermessaufgaben. Hier werden schon Partikelanzahlkonzentrationen und zeitweise Partikelgrößenverteilungen bestimmt.

Zukünftig sollen UFP-Messungen in möglichst allen drei Flächenkategorien entsprechend des Lenschow-Ansatzes (ländlicher Hintergrund, städtischer Hintergrund und verkehrsbeeinflusste Station) durchgeführt werden. Dabei ist zu prüfen, inwiefern die vorhandenen ortsfesten Standorte geeignet sind.

Die vorhandene Messstelle Neuglobsow (UBA) ist für den regionalen Hintergrund repräsentativ. Für die Erzeugung eigener Zeitreihen ultrafeiner Partikel im Flächenland Brandenburg kann die Bestimmung des regionalen Hintergrunds mit einer weiteren Messstelle befürwortet werden. Sie bildet für sämtliche Betrachtungen die Referenz in Sachen Partikelgrößenverteilung und Partikelanzahlkonzentration. Abzüglich diesem Schwellenwert kann eine Beurteilung der Belastung an feinen und ultrafeinen Partikeln an städtischen Hintergrund- und quellnahen Messorten stattfinden.

Bei Betrachtung der Übersichtskarte der Orte mit kontinuierlicher Luftgütemessung (Abbildung 48) kann hier die Messstation im Spreewald empfohlen werden (Abbildung 49). Neben Stickstoffdioxid, den Stickstoffoxiden, Schwefeldioxid, Feinstaub (PM₁₀), Ozon und meteorologischen Parametern wird bereits testweise die Gesamtpartikel-Anzahlkonzentration mit einem Partikelzähler (Grimm) aufgezeichnet. Für die Quellzuordnung sowie zur Beurteilung atmosphärischer Prozesse zur Bildung ultrafeiner Partikel sind einfache Gesamtpartikel-Anzahlkonzentration jedoch nicht ausreichend. Durch die fehlenden Informationen zur Partikelgröße können diese Messdaten nicht interpretiert werden. Gerade für Vergleiche zu belasteten Probenahmestellen erweist sich der Einsatz temporärer Messstationen mit der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung als notwendig.

An der Messstelle Spreewald kann nicht nur der regionale Hintergrund erfasst, sondern auch der Einfluss des Ferntransportes aus Osteuropa bestimmt werden. Messungen ultrafeiner Partikel liefern wichtige Zusatzinformationen, die komplementär zu früheren Untersuchungen (van Pinxteren et al., 2017) sind.

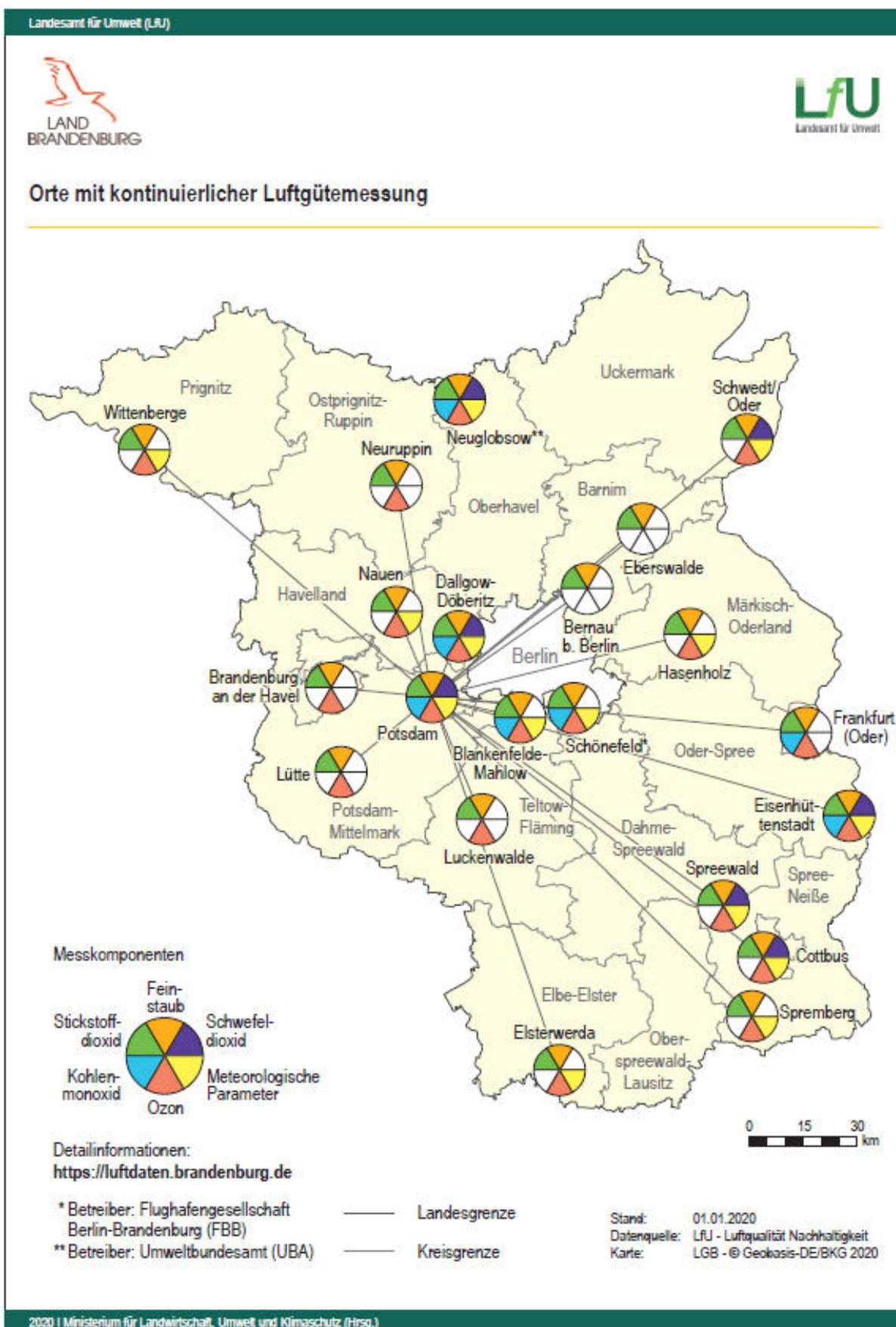


Abb. 48: Messstationen mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität. © Landesamt für Umwelt



Abb. 49: Messstation Spreewald mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im ländlichen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt

Zur Beurteilung der Belastung an feinen und ultrafeinen Partikeln hinsichtlich der beiden vorgeschlagenen Messstrategien, müssen Messungen im städtischen Hintergrund durchgeführt werden. Diese Messwerte charakterisieren die Umgebungsluft, die für die Exposition der Bevölkerung repräsentativ ist (im Sinne der 39. BImSchV). Vordergründig kommen hier Standorte in Betracht, die sich in den bevölkerungsreichen Gebieten Brandenburgs befinden.

Ein Beispiel hierfür wären die Hintergrundmessungen des LfU in der Stadt Cottbus. Neben einer Verkehrsstation in der Bahnhofstraße existiert eine Messstation für den städtischen Hintergrund. Für einen repräsentativen Datensatz wäre dieser Standort Cottbus, Gartenstraße zu empfehlen. Dieser rein städtische Hintergrund umfasst ein größeres Wohngebiet mit weitreichender Entfernung zur vielbefahrenen Bundesstraße 169 sowie zum Hauptbahnhof Cottbus (Abbildung 50).



Abb. 50: Messstation Cottbus, Gartenstraße mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im städtischen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt

Ein Standort aus dem Luftgütemessnetz für mobile Messungen der zweiten Messstrategie ist die Messstation in Spremberg (Abbildung 51). Die Nähe zum Kraftwerk Schwarze Pumpe, dem angrenzenden Tagebau sowie die überschaubare Entfernung zu den Kraftwerken Boxberg und Jänschwalde ermöglichen Sondermessungen zu feinen und ultrafeinen Partikeln in dieser Region.



Abb. 51: Messstation Spremberg mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im vorstädtischen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt

Mindestens eine stationäre Messstelle für das urbane Hintergrundaerosol sollte im Ballungsraum Berlin/Brandenburg eingerichtet werden. In dieser Region lebt der Großteil der Einwohner des Landes Brandenburg. Dieser Speckgürtel um Berlin wird auch in den kommenden Jahren der bevorzugte Lebensbereich der Menschen bleiben und bietet damit ideale Voraussetzungen für die Überwachung der Luftqualität.

Die erst Mitte 2019 eröffnete Messstation in Dallgow-Döberitz (Abbildung 52) ist ein Favorit. Durch die Verkehrsanbindungen der Bundesautobahn 10 im Westen, der Bundesstraße 5 im Süden sowie des Eisenbahnverkehrs werden zunehmend solche Wohngebiete im vorstädtischen Bereich der

Stadt Berlin geschaffen. In Abhängigkeit der Windrichtung wird der klassische städtische Hintergrund gemessen (Westwind) oder die Station befindet sich in der Ablufftahn der Großstadt Berlin (Ostwind).



Abb. 52: Messstation Dallgow-Döberitz mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im vorstädtischen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt

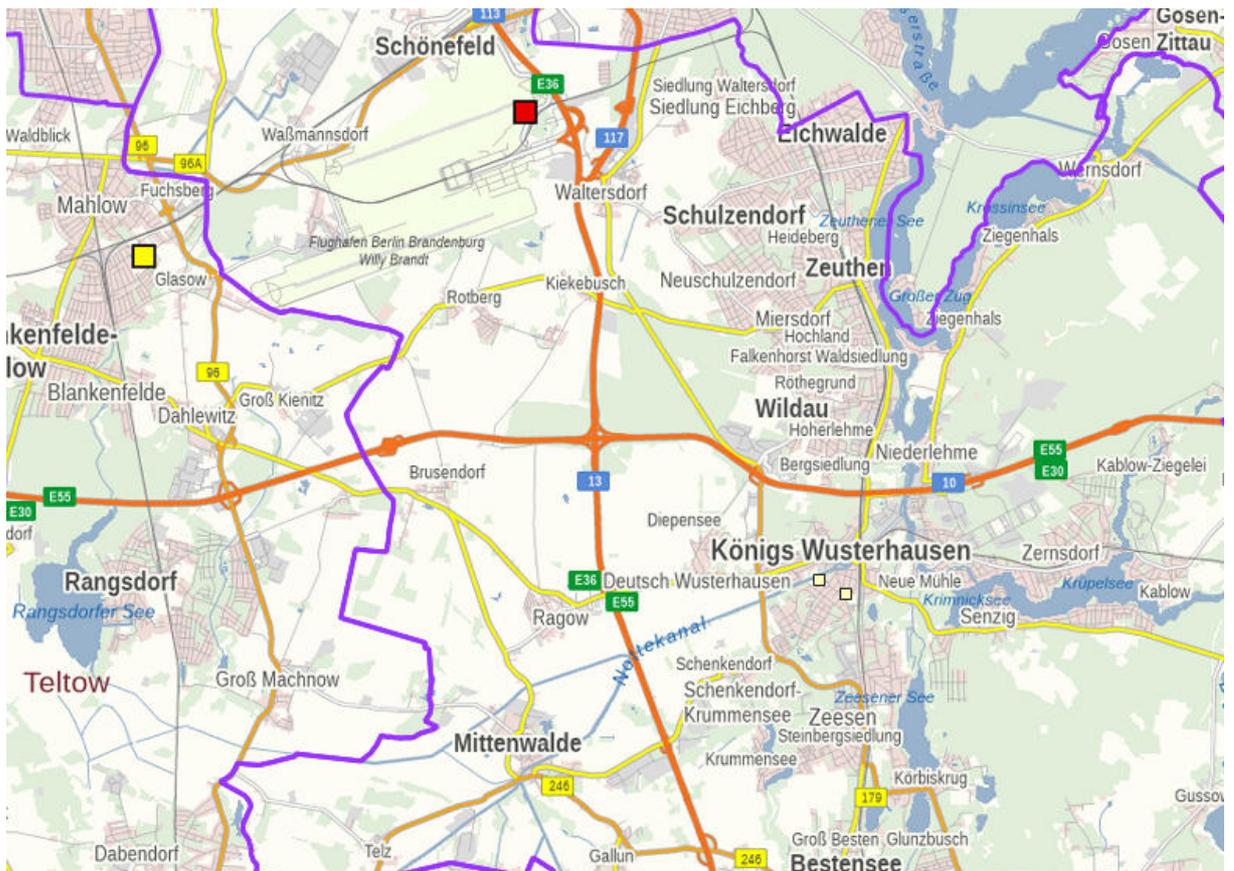


Abb. 53: Ehemalige Messstationen in Königs Wusterhausen mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im vorstädtischen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt

Hinsichtlich der ersten Messstrategie ist das städtische Gebiet der Stadt Königs Wusterhausen ebenfalls prädestiniert. In Anlehnung an die früheren Standorte Königs Wusterhausen, Cottbuser Straße (aktiv bis 2008) oder Goethe-/Wiesenstraße (Laufzeit 2008-2013) könnte an ähnlicher Stelle ein stationärer Messpunkt zur Überwachung der Luftqualität errichtet werden (Abbildung 53).

5.5 TEMPORÄRE MESSUNGEN IM VERURSACHERBEZOGENEN BEREICH

Wegen des hohen Aufwands wird eine große Anzahl von stationären Messstationen zur Erfassung der Partikelgrößenverteilung als nicht realistisch eingeschätzt. Deshalb sollten sich langfristige Messungen auf Kernmessstationen beschränken. Mit einer temporären Messstation können dennoch weitere verursacherbezogenen Untersuchungen durchgeführt werden.

Als Beispiel hierfür wären zeitbegrenzte Messungen an verkehrsnahen Standorten wie z.B. in Potsdam zu nennen. In Kombination mit einer städtischen Hintergrundstation (Messregime 1, Messpunkt westlich von Berlin) und dem ländlichen Hintergrund im Spreewald lassen sich auch über begrenzte Zeiträume von ein bis zwei Jahren die Beiträge des Straßenverkehrs zur Partikelbelastung abschätzen.

Messungen an verkehrsbeeinflussten Messstationen zeigen auch in Brandenburg die höchsten Konzentrationen für PM₁₀, PM_{2.5} und NO₂ (Abbildungen 54 und 55). Auch wenn durch die Umsetzung der in Luftreinhalteplänen definierten Minderungsmaßnahmen die Konzentrationen in den letzten Jahren reduziert wurden, könnten UFP-Messtellen an solchen verkehrsbeeinflussten Standorten errichtet werden. Bei der Auswahl sollten die Höhe der Konzentration der klassischen Luftschadstoffe, aber auch vorhandenen Datengrundlagen zur Analyse der Messergebnisse berücksichtigt werden.

Die Messstelle in Potsdam Zeppelinstraße ist verkehrsbeeinflusst und es liegen umfangreiche Informationen über das Fahrverhalten vor. Zudem ist sie eine Dauerverkehrsmessstelle. Hier erfolgten jüngst detailreiche mess- und modellierungstechnische Untersuchungen, die Grundlage für weitere Untersuchungen in Bezug auf UFP-Belastung sein können. Um Aussagen zur verkehrsbedingten Zusatzbelastung ableiten zu können, ist es erforderlich, auch den städtischen Hintergrund parallel zu messen.

Auf dieser Grundlage können Messungen zu den Verkehrsbeiträgen in brandenburgischen Großstädten ergänzt werden, um bereits existierende Ergebnisse zu bestätigen oder auch weitere Minderungsmaßnahmen zu untersuchen. Allerdings können sie in Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstandes als temporäre Messungen durchgeführt werden.

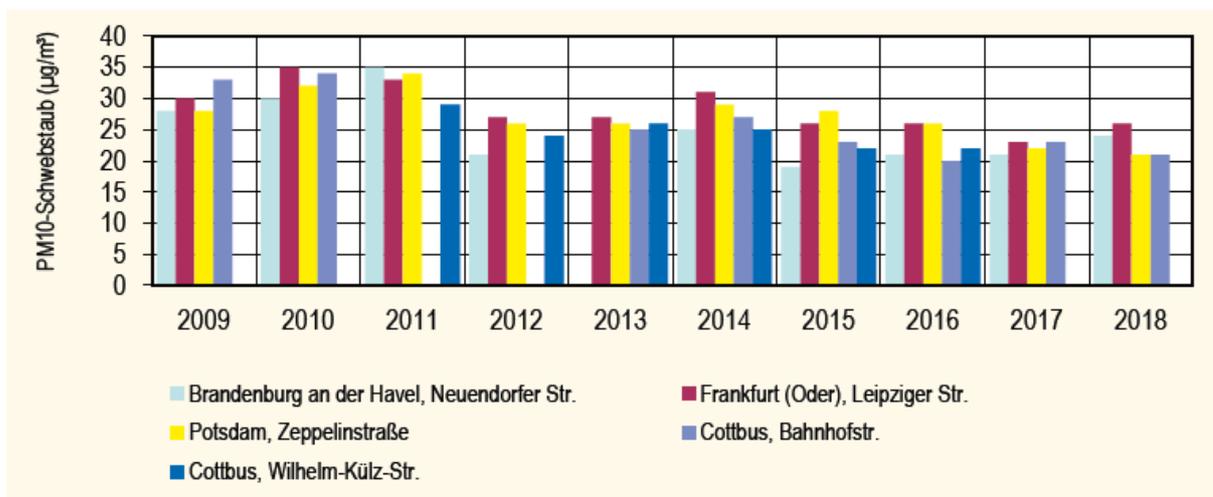


Abb. 54: Jahresmittelwerte der PM10-Konzentration an ausgewählten verkehrsbezogenen Messstellen im Land Brandenburg (Quelle: MLUK, LfU: Jahresbericht 2018 – Luftqualität in Brandenburg).

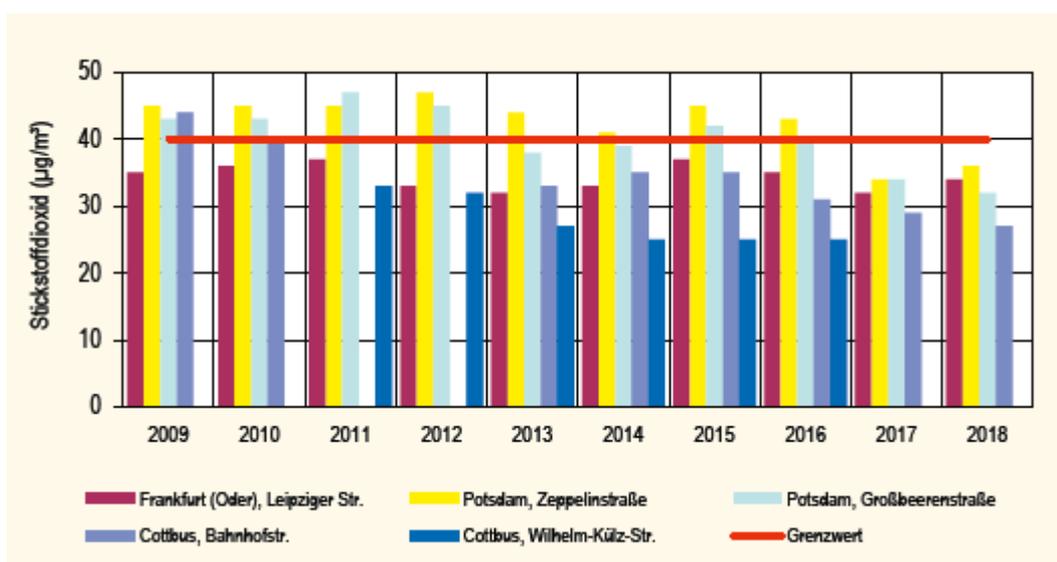


Abb. 55: Jahresmittelwerte der NO₂-Konzentration an ausgewählten verkehrsbezogenen Messstellen im Land Brandenburg (Quelle: MLUK, LfU: Jahresbericht 2018 – Luftqualität in Brandenburg).

Ein weiteres Beispiel zu temporären Messungen im verursacherbezogenen Bereich sind die Untersuchungen zum Einfluss des Flugverkehrs und des Flughafenbetriebes auf die Luftqualität auf die unmittelbare Umgebung. Diese Problematik wurde ausführlich in den Beispielen zu UFP- und BC-Emissionen in Kapitel 2.5 dargestellt. Durch temporäre Messungen um den Flughafen Berlin-Brandenburg, auch in Verbindung mit den Messungen der FBB sind Kurzezeitkampagnen denkbar.

6 MESSZEITRÄUME FÜR REPRÄSENTATIVE DATENSÄTZE

6.1 ZUSAMMENFASSUNG

Die Beurteilung der Luftqualität hinsichtlich der Belastung mit ultrafeinen Partikeln ist, solange keine Richt-, Grenz- oder Leitwerte vorliegen, nur über vergleichende Betrachtungen von Datenreihen von Messstationen unterschiedlicher Belastungsregimes möglich. Die Auswahl von Messstandorten und des Messzeitraums ist daher in Hinblick auf die Interpretation von großer Bedeutung.

Stationäre Messstationen sollen dabei die Grundlage für lange Zeitreihen bilden und die Betroffenheit der Menschen bezüglich ultrafeinen Partikeln charakterisieren. Aus diesen Daten sollen Erkenntnisse über die Immissionssituation gewonnen werden und der Bezug zu anderen Reihen hergestellt werden. Deshalb sind hier Zeiträume von etwa 10 Jahren einzuplanen, damit auch Trendanalysen durchgeführt werden können. Für temporäre Messungen können kürzere Zeiträume gewählt werden. Hier soll vor allem der Quellbezug hergestellt werden. Deshalb kann hier eine Mindestanforderung von einem Jahr als Messzeitraum betrachtet werden. Für epidemiologische Studien reicht es nicht aus, auf lange Sicht Daten zu generieren. Nur in Verbindung mit anderen Schadstoffparametern und einer Kohorte können solche Untersuchungen durchgeführt werden.

6.2 ERFORDERNIS REPRÄSENTATIVER DATENSÄTZE

Notwendigkeit und Umfang der Messung ultrafeiner Partikel im Land Brandenburg resultieren gegenwärtig vor allem aus einem erforderlichen Erkenntnisgewinn für die Umweltbehörden, u.a. für die Erfüllung der Informationsanforderungen der Öffentlichkeit, über die aktuelle Immissionssituation, über zu erwartende Trends und zu wesentlichen Quellen ultrafeiner Partikel und solcher Substanzen, die für die Interpretation von räumlich und zeitlich aufgelösten Messreihen von ultrafeinen Partikeln erforderlich sind. Die Beurteilung der Luftqualität hinsichtlich der Belastung mit ultrafeinen Partikeln ist, solange keine Richt-, Grenz- oder Leitwerte vorliegen, nur über vergleichende Betrachtungen von Datenreihen von Messstationen unterschiedlicher Belastungsregimes möglich. Die Auswahl von Messstandorten und des Messzeitraums ist daher in Hinblick auf die Interpretation von großer Bedeutung.

Die Errichtung einer oder bestenfalls mehrerer stationärer Messstationen zu ultrafeinen Partikeln und von Black Carbon kann die Grundlage bilden, einen zeitlich langen Datensatz zur Beschreibung der Exposition der Bevölkerung gegenüber diesen Schadstoffen zu gewinnen. Diese Messungen sollen nicht nur charakteristisch für den Messpunkt sein, sondern vielmehr sollen die Daten reprä-

sentativ für ein typisches Gebiet im Flächenland Brandenburg sein. Eine Vergleichbarkeit zu Messstationen mit qualitätsgesicherten Daten (z.B. GUAN-Messstationen) sollte außerdem sichergestellt werden.

Hinsichtlich der Auswahl von Messstandorten hat die Einwohnerdichte eine große Bedeutung, da sie mit den Emissionen pro Fläche und den daraus resultierenden Immissionen eng verbunden ist. Im Land Brandenburg besteht dabei das Erfordernis, sowohl den ausgeprägten Flächenland-Charakter mit den dörflichen Siedlungen, Klein- und Mittelstädten abzubilden, als auch repräsentative Aussagen zu Oberzentren und insbesondere zum verdichteten engeren Verflechtungsraum mit Berlin, einschließlich der Landeshauptstadt Potsdam, zu treffen. Neben geeigneten Messorten sind auch repräsentative Messzeiträume zu bestimmen. Nur auf diese Weise ist eine Beurteilung der raumzeitlichen Verhältnisse und der Bevölkerungsexposition landesweit möglich.

In Bezug auf die Quellstruktur für ultrafeine Partikel sollen Emissionssektoren wie Industrie, Gewerbe, motorisierter Verkehr und nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen aber ggf. auch der Ferntransport betrachtet werden. Die für belastbare Aussagen erforderlichen Messzeiträume unterscheiden sich je nach Quellsektor. Temporär eingerichtete Messstellen sind eine geeignete Möglichkeit zur Quellenanalyse.

Unter Berücksichtigung eines angemessenen Kosten-Nutzenverhältnisses und einer sich daraus abzuleitenden begrenzten Anzahl von UFP-Messstellen ist sowohl die Auswahl geeigneter Messstandorte als auch die Festlegung von Messzeiträumen sowohl für stationäre als auch für temporär betriebene Messstellen eine Schwerpunktaufgabe. In Kapitel 5.3 ist bereits ein plausibler und verhältnismäßiger Vorschlag möglicher Messorte für das Land Brandenburg vorgelegt worden.

6.3 ANFORDERUNGEN FÜR STATIONÄRE MESSUNGEN

Stationäre Messungen müssen die Immissionsstruktur eines repräsentativen Gebietes abbilden, dabei sollte auch die Exposition der Bevölkerung gegenüber den betrachteten Schadstoffen gegeben sein. Eine Interpretation von Daten der UFP-Belastung ist umso belastbarer, je länger die betrachteten Zeiträume sind. Entscheidend dabei ist nicht die Momentaufnahme einer Partikelgrößenverteilung oder einer Anzahlkonzentration. Vielmehr geben erst statistische Auswertungen über einen längeren Zeitraum belastbar Aufschluss über die Exposition der Bevölkerung hinsichtlich mittlerer und extremer UFP- und weiterer zu messender Komponenten, wie z.B. BC-Konzentrationen in einem repräsentativen Gebiet. Werden solche Daten über mehrere Jahre aufgenommen und ausgewertet, ergibt sich der Vorteil, dass der Einfluss der natürlichen meteorologischen Schwankungen auf das Immissionsniveau eingeschätzt werden kann. So gewonnene langjährige Kenngrößen repräsentieren auch hinsichtlich der meteorologischen Schwankungen mittlere Verhältnisse.

Schließlich können aus langfristig aufgenommenen Daten Trends berechnet werden. In einem zu kurz gewählten Zeitraum für Messungen können viele Faktoren das Niveau einer Größenverteilung oder die Höhe der Partikelanzahlkonzentration bestimmen. Erst über eine Zeitspanne von etwa 10

Jahren sind Trendanalysen hinsichtlich der UFP-Belastung sinnvoll. In Tabelle 6 sind Trendaussagen mehrerer Langzeitstudien aus Deutschland und Europa dargestellt. Die betrachteten Parameter sind die Rußmassenkonzentration bzw. der Absorptionskoeffizient, die berechneten Partikelanzahlkonzentrationen für den Größenbereich zwischen 20 und 800 nm und Messwerte für PM_{2.5}.

| Langzeitanalyse | Zeitraum | Region | Parameter | jährlicher Anstieg des Trends |
|----------------------------|-----------|------------------|------------------------|---|
| | | | | verkehrsnahe (3 Stationen): -11.3 % bis -5.0 % |
| GUAN-Daten | 2009-2018 | Deutschland | Rußmassenkonzentration | urbaner HG (5): -8.1 % bis -2.3 % |
| | | | | regionaler HG und Bergstationen (6): -7.8 % bis -1.7 % |
| GUAN-Daten | 2009-2018 | Deutschland | N _[20-800] | verkehrsnahe (3): -7.3 % bis -2.9 % |
| | | | | urbaner HG (7): -6.3 % bis -2.6 % |
| | | | | regionaler HG und Bergstationen (6): -4.2 % bis -0.2 % |
| Kutzner et al. (2018) | 2005-2014 | Deutschland | Rußmassenkonzentration | verkehrsnahe (7): -0.31, -0.15 |
| | | | | urbaner HG (4): -0.1, -0.02 |
| | | | | regionaler HG (1): 0.00 |
| Asmi et al. (2013) | 2001-2010 | Europa | N _[20-800] | Hintergrund (4): -4.6 % bis +1.6 % |
| Collaud Coen et al. (2013) | 2001-2010 | Europa | Absorptionskoeffizient | Hintergrund (4): -1.6 % bis 0.0 % |
| Bigi u. Ghermandi (2016) | 2005-2014 | Italien, Poebene | PM _{2.5} | verkehrsnahe (2): -6.4 % bis -4.6 % |
| | | | | urbaner HG (17): -8.1 % bis -0.4 % |
| | | | | regionaler HG (4): -4.9 % bis 0.0 % |
| Singh et al. (2018) | 2009-2016 | United Kingdom | Rußmassenkonzentration | verkehrsnahe (1): -8.0 % |
| | | | | urbaner HG (2): -5.0 % bis -4.7 % |
| | | | | regionaler HG (1): -7.7 % |

Tab. 6: Vergleich von Langzeitstudien der Parameter Rußmassenkonzentration, Partikelanzahlkonzentration und Feinstaub in Europa (Sun et al., 2019).

Langzeitanalysen verschiedener Parameter dienen dem Verständnis der atmosphärischen Prozesse und der Quellen von ultrafeinen Partikeln und Black Carbon. Ein detailliertes und für den Erkenntnisgewinn sehr wesentliches Beispiel zu einer Auswertung langer Messreihen ist in Abbildung 56 gegeben. Dabei werden die Daten von 16 GUAN-Messstationen hinsichtlich der jährlichen prozentualen Änderungen für die letzten zehn Jahre gezeigt. Dargestellt sind die äquivalente Rußmassenkonzentration (eBC) und verschiedene Partikelgrößenklassen. Der Trend der Partikelgrößenklasse N₍₃₀₋₂₀₀₎ kann als Indikator für die Emissionen vom Straßenverkehr betrachtet werden.

Die Abnahme betrug zwischen fünf Prozent und knapp einem Prozent pro Jahr für die Anzahlkonzentration dieses Größenbereiches. Starke Rückgänge konnten für den urbanen, verkehrsnahen Bereich zu den Hauptverkehrszeiten von 6 bis 18 Uhr beobachtet werden. Für städtische Hintergrundmessstationen liegen die Werte bei minus fünf bis minus drei Prozent pro Jahr.

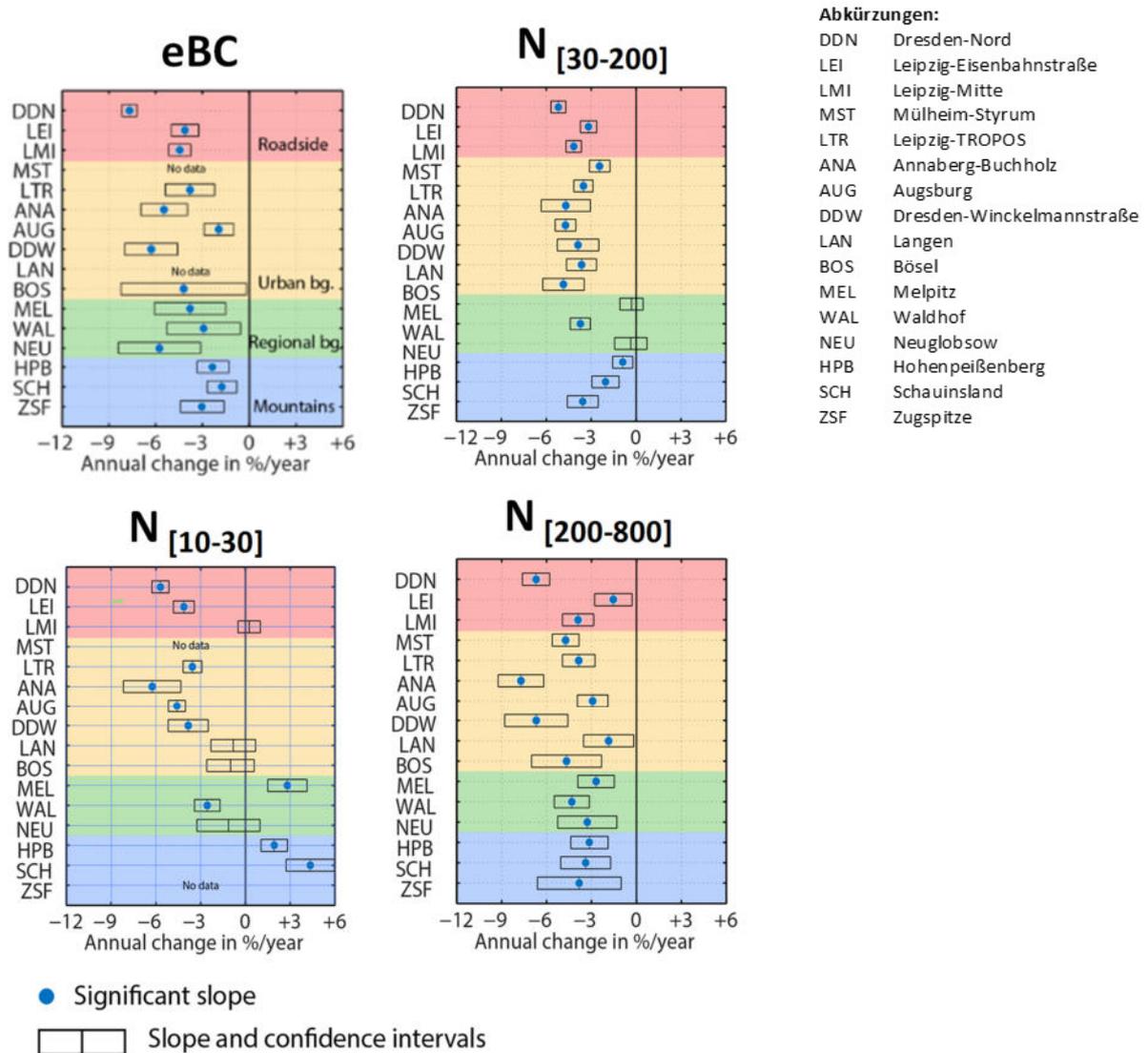


Abb. 56: Trendanalyse für verschiedene Größenklassen von ultrafeinen Partikeln und Ruß über einen Zeitraum von 10 Jahren, klassifiziert nach Standort und Standortkategorie (Sun et al., 2019).

Die Rußmassenkonzentration nimmt jährlich etwa zwischen drei und sechs Prozent für alle Gebietskategorien ab. An der verkehrsnahen Messstation Dresden-Nord ist sogar eine Abnahme von acht Prozent pro Jahr zu verzeichnen.

Aus dem Größenbereich zwischen 10 nm und 30 nm lassen sich zwei Rückschlüsse ziehen. Einerseits konnte an verkehrsnahen Messstationen sowie im städtischen Hintergrund eine Abnahme von drei bis sechs Prozent pro Jahr verzeichnet werden. Dies resultiert aus der Erneuerung der Fahrzeugflotte des Straßenverkehrs und der Einführung von Minderungsmaßnahmen. Andererseits ist diese Partikelklasse ein Indikator für Partikelneubildungsereignisse, also eine natürliche Form einer Partikelquelle. Vor allem im ländlichen Hintergrund sowie an den Bergstationen sind in den letzten Jahren mitunter Zunahmen von bis zu vier Prozent pro Jahr zu erkennen. Eine Ursache

könnten vermehrte Partikelneubildungsereignisse in den letzten Jahren sein. Eine tendenzielle Abnahme der Partikelanzahlkonzentrationen im regionalen Hintergrund sowie auf den Bergstationen könnte damit durch Partikelneubildung auf ein konstantes Niveau ausgeglichen werden.

Trends in der Größenklasse N(200-800) stehen für Aussagen zum Ferntransport von Aerosolen. Generelle Abnahmen der Partikelanzahlkonzentration sind auch für den Größenbereich des gealterten Aerosols festzustellen. Durch großräumige Verbesserungen der Luftqualität sinkt der Anteil an Hintergrund-Partikelmassenkonzentration jährlich weiter ab. Anhand der 10jährigen Datenreihen konnten hier Raten von etwa minus drei bis minus sechs Prozent pro Jahr abgeleitet werden.

Generell konnten über den 10jährigen Zeitraum Minderungen sowohl für die Partikelanzahl als auch die Rußmassenkonzentration für ganz Deutschland festgestellt werden, wobei dies für alle Stationskategorien gilt.

Ferner bilden Langzeitmessungen die Grundlage für eine Ursachenanalyse. Mithilfe zusätzlicher temporärer Messungen kann der Einfluss bestimmter Quellgruppen herausgearbeitet werden.

6.4 ANFORDERUNGEN FÜR TEMPORÄRE MESSUNGEN

Die Länge des Messzeitraums spielt nicht nur für Langzeitbeobachtung und Trendanalysen von UFP eine entscheidende Rolle. Auch für temporäre Messungen darf der Zeitraum nicht zu kurz gewählt werden, damit eine Interpretation der Daten ermöglicht wird.

Im zukünftigen Messkonzept im Land Brandenburg sollen temporäre Messungen vor allem zur Charakterisierung bestimmter Quellgruppen genutzt werden. Solche Messungen werden also in Quellnähe stattfinden; z. B. sollten für die Bestimmung des Anteils des Straßenverkehrs an der UFP-Belastung Messzeiträume von mindestens einem Jahr gewählt werden. So können sowohl jahreszeitliche Unterschiede bestimmt werden als auch Vergleiche mit anderen Schadstoffen erfolgen.

Der Messzeitraum von einem Jahr stellt eine Mindestanforderung dar. Je nach Einfluss der Quellgruppe können deutlich längere Messzeiträume erforderlich sein um belastbare Ergebnisse zu erhalten. Dabei spielt die direkte Abhängigkeit von den meteorologischen Verhältnissen die entscheidende Rolle. Die Untersuchung des Ferntransportes aus Osteuropa ist ein Beispiel dafür.

Während es in einem Winterhalbjahr vermehrt zu stagnierenden Ostwetterlagen kommt, kann es im darauffolgenden Jahr zu wenigen oder auch gar keinen solcher großräumigen Wetterlagen kommen. Eine Ausdehnung des Messzeitraumes auf mindestens ein weiteres Winterhalbjahr erweist sich somit als sinnvoll.

Als weiteres Beispiel für den großen Einfluss der meteorologischen Bedingungen auf Analysen zur UFP-Belastung ist das EU-Projekt OdCom – „Objektivierung der Geruchsbeschwerden im sächsisch-tschechischen Grenzgebiet – Ein Beitrag zur Ursachenanalyse und Untersuchung der gesundheitlichen Folgen“. Hier sollten vor allem die Winterhalbjahre unter dem Einfluss einer südöstlichen

Strömung untersucht werden. Jedoch war die zweite Winterperiode des ursprünglichen Messzeitraumes nur wenig durch diese Wetterlagen geprägt. Deshalb wurde das Projekt kurzfristig auf einen dritten Zeitraum verlängert. Somit sind Messzeiträume länger als ein Jahr zu wählen, sofern die Betrachtung der Partikelbelastung abhängig von der Meteorologie ist.

Zur sinnvollen Interpretation der Ergebnisse temporärer Messungen ist selbstverständlich der Bezug zu anderen Datenreihen notwendig. Solche Zeitreihen sollten auch nicht nur im gleichen Messzeitraum vorhanden sein, sondern sollten längere Zeiträume umfassen.

6.5 ANFORDERUNGEN AN MESSUNGEN FÜR EPIDEMIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die Bereitstellung von UFP-Daten für epidemiologische Untersuchungen kann als nicht trivial betrachtet werden. Wirkungsforschungen können nur dann betrieben werden, wenn es

- a) einen guten Datensatz an ultrafeinen Partikeln gibt (zeitlich hochaufgelöste Werte der Partikelgrößenverteilung) und
- b) in dem betrachteten Untersuchungsgebiet eine Kohorte vorhanden ist.

Aufgrund von epidemiologischen Studien an anderen Orten (z.B. Augsburg), kann ein Gefährdungspotential mit lokalen UFP-Messdaten gut abgeschätzt werden. NO₂ und Ruß sind Schadstoffgrößen, die ebenfalls als Messdaten vorliegen sollten. Ein weiterer Aspekt ist die Qualität der Messungen wie sie in der CEN/TS 177434 beschrieben ist.

7 AUSWERTESTRATEGIE UND DATENVERÖFFENTLICHUNG

7.1 ZUSAMMENFASSUNG

Die Auswertung von Daten und deren Speicherung soll so erfolgen, dass eine weitere wissenschaftliche Auswertung möglich ist. In den Luftgütemessnetzen reicht es für die Auswertung, bestimmte Größenbereiche zu Größenklassen zusammenzufassen. In den Luftgütemessnetzen von Sachsen und Hessen werden zu diesem Zweck sieben Größenklassen als Abbild der Partikelgrößenverteilung berechnet. Ihre Werte werden als 7 Schadstoffklassen behandelt und so in der jeweiligen Datenbank hinterlegt. Jedoch sollen die ursprünglich erfassten Partikelgrößenverteilungen in ihrer vollen Auflösung für detaillierte Untersuchungen erhalten bleiben. Hinsichtlich der BC-Konzentrationen erfolgt eine Speicherung von Halbstundenmittelwerten in der Datenbank.

Für die Prüfung der Plausibilität von Messdaten eignen sich Konturplots, Zeitreihen sowie mittlere Partikelgrößenverteilungen, welche mit anderen Bezugsreihen verglichen werden können.

Eine Veröffentlichung von Messdaten kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Während im sächsischen Messnetz die UFP-Daten einmal jährlich ausgewertet werden und daraus ausschließlich Berichte erstellt werden, erfolgt in Hessen, ermöglicht durch weit höheren personellen Einsatz, die Veröffentlichung von Messdaten auf tagesaktueller Basis im Internet.

Aus dem Workshop zum Thema des Messkonzeptes für ultrafeine Partikel ging aus den Erfahrungen der Bundesländer Sachsen und Hessen hervor, dass Messungen der Größenverteilungen ultrafeiner Partikel ohne eine wissenschaftliche Begleitung nur schwer durchführbar sind. Die vollautomatische Erfassung und Qualitätssicherung von Partikelgrößenverteilungen ist nicht möglich. Vielmehr ist ein Einsatz von Personal zur Plausibilisierung und Qualitätssicherung unumgänglich.

7.2 GRUNDLEGENDE AUSWERTESTRATEGIEN

Die Messdaten sollen in regelmäßigen Abständen ausgewertet (falls nicht schon mittels der ACTRIS/GUAN „Near-Real-Time“ Analyse) und in Berichten zusammengefasst werden. Dazu kann das für die klassischen Schadstoffe vorhandene Berichtswesen erweitert werden, in dem die Berichte täglich, monatlich und jährlich erstellt werden. Da derzeit kein gesetzlich vorgeschriebener Grenzwert für UFP existiert, kann die Auswertung unabhängigen und vergleichenden Kriterien folgen. Es wird empfohlen sich an den Auswertesystemen der Bundesländer Sachsen und Hessen zu orientieren.

Die Auswertung kann u. a. Grundlagen für die Ursachenanalyse schaffen. Dazu werden geeignete größenklassenbezogene statistische Kennwerte als Partikelanzahlkonzentration in $1/\text{cm}^3$ benötigt,

die auch eine Untersuchung der nichtflüchtigen Partikel beinhaltet. Um die Datenmenge zu minimieren, sollten für interne Datenbanken Stundenmittelwerte oder auch Halbstundenmittelwerte verwendet werden. Die Rohdaten sollten dennoch für eventuelle, zeitlich höher aufgelöste Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Die hoch größen- und zeitaufgelösten Daten sollten zusätzlich auf einer zentralen Datenbank (z.B. GUAN) für weitere wissenschaftliche Studien hinterlegt werden.

Schadstoffklassen

MPSS-Messgeräte sollten Größenverteilungen idealerweise in 32 Kanälen pro Partikelgrößen-Dekade messen. Das bedeutet, bei einem zu erfassenden Größenbereich zwischen 10 und 800 nm müssen 32 Kanäle zwischen 10 und 100 nm sowie weitere 32 Kanäle zwischen 100 und 1000 nm vermessen werden. Damit gibt es 64 Stützstellen für die Partikelgrößenverteilung.

Diese können zu Größenklassen zusammengefasst werden. Bei der Auswahl der Größenklassen muss definiert sein, welche Größenklassen für welche Interpretation erforderlich ist. Eine Auswertung von UFP erfolgt auf der Grundlage verschiedener Quelltypen und der damit verbundenen modalen Betrachtung (siehe Abb. 57, Tab. 7).

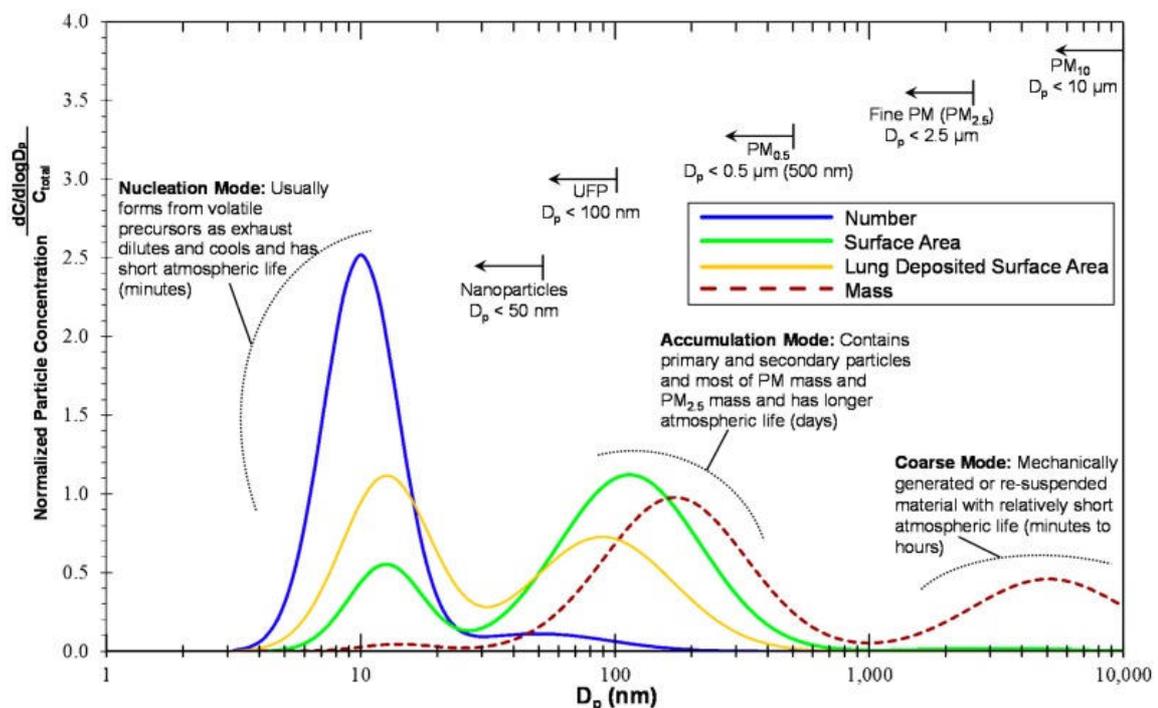


Abb. 57: Trimodale Partikelgrößenverteilungen unter Verwendung verschiedener Partikelmetriken (Anzahl=Numer, Oberfläche=Area, Lungenablagerungsfläche=Lung Deposited Surface Area und Masse=Mass), D_p = Partikeldurchmesser, UFP = ultrafeine Partikel und PM = Partikel. Quelle: Kittelson, 2015

Zur Analyse des Partikelneubildungsprozesses, in denen leichtflüchtige Partikel einen hohen Anteil bilden (Nucleation Mode) müssen Größenklassen kleiner 20 nm ausgewertet werden. Für die Identifizierung von verkehrsbedingten Partikelemissionen ist eine Auswertung der Größenklassen zwischen 30 und 200 nm erforderlich.

Es wird empfohlen die gemessenen Anzahlkonzentrationen in Anlehnung an die Auswertungen in Sachsen und Hessen in die folgenden sieben Größenklassen zu aggregieren (Tabelle 7).

| Abkürzung | Partikelgrößenbereich, Anwendung |
|-----------|----------------------------------|
| N1 | 5 – 10 nm * |
| N2 | 10 – 20 nm, Partikelneubildung |
| N3 | 20 – 30 nm, Partikelneubildung |
| N4 | 30 – 50 nm, Verkehrs aerosol |
| N5 | 50 – 70 nm, Verkehrs aerosol |
| N6 | 70 – 100 nm, Verkehrs aerosol |
| N7 | 100 – 200 nm, Verkehrs aerosol |
| N8 | 200 – 800 nm, Ferntransport |

Tab. 7: 7 Größenklassen, wie sie im Luftgütemessnetz Sachsen gespeichert werden (Hessen analog, Klasse N8: 200-500 nm, Sachsen misst an mehreren Stationen zusätzlich die Größenklasse N1: 5-10 nm), Quelle: LfULG.

Die Anzahlkonzentrationen sollen zudem für jede Größenklasse separat nach flüchtiger und nicht flüchtiger Partikel ausgegeben werden. Ein Datensatz beinhaltet dementsprechend $7 \times 2 = 14$ Werte (Größenklassen N2 bis N8). Zusätzlich können Sondergrößen berechnet werden, wie sie ebenfalls in der Datenbank des Messnetzes Sachsen gespeichert werden (Tabelle 8). Mit diesen Berechnungen können Informationen zur Partikeloberfläche sowie zur Partikelmasse für verschiedene Größen- und Anwendungsbereiche erhalten werden.

Geeignete statistische Kennwerte zur Beurteilung sind Halbstundenmittelwerte, Stundenmittelwerte, Tagesmittelwerte, Monatsmittelwerte und Jahresmittelwerte. Die Berechnung der Medianwerte ist prinzipiell möglich und zu empfehlen, allerdings ist der Mittelwert zur Untersuchung einzelner Ereignisse vorzuziehen. Partikelneubildungsereignisse zum Beispiel führen hier zu unterschiedlichen Bewertungen.

| Abk. | Bemerkung |
|----------|---|
| N_PS1 | Partikeloberfläche in $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ von Partikeln $<800 \text{ nm } D_p$ ($\sim <1 \mu\text{m } D_a$) |
| N_PM1 | Partikelmasse in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ von Partikeln $<800 \text{ nm } D_p$ ($\sim <1 \mu\text{m } D_a$), entspricht in etwa PM₁ |
| N_PM0.25 | Partikelmasse in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ von Partikeln $<200 \text{ nm } D_p$ ($\sim <0,25 \mu\text{m } D_{ae}$), entspricht in etwa PM_{0.25} |
| N_PM0.12 | Partikelmasse in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ von Partikeln $<100 \text{ nm } D_p$ ($\sim <0,12 \mu\text{m } D_a$), = Masse UFP |
| N_PM_200 | Partikelmasse in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ von Partikeln von 30 nm bis $200 \text{ nm } D_p$, Anwendung Umweltzone |

Tab. 8: Zusätzliche Größenklassen mit Anwendungsbereich, wie sie im Luftgütemessnetz Sachsen gespeichert werden Quelle: LfULG.

Typische Größenverteilungen sind in Abbildung 58 gezeigt. Für verkehrsnahen Messtationen treten die wesentlichen Unterschiede im ultrafeinen Partikelgrößenbereich (Partikeldurchmesser $< 100 \text{ nm}$) auf. Hier spielt die hohe Anzahl an sehr kleinen Partikeln eine Rolle. Für den Akkumulationsmode hingegen gleichen sich alle Stationstypen an (größer 200 nm).

Doch nicht nur typische Niveaus von Partikelgrößenverteilung des Straßenverkehrs können Abbildung 58 entnommen werden. Auch sind hier mittlere Verteilungen für den städtischen Hintergrund, den ländlichen Hintergrund sowie typische Partikelgrößenverteilung an Bergstation unterschiedlicher Höhe zu sehen.

Da ultrafeine Partikel nicht mit Grenzwerten reguliert sind, existiert keine klare Richtlinie zur Bewertung von verschiedenen Partikelanzahlkonzentrationen. Vergleiche mit anderen Messtationen der gleichen Gebietskategorie können Hinweise auf die Höhe der Belastung geben. Typische Niveaus, sowohl von Anzahlgrößenverteilungen als auch Anzahlkonzentrationen können nur aus langfristigen Messungen abgelesen werden.

So ergeben sich mittlere Werte (Punkte in Abb. 59) der Anzahlkonzentrationen für den Partikelgrößenbereich zwischen 10 und 800 nm in Abbildung 59 und für 60 bis 300 nm in Verbindung zur Rußmasse in Abbildung 60.

Die mittleren Anzahlkonzentrationen liegen für den gesamten Partikelgrößenbereich 10-800 nm für den urbanen, verkehrsnahen Bereich bei etwa 12.000 Partikeln pro cm^3 , im urbanen Hintergrund liegt sie zwischen 6.000 und 10.000 Partikeln pro cm^3 , im ländlichen Hintergrund bei 2.000 bis 5.000 Partikel pro cm^3 und auf den Bergstationen unterhalb 2.000 Partikel pro cm^3 .

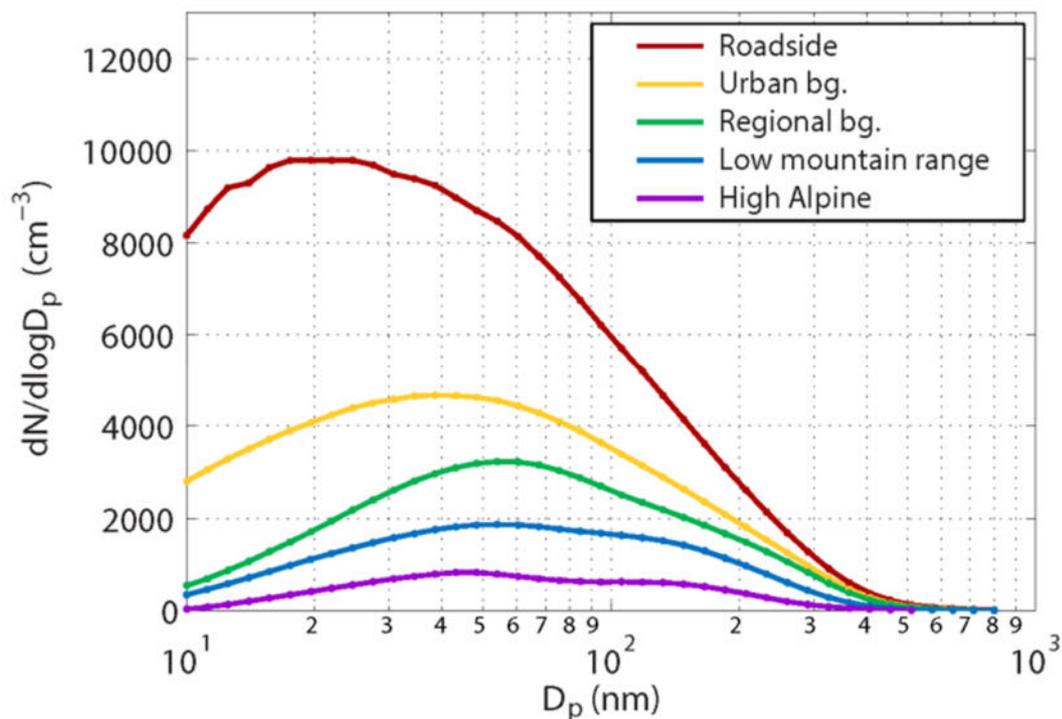


Abb. 58: Mittlere Partikelgrößenverteilungen für die einzelnen Standortkategorien: Roadside = verkehrsnah, Urban bg. = urbaner Hintergrund, Regional bg. = ländlicher Hintergrund, Low mountain range = Mittelgebirge und High Alpine = Hochgebirge Quelle: Sun et. al 2019.

Die mittleren Rußmassenkonzentrationen liegen für den urbanen, verkehrsnahen Bereich bei etwa $3 \mu\text{g}$ pro m^3 , im urbanen Hintergrund liegt sie zwischen 1 und $2 \mu\text{g}$ pro m^3 , im ländlichen Hintergrund bei knapp $1 \mu\text{g}$ pro m^3 und auf den Bergstationen deutlich unterhalb $1 \mu\text{g}$ pro m^3 .

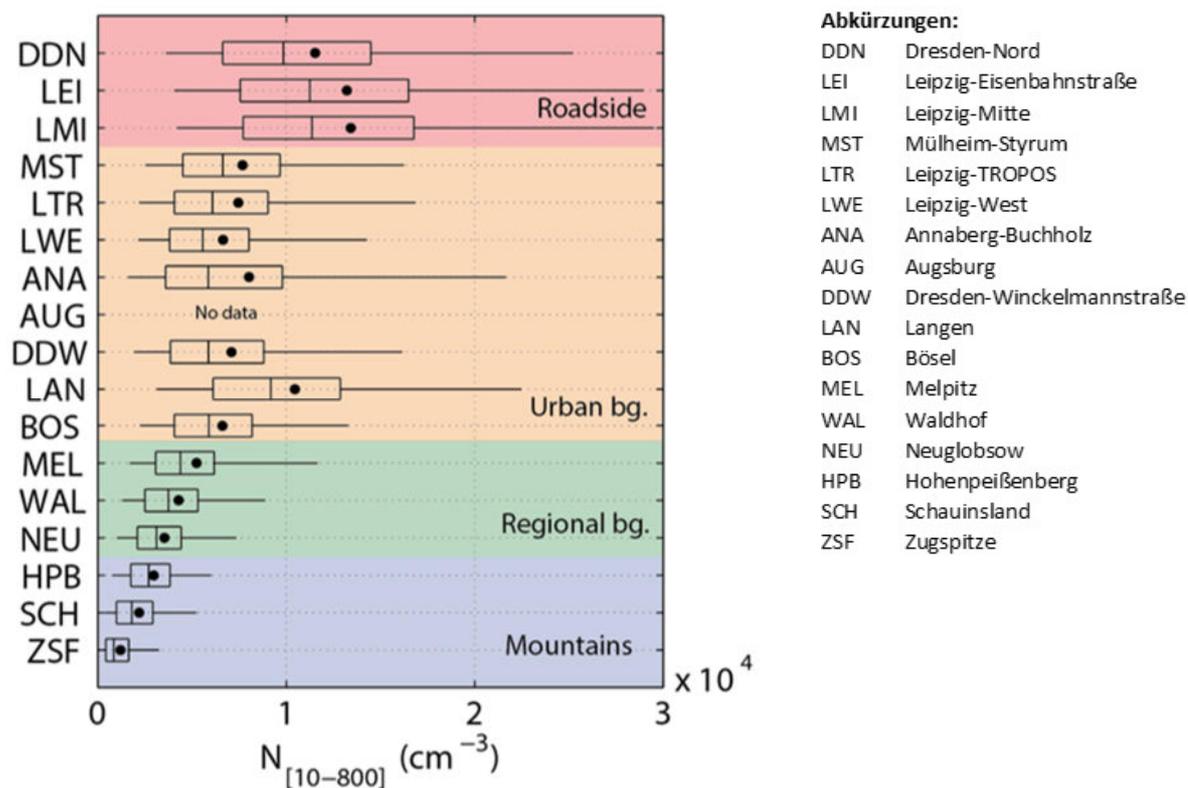


Abb. 59: Mehrjährige statistische Werte der Gesamtanzahlkonzentration zwischen 10 und 800 nm für 17 Messstationen des GUAN.

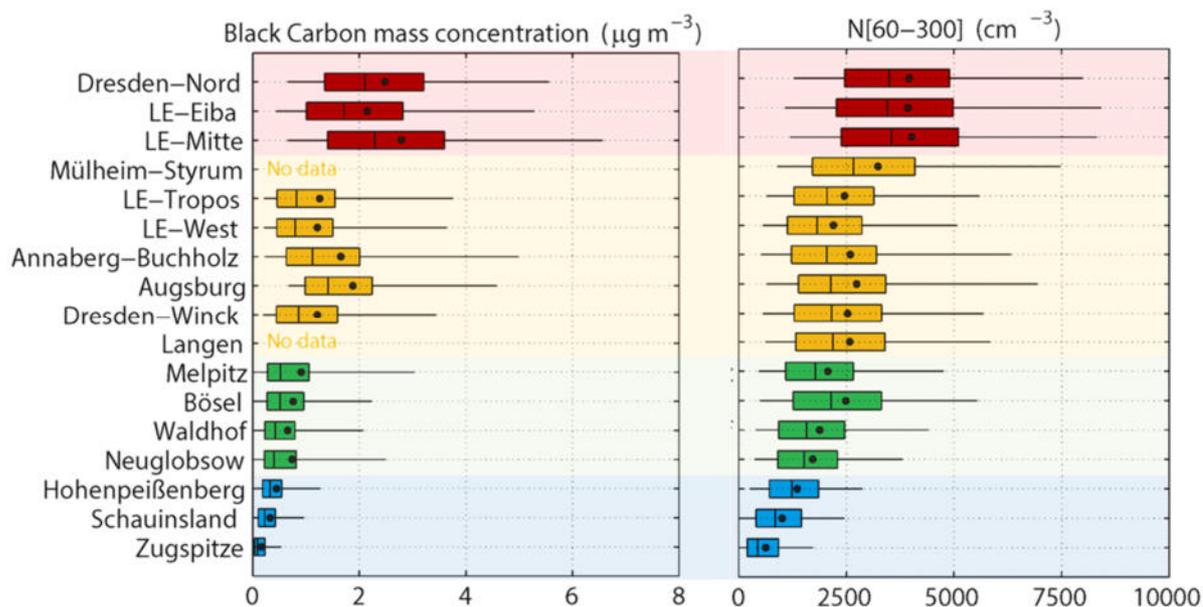


Abb. 60: Mehrjährige statistische Werte der Rußmassenkonzentration (links) sowie Anzahlkonzentration zwischen 60 und 300 nm (rechts) für 17 Messstationen des GUAN.

Für den korrelierenden Partikelgrößenbereich zwischen 60 und 300 nm liegen die Kenngrößen für den urbanen, verkehrsnahen Bereich bei etwa 4.000 Partikeln pro cm^3 , im urbanen Hintergrund zwischen 2.000 und 3.000 Partikeln pro cm^3 , im ländlichen Hintergrund bei 2.000 bis 2.500 Partikel pro cm^3 und auf den Bergstationen unterhalb 2.000 Partikel pro cm^3 . Dabei wird deutlich, dass vor allem im urbanen, verkehrsnahen Bereich die Anzahlkonzentration Partikel kleiner 60 nm dominiert wird. Weitere statistische Werte sind der Medianwert (senkrechter Strich) sowie die Perzentile 25 und 75 (Boxwerte) und die Perzentile 5 und 95 (horizontale Striche) in den Abbildungen 59 und 60.

Eine anschauliche Darstellungsform der Partikelgrößenverteilung ist der Konturplot. Er dient nicht nur der visuellen Darstellung, er bildet auch als Sichtkontrolle die Grundlage für eine Plausibilitätskontrolle. In der TROPOS-Datenerfassung ist bereits ein Konturplot enthalten, welcher nach jeder Messung aktualisiert wird. Zwei Beispiele für Konturplots sind in den Abbildungen 61 und 62 gegeben. Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Tage im Juni 2019 für die urbane, verkehrsbeeinflusste Messstationen Leipzig-Eisenbahnstraße. Während in der ersten Grafik die lokalen Quellen eine Rolle bei der Partikelbelastung spielen, dominiert der Prozess der Partikelneubildung am zweiten Beispieltag die Größenverteilung.

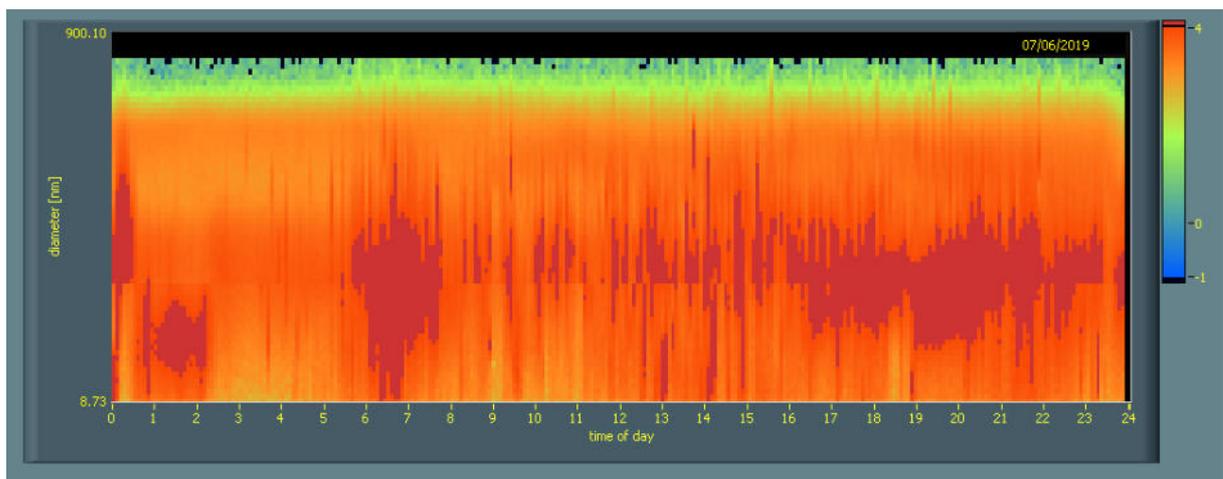


Abb. 61: Beispiel eines Konturplots von Partikelgrößenverteilungen, Messstandort im urbanen Bereich mit lokalen Partikelbelastungen.

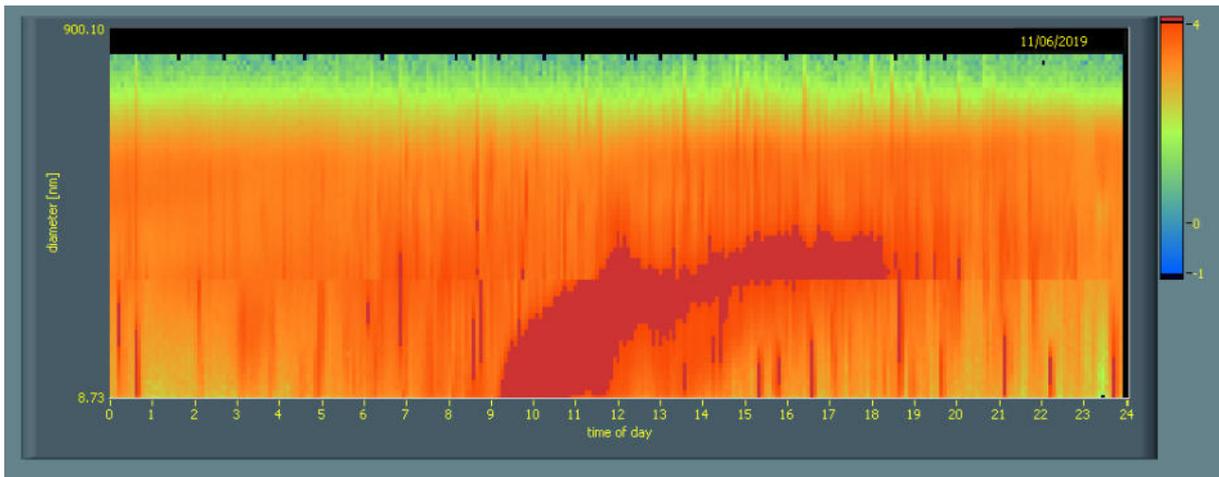


Abb. 62: Beispiel eines Konturplots von Partikelgrößenverteilungen, Messstandort im urbanen Bereich mit Partikelneubildungsereignis.

Zusätzlich können Zeitreihenanalysen durchgeführt werden, in denen Zeitreihen von Aktivitätsdaten wie Kfz- oder Flugverkehr gegenübergestellt werden. So können Ursachenanalysen durchgeführt werden, in denen der Einfluss des Verkehrs oder des Ferntransportes quantifiziert werden kann.

Eine weitere Methode zur Ursachenanalyse ist die chemische Analyse der Hauptbestandteile von UFP-Partikeln. So können detektierte Substanzen Emittenten zugeordnet werden können (z.B. Black Carbon dem Flug oder Kfz-Verkehr). Dies kann als Sonderauswertung erfolgen. Solche Untersuchungen wurden beispielsweise vom sächsischen LfULG für die Messstelle Dresden Nord (Schlesischer Platz) durchgeführt.

Für die Speicherung von Daten ultrafeiner Partikel kann das internationale ACTRIS-Format (Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure) verwendet werden, welches auch in der GUAN-Datenbank genutzt wird. Die Daten sind dann über das „World Data Center for Aerosols“: <http://ebas.nilu.no/> abrufbar.

Die Veröffentlichung von UFP-Messwerten geschieht aktuell in den Ländermessnetzen von Sachsen und Hessen ganz unterschiedlich. Im Gegensatz zu den klassischen Schadstoffen, welche dem Nutzer tagesaktuell zur Verfügung stehen, besteht für UFP keine Pflicht einer einheitlichen Darstellungsform. So werden in Sachsen hauptsächlich Berichte in Bezug auf ultrafeine Partikel veröffentlicht, während das Messnetz in Hessen, vorangetrieben durch die dortigen Bürgerinitiativen, ein deutlich größeres Spektrum an Daten zur Verfügung stellt.

7.3 DATENVERÖFFENTLICHUNG AM BEISPIEL SACHSEN

Im Messnetz Sachsen werden die Messgeräte zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung, der gleichzeitigen Aufnahme der Partikelanzahlkonzentration sowie zur Erfassung der Black Carbon-Konzentration von der staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) betrieben. Black-Carbon-Messwerte fließen direkt als Stundenmittelwerte in die Messnetzdatenbank ein und stehen dann für behördliche Auswertungen sofort zur Verfügung. Anders sieht es bei den Partikelgrößenverteilungen und den Anzahlkonzentrationen aus. Diese Daten werden als Jahresdatensätze an TROPOS übermittelt, wo sie im ersten Quartal des Folgejahres prozessiert und evaluiert werden. Durch Plausibilitäts- und Qualitätskontrollen werden zudem Fehlmessungen aus den Datensätzen entfernt. Im Anschluss erfolgt grundsätzlich die Berechnung in die sieben Größenklassen zwischen 10 und 800 nm als Stundenmittelwerte sowie eine Konvertierung in das Bayern-Hessen-Format. Letztendlich werden die fertigen Daten an die BfUL zurückgeschickt und in die Datenbank eingepflegt. Der Aufwand für diese externe Datenbearbeitung beträgt mindestens einen Monat für die derzeit 6 Messstationen des Messnetzes in Sachsen.

Mit diesen endvalidierten Daten werden Auswertungen durchgeführt, die dann ausschließlich in Berichten veröffentlicht werden. Eine Near-Real-Time-Veröffentlichung dieser Messdaten durch die Landesbehörde ist nicht möglich, da die Datensätze erst als Jahresdatensatz am Anfang des Folgejahres vorliegen.

Als Beispiele der Veröffentlichung von Berichten des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Landes Sachsen können genannt werden:

- a) Bericht über 20 Jahre UFP-Messung in Sachsen. Dieser erscheint in Kürze und stellt die Entwicklung der Luftqualität in Sachsen dar.
- b) Abschlussbericht zu begleitenden Untersuchungen der Umweltzone Leipzig. Die Partikel-daten (Partikelklassen zwischen 30 und 200 nm) wurden hier in Verbindung mit der äquivalenten Rußmassenkonzentration (BC) und anderen Luftschadstoffen verwendet, um eine Verursacheranalyse durchzuführen (Beispiel Abbildung 63)
- c) Veröffentlichungen zur Luftqualität bei besonderen Einzelereignissen. Beispiele dafür sind das Abrennen von Silvesterfeuerwerk oder Verbrennungen während der Walpurgisnacht (Beispiel von veröffentlichten Daten in Abbildung 64).

Durch weitere Auswertungen von Messdaten entstehen auch die Grundlagen für Fachvorträge zur UFP-Belastung, die nicht nur an lokale Interessenten gerichtet sind. Auch regionale und nationale Zielgruppen sind Interessenten solcher Veranstaltungen.

Die ermittelten Partikel- und Black Carbon-Daten dienen jedoch nicht nur dem internen Messnetzgebrauch und der allgemeinen Information der Öffentlichkeit. Vor allem für die Forschung bilden sie eine wesentliche Grundlage. So werden die Daten aus Sachsen für epidemiologische Studien bereitgestellt. Eine Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum in München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt ist ein Beispiel dafür. Auch für nationale Forschungsprojekte

oder EU-Projekte werden Daten aus dem Messnetz Sachsen verwendet und in Berichten veröffentlicht. Beispielhaft sei hier das EU-Projekt „UFIREG“ angeführt. Auch auf internationaler Basis bilden diese UFP- und BC-Daten die Grundlage für wissenschaftliche Studien, durch die Weitergabe der Daten an internationale Datenbanken durch TROPOS, stehen sie Forschern weltweit zur Verfügung.

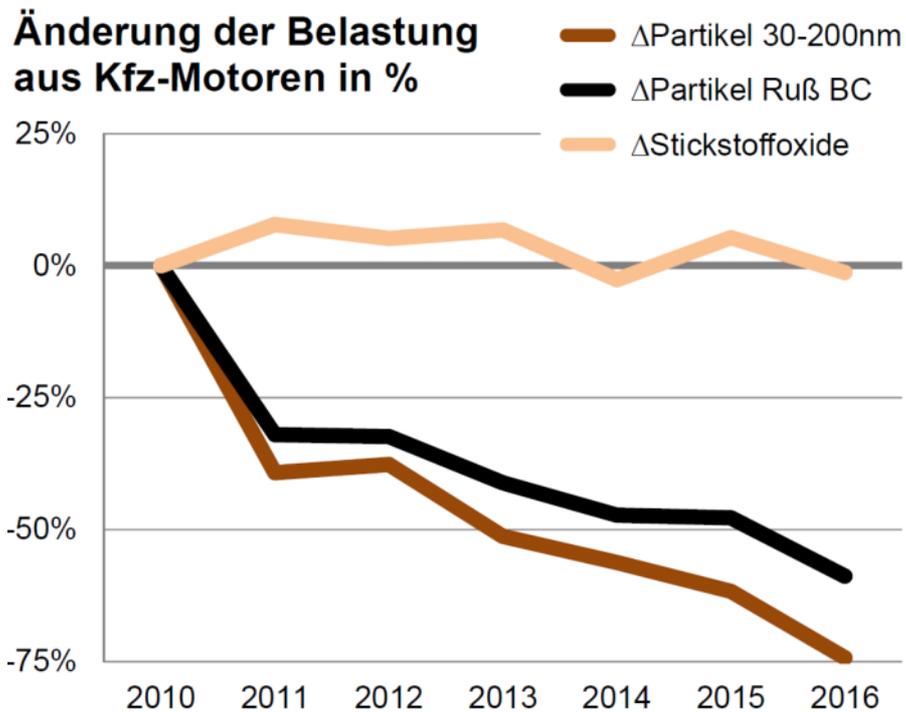


Abb. 63: Relative Änderung des Immissionsanteils durch die Kfz-Motoremissionen an der Messstation Leipzig-Mitte von 2010 bis 2016 (Quelle: LfULG).

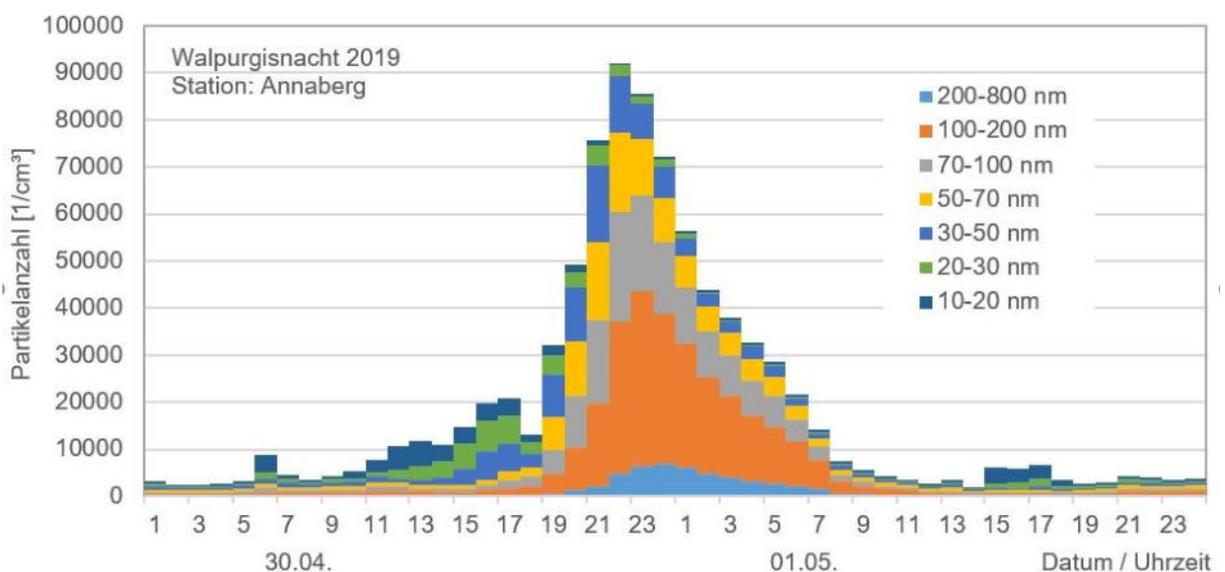


Abb. 64: Einfluss der Walpurgisfeuer 2019 in Annaberg-Buchholz auf die Partikelanzahlkonzentration in der Luft für verschiedene Partikelgrößenklassen (Quelle: LfULG).

7.4 DATENVERÖFFENTLICHUNG AM BEISPIEL HESSEN

Am Großflughafen Frankfurt/Main und in dessen Umfeld werden die UFP an insgesamt 5 (mit CPC 9) Messstellen gemessen. Im Hinblick auf die Ausgestaltung des Messprogramms und die Veröffentlichung der Messwerte hat in der Vergangenheit neben dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) und der Fraport AG auch das Umwelt- und Nachbarschaftshaus - Gemeinnützige Umwelthaus GmbH, eine vom Land Hessen finanzierte Einrichtung, erheblichen Einfluss genommen. Insbesondere soll Bürgerinitiativen und der Öffentlichkeit ein zeitnaher Zugang zu Umweltinformationen gewährt werden. Zwischen den drei beteiligten Stellen wurden dazu Vereinbarungen, u.a. über die Finanzierung von erforderlichen Personalstellen, geschlossen. Im Hinblick auf die Zielstellung wurde festgelegt, UFP-Daten in Hessen zeitnah auszuwerten und zu veröffentlichen. Dies kann realisiert werden, indem qualifiziertes Personal, das für diesen Zweck im HLNUG bereitgestellt wurde, die tägliche Datenverfügbarkeit prüft, die Plausibilitäts- und Qualitätskontrolle sowie die Validierung der Messdaten regelmäßig durchführt. Durch eigene umfangreiche Programmierungen im R-Format werden sog. Konturplots erstellt, sodass zeitnah zu den Messungen dreidimensionale Darstellungen der Messdaten erzeugt werden können, die für andere Luftschadstoffe nicht erforderlich sind und als Standardwerkzeuge in Messnetzdatenbanken nicht zur Verfügung stehen.

Diese tagesaktuellen und plausibilitätskontrollierten Daten stehen für weitere Berechnungen und Auswertungen zur Verfügung, aus denen analog zum Land Sachsen Berichte erstellt werden. Die genannten Datenprüfungen und Datenflüsse erfordern eine hohe Qualifikation der technischen und wissenschaftlichen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen.

Die Messdaten der Partikelgrößenverteilung und der Anzahlkonzentration werden tagesaktuell in der Datenbank des Luftmessnetzes verwaltet, zu Halbstundenmittelwerten aggregiert und es erfolgt die Berechnung der sieben Größenklassen zwischen 10 und 800 nm. Mit Hilfe eigener programmiertechnischer Lösungen können diese Konzentrationen in den jeweiligen Größenklassen analog den klassischen Schadstoffen im Internet der Öffentlichkeit verfügbar gemacht werden. Dies beinhaltet die Darstellung der aktuellen Messdaten als Zeitreihe, wahlweise als Diagramm oder Tabelle (Abbildungen 65 und 66).

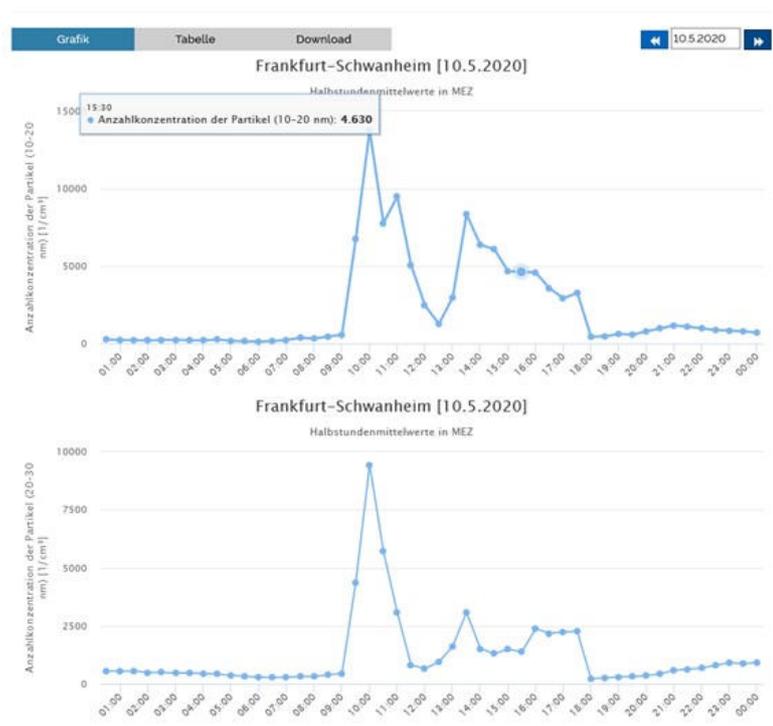


Abb. 65: Beispiel für Zeitreihen von UFP-Klassen für die Online-Veröffentlichung durch die HLNUG. Quelle: <https://www.hlnug.de/?id=9231&station=0619>, 10.05.2020)

| | | Anzahlkonzentration der Partikel | | | | | | |
|------------|---------|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Datum | Uhrzeit | 10-20 nm [1/cm³] | 20-30 nm [1/cm³] | 30-50 nm [1/cm³] | 50-70 nm [1/cm³] | 70-100 nm [1/cm³] | 100-200 nm [1/cm³] | 200-500 nm [1/cm³] |
| 10.05.2020 | 00:30 | 261 | 567 | 1186 | 1285 | 1703 | 2259 | 625 |
| 10.05.2020 | 01:00 | 221 | 546 | 1172 | 1271 | 1733 | 2298 | 626 |
| 10.05.2020 | 01:30 | 221 | 561 | 1149 | 1258 | 1751 | 2325 | 608 |
| 10.05.2020 | 02:00 | 194 | 491 | 1013 | 1140 | 1605 | 2170 | 577 |
| 10.05.2020 | 02:30 | 239 | 498 | 898 | 975 | 1380 | 1919 | 531 |
| 10.05.2020 | 03:00 | 238 | 471 | 843 | 930 | 1304 | 1829 | 510 |
| 10.05.2020 | 03:30 | 216 | 480 | 848 | 897 | 1251 | 1764 | 508 |
| 10.05.2020 | 04:00 | 196 | 447 | 852 | 890 | 1257 | 1767 | 503 |
| 10.05.2020 | 04:30 | 260 | 424 | 839 | 888 | 1257 | 1796 | 512 |
| 10.05.2020 | 05:00 | 171 | 376 | 808 | 878 | 1263 | 1820 | 512 |
| 10.05.2020 | 05:30 | 143 | 324 | 739 | 841 | 1245 | 1792 | 532 |
| 10.05.2020 | 06:00 | 129 | 296 | 718 | 849 | 1235 | 1779 | 524 |
| 10.05.2020 | 06:30 | 156 | 278 | 680 | 813 | 1197 | 1762 | 538 |
| 10.05.2020 | 07:00 | 229 | 283 | 607 | 737 | 1092 | 1697 | 565 |
| 10.05.2020 | 07:30 | 370 | 326 | 608 | 714 | 1053 | 1679 | 587 |
| 10.05.2020 | 08:00 | 318 | 321 | 603 | 707 | 1035 | 1657 | 599 |
| 10.05.2020 | 08:30 | 455 | 393 | 610 | 670 | 1002 | 1700 | 656 |
| 10.05.2020 | 09:00 | 563 | 447 | 673 | 674 | 993 | 1745 | 676 |
| 10.05.2020 | 09:30 | 6756 | 4376 | 1496 | 694 | 965 | 1738 | 647 |
| 10.05.2020 | 10:00 | 13761 | 9430 | 4071 | 965 | 1034 | 1767 | 649 |
| 10.05.2020 | 10:30 | 7774 | 5703 | 3164 | 919 | 1019 | 1762 | 641 |

Abb. 66: Beispiel für Tabellenwerte von UFP für die Online-Veröffentlichung durch die HLNUG. Quelle: <https://www.hlnug.de/?id=9231&station=0619>, 10.05.2020)

7.5 VERÖFFENTLICHUNG VON GUAN-DATEN

GUAN ist ein kooperatives Atmosphärenbeobachtungsnetzwerk, mit dessen Hilfe klimarelevante Wirkungen sowie die Partikelbelastung auf den Menschen untersucht werden können. Es werden Partikelgrößenverteilungen und die Rußmassenkonzentration an mehreren Stellen in Deutschland gemessen.

In Zusammenarbeit mit der Wissenschaft werden die Rohdaten von den meisten Messstationen am TROPOS prozessiert und in endvalidierte Daten umgewandelt. Diese Daten werden momentan nach Absprache zentral auf der Datenbank EBAS gespeichert. Diese für das Global Atmosphere Watch (GAW) Programm betriebene Datenbank wird durch das Norwegische Institut für Luftforschung (NILU) unterhalten.

Sowohl die Partikel- als auch die Rußdaten werden in verschiedenen Verarbeitungsstufengespeichert. Die Rohdaten des Messinstruments werden als Level 0-Daten abgelegt. Prozessierte Daten in Originalzeitauflösung und in Umgebungsbedingungen werden als Level 1-Daten bezeichnet. Die finalen Größenverteilungen (und Rußmassenkonzentrationen) sind die Level 2-Daten. Diese Daten sind qualitätsgesichert, gespeichert als Stundenmittel und auf Standardbedingungen (0°C und 1013 hPa) korrigiert.

Eine Zusammenstellung der vorhandenen Messdaten auf EBAS ist außerdem auf der Internetpräsenz <http://wiki.tropos.de/index.php/GUAN> vorhanden. Dort kann durch Folgen der einzelnen Links zu den Jahresdatensätzen der jeweiligen Messstation gelangt werden.

Die Messdaten des Aerosolnetzwerkes GUAN sind über die Webseite der EBAS-Datenbank abrufbar. Auf der Benutzeroberfläche unter <http://ebas.nilu.no/> kann unter Framework (Abbildung 67, links oben) das Netzwerk GUAN ausgewählt werden. Als nächster Schritt erfolgt die Länderwahl in der Mitte und es werden auf der rechten Seite die deutschen Messstationen aufgelistet.

Nach Auswahl der UBA-Messstation Neuglobsow erscheinen in der unteren Reihe weitere Auswahlmöglichkeiten zum Instrumententyp, hier MPSS (SMPS) und den wählbaren Komponenten in der mittleren Spalte. Hier wird nun die Partikelgrößenverteilung (*particle number size distribution*) als Parameter ausgesucht. Da die Aerosolmessungen mit einem PM₁₀-Vorabscheider betrieben werden sollten, ist als Matrix-Parameter „pm10“ zu nehmen.

Ist diese Auswahl getan, können im Anschluss die Datensätze gewählt werden. Im Beispiel für Neuglobsow wird hier der Konturplot der Partikelgrößenverteilung im Jahr 2019 dargestellt (Abbildung 68). Zudem können auch die Metadaten zu diesen Daten heruntergeladen werden.

The screenshot displays the EBAS data portal interface. At the top, logos for NILU, emep, WMO Global Atmosphere Watch, ACTRIS, AMAP, OSIPAR, HELCOM, and the European Union are visible. The main navigation bar includes 'Home', 'Acknowledgment', 'Data policy', a search field, and 'Login'.

The search filters are as follows:

- Framework [1]:** GUAN
- Country [2]:** Germany
- Station [15]:** Leipzig-Eisenbahnstrasse
- Instrument type [7]:** v-smps
- Component [9]:** aerosol_absorption_coefficient
- Matrix [6]:** pm10_non_volatile

Additional filters include 'From' and 'To' set to '>>All'. The 'Available datasets' count is 10545. A 'Reset' button and a 'List datasets' button are present.

The 'Map (Populate) (Show large)' section shows a map of Europe with a red pin over Germany. The 'Additional resources' section lists:

- Near-Real-Time data
- European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP-CCC)
- Site descriptions - EMEP
- WMO Global Atmosphere Watch (GAW)
- Site descriptions - GAW
- Air mass trajectories
- Data submission
- About EBAS
- EBAS User Feedback Tracker

 Social media icons for Facebook and Twitter are also shown.

Abb. 67: Datenveröffentlichung von UFP des GUAN in der EBAS-Datenbank. Quelle: <http://ebas.nilu.no/>

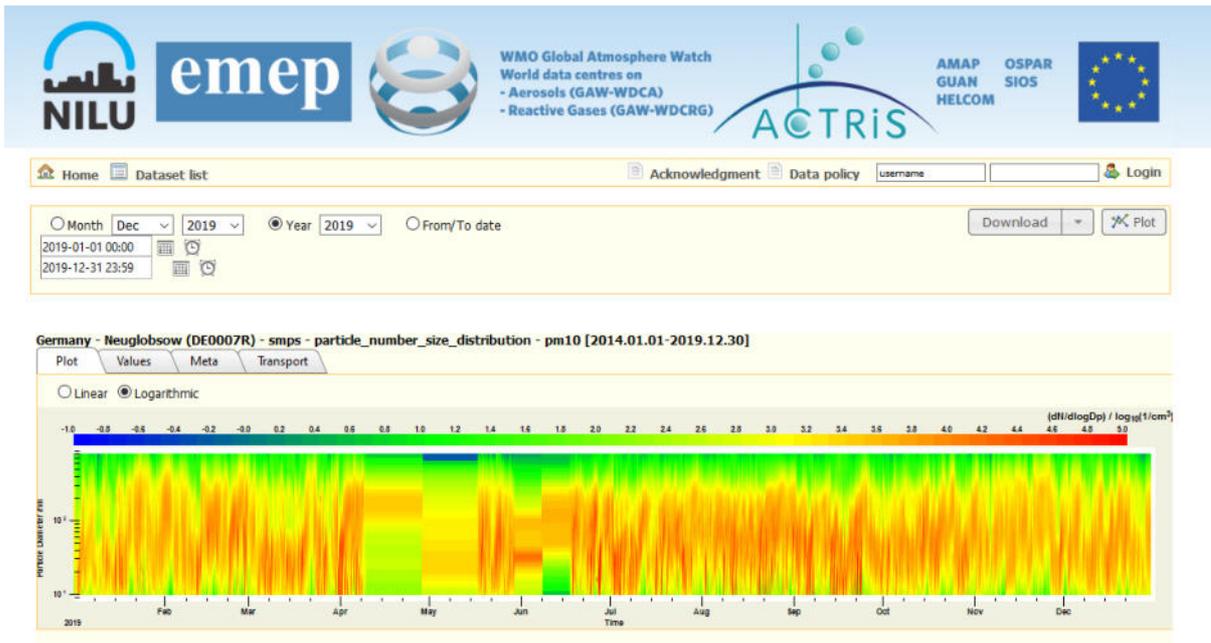


Abb. 68: Datenveröffentlichung von UFP des GUAN in der EBAS-Datenbank – Beispiel Jahresdaten 2019 für Neuglobsow. Quelle: <http://ebas.nilu.no/>

Zukünftig werden die GUAN-Daten weiterhin freiwillig in der EBAS-Datenbank gespeichert. Nach einer in Planung befindlichen Kooperationsvereinbarung soll eine eigene GUAN-Datenbank beim Umweltbundesamt eingerichtet werden, in der alle Partner ihre hoch großen- und zeitaufgelösten Daten ablegen können.

Im zukünftigen Kooperationsvertrag sind für die Datenbank

- a) die allgemeinen Grundsätze,
- b) die Metadaten,
- c) der Datenformat – Import
- d) der Datenformat – Export
- e) die Datenweitergabe an Dritte
- f) die Datenupdates – Qualitätsstufen, sowie
- g) die Handhabung der historischen GUAN-Daten

beschrieben.

7.6 MÖGLICHKEITEN FÜR BRANDENBURG

Der Vergleich zwischen den Messnetzen in Sachsen und Hessen zeigt, dass auf ganz unterschiedliche Weise mit angesammelten UFP-Daten umgegangen wird.

Ähnlich dem Messnetz in Sachsen sollte sich in der Anfangszeit zunächst auf die Veröffentlichung in Form von Berichten fokussiert werden. Dies könnte in Jahresberichten erfolgen, aber auch in

anlassbezogenen Sonderauswertungen. Zeitreihen oder auch Konturplots würden sich für etwaige Episoden als Darstellung eignen. Andere statistische Kenngrößen wie Monats- und Jahresmittelwerte könnten ebenfalls einfließen.

In Anlehnung an die Veröffentlichung der GUAN-Daten in der internationalen Datenbank EBAS wäre es empfehlenswert, Konturplots der Partikelgrößenverteilung auf Tagesbasis auf der Website zur Luftgüte zu hinterlegen. Diese Tagesfiles werden bei TROPOS mit automatischen Inversionsprogrammen erstellt und könnten direkt übernommen werden (Abbildungen 61 und 62).

Es wäre auch für das Land Brandenburg grundsätzlich denkbar, in Anlehnung an die Veröffentlichung in Hessen UFP-Daten in Near-Real-Time bereitzustellen. Dies ist mit erheblich höherem Aufwand an Personal und finanziellen Mitteln verbunden und bedarf einer umfangreichen Vorbereitung.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Erfassung und Veröffentlichung der Daten über das Netzwerk GUAN, wie sie am Beispiel der UFP-Messstationen Leipzig im Kapitel 8.3 gezeigt ist.

8 KONKRETE UMSETZUNGEN IM LAND BRANDENBURG

8.1 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel werden letztendlich die konkreten Umsetzungen der Messstrategie zu ultrafeinen Partikeln und Black Carbon diskutiert. Für die zu bestimmenden Parameter ist eine Übersicht zu geeigneten Geräten gegeben. Es werden die gängigen Partikelgrößenspektrometer mit den wichtigsten Eigenschaften aufgelistet. Mitunter werden dabei nicht alle Kriterien zu einer richtlinienkonformen Messung der Partikelgrößenverteilung erfüllt. Die Auswahl an Messgeräten zur Bestimmung der Rußmassenkonzentration ist hingegen weniger groß. Da die in GUAN benutzten Modelle MAAP 5012 nicht mehr hergestellt werden, eignen sich Aethalometer für Absorptionsphotometermessungen.

Ein Einbau der Gerätschaften ist allerdings nicht trivial. Die meisten Partikelgrößenspektrometer sind Standalone-Geräte und können nicht einfach in ein verfügbares Rack eingeschoben werden. Zusätzlich sind Umbauarbeiten an den Messcontainern notwendig, da eigene Probenahmeleitungen benötigt werden und die Erzeugung eines Durchflusses mit Vakuumpumpen notwendig ist. Es sind also nicht nur Investitionskosten für Geräte einzuplanen, auch Umbauarbeiten an der bestehenden Infrastruktur sind nötig.

Ist dann die Einrichtung der Messgeräte abgeschlossen, müssen die anlaufenden Messdaten hinsichtlich der Plausibilität und der Qualität überprüft werden. Dies erfordert personellen Aufwand. Während die technische Wartung mit einem Tag pro Monat und Messstation beziffert werden kann, sind für Plausibilitätsprüfungen mindestens vier Stunden pro Woche und für die Datenvalidierung mindestens eine Woche Arbeitszeit pro Quartal für einen qualifizierten Mitarbeiter nötig. Die Mindestanforderung für die Bereitstellung qualitätsgesicherter Daten beträgt damit also zwei Kalendermonate pro Messstation im Jahr.

8.2 GEEIGNETE MESSGERÄTE

Die Erfassung von feinen und ultrafeinen Partikeln ist als anspruchsvolle Aufgabe zu bewerten, die keinen gesetzlichen Richtlinien unterliegt. Es ist daher umso wichtiger, dass die eingesetzten Messgeräte plausible Messwerte liefern. Im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen kann und muss somit eine hohe Datenqualität erzielt werden.

Für die zukünftige Überwachung von UFP-Werten im Luftgütemessnetz Brandenburg könnten die folgenden Geräte verwendet werden.

Partikelgrößenverteilung:

Die namhaften Hersteller von Partikelgrößenspektrometern sind TSI, Grimm, Palas sowie die Eigenbauten des TROPOS. In bereits existierenden Messnetzen werden vor allem TSI-Geräte (Hessen – HLNUG) sowie TROPOS-Geräte (GUAN, UBA, Sachsen - LfULG) verwendet. Doch noch nicht alle Gerätetypen erfüllen die Anforderungen der technischen Spezifikation 17434 zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Außenluft. Jedoch wird ihre Erfüllung in naher Zukunft angestrebt. Dies ist zum Beispiel der Fall für die TSI-Partikelgrößenspektrometer.

Die Tabelle 9 gibt einen Überblick über Hersteller von Mobilitätsspektrometern. Weiterhin enthält die Tabelle 9 Kerninformationen zu erfassten Größenbereichen, zur Auflösung hinsichtlich Zeit und Größenkanälen, den ungefähren Dimensionen sowie weiteren charakteristischen Merkmalen. Die Abbildung 69 zeigt bildlich die derzeitige Modellbreite an Partikelgrößenspektrometern.

| Hersteller | Modell | Größenbereich / Klassierung | Auflösung | Dimension (L x B x H, in mm) | Bemerkungen |
|------------|-------------|-----------------------------|--|---|--|
| TSI | <i>3938</i> | 10-550 nm | Zeitliche Auflösung von 5 Minuten empfohlen Auch schnelle Scans bis auf 15 Sekunden möglich (auf Kosten der Zählstatistik) Maximal 128 Bins pro Dekade | 400 x 280 x 670 Plus Stellplatz für Partikelzähler | Standalone-Gerät, besitzt kein eigenes Rack CEN-Konformität wird angestrebt Größenbereich noch nicht bis auf 800 nm ausgeweitet Keine Trocknung der Probenahmeströme, Nachrüstung erforderlich Radioaktive Quelle fest verbaut Vakuumpumpe zur Durchflusserzeugung nötig Diffusionsverluste im Gerät sind definiert Partikelzähler werden mit Butanol betrieben Zählpulse können vom CPC abgegriffen werden (Datenübertragung) Interne Datenaufzeichnung Externer Messrechner mit TSI-Datenerfassungssoftware empfehlenswert, windowsbasiert, minimale Anforderungen Messnetzerfahrung in Hessen und an europäischen Messstandorten Jährliche Prüfung nach CEN/TS erforderlich |

| | | | | | |
|--------------|-------------------|-----------|--|-----------------|---|
| Grimm | <i>5.420</i> | 10-800 nm | Scandauer von 5 Minuten empfehlenswert 64 Bins pro Dekade | Höhe 480 DMA | Als 19"-Einschübe vorhanden CEN-Konformität nicht gegeben Keine Trocknung der Probenahmeströme vorhanden Diffusionsverluste im Gerät sind nicht definiert Interne Pumpen sind vorhanden (keine Pumpe nötig) Partikelzähler werden mit Butanol betrieben Zählpulse können vom CPC abgegriffen werden (Datenübertragung) Radioaktive Quellen frei wählbar Externer Messrechner, Software vom Hersteller wird benötigt Einsatz bereits in der Umgebung des Flughafens BER Jährliche Prüfung nach CEN/TS erforderlich |
| Palas | <i>DEMC 2000X</i> | 10-800 nm | Zeitliche Auflösung von 5 Minuten empfohlen | 300 x 500 x 400 | Standalone-Geräte, ohne eigenes Rack CEN-Konformität nicht gegeben Keine Trocknung der Probenahmeströme vorhanden Interner Datenlogger zur Datenaufzeichnung Software wird mitgeliefert |

| | | | | | |
|---------------|-----------------|-----------|---|---|---|
| | | | <p>Schnelles Scannen unterhalb einer Minute möglich</p> <p>Maximal 64 Bins pro Dekade</p> | | <p>Partikelzähler werden mit Butanol betrieben</p> <p>Kein Abgreifen der Pulse am CPC möglich</p> <p>Interne Pumpen vorhanden</p> <p>Radioaktive Quelle frei wählbar</p> <p>Wenig Erfahrung mit den Geräten, keine Messnetzerfahrung</p> <p>Jährliche Prüfung nach CEN/TS erforderlich</p> |
| TROPOS | <i>Eigenbau</i> | 10-800 nm | <p>Je 2.5 Minuten für up und down Scan (komplett 5 Minuten)</p> <p>32 Bins pro Dekade</p> | <p>570 x 440 x 600</p> <p>Mit Untergestell Höhe 1550 mm</p> | <p>Standalone-Gerät, eigenes Rack</p> <p>CEN-konform</p> <p>Größenbereich zwischen 10 und 800 nm</p> <p>Trocknung der Probenahmeströme auf unter 40 Prozent</p> <p>Radioaktive Quelle frei wählbar</p> <p>Vakuumpumpe zur Durchflusserzeugung nötig</p> <p>Diffusionsverluste im Gerät sind definiert</p> <p>Partikelzähler werden mit Butanol betrieben</p> <p>Pulse vom Zähler können abgegriffen werden (Datenübertragung)</p> |

| | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | <p>Externer Messrechner mit TROPOS-Datenerfassungssoftware nötig (Steuerrechner), windowsbasiert, Anforderungen: i5-Prozessor mit 8 GB RAM Arbeitsspeicher</p> <p>Messnetzerfahrung in Sachsen und in GUAN</p> <p>Jährliche Prüfung nach CEN/TS erforderlich</p> |
|--|--|--|--|--|--|

Tab. 9: Hersteller und Charakteristika von Partikelgrößenspektrometern.

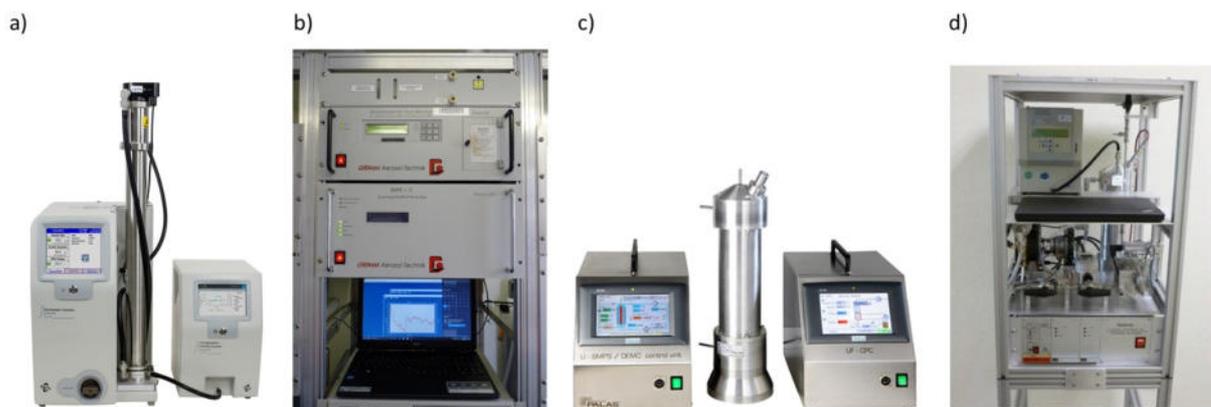


Abb. 69: Produktpalette von Partikelgrößenpektrometern: a) TSI Modell 3938, b) Grimm Modell 5.420, c) Palas U-SMPS und d) TROPOS.

Die meisten Geräte zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung sind eigenständige Geräte (Standalone-Geräte), die nicht ohne weiteres in vorgegebene Racks in Containern eingebaut werden können. Vielmehr benötigen sie ein eigenes Rack bzw. einen eigenen Stellplatz. Lediglich die Spektrometer der Firma Grimm gibt es aktuell in der Konfiguration, dass sie auch in 19"-Racks eingeschoben und verbaut werden können. Diese werden bereits bei der Luftgüteüberwachung am Flughafen Berlin-Brandenburg eingesetzt.

Zur Datenaufzeichnung werden mindestens bei den Gerätschaften von TSI, Grimm und TROPOS eigene, externe Messrechner benötigt. Die Hersteller liefern zudem auch ihre eigene Datenerfassungssoftware mit. Am Beispiel eines TROPOS Messgerätes können handelsübliche Laptops als externe Messrechner mit einem I5-Prozessor und 8 GB RAM/Arbeitsspeicher verwendet werden. Ähnliche Anforderungen sind auch für die TSI- und Grimm-Geräte zu benennen.

Die gesammelten Daten an Mobilitäts- oder auch schon erzeugten Partikelgrößenverteilungen werden über die Erfassungssoftware auf dem Messrechner gespeichert. Neben der Anzahl an Bins spielt ihre zeitliche Auflösung wichtige Rolle. Alle Geräte besitzen mittlerweile genügend Bins pro Dekade, um atmosphärische Größenverteilung genau abzubilden. Jedoch klingt eine Scandauer kleiner einer Minute im ersten Moment sehr verlockend. Dies minimiert aber die Zählstatistik, da mitunter sehr schnell über Bereiche gescannt wird, wo recht wenig Partikel vorhanden sind. Somit können längere Scandauern empfohlen werden, damit atmosphärische Größenverteilungen auch hinreichend genau abgebildet werden.

Je nach Anforderung müssen weitere Anpassungen hinsichtlich Software und der zugehörigen Auswertung vorgenommen werden. Beispielsweise werden Konturplots nicht automatisch bei allen Gerätetypen und deren Erfassung erstellt. Mitunter muss dafür zusätzliche Software erworben werden oder es muss ein Skript erstellt werden, welches aus den vorliegenden Daten einen Plot erstellt.

Gesamtpartikelanzahlkonzentration:

Die namhaften Hersteller von Kondensationspartikelzählern sind TSI, Grimm und Palas. Im Messnetz der Bundesländer Hessen sowie Sachsen werden TSI-Geräte verwendet. Auch an den Messstationen des UBA kommen solche Zähler zur Bestimmung der Gesamtanzahlkonzentration zum Einsatz. TSI als Hersteller ist mit seinen Partikelzählern zahlenmäßig am meisten vertreten und ist in einer großen Zahl von Referenzen benannt. Im Land Brandenburg werden bereits an den Messstellen in Cottbus sowie im Spreewald, aber auch an den Stationen Berlin-Schönefeld und Bohnsdorf (durch FBB betrieben) Partikelzähler der Firma Grimm eingesetzt. Diese zeichnen sich durch ihre einfache Befestigung im Rack aus.



Abb. 70: Partikelzähler Modell 3750 von TSI zur Bestimmung der Gesamtanzahlkonzentration.



Abb. 71: Partikelzähler Modell 5.420 von Grimm zur Bestimmung der Gesamtanzahlkonzentration.

Diese gängigen Partikelzähler werden mit der Arbeitsflüssigkeit Butanol betrieben. Sie decken den Konzentrationsbereich bis zu 100.000 Partikel pro cm^3 problemlos ab und haben eine untere Nachweisgrenze von 7 nm. Dieser Partikeldurchmesser (D_{p50}) beschreibt die Partikelgröße, bei der noch 50 Prozent der Anzahlkonzentration detektiert werden. Damit eine richtlinienkonforme, kontinuierliche Überwachung der Umgebung ermöglicht wird, kann dieser Durchmesser auch auf 10 nm erhöht werden. Auch bei der Auswahl eines Partikelzählers für ein Partikelgrößenspektrometer spielt dieser Parameter eine wichtige Rolle.

Rußmassenkonzentration (Black Carbon):

In GUAN werden zur Überwachung der äquivalenten Rußmassenkonzentration Absorptionsphotometer des Modells MAAP 5012 von Thermo Fisher Scientific eingesetzt. Diese robusten Geräte werden allerdings nicht mehr hergestellt.

Deshalb bleibt zur Bestimmung des Black Carbon-Gehaltes derzeit nur das Aethalometer vom Modell AE 33 der Firma Magee Scientific.

Bei insgesamt sieben Wellenlängen (370, 470, 520, 590, 660, 880 und 950 nm) erfolgt hier eine kontinuierliche Abscheidung auf einem Filterband. Gleichzeitig wird die Abschwächung des Lichtstrahls gemessen.

Die Messung der Absorption bei 880 nm wird als Konzentration des Rußes (als Black Carbon - BC) interpretiert. Bei herkömmlichen Messungen in Luftgütemessnetzen wird der auf Filtern gesammelte PM_{10} -/ $\text{PM}_{2,5}$ -Staub hinsichtlich organisch gebundenem Kohlenstoff (OC) und elementarem Kohlenstoff (EC), mittels chemischen Verfahren analysiert. Bei Messungen mittels Aethalometer werden die optischen Eigenschaften der Proben untersucht. Die Äquivalenzmessungen haben den Vorteil, dass sie simultan bei verschiedenen Wellenlängen stattfinden und dienen so Aerosolstudien in Hinblick auf Lichtabsorption, Atmosphärische Optik, Strahlungstransport, Emissionen und besonders der Quellenzuordnung. Ebenso wird dabei eine sehr hohe zeitliche Auflösung erzielt. Die Ergebnisse sind jedoch nicht unmittelbar mit denen der OC/EC-Messungen zu vergleichen.

Das Aethalometer ist damit bestens für Messungen in Messnetzen zur Rußmessung, für Verkehrsmessungen, Aerosolstudien und zur Bestimmung des Rußanteils (beispielsweise bei der Biomasseverbrennung) geeignet.

Durch die Abmessungen 280 x 430 x 330 (H x B x T) gekennzeichnet, kann es einfach in ein 19"-Rack integriert werden (Abbildung 72). Zudem benötigt es keinen eigenen Messrechner, sondern kann direkt in das Messnetz eingebunden werden.



Abb. 72: Aethalometer AE33 zur Bestimmung der Rußmassenkonzentration.

Prinzipiell sollte jedoch beachtet werden, dass UFP-Messgeräte nicht einfach in einem Messcontainer untergebracht und die Messungen begonnen werden können. Vielmehr bedarf es mindestens eines eigenen Probenahmesystems, welches aus einem Vorabscheider und einem eigenen Probenahmerohr besteht. Dafür sind Dachdurchführungen zu tätigen und im Inneren des Containers muss zusätzlich eine Pumpe zur Durchflusserzeugung untergebracht werden. Diese ist nötig, damit der Probenahmestrom im Größenspektrometer und im Partikelzähler gesichert ist. Eine Druckluftanlage zur Erzeugung trockener Druckluft muss ebenfalls bedacht werden. Mit dieser werden die Probenahmeströme heruntergetrocknet. Um CEN-konform zu messen, sollten relative Feuchten unter 40 Prozent für die Partikelmessgeräte erzielt werden, damit ein Wachstum von Partikeln in den Geräteleitungen unterbunden wird. Beispiele für Vakuumpumpen sind die Membranpumpe ME 4C NT bzw. ME 16C NT von „vacuubrand“ und Kompressoren inklusive Adsorptionstrockner und Druckluftbehälter der Firma „Mark“.

Gerade diese Platzanforderungen stellen in Messnetzen mitunter ein Problem dar, sind jedoch für eine korrekte Datenerfassung nicht zu vernachlässigen.

Die Abbildungen 73 und 74 zeigen diese Problematik. Während es sich bei der Messstation Cottbus, Gartenstraße um einen großen Messcontainer handelt und dabei unter Umständen genug Platz für eine Erweiterung der Messgeräte vorhanden ist, sieht es hingegen in kleineren Messcontainern diesbezüglich schlecht aus. Für Messungen an solch zumeist verkehrsnahen Messstellen, auch wenn sie nur temporär erfolgen sollen, müsste die Infrastruktur erweitert werden, damit Messgeräte zur UFP-Bestimmung untergebracht werden können.



Abb. 73: Innenansicht des Messcontainers mit seinen Messgeräten an der städtischen Hintergrundstation Cottbus, Gartenstraße, Quelle: LfU.



Abb. 74: Innenansicht des Messcontainers mit seinen Messgeräten an Verkehrsmessstellen des LfU im Land Brandenburg, Quelle: LfU.

Integration in Messnetz Brandenburg:

Für die Einrichtung einer oder mehrerer zukünftiger UFP-Messstellen im Land Brandenburg kann die Einbindung des kompletten Messgerätesatzes empfohlen werden. In einer ersten Stufe sollte eine repräsentative Messstation (Beispiel Königs Wusterhausen – Hauptstadtregion, Strategievorschlag 1) mit einem Partikelgrößenspektrometer zur Erzeugung langer Datenreihen von Partikelgrößenverteilungen, einem zusätzlichen Partikelzähler für die sofortige und ständige Plausibilitätsprüfung und Qualitätssicherung und einem Aethalometer zur Bestimmung der Konzentration an Black Carbon ausgestattet werden. Diese ortsfeste Masterstation würde sich hinsichtlich der Kosten in die folgenden Bereiche aufteilen:

- Investitionskosten – darunter zählen die Anschaffungskosten der Geräte, gegebenenfalls Anpassungen der vorhandenen Infrastruktur (Beschaffung oder Erweiterung des Messcontainers, Versorgung der Messstation mit Vakuumpumpe und Kompressor für Druckluft, sowie einem Abgasreinigungssystem)

- Kosten für die Sicherstellung der Messdatenerzeugung – damit die Geräte möglichst ohne Datenausfall laufen, müssen Betriebsmittel wie Butanol für das MPSS und Filterbänder für das Aethalometer vorhanden sein. Unverzichtbar ist die gerätetechnische Wartung innerhalb von monatlichen Wartungsrunden. Bei Störungen muss ein zeitnahes Eingreifen gewährleistet werden. Hier sind Personalkosten für die Stationstechniker der entscheidende Kostenfaktor.
- Kosten für die Datenvalidierung – hierzu zählen die möglichst wöchentlichen, wenn nicht gar täglichen Plausibilitätsprüfungen von Messdaten, das Erstellen von Konturplots sowie auch die Erzeugung von finalen Datensätzen für die Datenbanken. Diese Aufgaben sollte ein geschulter bzw. qualifizierter Mitarbeiter übernehmen, der sich einerseits mit Datenprozessierung, andererseits auch mit Programmiersprachen auskennt, damit Arbeitsabläufe optimiert werden können.
- Kosten für Vergleichsmessungen und Jahreswartungen von Geräten.

Eine Aufstellung der genauen Kosten ist in Abschnitt 8.5 gegeben.

In einer zweiten Stufe könnten dann die temporären Messungen implementiert werden. Hierfür würden ebenfalls Geräte zur Bestimmung der Partikelgrößenerteilung sowie der BC-Massenkonzentration angeschafft werden müssen. Empfohlen wird, hier einen zusätzlichen Partikelzähler zur Qualitätssicherung der Messdaten vorzuhalten. Allerdings konnte bereits aus Abbildung 75 entnommen werden, dass die verkehrsnahen Messstellen in Brandenburg mit kleinen Messcontainern ausgestattet sind. Deshalb wird es hier nötig sein, bestehende Infrastrukturen zu erweitern. Sofern der Platz im öffentlichen Raum vorhanden ist, könnte analog zu den Hintergrundstationen (Beispiel Cottbus, Gartenstraße, Abbildung 73) ein großer Messcontainer (bzw. ein zweiter kleiner zusätzlich) aufgestellt werden.

Auch diese zweite Variante hat die folgenden Kosten zu berücksichtigen:

- Investitionskosten für Geräte sowie Um-/Ausbau von Messcontainern
- Kosten zum Betrieb der Geräte sowie zu ihrer technischen Wartung
- Kosten zur Datenaufbereitung und Validierung
- Kosten für Vergleichsmessungen und Jahreswartungen

Prinzipiell muss von einer Verdopplung der Kosten ausgegangen werden, wenn zu einer Masterstation eine weitere Messstation aufgebaut werden soll. Der Zeitaufwand für die Komponenten der Technik (Wartung), aber auch für die Überprüfung auf Plausibilität von Messdaten und deren Validierung schlagen sich ebenfalls im zweifachen Wert nieder.

Eine dritte wichtige Stufe ist die Anschaffung von Ersatzgeräten. Bei mindestens einer stationären Messstation und einer zusätzlichen temporären Station kann es im Verlauf der Erzeugung langer Datenreihen zu gerätetechnischen Ausfällen kommen, beispielsweise wenn der Partikelzähler ge-

wartet und gereinigt werden muss oder er gar ein Problem in der Zählung besitzt. Dann sind Reparaturen nötig, die nicht innerhalb eines kurzen Zeitraumes zu bewerkstelligen sind. Aus dieser Perspektive ist die Anschaffung von Ersatzgeräten eine Notwendigkeit. Diese könnten dann unproblematisch die Datenreihen fortführen, ohne dass Daten-Ausfälle im Bereich von Wochen oder Monaten auftreten. Die Kosten, die hierfür entstehen würden, wären:

- Investitionskosten für Geräte
- Kosten für Vergleichsmessungen und Jahreswartungen

Die Speicherung der Messdaten (Partikelgrößenverteilungen, Gesamtanzahlkonzentrationen und äquivalente Rußmassenkonzentrationen) sollte unter Beibehaltung der Umgebungsbedingungen am Messort (mittlerer Luftdruck der Messstation und mittlere Temperatur im Container) stattfinden. Das bedeutet, Messwerte werden nicht auf Standardbedingungen korrigiert. Diese Standardbedingungen wären ein Luftdruck von 1013.25 hPa und eine Temperatur von 0°C (273.15 K). Diese Korrektur würde umso stärker ausfallen, je höher sich die Messstationen befinden. Für internationale Datenbanken wird diese Umrechnung standardmäßig gemacht. Allerdings erweist sich die Beibehaltung der Umgebungsbedingungen als Vorteil, da einerseits die Konzentrationsniveaus an verschiedene Stationen (unabhängig von der Höhe) direkt miteinander verglichen werden können, andererseits können diese Werte für gesundheitsrisikorelevante Fragestellungen besser verwendet werden. Die Abbildung 75 verdeutlicht ein Beispiel für eine Korrektur der Partikelgrößenverteilung auf Standardbedingungen in Abhängigkeit von der Höhe. Dabei wurden Stationshöhen von 100, 500 und 1000 m gewählt. Die Speicherung der Messdaten in Umgebungsbedingungen hat auch den Vorteil, dass Messwerte direkt mit Werten von Gasen oder anderen Parametern verglichen werden können.

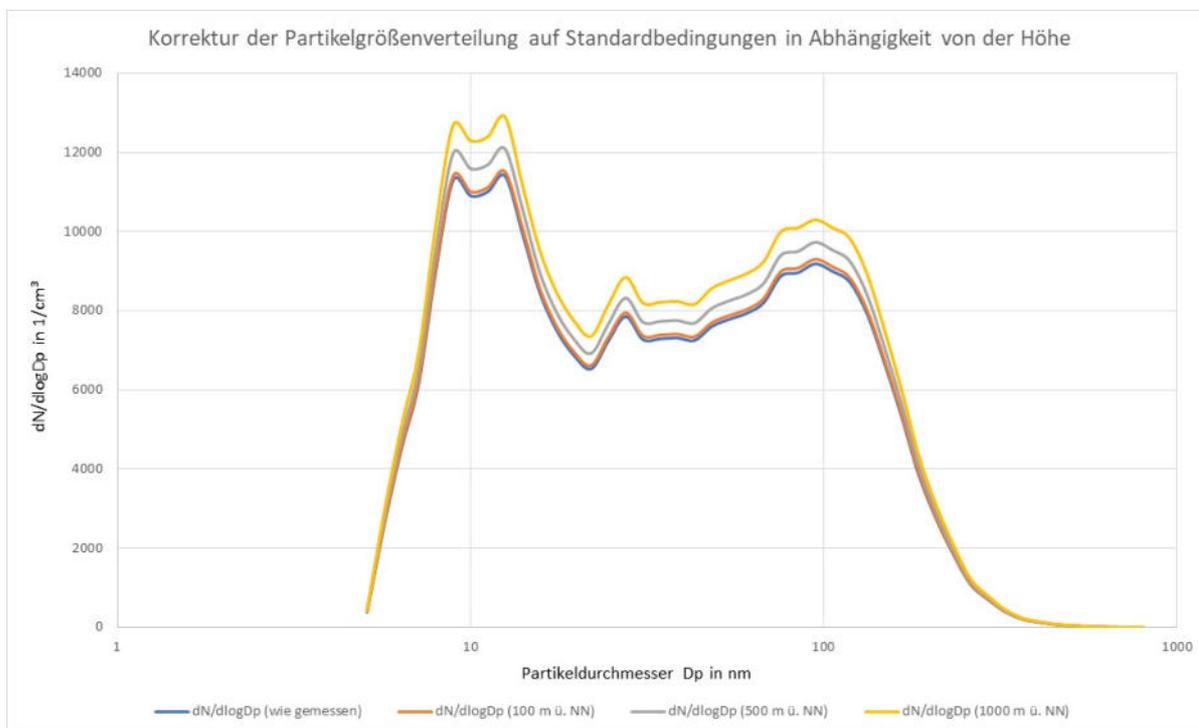


Abb. 75: Beispiel eines Scans der Partikelgrößenverteilung (blau) und der jeweiligen Korrektur entsprechend der Höhe über NN.

8.3 HANDLUNGSEMPFEHLUNG FÜR PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG UND QUALITÄTSSICHERUNG

Für zukünftig erzeugte Messdaten im Land Brandenburg sollten die Daten von ultrafeinen Partikeln und Ruß (Black Carbon) hinsichtlich Plausibilität und Qualität geprüft und gesichert werden. Dabei ist zu beachten, dass solche Betrachtungen einen gewissen Zeit- und Arbeitsaufwand mit sich bringen.

Als Plausibilitätsprüfungen kommen in Betracht:

- a) Bewertung von Konturplots
- b) Darstellung von mittleren Partikelgrößenverteilungen
- c) Darstellung von Zeitreihen zur Gesamtanzahlkonzentration sowie zu den sieben Größenklassen zwischen 10 und 800 nm
- d) Bezug zu anderen Parametern (Vergleich Größenklasse 30-200 nm mit Rußmasse aus BC)
- e) Vergleich von Zeitreihen der Gesamtanzahlkonzentration zwischen Total-Partikelzähler und Partikelgrößenspektrometer in einer Messstation
- f) Vergleich von stationsbezogenen Messdaten mit anderen Messstationen

Für die Darstellung von Konturplots oder auch für die Berechnung von Größenklassen müssen spezielle Skripte erstellt werden. Alternativ gibt es auch Softwareprogramme, die speziell auf solche Auswertungen ausgerichtet sind. Beide Varianten sind mit Folgekosten verbunden.

Für die technische Qualitätssicherung der Messgeräte und Messdaten müssen die Geräte in regelmäßigen Abständen hinsichtlich:

- a) des Nullpunktverhaltens
- b) der Flussraten
- c) der Hochspannungsversorgung des Klassierers für MPSS
- d) der Größenbestimmung am MPSS (mit Latexpartikeln der Größe 203 nm)

überprüft werden. Dies kann Aufgabe des technischen Personals des Messnetzes sein oder fremdvergeben werden und beläuft sich auf etwa einen Arbeitstag pro Monat und Messstation.

Für die Qualitätssicherung von Messdaten und deren Bereitstellung für Datenbanken sind die folgenden Untersuchungen mit zu berücksichtigen:

- a) Vergleich der integrierten Anzahlkonzentration der MPSS-Daten mit der Gesamtanzahlkonzentration des Prüf-Partikelzählers
- b) Ergebnisse der Vergleichsmessungen mit Referenzgeräten vor Ort
- c) Ergebnisse der Jahreswartung des jeweiligen Gerätes

Im Ergebnis aller Betrachtungen können dann die endvalidierten Partikelgrößenverteilungen für weitere Berechnungen sowie für Standardauswertungen verwendet werden.

Es werden programmtechnische Hilfsmittel genutzt, um:

- Werte für die Gesamtanzahlkonzentration zu berechnen,
- Werte für die in Tabelle 10 dargestellten Größenklassen zu bestimmen,
- Konturplots zu erstellen und zu bewerten,
- Vergleiche mit anderen Stationen und Aussagen zu mittleren Niveaus zu tätigen, sowie
- Werte in Datenbanken zu implementieren, wo sie der weiteren Nutzung zur Verfügung stehen.

| Abkürzung | Partikelgrößenbereich, Anwendung |
|-----------|----------------------------------|
| N1 | 5 – 10 nm * |
| N2 | 10 – 20 nm, Partikelneubildung |
| N3 | 20 – 30 nm, Partikelneubildung |
| N4 | 30 – 50 nm, Verkehrsaerosol |
| N5 | 50 – 70 nm, Verkehrsaerosol |
| N6 | 70 – 100 nm, Verkehrsaerosol |
| N7 | 100 – 200 nm, Verkehrsaerosol |
| N8 | 200 – 800 nm, Ferntransport |

Tab. 10: 7 Größenklassen zwischen 10 und 800 nm, wie sie im Luftgütemessnetz Sachsen gespeichert werden (Hessen analog, allerdings N8 nur 200-500 nm, Sachsen misst an mehreren Stationen zusätzlich die Größenklasse N1: 5-10 nm), Quelle: LfULG.

8.4 EMPFEHLUNGEN ZUR INTERPRETATION UND PRÄSENTATION VON MESSDATEN

Die Interpretation von Messdaten ist für ultrafeine Partikel nicht trivial. Es existieren hier keine Richt- oder Grenzwerte. Die Schwierigkeit besteht in der Zweidimensionalität der Verteilung sowie deren Bewertung. Notwendig ist daher die tiefgründige Einarbeitung in die Aerosolphysik. Die Bewertung der UFP-Konzentration muss vor allem über den Vergleich mit Werten anderer Messstationen erfolgen. Somit kommen langen Reihen von Messstationen gleicher Kategorie in Netzwerken eine bedeutende Rolle, zu denen Bezug genommen werden kann. Genannt sei hier erneut

GUAN, durch welches mittlerweile seit 10 Jahren Messdaten zu ultrafeinen Partikeln vom verkehrsnahen Messpunkt bis in den regionalen Hintergrund und Bergstationen erfasst werden.

Die Präsentation von Messdaten in der Öffentlichkeit ist schrittweise aufzubauen. Auf die Darstellung von Einzelwerten sollte in der Anfangszeit verzichtet werden. Es sollten zunächst im Vordergrund der Betrachtung stehen:

- Zeitreihen für begrenzte Zeiträume (Jahreswerte)
- Mittlere Partikelgrößenverteilungen
- Konturplots

Die kompletten Datensätze sollen selbstverständlich nach abschließender Validierung der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden, ggf. kann dies auch auf Anfrage geschehen. Diese bedeutet zunächst einen größeren Zeitaufwand.

Als Beispiel für eine Veröffentlichung können hier die entsprechenden Abschnitte des Luftgüteberichtes der Flughafen Berlin Brandenburg GmbH (FBB) sein. Eine kurze Darstellung, mit welchen Messgeräten an welchen Standorten die Partikelbelastung überwacht wird, könnte die Messergebnisse einleiten. Diese sind hier in Abbildung 76 dargestellt und können analog für das Messnetz in Brandenburg empfohlen werden. In besagtem Beispiel handelt es sich um die Jahreszeitreihen der Halbstundenmittelwerte der UFP-Anzahlkonzentration der beiden Messstandorte, einem Boxplot mit den statistischen Kenngrößen sowie einem Vergleich der Jahresmittelwerte in Bezug zu den vorhergehenden Jahren.

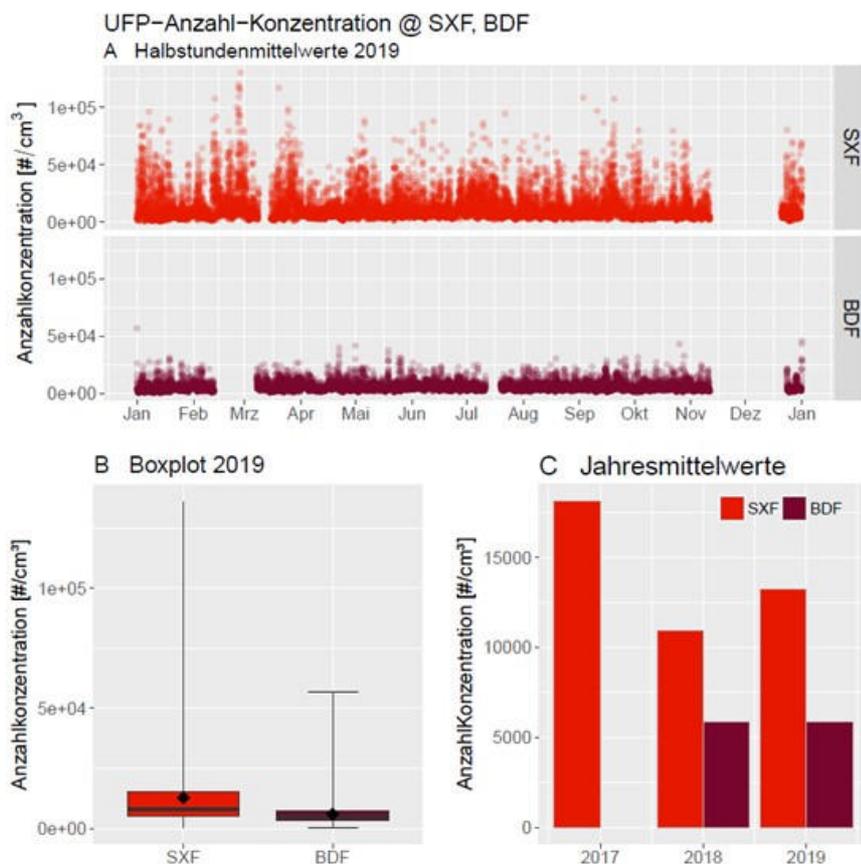


Abb. 76: Halbstundenmittelwerte der Gesamtpartikelanzahl UFP an den Standorten Berlin-Schönefeld SXF und Bohnsdorf BDF für das Jahr 2019, Quelle: FBB.

Eine andere Präsentation von Messdaten in der Öffentlichkeit zeigt sich am Beispiel tagesaktueller Messdaten der UFP-Messstationen in Leipzig. Diese erfolgt über die Internetseiten des TROPOS (<http://aerdataserv.tropos.de/NRT/Eisenbahnstrasse.html>). Anhand einer Übersichtskarte lassen sich Messstationen mit Messungen zu ultrafeinen Partikeln und Ruß (BC) auswählen. Das Ergebnis kann aus Abbildung 78 entnommen werden. Dabei werden für den betreffenden Tag die aktuelle Partikelgrößenverteilung, der automatisch erstellte Konturplot (durch programmtechnische Hilfsmittel auch aus den Datensätzen erzeugbar) sowie die äquivalente Rußmassenkonzentration (Black Carbon) als Zeitreihe dargestellt.

Eine solche Darstellung könnte analog auch für Brandenburg gemacht werden, erfordert bei TROPOS Aufwand im programmiertechnischen Bereich.

Dieses Ziel der Near-Real-Time-Datenveröffentlichung muss als Fernziel betrachtet werden. Der Bedarf an solchen Daten ist vorhanden, beispielsweise aus der Wissenschaft und der interessierten Öffentlichkeit, ist jedoch nicht einfach umsetzbar. Es bedarf hier unbedingt einer guten technischen Infrastruktur, der Kopplung verschiedener Datenplattformen und ausreichender programmtechnischer Ressourcen bzw. finanzieller Mittel hierzu.



Abb. 77: Internetveröffentlichung von tagesaktuellen Messdaten auf der TROPOS-Seite, Auswahl von Messtationen.

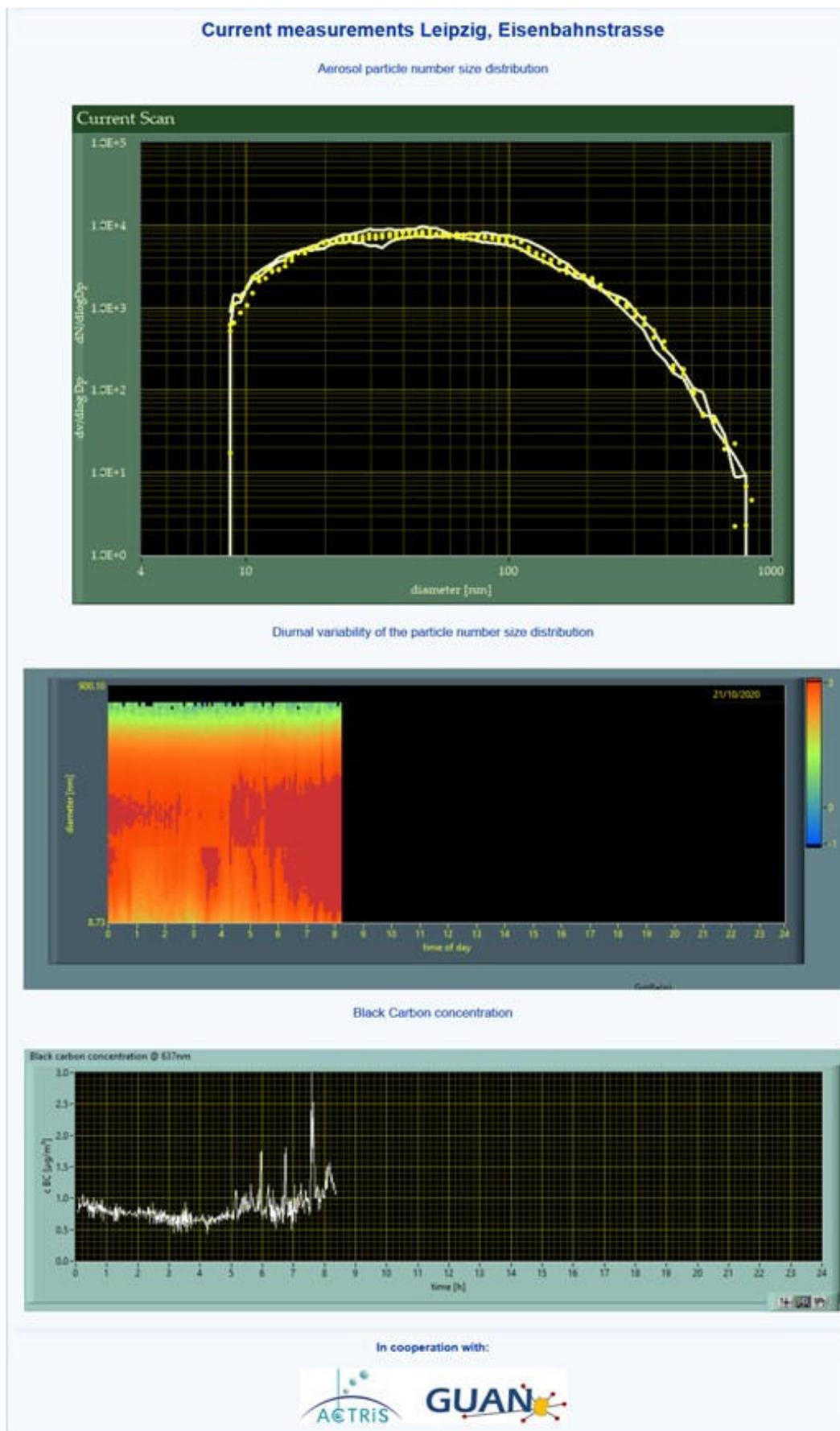


Abb. 78: Internetveröffentlichung von aktuellen Messdaten auf der TROPOS-Seite.

8.5 KOSTENRAHMEN

Dieses Unterkapitel soll das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Messungen zu ultrafeinen Partikeln und Ruß (BC) auf lange Sicht gesehen darstellen. Auch eine Übersicht zu den Investitionskosten folgt in diesem Berichtsteil. Es sei jedoch schon gesagt, dass die Kosten für Messgeräte einer Station (Masterstation) sich im unteren sechsstelligen Bereich bewegt. Zu den Folgekosten zählen nicht nur die zum Betrieb der Geräte nötigen Arbeitsmittel (externe Messrechner, Butanol, Strom), vielmehr tragen hier Kosten für beispielsweise Auswertesoftware, programmtechnische Hilfsmittel und schlichtweg auch Personalkosten bei. Neben den technischen Wartungs- und Kalibrierkosten von etwa 8 Stunden pro Monat und Messstation liegt die Arbeitskraft hinsichtlich Plausibilitätsprüfung und Datenvalidierung bei mindestens zwei Monaten pro Kalenderjahr. Für zusätzliche Veröffentlichungen auf den Internetseiten des LfU sind zudem personelle Ressourcen erforderlich.

Den größten Punkt bei der Betrachtung des Kostenrahmens nehmen die Investitionskosten ein. Diese liegen nach aktuellem Stand bei den Geräten:

- MPSS (gesamt): 80.000 Euro
- Thermodenuder: 10.000 Euro
- Prüf-Partikelzähler: 25.000 Euro
- Aethalometer: 20.000 Euro
- Technische Infrastruktur (bei bestehendem MC): > 15.000 Euro
- Kosten neuer MC: 65.000 Euro

In der Aufrüstung der technischen Infrastruktur der Messcontainer (MC) sind dann die Versorgung mit Vakuumpumpen zur Durchflusserzeugung, einem Kompressor zur Erzeugung trockener Druckluft zur Trocknung der Probenahmeströme, ein eigenes Probenahmesystem (Probenahmekopf und -rohr) sowie eine zusätzliche Dachdurchführung enthalten. Ein Abgasreinigungssystem ist ebenfalls zu empfehlen, damit die mit Butanol belastete Abluft der Spektrometer bzw. Partikelzähler nicht zu Querempfindlichkeiten führt. Insgesamt müssen dann Kosten von mindestens 15.000 Euro einkalkuliert werden. Diese Abschätzung gilt allerdings nur für die Integration von Messgeräten in bereits bestehende Messcontainer, beispielsweise in Cottbus. Für die Änderung eines kleineren, verkehrsnahen Messcontainers in einen größeren, damit die gesamte Messtechnik eingebaut werden kann, sind zusätzliche Kosten eines neuen Containers, mehr beanspruchte Fläche sowie die Kosten für die gesamte Verlegung der bestehenden Infrastruktur zu bedenken.

Als Folgekosten werden dann vor allem die Wartungs- und Kalibrierkosten aufgeführt, damit die UFP-Messgeräte auf lange Sicht gesehen Daten von hoher Qualität erzeugen. Diese Kosten sind wie folgt zu beziffern:

- Betriebsmittel wie Butanol, der Jahresverbrauch eines Gerätes beträgt etwa 25 Liter mit ungefähren Kosten von 50 Euro pro Liter
- Es entstehen Mehrkosten an Strom durch Betrieb einer weiteren Pumpe sowie eines Kompressors

- Für einen Techniker werden 8 Stunden pro Monat und Station berücksichtigt für Wartung und Kalibrierung der Geräte
- Für Plausibilitätskontrollen entstehen Personalkosten von mindestens 4 Stunden pro Woche und Messstation (qualifizierter Mitarbeiter)
- Für die Datenvalidierung kann mindestens 1 Woche pro Quartal angenommen werden, dies resultiert also in Kosten für das Datenhandling von mindestens einem Monat pro Jahr (qualifizierter Mitarbeiter)
- Kosten für externe Vergleichsmessungen vor Ort und Jahreswartungen, bei einer jährlichen Vorortmessung und einer Wartung im Labor sind pro Messstation etwa 5.000 Euro zu veranschlagen
- Geräteabschreibungen und Re-Investitionen sind ebenfalls zu beachten

9 ANHANG

9.1 ERKENNTNISSE AUS DEM WORKSHOP JANUAR 2020

Im Projekt „Entwicklung eines Messkonzeptes mit dem Ziel der Erzeugung einer qualitätsgesicherten Datenbasis für ultrafeine Partikel insbesondere in der Gegenüberstellung von unterschiedlich belasteten Gebieten im Land Brandenburg“ fand zur Hälfte der Projektlaufzeit ein Workshop statt. Dabei ging es nicht um die Präsentation und Diskussion von konkreten Messergebnissen, wissenschaftlicher Ergebnisse sowie spezieller Auswertungen. Vielmehr steht die Erarbeitung eines Messkonzeptes im Vordergrund. Der Schwerpunkt liegt dabei in der praktischen Umsetzung von UFP-Messungen im dauerhaften Einsatz eines Ländermessnetzes. Zusätzlich sollen Erfahrungen verschiedener Messprojekte anderer Bundesländer ergänzt werden, welche bereits eine gewisse Messpraxis in Bezug auf UFP haben.

Beitrag Marion Wichmann-Fiebig, Umweltbundesamt

Das Umweltbundesamt verweist darauf, dass es aktuell noch keine endgültige Abstimmung zu den UFP-Messungen gibt. Da momentan keine gesetzlich geregelten Grenzwerte existieren, zählt die Erfassung von UFPs zu den Sondermessungen der jeweiligen Institution oder Behörde.

Gleichzeitig würde es das UBA begrüßen, wenn mehr Luftgüte-Messstationen UFP-Daten erheben. Jedoch sollte dies in einer einheitlichen Form geschehen, um eine Vergleichbarkeit der Messungen gewährleisten zu können. Dazu zählen beispielsweise die Ober- und Untergrenze zur Erfassung, die gewählten Größenklassen der UFP-daten und die Unterscheidung nach flüchtigen und nicht-flüchtigen Partikeln. Die CEN-Richtlinie 17434 stellt dabei technische Spezifikationen zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration sowie die Spezifikation zur Bestimmung der Mobilitätspartikelgrößenverteilung in Außenluft dar. Das UBA hat die LAI angefragt, einen Standard zu erarbeiten.

Das Bundesland Sachsen hat in der Auswertung der UFP-Daten verschiedene Größenklassen eingeführt und damit quasi einen Standard gesetzt. Damit die charakteristische Form der Partikelanzahlgrößenverteilung hinreichend genau abgebildet werden kann, wurden 8 Größenklassen erstellt, welche in Tabelle 11 erläutert sind (Löschau, 2010). Dabei können die Klassen N1 (sofern vorhanden) bis N3 den Verlauf von Partikelneubildungsereignissen abbilden. Die Klassen N4 bis N7 charakterisieren vor allem in städtischen Umgebungen den Verkehrseinfluss. Die letzte Klasse N8 gibt Informationen zum gealterten Aerosol und ist somit ein Indikator für den Ferntransport.

Da ultrafeine Partikel auch in weiteren Diskussionen im Umweltbundesamt ein großes Thema sein werden, vor allem auch bezüglich ihrer gesundheitlichen Relevanz, könnte die bereits existierende Vorgabe von Klassen als Standard bzw. Richtlinie für Netzwerke auf Länderebene vorangetrieben werden.

| Größenklasse | N1 | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 |
|--------------------|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|------------|------------|
| Durchmesserbereich | 5-10 nm | 10-20 nm | 20-30 nm | 30-50 nm | 50-70 nm | 70-100 nm | 100-200 nm | 200-800 nm |

Tab. 11: Größenklassen für die Speicherung der Partikel Daten Luftgüte-Messnetz Sachsen.

Beitrag Prof. Dr. Alfred Wiedensohler, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS)

Prof. Dr. Wiedensohler gibt einen Überblick zu Langzeitmessungen von ultrafeinen Partikeln im GUAN-Netzwerk. Vor allem für die verkehrsnahen Messungen gehen die Anzahlkonzentrationen für den Größenbereich zwischen 30 und 200 nm deutlich zurück. Auch die Messungen des schwarzen Kohlenstoffs folgen diesem Trend (Abbildungen 79, 80).

So konnten für die letzten zehn Jahre eine Senkung der Rußmassenkonzentration von jährlich drei bis fünf Prozent berechnet werden. Die UFP-Anzahlkonzentration für den Größenbereich zwischen 30 und 200 nm folgt ebenfalls diesem Trend. Lediglich in Neuglobsow und Melpitz fallen die Werte geringer aus. Für den Größenbereich zwischen 200 und 800 nm konnte ebenfalls eine Abnahme der Konzentration und damit auch eine Abnahme der Oberfläche bzw. des Volumens beobachtet werden. Für den Bereich zwischen 10 und 30 nm gibt es sogar eine Zunahme im Laufe der Jahre. Dies könnte das Ergebnis aus vermehrten Partikelneubildungsereignissen sein.

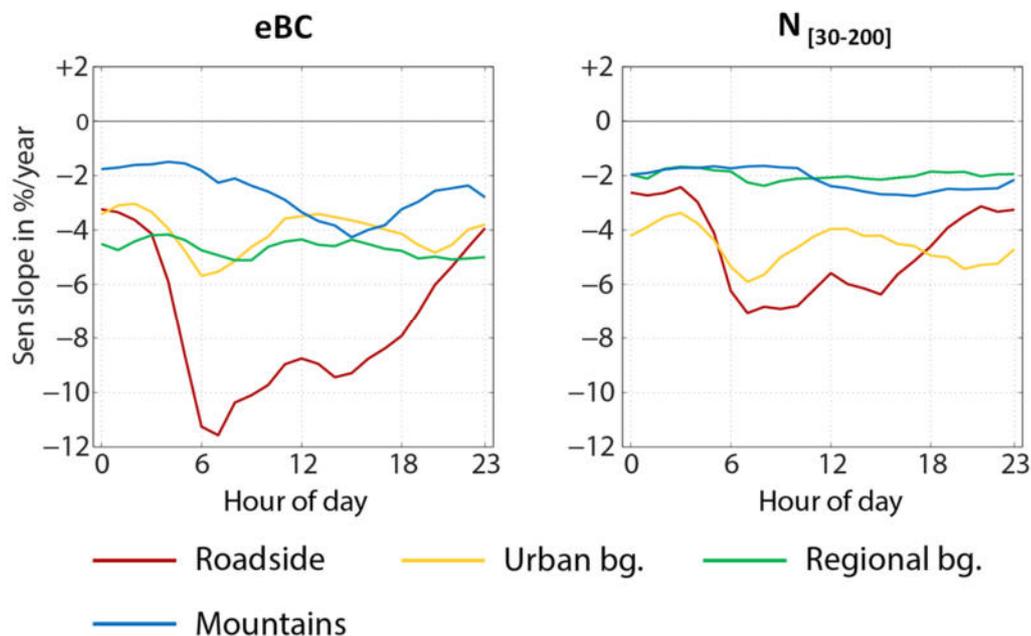


Abb. 79: Gemittelter Tagesgang der Rußmassenkonzentration sowie der Anzahlkonzentration an Partikeln des Bereiches 30 bis 200 nm für verkehrsnahen Stationen (rot, Roadside), städtischem Hintergrund (gelb, Urban bg.), regionalem Hintergrund (grün, Regional bg.) und Gebirgsstationen (blau, Mountains).

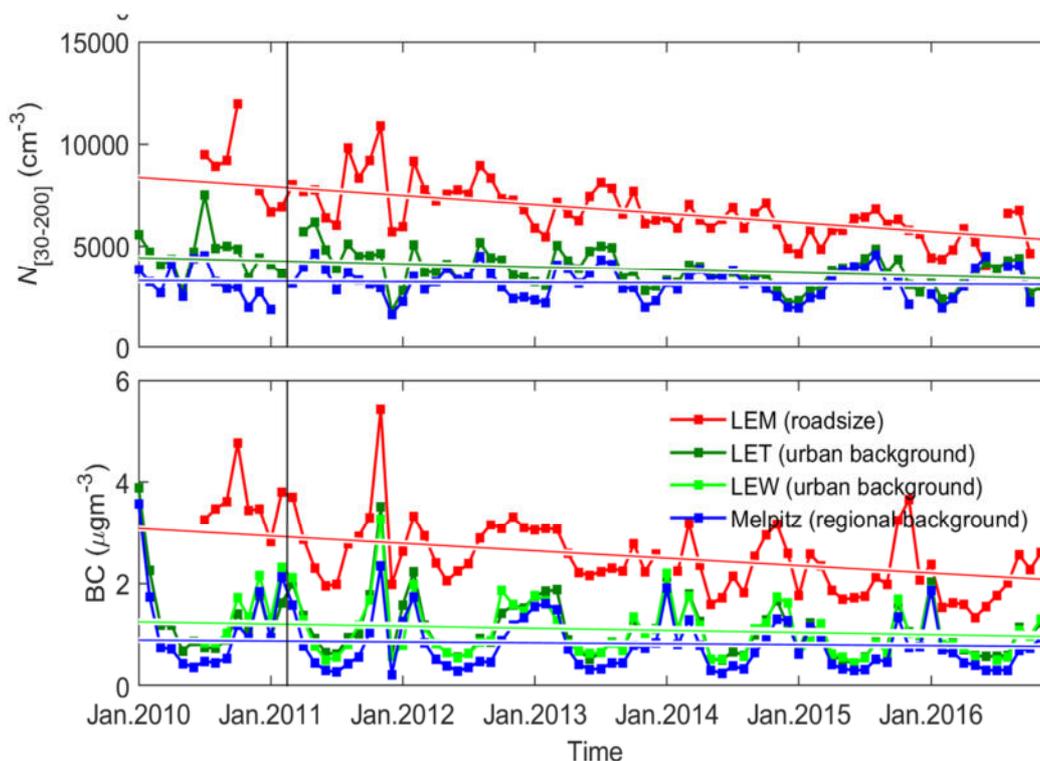


Abb. 80: Zeitreihen der Partikelanzahlkonzentration zwischen 30 und 200 nm (oben) sowie der Rußmassenkonzentration (unten) zwischen 2010 und 2016 für die Messstationen Leipzig-Mitte (LEM), Leipzig-TROPOS (LET), Leipzig-West (LEW) sowie Melpitz.

Am Beispiel der Leipziger Umweltzone werden die UFP- und Rußmessungen als Zeitreihe von 2010 bis Ende 2016 dargestellt (Abbildung 80). Während der städtische Hintergrund an verschiedenen Messpunkten gut übereinstimmt und nur geringfügig höher gegenüber dem regionalen Hintergrund ist, so liegen die Werte am verkehrsnahen Punkt im Mittel doppelt so hoch. Die Abnahme der Konzentrationen im Laufe der Zeit ist hier besonders deutlich zu erkennen.

Weiterhin wurden die Ergebnisse der Feinstaubmessungen $PM_{2.5}$ und PM_{10} , sowie der Differenz aus beiden Werten diskutiert. Auch hier kann der Abbildung 81 ein leichter Abwärtstrend entnommen werden. Vor allem grobe Partikel zwischen $2.5\ \mu m$ und $10\ \mu m$ stammen dabei aus den verkehrsnahen Bereichen (untere Grafik in Abbildung 81).

Für den Vergleich der Stickoxidmessungen sowie der Stickstoffdioxide ergibt sich ebenfalls die Aussage, dass die Konzentrationen an der Straße um ein Vielfaches höher sind im Vergleich zum städtischen und regionalen Hintergrund. Die Änderung seit Einführung der Umweltzone in Leipzig brachte hier allerdings nicht den gleichen Effekt wie bei der Betrachtung des Verkehrsinkrementes der Rußmassenkonzentration und von ultrafeinen Partikeln. Die Stickoxidkonzentrationen verblieben in den vergangenen Jahren auf einem gleichbleibenden Niveau, obwohl die Fahrzeugflotte modernisiert wurde.

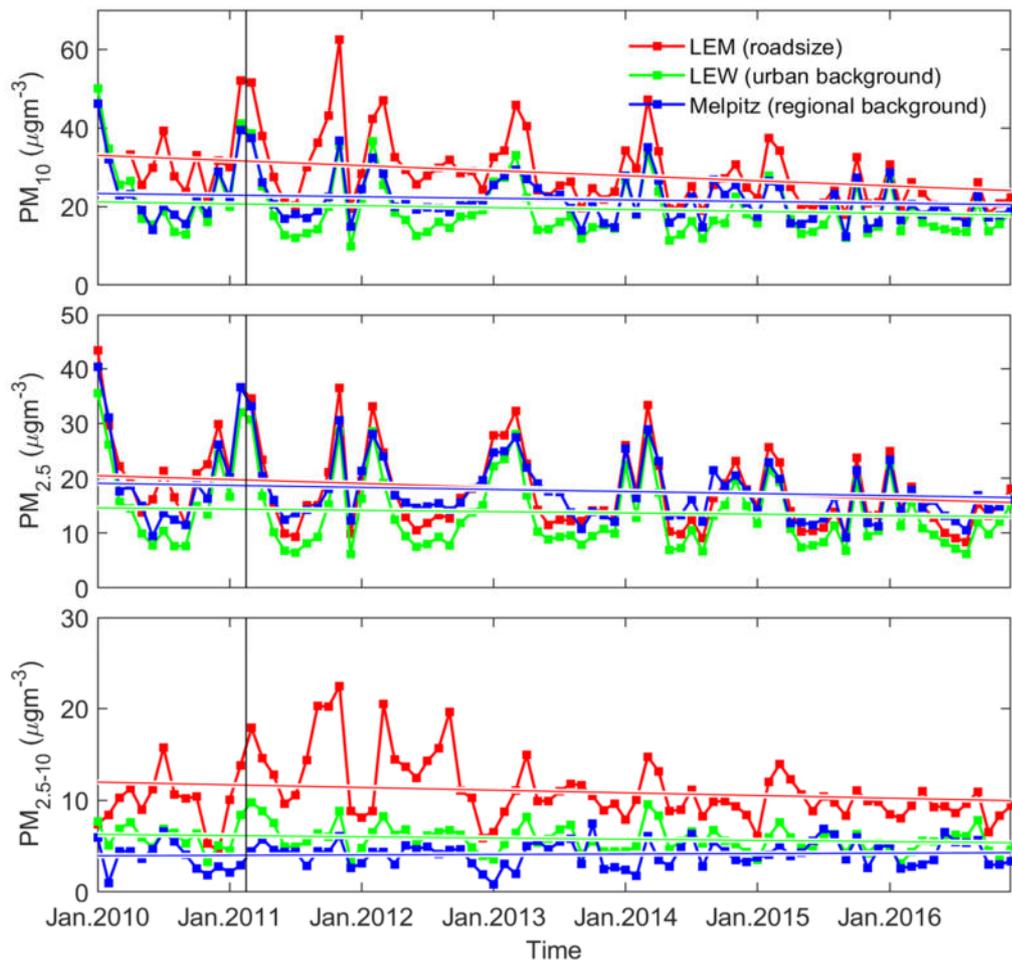


Abb. 81: Zeitreihen der Partikelmassenkonzentrationen PM_{10} (oben), $PM_{2.5}$ (mitte) sowie der Differenz zwischen PM_{10} und $PM_{2.5}$ (unten) von 2010 bis 2016 für die Messstationen Leipzig-Mitte (LEM), Leipzig-West (LEW) und Melpitz.

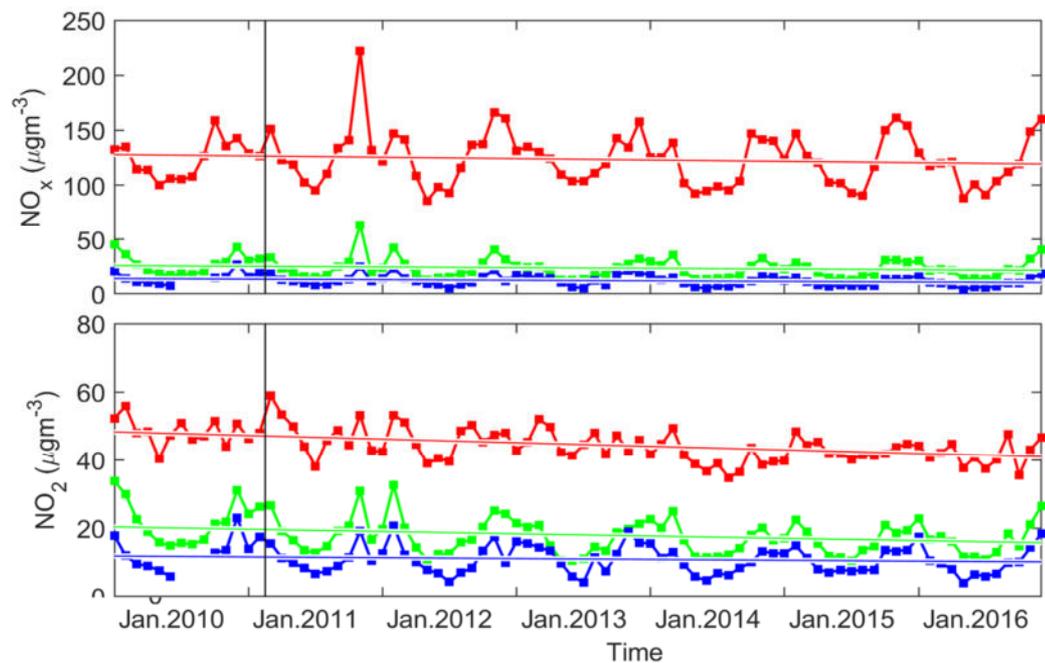


Abb. 82: Zeitreihen der Luftschadstoffkonzentrationen NO_x (oben) und NO_2 (unten) von 2010 bis 2016 für die Messstationen Leipzig-Mitte (LEM, rot), Leipzig-West (LEW, grün) und Melpitz (blau).

Beitrag Maik Merkel, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS)

In einem weiteren Vortrag vom TROPOS werden von Maik Merkel die Grundlagen zur Messtechnik für ultrafeine Partikel dargestellt. Es werden die unterschiedlichen Messmethoden zwischen reiner Partikelzählung und Bestimmung der Partikelgrößenverteilung vorgestellt. Zudem wird auf die Vor- und Nachteile der jeweiligen Messgröße eingegangen. Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mit einem Größenspektrometer sollten auch im Land Brandenburg bei der Errichtung neuer UFP-Messstationen in das Luftgütemessnetz den Bestimmungen der Anzahlkonzentration mit einem Partikelzähler vorzuziehen. Bindend sind die Kriterien der Technischen Spezifikation nach CEN (CEN-TS 17434). Ebenso wurden und werden in der Fortführung von GUAN (mit möglichen neuen Messstellen in Brandenburg) Partikelgrößenverteilungen und Ruß bestimmt (Tabelle 12).

| Nr. | Stationsname | Partikelgrößenverteilung | Messtechnik | Größenbereich | Gesamtanzahlkonzentration |
|-----|------------------------------|--------------------------|-------------|---------------|---------------------------|
| 1 | Annaberg-Buchholz | x | MPSS | 10-800 nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 2 | Augsburg | x | TDMPSS | 5-800 nm | x |
| 3 | Bösel | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 4 | Dresden-Nord | x | TDMPSS | 5-800 nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 5 | Dresden-Winckelmannstr. | x | MPSS | 10-800 nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 6 | Hohenpeißenberg | x | MPSS | 10-800 nm | x |
| 7 | Langen | x | MPSS | 10-600 nm | x |
| 8 | Leipzig-Eisenbahnstraße | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 9 | Leipzig-Mitte | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 10 | Leipzig-Tropos | x | TDMPSS | 5-800 nm | |
| 11 | Leipzig-West | x | TDMPSS | 5-800 nm | |
| 12 | Melpitz | x | TDMPSS | 5-800 nm | |
| 13 | Mülheim-Styrum | x | MPSS | 14-750 nm | |
| 14 | Neuglobsow | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 15 | Schauinsland | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 16 | Waldhof | x | MPSS | 10-800 nm | |
| 17 | Zugspitze (Schneefernerhaus) | x | MPSS | 10-600 nm | x |

Tab. 12: Messstationen und Messparameter in GUAN.

Beitrag Frau Dr. Diana Rose, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)

Frau Dr. Diana Rose vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie gibt einen Überblick über die Messaktivitäten im Bundesland Hessen. Eine der Beweggründe ultrafeine Partikel zu messen lag darin, dass aus Bürgersicht der Flughafen Frankfurt als Quelle für UFPs in Frage kommt und dieser somit die Luftqualität stark beeinträchtigt. Überflüge würden demnach zu erhöhten Konzentrationen führen, so die Vermutung der Bevölkerung. Mit ersten Messungen der Partikelanzahlkonzentration mit einem Kondensationspartikelzähler im Jahr 2015 gab es Indizien, dass der Flugbetrieb eine Quelle für Partikel ist. Damit stellten sich die in Tabelle 13 aufgeführten Leitfragen, aus welchen sich die Kriterien für notwendige Messgeräte sowie Messbedingungen ergeben.

Basierend darauf wurden einerseits Partikelzähler in Messcontainern integriert, welche Daten in einer Zeitauflösung von einer Sekunde an die UBIS-Datenbank liefert. Andere Stationen wurden mit Mobilitätsspektrometern ausgestattet, welche die Partikelgrößenverteilung in einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten liefern. Auch diese Daten werden in der UBIS-Datenbank gespeichert. Aus beiden Datensätzen werden im Anschluss Zeitreihen aus Halbstundenwerten erzeugt, welche täglich auf Plausibilität geprüft werden (Abbildung 83). Zudem werden aus den Größenverteilungen die verschiedenen Mittelwerte der Größenklassen bestimmt. Generell laufen die UFP-Messgeräte sehr stabil.

Die Geräte können untereinander auf Plausibilität geprüft werden, in dem die Messungen zu Nachtzeiten verglichen werden. In Frankfurt/Main herrscht Nachtflugverbot, somit sollten sich alle Messwerte auf ein Hintergrundniveau angleichen. Für die Plausibilitätsprüfung wurde eigens ein Skriptbasiertes Auswertemodul programmiert.

| Fragestellung | Messgerät | Bemerkung |
|---|-----------|---|
| Welche Menge an UFP trägt der Flugbetrieb als Ganzes (FRA-Gelände und Überflüge) in der Umgebung bei? | SMPS | <ul style="list-style-type: none"> Standorte: einige Kilometer Entfernung zu FRA-Gelände keine hohe Zeitauflösung notwendig Größenauflösung sinnvoll |
| Tragen auch Überflüge zur Erhöhung der UFP-Konzentration am Boden bei? | CPC | <ul style="list-style-type: none"> Standorte: wenige hundert Meter Entfernung zu Anfluglinie hohe Zeitauflösung, Verzicht auf Größenauflösung |

Tab. 13: Leitfragen für die Messung ultrafeiner Partikel im Umfeld des Flughafens Frankfurt/Main.

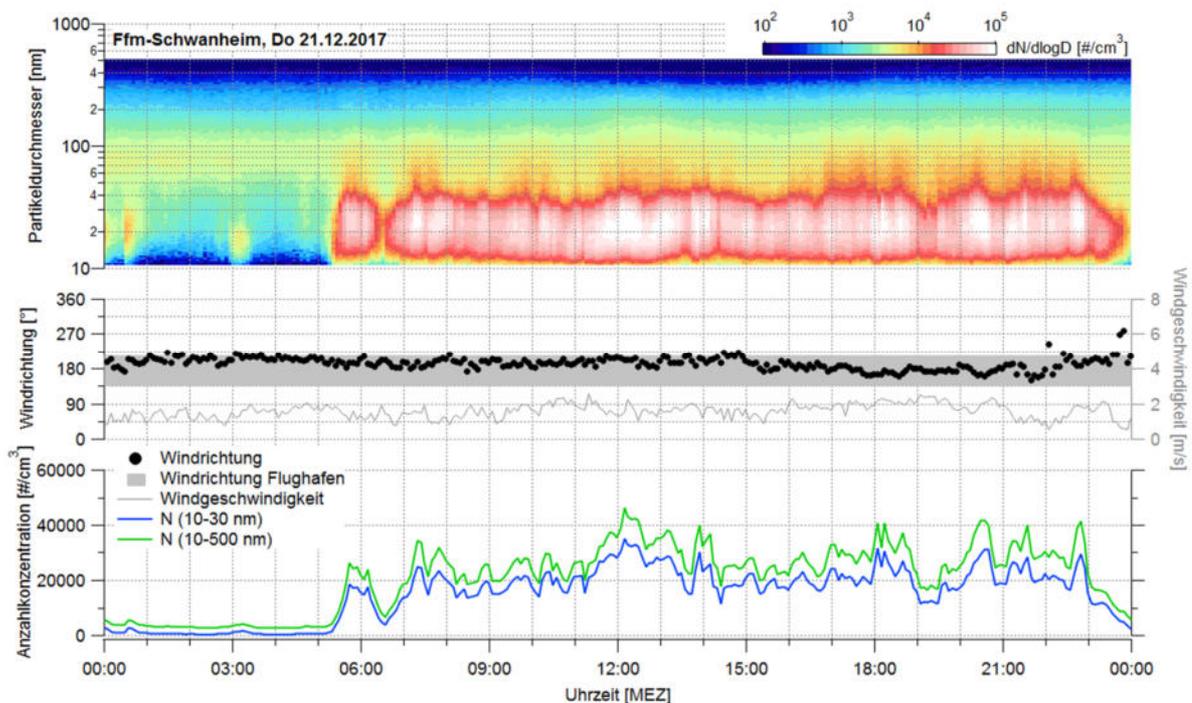


Abb. 83: Gemittelter Tagesgang der Rußmassenkonzentration sowie der Anzahlkonzentration an Partikeln des Bereiches 30 bis 200 nm für verkehrsnahen Stationen (rot), städtischem Hintergrund (gelb), regionalem Hintergrund (grün) und Gebirgsstationen (blau).

Die aufgenommenen Messdaten bilden die Grundlage für wissenschaftliche Auswertungen. Weiterhin werden sie für regelmäßige Berichte benötigt sowie auf der Internetpräsenz des Hessischen Landesamtes veröffentlicht. In einem zukünftigen Schritt sollen die Daten auch für das GUAN-Netzwerk bereitgestellt werden.

Allerdings sollte auch darüber diskutiert werden, wie mit den Ergebnissen, speziell aus dieser Studie, umgegangen wird. Da es keine Grenzwerte für UFPs gibt, ist eine Einordnung der Messwerte schwierig. Sie geben zwar die Höhe der Belastung an ultrafeinen Partikeln an, ob diese jedoch hoch oder niedrig ist, welche Gefährdung von ihr ausgeht, dafür gibt es noch keine einheitlichen Regelungen.

Beitrag Dr. Gunter Löschau, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)

Das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Sachsen besitzt seit nun knapp 20 Jahren Erfahrungen mit der Messung von ultrafeinen Partikeln. Herr Dr. Löschau gab im Workshop diesbezüglich einen Überblick.

Im Freistaat Sachsen gibt es aktuell sieben Messstationen, welche die Partikelgrößenverteilung der Außenluft bestimmen (Tabelle 14). Während die Station Dresden-Nord am Schlesischen Platz im Jahr 2001 mit der Intention der Untersuchung von Ballungsräumen in Betrieb gegangen ist, folgten die weiteren Sondermessungen zu UFPs in den Jahren 2010 und 2011. Dabei werden hauptsächlich verkehrsnaher Konzentrationen und urbane Hintergrundkonzentrationen erfasst, um die Veränderung der Verbrennungspartikel in der Außenluft zu dokumentieren. Die Station Melpitz im Norden Sachsens dient als repräsentative Messstelle für den regionalen Hintergrund.

| Messtation | Typ | Daten ab ¹ | Verantw. |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|----------|
| Dresden-Nord | Verkehr | 4/2001 | LfULG |
| Dresden-Winckelmannstr. | Städt. Hintergrund | 2011 | LfULG |
| Leipzig-Mitte | Verkehr | 7/2010 | Tropos |
| Leipzig-Eisenbahnstr. | Verkehr | 2010 | Tropos |
| Leipzig-Tropos | Städt. Hintergrund | 2010 | Tropos |
| Leipzig-West | Städt. Hintergrund | 7/2010 ² | Tropos |
| Annaberg-Buchholz | Verkehr | 2011 | LfULG |
| Melpitz | Ländlich | 2010 | Tropos |

Tab. 14: Überblick über die Luftgütemessstationen in Sachsen, welche Sondermessungen zu ultrafeinen Partikeln und Ruß durchführen; ¹Daten in LfULG-Datenbank gespeichert; ²Ende der Messungen 31.12.2016.

Um die Datenflut zu reduzieren, aber dennoch genügend Informationen aus den Partikelgrößenverteilungen zu erhalten, wurden 8 Partikelgrößenklassen eingeführt. Diese werden in der Datenbank des LfULG als 8 Schadstoffe behandelt (Tabelle 15). Weiterhin werden aus den Rohdaten der Größenklassen endvalidierte Einstunden-Mittelwerte in Außenluftbedingungen berechnet, welche in der Datenbank der Behörde gespeichert werden. Im Laufe der Jahre kamen weitere Komponenten hinzu, welche fünf weitere Schadstoffe in der Datenbank darstellen (Tabelle 16).

| Abkürzung | Partikelgrößenbereich, Anwendung |
|-----------|----------------------------------|
| N1 | 5 – 10 nm * |
| N2 | 10 – 20 nm |
| N3 | 20 – 30 nm |
| N4 | 30 – 50 nm |
| N5 | 50 – 70 nm |
| N6 | 70 – 100 nm |
| N7 | 100 – 200 nm |
| N8 | 200 – 800 nm |

Tab. 15: Überblick über die acht im sächsischen Luftgütemessnetz verwendeten Größenklassen mit den zugehörigen Größenbereichen sowie deren Anwendungen.

| Abk. | Bemerkung | Einheit |
|----------|--|-----------------------------|
| N_PS1 | Partikeloberfläche von Partikeln $< 800 \text{ nm } D_p$ ($\sim < 1 \text{ } \mu\text{m } D_{ae}$) | $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ |
| N_PM1 | Partikelmasse von Partikeln $< 800 \text{ nm } D_p$ ($\sim < 1 \text{ } \mu\text{m } D_{ae}$), entspricht in etwa PM₁ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| N_PM0.25 | Partikelmasse von Partikeln $< 200 \text{ nm } D_p$ ($\sim < 0,25 \text{ } \mu\text{m } D_{ae}$), entspricht in etwa PM_{0.25} | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| N_PM0.12 | Partikelmasse von Partikeln $< 100 \text{ nm } D_p$ ($\sim < 0,12 \text{ } \mu\text{m } D_{ae}$), = Masse UFP | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| N_PM200 | Partikelmasse von Partikeln von 30 nm bis 200 nm D_p , Anwendung Umweltzone | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |

Tab. 16: zusätzliche Sondermessgrößen, welche aus den gemessenen Partikelgrößenverteilungen berechnet werden und in der Datenbank der Behörde gespeichert werden.

So werden nun zusätzlich die Partikeloberfläche und die Partikelmasse für den Gesamtgrößenbereich, sowie drei weitere Partikelmassen berechnet, welche unterschiedliche Anwendungen finden bzw. Bedeutungen haben. Als Beispiel sei hier die Masse N_{PM0.12} genannt, welche die Gesamtmasse an ultrafeinen Partikeln wiedergibt.

| Phase | Zeitraum (Uhr) | Bemerkung |
|--|--------------------|--|
| (1) Kontrolle der Partikelgröße | 1:00 – 1:30 | Partikelgrößen-Standard |
| (2) Kontrolle Nullpunkt Konzentration | 1:30 – 3:00 | Dichtheitsprüfung |
| (3) Kontrolle Empfindlichkeit Konzentration | 3:00 – 5:00 | Vergleichsmessung mit Prüf-CPC für veränderte Außenluft |
| (4) Plausibilitätstest Empfindlichkeit Konzentration | 5:00 – 7:00 | Vergleichsmessung mit Prüf-CPC für Außenluft |

Tab. 17: Phasen der wöchentlichen, automatischen Funktionskontrolle für einzelne Partikelgrößenspektrometer im Luftgütemessnetz Sachsen.

Um die Partikeldaten im Luftgütemessnetz Sachsen einer regelmäßigen Qualitätskontrolle zu unterziehen, wurde in Zusammenarbeit mit dem TROPOS eine automatische, software- und geräte-technische Funktionskontrolle entwickelt. Die Phasen eines solchen Ablaufs sind in Tabelle 17 dargestellt. Einmal wöchentlich, vorzugsweise Sonntagmorgen werden vier Tests zur Qualitätssicherung der Messdaten durchgeführt. So wird als erstes die Kontrolle der Partikelgrößenbestimmung (Latexpartikel der Größe 203 nm) und danach das Nullpunktverhalten geprüft. Für die darauffolgenden zwei Stunden erfolgt die Kontrolle der Empfindlichkeit des Spektrometers überprüft, indem reduziertes Außenluftaerosol mit einem zusätzlichen Prüf-Partikelzähler gemessen und zum Spektrometer verglichen wird. Gerade bei diesem Test sollten beide Messgeräte innerhalb des geforderten zehnpromzentigen Toleranzbereiches liegen. Der finale Qualitätstest beinhaltet eine Kontrolle des gesamten Partikelgrößenspektrums in Außenluft im Vergleich zum Partikelzähler (Plausibilitätstest). Durch diese wöchentlichen Tests können sehr zeitnah Unstimmigkeiten im Messverhalten des Partikelgrößenspektrometers festgestellt werden und Fehler behoben werden.

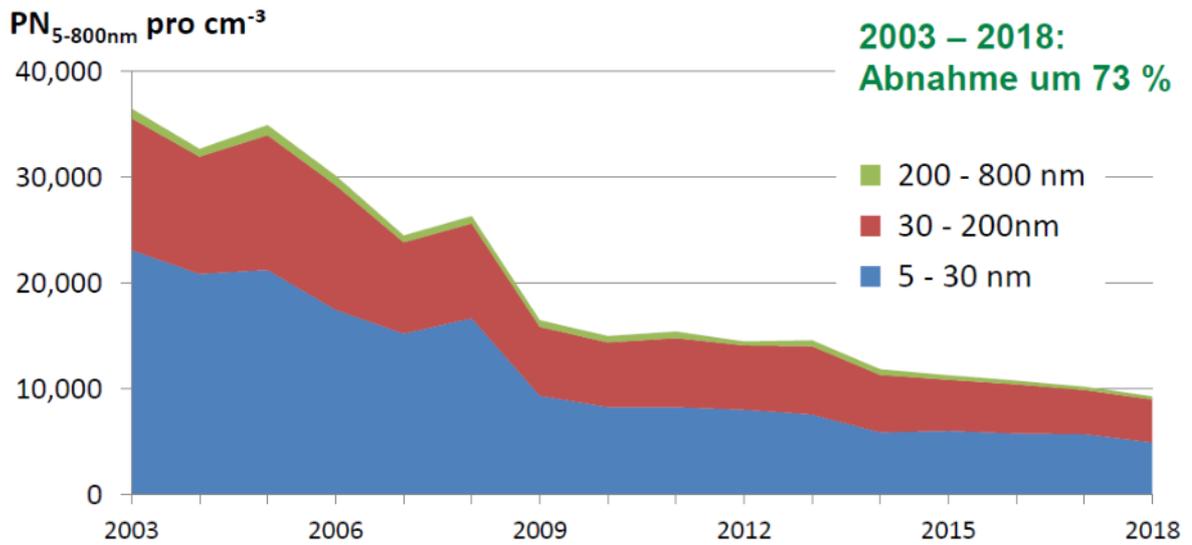


Abb. 84: Zeitreihe verschiedener Größenklassen für den Zeitraum 2003 bis 2018; Klasse 5 bis 30 nm (blau), 30 bis 200 nm (rot) und 200 bis 800 nm (grün).

Die Abbildung 84 zeigt einen zeitlichen Verlauf verschiedener Größenklassen für die Messstation Dresden-Nord (Schlesischer Platz) seit dem Jahr 2003 bis in das Jahr 2018. Ähnlich den Messwerten aus Leipzig gingen auch hier die Werte an der verkehrsnahen Station deutlich zurück. Die Abnahme der Partikelanzahlkonzentration zwischen 5 und 800 nm beträgt dabei 73 Prozent. Damit ist diese Abnahme doppelt so groß wie die Abnahme der Werte für PM₁₀ oder PM_{2.5}.

Schlussfolgerungen aus den Vorträgen – Wie könnten UFP-Messungen im Flächenland Brandenburg aussehen?

Die Messung ultrafeiner Partikel und die damit verbundene Aufrüstung von Messstationen kann nicht als trivial angesehen werden. Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung kann nur mit einem Mobilitätsgrößenspektrometer durchgeführt werden, welches sich im Vergleich zur Beschaffung eines Partikelzählers im dreifachen Preis widerspiegelt. Allerdings sind damit auch deutlich mehr Informationen zu Messergebnissen möglich (Partikelgröße, Quellbezug, Berechnungen zu Partikelvolumen und -masse). Ein Partikelzähler hingegen liefert nur die Gesamtanzahlkonzentration.

Für das Flächenland Brandenburg wäre es denkbar, eine repräsentative Messstation im Südosten zu etablieren. Diese sollte sich im städtischen Hintergrund befinden. Regionale Hintergrundstationen existieren bereits in Neuglobsow sowie im benachbarten Sachsen in Melpitz und bilden eine Referenz für einen Hintergrundpegel. Die Untersuchung von Trends erfordert somit Langzeitmessungen an solchen Messstellen, minimal müssen hier fünf Jahre angesetzt werden. Um die Inkremente des Verkehrssektors berücksichtigen zu können, müssen weitere Messungen mit Partikelgrößenspektrometern an verkehrsnahen Messpunkten durchgeführt werden.

Um auch die nichtflüchtigen Anteile des Partikelgrößenspektrums zu bestimmen, sollten neue Spektrometer mit einem Thermodenuder ausgestattet werden. So können Partikelgrößenverteilungen in Umgebungsluft einerseits und Verteilungen von hauptsächlich Rußpartikeln bestimmt werden. Aus diesem Unterschied der beiden Typen von Größenverteilungen kann eine Ursachenanalyse genauer durchgeführt werden.

Optional wäre ein drittes Partikelgrößenspektrometer für mobile Messungen oder auch kurze Messkampagnen, die nicht zur Trendanalyse gedacht sind. Ein Beispiel hierfür wären Messungen im Umfeld des Flughafens Berlin/Brandenburg, analog zu den Messungen aus dem Land Hessen.

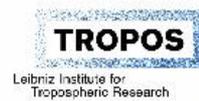
Die bereits existierenden Partikelzähler zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration können ebenfalls für mobile Messungen eingesetzt werden. Andererseits könnten sie auch zur Qualitätssicherung der Spektrometer dienen, wenn sie in einer Art Ringvergleich von Station zu Station wandern. Dann können die ausgegebenen Anzahlkonzentrationen vom Zähler mit den berechneten Konzentrationen aus der Partikelgrößenverteilung verglichen werden. Um die Qualitätsstandards zu erfüllen, sollte sich letzter Wert in einem Toleranzbereich von plus/minus zehn Prozent bewegen. Dies setzt allerdings voraus, dass auch die Zähler gegen eine Referenz (Beispiel Elektrometer) kalibriert wurden.

9.2 FOLIEN ZUM WORKSHOP IM JANUAR 2020

TRENDS DER KONZENTRATIONEN VON BC UND ULTRAFEINEN PARTIKELN IN DEUTSCHLAND - LANGZEITBEOBACHTUNGEN DES DEUTSCHEN ULTRAFEIN-AEROSOL-NETZWERKS (GUAN)

Alfred Wiedensohler und das GUAN Team
Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig, Germany

Workshop "Ultrafine Partikel" MLUK Potsdam,
23. Januar 2020



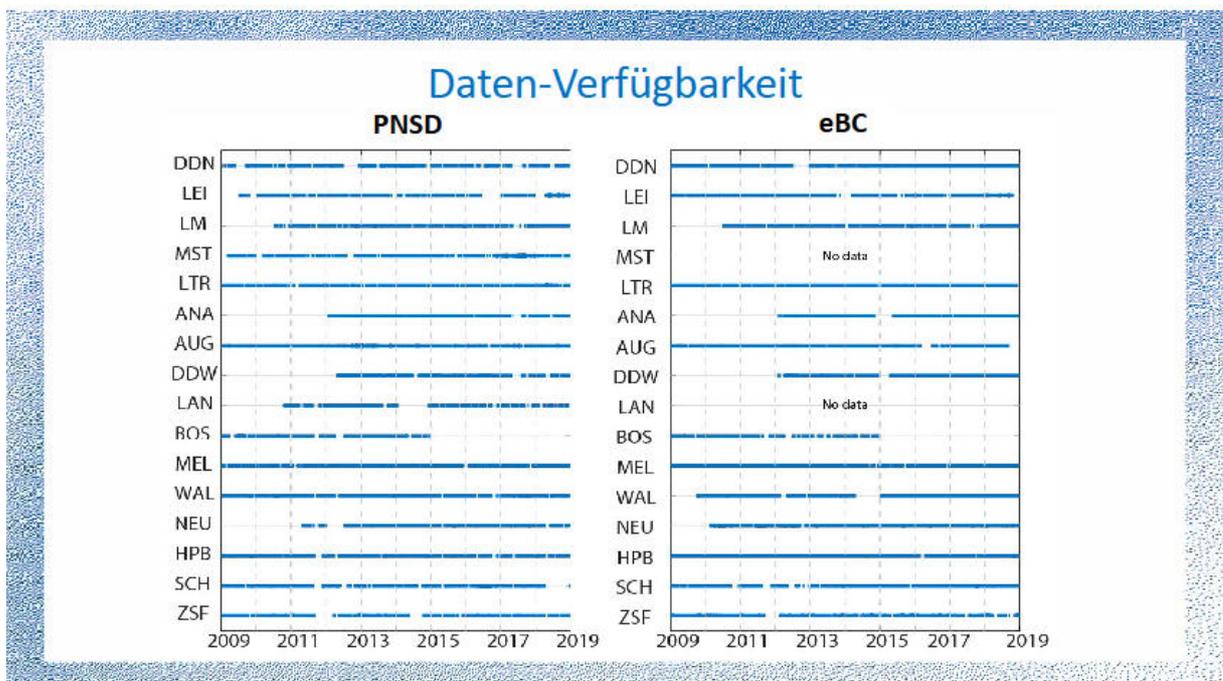
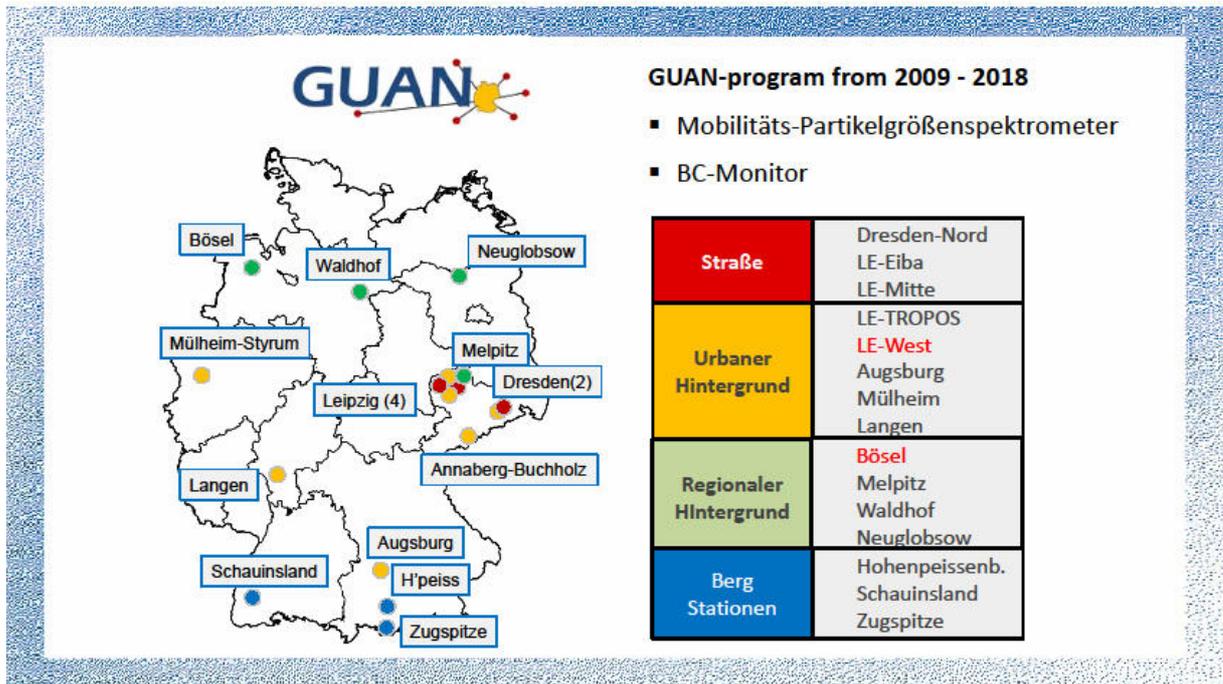
GUAN – German Ultrafine Aerosol Network

GUAN ist eine gemeinsame Initiative von Bundes- und Landesbehörden sowie Forschungseinrichtungen.

Die Ziele von GUAN sind Messungen von

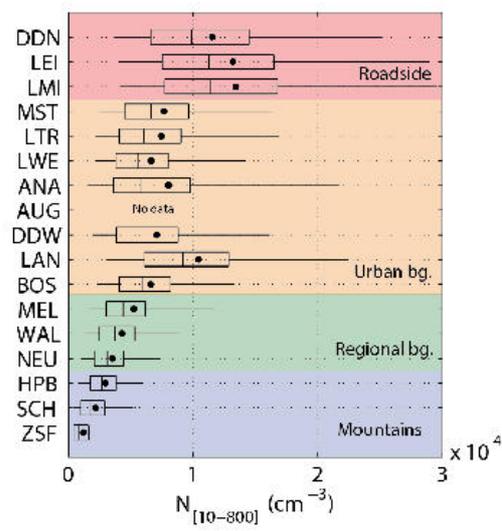
1. ultrafeinen Aerosolpartikeln (UFP <math><0,1 \mu\text{m}</math>)
2. Partikelgrößenverteilungen (10 - 800 nm)
3. Massenkonzentrationen des schwarzen Kohlenstoffes

mit hoher Qualitätssicherung durchführen sowie Daten von verschiedenen belasteten Gebieten zu erhalten

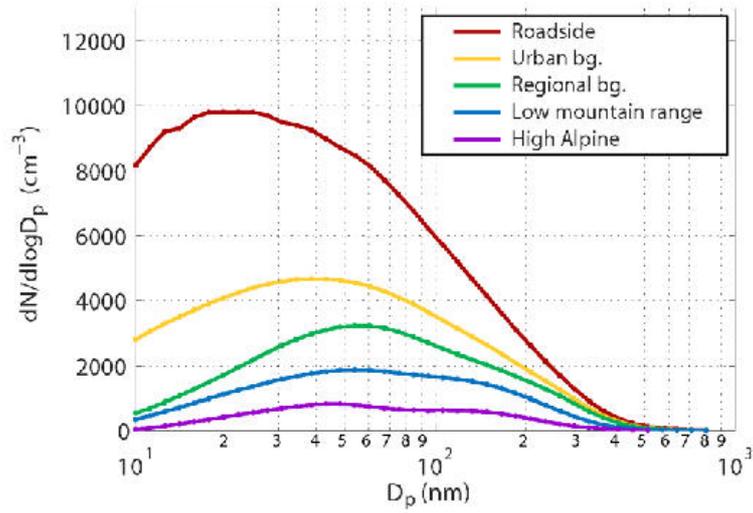


Partikelanzahl-Konzentration & -Größenverteilung

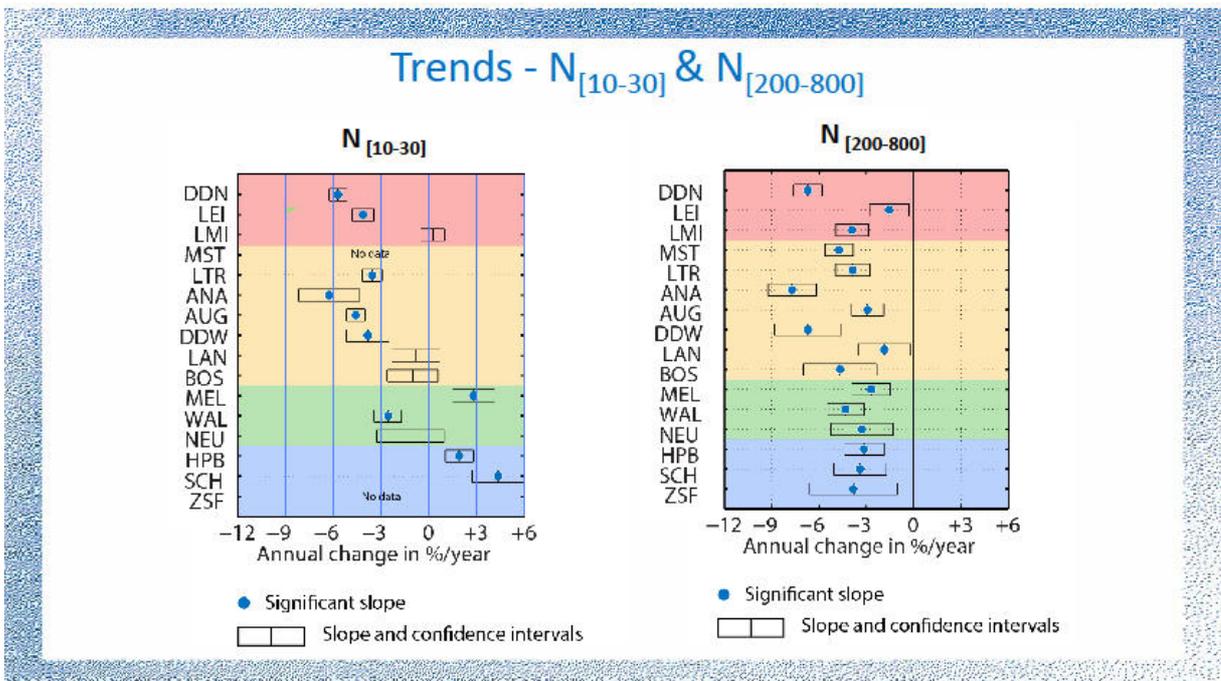
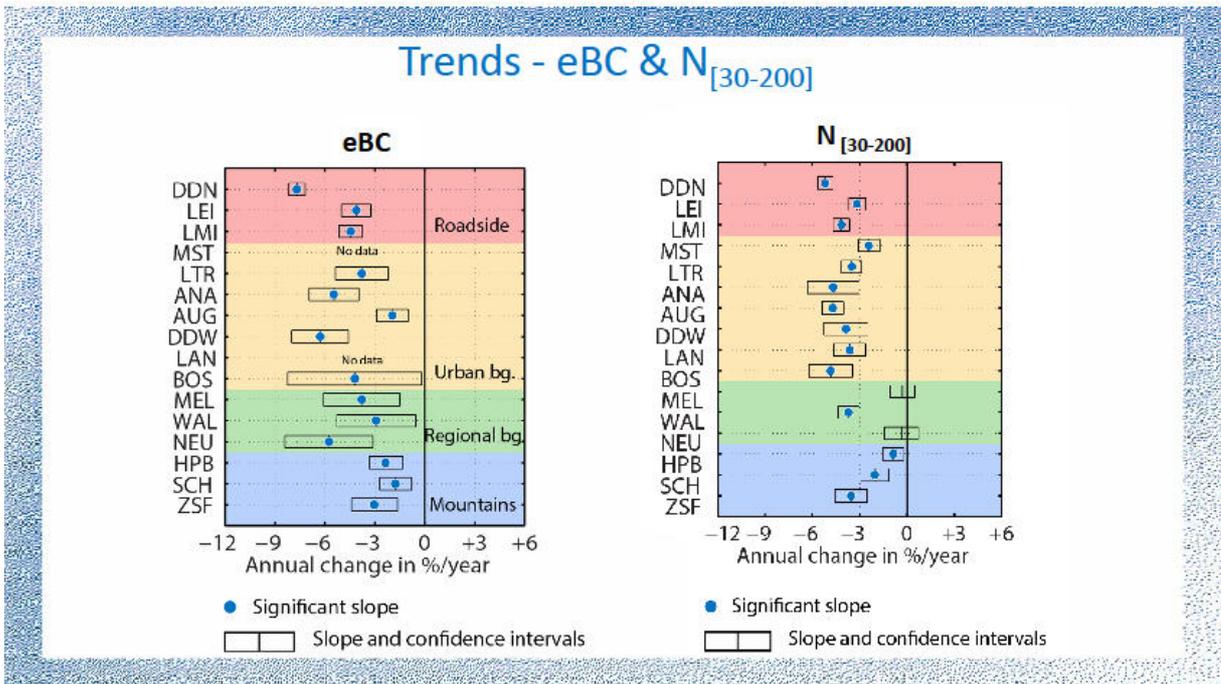
GUAN – Anzahlkonzentration (10-800 nm)

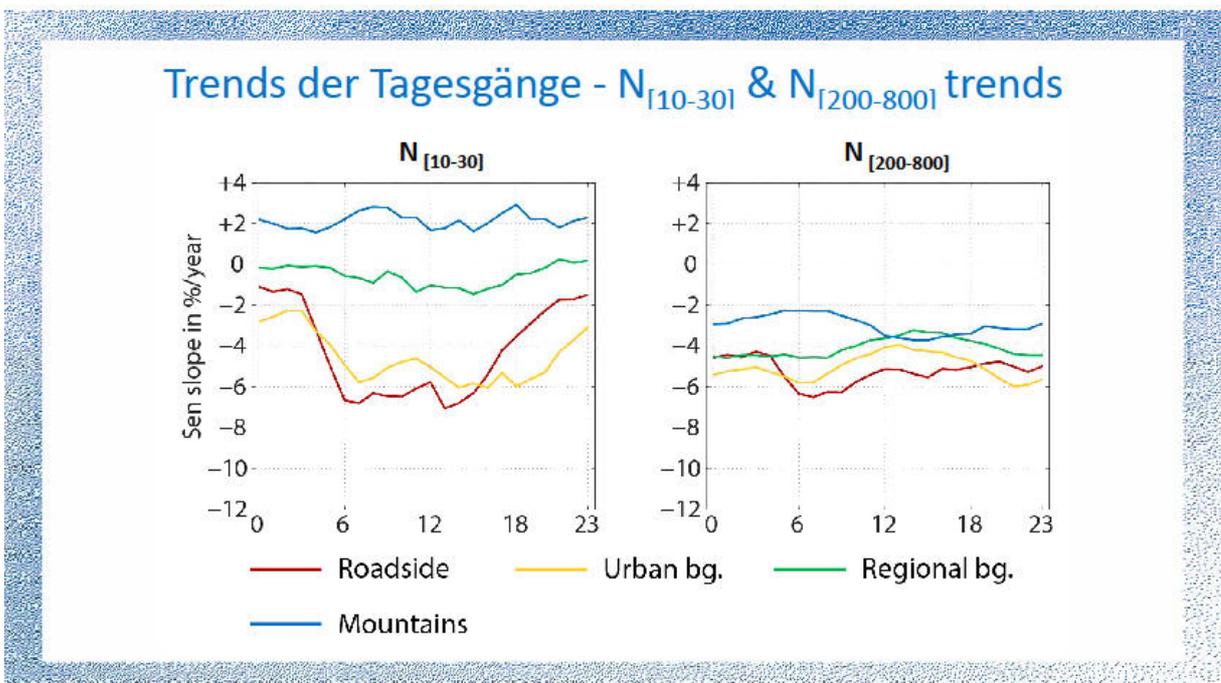
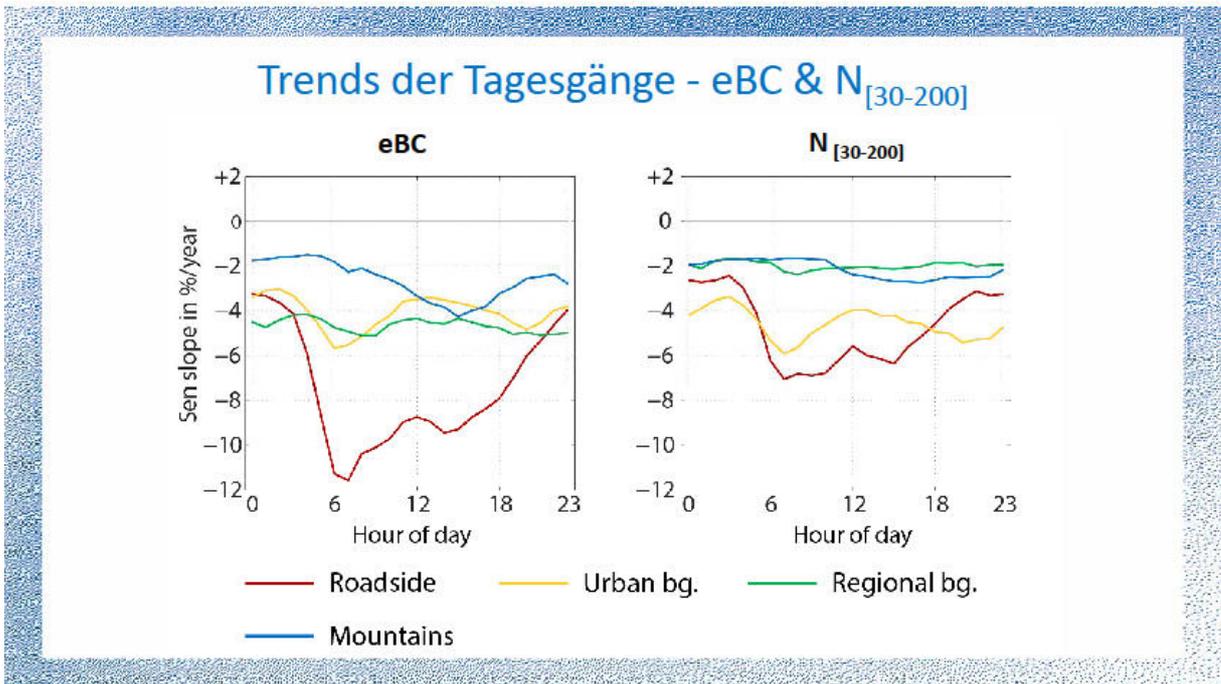


GUAN – Partikelanzahl-Größenverteilung



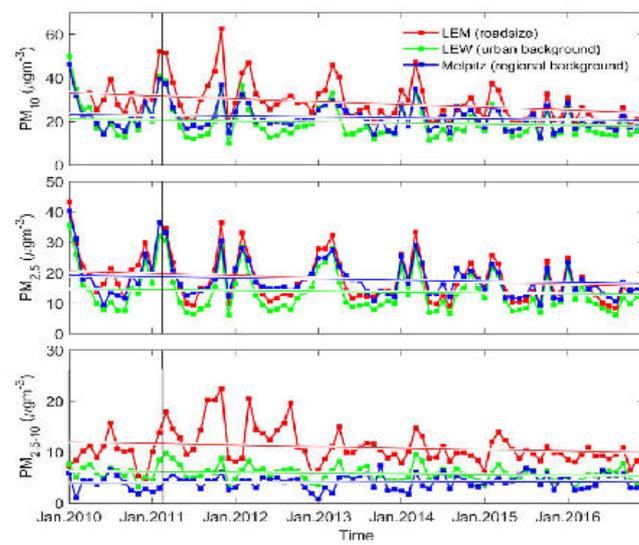
GUAN - Trends

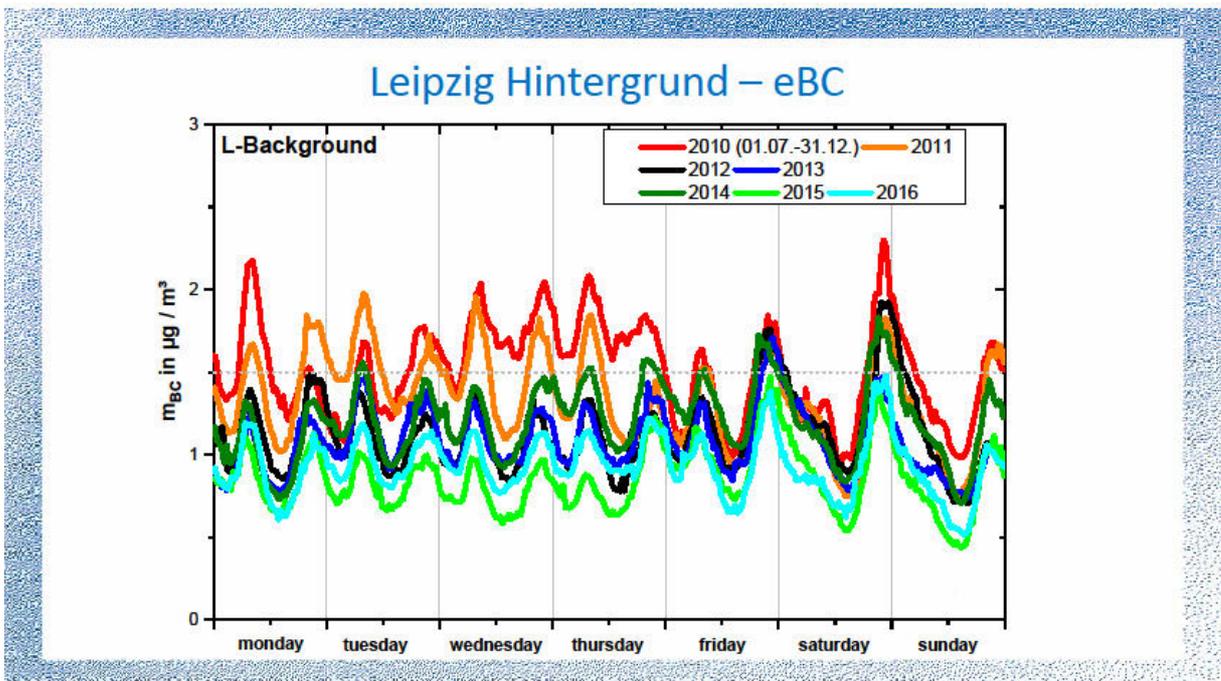
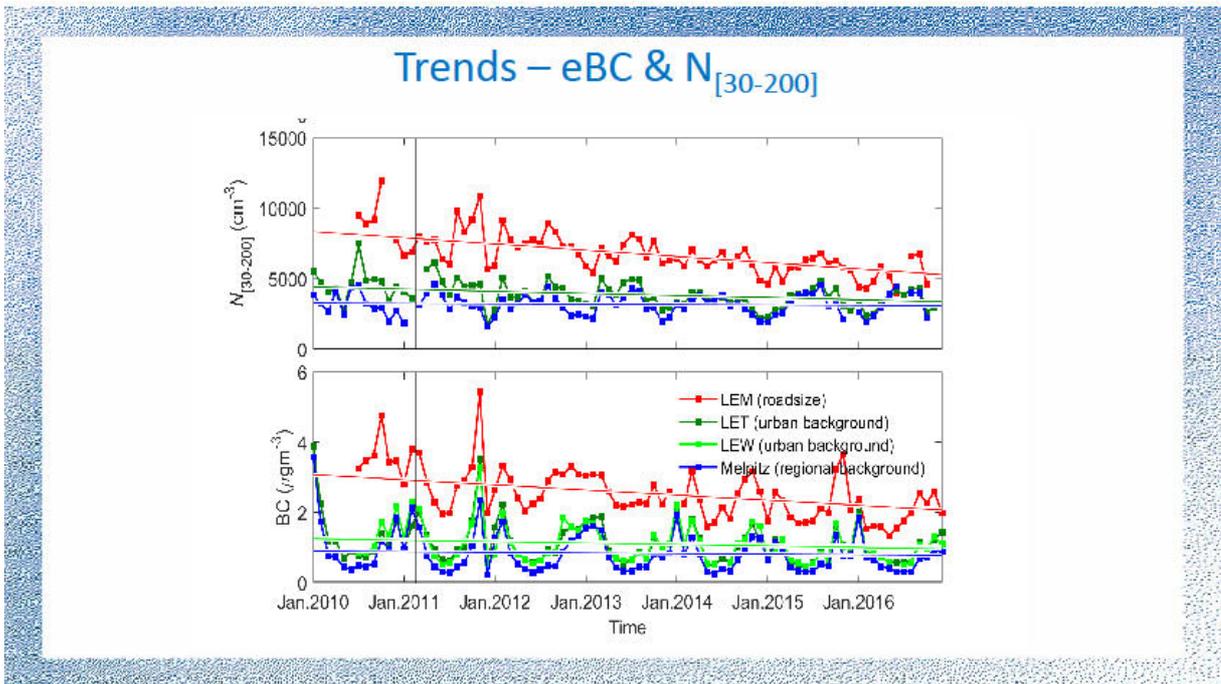


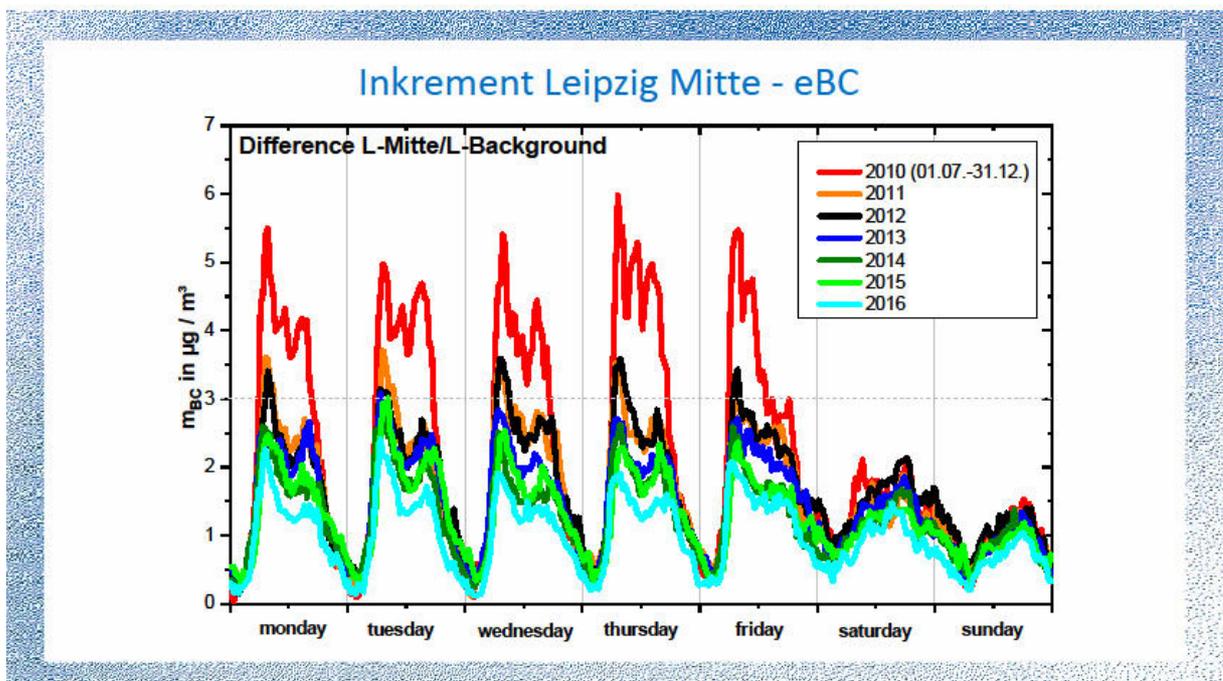
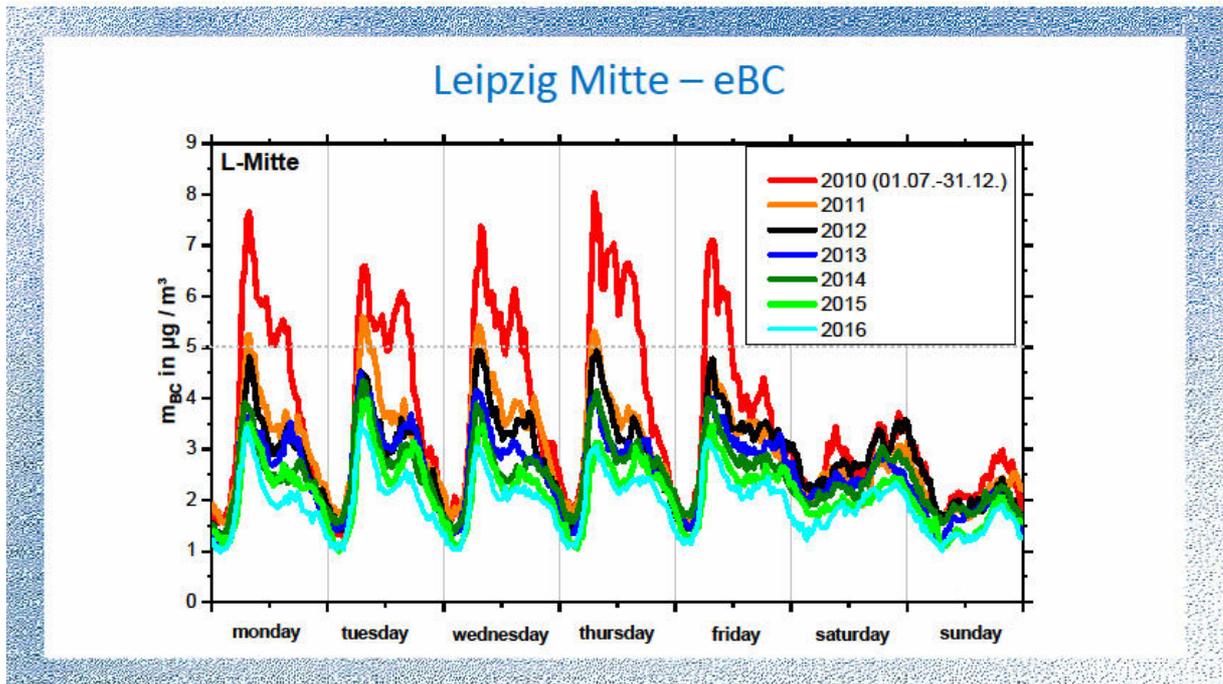


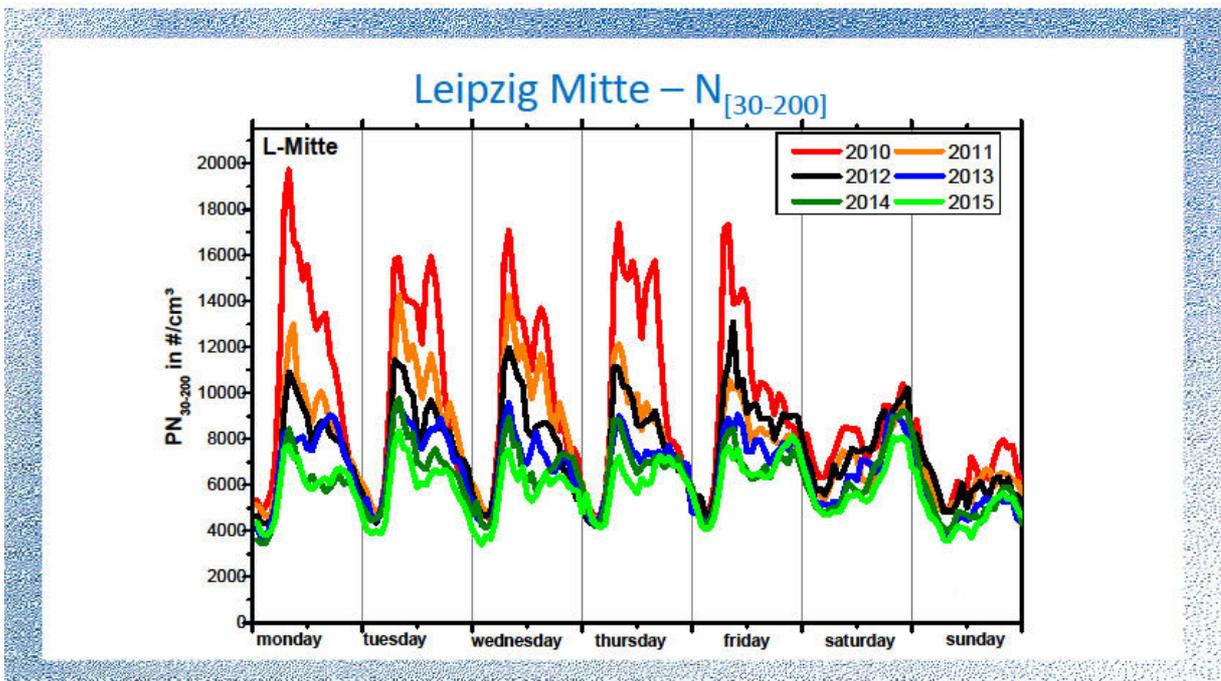
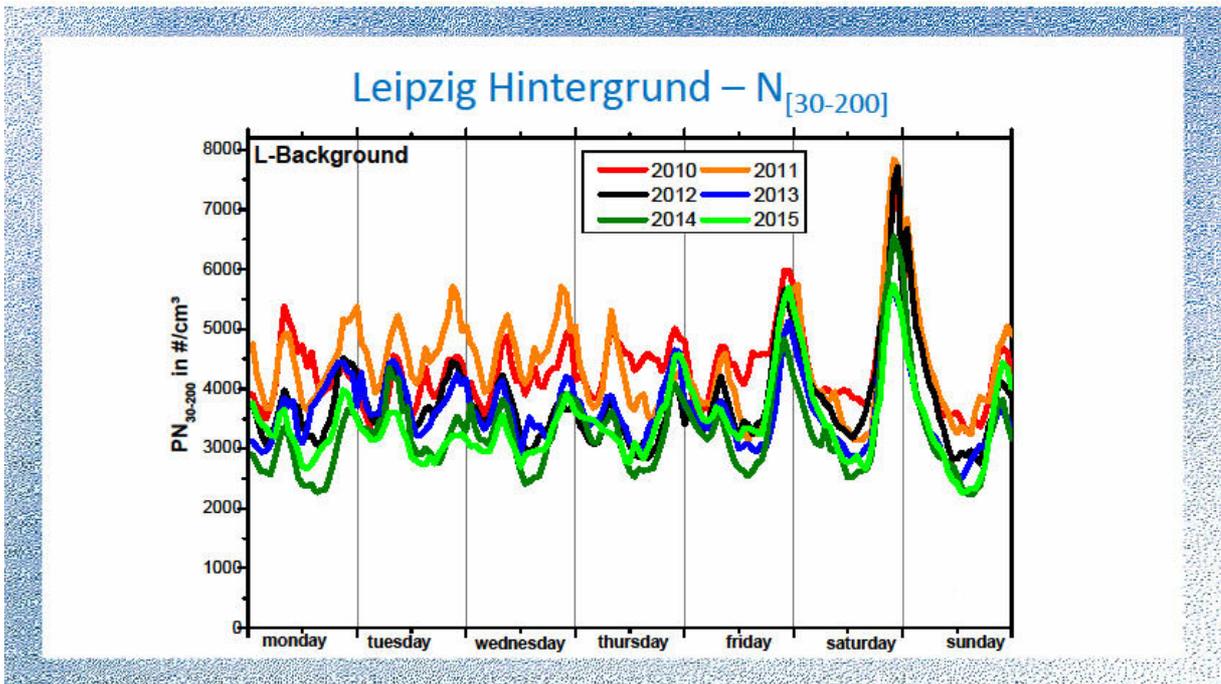
Umweltzone Leipzig

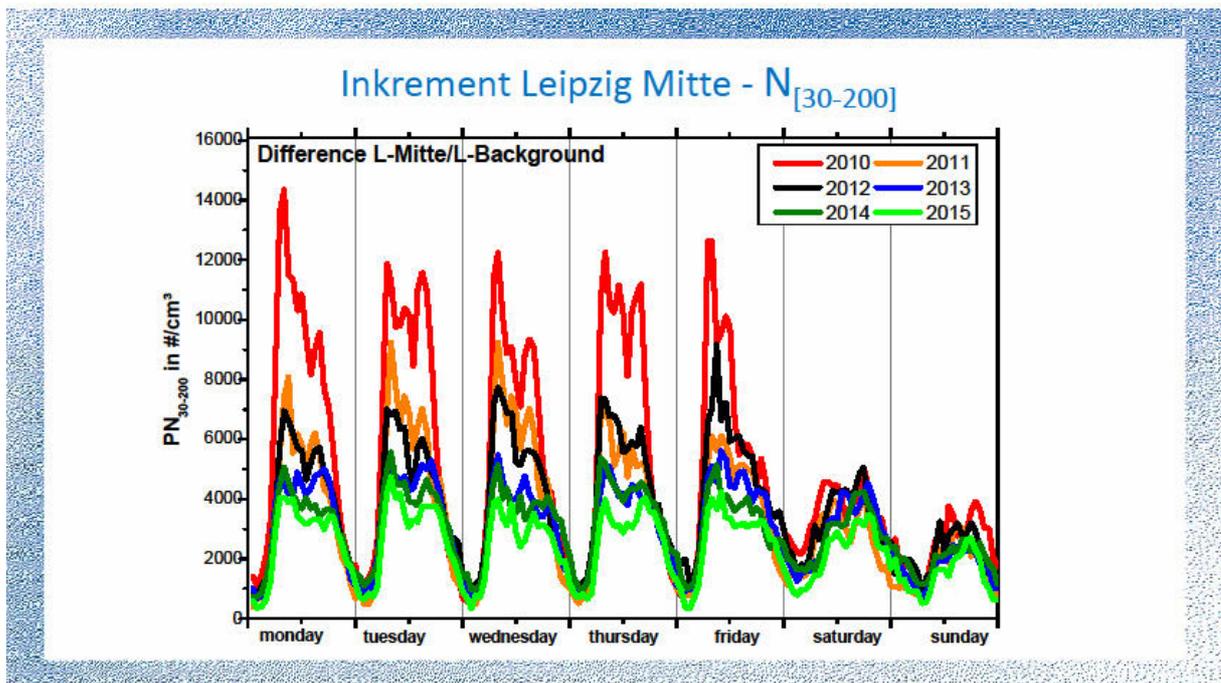
Trends – PM-Massenkonzentrationen







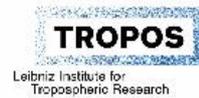




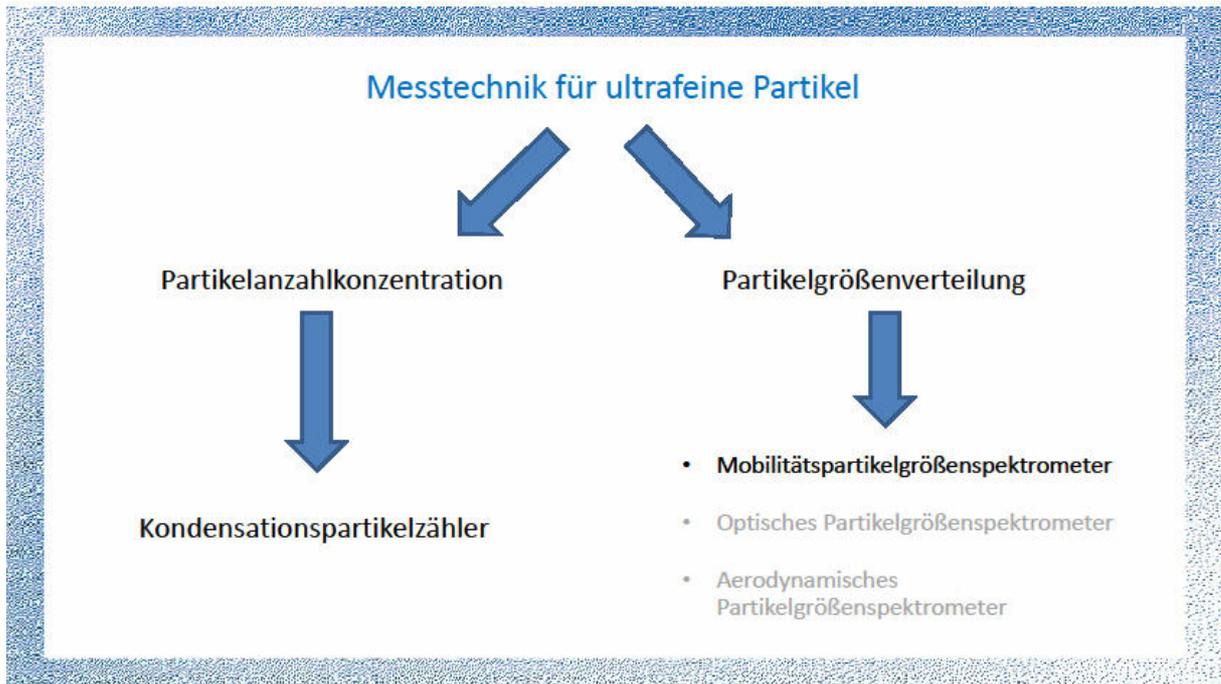
**Entwicklung eines Messkonzeptes mit dem Ziel der Erzeugung
einer qualitätsgesicherten Datenbasis für ultrafeine Partikel
insbesondere in der Gegenüberstellung von unterschiedlich
belasteten Gebieten im Land Brandenburg**

Maik Merkel – TROPOS

Workshop Potsdam – 23.01.2020



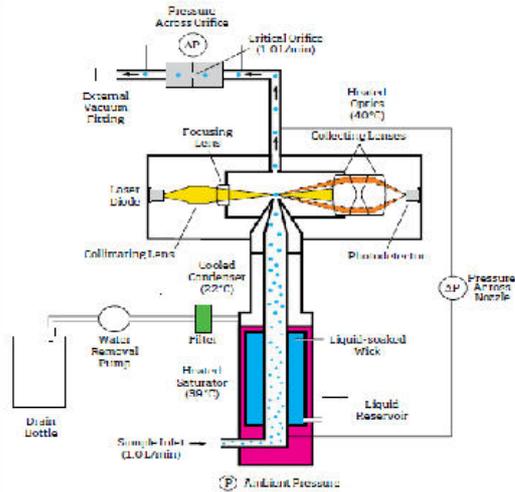
AP 2: Messtechnik für ultrafeine Partikel



Messung der Partikelanzahlkonzentration

- Kondensationspartikelzähler (CPC) können die Partikelanzahlkonzentration bis zu wenigen Nanometern bestimmen
- Im Vergleich zu optischen Größenspektrometern liegt die Detektionsgrenze bei deutlich geringeren Partikeldurchmessern
- Der Aerosolfluss wird mit dem Dampf einer Arbeitsflüssigkeit gesättigt
- Dieser Dampf kondensiert dann auf den Partikeln und vergrößert sie zu Tropfen
- Schließlich erfolgt die Zählung in einer Optik

Messung der Partikelanzahlkonzentration



Bilder: TSI.com

Messung der Partikelanzahlkonzentration - Normungen

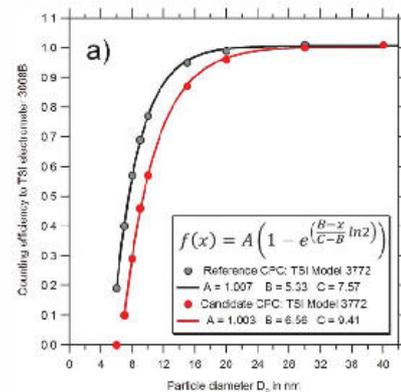
- CEN/TS 16976:2016 „Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols“
 - beschreibt ein Standardverfahren zur Ermittlung der Partikelanzahlkonzentration in Außenluft bis zu einem Wert von etwa 10^7 Part./cm³ und Mittelungszeiten größer gleich 1 Minute
 - untere und obere Partikelgröße sind definiert, sie liegt bei 7 nm im unteren Bereich und einigen Mikrometern als obere Grenze
 - weiter werden in dieser Norm die Probenahme, der Betrieb, die Datenverarbeitung sowie die Qualitätssicherungsmaßnahmen beschrieben

Messung der Partikelanzahlkonzentration - Normungen

- ISO 27891:2015 Partikelanzahlkonzentration – Kalibrierung von Kondensationspartikelzählern
 - beschreibt die Durchführung einer gültigen Kalibrierung für Partikelzähler
 - Verfahren zur Bestimmung der Nachweisempfindlichkeit eines Zählers mit Silberpartikeln für definierte Partikelanzahlkonzentrationen

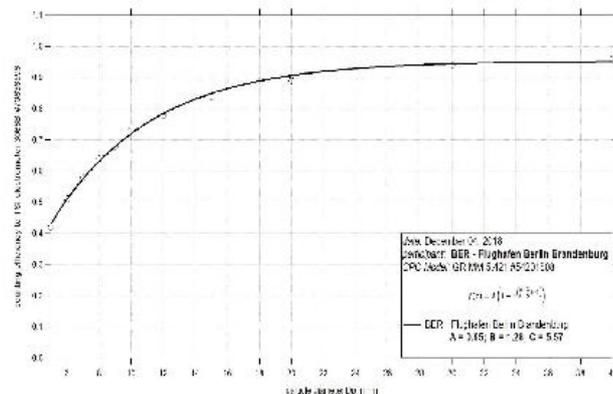
Messung der Partikelanzahlkonzentration

- Es existiert **kein direkter** Standard für die Partikelanzahlkonzentration!
- Die **Referenzkonzentration** wird durch ein **Elektrometer** bestimmt
- **Kalibrierfolge:**
 - Kalibrierung eines Elektrometers gegen eine femto-A Quelle (metrologische Institute z. Bsp. NIST, NPL, PTB)
 - Kalibrierung eines Referenzpartikelzählers
 - Kalibrierung von anderen Prüflingen



Messung der Partikelanzahlkonzentration

- GRIMM-Partikelzähler bereits im LfU vorhanden
- Solche Modelle haben bereits an Kalibrierworkshops im WCCAP teilgenommen



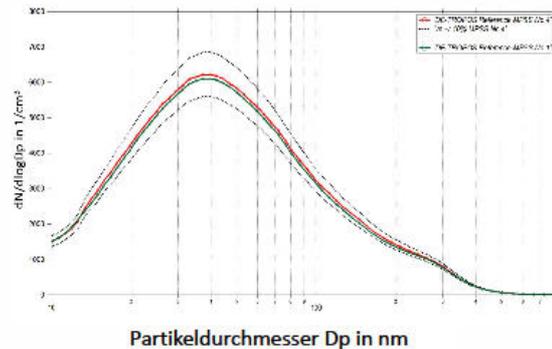
Messung der Anzahlkonzentration – Vor- und Nachteile

- Anzahlkonzentration schnell und unkompliziert zu messen, zumal wenn Messgeräte vorhanden sind
- Werte können in hoher Zeitaufösung gefahren werden
- Anzahlkonzentrationen sind das Integral über das gesamte Größenspektrum (z.B. N >10 nm)
- Sie gibt allerdings NUR Informationen über Höhe der Partikelbelastung bzgl. der Anzahl.
- Keine Informationen über die Größe der Partikel und welcher Größenbereich die Anzahl bestimmt
- Regelmäßige Kontrollen/Vergleichsmessungen/Kalibrierungen notwendig

Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung

Nach der Mehrfachladungsinversion muss die berechnete Partikelanzahlgrößenverteilung hinsichtlich den folgenden Punkten korrigiert werden:

- Zähleffizienzkurve des Partikelzählers
- Interne Verlustkorrektur hinsichtlich Diffusion (Prinzip der Äquivalentlänge)
- Diffusionsverluste in Zuleitungen



Wiedensohler et al. (2012). Mobility Particle Size Spectrometers: Harmonization of Technical Standards and Data Structure to Facilitate High Quality Long-term Observations of Atmospheric Particle Number Size Distributions. AMT 5, 657–685.

Messung der Partikelanzahlgrößenverteilung - Normungen

- CEN/TS 17434:2019: Außenluft – Bestimmung des Partikelgrößenspektrums des atmosphärischen Aerosols mit einem Partikelgrößenmobilitätsspektrometer (MPSS)
 - beschreibt ein Standardverfahren zur Ermittlung von Partikelanzahlgrößenverteilungen in Außenluft im Größenbereich von 10 bis 800 nm bei Gesamtkonzentrationen bis etwa 10^5 Part./ cm^3 und einer Zeitauflösung von wenigen Minuten
 - Es beschreibt die Leistungskenngrößen und Mindestanforderungen an die verwendeten Geräte und Ausrüstungen
 - weiter werden in dieser Norm die Probenahme, der Betrieb, die Datenverarbeitung sowie die Qualitätssicherungsmaßnahmen beschrieben

Messung der Partikelanzahlgrößenverteilung – Vor-/Nachteile

- Partikelgrößenverteilung ist ein Abbild des gesamten Partikelgrößenspektrums von wenigen Nanometern bis knapp 1 μm
- Anzahlkonzentrationen des gesamten Größenspektrums (10-800 nm) können berechnet werden, Vergleich mit Anzahlkonzentration von Partikelzählern
- Berechnung von Größenklassen möglich (Vergleich Sachsen/Hessen)

| Abkürzung | Partikelgrößenbereich, Anwendung |
|-----------|----------------------------------|
| N1 | 5 – 10 nm * |
| N2 | 10 – 20 nm |
| N3 | 20 – 30 nm |
| N4 | 30 – 50 nm |
| N5 | 50 – 70 nm |
| N6 | 70 – 100 nm |
| N7 | 100 – 200 nm |
| N8 | 200 – 800 nm |

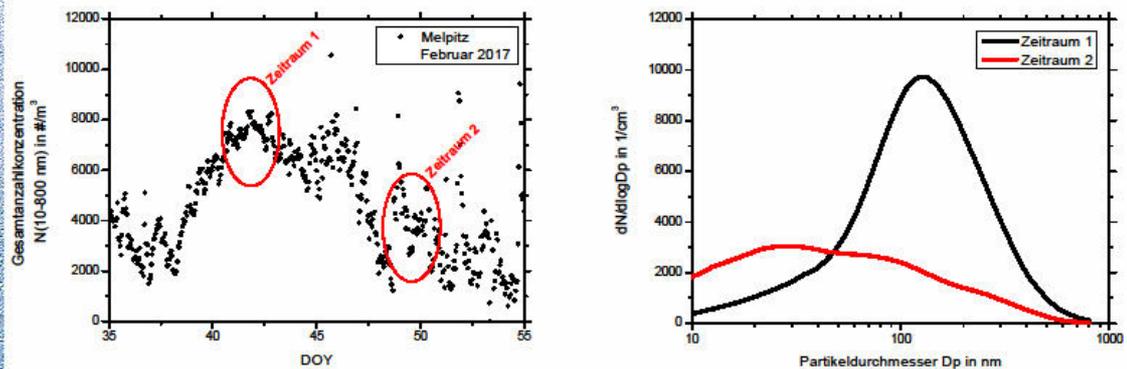
Messung der Partikelanzahlgrößenverteilung – Vor-/Nachteile

- Berechnung von Parametern wie Volumen-/Massenkonzentration ist möglich
- Informationen über die Größe der Partikel und welcher Größenbereich die Anzahl bestimmt
- Sinnvolle Zeitauflösung:
 - => Messung (5 Minuten)
 - => Datenbank (1 Stunde)
- Quellen von Partikeln können interpretiert oder ausgeschlossen werden
- Wartung und Kalibrierung auch hier nötig
- Vergleichbarkeit zu anderen Messstationen im GUAN-Netzwerk kann hergestellt werden

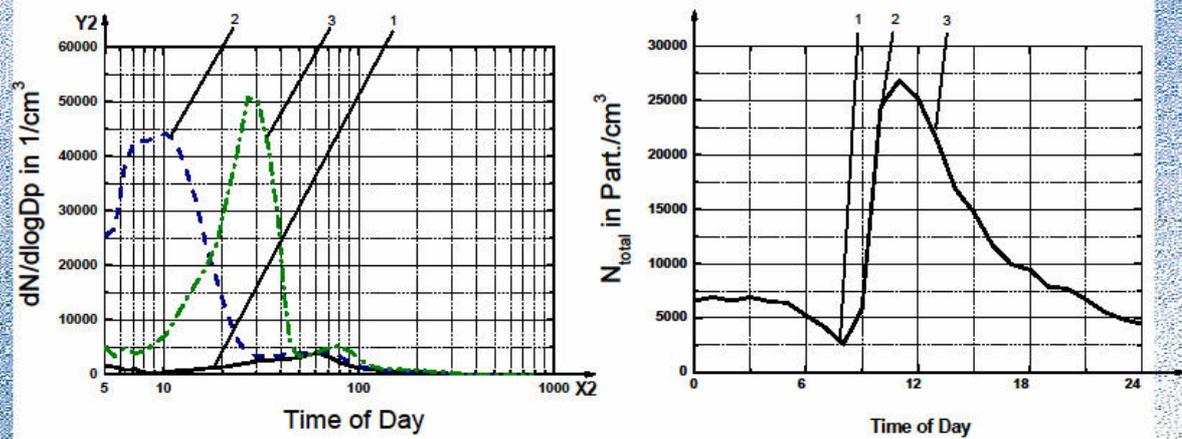
Messung der Partikelanzahlgrößenverteilung – Vor-/Nachteile

- ⇒ Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mehr Informationen zur Partikelbelastung als die reine Partikelanzahlkonzentration
- ⇒ Sie ist allerdings auch kostenintensiver in der Anschaffung
- ⇒ In den jährlichen Kosten sind sie allerdings nur unwesentlich höher
- ⇒ Einbindung ins GUAN-Netz für Langzeitmessungen wären sie vorteilhaft

Beispiel: Vergleich Anzahlkonzentration zu Größenverteilung



Beispiel: Vergleich Anzahlkonzentration zu Größenverteilung



Messtechnik im GUAN-Netzwerk

| Nr. | Stationsname | Partikelgrößenverteilung | Messtechnik | Größenbereich | Gesamtanzahlkonzentration |
|-----|------------------------------|--------------------------|-------------|---------------|---------------------------|
| 1 | Annaberg-Buchholz | x | MPSS | 10-800nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 2 | Augsburg | x | TDMPS | 5-800 nm | x |
| 3 | Bösel | x | MPSS | 10-800nm | |
| 4 | Dresden-Nord | x | TDMPS | 5-800 nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 5 | Dresden-Winkelmannstr. | x | MPSS | 10-800nm | (x - Funktionskontrolle) |
| 6 | Hohenpeißenberg | x | MPSS | 10-800nm | x |
| 7 | Langen | x | MPSS | 10-600nm | x |
| 8 | Leipzig Eisenbahnstraße | x | MPSS | 10-800nm | |
| 9 | Leipzig-Mitte | x | MPSS | 10-800nm | |
| 10 | Leipzig-Tropas | x | TDMPS | 5-800 nm | |
| 11 | Leipzig-West | x | TDMPS | 5-800 nm | |
| 12 | Melpitz | x | TDMPS | 5-800 nm | |
| 13 | Mülheim-Styrum | x | MPSS | 14-750nm | |
| 14 | Neuglobsow | x | MPSS | 10-800nm | |
| 15 | Schauinsland | x | MPSS | 10-800nm | |
| 16 | Waldhof | x | MPSS | 10-800nm | |
| 17 | Zugspitze (Schneefernerhaus) | x | MPSS | 10-600nm | x |

Erforderliche Qualitätssicherungsmaßnahmen für UFP-Messungen

- Plausibilitätsprüfung der Daten – monatlich
- Wartung des Gerätes (Flusskontrolle, Butanol auffüllen) – monatlich
- Nullpunktverhalten, Größenbestimmung - vierteljährlich
- *Vergleichsmessungen an der Station - jährlich*
- *Jahreswartung und Vergleich im WCCAP-Labor – jährlich*
- *Datenkontrolle – optimal auch via Fernwartung*
- *Datenvalidierung – viertel-/halb-/jährlich*

Kostenschema für Messung der Partikelgrößenverteilung (inkl. MWSt.)

| | |
|---|---------|
| ▪ Mobilitätsgrößenspektrometer inkl. CPC und Auflader | 80000 € |
| ▪ Vakuumpumpe | 4000 € |
| ▪ Kompressor (Druckluftversorgung Trockner) | 6000 € |
| ▪ Verbrauchsmaterialien, Multimeter etc. | 4000 € |
| ▪ Aufbau/Installation | 5000 € |

Jährliche Kosten für den Betrieb eines Größenspektrometers

| | |
|--|--------|
| ▪ Stromkosten (MPSS, Kompressor, Pumpe) | 3000 € |
| ▪ Butanol (ca. 15 L) | 1000 € |
| ▪ PSL-Lösung (Kontrolle Größenbestimmung) | 100 € |
| ▪ Andere Verbrauchsmaterialien (Reinigung, etc.) | 200 € |
| ▪ Kosten für Vergleichsmessung und Jahreswartung | 5000€ |

Messnetz Brandenburg – mögliche Einbindungen in das GUAN-Netzwerk



Neuglobsow an der Grenze zu Mecklenburg-Vorpommern bereits als GUAN-Station vorhanden

Südwestlich in Sachsen Melpitz als weitere Station

Beide Stationen regionaler Hintergrund

Messnetz Brandenburg – mögliche Einbindungen in das GUAN-Netzwerk

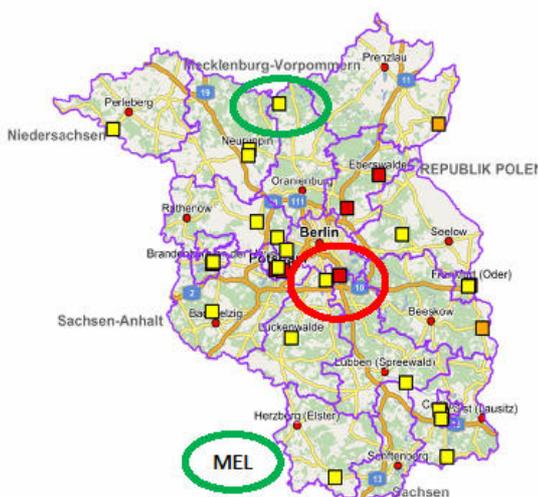


Denkbar wären Hintergrundmessungen in Südost-Brandenburg (Spreewald, evtl. Cottbus oder Spremberg)

⇒ Einfluss der Anströmungsrichtung könnte hier Partikelkonzentrationen beeinflussen (östliche Anströmung)

Dies erfordert allerdings die Aufrüstung der Infrastruktur in bestehenden Messstationen

Messnetz Brandenburg – mögliche Einbindungen in das GUAN-Netzwerk



Denkbar wären ebenso Messungen südöstlich von Berlin

⇒ Urbaner Einfluss (städtischer Verkehr/Flughafen) könnte hier Partikelkonzentration beeinflussen

Dies erfordert allerdings die Aufrüstung der Infrastruktur in bestehenden Messstationen

Zusammenfassung AP2 - Messtechnik

- Ultrafeine Partikel können prinzipiell nur durch die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung ermittelt werden
- Für die Messung der Gesamtpartikelanzahl-Konzentration reichen Partikelzähler aus
- Für epidemiologische Studien und andere wissenschaftliche Fragestellungen ist die komplette Aufnahme der PGV von Vorteil (GUAN-Netz)

Zusammenfassung AP2 - Messtechnik

- Die UFP-Belastung (in Brandenburg) kann durch Bestimmung der PGV wesentlich besser beurteilt werden, auch hinsichtlich längerfristigen Messprogrammen
- Aussagekräftigere bzw. wissenschaftliche Trendanalysen sind nur dann ableitbar
- Eine UFP-Quellen-Zuordnung lässt sich nur mit Hilfe der PGV bestimmen
- Die Qualitätssicherung der Messdaten sind notwendig und sollten den allgemeinen Anforderungen folgen (GUAN, ACTRIS)

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie



Erfahrungen aus der Messpraxis in Hessen

Diana Rose

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dezernat I2: Luftreinhaltung, Immissionen

Workshop „Entwicklung eines Messkonzepts für ultrafeine Partikel im Land Brandenburg“
Potsdam, den 23. Januar 2020

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie



Flughafen Frankfurt – Mittelpunkt der UFP-Messungen in Hessen

- Sorge der Bevölkerung, dass Flughafen die Luftqualität in der Umgebung beeinträchtigt
- eigene Messungen von Bürgerinitiativen mit Low-Cost-Geräten in Umgebung des FRA
 - reklamieren, dass Überflüge zu hohen UFP-Konzentrationen am Boden führen
- **09/2015:** Kooperation des HLNUG mit UBA: Betrieb eines **CPCs** (Gesamtkonzentration, 2,5 nm – 1 µm) in bestehender Messstation in **Raunheim** (ca. 5 km entfernt von FRA, unterhalb der Anfluglinie)
 - Indizien, dass Flugbetrieb Quelle für UFP ist
- **09/2017:** Start des Messprogramms UFP in Umgebung des FRA

Messkonzept des HLNUG

| Fragestellung | Messgerät | Bemerkung |
|---|-----------|---|
| Welche Menge an UFP trägt der Flugbetrieb als Ganzes (FRA-Gelände und Überflüge) in der Umgebung bei? | SMPS | <ul style="list-style-type: none"> Standorte: einige Kilometer Entfernung zu FRA-Gelände keine hohe Zeitauflösung notwendig Größenauflösung sinnvoll |
| Tragen auch Überflüge zur Erhöhung der UFP-Konzentration am Boden bei? | CPC | <ul style="list-style-type: none"> Standorte: wenige hundert Meter Entfernung zu Anfluglinie hohe Zeitauflösung, Verzicht auf Größenauflösung |

3

Einsatz von **SMPS**-Geräten

Messaufbau:

- Probenahme (PM_{10}) und Trocknung auf $RH < 40\%$ (TSI 3772200)
- SMPS mit langem DMA (TSI 3938) und Butanol-CPC (TSI 3772 bzw. TSI 3750), Kr^{85} als Neutralisator
- Reinigung des CPC-Abgases (Catalytic Vapor Filter bzw. AMS 8100)

Einstellungen:

- Flüsse: 1 lpm Aerosol, 5 lpm Sheath
- Größenbereich: 10 nm – 500 nm, 108 Kanäle
- Zeitauflösung: 240 s Scanzeit + Retrace/Purge → insg. ein Scan jede 5 min
- Korrekturen: Mehrfachladung + Diffusion

4

Einsatz von SMPS-Geräten

Anbindung an Messnetzzentrale:

- Speichern der Daten im ACTRIS-Format auf Geräte-Laptop im Messcontainer
- automatischer Abruf der Daten **alle halbe Stunde** → **Speichern aller gemessenen Größenverteilungen** (6 x 10⁸ Werte pro Gerät) und zusätzliche Parameter in **UBIS-Datenbank**
- Zugriff per Remote-Verbindung (NetSupport) auf Geräte-Laptop möglich
→ z.B. für Ansteuerung des SMPS bei Problemen

Aggregation:

Halbstundenmittelwerte der Anzahlkonzentration zusammengefasst in 7 Größenklassen (Klasseneinteilung in Anlehnung an LfLUG Sachsen)

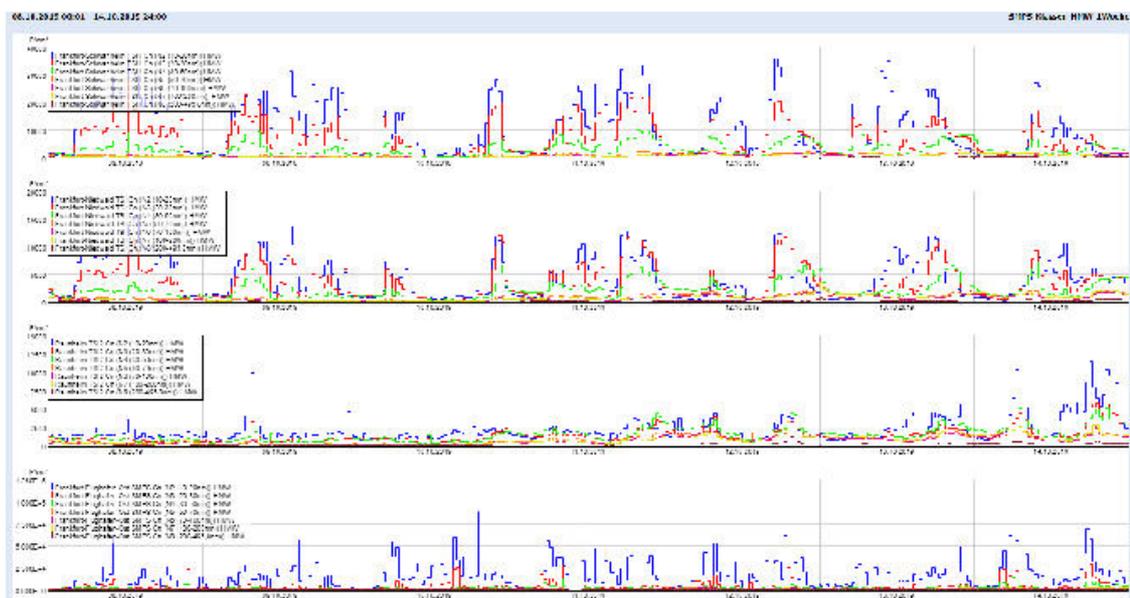
10 – 20 nm, 20 – 30 nm, 30 – 50 nm, 50 – 70 nm, 70 – 100 nm, 100 – 200 nm, 200 – 500 nm

Plausibilitätsprüfung:

- täglich: zeitlicher Verlauf der HMW in Größenklassen
- wöchentlich: zeitlicher Verlauf der Größenverteilungen anhand von Contour-Plots, die mit R-code erstellt werden

5

Beispiel für Plausibilitätsprüfung mit UBIS

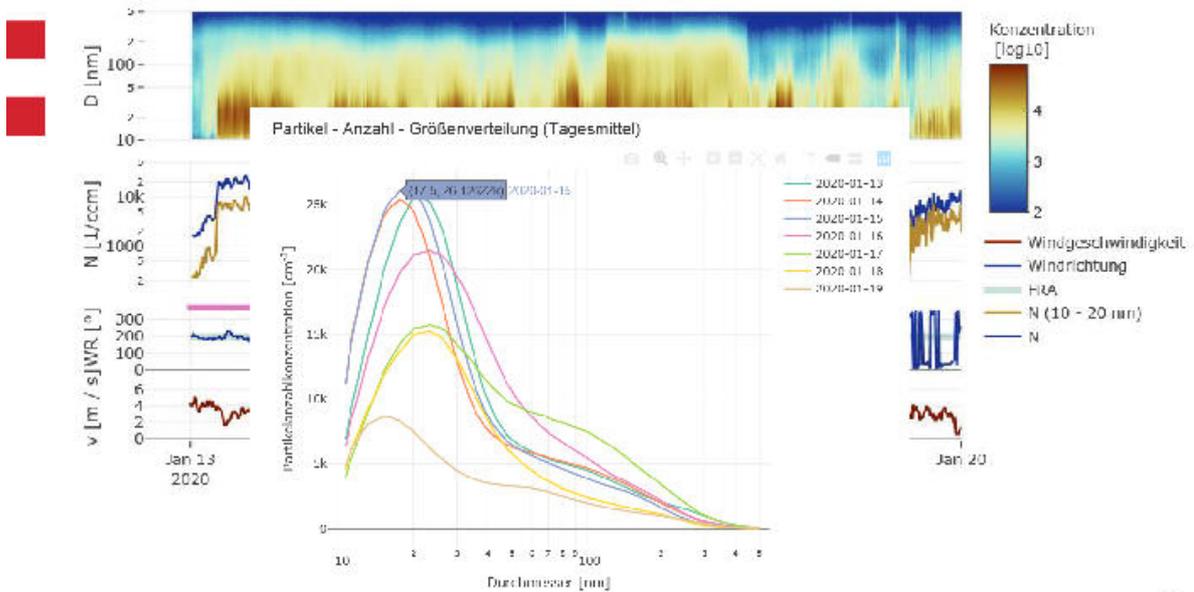


6



Beispiel für Plausibilitätsprüfung mit R-code

Zeitreihe (letzte Woche, originale Auflösung)

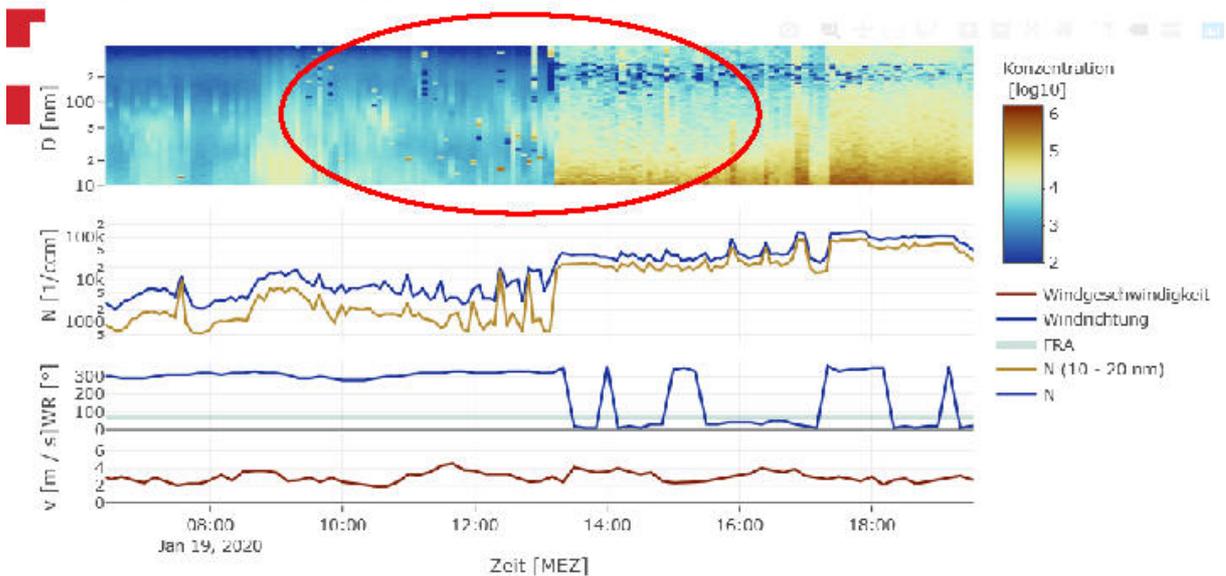


7



Beispiel für Plausibilitätsprüfung mit R-code

Fehlerhafte Messdaten aufgrund zu geringem Butanolgehalts im CPC
 → gut sichtbar in Contourplot, aber nicht unbedingt in Gesamtkonzentration



8

Einsatz von CPC-Geräten

| CPC in Messcontainer | CPC als Standalone-Gerät |
|---|--|
| Probenahme (PM _{2,5}) und Trocknung auf RH < 40%, optional mit Verdünnung 1:3 (TSI 3772200) | EDM465 von Grimm: |
| Vorabscheider (Zyklon, 0,8 µm) | Butanol-CPC (D ₅₀ = 7 nm) inklusive Probenahme, Trocknung, Vorabscheider (2,2 µm) im wetterfesten Gehäuse |
| Butanol-CPC: TSI 3750 , D ₅₀ = 7 nm | |
| Reinigung des CPC-Abgases (AMS 8100) | keine Reinigung des CPC-Abgases |
| Zeitauflösung: 1 s | Zeitauflösung: 1 s |
| Speichern der Messdaten auf Stationsrechner (Raspberry Pi) | Umbau der original Grimm-Datenerfassung auf eigene → Speichern der Messdaten auf Stationsrechner (Raspberry Pi) |

9

Einsatz von CPC-Geräten

Anbindung an Messnetzzentrale:

- automatischer Abruf der Daten alle halbe Stunde → **Speichern aller Messwerte** (Partikelkonzentration und zusätzliche Parameter in **Sekundenauflösung**) in **UBIS-Datenbank**
- zusätzlich Zugriff auf Stationsrechner möglich, z.B. für Ansteuerung des CPCs bei Problemen

Aggregation:

Halbstundenmittelwerte der Anzahlkonzentration

Plausibilitätsprüfung:

täglich: zeitlicher Verlauf der HMW der Gesamtkonzentration, bei Auffälligkeiten auch zeitlicher Verlauf der Sekundenwerte

10

Wartungsaufwand

- UFP-Messgeräte werden bei regulärer Stationswartung mitbetreut:
 - Butanol auffüllen, Vorabscheider reinigen, Nullfiltertest
 - Zeitaufwand pro Gerät: ca. 15-20 min, alle 4 Wochen (bei Grimm-Geräten alle 3 Wochen wg. geringerem Butanolvorrat)
 - Schulung des Personals durch Hersteller zu Beginn des Projektes
- UFP-Geräte laufen sehr stabil, keine außergewöhnlich häufigen Ausfälle

11

Qualitätssicherung

- Kalibrierung der Geräte beim WCCAP alle 1 – 1,5 Jahre
- neue Geräte werden mit Laborgerät verglichen
- zeitnah Entwicklung eines „Kalibrierracks“:
 - Diffusionsbatterie und CPC: Vergleich der CPC-Konzentration mit der Gesamtkonzentration aus SMPS-Größenverteilung (kleine Partikel werden vorher entfernt, damit unterschiedlicher Größenbereich nicht relevant)
 - Atomizer und Diffusionstrockner: Vernebelung von PSL-Partikeln zur Überprüfung der Größenklassierung
 - geplanter Einsatz des Racks pro Station: alle 2-3 Monate für jeweils 24 h
- Plausibilitätsprüfung:

Vergleich der nächtlichen Werte der Gesamtkonzentration an allen Standorten (Konzentrationen nahezu gleich, da alle Messgeräte im Umkreis von ca. 15 – 20 km)

12



Was geschieht mit den Messdaten?



- wissenschaftliche Auswertung der Daten in originaler zeitlicher Auflösung (SMPS: 5 min, CPC: 1 s) im Hinblick auf Fragestellungen den Flughafen betreffend
- Veröffentlichung dieser Auswertungen in Form regelmäßiger Berichte (ca. 1x pro Jahr)
- Veröffentlichung der aktuellen Messwerte auf HLNUG-Internetseite: **HMWs** der Gesamtkonzentration (CPC) oder Konzentration in Größenklassen (SMPS) für ausgewählte Stationen
- einige Anfragen von Bürgerinitiativen auf Herausgabe der Messwerte (teilweise auch originale Zeit- und Größenauflösung) unter Berufung auf das Umweltinformationsgesetz
- geplant: Bereitstellung der Daten für GUAN



13



Zusammenfassung



➤ Wartungsaufwand relativ überschaubar, da Geräte bisher sehr stabil laufen



➤ es fällt eine große Menge an Daten an, die ausgewertet werden muss
→ Auswertung bei SMPS nicht mit Standardtools machbar



- Geräte, dauerhaft im Einsatz: 4 SMPS, 3 CPC, in Kürze je eins mehr
- gespeicherte Messwerte (nur Konz.) pro Tag pro Gerät: SMPS: > 30.000, CPC: > 80.000
- Personal: 0,5 Techniker, 1,5 wiss. Mitarbeiter (teilweise finanziert aus Projektmitteln vom Land)

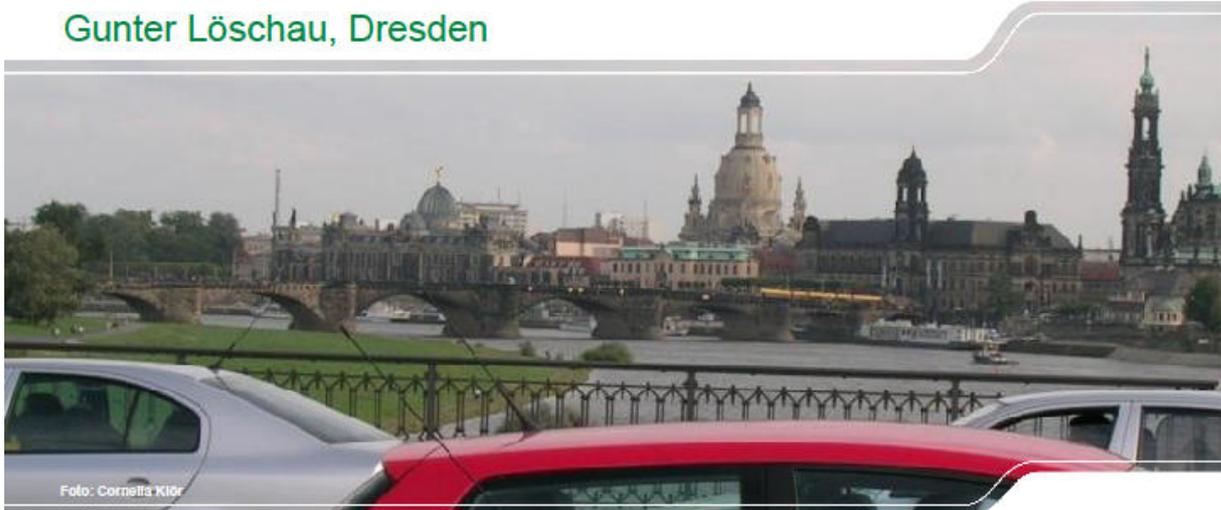
➤ Umgang mit Ergebnissen:

- Einordnung der Messwerte schwierig, da keine gesundheitlichen Empfehlungen oder Grenzwerte existieren
- viel Öffentlichkeitsarbeit notwendig, da großes Interesse in Bevölkerung besteht
- häufige Anfragen von Gemeinden: Bitte um Dokumentation der UFP-Belastung auf ihrer Gemarkung
- Unterstützung auf politischer Ebene wichtig

14

Beitrag Land Sachsen: Erfahrungen mit der Messung der Größenverteilung ultrafeiner Partikel

Gunter Löschau, Dresden



Workshop zum Projekt "Entwicklung eines Messkonzeptes mit dem Ziel der Erzeugung einer qualitätsgesicherten Datenbasis für ultrafeine Partikel insbesondere in der Gegenüberstellung von unterschiedlich belasteten Gebieten im Land Brandenburg" am 23. Januar 2020 im Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK) in Potsdam

Gliederung

- Einführung
- Betrieb der Sondermessungen von **ultrafeinen Partikeln (UFP)**
 - Messplatz, Messorte
 - Grundlagen, Datenhandling
 - Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle
 - Automatische Funktionskontrolle, Qualitätssicherungsexperiment, Messunsicherheit
 - Ergebnisse (Beispiele)
 - Zusammenfassung

Weshalb Messung ultrafeiner Partikel in Sachsen?

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



- Ultrafeine Partikel mit Durchmesser kleiner 0,1 µm tragen nur wenig zur Partikelmasse bei
- **Sinnvolle Ergänzung** zu den gesetzlich vorgegebenen Messungen von PM₁₀ und PM_{2,5}
- **Ziel: Veränderungen der Verbrennungspartikel in der Außenluft dokumentieren, wie z.B. Diesel-Fahrzeuge und Holzheizungen, da sie zum hoch toxischen Feinstaubanteil gehören und dadurch überproportional gesundheitlich relevant sind (WICHMANN)**

3 | 23.01.20 | Gunter Löschau



LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



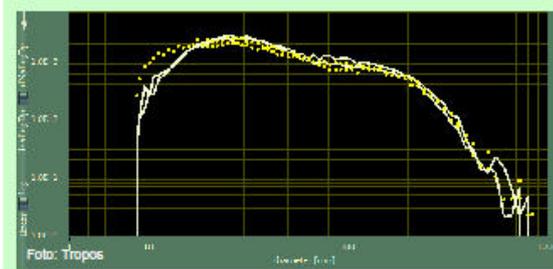
Wissenschaftliche Sondermessungen in Sachsen Ultrafeine Partikel und Ruß



■ Ruß als BC (Black Carbon)

■ Elektrisches Mobilitätsspektrometer
Bezeichnung SMPS (alt) neu: MPSS

■ Partikelgröße 10 - 800 nm



4 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Grundlagen für UFP-Messstationen weltweit

Betrieb nach einheitlichen Standards

Wiedensohler, A.; Birmili, W.; Nowak, A.; Sonntag, A.; Weinhold, K.; Merkel, M.; Wehner, B.; Tuch, T.; Pfeifer, S.; Fiebig, M.; Fjåraa, A. M.; Asmi, E.; Sellegri, K.; Depuy, R.; Venzac, H.; Villani, P.; Laj, P.; Aalto, P.; Ogren, J. A.; Swietlicki, E.; Williams, P.; Roldin, P.; Quincey, P.; Hüglin, C.; Fierz-Schmidhauser, R.; Gysel, M.; Weingartner, E.; Riccobono, F.; Santos, S.; Gröning, C.; Faloon, K.; Beddows, D.; Harrison, R.; Monahan, C.; Jennings, S. G.; O'Dowd, C. D.; Marinoni, A.; Horn, H.-G.; Keck, L.; Jiang, J.; Scheckman, J.; McMurry, P. H.; Deng, Z.; Zhao, C. S.; Moerman, M.; Henzing, B.; de Leeuw, G.; Lösschou, G. & Bastian, S.: Mobility particle size spectrometers: harmonization of technical standards and data structure to facilitate high quality long-term observations of atmospheric particle number size distributions. *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 657–685, 29 March 2012. <http://www.atmos-meas-tech.net/5/657/2012/amt-5-657-2012.html>

A. Wiedensohler, A. Wiesner, K. Weinhold, W. Birmili, M. Hermann, M. Merkel, T. Müller, S. Pfeifer, A. Schmidt, T. Tuch, F. Velarde, P. Quincey, S. Seeger & A. Nowak (2018): Mobility particle size spectrometers: Calibration procedures and measurement uncertainties, *Aerosol Science and Technology*, 52:2, 146-164, DOI: 10.1080/02786826.2017.1387229
<https://doi.org/10.1080/02786826.2017.1387229>

5 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Acht UFP- und BC-Messstationen in Sachsen

Überblick

| Messstation | Typ | Daten ab ¹ | Verantw. |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|----------|
| Dresden-Nord | Verkehr | 4/2001 | LfULG |
| Dresden-Winckelmannstr. | Städt. Hintergrund | 2011 | LfULG |
| Leipzig-Mitte | Verkehr | 7/2010 | Tropos |
| Leipzig-Eisenbahnstr. | Verkehr | 2010 | Tropos |
| Leipzig-Tropos | Städt. Hintergrund | 2010 | Tropos |
| Leipzig-West | Städt. Hintergrund | 7/2010 ² | Tropos |
| Annaberg-Buchholz | Verkehr | 2011 | LfULG |
| Melpitz | Ländlich | 2010 | Tropos |

¹ Messdaten gespeichert in LfULG-Datenbank zur Luftqualität

² Ende der Messung am 31.12.2016. Beginn 2017 Deutschneudorf

6 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Elektrische Mobilitätsspektrometer Luftgütemessnetz FS Sachsen

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



TROPOS

Leibniz Institute for
Tropospheric Research



Foto: Wiltram Birnill

- I Bauart: TROPOS
- I PM₁-Einlass und Trocknung
- I Radioaktive Quelle, Butanol
- I Partikelanzahl-Größenverteilung

| Messtation | Abk | Typ | Bemerkung |
|-------------------------|-----|-------------------------|---|
| Dresden-Nord | DDN | Städtische Straße | Twin-MPSS, Partikelgrößen 5 - 800 nm, LfULG-Projekt mit TROPOS, Messbeginn 2001 |
| Dresden-Winckelmannstr. | DDW | Städtischer Hintergrund | MPSS, Partikelgrößen 10 - 800 nm, EU-Projekt UFIREG (2011-2019) |
| Annaberg-Buchholz | ANA | Städtische Straße | MPSS, Partikelgrößen 10 - 800 nm, EU-Projekt UltraSchwarz (2011-2019) |

7 | 23.01.20 | Gunter Löschau

LfULG-Datenbank Luftqualität Reduzierung der Datenflut durch 8 Partikelgrößenklassen

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



TROPOS

Leibniz Institute for
Tropospheric Research

Teil 1: Partikelanzahlkonzentration in 1/cm³

| Abkürzung | Partikelgrößenbereich, Anwendung |
|-----------|----------------------------------|
| N1 | 5 – 10 nm * |
| N2 | 10 – 20 nm |
| N3 | 20 – 30 nm |
| N4 | 30 – 50 nm |
| N5 | 50 – 70 nm |
| N6 | 70 – 100 nm |
| N7 | 100 – 200 nm |
| N8 | 200 – 800 nm |

8 | 23.01.20 | Gunter Löschau

* An drei Messstationen zusätzlich

LfULG-Datenbank Luftqualität

5 Berechnungsgrößen für Partikeloberfläche und Partikelmasse

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Teil 2: Berechnete Partikelgrößen

| Abk. | Bemerkung | Einheit |
|----------|--|-----------------------------|
| N_PS1 | Partikeloberfläche von Partikeln <800 nm D_p ($\sim <1 \mu\text{m } D_{ae}$) | $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ |
| N_PM1 | Partikelmasse von Partikeln <800 nm D_p ($\sim <1 \mu\text{m } D_{ae}$), entspricht in etwa PM₁ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| N_PM0.25 | Partikelmasse von Partikeln <200 nm D_p ($\sim <0,25 \mu\text{m } D_{ae}$), entspricht in etwa PM_{0,25} | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| N_PM0.12 | Partikelmasse von Partikeln <100 nm D_p ($\sim <0,12 \mu\text{m } D_{ae}$), = Masse UFP | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| N_PM200 | Partikelmasse von Partikeln von 30 nm bis 200 nm D_p , Anwendung Umweltzone | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |

D_p = Mobilitätsdurchmesser
 D_{ae} = Aerodynamischer Durchmesser

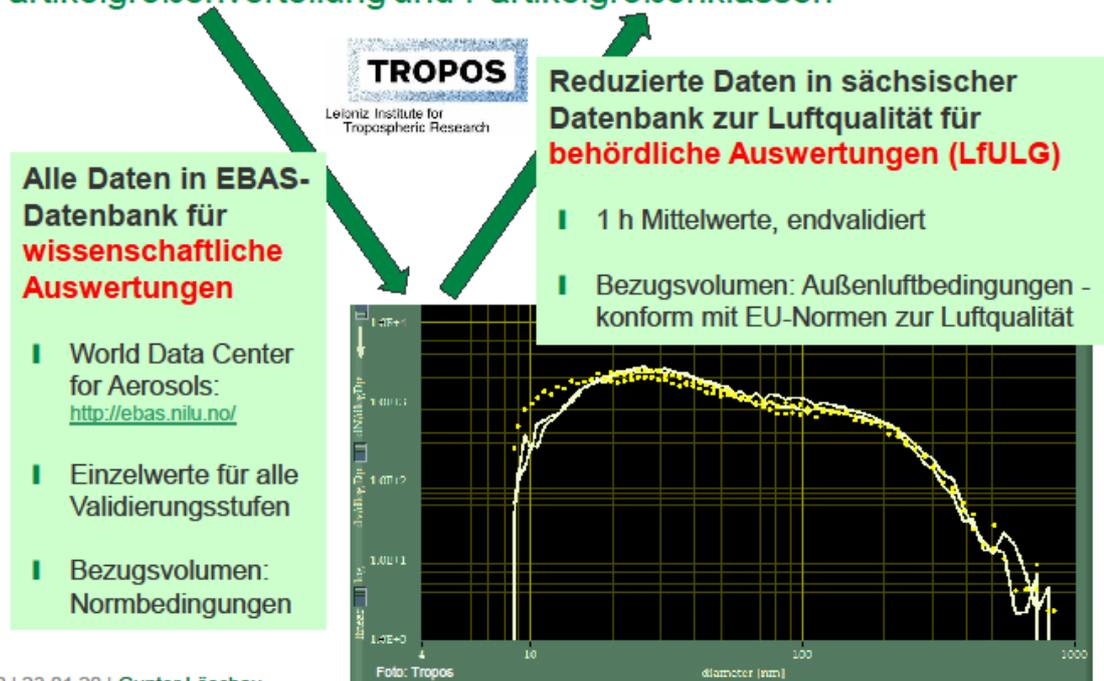
9 | 23.01.20 | Gunter Löschau

UFP - Datenhandling

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Partikelgrößenverteilung und Partikelgrößenklassen



10 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Datenlieferungen an UBA, GUAN, NILU, Forscher ...



TROPOS

Leibniz Institute for
Tropospheric Research



Atmospheric Environment
 Variability of black carbon mass concentrations, sub-micrometer particle number concentrations and size distributions: results of the German Ultrafine Aerosol Network ramp
 J. Sun¹, W. Harnik², M. Hernandez³, T. S. Bates⁴, G. M. McArthur⁵, J. Cyrys⁶, J. G. L. Bua⁷, B. Salas⁸, R. Graw⁹, K. W. Woolden¹⁰

Science of the Total Environment
 Statistical modelling of roadside and urban background ultrafine and accumulation mode particle number concentrations using generalized additive models
 Lars Gilling¹, Gunter Löschau², Alfred Wiedensohler³, Steffen Weber⁴

ARTICLE INFO
 ABSTRACT

Löschau, G.; Wiedensohler, A.; Birmili, W.; Rasch, F.; Spindler, G.; Müller, K.; Wolf, U.; Hausmann, A.; Sommer, W.; Anhalt, M.; Dietz, V.; Herrmann, H.: *Umweltzone Leipzig, Immissionssituation 2010-2016. Abschlussbericht.* Hrsg.: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dezember 2017.
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/27471>

**LfULG-Forschungsprojekt:
Gesundheitliche
Wirkungen von Ruß und
ultrafeinen Partikeln in
Leipzig und Dresden**
 Helmholtz Zentrum münchen
 Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

Alas, H., S. Pfeifer, A. Wiesner, B. Wehner, K. Weinhold, M. Merkel, G. Löschau, S. Bastian, A. Hausmann, and A. Wiedensohler (2019). **Spatial Variability and Representativeness of Black Carbon and Particle Mass Concentrations near Fixed Air Quality Monitoring Stations.** *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 79(6), 217-226.

11 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Entwicklung der Qualitäts- sicherung und -kontrolle



Ein langer Weg!

TROPOS

Leibniz Institute for
Tropospheric Research

- I **Jahreswartung und Zertifizierung im WCCAP* in Leipzig**
- I **Zertifizierung in Messstation mit mobilem Referenz-Mobilitätsspektrometer (3 x pro Jahr)**
- I **Entwicklung einer automatische Funktionskontrolle (1 x pro Woche)**
- I **Endvalidierung des Datensatzes eines Jahres durch TROPOS und Übergabe an Luftgüte-Datenbank**
- I **Entwicklung eines KAT zur Butanol-Reduzierung**



Foto: Tropos

* World Calibration Centre for Aerosol Physics

12 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Automatische Funktionskontrolle

Phasen der Kontrolle der MPSS-Anzeige

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



| Phase | Zeitraum (Uhr) | Bemerkung |
|--|----------------|---|
| (1) Kontrolle der Partikelgröße | 1:00 – 1:30 | Partikelgrößen-Standard |
| (2) Kontrolle Nullpunkt Konzentration | 1:30 – 3:00 | Dichtheitsprüfung |
| (3) Kontrolle Empfindlichkeit Konzentration | 3:00 – 5:00 | Vergleichsmessung mit Prüf-CPC für veränderte Außenluft |
| (4) Plausibilitätstest Empfindlichkeit Konzentration | 5:00 – 7:00 | Vergleichsmessung mit Prüf-CPC für Außenluft |

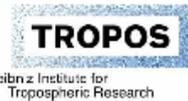
Jeden Sonntag von 1 bis 5 Uhr

13 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Automatische Funktionskontrolle am Sonntag

Fernzugriff: Kontrolle Messbetrieb am Montag

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Ziel: Weiterbetrieb nach Ende der EU-Projekte (Nachhaltigkeit)



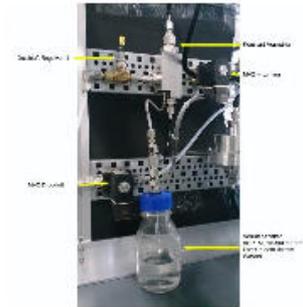
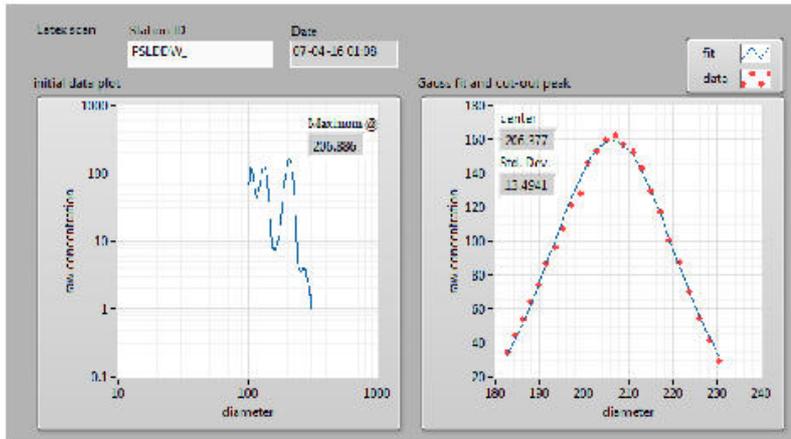
- Durchflüsse?
- Feuchtegehalt kleiner 40 %?
- Rohdaten-Konzentration?
- Größenverteilung stetig?

14 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Automatische Funktionskontrolle

Kontrolle der Partikelgrößenanzeige

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



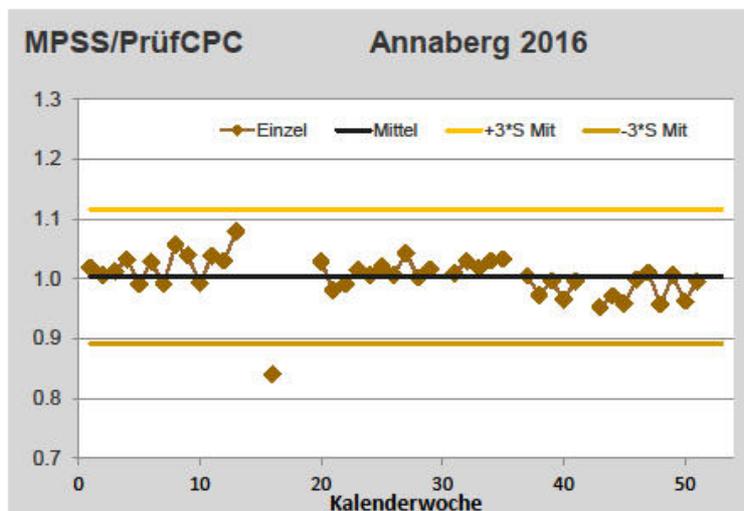
- █ Zerstäuber
- █ Latexpartikel 203 nm (NIST zertifiziert)
- █ 3 Läufe --> Mittelwert

15 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Automatische Funktionskontrolle

Kontrolle der Partikelanzahlkonzentrationsanzeige

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



- █ modifizierte Außenluft
- █ Referenz ist zertifizierter Prüf-CPC
- █ Einzelpartikel-Zählmodus

16 | 23.01.20 | Gunter Löschau

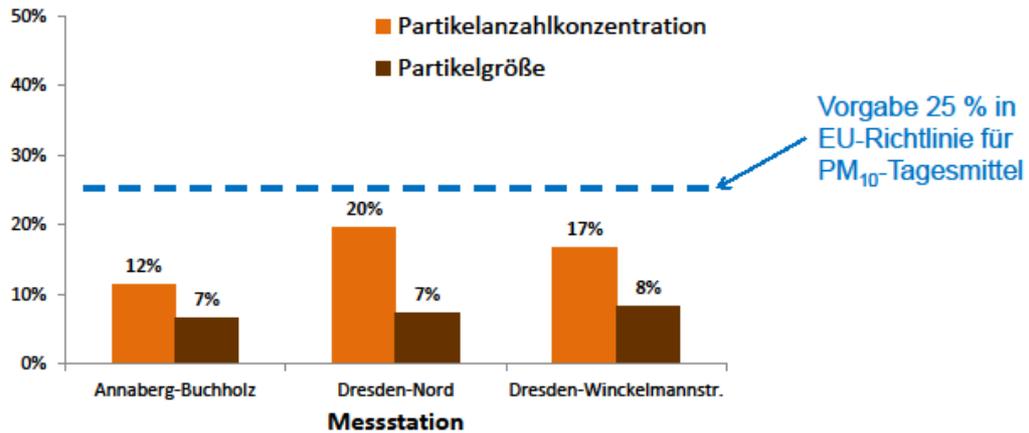
Messunsicherheit aus der automatischen Funktionskontrolle Partikelgröße und Partikelanzahlkonzentration (GUM)

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Leibniz Institute for
Tropospheric Research

Erweiterte Messunsicherheit für 1 h Werte 2016 in %



Erstmalig durchgehende Qualitätskontrolle für Partikelgrößen-Mobilitätsspektrometer

17 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Entwicklung der Qualitätssicherung und -kontrolle

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



STAATLICHE BETRIEBSGESELLSCHAFT FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT



Ein langer Weg!



Leibniz Institute for
Tropospheric Research

Jahreswartung und Zertifizierung im WCCAP* in Leipzig

Zertifizierung in Messstation mit mobilem Referenz-Mobilitätsspektrometer (3 x pro Jahr)

Entwicklung einer automatische Funktionskontrolle (1 x pro Woche)

Endvalidierung des Datensatzes eines Jahres durch TROPOS und Übergabe an Luftgüte-Datenbank

Entwicklung eines KAT zur Butanol-Reduzierung



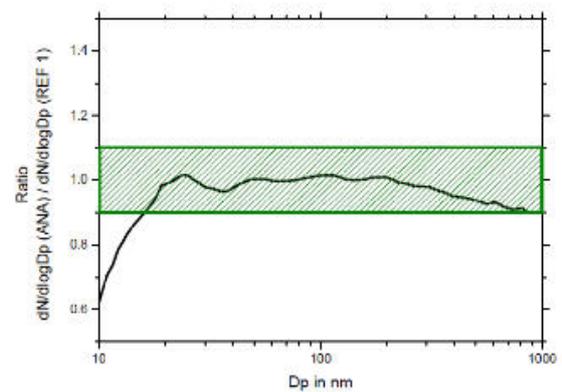
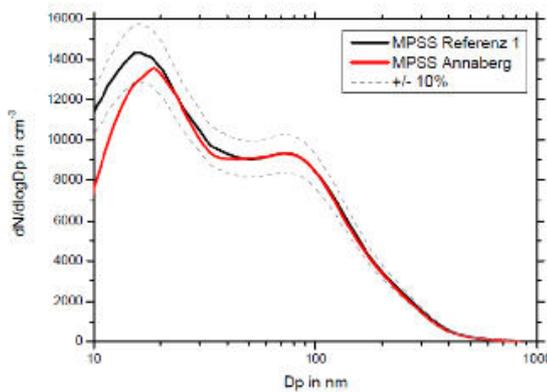
Foto: Tropos

* World Calibration Centre for Aerosol Physics

18 | 23.01.20 | Gunter Löschau

QS-Experiment in Messstation mit mobilem Referenzmesssystem Partikelgrößenverteilung

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

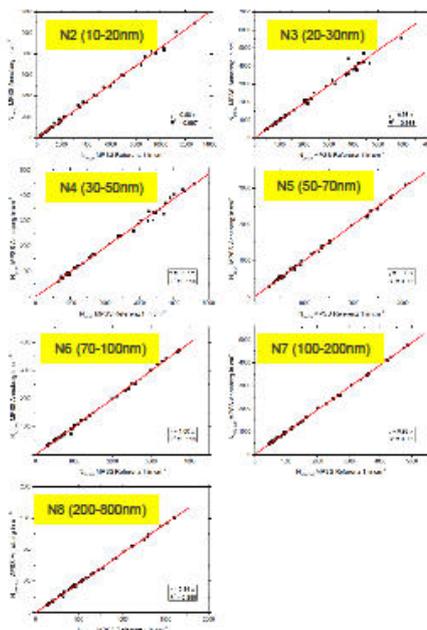


Vergleich über mind. 36 h mit Außenluft

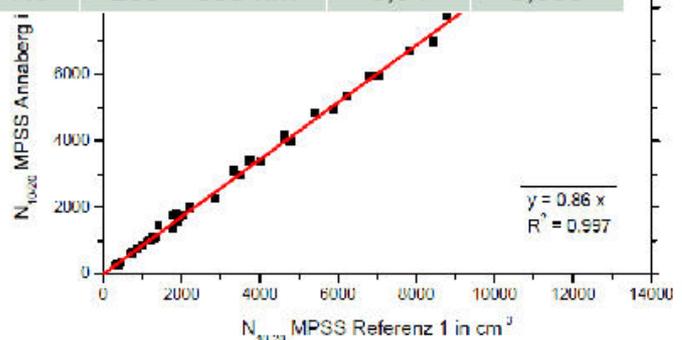
19 | 23.01.20 | Gunter Löschau

QS-Experiment in Messstation Partikelgrößenklassen

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



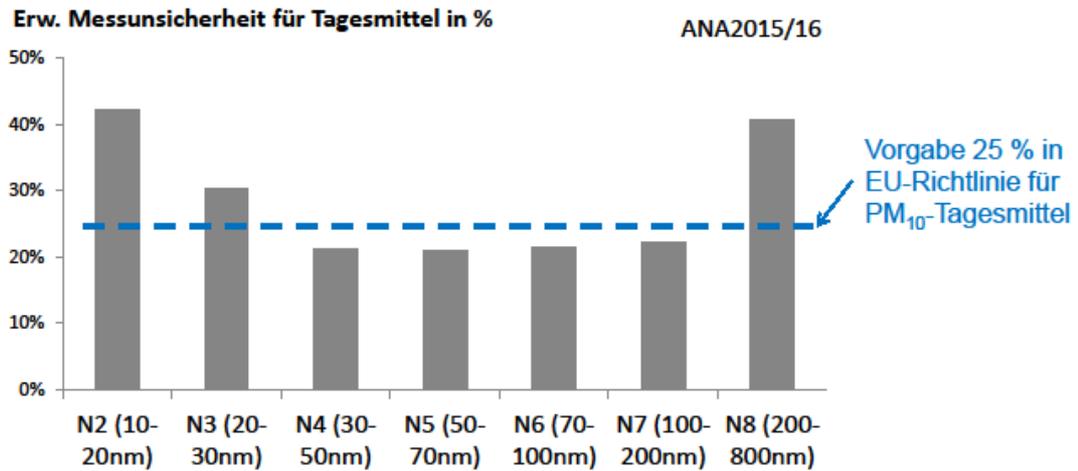
| Abk | Größenbereich | Anstieg | R ² |
|-----|---------------|---------|----------------|
| N2 | 10 - 20 nm | 0,86 | 0,997 |
| N3 | 20 - 30 nm | 0,98 | 0,988 |
| N4 | 30 - 50 nm | 0,97 | 0,995 |
| N5 | 50 - 70 nm | 1,00 | 0,999 |
| N6 | 70 - 100 nm | 1,00 | 0,999 |
| N7 | 100 - 200 nm | 0,98 | 0,999 |
| N8 | 200 - 800 nm | 0,94 | 0,999 |



20 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Messunsicherheit aus QS-Experimenten Partikelgrößenklassen (GUM)

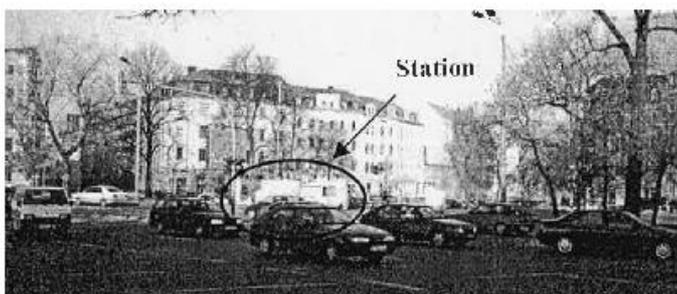
LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



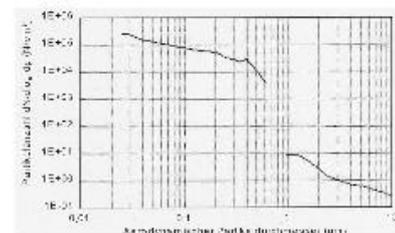
21 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Erste Messung ultrafeiner Partikel (UFP) in Sachsen November 1998, Universität Duisburg (H. Fissan)

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Messstation Wilhelm Külz Platz in Chemnitz

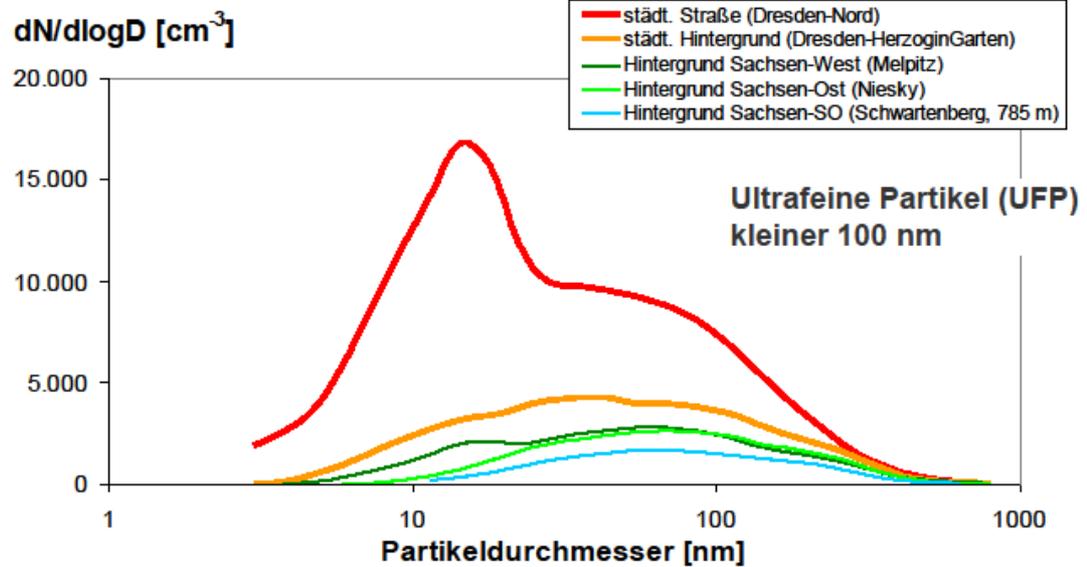


- █ Verkehrsnah
- █ 30 Tage (November/Dezember 1998)
- █ Mittelwert 91.800 Partikel pro cm⁻³
- █ Min./Max. 5.500 ... 270.000 Partikel/cm⁻³

22 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Sondermessung Partikelanzahl – Größenverteilung Typische Orte in Sachsen: Mittel 9/2006 - 2/2007, Projekt

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



23 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Messstation Dresden-Nord Typ: Städtische Straße

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Langzeitbeobachtung mit wissenschaftlicher Sondermessung
von Ruß und ultrafeinen Partikeln (Supersite) seit 2001

- Weniger als 10 m vom Straßenrand
- ca. 18.000 Kfz/d
- Nächste Kreuzung 55 m



Foto: Gunter Löschau

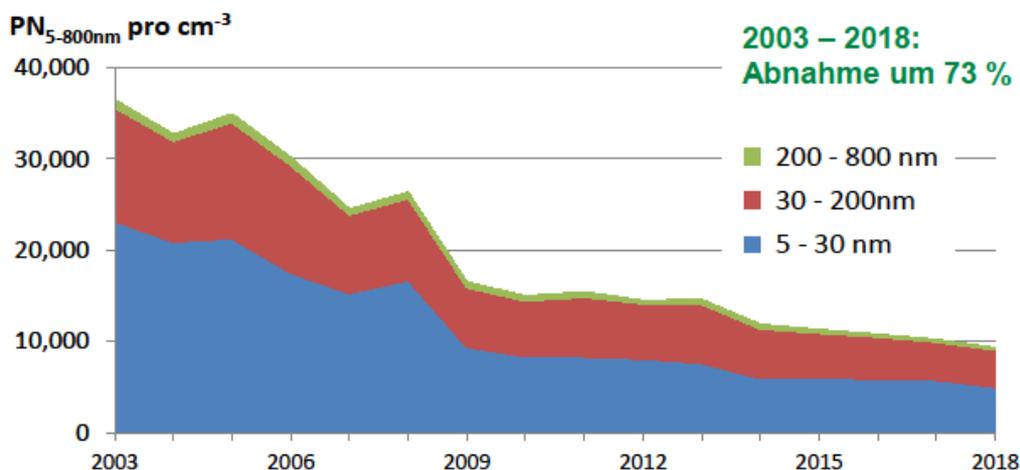
24 | 23.01.20 | Gunter Löschau

Deutliche Reduzierung der Partikelanzahl $PN_{5-800nm}$ über 15 Jahre Messstation Dresden-Nord: Städtische Straße

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Leibniz Institute for
Tropospheric Research



Abnahme der Partikelanzahl ist doppelt so groß wie für PM_{10} , $PM_{2.5}$...

25 | 23.01.20 | Gunter Löschau | Modernisierung der Diesel-Fahrzeuge durch Dieselpartikelfilter

Zusammenfassung

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



20 Jahre wissenschaftliche Sondermessung ultrafeiner Partikel in Sachsen



Leibniz Institute for
Tropospheric Research

- Enge Zusammenarbeit von Behörde und Wissenschaft
- Weiterbildung der Mitarbeiter
- Entwicklung der Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle der Daten
- Normung: UBA & Sachsen (2001): VDI 3867, VDI 3491, CEN/TS 16976 ...
- Verbrennungsprodukte aus Kraftfahrzeugen, Holzheizungen, Kraftwerken, Petrochemische Anlagen, Flugzeugen, Schiffen, Grillen, offene Feuer ...
- Sinnvolle Ergänzung zu PM_{10} - und $PM_{2.5}$ -Überwachung, da Wirkung von Minderungsmaßnahmen sehr empfindlich und selektiv nachweisbar
- Nachweis für die Reduzierung des hochtoxischen Anteils im Feinstaub
= Senkung des Gesundheitsrisikos der Bevölkerung (WICHMANN)

26 | 23.01.20 | Gunter Löschau

9.3 SCHEMA DES DATENFLUSSES ANHAND DER BEISPIELE SACHSEN UND HESSEN

Messnetz Sachsen



Abb. 85: Aktuelle Version eines TROPOS-Größenspektrometers.

Die Abbildung 85 zeigt ein Mobilitätsgrößenspektrometer von TROPOS. Diese Spektrometer vereinen alle Komponenten in einem Rack und lassen sich dadurch bei vorhandenem Platz problemlos in Messcontainer integrieren, sofern der Platz vorhanden ist. Die gemessenen Mobilitätsverteilungen werden über eine am TROPOS entwickelte Datenerfassung (LabView-Programme) auf dem eigenen Messrechner (Laptop) erfasst und gespeichert. Aus diesen Rohverteilungen werden dann mit weiteren LabView-Programmen die finalen Partikelgrößenverteilungen erstellt, aus welchen sich beispielsweise die Größenklassen berechnen lassen und die Daten in das Bayern-Hessen-Format umgewandelt werden können.

Die Abbildung 86 zeigt ein Beispiel eines TROPOS-Messgerätes (mit zusätzlich integriertem Absorptionsphotometer im Untergestell des Racks) in der Messstation Leipzig-Mitte im sächsischen Luftgütemessnetz.



Abb. 86: Beispiel eines TROPOS Größenspektrometers im Luftgütemessnetz Sachsen in der Messstation Leipzig-Mitte.

Das zugehörige Flussdiagramm mit allen weiteren Komponenten (Vakuum und Druckluft zur Trocknung des Probenahmestromes) ist in Abbildung 87 dargestellt.

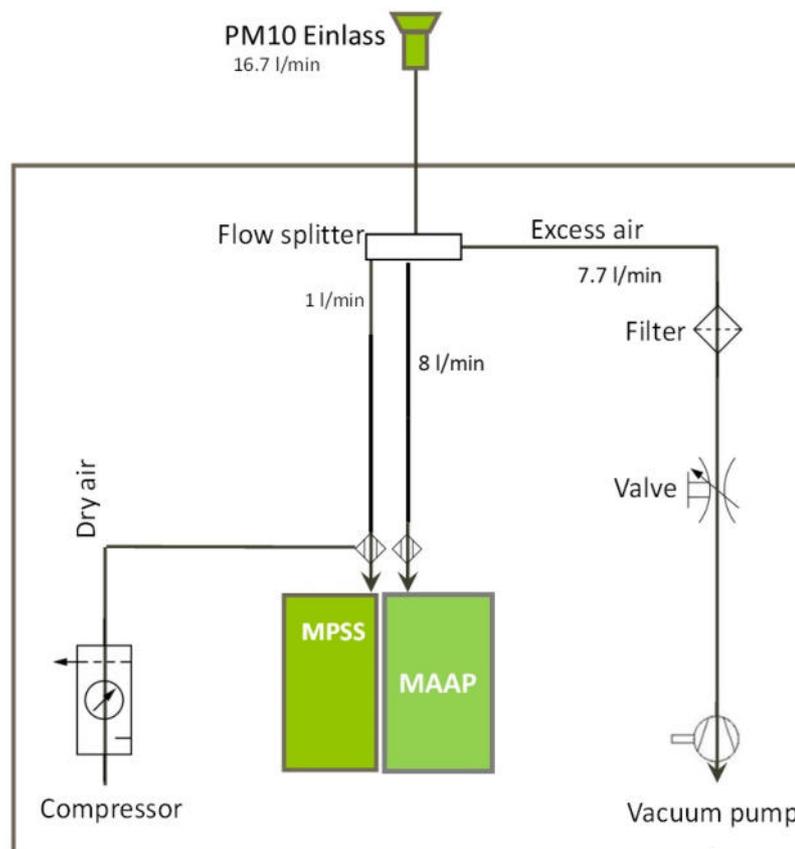


Abb. 87: Flussbild mit Probenahmesystem für die Luftgütestation Leipzig-Mitte im regulären Messbetrieb.

Die erfassten Daten im Luftgütemessnetz Sachsen werden nach dem Schema in Abbildung 87 prozessiert. Die auf dem Messrechner gespeicherten Rohdaten der Mobilitätsverteilungen werden auf zwei Wegen bearbeitet. Während das LfULG die Daten einer wöchentlichen Funktionskontrolle auswertet, findet die generelle Evaluierung der Messdaten am TROPOS statt. Zudem sei erwähnt, dass der externe Messrechner zwar Anbindung an das Messnetz besitzt, diese jedoch ausschließlich zur Fernwartung sowie zum aktiven Datentransfer dient. Ein automatisches Senden von Messdaten in die Datenbank findet in Sachsen nicht statt.

Für die wöchentliche Plausibilitätsprüfung werden die folgenden Punkte durch das LfULG untersucht:

- Nullpunktbestimmung (Überprüfung des Spektrometers mit Nullluft)
- Prüfung der Größenbestimmung mit Latexpartikeln der Partikelgröße 203 nm

- Empfindlichkeitstest (Messung der Partikelgrößenverteilung in reduzierter Außenluft und Vergleich der integrierten Anzahlkonzentration zu einem Prüf-Partikelzähler)
- Plausibilitätstest in Außenluft (Vergleich der integrierten Anzahlkonzentration aus den Spektrometerdaten mit den Daten des Prüf-Partikelzählers)

Anhand dieser Auswertungen erfolgt in Abstimmung zwischen dem Landesamt in Sachsen und dem TROPOS, ob die Messdaten innerhalb der Toleranzgrenzen liegen oder ob Handlungsbedarf besteht, da die Prüfkriterien nicht erfüllt wurden.



Abb. 88: Schema der Datenprozessierung am Beispiel des Luftgütemessnetzes Sachsen.

Abseits dieser wöchentlichen Plausibilitätsprüfungen durch das Landesamt wird der Jahresdatensatz der Partikelgrößenverteilungen durch TROPOS evaluiert. Dazu werden die gesamten Rohdaten vom Messrechner manuell an TROPOS überliefert. Mithilfe von LabView-Programmen werden nun die Mobilitätsverteilungen in finale Partikelgrößenverteilungen umgewandelt. Aus diesen Daten erfolgt in einem nächsten Schritt die Berechnung der sieben Größenklassen mit einer anschließenden Formatierung der Daten in das Bayern-Hessen-Protokoll. Sind diese Schritte getan, werden die Daten zurück an die Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL, Betreiber der Spektrometer in Sachsen) übermittelt. Diese speichern nun die 7 Klassen (für einige Geräte 8 Klassen) in ihrer Messnetzdatenbank, worauf sich auch das LfULG bezieht. Es ist zu beachten, dass

sämtliche Daten zu ultrafeinen Partikeln in dieser Datenbank in Umgebungsbedingungen gespeichert werden. Es werden also keine Umrechnungen auf Standardbedingungen (0°C und 1013.25 hPa) vorgenommen. Die Daten der einzelnen Messstationen sollen so gespeichert werden, wie sie an den Stationen gemessen werden. Besonders für Bergstationen würde eine Umrechnung auf Standardbedingungen zu anderen Ergebnissen führen. Für Ländermessnetze ist die Beibehaltung der Umgebungsbedingungen auch nützlich, wohingegen für internationale Datenbanken eine Umrechnung auf einheitliche Bedingungen bei der Vielzahl an unterschiedlichen Standortkategorien gemacht werden muss.

Allerdings werden für Letztere keine Größenklassen berechnet. Hier fließen die Daten der kompletten Partikelgrößenverteilung ein.

Messnetzes Hessen

Als weiteres Beispiel soll hier der Datenfluss einer Luftgütemessstation in Hessen dargestellt werden. In der Abbildung 89 sind die Messgeräte in einem Messcontainer der HLNUG gezeigt. Dabei wird ein Größenspektrometer der Firma TSI, Modell 3938 mit CPC 3772 sowie einem zusätzlichen Partikelzähler des Modells 3750 zur ständigen Qualitätssicherung eingesetzt. Eine Trocknung des Probenahmestromes auf unter 40 Prozent wird mittels Nafiontrocknern erzielt. Mittels eines Nullluftgenerators wird zudem das Abgas gereinigt, damit keine Querempfindlichkeiten mit anderen Messgeräten auftreten.

Die Abbildung 90 zeigt den externen Messrechner zur Erfassung der Partikelgrößenverteilung. Dabei wird ähnlich zur TROPOS-Datenerfassung ein handelsüblicher Laptop verwendet, auf welchem die TSI-Datenerfassungssoftware installiert ist.

Die auf diesem Rechner gespeicherten Partikelgrößenverteilungen bilden die Grundlage für den Datenfluss im Land Hessen (Abbildung 91). Alle 30 Minuten werden die Verteilungen automatisch vom externen Messrechner abgerufen und in die Datenbank des Luftmessnetzes Hessen transferiert.

Aus diesen Rohverteilungen werden im Anschluss Halbstundenmittelwerte aggregiert und es erfolgt die Berechnung der Größenklassen nach der sächsischen Auswertestrategie. Diese Werte werden anschließend direkt im Internet veröffentlicht, indem die Konzentrationen der einzelnen Größenklassen dargestellt werden.

In einem zweiten 30-minütigen Abruf werden die Größenverteilungen als R-Datensatz verwaltet, aus dem automatisch Überblicksdarstellungen mit den Daten aller UFP-Messstellen des Messnetzes Hessen erstellt werden. Dies geschieht also zweimal pro Stunde. Mithilfe dieser Plots wird die tägliche Plausibilitätskontrolle der Messdaten durchgeführt. Sollten sich hier Fehlmessungen oder andere zu verwerfende Daten ergeben,

werden diese kenntlich gemacht und es erfolgt eine Änderungen der Datensätze in der Datenbank. Alle gültigen Daten werden für weitere Auswertungen verwendet.



Abb. 89: Beispiel eines TSI Größenspektrometers mit zusätzlichem Partikelzähler zur Qualitätssicherung im Luftgütemessnetz Hessen, Quelle: HLNUG.

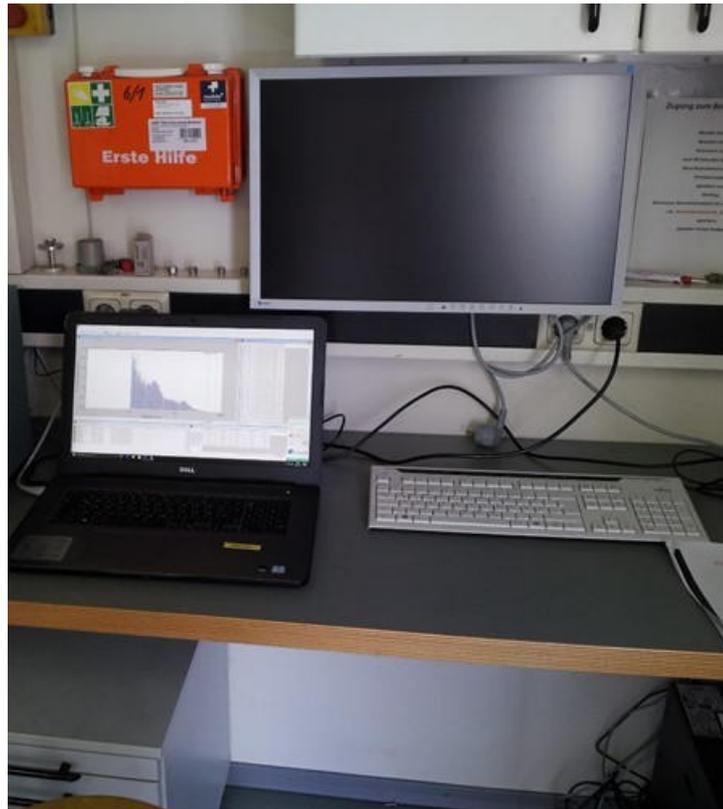


Abb. 90: Externer Messrechner zur Erfassung der Partikelgrößenverteilung im Luftgütemessnetz Hessen, Quelle: HLNUG.

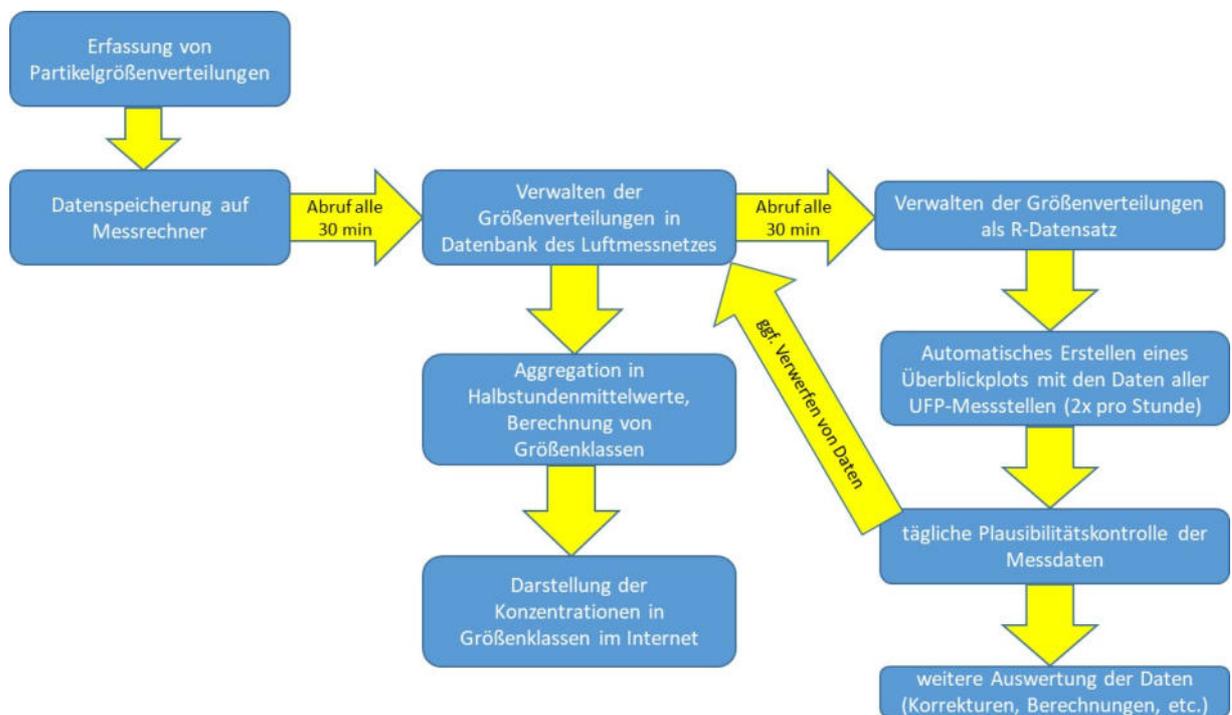


Abb. 91: Schema der Datenprozessierung am Beispiel des Luftgütemessnetzes Hessen.

Für die tägliche Kontrolle der Daten wird in Hessen etwa eine Stunde (pro Tag) veranschlagt. Diese Kontrolle beinhaltet eine Datenbewertung, dass alle Messstationen laufen und dass alle Daten plausibel sind. Durch die Erstellung von R-Skripten konnte mit einem anfänglich hohen zeitlichen Aufwand die benötigte Zeit für die tägliche Kontrolle effektiv reduziert werden. Würde hingegen die Kontrolle ohne diese Skripte erfolgen, also lediglich mit den Tools der UBIS-Datenbank, dann wäre der Zeitaufwand bedeutend größer.

LITERATURVERZEICHNIS

- Asmi, A., Wiedensohler, A., Laj, P., Fjaeraa, A.-M., Sellegri, K., Birmili, W., Weingartner, E., Baltensperger, U., Zdimal, V., Zikova, N. et al.: Number size distributions and seasonality of submicron particles in Europe 2008–2009, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 5505–5538, doi:10.5194/acp-11-5505-2011, 2011.
- Asmi, A., Collaud Coen, M., Ogren, J. A., Andrews, E., Sheridan, P., Jefferson, A. et al.: Aerosol decadal trends – Part 2: In-situ aerosol particle number concentrations at GAW and ACTRIS stations, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 895–916, 2013
- Baldauf, R.W., R.B. Devlin, P. Gehr et al.: Ultrafine particle metrics and research considerations: review of the 2015 UFP Workshop. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13: 1054, 2016.
- BAST (2017): „Relevanz von Nicht-Abgas Partikelemissionen“. Bericht für die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Dezember 2017
- Barmapadimos, I., Hueglin, C., Keller, J., Henne, S., Prévôt, A.S.H., Influence of meteorology on PM 10 trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008. *Atmos. Chem. Phys.* 11 (4), 1813–1835, 2011.
- Beddows, D.C.S., Dall'Osto, M., Harrison, R.M., Kulmala, M., Asmi, A., Wiedensohler, A., Laj, P., Fjæraa, A.M., Sellegri, K., Birmili, W., Bukowiecki, N. Variations in tropospheric submicron particle size distributions across the European continent 2008–2009. *Atmos. Chem. Phys.* 14 (8), 4327–4348, 2014.
- Birmili, W. und A. Wiedensohler. New particle formation in the continental boundary layer: Meteorological and gas phase parameter influence. *Geophys. Res. Lett.* 27: 3325–3328, 2000.
- Birmili, W., A. Wiedensohler, C. Plass-Dülmer, und H. Berresheim. Evolution of newly formed aerosol particles in the continental boundary layer: A case study including OH and H₂SO₄ measurements. *Geophys. Res. Letters* 27: 2205–2209, 2000.
- Birmili, W., A. Wiedensohler, J. Heintzenberg, und K. Lehmann. Atmospheric particle number size distribution in Central Europe: Statistical relations to air masses and meteorology. *J. Geophys. Res.* D23: 32,005–32,018, 2001.
- Birmili, W., Berresheim, H., Plass-Dülmer, C., Elste, T., Gilge, S., Wiedensohler, A., und Uhrner, U.: The Hohenpeissenberg aerosol formation experiment (HAFEX): a long-term study including size-resolved aerosol, H₂SO₄, OH, and monoterpenes measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 361–376, doi:10.5194/acp-3-361-2003, 2003.
- Birmili, W., K. Weinhold, S. Nordmann, A. Wiedensohler, G. Spindler, K. Müller, H. Herrmann, T. Gnauk, M. Pitz, J. Cyrus, H. Flentje, C. Nickel, T.A.J. Kuhlbusch, G. Löschau, D. Haase, F. Meinhardt, A. Schwerin, L. Ries, und K. Wirtz. Atmospheric aerosol measurements in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN): Part 1 - soot and particle number size distributions. *Gefahrst. Reinh. Luft*, 69(4): 137–145, 2009a.

- Birmili, W., T. Göbel, A. Sonntag, L. Ries, R. Sohmer, S. Gilge, I. Levin, und A. Stohl. A case of transatlantic aerosol transport detected at the Schneefernerhaus Observatory (2650 m) on the northern edge of the Alps. *Meteorologische Zeitschrift*, 19 (6), 591-600, doi: 10.1127/0941-2948/2010/0465, 2010.
- Birmili, W., Weinhold, K., Rasch, F., Sonntag, A., Sun, J., Merkel, M., Wiedensohler, A., Bastian, S., Schladitz, A., Löschau, G., Cyrus, J., Pitz, M., Gu, J., Kusch, T., Flentje, H., Quass, U., Kaminski, H., Kuhlbusch, T. A. J., Meinhardt, F., Schwerin, A., Bath, O., Ries, L., Gerwig, H., Wirtz, K., and Fiebig, M.: Long-term observations of tropospheric particle number size distributions and equivalent black carbon mass concentrations in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN), *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 355-382, 2016.
- Birmili, W., Sun, J., Weinhold, K., Merkel, M., Rasch, F., Wiedensohler, A., Bastian, S., Löschau, G., Schladitz, A., Quass, U., Kuhlbusch, T.A.J., Kaminski, H., Cyrus, J., Pitz, M., Gu, J., Kusch, T., Flentje, H., Meinhardt, F., Schwerin, A., Bath, O., Ries, L., Gerwig, H., Wirtz, K., Weber, S.: Atmospheric aerosol measurements in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN) - Part III: Black Carbon mass and particle number concentrations 2009-2014, *Gefahrst. Reinh. Luft*, 75(11/12), 479-488, 2015
- Borte, M. Influence of lifestyle and behaviour on the development of the immune system and allergic diseases. The LISA birth cohort study. . In: Schulz R LI, et al., eds; 2001
- Breitner, S.; Liu, L.; Cyrus, J.; Bruske, I.; Franck, U.; Schlink, U., et al. Sub-micrometer particulate air pollution and cardiovascular mortality in Beijing, China. *Sci Total Environ.* 409:5196-5204; 2011
- Buonanno, G., Bernabei, M., Avino, P., Stabile, L. (2012): Occupational exposure to airborne particles and other pollutants in an aviation base. *Environmental Pollution*, 170, 78-87.
- Burtscher, H. and Mayer, A.: Field Instrumentation for ultrafine particles. Präsentation am Ultrafine Particles Workshop Feb 11-13, 2015, U.S. EPA, Research Triangle Park, NC., 2015.
- Burtscher, H., Baltensperger, U., Bukowiecki, N., Cohn, P., Hüglin, C., Mohr, M., Weingartner, E.: Separation of volatile and non-volatile aerosol fractions by thermodesorption: instrumental development and applications. *Journal of Aerosol Science*, 32(4), 427-442, 2001.
- Butterfield, D., Beccaceci, S., Sweeney, B., Green, D., Alexander, J., Grieve, A., Annual Report for the UK Black Carbon Network. National Physical Laboratory, pp. 63, 2010.
- CEN/TR 16976: Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols. 2016.
- CEN/TR 17434: Außenluft – Bestimmung der Partikelanzahlgrößenverteilung des atmosphärischen Aerosols mit einem Mobilitätspartikelgrößenspektrometer. In Bearbeitung.
- Collaud Coen, M., Andrews, E., Asmi, A., Baltensperger, U., Bukowiecki, N., Day, D., Fiebig, M., Fjærraa, A.M., Flentje, H., Hyvärinen, A., Jefferson, A., Aerosol decadal trends-Part 1: in-situ optical measurements at GAW and IMPROVE stations. *Atmos. Chem. Phys.* 13 (2), 869–894., 2013.
- Costabile, F., Birmili, W., Klose, S., Tuch, T., Wehner, B., Wiedensohler, A., Franck, U., König, K., und Sonntag, A., Spatio-temporal variability and principal components of the particle number size distribution in an urban atmosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3163-3195, doi:10.5194/acp-9-3163-2009, 2009.

- Costabile, F., Amoroso, A., Wang, F., Sub- μm particle size distributions in a suburban Mediterranean area. Aerosol populations and their possible relationship with HONO mixing ratios, *Atmos. Environ.* 44 (39), 5258–5268, 2010.
- Denby, B.R., Sundvor I. et al (2012): NORTRIP (NON-exhaust Road TRaffic Induced Particle emission modelling) model development and documentation. NILU Scientific report OR 23/2012.
- Denby, B.R., Sundvor, I., Johansson, C., Pirjola, L., Ketznel, M., Normann, M., Kupiainen, K., Gustafsson, M., Blomqvist, G., Omstedt, G. (2013): A coupled road dust and surface moisture model to predict non-exhaust road traffic induced particle emissions (NORTRIP). **Part 1: Road dust loading and suspension modelling.** *Atmospheric Environment* 77 (2013) 283-300.
- Düring, I., Lohmeyer, A. (2011): Einbindung des HBEFA 3.1 in das FIS Umwelt und Verkehr sowie Neufassung der Emissionsfaktoren für Aufwirbelung und Abrieb des Straßenverkehrs. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Radebeul unter Mitarbeit der TU Dresden sowie der BEAK Consultants GmbH. Projekt 70675-09-10, Juni 2011. Gutachten im Auftrag von: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- Ellermann, T., Massling, A., Løfstrøm, P., Winther, M., Nøjgaard, J., Ketznel, M. (2011): UNDERSØGELSE AF LUFTFORURENINGEN PÅ FORPLADSEN I KØBENHAVNS LUFTHAVN KASTRUP I RELATION TIL ARBEJDSMILJØ. Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, nr. 5.
- Engler, C., Rose, D., Wehner, B., Wiedensohler, A., Brüggemann, E., Gnauk, T., Spindler, G., Tuch, T., und Birmili, W., Size distributions of non-volatile particle residuals ($D_p < 800 \text{ nm}$) at a rural site in Germany and relation to air mass origin, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5785-5802, doi:10.5194/acp-7-5785-2007, 2007.
- Größ, J., Hamed, A., Sonntag, A. et al.: Atmospheric new particle formation at the research station Melpitz, Germany: connection with gaseous precursors and meteorological parameters. *Atmospheric Chemistry Physics* 18: 1835-1861, 2018.
- Grigoratos, Th. and Martini, G. (2014): Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM: Literature review. Joint Research Centre Institute of Energy and Transport. JRC89231 EUR 26648 EN ISBN 978-92-79-38302-1 (PDF) ISBN 978-92-79-38303-8 (print) ISSN 1831-9424 (online) ISSN 1018-5593 (print) http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC89231/jrc89231-online_final_version_2.pdf.
- Grigoratos, Th. and Martini, G. (2015): Brake wear particle emissions: a review. *Environ Sci Pollut Res* (2015) 22:2491–2504.
- HEI – Health Effects Institute: Understanding the health effects of ambient ultrafine particles. HEI Perspectives 3, Health Effects Institute, Boston, Massachusetts, USA, 2013.
- Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S., (2015). Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating. *Wear* 334-335, 44-48.
- Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S. (2016): Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles. *Atmospheric Environment* 131 (2016) 269-278.
- Hsu, H.-H., Adamkiewicz, G., Houseman, A.E., Zarubiak, D., Spengler, J.D., Levy, J.I. (2013): Contributions of aircraft arrivals and departures to ultrafine particle counts near Los Angeles international airport. *Science of the Total Environment*, 444, 347-355.

- Hudda, N., Gould, T., Hartin, K., Larson, T.V., Fruin, S.A.: Emissions from an international airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind. *Environment Science and Technology* 48(12):6628-35, 2014.
- ISO 27891: Aerosol particle number concentration – Calibration of condensation particle counters. 2016.
- Jones, A.M., Harrison, R.M., Barratt, B., Fuller, G., A large reduction in airborne particle number concentrations at the time of the introduction of “sulphur free” diesel and the London low emission zone. *Atmos. Environ.* 50, 129–138, 2012.
- Kinsey, J.S., Dong, Y., Williams, D.C., Logan, R. (2010): Physical characterization of the fine particle emissions from commercial aircraft engines during the aircraft particle emissions experiment (APEX) 1-3. *Atmospheric Environment*, 44, 2147-2156.
- Kittelson, D.: Ultrafine Particle Metrics and Indicators. Präsentation am Ultrafine Particles Workshop Feb 11-13, 2015, U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, 2015.
- Klose, S., W. Birmili, J. Voigtländer, T. Tuch, B. Wehner, A. Wiedensohler, und M. Ketzler., Particle number emissions of motor traffic derived from street canyon measurements in a Central European city. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 9: 3763-3809, 2009.
- Kreider, M., Panko, J., McDonald, J.D., McAtee, B.L., Finley, B.L. and Seagrave, J. (2009): Effects of Intratracheal Instillation of Tire and Road Wear Particles (TRWP) and Tread Particles (TP) on Inflammation and Cytotoxicity in Rat Lung: A Comparative Toxicity Study. Society of Toxicology (SOT) Annual Meeting, Washington, D.C., U.S.A.
- Kreider, M.L. and Panko, J.M. (2012): Effects of Subacute Inhalation Exposure to Tire and Road Wear Particles in Rats. 48th Congress of the European Societies of Toxicology, Eurotox, 17-20 June 2012, Stockholm, Sweden.
- Kukutschová, J., Moravec, P., Tomášek, V., Matějka, V., Smolík, J., Schwarz, J., Seidlerová, J., Šafářová, K. and Filip, P. (2011). On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes. *Environmental Pollution* 159:998-1006.
- Keuken, M.P., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing, J.S., Hoek, G. (2015): Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmospheric Environment*, 104, 132-142.
- Lanzinger, S., Schneider, A., Breitner, S., Stafoggia, M., Erzen, I., Dosatl, M., Pastorkova, A., Bastian, S., Cyrus, J., Zscheppang, A., Kolodnitska, T., Peters, A.: Ultrafine and Fine Particles and Hospital Admissions in Central Europe. Results from the UFIREG Study, *Am J Respir Crit Care Med.*, 194(10):1233-1241.2016.
- Lobo, P., Durdina, L., Smallwood, G.J., Rindlisbacher, T., Siegerist, F., Black, E.A., Yu, Z., Mensah, A.A., Hagen, D.E., Miake-Lye, R.C., Thomson, K.A., Brem, B.T., Corbin, J.C., Abegglen, M., Sierau, B., Whitefield, P.D., Wang, J. (2015): Measurement of aircraft engine non-volatile PM emissions: results of the aviation-particle regulatory instrumentation demonstration experiment (A-PRIDE) 4 campaign. *Aerosol Science and Technology*, 49, 472-484.
- Lohmeyer (2016): Ermittlung von Emissionsfaktoren von Kraftfahrzeugen unter Berücksichtigung zukünftiger Antriebskonzepte und der Vorkette von Kraftstoffen; Teilprojekt: Systematisierung, Abstimmung und Aufbereitung von PM_x-Emissionsfaktoren aus Abrieb und Wiederaufwirbelung für HBEFA. UFOPLAN 2013, FKZ 3713 47 100. Bericht im Auftrag des UBA über IFEU Heidelberg. November 2016.

- Löschau, G., Wiedensohler, A., Birmili, W., Rasch, F., Spindler, G., Müller, K., Hausmann, A., Wolf, U., Sommer, W., Anhalt, M., Dietz, V., Herrmann, H., Böhme, U., Kath, H.-G., Kühne, H., Mess-technische Begleitung der Einführung der Umweltzone Leipzig Teil 6 / Abschlussbericht: Immissionssituation von 2010 bis 2016 und Wirkung der Umweltzone auf die straßennahe Luftqualität, Abschlussbericht des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 2017
- Löschau, G., Wiedensohler, A., Wehner, B., Birmili, W. & Gerwig, H. (2010): Messung der Anzahl von ultrafeinen Partikeln in der Außenluft in einem Luftgütemessnetz, Teil 2: Ergebnisse einer verkehrsnahen Langzeitmessung. – *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 70: 183–187.
- Ma, N. and Birmili, W.: Estimating the contribution of photochemical particle formation to ultrafine particle number averages in an urban atmosphere, *Sci. Tot. Environ.*, 512–513, 154–166, 2015
- May, J., Bosteels, D., Such, C., Nicol, A., Andersson, J. (2008): Heavy-duty engine particulate emissions: application of PMP methodology to measure particle number and particulate mass. SAE International.
- Masiol, M., Harrison, R.M. (2014): Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: a review. *Atmospheric Environment*, 95, 409–455.
- Meister, K., Johansson, C., Forsberg, B. (2012): Estimated Short-Term Effects of Coarse Particles on Daily Mortality in Stockholm, Sweden. *Environmental Health Perspectives Volume 120 Number 3*, March 2012.
- Müller, T., Henzing, J. S., de Leeuw, G., Wiedensohler, A., Alastuey, A., Angelov, H., Bizjak, M., Collaud Coen, M., Engström, J. E., Gruening, C. et al., Characterization and intercomparison of aerosol absorption photometers: result of two intercomparison workshops, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 245–268, doi:10.5194/amt-4-245-2011, 2011.
- Murphy, D.M., Chow, J.C., Leibensperger, E.M., Malm, W.C., Pitchford, M., Schichtel, B.A., Watson, J.G., White, W.H., Decreases in elemental carbon and fine particle mass in the United States. *Atmos. Chem. Phys.* 11 (10), 4679–4686, 2011.
- Nordmann, S., W. Birmili, K. Weinhold, A. Wiedensohler, S. Mertes, K. Müller, T. Gnauk, H. Herrmann, M. Pitz, J. Cyrys, H. Flentje, L. Ries, und K. Wirtz, Atmospheric aerosol measurements in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN) - Part 2: Comparison of measurements techniques for graphitic, light-absorbing, and elemental carbon, and the non-volatile particle volume under field conditions. *Gefahrst. Reinh. Luft*, 69(11/12): 469–474, 2009.
- Paasonen, P., Kupiainen, K., Klimont, Z., Visschedijk, A., Denier van der Gon, H.A.C., Amann, M.: Continental anthropogenic primary particle number emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, 16: 6823–6840, 2016.
- Petzold, A., Ogren, J.A., Fiebig, M., Laj, P., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A., Zhang, X.-Y., Recommendations for reporting „black carbon“ measurements, *Atmos. Chem. Phys.* 13, 8365–8379, 2013.
- Petzold, A. and Schönlinner, M. (2004) Multi-angle absorption photometry--a new method for the measurement of aerosol light absorption and atmospheric black carbon, *Journal of Aerosol Science*, 35, 4, 421–441.
- Pöschl, U.: Atmosphärische Aerosole: Zusammensetzung, Transformation, Klima- und Gesundheitseffekte, *Angewandte Chemie*, 117, 46, 7690–7712, 2005.

- Rasch, F., Birmili, B., Weinhold, K., Nordmann, S., Sonntag, A., Spindler, G., Herrmann, H., Wiedensohler, A., Löschau, G., Signifikante Minderung von Ruß und der Anzahl ultrafeiner Partikel in der Außenluft als Folge der Umweltzone in Leipzig, *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft*, 73 (11/12): 483-489, 2013
- Rose, D. und Jacobi, S.: 1. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Juni 2018
- Rose, D. und Jacobi, S.: 2. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, August 2019
- Rose, D., Ditas, F. und Jacobi, S.: 3. Bericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Oktober 2020
- Rückerl, R., A. Schneider, S. Breitner, J. Cyrus and A. Peters: Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence. *Inhalation Toxicology*, 23(10): 555-592, 2011
- SAE (2013): Procedure for the continuous sampling and measurement of non-volatile particle emissions from aircraft turbine engines, Aerospace Information Report (AIR) 6241, SAE International.
- Spindler, G., Grüner, A., Müller, K., Schlimper, S., Herrmann, H.: Long-term size-segregated particle (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) characterization study at Melpitz – influence of air mass inflow, weather conditions and season. *J. Atmos. Chem.*, 70, 165-195, (2013)
- Sun, J., Birmili, W., Hermann, M, Tuch, T., Weinhold, K., Spindler, G.,Schladitz, A., Bastian, S., Löschau, G., Cyrus, J., Gu, J., Flentje, H., Briel, B., Asbach, C., Kaminski, H.,Ries, L., Sohmer, R., Gerwig, H., Wirtz, K., Meinhardt, F., Schwerin, A., Bath, O., Ma, N., Wiedensohler,A.: Variability of Black Carbon mass concentrations, sub-micrometer particle number concentrations and size distributions: Results of the German Ultrafine Aerosol Network ranging from city street to high Alpine locations, *Atmos. Environ.*, 202, 256-268, 2019.
- Sun, J., Birmili, W., Hermann, M, Tuch, T., Weinhold, K., Merkel, M., Rasch, F., Sonntag, A., Müller, T., Schladitz, A., Bastian, S., Löschau, G., Cyrus, J., Gu, J., Flentje, H., Briel, B., Asbach, C., Kaminski, H.,Ries, L., Sohmer, R., Gerwig, H., Wirtz, K., Meinhardt, F., Schwerin, A., Bath, O., Ma, N., Wiedensohler,A.: Decreasing trends of particle number and black carbon mass concentrations at 16 observational sites in Germany from 2009 to 2018, *in discussion*, 2019.
- Timko, M.T., Fortner, E., Franklin, J., Yu, Z., Wong, H.-W., Onasch, T.B., Miake-Lye, R.C., Herndon, S.C. (2013): Atmospheric measurements of the physical evolution of aircraft exhaust plumes. *Environmental Science and Technology*, 47, 3513-3520.
- UBA (2019): Einfluss eines Großflughafens auf zeitliche und räumliche Verteilungen der Außenluftkonzentrationen von Ultrafeinstaub < 100 nm, um die potentielle Belastung in der Nähe zu beschreiben - unter Einbeziehung weiterer Luftschadstoffe (Ruß, Stickoxide und Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀)). Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 3716 52 200 0. Abschlußbericht 2019
- Van Dingenen, R., Raes, F., Putaud, J.P., Baltensperger, U., Charron, A., Facchini, M.C., Decesari, S., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.C., Harrison, R.M. A European aerosol phenomenology—

- 1: physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. *Atmos. Environ.* 38 (16), 2561–2577, 2004.
- Van Pinxteren, D., Mothes, F., Spindler, G., Fomba, K. W., Cuesta, A., Tuch, T., Müller, T., Wiedensohler, A. und Herrmann, H.: Zusatzbelastungen aus Holzheizungen, Schriftenreihe des LfULG, Heft 12/2020, 2020.
- Van Pinxteren, D., Mothes, F., Spindler, G., Fomba, K. W., Herrmann, H.: Auswertung der gravimetrischen PM10-Messungen in Sachsen, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Berlin zur Identifikation des Anteils verschiedener Quellen an der Feinstaubbelastung anhand der Inhaltsstoffe und anhand von Rezeptormodellierungen (PM-Ost), Abschlussbericht, 2017.
- VDI 2009: VDI Richtlinie 3867 Blatt I: Messen von Partikeln in der Außenluft. Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen - Grundlagen, 2009
- VDI (2019): Modellierung von Ultrafeinpartikeln am und um den Flughafen Frankfurt/Main - Bericht aus dem UBA Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 3716 52 200 in Tagungsband zur 8. VDI Fachtagung Diffuse Emissionen 2019 in Düsseldorf (14. und 15. Mai 2019)
- von Bismarck-Osten, C., Birmili, W., Ketzler, M., Massling, A., Petäjä, T., Weber, S.: Characterization of parameters influencing the spatio-temporal variability of urban particle number size distributions in four European cities. *Atmos. Environ.*, 77, 415-429, 2013.
- Voigtländer, J., Tuch, T., Birmili, W., und Wiedensohler, A., Correlation between traffic density and particle size distribution in a street canyon and the dependence on wind direction, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4275-4286, doi:10.5194/acp-6-4275-2006, 2006.
- Wehner, B., S. Philippin, and A. Wiedensohler, Design and calibration of an improved thermode-nuder to study the volatility fraction of aerosol particles, *J. Aerosol Sci.*, **33**, 1087-1093, 2002.
- Wehner, B., W. Birmili, T. Gnauk, und A. Wiedensohler, Particle number size distributions in a street canyon and their transformation into the urban background: Measurements and a simple model study. *Atmos. Env.* 36: 2215–2223, 2002.
- Wehner, B., und A. Wiedensohler, Long term measurements of submicrometer urban aerosols: Statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3, 867-879, 2003.
- Wehner B., Siebert H., Stratmann F., Tuch T., Wiedensohler A., Petäjä T., Dal Maso M., und Kulmala M., Horizontal homogeneity and vertical extent of new particle formation events, *Tellus*, 59B, 362-371, 2007.
- Wehner, B., W. Birmili, F. Ditas, Z. Wu, M. Hu, X. Liu, J. Mao, N. Sugimoto, und A. Wiedensohler, Relationships between submicrometer particulate air pollution and air mass history in Beijing, China, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 6155-6168, 2008.
- Wehner B., Siebert H., Ansmann A., Ditas F., Seifert P., Stratmann F., Wiedensohler A., Apituley A., Shaw R.A., Manninen H.E., und Kulmala M., Observations of turbulence-induced new particle formation in the residual layer, *Atm. Chem. Phys.*, 10, 4319-4330, 2010.
- WHO – World Health Organization, Regional Office for Europe (2016): WHO Expert Consultation: Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs). Meeting report, Bonn, Germany, 29 September–1 October 2015. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.

- Wiedensohler, A., B. Wehner, und W. Birmili, Aerosol number concentration and size distributions at mountain-rural, urban-influenced, and urban-background sites in Germany. *J. Aerosol Med.* 15: 237-243, 2002.
- Wiedensohler, A., W. Birmili, A. Nowak, A. Sonntag, K. Weinhold, M. Merkel, B. Wehner, T. Tuch, S. Pfeifer, M. Fiebig, A. M. Fjaraa, E. Asmi, K. Sellegri, R. Depuy, H. Venzac, P. Villani, P. Laj, P. Aalto, J. A. Ogren, E. Swietlicki, P. Williams, P. Roldin, P. Quincey, C. Hüglin, R. Fierz-Schmidhauser, M. Gysel, E. Weingartner, F. Riccobono, S. Santos, C. Gruning, K. Faloon, D. Beddows, R. M. Harrison, C. Monahan, S. G. Jennings, C. D. O'Dowd, A. Marinoni, H. G. Horn, L. Keck, J. Jiang, J. Scheckman, P. H. McMurry, Z. Deng, C. S. Zhao, M. Moerman, B. Henzing, G. de Leeuw, G. Loschau und S. Bastian, Mobility particle size spectrometers: harmonization of technical standards and data structure to facilitate high quality long-term observations of atmospheric particle number size distributions, *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(3), 657-685, 2012.
- Wiedensohler, A., Wiesner, A., Weinhold, K., Birmili, W., Hermann, M., Merkel, M., Müller, T., Pfeifer, S., Schmidt, A., Tuch, T., Velarde, F., Quincey, P., Seeger, S. and Nowak, A., Mobility Particle Size Spectrometers: Calibration procedures and measurement uncertainties, *Aerosol Science and Technology*, 52:2.146-164, 2018.
- WMO – World Meteorological Organization: WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations. GAW Report No. 227, Genf, 2016.
- Olf, K., Schneider, A., Breitner, S., Meisinger, C., Heier, M., Cyrus, J., Kuch, B., von Scheidt, W., Peters, A.: Associations between short-term exposure to particulate matter and ultrafine particles and myocardial infarction in Augsburg, Germany. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Volume 218, Issue 6, pages 535-542, 2015.
- Zanatta, M., Gysel, M., Bukowiecki, N., Müller, T., Weingartner, E., Areskoug, H., Fiebig, M., Yttri, K.E., Mihalopoulos, N., Kouvarakis, G., Beddows, D., A European aerosol phenomenology-5: climatology of black carbon optical properties at 9 regional background sites across Europe. *Atmos. Environ.* 145, 346-364, 2016.
- Zhao J., Weinhold, K., Merkel, M., Kecorius, S., Schmidt, A., Schlecht, S., Tuch, T., Wehner, B., Birmili, W. and Wiedensohler, A., Concept of high quality simultaneous of the indoor and outdoor aerosol to determine the exposure to fine und ultrafine particles in private homes, *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft*, 78 (3): 73-78, 2018.
- Zhu, Y., Fanning, E., Yu, R.C., Zhang, Q., Froines, J.R. (2011): Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large international airport. *Atmospheric Environment*, 45, 6526-6533.
- PMP-Dokument 29-06 (2014): GRPE-PMP-29-06 Brakes-Tyres_open questions.pptx
- PMP-Dokument 31-03 (2014): GPRE-PMP-31-03 - Russian Federation doc GRPE-69-03e.pdf
- PMP-Dokument 43-12 (2017): PMP-43-12 JARI_Brake_2017_for_PMP_20170315.pdf
- PMP-Dokument 37-08 (2015): PMP-37-08_Ford_NonExhaust.pdf
- PMP-37-09-Dokument (2015): PMP 37-09 meeting notes draft 37th session.doc

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 1: | Aufteilung der atmosphärischen Aerosolpartikel in drei Größenklassen und nach ihrer Herkunft. | 7 |
| Abb. 2: | Herkunft und Bildungsprozesse für die atmosphärischen Aerosolpartikel..... | 8 |
| Abb. 3: | Optische und thermochemische Klassifizierung sowie molekulare Strukturen von schwarzem Kohlenstoff (BC) oder elementarem Kohlenstoff (EC) und organischem Kohlenstoff, Pöschl, 2005..... | 9 |
| Abb. 4: | Monatsmittelwert der Beiträge verschiedener Quellen zur Partikelanzahlkonzentration für die verkehrsnahen Messstelle Leipzig-Mitte, den urbanen Hintergrund Leipzig-TROPOS sowie den regionalen Hintergrund Melpitz. | 11 |
| Abb. 5: | Anteil wichtiger Quellsektoren an der globalen Emission von Partikeln für das Jahr 2010 (Anzahlen PN_{tot} = alle Partikel, PN_{UFP} = ultrafeine Partikel $< 0.1 \mu m$, PN_{FP} = feine Partikel $0.1-2 \mu m$ und PM_1 = Partikelmassenkonzentration $< 1 \mu m$). | 11 |
| Abb. 6: | Räumliche Verteilung globaler kontinentaler anthropogener Partikelanzahl-Emissionen in der Einheit Emission pro km^2 und Jahr. | 12 |
| Abb. 7: | Median-Partikelanzahlgrößenverteilungen für die 5 Stationstypen im GUAN-Netzwerk. | 13 |
| Abb. 8: | Mittlere Partikelanzahlkonzentrationen für ultrafeine Partikel ($20 \text{ nm} < D_p < 100 \text{ nm}$) an den 17 Messstationen im GUAN-Netzwerk für den Zeitraum 2009-2014..... | 14 |
| Abb. 9: | Mittlerer Tagesgang der Woche für die Partikel-Anzahlkonzentration im Bereich von 30 bis 200 nm in Leipzig-Mitte von 2010 vor Einführung der Umweltzone bis 2016. | 15 |
| Abb. 10: | Partikelgrößenverteilung sowie zugehörige Moden bei der unvollständigen Verbrennung von Dieselfahrzeugen (oben) sowie Benzinern (unten); Burtscher und Mayer (2015). | 17 |
| Abb. 11: | Mittlere Partikelgrößenverteilung der verkehrsnahen Messstation Dresden-Nord über einen Zeitraum von sechs Monaten (09/2006-02/2007)..... | 18 |
| Abb. 12: | Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser für Bremsmanöver von 100 km/h sowie 30 km/h. Pos B ist eine Messung nahe der Bremsscheibe, die anderen Messungen wurden im Radkasten durchgeführt. (Entnommen aus Grigoratos und Martini, 2014.) .. | 19 |
| Abb. 13: | Konzentrationen des schwarzen Kohlenstoffes gemessen mit Aethalometer und MAAP dargestellt als Zeitreihen; Messwerte im Ort Melpitz sind als | |

| | | |
|----------|--|----|
| | hellgraue Linien, die an der Referenz Melpitz Station als schwarze Linien dargestellt (Quelle: LfULG Schriftenreihe, Heft 12/2020)..... | 20 |
| Abb. 14: | Mittlere Anzahlgrößenverteilung für verschiedene Anströmungsrichtungen an der Station Frankfurt-Schwanheim nach Tag (5-23 Uhr) und Nacht (23-5 Uhr) getrennt. | 21 |
| Abb. 15: | Mittlere Anzahlgrößenverteilung für verschiedene Anströmungsrichtungen an der Station Frankfurt-Flughafen, A3 nach Tag (5-23 Uhr) und Nacht (23-5 Uhr) getrennt. | 22 |
| Abb. 16: | Mittlere Anzahlgrößenverteilung für verschiedene Anströmungsrichtungen an der Station Raunheim nach Tag (5-23 Uhr) und Nacht (23-5 Uhr) getrennt. .. | 22 |
| Abb. 17: | Kurzzeitmessungen mit mobilem Partikelzähler an einem Standort im Umfeld des Flughafens Frankfurt mit einer Überflughöhe von 100 m (Masterarbeit J. Freund). | 23 |
| Abb. 18: | Flughafen Amsterdam - Schiphol (Keuken et al., 2015). Mittlere Partikelgrößenverteilungen gemessen im Zeitraum März bis Mai 2014 an zwei Messstellen in der unmittelbaren bzw. näheren Umgebung des Flughafengeländes zu verschiedenen Tageszeiten und Windrichtungsverhältnissen. © Keuken et al. (2015)..... | 24 |
| Abb. 19: | Partikelgrößenverteilung (links) und Gesamtanzahlkonzentration (rechts) in Abhängigkeit der Zeit für den Fall der Partikelneubildung für die Messstation Melpitz im Sommer 2018..... | 25 |
| Abb. 20: | Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Zeit für den Fall der Partikelneubildung für die Messstation Leipzig-Mitte und Leipzig-TROPOS im Juli 2012 (Ma und Birmili, 2015). | 26 |
| Abb. 21: | Typische Großwetterlagen über Deutschland; links: Westlage; rechts: Ostlage (Quelle: Uni Regensburg, Europäische Wetterlagen)..... | 27 |
| Abb. 22: | Mittelwerte der PM10, PM2.5 und PM1 Massenkonzentrationen im Vergleich zwischen Winter und Sommer sowie zwischen westlichen und östlichen Anströmungen für den Zeitraum Mai 2004 bis April 2008. | 28 |
| Abb. 23: | Partikeldeposition im menschlichen Atemtrakt als Funktion des Partikeldurchmessers..... | 30 |
| Abb. 24: | Zusammenfassung der Wahrscheinlichkeit der Partikeldeposition im menschlichen Atemtrakt als Funktion des Partikeldurchmessers sowie der Einfluss verschiedener Depositionsmechanismen. | 31 |
| Abb. 25: | Beispiel einer Datei mit Rohdaten einer Mobilitätsverteilung (Spalten: Zeit, Temperatur, Druck, Anzahl Bins, Durchmesser und Rohkonzentration fortlaufend). | 37 |

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 26: | Vergleich der Partikelgrößenverteilung eines Prüflings gegenüber eines Referenzpartikelgrößenspektrometers. | 38 |
| Abb. 27: | Kalibrierung eines Partikelgrößenspektrometers mit standardisierten Partikeln: (a) 203 nm; (b) 125 nm; (c) 350 nm; (d) 500 nm (Wiedensohler et al., 2018) | 39 |
| Abb. 28: | Atmosphärische Messstationen im German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). | 43 |
| Abb. 29: | Schema der Arbeitsweise eines Kondensationspartikelzählers (links) sowie ein Beispiel der Firma TSI, Modell 3772. | 48 |
| Abb. 30: | Zähleffizienzkurve für einen Partikelzähler der Firma Grimm im Vergleich zum Elektrometer, für die Kalibrierung wurden Silberpartikel zwischen 5 und 40 nm verwendet. | 49 |
| Abb. 31: | Schema der Arbeitsweise eines Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometers. | 50 |
| Abb. 32: | TROPOS - Mobilitätspartikelgrößenspektrometer. | 51 |
| Abb. 33: | Rückführbarkeit von Aerosolmessungen auf Grundeinheiten. | 53 |
| Abb. 34: | Aufbau eines Thermodenuders nach Wehner et al., 2002. | 53 |
| Abb. 35: | Kopplung von Thermodenuder und Partikelgrößenspektrometer. Lange Messreihen liefern Informationen über die nichtflüchtigen Anteile des Fein- und Ultrafeinstaubes. | 54 |
| Abb. 36: | Vergleich von Partikelgrößenverteilungsmessungen mit und ohne Thermodenuder. Ein deutliches Schrumpfen der Partikel zu geringeren Durchmessern ist zu erkennen. | 54 |
| Abb. 37: | Messprinzip eines Mehrwinkelabsorptionsphotometer des Modells MAAP 5012. | 55 |
| Abb. 38: | Hauptstadtregion Berlin-Brandenburg mit gut 40 Prozent der Bevölkerung des Bundeslandes Brandenburg (Bildquelle: Wikipedia) | 62 |
| Abb. 39: | Südost-Brandenburg mit einer landschaftlichen Mischung aus Industrie und Naturschutzgebieten (Bildquelle: OpenStreetMap) | 63 |
| Abb. 40: | Braunkohlekraftwerk Jänschwalde im Südosten Brandenburgs mit seinen Kühltürmen (Bildquelle: leag.de) | 64 |
| Abb. 41: | Polardiagramme für die PM10-Massekonzentration in Abhängigkeit der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Messstation (Quelle: van Pinxteren et al., 2017) | 65 |
| Abb. 42: | Verkehrsmengenkarte für das Erfassungsjahr 2015 auf Bundesautobahnen (Straßenverkehrszählung 2015; Bundesanstalt für Straßenwesen) | 66 |
| Abb. 43: | Übersicht über die GUAN-Messstationen zu ultrafeinen Partikeln und Ruß (BC) | 68 |

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 44: | Übersicht zur UFP-Messstation zu ultrafeinen Partikeln in Berlin-Schönefeld (Karte: OpenStreetMap)..... | 70 |
| Abb. 45: | Ergebnisse der Anzahlkonzentrationen der Messstationen Berlin-Schönefeld und Bohnsdorf für das Jahr 2019; FBB-Luftgütebericht 2019..... | 70 |
| Abb. 46: | Mögliches Messregime zur Überwachung der Luftqualität im Berliner Speckgürtel (Karte: LfU)..... | 72 |
| Abb. 47: | Mögliches Messregime zur Überwachung der Luftqualität im südöstlichen Brandenburg (Karten: OpenStreetMap, LfU)..... | 74 |
| Abb. 48: | Messstationen mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität. © Landesamt für Umwelt..... | 77 |
| Abb. 49: | Messstation Spreewald mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im ländlichen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt..... | 78 |
| Abb. 50: | Messstation Cottbus, Gartenstraße mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im städtischen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt..... | 79 |
| Abb. 51: | Messstation Spremberg mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im vorstädtischen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt..... | 79 |
| Abb. 52: | Messstation Dallgow-Döberitz mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im vorstädtischen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt..... | 80 |
| Abb. 53: | Ehemalige Messstationen in Königs Wusterhausen mit kontinuierlicher Überwachung der Luftqualität im vorstädtischen Hintergrund. © Landesamt für Umwelt..... | 80 |
| Abb. 54: | Jahresmittelwerte der PM10-Konzentration an ausgewählten verkehrsbezogenen Messstellen im Land Brandenburg (Quelle: MLUK, LfU: Jahresbericht 2018 – Luftqualität in Brandenburg)..... | 82 |
| Abb. 55: | Jahresmittelwerte der NO ₂ -Konzentration an ausgewählten verkehrsbezogenen Messstellen im Land Brandenburg (Quelle: MLUK, LfU: Jahresbericht 2018 – Luftqualität in Brandenburg)..... | 82 |
| Abb. 56: | Trendanalyse für verschiedene Größenklassen von ultrafeinen Partikeln und Ruß über einen Zeitraum von 10 Jahren, klassifiziert nach Standort und Standortkategorie (Sun et al., 2019)..... | 86 |
| Abb. 57: | Trimodale Partikelgrößenverteilungen unter Verwendung verschiedener Partikelmetriken (Anzahl=Numer, Oberfläche=Area, Lungenablagerungsoberfläche=Lung Deposited Surface Area und Masse=Mass), D _p = Partikeldurchmesser, UFP = ultrafeine Partikel und PM = Partikel. Quelle: Kittelson, 2015..... | 90 |
| Abb. 58: | Mittlere Partikelgrößenverteilungen für die einzelnen Standortkategorien: Roadside = verkehrsnah, Urban bg. = urbaner Hintergrund, Regional bg. = | |

| | | |
|----------|--|-----|
| | ländlicher Hintergrund, Low mountain range = Mittelgebirge und High Alpine = Hochgebirge Quelle: Sun et. al 2019..... | 93 |
| Abb. 59: | Mehrfährige statistische Werte der Gesamtanzahlkonzentration zwischen 10 und 800 nm für 17 Messstationen des GUAN. | 94 |
| Abb. 60: | Mehrfährige statistische Werte der Rußmassenkonzentration (links) sowie Anzahlkonzentration zwischen 60 und 300 nm (rechts) für 17 Messstationen des GUAN. | 94 |
| Abb. 61: | Beispiel eines Konturplots von Partikelgrößenverteilungen, Messstandort im urbanen Bereich mit lokalen Partikelbelastungen..... | 95 |
| Abb. 62: | Beispiel eines Konturplots von Partikelgrößenverteilungen, Messstandort im urbanen Bereich mit Partikelneubildungsereignis. | 96 |
| Abb. 63: | Relative Änderung des Immissionsanteils durch die Kfz-Motoremissionen an der Messstation Leipzig-Mitte von 2010 bis 2016 (Quelle: LfULG). | 98 |
| Abb. 64: | Einfluss der Walpurgisfeuer 2019 in Annaberg-Buchholz auf die Partikelanzahlkonzentration in der Luft für verschiedene Partikelgrößenklassen (Quelle: LfULG). | 99 |
| Abb. 65: | Beispiel für Zeitreihen von UFP-Klassen für die Online-Veröffentlichung durch die HLNUG. Quelle: https://www.hlnug.de/?id=9231&station=0619, 10.05.2020)..... | 100 |
| Abb. 66: | Beispiel für Tabellenwerte von UFP für die Online-Veröffentlichung durch die HLNUG. Quelle: https://www.hlnug.de/?id=9231&station=0619, 10.05.2020) | 100 |
| Abb. 67: | Datenveröffentlichung von UFP des GUAN in der EBAS-Datenbank. Quelle: http://ebas.nilu.no/ | 102 |
| Abb. 68: | Datenveröffentlichung von UFP des GUAN in der EBAS-Datenbank – Beispiel Jahresdaten 2019 für Neuglobsow. Quelle: http://ebas.nilu.no/ | 103 |
| Abb. 69: | Produktpalette von Partikelgrößenspektrometern: a) TSI Modell 3938, b) Grimm Modell 5.420, c) Palas U-SMPS und d) TROPOS. | 111 |
| Abb. 70: | Partikelzähler Modell 3750 von TSI zur Bestimmung der Gesamtanzahlkonzentration..... | 112 |
| Abb. 71: | Partikelzähler Modell 5.420 von Grimm zur Bestimmung der Gesamtanzahlkonzentration..... | 112 |
| Abb. 72: | Aethalometer AE33 zur Bestimmung der Rußmassenkonzentration..... | 114 |
| Abb. 73: | Innenansicht des Messcontainers mit seinen Messgeräten an der städtischen Hintergrundstation Cottbus, Gartenstraße, Quelle: LfU..... | 115 |
| Abb. 74: | Innenansicht des Messcontainers mit seinen Messgeräten an Verkehrsmessstellen des LfU im Land Brandenburg, Quelle: LfU..... | 116 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Abb. 75: | Beispiel eines Scans der Partikelgrößenverteilung (blau) und der jeweiligen Korrektur entsprechend der Höhe über NN..... | 119 |
| Abb. 76: | Halbstundenmittelwerte der Gesamtpartikelanzahl UFP an den Standorten Berlin-Schönefeld SXF und Bohnsdorf BDF für das Jahr 2019, Quelle: FBB.. | 122 |
| Abb. 77: | Internetveröffentlichung von tagesaktuellen Messdaten auf der TROPOS-Seite, Auswahl von Messstationen..... | 123 |
| Abb. 78: | Internetveröffentlichung von aktuellen Messdaten auf der TROPOS-Seite.. | 124 |
| Abb. 79: | Gemittelter Tagesgang der Rußmassenkonzentration sowie der Anzahlkonzentration an Partikeln des Bereiches 30 bis 200 nm für verkehrsnahen Stationen (rot, Roadside), städtischem Hintergrund (gelb, Urban bg.), regionalem Hintergrund (grün, Regional bg) und Gebirgsstationen (blau, Mountains). | 128 |
| Abb. 80: | Zeitreihen der Partikelanzahlkonzentration zwischen 30 und 200 nm (oben) sowie der Rußmassenkonzentration (unten) zwischen 2010 und 2016 für die Messstationen Leipzig-Mitte (LEM), Leipzig-TROPOS (LET), Leipzig-West (LEW) sowie Melpitz. | 129 |
| Abb. 81: | Zeitreihen der Partikelmassenkonzentrationen PM ₁₀ (oben), PM _{2,5} (mitte) sowie der Differenz zwischen PM ₁₀ und PM _{2,5} (unten) von 2010 bis 2016 für die Messstationen Leipzig-Mitte (LEM), Leipzig-West (LEW) und Melpitz..... | 130 |
| Abb. 82: | Zeitreihen der Luftschadstoffkonzentrationen NO _x (oben) und NO ₂ (unten) von 2010 bis 2016 für die Messstationen Leipzig-Mitte (LEM, rot), Leipzig-West (LEW, grün) und Melpitz (blau). | 131 |
| Abb. 83: | Gemittelter Tagesgang der Rußmassenkonzentration sowie der Anzahlkonzentration an Partikeln des Bereiches 30 bis 200 nm für verkehrsnahen Stationen (rot), städtischem Hintergrund (gelb), regionalem Hintergrund (grün) und Gebirgsstationen (blau). | 133 |
| Abb. 84: | Zeitreihe verschiedener Größenklassen für den Zeitraum 2003 bis 2018; Klasse 5 bis 30 nm (blau), 30 bis 200 nm (rot) und 200 bis 800 nm (grün)..... | 137 |
| Abb. 85: | Aktuelle Version eines TROPOS-Größenspektrometers..... | 183 |
| Abb. 86: | Beispiel eines TROPOS Größenspektrometers im Luftgütemessnetz Sachsen in der Messstation Leipzig-Mitte. | 184 |
| Abb. 87: | Flussbild mit Probenahmesystem für die Luftgütestation Leipzig-Mitte im regulären Messbetrieb..... | 185 |
| Abb. 88: | Schema der Datenprozessierung am Beispiel des Luftgütemessnetzes Sachsen..... | 186 |
| Abb. 89: | Beispiel eines TSI Größenspektrometers mit zusätzlichem Partikelzähler zur Qualitätssicherung im Luftgütemessnetz Hessen, Quelle: HLNUG..... | 188 |

Abb. 90: Externer Messrechner zur Erfassung der Partikelgrößenverteilung im Luftgütemessnetz Hessen, Quelle: HLNUG..... 189

Abb. 91: Schema der Datenprozessierung am Beispiel des Luftgütemessnetzes Hessen.
..... 189

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|-----|
| Tab. 1: | Ergebnisse der mehrjährigen Trendanalyse für die Anzahlkonzentrationen verschiedener Größenbereiche N(10-30nm) und N(30-200nm) mit zwei verschiedenen Statistikmodellen (Sun et al., 2019)..... | 16 |
| Tab. 2: | Messstationen im GUAN-Netzwerk | 44 |
| Tab. 3: | Verbindung des GUAN-Netzwerkes zu anderen Luftqualitätsnetzwerken und Infrastrukturen..... | 46 |
| Tab. 4: | Eingesetzte Messtechnik sowie erfasster Größenbereich an den einzelnen Messstationen in GUAN..... | 52 |
| Tab. 5: | Möglichkeiten der Generierung von Partikeldaten für die beiden vorgestellten Messregimes. | 75 |
| Tab. 6: | Vergleich von Langzeitstudien der Parameter Rußmassenkonzentration, Partikelanzahlkonzentration und Feinstaub in Europa (Sun et al., 2019)..... | 85 |
| Tab. 7: | 7 Größenklassen, wie sie im Luftgütemessnetz Sachsen gespeichert werden (Hessen analog, Klasse N8: 200-500 nm, Sachsen misst an mehreren Stationen zusätzlich die Größenklasse N1: 5-10 nm), Quelle: LfULG. | 91 |
| Tab. 8: | Zusätzliche Größenklassen mit Anwendungsbereich, wie sie im Luftgütemessnetz Sachsen gespeichert werden Quelle: LfULG..... | 92 |
| Tab. 9: | Hersteller und Charakteristika von Partikelgrößenpektrometern. | 110 |
| Tab. 10: | 7 Größenklassen zwischen 10 und 800 nm, wie sie im Luftgütemessnetz Sachsen gespeichert werden (Hessen analog, allerdings N8 nur 200-500 nm, Sachsen misst an mehreren Stationen zusätzlich die Größenklasse N1: 5-10 nm), Quelle: LfULG..... | 120 |
| Tab. 11: | Größenklassen für die Speicherung der Partikeldaten Luftgüte-Messnetz Sachsen..... | 128 |
| Tab. 12: | Messstationen und Messparameter in GUAN. | 132 |
| Tab. 13: | Leitfragen für die Messung ultrafeiner Partikel im Umfeld des Flughafens Frankfurt/Main..... | 133 |
| Tab. 14: | Überblick über die Luftgütemessstationen in Sachsen, welche Sondermessungen zu ultrafeinen Partikeln und Ruß durchführen; ¹ Daten in LfULG-Datenbank gespeichert; ² Ende der Messungen 31.12.2016..... | 134 |
| Tab. 15: | Überblick über die acht im sächsischen Luftgütemessnetz verwendeten Größenklassen mit den zugehörigen Größenbereichen sowie deren Anwendungen..... | 135 |

| | |
|--|-----|
| Tab. 16: zusätzliche Sondermessgrößen, welche aus den gemessenen Partikelgrößenverteilungen berechnet werden und in der Datenbank der Behörde gespeichert werden. | 135 |
| Tab. 17: Phasen der wöchentlichen, automatischen Funktionskontrolle für einzelne Partikelgrößenspektrometer im Luftgütemessnetz Sachsen. | 136 |

PROJEKTPARTNER

Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft

Abteilung Umwelt, Klimaschutz, Nachhaltigkeit

Referat 54 – Anlagenbezogener Immissionsschutz, Anlagensicherheit und Störfallvorsorge, Luftreinhaltung und Lärminderung, umweltbezogene Fragen des Verkehrs

Haus S

Henning-von-Tresckow-Straße 2-13

14467 Potsdam

Landesamt für Umwelt

Abteilung T1, Referat Luftqualität, Nachhaltigkeit

14410 Potsdam

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V. – TROPOS

Abteilung „Experimentelle Aerosol- und Wolkenmikrophysik“

Permoserstraße 15

04318 Leipzig

Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co KG

Mohrenstraße 14

01445 Radebeul

