



# 1. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt

Diana Rose, Stefan Jacobi

Wiesbaden, den 19.06.2018  
(Korrektur der Version vom 30.05.2018)



## Inhalt

Zusammenfassung .....	1
1 Einleitung .....	4
2 Messgeräte und Standortwahl.....	5
3 Ergebnisse .....	8
3.1 Anzahlgrößenverteilungen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim .....	8
3.2 Tagesgänge der Gesamtkonzentration der Partikel .....	9
3.3 Windrichtungsabhängige Untersuchung der Partikeleigenschaften .....	10
4 Der Frankfurter Flughafen als Quelle für ultrafeine Partikel? .....	13
5 Fazit und Ausblick.....	15
Danksagung .....	17
Literaturangaben.....	18
Begriffserläuterungen .....	19
Korrigendum .....	20



## Zusammenfassung

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) führt seit September 2017 Messungen der Anzahlgrößenverteilung von Partikeln in der Luft an zwei Standorten, Raunheim und Frankfurt-Schwanheim, durch. Mit diesen Messungen soll untersucht werden, wie hoch die Ultrafeinstaub-Belastung im Umfeld des Flughafens Frankfurt ist und ob der Flughafen als Quelle für ultrafeine Partikel in Frage kommt. Als ultrafeine Partikel (UFP) werden alle Partikel mit einem Durchmesser kleiner 100 Nanometern (nm) bezeichnet. Ihre gesundheitlichen Wirkungen sind noch nicht abschließend geklärt. Der vorliegende Zwischenbericht fasst erste Ergebnisse zusammen, die im Zeitraum September 2017 bis Februar 2018 erzielt wurden.

Als Mittelwert über die ersten Monate der Messungen ergibt sich in Raunheim eine Gesamtkonzentration der Partikel im Größenbereich von ca. 10 nm bis 500 nm von ca. 7.000 Partikel pro Kubikzentimeter ( $\#/cm^3$ ), was für die Lage der Station im städtischen Hintergrund nicht unüblich ist. Der Anteil an UFP beträgt etwa 85 %. In Frankfurt-Schwanheim ist die mittlere Gesamtkonzentration mit ca.  $8.900\#/cm^3$  jedoch deutlich höher und für die Lage auf den ersten Blick eher ungewöhnlich. Die Station liegt am südwestlichen Rand der Stadt aber bereits im Frankfurter Stadtwald, wo nahegelegene potentielle Partikelquellen, wie z.B. Emissionen des Kfz-Verkehrs, aber auch Gewerbe und Hausbrand bereits relativ weit entfernt sind. Der Anteil an UFP an der gemessenen Anzahl von Partikeln im Größenbereich von 10 nm – 500 nm liegt hier etwa bei 90 %.

Die bisherigen Messungen zeigen, dass an beiden Messstationen tagsüber sehr hohe Anzahlkonzentrationen insbesondere von sehr kleinen Partikeln (mit Durchmessern von etwa 10 nm bis 30 nm) auftreten, sobald der Wind aus Richtung des Flughafens weht. In Frankfurt-Schwanheim ist die Gesamtkonzentration der Partikel dann im Mittel 6-mal so hoch wie bei Wind aus anderen Richtungen, in Raunheim etwa zweimal so hoch. Kommt der Wind während der Nachtstunden aus Richtung Flughafen, sind die Partikelkonzentrationen nicht signifikant höher als bei Wind aus anderen Richtungen. Auch wenn eine einfache Korrelation mit der Windrichtung nicht zwangsläufig als eindeutige und abschließende Quellenzuordnung zu verstehen ist und auch andere potentielle Quellen für ultrafeine Partikel in Betracht zu ziehen sind (insbesondere an der Station Raunheim), so ist diese Windrichtungsabhängigkeit als auffällig zu bezeichnen.

Die Gesamtkonzentration der Partikel weist in Frankfurt-Schwanheim, das sich aufgrund des vorrangig herrschenden Südwestwinds die meiste Zeit in der Abluft des Flughafens befindet, einen markanten Tages- und Wochengang auf, der untypisch für straßenverkehrsbeeinflusste Standorte ist. Die geringsten Partikelkonzentrationen werden zwischen 4:00 und 5:00 Uhr beobachtet. Ab 5:00 Uhr steigt die Konzentration stark an, bis 6:00 Uhr hat sie sich verdoppelt und bis 12:00 Uhr liegt sie mehr als 4-mal so hoch wie in der Nacht. Danach sinkt sie leicht, erreicht zwischen 22:00 und 23:00 Uhr

ein weiteres Maximum und fällt nach 23:00 Uhr schnell auf ihren nächtlichen Wert zurück. Der rapide Anstieg und Abfall der Konzentration um 5:00 Uhr bzw. 23:00 Uhr stimmt mit der hauptsächlichen Betriebszeit des Flughafens auffällig gut überein. Anders als bei straßenverkehrsbezogenen Messstellen unterscheidet sich auch der Tagesgang am Wochenende nicht von dem an einem Werktag. Aus der stark von der Windrichtung beeinflussten Form der Größenverteilung und der damit verbundenen Höhe der Anzahlkonzentration in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim sowie aus dem markanten Tages- und Wochengang in Frankfurt-Schwanheim lässt sich schließen, dass das Gelände des Flughafen Frankfurt eine bedeutsame Quelle für ultrafeine Partikel ist. Allerdings stehen noch weitere Auswertungen aus, die Hinweise geben könnten, inwiefern die erhöhten Konzentrationen auf den Flughafenbetrieb zurückzuführen sind. Dies betrifft zum Beispiel Abhängigkeiten der Konzentration von den saisonalen, wochen- und tageszeitbedingten Schwankungen der Verkehrsmengen am Flughafen oder Abgleiche mit Tagen mit deutlich reduzierter Verkehrsmenge (z.B. Streiktage am Flughafen).

Das Auftreten der UFP ist nach den derzeitigen Erkenntnissen durch bodennahen Transport geprägt, das heißt durch die Emissionen, die beim Betrieb auf dem Flughafengelände entstehen. Einschätzungen darüber, ob Überflüge unterhalb einer bestimmten Höhe als relevante Quelle für UFP am Boden in Betracht kommen, lassen sich aus den bisherigen Auswertungen nicht ableiten. Im Rahmen zukünftiger Messungen an weiteren Standorten soll auch dieser Frage weiter nachgegangen werden.

Die Beobachtungen bestätigen die Ergebnisse von anderen wissenschaftlichen Studien, die zum Beispiel in der Abluft der Flughäfen von Amsterdam oder Los Angeles ebenfalls stark erhöhte Konzentrationen ultrafeiner Partikel, insbesondere im Größenbereich von 10 nm bis 30 nm gefunden haben (Hudda et al., 2014; Keuken et al., 2015).

Die Messungen der Anzahlgrößenverteilung in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim sollen weitergeführt und in Kürze noch durch mindestens eine weitere mobile Station ergänzt werden. Diese soll unter anderem dafür eingesetzt werden, sowohl den Beitrag unterschiedlicher Quellen (Flughafen, Straßenverkehr, etc.) als auch räumliche Aspekte der Belastungssituation noch besser charakterisieren und differenzieren zu können.

Welche Konsequenzen die beobachteten Partikelkonzentrationen auf die menschliche Gesundheit haben, kann hier nicht beurteilt werden. Für die Anzahlkonzentration der ultrafeinen Partikel existieren zurzeit weder wirkungsbezogene noch rechtliche Beurteilungsgrundlagen bzw. -werte. Toxikologische Studien weisen darauf hin, dass ultrafeine Partikel aufgrund ihrer geringen Größe und der damit verbundenen hohen Lungengängigkeit negative Effekte auf die Gesundheit haben. Es fehlt jedoch eine ausreichende Anzahl an epidemiologischen Studien, um die genauen Effekte quantifizieren zu können (Birmili et al., 2014). Die systematische und längerfristige Messung ultrafeiner Partikel ist auch mangels

einer expliziten Messanforderung bei weitem nicht so verbreitet, wie dies für gesetzlich regulierte Stoffe der Fall ist. Die aufgenommenen Untersuchungen stellen daher einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Datenlage dar, die wiederum Voraussetzung dafür ist, dass zukünftig entsprechende Wirkungsstudien durchgeführt werden können. Dies ist dringend notwendig, um belastbare Daten vorzulegen und damit die Diskussion zu versachlichen. Die Ergebnisse stehen generell der Wirkungsforschung zur Verfügung, die versucht, Zusammenhänge zwischen dem Auftreten bestimmter Krankheitsbilder und auslösenden Faktoren, unter anderem auch Umweltfaktoren, aufzuklären. In den kommenden Jahren wird das HLNUG die Konzentration, Größe und perspektivisch auch die Zusammensetzung von Ultrafeinstäuben verschiedener möglicher Quellen weiter untersuchen. Die Ergebnisse werden für mögliche europäische oder nationale Forschungsprojekte nutzbar gemacht sowie der Region zur Verfügung gestellt.

# 1 Einleitung

Der Ballungsraum Rhein-Main stellt hessenweit das am stärksten mit Luftschadstoffen belastete Gebiet dar. Begründet ist dies hauptsächlich durch die hohe Bevölkerungsdichte und das daraus folgende hohe Verkehrsaufkommen in den Städten und auf den Autobahnen. Im Ballungsraum Rhein-Main befindet sich auch Deutschlands größter Flughafen, der Flughafen Frankfurt. Mit seinen etwa 1.300 Flugbewegungen pro Tag befördert er jährlich über 60 Millionen Passagiere und über 2 Millionen Tonnen Fracht (Fraport AG, 2017). Der Flughafen stellt einerseits einen wichtigen Wirtschaftsfaktor für die Region dar, trägt andererseits aber zumindest lokal betrachtet nicht unerheblich zur Emission von Luftschadstoffen bei, deren Einfluss auf die Luftqualität zu beachten ist. Zahlreiche Luftschadstoffe, wie z. B. Stickstoffoxide und Ruß werden sowohl von den Triebwerken der Flugzeuge, als auch von den Fahrzeugen des Flughafenbetriebs emittiert. Diese Emissionen entstehen hauptsächlich am Boden und, bei Start und Landung der Flugzeuge, auch in niedrigen Höhen, von wo aus sie möglicherweise in bodennahe Luftschichten gemischt werden.

Inwiefern der Luftverkehr im Rhein-Main-Gebiet einen Einfluss auf die Luftqualität hat, wird seit Jahren, und verstärkt seit der Eröffnung der Landebahn Nordwest im November 2011, diskutiert. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), dessen Aufgabe es ist, die Luftqualität in Hessen auf der Grundlage der europäischen Luftqualitätsgesetzgebung zu überwachen, hat deshalb in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen durchgeführt und damit zur Versachlichung der Debatte beigetragen.

So betrieb das HLNUG von Mai 2012 bis März 2017, unterstützt auch durch das Umwelt- und Nachbarschaftshaus, eine mobile Messstation nacheinander an vier Standorten rund um den Flughafen. Die Standorte befanden sich alle im nahegelegenen Einflussbereich der Lande- oder Startbahnen, teilweise auch direkt darunter. Jeweils für ein Jahr wurden in Frankfurt-Lerchesberg, Flörsheim, Mörfelden-Walldorf und Neu-Isenburg alle gesetzlich regulierten Schadstoffe (Feinstaub PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub>, Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Benzol und Ozon) sowie weitere darüber hinaus (z. B. Ruß und Gesamtkohlenwasserstoffe) gemessen. Die Messungen ergaben, dass die Belastung mit den untersuchten Schadstoffen an diesen Standorten im nahen Umfeld des Flughafens Frankfurt nicht höher als an anderen vergleichbaren Luftmessstationen im Ballungsgebiet Rhein-Main ist. Zusammenfassende Präsentationen dieser Ergebnisse wurden auf der Internetseite des HLNUG veröffentlicht.<sup>1</sup>

Internationale wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass z. B. im Einflussbereich der Flughäfen von Los Angeles und Amsterdam erhöhte Anzahlkonzentrationen von ultrafeinen Partikeln (UFP) zu finden

---

<sup>1</sup> <https://www.hlnug.de/themen/luft/sonstige-berichte.html>



sind (Hudda et al., 2014; Keuken et al., 2015). Ultrafeine Partikel bezeichnen alle luftgetragenen Teilchen mit einem Durchmesser unter 100 Nanometern (nm). Diese tragen auch bei hoher Anzahl aufgrund ihrer geringen Größe kaum zur Partikelmasse und damit auch kaum zu den Komponenten PM<sub>10</sub> oder PM<sub>2,5</sub> bei. UFP sind potentiell gesundheitsschädlich, da sie aufgrund ihrer geringen Größe sehr lungengängig sind. Jedoch existiert bisher keine ausreichende Anzahl an epidemiologischen Studien, die die Gesundheitseffekte von UFP quantifizieren. Für die Anzahlkonzentration der ultrafeinen Partikel existieren daher zurzeit weder wirkungsbezogene noch rechtliche Beurteilungsgrundlagen bzw. -werte.

Um den Einfluss des Flughafens Frankfurt auf die Ultrafeinstaubbelastung in der Region abzuschätzen, hat das HLNUG zusammen mit dem Umweltbundesamt (UBA, Außenstelle Langen) bereits im September 2015 Messungen mit einem Partikelzähler an der HLNUG-Messstation Raunheim (ca. 5 km südwestlich des Flughafens) aufgenommen. Das Gerät misst die Gesamtkonzentration aller Partikel mit einer Größe von ca. 3 nm bis ca. 1 µm und deckt damit auch den Größenbereich der UFP ab. Die bisherigen Auswertungen dieser Messungen haben ergeben, dass die Gesamtpartikelanzahlkonzentration bei Wind aus nordöstlichen Richtungen erhöht ist. In dieser Richtung liegt der Flughafen Frankfurt, jedoch befinden sich auch weitere potentielle Quellen für UFP (z. B. der Kfz-Verkehr auf den Autobahnen und anderen Straßen) ebenfalls in dieser Richtung, so dass eine eindeutige Quellenzuordnung nicht ohne weiteres möglich ist.

Ziel einer neueren Studie des HLNUG ist nun die Untersuchung der UFP im Einflussgebiet des Flughafens Frankfurt mit Hilfe von größenauflösenden Partikelmessungen. Damit soll eine bessere Aussage darüber getroffen werden können, ob ein Einfluss des Flughafens Frankfurt als Quelle für ultrafeine Partikel im Umfeld zu erkennen ist.

Das HLNUG betreibt deshalb seit Herbst 2017 je ein Messgerät zur Bestimmung der Anzahlgrößenverteilung von Partikeln in Raunheim und in Frankfurt-Schwanheim. Die Anschaffung der umfangreichen messtechnischen Einrichtungen wurde durch das Umwelt- und Nachbarschaftshaus unterstützt. Der hier vorliegende Zwischenbericht fasst erste Ergebnisse zusammen, die im Zeitraum von September 2017 bis Februar 2018 gesammelt wurden.

## **2 Messgeräte und Standortwahl**

Bei den eingesetzten Messgeräten handelt es sich um sogenannte Partikelgrößenpektrometer (SMPS, engl. Scanning Mobility Particle Sizer) der Fa. TSI GmbH (Modell 3938). Das SMPS-Gerät misst die Anzahlgrößenverteilung von luftgetragenen Partikeln in einem Größenbereich von ca. 10 nm bis 500 nm (Durchmesser). Dafür werden die Partikel in der Außenluft angesaugt, getrocknet und elektrisch geladen. Die aufgeladenen Partikel durchströmen ein elektrisches Feld, in dem sie je nach Größe unterschiedlich stark abgelenkt werden. Abhängig von der Stärke des elektrischen Feldes verlassen nur

die Partikel einer bestimmten Größe<sup>2</sup> das elektrische Feld durch einen Auslass und werden in einem Kondensationspartikelzähler (CPC, engl. Condensation Particle Counter; TSI GmbH, Modell 3772) gezählt. Durch schrittweise Variation der elektrischen Spannung wird das elektrische Feld so verändert, dass nach und nach unterschiedliche Partikelgrößen selektiert und kontinuierlich gezählt werden. In einem Durchlauf über ca. 5 min wird somit die Anzahlkonzentration, d.h. die Partikelanzahl pro Kubikzentimeter Luftvolumen ( $\#/cm^3$ ) in 108 Größenkanälen von ca. 10 nm bis 500 nm bestimmt. Anhand der Anzahlgrößenverteilung lässt sich ablesen, in welcher Menge (Anzahl pro Luftvolumen) die Partikel bestimmter Größen in der Luft vorhanden sind. Anhand der Form der Verteilung lassen sich Rückschlüsse auf dominierende Partikelquellen ziehen.

Addiert man die in den einzelnen Größenkanälen gemessenen Anzahlkonzentrationen über den gesamten Größenbereich, ergibt sich die Gesamtpartikelkonzentration (aller Partikel mit 10 nm bis 500 nm Durchmesser). Entsprechend lässt sich auch die Partikelkonzentration über ein bestimmtes Größenintervall bilden. Zum Beispiel ergibt sich die Konzentration der ultrafeinen Partikel aus der Summe der in den Größenkanälen von 10 nm bis 100 nm gemessenen Anzahlkonzentrationen.

Die vom HLNUG eingesetzte Messmethode zur Bestimmung der Anzahlgrößenverteilung ist seit mehr als 30 Jahren in der Forschung etabliert. Sie kommt jedoch erst seit einigen Jahren für Langzeitstudien zum Einsatz (z. B.: Asmi et al., 2011; Birmili et al., 2016). Da verschiedene Messgeräte existieren, die unterschiedliche Größenbereiche abdecken, ist ein Vergleich der Gesamtkonzentration der Partikel immer unter Betracht des Größenbereichs vorzunehmen.

Für die Luftmessnetze der Bundesländer ist diese Art der Messung überwiegend Neuland. Es bestehen bisher keine verbindlichen Vorgaben zur Vereinheitlichung der Messungen oder Vorschriften zur Qualitätssicherung. Im Rahmen der europäischen Normung (CEN) wurde inzwischen eine „Technische Spezifikation“ mit Anforderungen an Bau und Betrieb eines Partikelzählers (CPC) verfasst (CEN/TS 16976), die als Grundlage einer echten Normierung dienen kann. Ein ähnliches Dokument für Messsysteme zur Erfassung der Größenverteilung wird zurzeit erst erarbeitet. Um dennoch eine hohe Datenqualität zu gewährleisten, wurden die beiden vom HLNUG eingesetzten SMPS-Geräte in Kooperation mit dem Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) mit einem weiteren SMPS, das auf den Standard des Kalibrierlabors<sup>3</sup> des Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) rückführbar ist, verglichen. Die beiden SMPS-Geräte des HLNUG unterschieden sich untereinander nur

---

<sup>2</sup> Die Ablenkung der Partikel im elektrischen Feld ist genau genommen abhängig von der elektrischen Mobilität der Partikel, die wiederum von der Anzahl der Ladungen, die das Partikel trägt und seiner Größe abhängt.

<sup>3</sup> TROPOS beherbergt das Weltkalibrierzentrum für Aerosolphysik (WCCAP, engl.: World Calibration Center for Aerosol Physics), für die Qualitätssicherung von Partikelgrößenmessgeräten und Partikelzählern (siehe auch Wiedensohler et al., 2012).

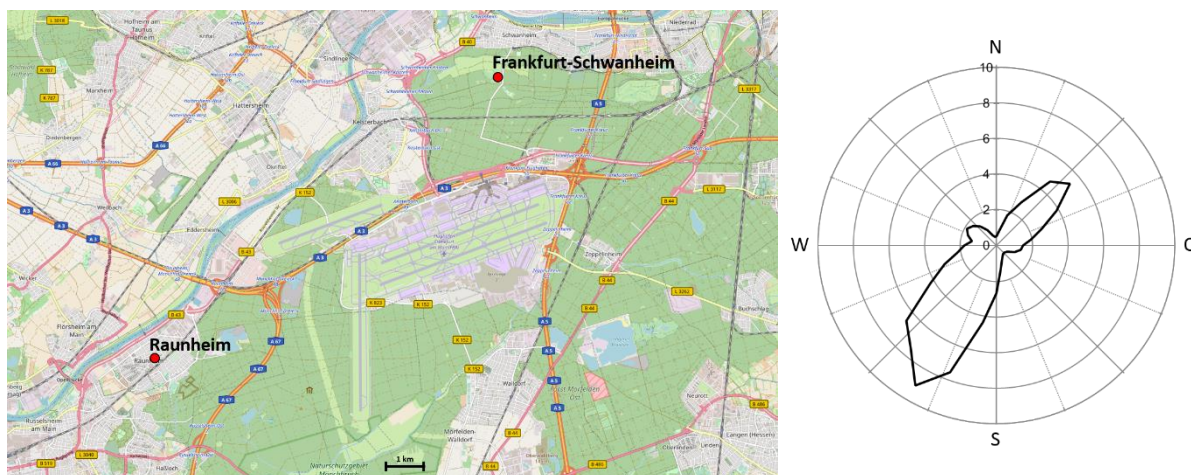


Abbildung 1. Lage der Messstationen „Raunheim“ und „Frankfurt-Schwanheim“ (Karte: OpenStreetMap) sowie Häufigkeit der Windrichtungen (in %) am Flughafen Frankfurt für das Jahr 2017 (Daten: Deutscher Wetterdienst). Der Wind weht hauptsächlich aus einer der beiden Hauptwindrichtungen, Süd-Südwest oder Nordost, wobei Süd-Südwest häufiger vorkommt als Nordost.

marginal. Bezogen auf das Referenzgerät ergab sich für beide Geräte eine Abweichung in der Partikelgröße von ca. +3,5 % und eine Abweichung in der Gesamtpartikelkonzentration von weniger als  $\pm 1\%$  (siehe Zwischenbericht des IUTA unter <https://www.hlnug.de/themen/luft/sonstige-berichte/ultrafeine-partikel.html>).

Als Einsatzorte für die SMPS-Geräte wurden die reguläre Messstation des hessischen Luftmessnetzes in Raunheim und ein zusätzlich aufgebauter Messcontainer in Frankfurt-Schwanheim ausgewählt (Abb. 1). Die Messstation in Raunheim liegt etwa 5 km südwestlich des Frankfurter Flughafens inmitten eines Wohngebiets. Die dortige Belastung mit Luftschadstoffen wie  $PM_{10}$ ,  $NO_2$ , etc. ist charakteristisch für städtischen Hintergrund. Die Messstation in Raunheim befindet sich in der Abluft des Flughafens, wenn der Wind aus etwa nordöstlichen Richtungen weht. Die Windrichtungen Nord-Nordost bis Ost-Nordost treten statistisch gesehen zu ca. 20% der Zeit auf. Läuft der Flughafenbetrieb in „Betriebsrichtung Ost“<sup>4</sup> überfliegen die Flugzeuge die Station ca. 250 m nördlich und ca. 250 m südlich beim Landeanflug auf die Centerbahn (07C) bzw. die Südbahn (07R). Die Flugzeuge befinden sich beim Überflug der Station auf etwa 500 m Höhe. Das SMPS-Gerät wird in Raunheim seit September 2017 betrieben.

Der Messcontainer in Frankfurt-Schwanheim liegt etwa 3 km nördlich des Flughafens Frankfurt auf einem Sportplatz am südwestlichen Rand der Stadt Frankfurt aber bereits im Frankfurter Stadtwald. Die nächstgelegene Straße liegt in ca. 100 m Entfernung und ist nur wenig befahren. Die Messstation in

---

<sup>4</sup> Die „Betriebsrichtung Ost“ wird vom Flughafen genutzt, wenn der Wind aus östlichen Richtungen weht. Dreht der Wind auf westliche Richtungen, wird die Standardbetriebsrichtung „Betriebsrichtung West“ eingestellt. In diesem Fall starten die Flugzeuge von der Center- und Südbahn Richtung Westen, überqueren die Messstation in Raunheim jedoch in größerer Entfernung.

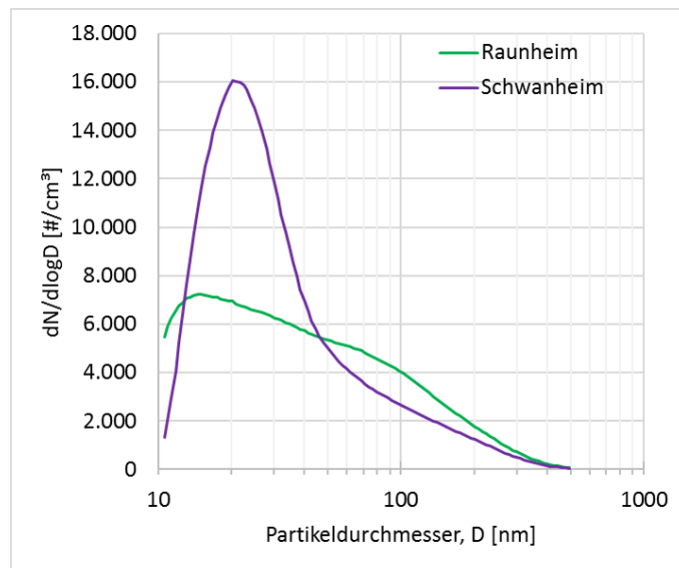


Abbildung 2. Mittlere Anzahlgrößenverteilung für Raunheim und Frankfurt-Schwanheim im Zeitraum 01.10.2017 bis 28.02.2018. Dargestellt ist die Anzahlkonzentration normiert auf die logarithmische Breite des jeweiligen Größenkanals ( $dN/d\log D$ ) aufgetragen über dem Partikeldurchmesser ( $D$ ).

Frankfurt-Schwanheim kann ebenfalls noch als charakteristisch für „städtischen Hintergrund“ bezeichnet werden, wobei aufgrund der größeren Entfernung zu bewohntem Gebiet und zu relevanten Quellen eine geringere Luftschadstoffbelastung als in Raunheim zu erwarten ist. Die Station befindet sich in der Abluft des Flughafens, wenn der Wind aus südwestlicher Richtung weht. Die Windrichtungen Süd bis West-Südwest treten statistisch gesehen zu ca. 45 % der Zeit auf. Überflüge treten in Schwanheim weder bei Betriebsrichtung Ost, noch West auf. Das SMPS-Gerät ist in Frankfurt-Schwanheim seit Oktober 2017 im Einsatz.

### 3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Größenverteilungsmessungen an den Standorten Raunheim und Frankfurt-Schwanheim vorgestellt, die im Zeitraum 01.09.2017 bis 28.02.2018 bzw. im Zeitraum 01.10.2017 bis 28.02.2018 gesammelt wurden. Für den Vergleich der beiden Stationen wurde als Mittelungszeitraum der gemeinsame Messzeitraum 01.10.2017 bis 28.02.2018 gewählt. Für die Untersuchung der Windrichtungsabhängigkeit, wurde der Mittelungszeitraum für Raunheim auf den vollständigen Messzeitraum (ab 01.09.2017) ausgeweitet.

#### 3.1 Anzahlgrößenverteilungen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim

Abbildung 2 zeigt die mittlere Anzahlgrößenverteilung der Partikel für die Station Raunheim und Frankfurt-Schwanheim. Im Größenbereich zwischen 10 nm und 70 nm ist die mittlere Größenverteilung in Raunheim relativ flach (d.h. kaum Konzentrationsunterschiede in diesem Größenbereich), für Partikel größer 70 nm nimmt die Konzentration stark mit der Größe ab. Die Gesamtkonzentration der Partikel

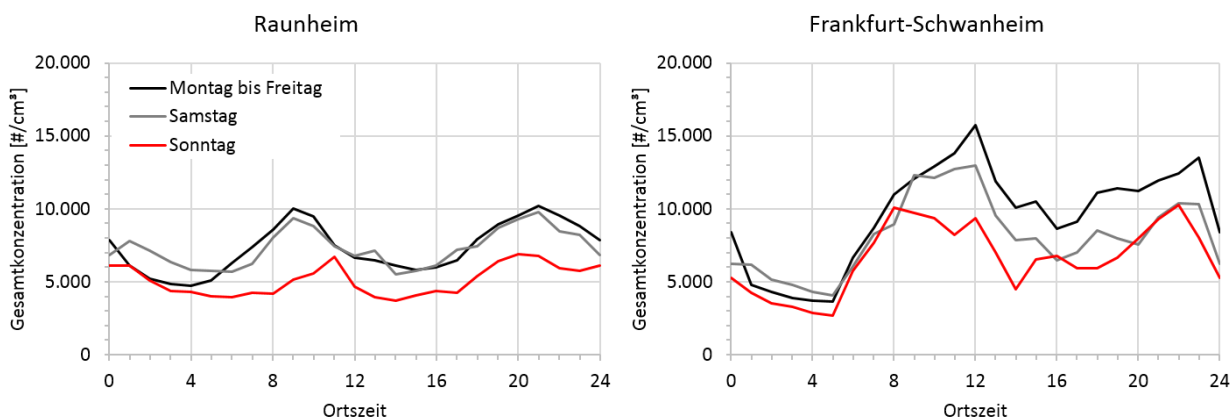


Abbildung 3. Tagesgang der Gesamtkonzentration der Partikel von 10 nm bis 500 nm für Raunheim und Frankfurt-Schwanheim. Die Gesamtkonzentration wurde dafür getrennt nach Wochentagen stundenweise im Zeitraum vom 01.10.2017 bis 28.02.2018 gemittelt.

liegt in Raunheim im Mittel bei 7.000 #/cm<sup>3</sup>, wovon die ultrafeinen Partikel etwa 85 % ausmachen. Die mittlere Anzahlgrößenverteilung in Frankfurt-Schwanheim dagegen weist eine völlig andere Form auf. Die Anzahlkonzentration der Partikel größer 50 nm ist niedriger als in Raunheim, aber die Partikel kleiner als 50 nm liegen in viel höherer Anzahl vor. Partikel mit 20 nm Durchmesser sind am häufigsten vertreten. Die Gesamtkonzentration der Partikel liegt in Frankfurt-Schwanheim im Mittel bei 8.900 #/cm<sup>3</sup>, wovon die ultrafeinen Partikel etwa 90 % ausmachen.

Die Größenverteilung für Partikel größer 50 nm ist an beiden Standorten typisch für städtischen Hintergrund (z.B. Costabile et al., 2009). Die Konzentrationen liegen in Schwanheim sogar vergleichsweise niedrig. Jedoch sind die hohen Konzentrationen für Partikel kleiner als 50 nm, insbesondere in Schwanheim, sehr untypisch für eine übliche städtische Hintergrundstation. Sie weisen auf eine starke lokale Partikelquelle hin. Solch hohe Konzentration wären erfahrungsgemäß zum Beispiel in stark straßenverkehrsbelasteten Situationen zu erwarten, jedoch läge in diesem Fall auch die Konzentration der Partikel größer 50 nm insgesamt höher.

### 3.2 Tagesgänge der Gesamtkonzentration der Partikel

In Abbildung 3 ist nun der Tagesgang für die Gesamtkonzentration der Partikel abhängig vom Wochentag dargestellt. In Raunheim lassen sich werktags zwei Maxima von 8:00 bis 9:00 Uhr und von 20:00 bis 21:00 Uhr mit Konzentrationen von ca. 10.000 #/cm<sup>3</sup> beobachten. Die Konzentrationsminima liegen mit ca. 5.000 #/cm<sup>3</sup> und 6.000 #/cm<sup>3</sup> um 4:00 Uhr bzw. 15:00 Uhr. An Sonntagen bleibt die Konzentration insgesamt auf einem niedrigeren Niveau. Sie steigt am Vormittag nur langsam und erreicht erst um 11:00 Uhr ein Maximum. Das Maximum am Abend wird etwa um 20:00 Uhr erreicht. Diese Form des Tagesgangs ist typisch für Luftschadstoffe, die ihre Quelle überwiegend im Kfz-Verkehr haben, wie zum Beispiel Stickstoffoxide, und ergibt sich aus einer Überlagerung der

Emissionen durch den Kfz-Verkehr und der natürlichen Durchmischung der unteren Luftschichten im Tagesverlauf, die entscheidend von der Stabilität der Atmosphäre und deren Änderung abhängt. Der Tagesgang der Gesamtkonzentration der Partikel in Schwanheim ist viel stärker ausgeprägt als in Raunheim. Wochentags steigt die Konzentration von ca.  $4.000 \text{ \#/cm}^3$  um 5:00 Uhr auf mehr als den vierfachen Wert bis zum Mittag, sinkt dann zum Nachmittag langsam ab, bildet ein erneutes Maximum in den späten Abendstunden und sinkt ab 23:00 Uhr innerhalb von zwei Stunden auf ein nächtliches Minimum von unter  $5.000 \text{ \#/cm}^3$  ab. An Samstagen und Sonntagen nimmt die Gesamtkonzentration den gleichen Verlauf mit etwas schwächer ausgeprägten Maxima. Der Tagesgang in Frankfurt-Schwanheim lässt damit eine nicht zu weit entfernte Partikelquelle vermuten, die zwischen 23:00 Uhr und 5:00 Uhr kaum oder nur in geringem Maße vorhanden ist und die sich am Wochenende ähnlich wie unter der Woche verhält. Der Flughafen Frankfurt könnte als Quelle für diese Partikel in Frage kommen, einerseits da aufgrund des Nachtflugverbots zwischen 23:00 und 5:00 Uhr kein bzw. kaum Flugbetrieb stattfindet und damit auch kaum Emissionen entstehen, andererseits da sich die Flugbewegungen und andere damit verbundenen Aktivitäten am Flughafen unter der Woche nur wenig von denen am Wochenende unterscheiden. Weitere Untersuchungen zum Beispiel zu saisonalen Schwankungen des Flugbetriebs und weitere Auswertungen zum Wochen- und Tagesgang werden noch erfolgen.

### 3.3 Windrichtungsabhängige Untersuchung der Partikeleigenschaften

Um die Möglichkeit des Flughafens als Quelle für ultrafeine Partikel näher zu untersuchen, wurde eine windrichtungsabhängige Auswertung vorgenommen. Dazu wurde die Windrose in acht Sektoren, d.h. in  $45^\circ$ -Abschnitte eingeteilt. Jede an der Messstation gemessene Anzahlgrößenverteilung wurde dem Windsektor zugeteilt, aus dem der Wind zum Zeitpunkt der Messung wehte<sup>5</sup>. Anschließend wurde über alle in einem Sektor gesammelten Anzahlgrößenverteilungen gemittelt. Diese Zuordnung wurde getrennt für alle Messungen am Tag (zwischen 5:00 und 23:00 Uhr) und in der Nacht (zwischen 23:00 und 5:00 Uhr) vorgenommen, so dass sich für jeden der acht Windsektoren eine mittlere Anzahlgrößenverteilung am Tag und eine in der Nacht ergibt. Die Darstellung dieser Ergebnisse für Raunheim und Frankfurt-Schwanheim befindet sich in Abb. 4 bzw. Abb. 5.

Weht der Wind in Raunheim aus Richtung Nordost oder Ost, weist die Anzahlgrößenverteilung tagsüber ein ausgeprägtes Maximum bei ca.  $12 \text{ nm}$  auf. Die Gesamtkonzentration liegt im Mittel bei ca.  $10.000 \text{ \#/cm}^3$ , wobei alleine die Partikel mit Größen von  $10 \text{ nm}$  bis  $30 \text{ nm}$  ca.  $65\%$  der Gesamtkonzentration ausmachen. In der Nacht ist die Anzahlkonzentration dieser kleinen Partikel sehr gering und die Gesamtkonzentration sinkt im Mittel auf  $5.000 \text{ \#/cm}^3$  bei NO-Wind und  $2.300 \text{ \#/cm}^3$  bei Ostwind.

---

<sup>5</sup> In die Berechnung gingen nur Zeiten ein, in denen der Wind mit einer Geschwindigkeit von mindestens  $1 \text{ m/s}$  wehte, da die Bestimmung der Windrichtung bei geringerer Windgeschwindigkeit ungenau ist.

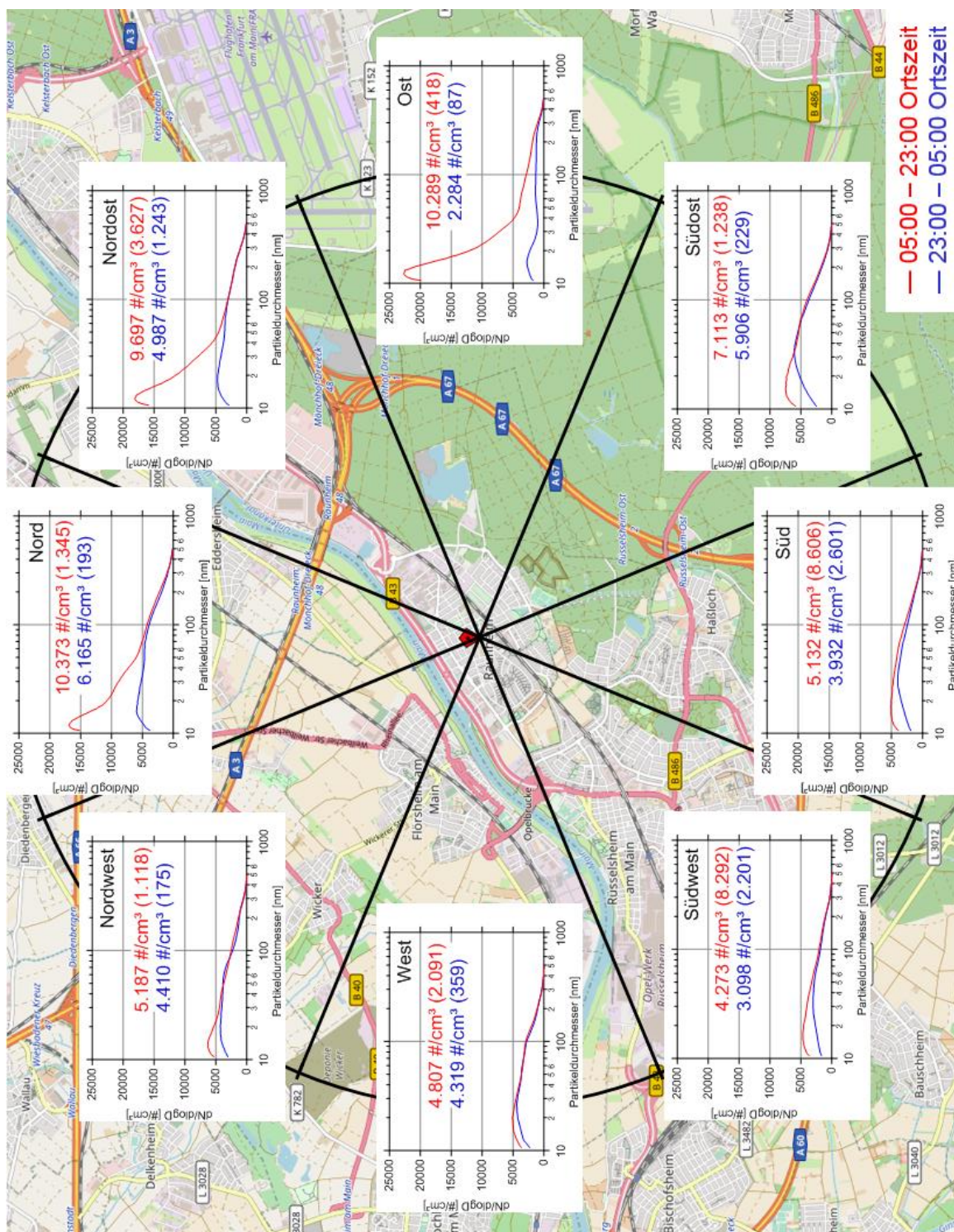


Abbildung 4. Windrichtungsabhängige Auswertung der Anzahlgrößenverteilung in Raunheim (Karte: OpenStreetMap). Dargestellt ist jeweils die mittlere Anzahlgrößenverteilung am Tag (rot) und in der Nacht (blau) für Zeiten aus denen der Wind aus dem angegebenen Sektor wehte. Der Mittelungszeitraum ist 01.09.2017 bis 28.02.2018. Die roten und blauen Werte in den Diagrammen geben die mittlere Gesamtkonzentration der Partikel (in Anzahl pro Kubikzentimeter) tagsüber bzw. nachts an. Die Werte in Klammern benennen die Anzahl der Größenverteilungen, die dem jeweiligen Mittelwert zugrunde liegen. Die Achsenskalierung ist in allen Diagrammen identisch, um eine gute Vergleichbarkeit der Kurven zu ermöglichen.

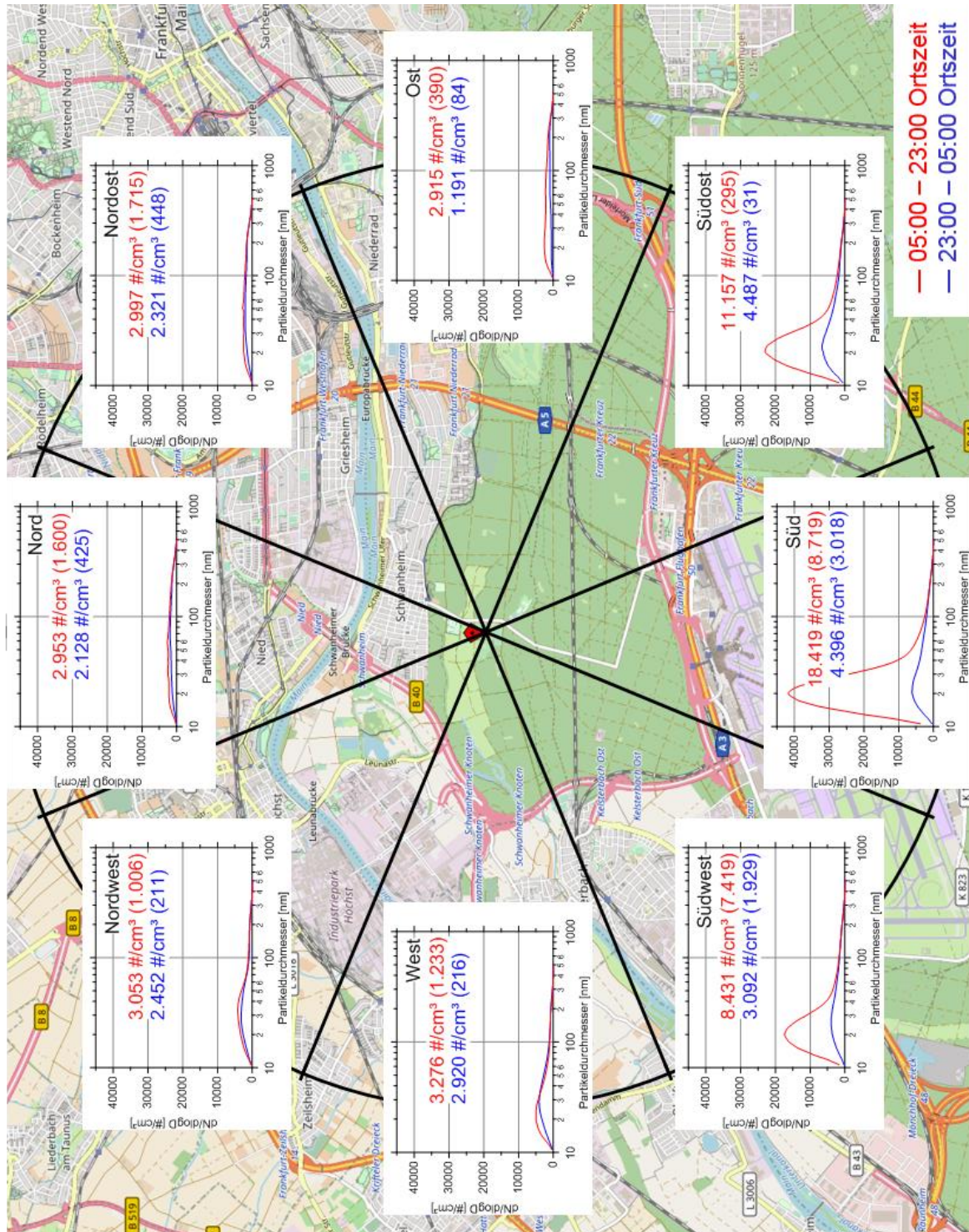


Abbildung 5. Windrichtungsabhängige Auswertung der Anzahlgrößenverteilung in Frankfurt-Schwanheim (Karte: OpenStreetMap). Der Mittelungszeitraum ist 01.10.2017 bis 28.02.2018. Die Beschriftung ist wie in Abb.4.



Weht der Wind in Raunheim aus Richtung Nord, ist die Anzahlkonzentration der 10 nm bis 30 nm Partikel tagsüber ebenfalls stark erhöht, aber die Anzahlgrößenverteilung ist in wesentlich breiter als bei Wind aus NO oder O. In der Nacht nimmt die Konzentration der Partikel kleiner 100 nm deutlich ab.

Weht der Wind in Raunheim aus südlichen bis westlichen Richtungen (SO, S, SW, W, NW), sind die Tag-Nacht-Unterschiede in der mittleren Anzahlgrößenverteilung weitaus geringer als bei anderen Richtungen. Die Verteilung ist relativ flach und weist kein ausgeprägtes Maximum bei sehr kleinen Partikeln auf. Die Gesamtkonzentration liegt tagsüber im Mittel bei 4.300 #/cm<sup>3</sup> bis 5.200 #/cm<sup>3</sup> und nur bei Wind aus Südost etwas höher bei ca. 7.100 #/cm<sup>3</sup>. Nachts ist die Gesamtkonzentration etwa 10 – 30 % niedriger als am Tag.

In Frankfurt-Schwanheim ist ebenfalls eine je nach Windrichtung und Tageszeit sehr unterschiedliche Anzahlgrößenverteilung zu beobachten. Weht der Wind an der Station Frankfurt-Schwanheim aus südlichen Richtungen (SO, S, SW), weist die Anzahlgrößenverteilung tagsüber ein ausgeprägtes Maximum bei 20 nm Partikeln auf. Bei Wind aus Süd liegt die Gesamtkonzentration im Mittel bei ca. 18.000 #/cm<sup>3</sup>, wobei alleine die Partikel mit Größen von 10 nm bis 30 nm ca. 75 % der Gesamtkonzentration ausmachen. Dreht der Wind auf SW oder SO, nimmt die Gesamtkonzentration zwar ab, der große Anteil (ca. 70 %) dieser sehr kleinen Partikel bleibt jedoch bestehen. In der Nacht sinkt die Konzentration der kleinen Partikel bei Südwind sehr stark, was zu einer Abnahme der Gesamtkonzentration um ca. 75 % führt.

Weht der Wind in Frankfurt-Schwanheim aus einer der anderen Windrichtungen (W, NW, N, NO, O), ist die Anzahlgrößenverteilung flach und unterscheidet sich in ihrer Form nur geringfügig zwischen Tag und Nacht. Die Gesamtkonzentration liegt dann am Tag bei 2.900 #/cm<sup>3</sup> bis 3.300 #/cm<sup>3</sup> und in der Nacht bei 1.200 #/cm<sup>3</sup> bis 2.900 #/cm<sup>3</sup>.

## **4 Der Frankfurter Flughafen als Quelle für ultrafeine Partikel?**

Die bisher vorgestellten Ergebnisse zeigen einerseits Partikeleigenschaften, die typisch für städtische Immissionen sind (z. B. Höhe der Gesamtkonzentration der Partikel, Form der Größenverteilung oder Tagesgang der Gesamtkonzentration in Raunheim), jedoch konnten insbesondere am Standort Frankfurt-Schwanheim Merkmale festgestellt werden, die eher auf eine andere Partikelquelle als städtische Emissionen schließen lassen.

Ob der Flughafen Frankfurt eine bedeutende Quelle für ultrafeine Partikel darstellt, wird im Folgenden diskutiert.

Die windrichtungsabhängige Analyse der Messdaten (Abb. 4 und 5) zeigt, dass die Anzahlgrößenverteilung der Partikel an beiden untersuchten Standorten tagsüber jeweils bei Wind grob aus Richtung des Flughafens ein markantes Maximum bei einer Partikelgröße von ca. 10 nm bis 20 nm aufweist. Die Gesamtkonzentration der Partikel ist dann im Mittel um den Faktor 6 in Frankfurt-Schwanheim und um

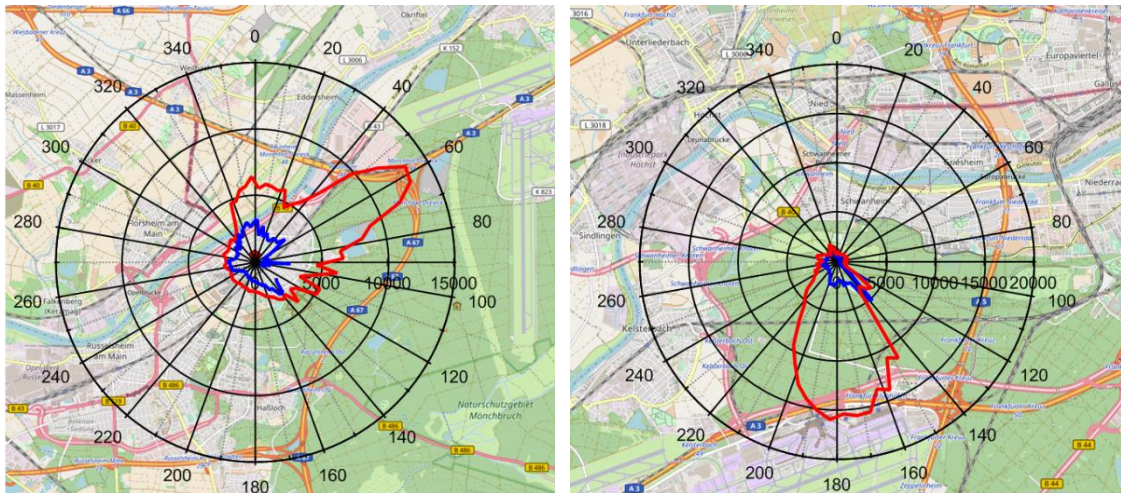


Abbildung 6. Windrichtungsabhängige Auswertung der Gesamtkonzentration aller Partikel mit 10 nm bis 30 nm im Durchmesser in Raunheim (links) und Frankfurt-Schwanheim (rechts) (Karte: OpenStreetMap). Dargestellt ist jeweils die mittlere Anzahlkonzentration am Tag (rot) und in der Nacht (blau) für Zeiten aus denen der Wind aus der angegebenen Richtung (in 5°-Schritten) wehte. Die Achsenskalierung ist in Partikel pro cm<sup>3</sup> gegeben. Datenlücken treten auf, wenn im Mittelungszeitraum kein Wind aus der angegebenen Richtung wehte.

den Faktor 2 in Raunheim erhöht gegenüber Zeiten mit Wind aus anderen Richtungen. Die Partikel mit einer Größe von 10 nm bis 30 nm machen in diesen Fällen einen Anteil von im Mittel ca. 70 % an der Gesamtkonzentration aus. Die hohen Konzentrationen und der schmale Größenbereich dieser Partikel sprechen für eine starke, relativ lokale Quelle. Anhand der hier durchgeführten Messungen kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, welche chemische Zusammensetzung die Partikel haben.

Abbildung 6 gibt eine detailliertere Darstellung der Windrichtungsabhängigkeit (in 5°-Schritten) für die Konzentration der 10 – 30 nm Partikel wieder. Sie zeigt, dass die höchsten Konzentrationen jeweils bei Wind aus einem schmalen Sektor auftreten, in Raunheim bei Wind aus 45° bis 80° (Nordost bis Ost-Nordost) und in Frankfurt-Schwanheim bei Wind aus 145° bis 210° (Süd). Der Flughafen Frankfurt (und speziell das Vorfeld von Terminal 1 und 2) liegt jeweils genau in diesem Sektor, was auf ihn als eine mögliche Quelle für UFP hinweist. Insbesondere in Schwanheim ist der Windsektor mit hoher Partikelkonzentration scharf abgegrenzt. Das heißt, tritt der Wind nur leicht aus dem Sektor 145° bis 210° heraus, nimmt die Konzentration der 10 – 30 nm Partikel rapide ab. Abbildung 6 lässt somit annehmen, dass zumindest in Schwanheim der Autobahn-Verkehr nicht als hauptsächliche Partikelquelle in Frage kommt, da die Station bei Wind aus den Richtungen, bei denen sie in der Abluft der nahegelegenen Autobahnen A5 und A3 liegt, sehr geringe Partikelkonzentrationen aufweist.

In Raunheim ist die windabhängige Konzentrationsdarstellung (Abb. 6) nicht ganz so eindeutig. Dort ist die Partikelkonzentration der Partikel mit 10 nm bis 30 nm Durchmesser auch außerhalb des Sektors 45° bis 80° leicht erhöht, z. B. bei 340° bis 20° (Nord) und bei 80° bis 135° (Ost), wo die Autobahnen A3 bzw. A67 jeweils in ca. 2,5 km Entfernung liegen. Es ist aber zu bedenken, dass die Station Raunheim

durch ihre Lage im Wohngebiet auch durch den städtischen Kfz-Verkehr beeinflusst ist, der möglicherweise andere, weiter entfernte Partikelquellen überlagert.

Wie in Abb. 6 zu sehen, treten die erhöhten Konzentrationen der Partikel von 10 nm bis 30 nm nur tagsüber auf. Dies lässt vermuten, dass die Emission dieser Partikel nachts stark reduziert ist bzw. vollständig zum Erliegen kommt. Der Flughafen als Partikelquelle rückt somit weiter in den Fokus, da infolge des Nachtflugverbots zwischen 23:00 und 5:00 Uhr kaum Emissionen zu erwarten sind.

Ein weiterer Hinweis darauf, dass der Flughafen Frankfurt eine Quelle für ultrafeine Partikel darstellt, sind die bereits in Abb. 3 gezeigten Tagesgänge. Der Tagesgang der Gesamtkonzentration der Partikel an der Station Raunheim, die nicht so ausgeprägt deutlich wie Schwanheim in der Abluft des Flughafens liegt und bei der auch andere Quellen eine größere potentielle Rolle spielen, ähnelt dem verkehrstypischer Schadstoffe, wie  $\text{NO}_2$  und  $\text{PM}_{10}$ . Dahingegen weist der Tagesgang der Gesamtkonzentration der Partikel an der Station Frankfurt-Schwanheim, die die meiste Zeit in der Abluft des Flughafens liegt, eine andere Form auf: an allen Tagen der Woche ein Maximum um 12:00 Uhr und um 22:00 bis 23:00 Uhr sowie ein starker Anstieg der Konzentration um 5:00 Uhr und Abfall um 23:00 Uhr. Dies spiegelt eher die hauptsächliche Betriebszeit des Flughafens wider und ist nicht typisch für Kfz-Verkehr.

Eine derzeit noch bestehende Schwäche bei der Interpretation der Messdaten ist, dass der bisher untersuchte Zeitraum hauptsächlich geprägt war durch Wind aus südwestlichen Richtungen. Die Daten mit Wind aus östlichen Richtungen sind deshalb unterrepräsentiert und die daraus gebildeten Mittelwerte, wie in Abb. 4, 5 und 6 gezeigt, nicht so robust wie die aus den anderen Windrichtungen. Die statistische Sicherheit der Aussagen wird sich aber mit zunehmender Dauer der Untersuchung verbessern.

Anzumerken ist nach wie vor, dass der Kfz-Verkehr auf den zahlreichen und sehr stark befahrenen Autobahnen und anderen Straßen im Umfeld des Flughafens nicht gänzlich als Quelle für die ultrafeinen Partikel ausgeschlossen werden kann. Jedoch sprechen der Tagesgang (scharfer Anstieg und Abfall der Konzentration) sowie der scharfe Abfall der Konzentration, sobald der Wind leicht aus dem Sektor „Flughafen“ herausdreht, dafür, dass die Emissionen aus dieser Quelle den dominierenden Beitrag zur Immissionsbelastung durch ultrafeine Partikel – zumindest an der Messstelle Frankfurt-Schwanheim – leisten.

## **5 Fazit und Ausblick**

Die bisherigen Messungen (September 2017 bis Februar 2018) der Anzahlgrößenverteilung der Partikel an den Messstationen Raunheim und Frankfurt-Schwanheim legen den Schluss nahe, dass der Flughafen Frankfurt eine bedeutsame Bodenquelle für ultrafeine Partikel ist. Dies ergibt sich einerseits aus der ausgeprägten Windrichtungsabhängigkeit der UFP-Konzentration und andererseits aus ihrem Tages- und Wochengang, der offenbar eng mit der hauptsächlichen Betriebszeit des Flughafens korreliert ist.

Weitere Untersuchungen werden folgen. Die Tendenz zu erhöhten Konzentrationen bei Wind aus Richtung Flughafen wurde bereits bei früheren Messungen der Gesamtkonzentration (3 nm bis 1 µm, mit Partikelzähler gemessen) in Raunheim beobachtet. Die neuen, größenauflösenden Messungen bestätigen diesen Befund beindruckend und ergänzen ihn mit der wichtigen Information, dass die erhöhten Konzentrationen von kleinsten ultrafeinen Partikeln (10 nm – 30 nm) dominiert werden. Anhand der hier durchgeführten Messungen kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, welche chemische Zusammensetzung die Partikel haben. Die Messergebnisse bestätigen auch die Ergebnisse von anderen internationalen wissenschaftlichen Studien, die ebenfalls stark erhöhte Konzentrationen von Partikeln mit 10 nm – 30 nm Größe in der Abluft von Großflughäfen gefunden haben.

Das Auftreten der UFP ist nach den derzeitigen Erkenntnissen durch bodennahen Transport geprägt, das heißt durch die Emissionen, die beim Betrieb auf dem Flughafengelände entstehen. Das HLNUG wird die Messungen der Anzahlgrößenverteilungen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim fortführen. Es soll demnächst noch ein weiteres SMPS-Gerät in einer mobilen Messstation betrieben werden, für die noch kein konkreter Standort ausgewählt ist. Ziel ist es, unter anderem, den Einfluss des Flugverkehrs besser von dem des Kfz-Verkehrs, oder anderer Quellen, differenzieren zu können. Auch sollen die räumlichen Unterschiede der Immissionsbelastung durch ultrafeine Partikel im Laufe der Zeit besser erfasst werden. Unter anderem werden folgende Untersuchungen in Betracht gezogen:

- Messungen auf dem Flughafengelände selbst
- Flughafennahe Messungen, deren Lage eine bessere Differenzierung in Bezug auf den Straßenverkehr erlauben
- Messungen/Untersuchungen mit dem Ziel, den Einfluss von Überflügen in der Umgebung von Flughäfen noch weitergehend zu erforschen
- Bestimmung der chemischen Zusammensetzung
- Messungen in anderen, charakteristischen Belastungssituationen, bspw. an großen Straßen, im städtischen Hintergrund, in der Nähe anderer potentieller Quellen (z. Bsp. Industrie/Gewerbe) oder auch im ländlichen/regionalen Hintergrund

## **Danksagung**

Dem Umwelt- und Nachbarschaftshaus wird gedankt für die finanzielle Unterstützung sowohl beim Betrieb der Luftmessstation für die Beurteilung der Luftqualität rund um den Flughafen (vier Messperioden für jeweils ein Jahr in der Zeit von 2012 bis 2017), als auch für die Anschaffung eines SMPS für die Messung der Größenverteilung der UFP.

Dem Umweltbundesamt, Außenstelle Langen, wird gedankt für die kooperative Zusammenarbeit und die Bereitstellung des Partikelzählers zur Messung der Gesamtpartikelanzahlkonzentration an der Luftmessstation Raunheim seit September 2015.

## Literaturangaben

Asmi, A., Wiedensohler, A., Laj, P., Fjaeraa, A.-M., Sellegri, K., Birmili, W., Weingartner, E., Baltensperger, U., Zdimal, V., Zikova, N., Putaud, J.-P., Marinoni, A., Tunved, P., Hansson, H.-C., Fiebig, M., Kivekäs, N., Lihavainen, H., Asmi, E., Ulevicius, V., Aalto, P. P., Swietlicki, E., Kristensson, A., Mihalopoulos, N., Kalivitis, N., Kalapov, I., Kiss, G., de Leeuw, G., Henzing, B., Harrison, R. M., Beddows, D., O'Dowd, C., Jennings, S. G., Flentje, H., Weinhold, K., Meinhardt, F., Ries, L., and Kulmala, M. (2011): Number size distributions and seasonality of submicron particles in Europe 2008–2009. – *Atmos. Chem. Phys.*, **11**: 5505–5538.

Birmili, W., Ruckerl, R., Hoffmann, B., Weinmayr, G., Schins, R., Kuhlbusch, T. A. J., Vogel, A., Weber, K., Franck, U., Cyrys, J. & Peters, A. (2014): Ultrafeine Partikel in der Außenluft: Perspektiven zur Aufklärung ihrer Gesundheitseffekte. – *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, **74**, Nr. 11/12: 492–500.

Birmili, W., Weinhold, K., Rasch, F., Sonntag, A., Sun, J., Merkel, M., Wiedensohler, A., Bastian, S., Schladitz, A., Löschau, G., Cyrys, 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. (2016): 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.

Costabile, F., Birmili, W., Klose, S., Tuch, T., Wehner, B., Wiedensohler, A., Franck, U., König, K. & Sonntag, A. (2009): Spatio-temporal variability and principal components of the particle number size distribution in an urban atmosphere. – *Atmos. Chem. Phys.*, **9**: 3163–3195.

Fraport AG (2017): Frankfurt Airport Luftverkehrsstatistik 2016. [<https://www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/verkehrszahlen/luftverkehrsstatistik/luftverkehrsstatistik-2016-/jcr:content.file/statistischer-jahresbericht-2016-3.pdf>; Stand: 02.03.2018].

Hudda, N., Gould, T., Hartin, K., Larson, T.V. & Fruin, S.A. (2014): Emissions from an International Airport Increase Particle Number Concentrations 4-fold at 10 km Downwind. – *Environ. Sci. Technol.*, **48**: 6628–6635.

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). – *Atmos. Environ.*, **104**: 132–142.

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. & Nowak, A. (2018): Mobility particle size spectrometers: Calibration procedures and measurement uncertainties. – *Aerosol Science and Technology*, **52**: 146–164.

## Begriffserläuterungen

### Ultrafeine Partikel (UFP)

Ultrafeine Partikel bezeichnen alle luftgetragenen Teilchen mit einem Durchmesser unter 100 Nanometern. Diese tragen auch bei hoher Anzahl aufgrund ihrer geringen Größe kaum zur Partikelmasse und damit zu den als Partikelmassenkonzentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) definierten Größen  $\text{PM}_{10}$  oder  $\text{PM}_{2,5}$  bei. UFP stehen im Verdacht besonders gesundheitsschädlich zu sein, da sie aufgrund ihrer geringen Größe sehr lungengängig sind. Jedoch existiert bisher keine ausreichende Anzahl an epidemiologischen Studien, die die Gesundheitseffekte von UFP quantifizieren. Für die Anzahlkonzentration der ultrafeinen Partikel existieren daher bisher weder wirkungsbezogene Beurteilungswerte, noch ist sie gesetzlich reguliert.

### Anzahlgrößenverteilung der Partikel

Die Anzahlgrößenverteilung der Partikel beschreibt, wie viele Partikel welches Durchmessers ( $D$ ) pro Luftvolumen enthalten sind. Aus messtechnischen Gründen wird die Anzahlgrößenverteilung in der Regel als Partikelkonzentration ( $N$ ) normiert auf die logarithmische Breite des jeweiligen Größenkanals bzw. Durchmesserintervalls angegeben ( $dN/d\log D$ ). Da die Anzahlgrößenverteilung einer logarithmischen Normalverteilung ähnelt und sich über einen Durchmesserbereich von mehreren Größenordnungen erstreckt, erfolgt die Darstellung über einer logarithmisch skalierten Achse für den Partikeldurchmesser.

### Gesamtkonzentration der Partikel

Die Gesamtkonzentration der Partikel gibt an, wie viele Partikel jeglicher Größe sich insgesamt in einem Luftvolumen befinden (Einheit: Anzahl der Partikel pro Kubikzentimeter Luft,  $\#/\text{cm}^3$ ). Die Gesamtkonzentration kann von einem Partikelzähler direkt gemessen werden oder ergibt sich als Summe der Partikelkonzentration, die von einem Größenspektrometer (z. B. das hier verwendete SMPS-Gerät) über alle gemessenen Partikelgrößen detektiert wurde. Da verschiedene Messgeräte unterschiedliche Partikelgrößenbereiche abdecken und sich die Partikelkonzentration stark mit der Partikelgröße ändert, muss beim Vergleich von Werten immer darauf geachtet werden, auf welchen Größenbereich sie sich beziehen.

### Größenspektrometer

Ein Größenspektrometer ist ein Messgerät, mit dem die Anzahlgrößenverteilung von Partikeln in der Luft gemessen wird. Vom HLNUG wurden bisher zwei SMPS-Geräte eingesetzt (SMPS, engl: Scanning Mobility Particle Sizer).

### SMPS, engl: Scanning Mobility Particle Sizer

Ein SMPS ist ein Messsystem, mit dem die Anzahlgrößenverteilung von Partikeln in der Luft gemessen werden kann. Dafür werden die Partikel in der Außenluft angesaugt, getrocknet und elektrisch geladen. Die aufgeladenen Partikel durchströmen ein elektrisches Feld, in dem sie je nach Größe (bzw. genauer: ihrer elektrischen Mobilität) unterschiedlich stark abgelenkt werden. Abhängig von der Stärke des elektrischen Feldes verlassen nur die Partikel einer bestimmten Größe bzw. Größenintervalls das elektrische Feld durch einen Auslass und werden schließlich mit einem Partikelzähler gezählt. Durch schrittweise Variation der elektrischen Spannung wird das elektrische Feld so verändert, dass nach und nach unterschiedliche Partikelgrößen selektiert und kontinuierlich gezählt werden. Somit ergibt sich die Anzahlgrößenverteilung. Die vom HLNUG eingesetzten Geräte messen in einem Größenbereich von etwa 10 nm bis 500 nm.

## Korrigendum

In der Version vom 30.05.2018 des 1. Zwischenberichts befand sich ein Fehler in Abbildung 3:

Beim Tagesgang in Frankfurt-Schwanheim wurde die Linienfarbe für Samstag und Sonntag vertauscht. Die hier vorliegende Version vom 19.06.2018 beinhaltet die korrigierte Abbildung 3.