



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

Diana Rose, Stefan Jacobi

Wiesbaden, den 20.08.2019



## Zusammenfassung

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) untersucht seit einiger Zeit, wie hoch die Ultrafeinstaubbelastung im Umfeld des Flughafens Frankfurt ist und inwiefern der Flugbetrieb als Quelle für ultrafeine Partikel in Frage kommt. Als ultrafeine Partikel (UFP) beziehungsweise Ultrafeinstaub werden alle Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 100 Nanometer (nm) bezeichnet.

Der 2018 veröffentlichte erste Zwischenbericht beinhaltete deutliche Hinweise darauf, dass das Gelände des Flughafens offenbar eine bedeutende Quelle für UFP in der Umgebung ist. Emissionen, die beim Betrieb auf dem Flughafengelände bodennah freigesetzt werden, z.B. von Flugzeugtriebwerken bei der Abfertigung sowie beim Starten, Landen, Rollen, etc., werden mit dem Wind in die Umgebung transportiert und führen dort zu stark erhöhten Konzentrationen an UFP während der Betriebszeiten des Flughafens. Seit der Veröffentlichung des ersten Zwischenberichts hat das HLNUG seine Messungen weiter intensiviert. Die weitergeführten Messungen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim, die neu begonnenen kontinuierlichen Messungen in unmittelbarer Nähe des Flughafengeländes (Frankfurt-Flughafen-A3) und in Frankfurt-Sachsenhausen sowie zahlreiche Kurzzeitmessungen an verschiedenen Standorten unterhalb der Anfluglinien nahe des Flughafens bestätigen die Ergebnisse des ersten Zwischenberichts und liefern weitere wichtige Erkenntnisse:

- Die höchste mittlere Anzahlkonzentration tritt am Standort Frankfurt-Flughafen-A3 auf (33000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ). Sie liegt dort bezogen auf denselben Größenbereich (10 – 500 nm) etwa viermal so hoch wie in Frankfurt-Schwanheim (7900 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ) oder Raunheim (8600 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ). An diesen Standorten ist im Mittel mindestens die Hälfte der Partikel kleiner als 30 nm. Die mittleren Konzentrationen am Standort in Frankfurt-Sachsenhausen sind vergleichbar mit denen in Raunheim oder Frankfurt-Schwanheim, weisen aber aufgrund des abweichenden Messbereichs etwas höhere Werte auf (9700 Partikel pro  $\text{cm}^3$ , im Größenbereich 7 nm – 2,2  $\mu\text{m}$ ).
- Die Messwerte weisen eine sehr hohe zeitliche Variabilität auf, selbst einzelne Monatsmittelwerte unterscheiden sich sehr stark.
- An allen Standorten treten bei Wind aus Richtung des Flughafens 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.

- An allen Standorten tritt bei Wind aus Richtung des Flughafens ein markanter Tagesgang der Partikelkonzentration auf. An allen Wochentagen steigt die Konzentration kurz nach 5 Uhr innerhalb einer Stunde auf ein Vielfaches des nächtlichen Wertes, bleibt den ganzen Tag auf einem hohen Niveau und fällt gegen 23 Uhr schnell wieder auf das nächtliche Minimum zurück. Dieser Verlauf ähnelt den Betriebszeiten des Flughafens.
- Der Standort Frankfurt-Flughafen-A3 zeigt, dass an diesem Ort, in unmittelbarer Nähe des Flughafens, ein Beitrag an ultrafeinen Partikeln von der 100 m entfernten Autobahn im Vergleich zum Beitrag vom Flughafengelände als nur sehr gering einzuschätzen ist.
- An allen Standorten treten bei Wind aus der Richtung, in der sich Flugzeuge im Landeanflug auf den Flughafen befinden, im Mittel signifikant höhere Partikelkonzentrationen als im Hintergrund auf. Diese sind jedoch in Raunheim und Frankfurt-Sachsenhausen ca. 30 – 40 % und an den Standorten Flughafen-A3 und Schwanheim mehr als 60 % niedriger als die Konzentrationen bei Wind direkt aus Richtung des Flughafengeländes. In Raunheim und Frankfurt-Sachsenhausen tritt bei dieser Windrichtung ebenfalls ein markanter Tagesgang mit starkem Anstieg um kurz nach 5 Uhr und schnellem Abfall gegen 23 Uhr auf, dieser ist jedoch schwächer ausgeprägt, als bei Wind aus Richtung des Flughafengeländes.
- Die Kurzzeitmessungen an zahlreichen Standorten unterhalb der Anfluglinien deuten darauf hin, dass kein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen Überflugereignissen und Konzentrationsspitzen besteht, auch nicht in geringem Abstand zum Flughafen, d.h. bei geringen Überflughöhen (weniger als 100 m über Grund). Nur an einem Standort folgte bei einer Messung – unter bestimmten Bedingungen – auf fast jeden Überflug mit etwas Verzögerung ein kurzzeitiger, starker Anstieg der Partikelkonzentration. An den anderen Standorten traten zwar Konzentrationsspitzen auf, diese konnten jedoch nicht eindeutig auf einzelne Überflugereignisse zurückgeführt werden. Der Frage, inwiefern sich einzelne Überflugereignisse direkt auf die UFP-Konzentration am Boden auswirken, wird weiter nachgegangen werden.
- Auch an den kontinuierlichen Messstationen Raunheim und Frankfurt-Sachsenhausen, die sich beide fast senkrecht unterhalb der Anfluglinie befinden, lässt sich anhand der bislang vorgenommenen Auswertungen keine Kausalität zwischen einzelnen Überflugereignissen und kurzzeitigen Konzentrationsspitzen am Boden nachweisen. Die Ergebnisse an den beiden Standorten weisen jedoch darauf hin, dass die Gesamtheit der Anflüge unterhalb einer bestimmten Flughöhe einen Beitrag zu einer generellen Erhöhung der UFP-Konzentration am Boden leistet.

Diese Befunde zeigen, dass der Flugbetrieb eine bedeutende Quelle für ultrafeine Partikel darstellt, die zu erhöhten Konzentrationen in der Umgebung führt. Das Gebiet, auf dem ultrafeine Partikel aus Flugzeugtriebwerken freigesetzt werden, die dann auch Auswirkungen auf die bodennahen UFP-Konzentrationen haben können, beschränkt sich nicht nur auf das Flughafengelände selbst, sondern erstreckt sich auch entlang der Anfluglinien, nach erster Schätzung bis zu einem Abstand von etwa 7-8 km vom Aufsetzpunkt. Auf dieser Fläche werden große Mengen an UFP entweder bodennah emittiert (auf dem Flughafengelände) oder auf geringen Flughöhen (unterhalb etwa 400 m), die anschließend auch von Wirbelschleppen zum Boden verfrachtet werden können (entlang der Anflugkorridore). Mit dem Wind werden sie dann in die Umgebung transportiert, so dass dort bodennah signifikant erhöhte Konzentrationen gemessen werden können. So sind nach bisheriger Erkenntnislage nicht die Gebiete von erhöhten UFP-Konzentrationen betroffen, die direkt unterhalb der Einflugschneisen liegen, sondern vielmehr die Regionen, die sich in der Abluft des Flughafens inklusive der Anflugkorridore unterhalb einer Flughöhe von ca. 400 m befinden. Dabei sind die Beiträge an ultrafeinen Partikeln, die direkt vom Flughafengelände ausgehen, größer als die, die von den Anflugkorridoren ausgehen. Aufgrund der beiden Hauptwindrichtungen Süd-Südwest sowie Nordost, sind somit vor allem das Stadtgebiet Frankfurt sowie Gemeinden südwestlich des Flughafens (z.B. Kreis Groß-Gerau) von erhöhten UFP-Konzentrationen durch den Flugbetrieb betroffen. Inwiefern auch Abflüge die bodennahe UFP-Konzentration beeinflussen, kann mit den bisherigen Messungen nicht geklärt werden, auch dieser Frage wird weiter nachgegangen werden.

Das HLNUG wird die Messungen ultrafeiner Partikel fortsetzen und auch erweitern. Dazu sind bereits drei neue Standorte in Frankfurt-Oberrad, Frankfurt-Flughafen-Ost, Frankfurt-Niedwald eingerichtet worden bzw. in Planung (Raunheim-Mönchhof). Es soll damit untersucht werden, bis zu welcher Entfernung vom Flughafen sich der Einfluss des Flugbetriebs in den UFP-Konzentrationen am Boden widerspiegelt. Außerdem soll der Beitrag durch An- und Abflüge besser quantifiziert werden. Zukünftig sind auch noch Messungen an weiteren Standorten in Erwägung zu ziehen. Diese sollen sich an der wachsenden Erkenntnislage orientieren und das Ziel haben, möglichst umfassende und räumlich differenzierte Informationen über Zusammenhänge zwischen Flugbetrieb in der Luft, Bodenbetrieb und UFP-Immissionen zu erhalten.

Ultrafeine Partikel sind aufgrund ihrer geringen Größe besonders lungengängig. In welchem Ausmaß gesundheitliche Risiken von Ultrafeinstäuben ausgehen, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausreichend beurteilt werden, da es u.a. noch an epidemiologischen Studien mangelt, anhand derer man die Gesundheitseffekte von UFP belegen und quantifizieren könnte. Die vorliegenden

Messergebnisse und fortlaufend weiter erfolgende Messungen ermöglichen, dass nun solche Wirkungszusammenhänge umfassend wissenschaftlich untersucht werden können.

Die Messungen ultrafeiner Partikel durch das HLNUG sind eingebunden in eine Gesamtstrategie des Landes Hessen. Darin greift außerdem das Forum Flughafen und Region (FFR) das Thema ultrafeine Partikel als zusätzlichen Schwerpunkt auf. Neben der Identifikation von Minderungsmöglichkeiten soll die Untersuchung von eventuellen gesundheitlichen Auswirkungen durch ultrafeine Partikel vorangebracht werden. Ein erster wichtiger Schritt zur Darstellung des Kenntnisstandes und der offenen Fragen, aber auch für die Vorbereitung einer solchen Studie wird eine Expertenanhörung im August 2019 sein, die gemeinsam vom HLNUG, FFR und der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmmmissionen (ADF) durchgeführt wird.

## Inhalt

Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung.....	9
2 Standorte, Mess- und Auswertemethoden .....	10
2.1 Flughafenbetrieb .....	10
2.2 Standorte für UFP-Messungen .....	12
2.3 Windmessungen.....	14
2.4 Geräte zur UFP-Messung.....	14
2.5 Qualitätssicherung der UFP-Messdaten.....	15
2.6 Festlegung von Windsektoren an den einzelnen Standorten .....	16
2.7 Kurzzeitmessungen an Standorten unterhalb der Anfluglinien .....	20
3 Ergebnisse.....	20
3.1 Überblick über die mittlere Belastung an vier Standorten .....	20
3.2 Windrichtungsabhängigkeit und Tagesgang der UFP-Konzentration .....	23
3.2.1 Frankfurt-Schwanheim .....	24
3.2.2 Frankfurt-Flughafen-A3 .....	27
3.2.3 Frankfurt-Sachsenhausen.....	30
3.2.4 Raunheim .....	32
3.3 Zusammenhang zwischen Überflugeignissen und UFP-Konzentration .....	35
3.3.1 Kurzzeitmessungen mit handgehaltenem Partikelzähler.....	35
3.3.2 Raunheim .....	37
3.3.3 Frankfurt-Sachsenhausen.....	41
4 Diskussion und Schlussfolgerungen.....	43
5 Ausblick.....	46
6 Quellen .....	48
8 Danksagung .....	49
9 Anhang.....	50





## 1 Einleitung

Als ultrafeine Partikel (UFP) beziehungsweise Ultrafeinstaub werden alle Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 100 Nanometer (nm) bezeichnet. UFP sind damit die kleinsten festen und flüssigen Teilchen in unserer Luft. Sie stellen eine Teilmenge des Feinstaubes dar, tragen aber aufgrund ihrer geringen Größe kaum zur Massenkonzentration der Feinstaubfraktionen  $PM_{10}$  oder  $PM_{2,5}$  bei. Für ultrafeine Partikel gibt es, anders als für  $PM_{10}$  oder  $PM_{2,5}$  keine gesetzlichen Vorgaben zur Überwachung oder gar Grenzwerte, die eingehalten werden müssen. Demzufolge werden UFP bisher zwar vereinzelt im Rahmen von Forschungsprojekten erfasst, nicht aber kontinuierlich innerhalb der Luftqualitätsüberwachung der Messnetze der Bundesländer.

Da ultrafeine Partikel aufgrund ihrer geringen Größe besonders lungengängig sind, sind sie potentiell gesundheitsschädlich. Allerdings mangelt es noch an epidemiologischen Studien, anhand derer man die Gesundheitseffekte von UFP belegen und quantifizieren könnte (Ohlwein et al., 2018).

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) beschäftigt sich bereits seit 2015 mit dem Thema ultrafeine Partikel, da der Flughafen Frankfurt in den Fokus als mögliche Quelle für Ultrafeinstaub in der Region gerückt ist. Internationale wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass zum Beispiel im Einflussbereich der Flughäfen von Los Angeles und Amsterdam erhöhte Anzahlkonzentrationen von UFP zu finden sind (Hudda et al., 2014, Keuken et al., 2015, Stacey, 2018). Außerdem zeigen Studien, dass Triebwerke große Mengen an besonders kleinen ultrafeinen Partikeln emittieren (Stacey, 2018).

Das HLNUG betreibt bereits seit September 2015 in Kooperation mit dem Umweltbundesamt (UBA, Außenstelle Langen) ein UFP-Messgerät in Raunheim. Im Herbst 2017 wurden die Messungen verstärkt und je ein Gerät zur Bestimmung der Größenverteilung ultrafeiner Partikel in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim in Betrieb genommen. Im Mai 2018 veröffentlichte das HLNUG seinen *1. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt* (Rose und Jacobi, 2018). Der Bericht zeigte, dass das Gelände des Flughafens offenbar eine bedeutende Quelle für UFP in der Umgebung ist. Emissionen, die beim Betrieb auf dem Flughafengelände bodennah freigesetzt werden, z.B. von Flugzeugtriebwerken bei der Abfertigung sowie beim Starten, Landen, Rollen, etc., werden mit dem Wind in die Umgebung transportiert und führen dort zu einer stark erhöhten Konzentration an UFP während der Betriebszeiten des Flughafens. Ob auch Überflüge unterhalb einer bestimmten Höhe als relevante Quelle für UFP am Boden in Betracht kommen, ließ sich aus den bis dahin erfolgten Messungen nicht ableiten.

Seit der Veröffentlichung des ersten Zwischenberichts hat das HLNUG seine Messungen weiter intensiviert. Mittlerweile wurden zum Teil in Kooperation mit dem Umwelt- und Nachbarschaftshaus sowie mit der Stadt Frankfurt fünf weitere kontinuierlich betriebene UFP-Messstellen in Frankfurt und am Flughafen eingerichtet. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden zahlreiche Kurzzeitmessungen an verschiedenen Standorten in der Nähe des Flughafens unternommen. Außerdem wurden die Messungen in Raunheim und Frankfurt-Schwanheim fortgesetzt, wodurch detailliertere Auswertungen vorgenommen werden konnten, für die beim letzten Bericht noch kein ausreichend großer Datensatz vorlag.

Der hier vorliegende zweite Zwischenbericht soll weitere Erkenntnisse liefern, ob nur der Betrieb auf dem Flughafengelände oder auch die An- und Abflüge relevante Quellen für ultrafeine Partikel am Boden darstellen. Außerdem soll gezeigt werden, ob auch noch in größerer Entfernung vom Flughafen erhöhte Konzentrationen an UFP messbar sind und inwiefern sich auch andere Quellen (z.B. Kfz-Verkehr auf Autobahnen) auf die UFP-Konzentration an einem Standort auswirken.

## 2 Standorte, Mess- und Auswertemethoden

### 2.1 Flughafenbetrieb

Der Verkehrsflughafen Frankfurt Main liegt im Südwesten der Stadt Frankfurt etwa 10 km vom Stadtkern entfernt. Pro Tag landen und starten im Durchschnitt ca. 1300 Flugzeuge. Die Anzahl der Flugbewegungen am Wochenende ist nur geringfügig niedriger als an Werktagen. In der Zeit von 23:00 Uhr bis 5:00 Uhr herrscht Nachtflugverbot. Die An- und Abflüge verteilen sich auf insgesamt vier Bahnen: auf die Centerbahn und Südbahn, die sowohl zum Starten als auch zum Landen ausgelegt sind, auf die Landebahn Nordwest und auf die Startbahn 18 West (Fraport, 2018). Während auf der Startbahn 18 West Flugzeuge immer zunächst gen Süden starten und sich die Windrichtung nur auf die Nutzungshäufigkeit der jeweiligen Abflugstrecken auswirkt, werden die drei anderen Bahnen abhängig von der Windrichtung betrieben. Bei Wind aus westlichen Richtungen landen und starten die Flugzeuge auf diesen Bahnen in Richtung Westen (Betriebsrichtung West, bzw. BR25). Die Bahnen erhalten bei dieser Betriebsrichtung die Bezeichnungen 25R, 25C und 25L (siehe Abbildung 1). Bei Wind aus östlichen Richtungen landen und starten die Flugzeuge auf diesen Bahnen in Richtung Osten (Betriebsrichtung Ost, bzw. BR07). Die Bahnen erhalten bei dieser Betriebsrichtung die Bezeichnungen 07R, 07C und 07L. Da die vorherrschende Windrichtung im Rhein-Main-Gebiet Südwest ist (siehe Abbildung 1), tritt die BR25 häufiger auf als die BR07.

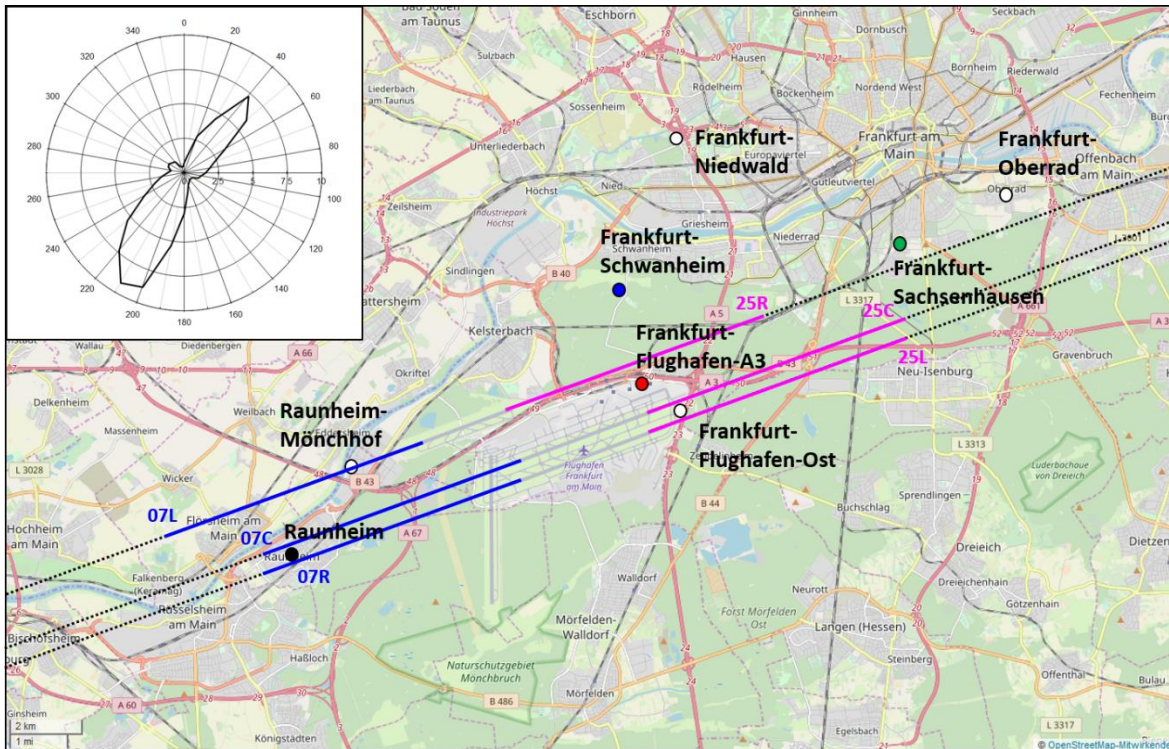


Abbildung 1. Standorte der Messstellen, an denen das HLNUG Messgeräte zur Untersuchung ultrafeiner Partikel betreibt, sowie Flugrouten beim Landeanflug auf den Flughafen (gepunktete Linien). Die Flugrouten bis zu einer Flughöhe von ca. 400 m über Grund sind bei Betriebsrichtung BR07 als blaue und bei BR25 als pinke Linien dargestellt. Die Messdaten der Standorte mit weißer Markierung sind nicht Teil dieses Berichts. In der linken oberen Ecke ist die relative Häufigkeit (in %) der Windrichtung, gemessen an der Messstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt, gezeigt (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420; Zeitraum 09/2017 – 02/2019).

Beim Landeanflug auf den Flughafen nehmen die Flugzeuge schon frühzeitig Kurs auf die jeweilige Landebahn (Eindrehbereich liegt mind. 20 km vor dem Aufsetzpunkt, Flughöhe im Eindrehbereich bei der Landebahn Nordwest ca. 1400 m über Grund und bei der Süd- und Centerbahn ca. 1100 m über Grund) mit einem Anflugwinkel von 3° bzw. 3,2° (Framap, 2015). Die Flugzeuge folgen hierbei im Anflug auf den Flughafen dem Leitstahl des Instrumentenlandesystems, der Kurs und Gleitpfad für die Landung vorgibt. D.h. die Flugzeuge befinden sich in dieser Flugphase über einen langen Zeitraum konzentriert auf zwei Flugpfaden (in der Regel erfolgen Anflüge auf 25/07R und 25/07L, Abflüge von 25/07C). Der festgelegte Aufsetzpunkt und Anflugwinkel bewirkt, dass alle Flugzeuge im Anflug einen bestimmten Ort mit etwa gleicher Überflughöhe passieren.

Beim Start teilen sich die Abflugrouten sehr schnell auf unterschiedliche Himmelsrichtungen auf – pro Betriebsrichtung auf mind. 10 Flugrouten. Je nach Größe bzw. Gewicht des Flugzeugs kann der genaue Ort des Abhebens und der Winkel des Steigflugs sehr unterschiedlich sein. Demzufolge bewegen sich die Flugzeuge beim Start auf wesentlich mehr Flugrouten und in unterschiedlicheren Flughöhen als beim Landen. Die Steigwinkel sind generell erheblich größer als die Anflugwinkel, so dass sich der Abstand zum Boden beim Abflug schnell vergrößert. Dagegen bewegt sich das Flugzeug bei der Landung längere Zeit in niedriger Höhe.

Im Rahmen dieses Berichts wird unter anderem betrachtet, ob auch Emissionen von Flugzeugen beim An- oder Abflug einen Einfluss auf die bodennahe Konzentration an ultrafeinen Partikeln haben. Sogenannte Wirbelschleppen, die sich hinter den Flugzeugen bilden, können die Emissionen der Flugzeugtriebwerke innerhalb kurzer Zeit in mehrere Hundert Meter tiefer liegende Luftschichten transportieren, bevor sich die Wirbel auflösen. Dieser vertikale Transport der Triebwerksemissionen könnte damit zu einer Erhöhung der bodennahen UFP-Konzentration beitragen. Die Messungen und Auswertungen, die speziell im Hinblick auf den Effekt von Überflügen unternommen wurden, konzentrieren sich zunächst auf den Effekt von Landeanflügen, da die Anflüge, wie oben beschrieben, eine wesentlich einheitlichere Charakteristik aufweisen als Abflüge und somit ein Effekt leichter messbar und auch reproduzierbarer sein sollte.

## 2.2 Standorte für UFP-Messungen

Das HLNUG betreibt seit September 2015 an mehreren Standorten verschiedene Messgeräte zur physikalischen Charakterisierung von ultrafeinen Partikeln (siehe Abbildung 1 und Tabelle 1). Während für den ersten Zwischenbericht lediglich Messdaten von den Stationen Raunheim und Frankfurt-Schwanheim vorlagen, wurden die Messungen im Laufe des letzten Jahres weiter ergänzt. Die weiteren Standorte wurden so ausgewählt, dass Aussagen darüber getroffen werden können, wie weit sich die vom Flughafen emittierten Partikel in der Region ausbreiten und ob sich auch ein Einfluss von Emissionen beim Landeanflug am Boden nachweisen lässt. Im Rahmen dieses Zwischenberichts werden deshalb zusätzlich zu den Ergebnissen der Stationen Raunheim und Frankfurt-Schwanheim, die Ergebnisse der Stationen Frankfurt-Flughafen-A3 und Frankfurt-Sachsenhausen betrachtet. Weiterführende Messungen an zusätzlichen Standorten (Frankfurt-Flughafen-Ost, Frankfurt-Oberrad, Frankfurt-Niedwald und Raunheim-Mönchhof) werden erst Bestandteil des nächsten Berichts sein, weshalb auf ihre genaue Lage an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll.

**Raunheim:** Der Standort ist seit 1976 eine reguläre Messstation des hessischen Luftmessnetzes zur Überwachung der Luftqualität. Die Messstation 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 nordöstlichen Richtungen weht. Die Windrichtungen Nord-Nordost bis Ost-Nordost treten statistisch gesehen zu ca. 20% der Zeit auf. Lläuft der Flughafenbetrieb in „Betriebsrichtung Ost“ passieren die Flugzeuge die Station ca. 250 m nördlich oder ca. 250 m südlich beim Landeanflug auf die Centerbahn (07C) bzw. die Südbahn (07R). Die Flugzeuge befinden sich beim Überflug der Station auf etwa 350 m Höhe über Grund.

*Tabelle 1. Details zu den an den verschiedenen Standorten betriebenen Messungen ultrafeiner Partikel. Bei der Angabe des Größenbereichs für die Anzahlkonzentration wird die untere Grenze (der Partikeldurchmesser, bei dem 50% aller Partikel gezählt werden) bestimmt durch die Spezifikation des Geräts, die obere Grenze (Partikeldurchmesser, bei dem 50% aller Partikel die Probenahme passieren) ergibt sich aus dem verwendeten Vorabscheider, der in der Probenahme installiert ist.*

Standort	Messgröße	Messgerät	Zeitraum	Bemerkungen
Raunheim	Anzahlkonzentration (2,5 nm – 1 µm)	CPC (Fa. TSI, Model 3776)	seit 09/2015	in Kooperation mit dem UBA; seit 10/2018 wegen Defekt außer Betrieb – möglicherweise Daten ab 11/2017 nicht nutzbar
Raunheim	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	seit 09/2017	
Frankfurt-Schwanheim	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	seit 10/2017	
Frankfurt-Flughafen-A3	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	08/2018 bis 02/2019	temporäre Messstation auf dem frei zugänglichen Gelände des Flughafens
Frankfurt-Sachsenhausen	Anzahlkonzentration (7 nm – 2,2 µm)	CPC (Fa. Grimm, Model EDM 465)	seit 10/2018	in Kooperation mit dem Umweltamt der Stadt Frankfurt
Frankfurt-Oberrad	Anzahlkonzentration (7 nm – 2,2 µm)	CPC (Fa. Grimm, Model EDM 465)	seit 03/2019	in Kooperation mit dem Umweltamt der Stadt Frankfurt; Daten nicht Teil dieses Berichts
Frankfurt-Flughafen-Ost	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	seit 03/2019	in Kooperation mit dem UNH; Daten nicht Teil dieses Berichts
Frankfurt-Niedwald	Anzahlgrößenverteilung (10 nm – 500 nm)	SMPS (Fa. TSI, Model 3938)	seit 04/2019	Daten nicht Teil dieses Berichts
Raunheim-Mönchhof	Anzahlkonzentration (7 nm – 10 µm)	CPC (Fa. TSI, Model 3750)	vgl. ab 10/2019	Daten nicht Teil dieses Berichts

**Frankfurt-Schwanheim:** Der Messcontainer befindet sich 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. Der Standort kann ebenfalls 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. Bei Betriebsrichtung BR25 befinden sich Flugzeuge im Anflug auf die Landebahn 25R in ca. 2 km Entfernung in südlicher Richtung auf einer Flughöhe von ca. 200 m über Grund.

**Frankfurt-Flughafen-A3:** Der Standort befindet sich auf einem Parkplatz des Flughafens ca. 100 m westlich der Kreuzung Hugo-Eckener-Ring/Kapitän-Lehmann-Straße. Er liegt ca. 100 m südlich der Bundesautobahn A3. Im Südosten befindet sich in ca. 200 m Entfernung das Terminal 2, dahinter schließt sich das Flughafenvorfeld an. Bei Wind aus südlichen Richtungen ist die Messstelle geprägt von den Emissionen, die auf dem Flughafengelände freigesetzt werden, bei Wind aus nördlichen Richtungen von den Emissionen die von den Kfz auf der Autobahn oder der angrenzenden Straße



stammen. Bei Betriebsrichtung BR25 befinden sich Flugzeuge im Anflug auf die Landebahn 25R in ca. 600 m Entfernung in nordwestlicher Richtung auf einer Überflughöhe von ca. 200 m.

**Frankfurt-Sachsenhausen:** Der Standort befindet sich auf dem Gelände der Martin-Buber-Schule im Frankfurter Stadtteil Sachsenhausen in einer Wohngegend mit sehr wenig Kfz-Verkehr und kann als „städtischer Hintergrund“ charakterisiert werden. Der Flughafen liegt in ca. 7,5 km Entfernung südwestlich der Messstelle. Bei BR25 befinden sich in südlicher Richtung Flugzeuge in ca. 600 m Entfernung im Anflug auf die Landebahn 25R (Flughöhe ca. 650 m) sowie in ca. 2 km oder 2,5 km Entfernung im Anflug auf die Landebahn 25C oder 25L (Flughöhe ca. 400 m). Mögliche nahegelegene Quellen für ultrafeine Partikel bieten der Schornstein der schuleigenen Pelletheizung sowie die Küchenabluft einer Kita, die sich in unmittelbarer Nähe der Messstelle befinden.

### 2.3 Windmessungen

Die in diesem Bericht verwendeten Winddaten stammen von der Messstation des Deutschen Wetterdienstes auf dem Flughafengelände (DWD *Climate Data Center*, Stations-ID 1420). Das HLNUG betreibt zwar auch eigene Windmessungen direkt an den Messstationen, diese sind jedoch oft zu sehr durch die lokalen Verhältnisse beeinflusst und können die ungestörte Strömung dann nicht repräsentieren. Die Windmessungen direkt an der Messstelle haben daher eher einen orientierenden, kleinräumigen Charakter. Für großräumige Transportbetrachtungen eignen sich in diesen Fällen Messdaten der DWD-Stationen besser.

Bei der Auswertung der Partikelmessdaten wurde angenommen, dass zu einem Zeitpunkt die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung am Standort der UFP-Messung mit denen am Standort der Windmessung gleichzusetzen ist. Zwar ergibt sich durch die Entfernung der beiden Messpunkte ein zeitlicher Versatz des Windfeldes, der jedoch in den meisten Fällen geringer als die Genauigkeit der Windmessung (Geschwindigkeit: 0,1 m/s, Richtung: 10°) einzuschätzen ist.

### 2.4 Geräte zur UFP-Messung

Zur physikalischen Charakterisierung der ultrafeinen Partikel setzt das HLNUG zwei verschiedene Messmethoden ein.

Die Partikelanzahlkonzentration, also die Anzahl aller Partikel innerhalb eines bestimmten Luftvolumens (Partikel pro Kubikzentimeter), wird mit einem Kondensationspartikelzähler (CPC, engl. *condensation particle counter*) gemessen. Vorteil dieser Methode ist, dass die Partikelkonzentration in einer hohen zeitlichen Auflösung (Sekundenwerte) detektiert werden kann. Nachteil ist jedoch, dass man keinerlei Informationen über die Größe der einzelnen Partikel erhält. Für die kontinuierlichen Messungen betreibt das HLNUG drei verschiedene Typen von CPCs, die unterschiedliche untere Grenzen des nachweisbaren Größenbereichs aufweisen. Diese untere

Grenze hat jedoch erheblichen Einfluss auf die gemessene Anzahlkonzentration, was bedeutet, dass die Messwerte nicht direkt miteinander verglichen werden können. Welche CPC-Typen an welchem Standort betrieben werden, kann Tabelle 1 entnommen werden.

Die Anzahlgrößenverteilung der Partikel wird mit einem Partikelgrößenspektrometer (SMPS, engl. *Scanning Mobility Particle Sizer*) der Fa. TSI GmbH (Modell 3938) gemessen. In einem Durchlauf über ca. 5 min wird die Anzahlkonzentration, d.h. die Partikelanzahl pro Kubikzentimeter Luftvolumen ( $1/\text{cm}^3$ ) 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. Nachteil dieses Messverfahrens ist die schlechtere Zeitauflösung gegenüber dem CPC.

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. Tabelle 1 zeigt, an welchen Standorten die Anzahlgrößenverteilung gemessen wird.

Bei allen Messungen wird die angesaugte partikelhaltige Luft jeweils vor dem Eintritt in das Messgerät mit einem Nafion-Trockner auf unter 35 % relative Feuchte gebracht.

## 2.5 Qualitätssicherung der UFP-Messdaten

Für die Messung von ultrafeinen Partikeln 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 alle SMPS-Geräte sowie die CPCs der Fa. TSI im Weltkalibrierzentrum für Aerosolphysik (WCCAP, engl.: *World Calibration Center for Aerosol Physics*) am Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) kalibriert. Dies erfolgte im Oktober 2018, so dass in diesem Monat bei allen Standorten größere Datenlücken auftraten. Alle SMPS-Geräte sowie der CPC 3750 (Fa. TSI) genügten den erforderlichen Qualitätsansprüchen (mindestens  $\pm 10\%$  Genauigkeit der Anzahlkonzentration und mindestens  $\pm 3\%$  Genauigkeit in der Partikelgröße (nur bei SMPS)). Für den in Raunheim betriebenen CPC 3776 (Fa. TSI) stellte sich jedoch heraus, dass die

Anzahlkonzentration vom Gerät um mehr als 60 % überschätzt wurde. Der Grund für diesen Fehler konnte während der Kalibrierung im WCCAP nicht ermittelt und demzufolge nicht behoben werden. Das Gerät wurde daraufhin außer Betrieb genommen. Weder aus der Historie der durchgeführten Wartungen noch aus einem Vergleich der Messdaten von CPC und SMPS in Raunheim konnte nachvollzogen werden, seit wann der Gerätefehler bestand und wie er sich über die Zeit verändert hat. Möglicherweise lassen bereits die Daten ab 11/2017 keine sichere Aussage über die absolute Höhe der Partikelkonzentration zu. In dem hier vorliegenden Bericht wurde aus diesem Grund keine Interpretation der Daten ab 11/2017 vorgenommen. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass die relativen Änderungen der Konzentrationen über einen kurzen Zeitraum gesehen (z.B. über einen Tag) korrekt aufgenommen wurden.

Die beiden CPCs der Fa. Grimm wurden mit den beim WCCAP kalibrierten CPCs verglichen und wiesen ebenfalls eine Genauigkeit von besser als  $\pm 10\%$  auf.

## *2.6 Festlegung von Windsektoren an den einzelnen Standorten*

Um eine Aussage über mögliche Quellen der ultrafeinen Partikel herzuleiten, wurden die Partikelmessdaten anhand der zum Messzeitpunkt vorherrschenden Windrichtung und Windgeschwindigkeit betrachtet. Dazu wurden an jedem Standort vier Windsektoren festgelegt (Details siehe Abb. 2 – 5). Die Festlegung erfolgte anhand lokaler Gegebenheiten (z.B. in welcher Windrichtung befindet sich eine nahe gelegene Autobahn oder das Stadtgebiet) sowie anhand der Himmelsrichtung (z.B. Nord, Ost, etc.). Die Einteilung der Windsektoren ergibt sich wie in Tabelle 2 beschrieben. Für die Mittelung der Messdaten nach Windsektoren, wurden nur die Zeiten berücksichtigt, in denen eine Windgeschwindigkeit von mindestens 1 m/s auftrat.



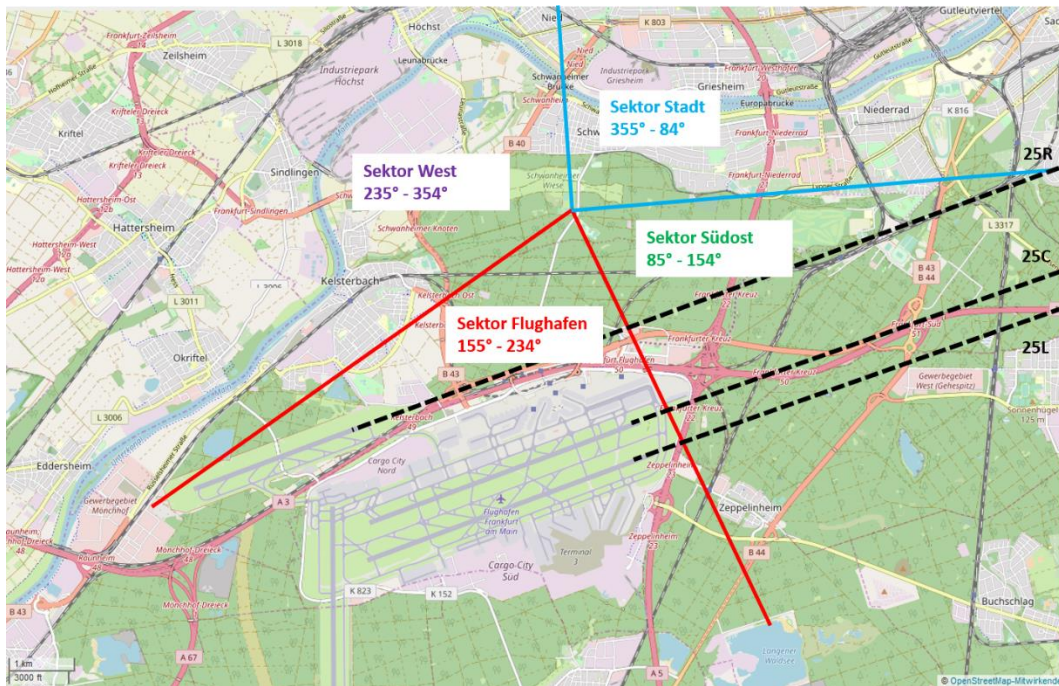


Abbildung 2. Lage der Messstation Frankfurt-Schwanheim. Zur Charakterisierung der UFP-Belastungen bei unterschiedlicher Herkunft der Partikel wurden vier Windsektoren (Flughafen, Stadt, Südost, West) festgelegt. Die schwarzen gestrichelten Linien markieren die Einflugschneisen bei BR25.

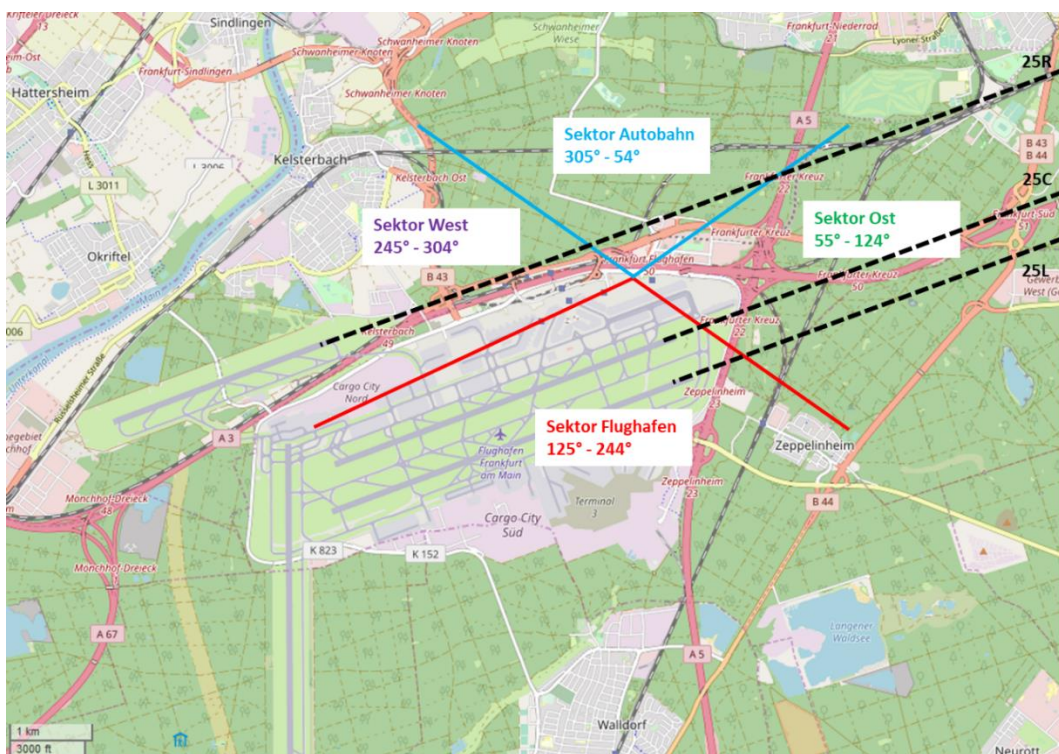


Abbildung 3. Lage der Messstation Frankfurt-Flughafen-A3. Zur Charakterisierung der UFP-Belastungen bei unterschiedlicher Herkunft der Partikel wurden vier Windsektoren (Flughafen, Autobahn, Ost, West) festgelegt. Die schwarzen gestrichelten Linien markieren die Einflugschneisen bei BR25.



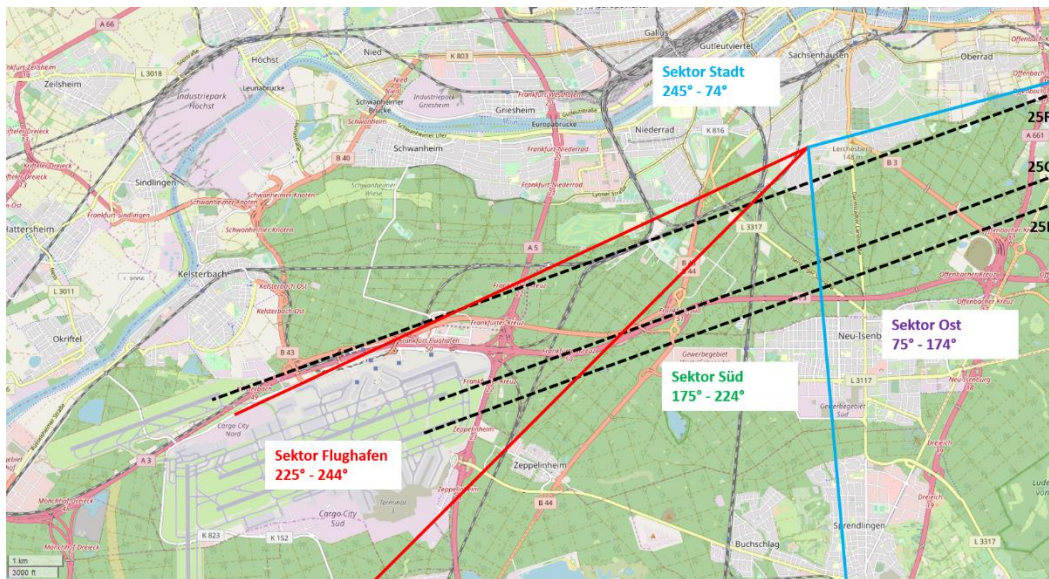


Abbildung 4. Lage der Messstation Frankfurt-Sachsenhausen. Zur Charakterisierung der UFP-Belastungen bei unterschiedlicher Herkunft der Partikel, wurden vier Windsektoren (Flughafen, Stadt Frankfurt, Süd, Ost) festgelegt. Die schwarzen gestrichelten Linien markieren die Einflugschneisen bei BR25.

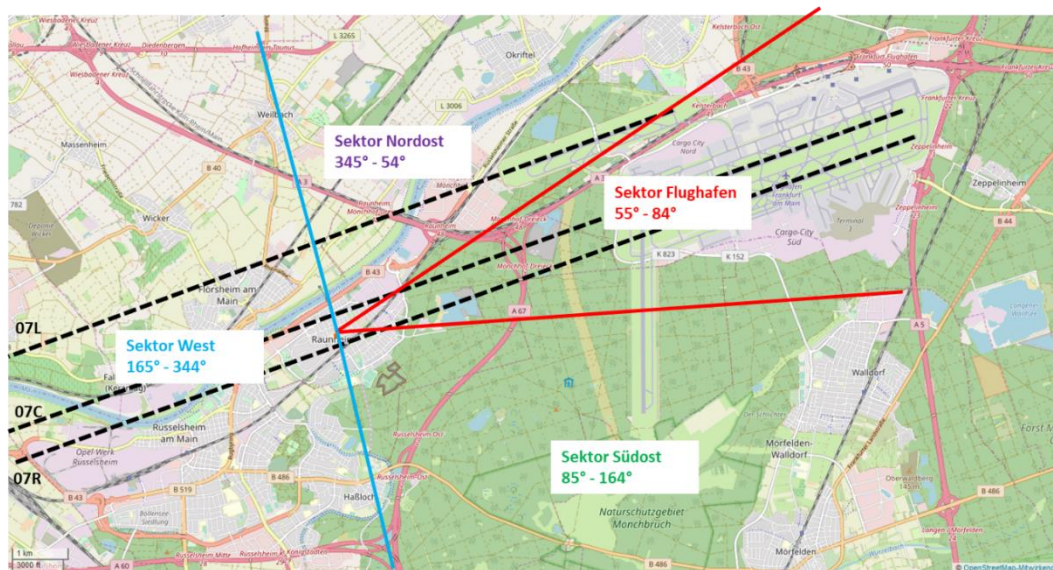


Abbildung 5. Lage der Messstation Raunheim. Zur Charakterisierung der UFP-Belastungen bei unterschiedlicher Herkunft der Partikel wurden vier Windsektoren (Flughafen, Südost, West, Nordost) festgelegt. Die schwarzen gestrichelten Linien markieren die Einflugschneisen bei BR07.

Tabelle 2. Festlegung von Windsektoren an den Standorten Frankfurt-Schwanheim, Frankfurt-Flughafen-A3, Frankfurt-Sachsenhausen und Raunheim, wie in Abb. 2-5 gezeigt. Gegeben ist, in welche Richtung der Flughafenbetrieb bei Wind aus dem Sektor stattfindet (Westbetrieb BR25, oder Ostbetrieb BR07), ob die Messstelle bei Wind aus diesem Sektor in der Abluft des Flughafens liegt und ob der Sektor im Einzugsbereich von An- oder Abflügen liegt. Sektoren, bei denen die Messstelle im Einflussbereich des Flughafengeländes liegt, sind rot markiert. Sektoren, bei denen die Messstelle im Einflussbereich von Anflügen liegt, sind orange markiert und Sektoren, bei denen die Messstelle im Einflussbereich von Abflügen liegt, sind blau markiert.

Standort	Bezeichnung des Sektors	Winkel des Windsektors	Einzugsbereich	Betriebsrichtung	in Abluft des Flughafengeländes?	Überflüge?
Frankfurt-Schwanheim	Flughafen	155° – 234°	Flughafengelände inkl. Landebahn Nordwest	BR25	ja	Anflug auf 25R
Frankfurt-Schwanheim	West	235° – 354°	Westen, zwischen Sektor Flughafen und Stadt	BR25	nein	nein
Frankfurt-Schwanheim	Stadt	355° – 84°	Stadt Frankfurt	BR07	nein	Abflug von 07C oder 07R Richtung Norden
Frankfurt-Schwanheim	Südost	85° – 154°	Osten, zwischen Sektor Stadt und Flughafen	BR07	nein	Abflug von 07C oder 07R
Frankfurt-Flughafen-A3	Flughafen	125° – 244°	Flughafengelände südlich des Terminals 1 + 2	BR25 + BR07	ja	nein
Frankfurt-Flughafen-A3	West	245° – 304°	Westen, zwischen Sektor Flughafen und Autobahn	BR25	nein	Anflug auf 25R
Frankfurt-Flughafen-A3	Autobahn	305° – 54°	Autobahn A3	BR25 + BR07	nein	bei BR25 Anflug auf 25R
Frankfurt-Flughafen-A3	Ost	55° – 124°	Osten, zwischen Sektor Autobahn und Flughafen	BR07	nein	Abflug von 07C oder 07R
Frankfurt-Sachsenhausen	Flughafen	225° – 244°	Flughafengelände	BR25	ja	Anflug auf 25R, 25C und 25L
Frankfurt-Sachsenhausen	Stadt	245° – 74°	Stadt Frankfurt und Region nördlich des Flughafens	BR25 + BR07	nein	bei BR07 Abflug von 07C oder 07R
Frankfurt-Sachsenhausen	Ost	75° – 174°	Osten, zwischen Sektor Stadt und Süd	BR07	nein	Abflug von 07C oder 07R
Frankfurt-Sachsenhausen	Süd	175° – 224°	Süden, Anflug bei BR25	BR25	nein	Anflug auf 25R, 25C und 25L
Raunheim	Flughafen	55° – 84°	Flughafengelände inklusive Teil der Startbahn 18 West	BR07	ja	Anflug auf 07C und 07R
Raunheim	Südost	85° – 164°	Südost, zwischen Sektor Flughafen und West	BR07	nein	Abflug von 18, Anflug auf 07R
Raunheim	West	165° – 344°	West, Bedingungen für BR25	BR25	nein	nein
Raunheim	Nordost	345° – 54°	Nordost, zwischen Sektor West und Flughafen	BR07	nein	Anflug auf 07L und 07C





Abbildung 6. Standorte, an denen Kurzzeitmessungen unterhalb der Anfluglinien mit einem handgehaltenen Partikelzähler durchgeführt wurden.

## 2.7 Kurzzeitmessungen an Standorten unterhalb der Anfluglinien

Es sollte festgestellt werden, ob sich einzelne Überflugereignisse direkt auf die am Boden gemessene UFP-Konzentration auswirken. Dazu wurden im Rahmen einer Masterarbeit zahlreiche Kurzzeitmessungen (jeweils maximal drei Stunden) mit einem handgehaltenen Partikelzähler (CPC 3007, Fa. TSI, zeitliche Auflösung der Messwerte: 1 s) an mehreren Standorten unterhalb der Anfluglinien und einer Entfernung vom Flughafen von bis zu 6 km durchgeführt. Eine genaue Beschreibung der Mess- und Auswertemethoden befindet sich in Freund (2019), die Lage der Standorte zeigt Abbildung 6.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Überblick über die mittlere Belastung an vier Standorten

Abbildung 7 zeigt die Häufigkeit der Größenverteilungen, die an den Standorten Frankfurt-Schwanheim, Frankfurt-Flughafen-A3 und Raunheim gemessen wurden. An allen drei Standorten weist die Größenverteilung im Bereich unter 30 nm stark erhöhte Anzahlkonzentrationen auf. Das Maximum der Median-Größenverteilung liegt an der Messstelle Flughafen-A3 bei 14 nm, in Raunheim bei 17 nm und in Schwanheim bei 27 nm. Gleichzeitig ist die Konzentration der Partikel dieses Größenbereichs (10 – 30 nm) auch am variabelsten.

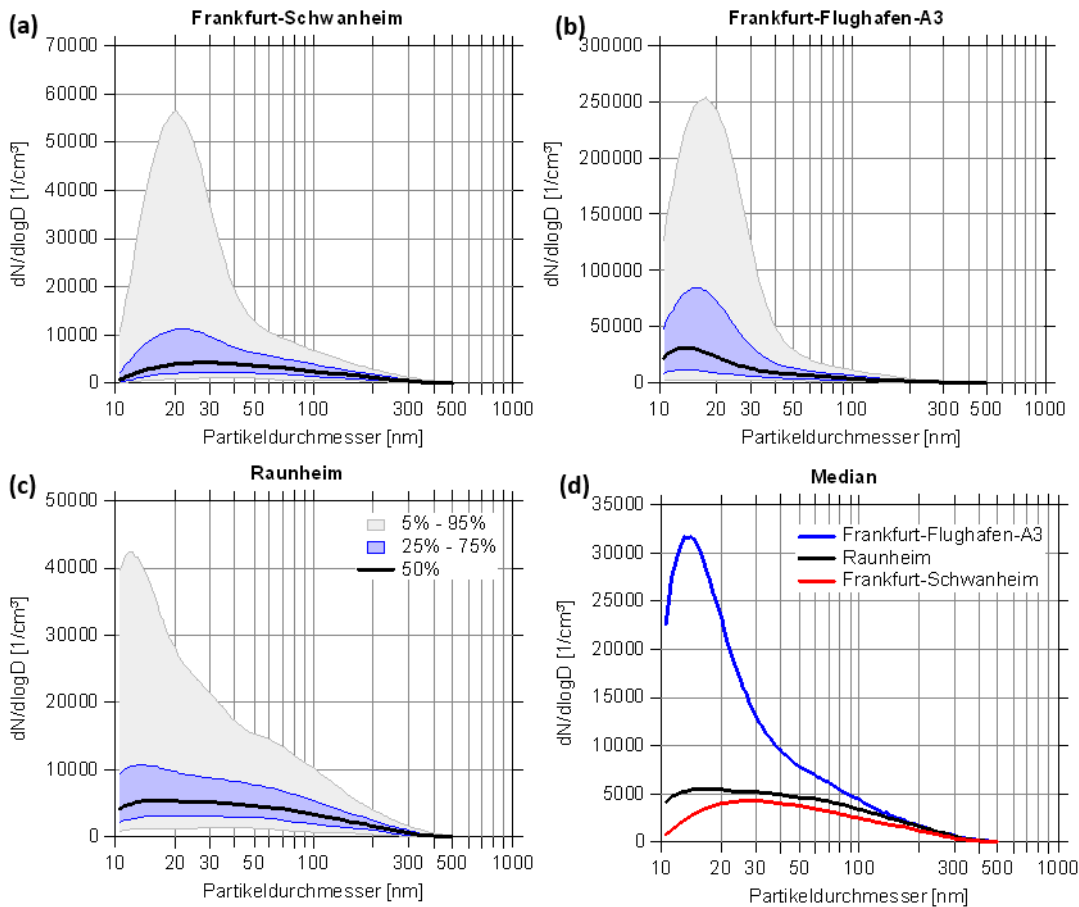


Abbildung 7. Statistik der Größenverteilungen an den Standorten Frankfurt-Schwanheim und Frankfurt-Flughafen-A3 und Raunheim. Gezeigt ist für die jeweiligen Standorte (a, b, c), wie häufig welche Konzentration bei einzelnen Partikelgrößen vorkommen (Perzentile): Die schwarze Linie gibt die Größenverteilung an, unterhalb derer 50% der Messungen liegen. Die blaue Fläche gibt den Bereich an, innerhalb dessen 50% der Messungen liegen – 25% der Größenverteilungen weisen niedrigere und 25% weisen höhere Konzentrationen als durch die blaue Fläche gekennzeichnet auf. Die graue Fläche gibt den Bereich an, innerhalb dessen 90% der Messungen liegen – nur 5% der Größenverteilungen weisen niedrigere und weitere 5% weisen höhere Konzentrationen als durch die graue Fläche gekennzeichnet auf. Bild (d) vergleicht die Median-Kurven der drei Standorte (entspricht den schwarze Linien in a, b, c) in einer Grafik.

Die höchsten Konzentrationen im Größenbereich 10 – 500 nm treten am Flughafen auf (Tabelle 3). Die mittlere Konzentration liegt dort bei ca. 33000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ , was etwa viermal so hoch ist wie in Raunheim oder Schwanheim (Mittelwert von 8600 bzw. 7900 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ). Dabei machen die Partikel kleiner 30 nm in Raunheim und Schwanheim ca. 50 % an der Gesamtkonzentration aus, am Flughafen sogar mehr als 70 %.

Die mittlere Anzahlkonzentration in Frankfurt-Sachsenhausen liegt zwar auf einem ähnlichen Niveau (9700 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ) wie in Raunheim oder Schwanheim, jedoch ist zu beachten, dass der CPC in Sachsenhausen auch kleinere Partikel (ab 7 nm) als die SMPS an den anderen Stationen detektieren kann, was unweigerlich zu einer höheren gemessenen Konzentration führt.

Die mittlere Anzahlkonzentration, die in Raunheim mit dem CPC gemessen wurde, liegt bei 16300 Partikeln pro  $\text{cm}^3$  und damit fast doppelt so hoch wie die Konzentration, die am selben Standort

Tabelle 3. Statistik der Gesamtpartikelkonzentration an den Standorten Frankfurt-Schwanheim, Frankfurt-Flughafen-A3, Frankfurt-Sachsenhausen und Raunheim. Zu beachten ist, dass die Messungen an den verschiedenen Standorten unterschiedliche Größenbereiche und auch Zeiträume abdecken.

Standort	Größenbereich	Messzeitraum	Mittelwert [1/cm <sup>3</sup> ]	Median [1/cm <sup>3</sup> ]	5er Perzentil [1/cm <sup>3</sup> ]	95er Perzentil [1/cm <sup>3</sup> ]
Frankfurt-Schwanheim	10 – 500 nm	01.10.17 – 31.12.18	7885	4917	1496	25976
Frankfurt-Flughafen-A3	10 – 500 nm	02.08.18 – 25.02.19	32664	17566	3587	111730
Frankfurt-Sachsenhausen	7 nm – 2,2 µm	01.10.18 – 28.02.19	9709	7872	2928	22889
Raunheim	10 – 500 nm	01.09.17 – 31.12.18	8613	6618	2087	22085
Raunheim	2,5 nm – 1 µm	04.09.15 – 11.10.18* 04.09.15 – 31.10.17	17040 16272	12597 11814	4661 4554	46528 45225

\*Die Messungen mit dem CPC am Standort Raunheim waren im angegebenen Zeitraum mehrmals für längere Zeit unterbrochen. Außerdem weisen die Daten möglicherweise ab November 2017 wegen eines nicht nachvollziehbaren Gerätedefekts zu hohe Werte auf (vgl. Kap. 2.5).

mit dem SMPS gemessen wurde. Wie Abbildung 7 zeigt, weist die mittlere Größenverteilung in Raunheim bei 10 nm maximale Konzentrationen auf, die offensichtlich auch für Partikel kleiner 10 nm nicht signifikant zurückgehen. Der große Unterschied zwischen den Ergebnissen der CPC- und der SMPS-Messung kann deshalb mit dem unterschiedlichen Messbereich erklärt werden (CPC: 2,5 nm – 1 µm, SMPS: 10 – 500 nm). Außerdem beziehen sich die Mittelwerte auf unterschiedliche Messzeiträume.

Zur Übersicht über die Anzahlkonzentrationen an den einzelnen Standorten sind im Anhang weitere Tabellen mit Monatsmittelwerten aufgeführt (Tabelle A1 bis Tabelle A5). Diese zeigen, dass die Gesamtkonzentrationen sehr stark variieren, was durch die große Variation der Konzentration von 10 – 30 nm Partikeln hervorgerufen wird. So liegt in Raunheim und in Frankfurt-Schwanheim der höchste Monatsmittelwert mehr als doppelt so hoch wie der niedrigste. An den Stationen Flughafen-A3 und Sachsenhausen fallen die Unterschiede in den Monatsmittelwerten nicht ganz so hoch aus, was daran liegen kann, dass der Messzeitraum hier wesentlich kürzer als an den anderen beiden Stationen ist. Auffällig ist, dass die höchsten Monatsmittelwerte nicht an allen Stationen gleichzeitig auftreten, sondern, dass es sogar vorkommt, dass an einer Station besonders hohe Werte gemessen werden, während an einer anderen Station zur selben Zeit besonders niedrige Werte zu verzeichnen sind.

Der arithmetische Mittelwert liegt immer signifikant höher als der Median, was darauf zurückzuführen ist, dass es in den Messwerten relativ viele Ausreißer zu sehr hohen Konzentrationen gibt. Dies unterscheidet sich allerdings nicht vom Verhalten anderer Luftschadstoffe, die über einen ausreichend langen Zeitraum betrachtet ebenfalls eine

unsymmetrische, rechtsschiefe Verteilung von Messwerten aufweisen; das heißt es treten relativ häufig Fälle mit hohen Konzentrationen auf.

### *3.2 Windrichtungsabhängigkeit und Tagesgang der UFP-Konzentration*

Eine windrichtungsabhängige Auswertung der Messdaten (Abbildung 8) zeigt, dass an allen Standorten die Anzahlkonzentration der Partikel bei Wind aus Richtung Flughafen tagsüber, d.h. während der Betriebszeiten des Flughafens, stark erhöht ist. Insbesondere in Schwanheim, am Flughafen-A3 und in Sachsenhausen sind die Windrichtungsbereiche mit erhöhter Partikelkonzentration scharf abgegrenzt – sobald der Wind nur geringfügig aus dem Sektor Flughafen herausdreht, sinkt die Konzentration auf einen Bruchteil. Moderat erhöhte Konzentrationen gibt es zusätzlich an der Station Raunheim bei Wind aus nördlichen Richtungen, sowie in Sachsenhausen bei Wind aus südlichen Richtungen.

Eine detailliertere Auswertung für jeden einzelnen Standort wird im Folgenden beschrieben. Damit soll ein Rückschluss gezogen werden, inwiefern der Flughafen als Ganzes und die Gebiete der An- und Abflüge eine Quelle für ultrafeine Partikel darstellen. Ultrafeine Partikel, die von Flugzeugtriebwerken emittiert werden, weisen typischerweise Größen von unter 30 nm auf (Stacey, 2018). Die Betriebszeiten des Flughafens gehen von 5:00 bis 23:00 Uhr; die Flugbewegungen sind an Sonntagen leicht gegenüber den anderen Wochentagen reduziert. Indizien dafür, dass die gemessenen Partikel ihren Ursprung im Flugverkehr haben, sind demzufolge hohe Konzentrationen im Partikelgrößenbereich von 10 – 30 nm und ein markanter Tagesgang dieser Partikel mit einem starken Anstieg um 5 Uhr und Abfall ab ca. 23 Uhr an allen Wochentagen.

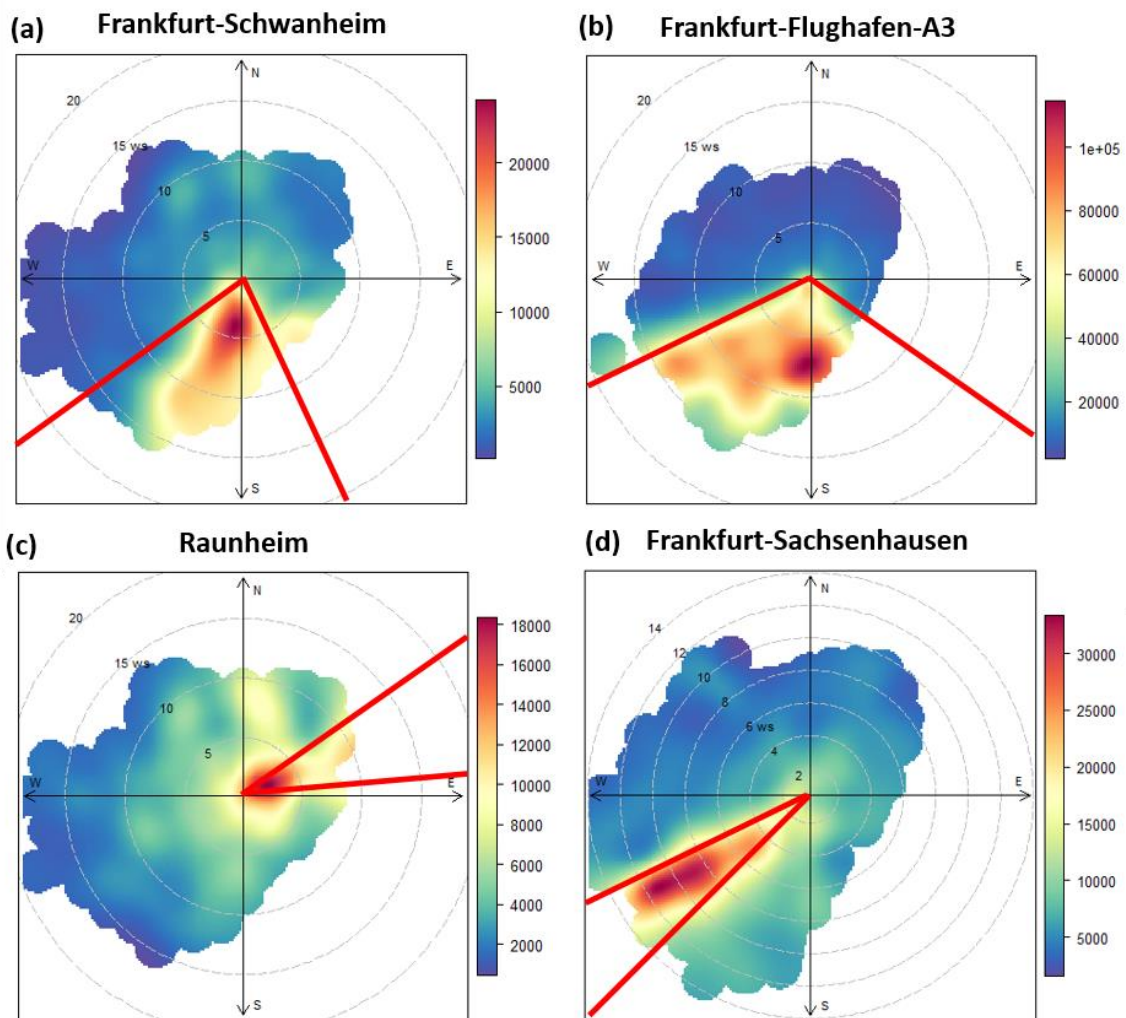


Abbildung 8. Windabhängigkeit der Gesamtpartikelkonzentration an den Standorten Frankfurt-Schwanheim, Frankfurt-Flughafen-A3 und Raunheim (Größenbereich 10 – 500 nm) sowie am Standort Frankfurt-Sachsenhausen (Größenbereich 7 nm – 2,2 µm). Gezeigt ist die über den gesamten Messzeitraum gemittelte Anzahlkonzentration in Partikel pro cm<sup>3</sup> (Farbskala) abhängig von der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit (ws, Werte in m/s radial nach außen zunehmend). In die Darstellung fließen nur Messdaten von 5:00 – 23:00 Uhr Ortszeit ein. Die roten Linien markieren den Himmelsrichtungsbereich in dem der Flughafen liegt (vgl. Abb. 2-5). Die Grafiken wurden erstellt mit „openair“ – einem Software-Paket für R von Carslaw & Ropkins (2012) angewendet in R Version 3.5.3.

### 3.2.1 Frankfurt-Schwanheim

Abbildung 9 zeigt die Anzahlgrößenverteilungen in Schwanheim gemittelt über die jeweiligen Windsektoren (Einteilung der Sektoren siehe Abbildung 2). Für den Sektor Flughafen weist die Größenverteilung tagsüber ein ausgeprägtes Maximum im Größenbereich von 10 bis 30 nm auf. Die mittlere Gesamtkonzentration liegt bei ca. 15000 Partikeln pro cm<sup>3</sup>, wovon die 10 bis 30 nm Partikel etwa zwei Drittel ausmachen (Tabelle 4). In den Nachtstunden ist die Konzentration der



Tabelle 4. Mittlere Anzahlkonzentration verschiedener Partikelgrößenbereiche in Frankfurt-Schwanheim bei Wind aus verschiedenen Sektoren getrennt nach Tag (5 – 23 Uhr Ortszeit) und Nacht (23 – 5 Uhr Ortszeit). Gegeben ist der arithmetische Mittelwert und der Median, sowie die Anzahl (n) der in das jeweilige Mittel eingehenden Größenverteilungen. Die pink und blau markierten Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Wert in jeder Spalte.

	n	arithmetischer Mittelwert			Median				
		10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm	10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm
Flughafen, Tag	36296	10748	4201	185	15134	8584	3222	149	11955
Flughafen, Nacht	10158	2240	2672	179	5091	1263	2063	158	3484
Stadt, Tag	32644	1675	2779	270	4724	1251	2310	249	3810
Stadt, Nacht	13176	1161	3349	284	4794	946	2883	268	4097
Südost, Tag	7454	3236	3302	256	6794	1872	2560	240	4672
Südost, Nacht	1654	1808	3434	260	5502	1229	2798	253	4280
West, Tag	18038	2073	2111	150	4334	1164	1454	116	2734
West, Nacht	3760	1344	2056	149	3549	1075	1622	116	2813

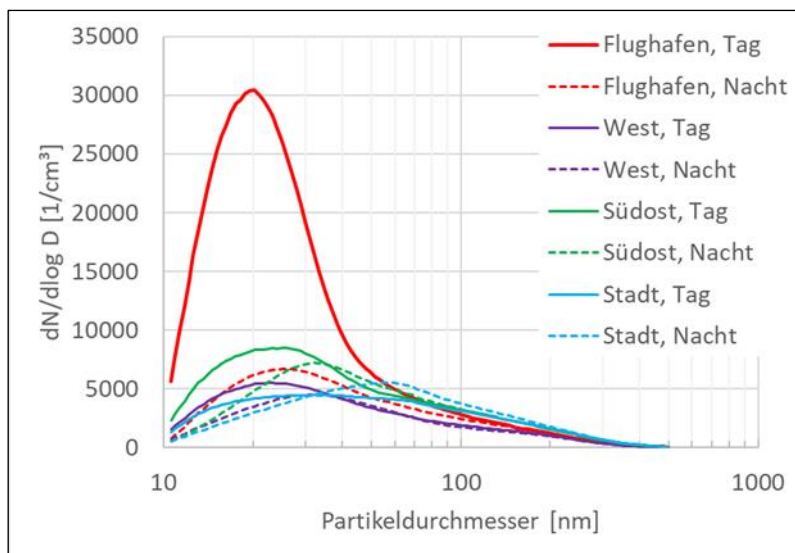


Abbildung 9. Mittlere Anzahlgrößenverteilung in Frankfurt-Schwanheim bei Wind aus verschiedenen Sektoren getrennt nach Tag (5 – 23 Uhr Ortszeit) und Nacht (23 – 5 Uhr Ortszeit).

10 – 30 nm Partikel stark reduziert, die mittlere Gesamtkonzentration liegt dann etwa bei einem Drittel der Tageskonzentration.

Die zweithöchsten Gesamtkonzentrationen am Tag treten bei Wind aus dem Sektor Südost auf (ca. 6800 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ), auch hier machen die 10 bis 30 nm Partikel einen großen Anteil (ca. 50 %) aus. Bei Wind aus Richtung Stadt und aus Sektor West sind die Gesamtkonzentrationen tagsüber am niedrigsten (ca. 4700 bzw. 4300 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ), beim Sektor Stadt unterscheiden sich Tag- von den Nachtmessungen zudem nur gering.

Der Tagesgang der 10 – 30 nm Partikel (Abb. 10) zeigt, dass die niedrigsten Konzentrationen bei allen Sektoren zwischen 3:00 und 5:00 Uhr zu beobachten sind. Bei Wind aus Sektor Flughafen steigt die Konzentration an Montagen bis Freitagen bis 9:00 Uhr etwa um den Faktor 10. Die Konzentration fällt um die Mittagszeit etwas ab, steigt dann bis ca. 22:00 Uhr allmählich wieder an und sinkt danach auf das nächtliche Minimum. An Sonntagen ist der Verlauf ähnlich, jedoch auf etwas niedrigerem Konzentrationsniveau. Bei Wind aus den anderen Sektoren ist der Tagesgang wesentlich weniger stark ausgeprägt, es existiert auch kein steiler Anstieg ab 5:00 Uhr<sup>1</sup>.

Für Frankfurt-Schwanheim lässt sich zusammenfassen, dass eine große Anzahl an ultrafeinen Partikeln aus Richtung des Flughafens herantransportiert wird. Der Beitrag zusätzlich zur Hintergrundkonzentration<sup>2</sup> (ca. 3700 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ) beläuft sich auf im Mittel ca. 11000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ . Ob die Partikel ihren Ursprung ausschließlich auf dem Flughafengelände (Start und Landung der Flugzeuge, Rollen, Abfertigung, etc.) haben oder auch vom Anflug auf die Nordwestlandebahn (Emissionen aus einer Höhe von bis zu etwa 250 m) stammen, lässt sich an diesem Standort nicht differenzieren. Inwiefern ein gewisser Anteil auch von der Autobahn A3 im Süden stammen könnte, lässt sich ebenfalls nicht abschätzen. Jedoch liefert der Fakt, dass aus östlicher Richtung, in der die Autobahn A5 in etwa gleicher Entfernung liegt, keine erhöhten Konzentrationen zu beobachten sind, den Hinweis, dass die Autobahn zumindest in dieser Entfernung (ca. 2,5 km) keinen wesentlichen Beitrag leisten kann.

Der zusätzliche Beitrag an ultrafeinen Partikeln aus dem Sektor Südost, in dem bei Betriebsrichtung Ost die Abflüge vom Parallelbahnsystem ausgehen und in dem sich auch das Autobahnkreuz

---

<sup>1</sup> Die mittleren Tagesgänge an Samstagen liegen an allen Stationen jeweils zwischen den Werten an Wochentagen und an Sonntagen. Um den Umfang dieses Berichts nicht zusätzlich auszudehnen, wurden nur die beiden Extremfälle, also die Mittelwerte an Wochentagen und Sonntagen dargestellt und beschrieben.

<sup>2</sup> Im Folgenden wird als Hintergrundkonzentration jeweils der nächtliche Mittelwert angenommen.

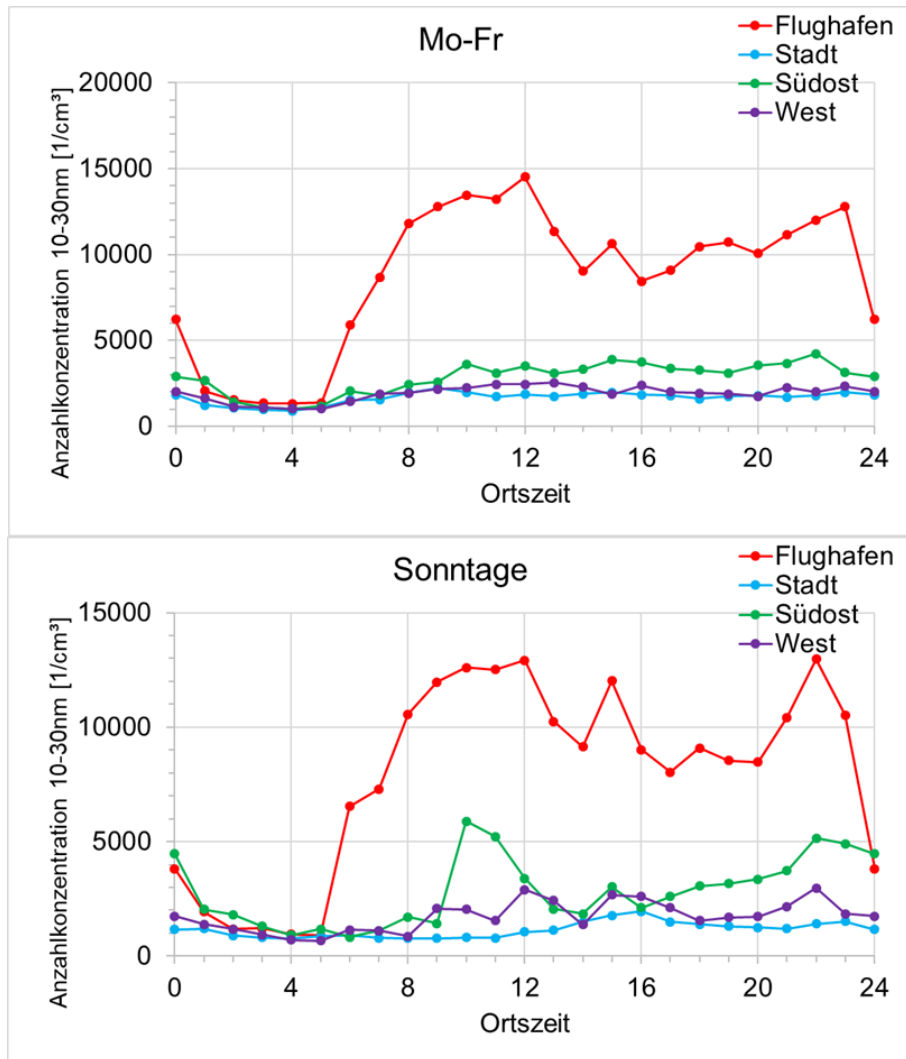


Abbildung 10. Mittlerer Tagesgang der Anzahlkonzentration von 10 – 30 nm Partikeln in Frankfurt-Schwanheim bei Wind aus verschiedenen Sektoren an Montagen bis Freitagen sowie an Sonntagen. Die Partikelkonzentration wurde dafür getrennt nach Windsektoren stundenweise gemittelt. Der Datenpunkt ist jeweils auf das Ende der Stunde gesetzt.

Frankfurt befindet, liegt bei weniger als 2000 Partikeln pro  $\text{cm}^3$ . Dies zeigt, dass ein Einfluss durch Abflüge am Standort Frankfurt-Schwanheim höchstens sehr gering sein kann.

### 3.2.2 Frankfurt-Flughafen-A3

Abbildung 11 zeigt die Anzahlgrößenverteilungen an der Station Frankfurt-Flughafen-A3 gemittelt über die jeweiligen Windsektoren (Einteilung der Sektoren siehe Abbildung 3). Für den Sektor Flughafen weist die Größenverteilung tagsüber ein ausgeprägtes Maximum im Größenbereich von 10 bis 30 nm auf. Die mittlere Gesamtkonzentration liegt bei ca. 68000 Partikeln pro  $\text{cm}^3$ , wovon die 10 bis 30 nm Partikel etwa 80 % ausmachen (Tabelle 5). Die Gesamtkonzentration liegt damit etwa viereinhalbmal so hoch wie in Schwanheim bei Wind aus Richtung Flughafen. In den

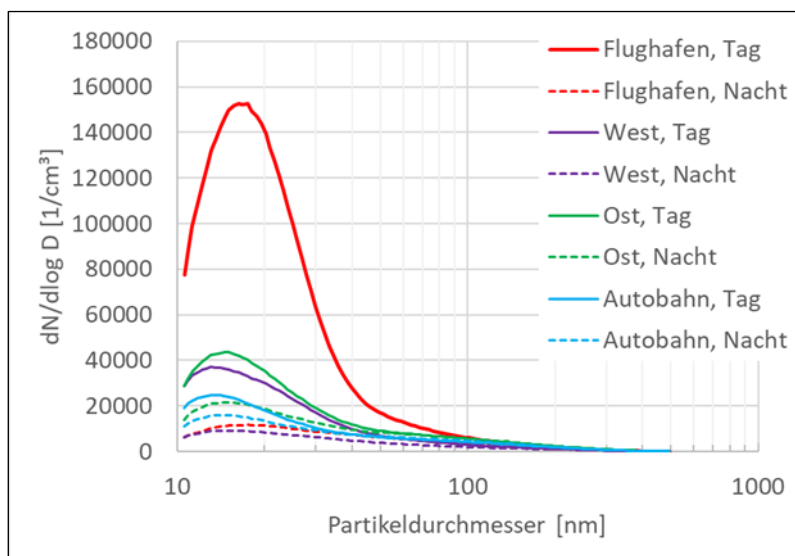


Abbildung 11. Mittlere Anzahlgrößenverteilung an der Station Frankfurt-Flughafen-A3 bei Wind aus verschiedenen Sektoren getrennt nach Tag (5 – 23 Uhr Ortszeit) und Nacht (23 – 5 Uhr Ortszeit).

Nachtstunden ist die Konzentration der 10 – 30 nm Partikel stark reduziert, die mittlere Gesamtkonzentration reduziert sich dann auf etwa 15 % der Tageskonzentration.

Bei Wind aus den Sektoren Ost und West sind die Gesamtkonzentrationen tagsüber deutlich niedriger (23000 bzw. 19000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ), jedoch mit ebenfalls sehr hohem Anteil an 10 – 30 nm Partikeln (ca. 70 % – 75 %). In der Nacht reduzieren sich die mittleren Konzentrationen beim Sektor Ost um ca. 40 %, beim Sektor West um etwa 65 %.

Bei Wind aus dem Sektor Autobahn liegen die Gesamtkonzentrationen tagsüber mit ca. 13000 Partikeln pro  $\text{cm}^3$  am niedrigsten. Auch hier machen die 10 – 30 nm Partikel jedoch einen Anteil von etwa 65 % aus. In der Nacht sinken die Gesamtkonzentrationen nur um etwa 20 %.

Betrachtet man den Tagesgang der 10 – 30 nm Partikel (Abb. 12), so stellt man, wie auch schon in Schwanheim, für den Sektor Flughafen an allen Wochentagen einen sehr steilen Anstieg der Konzentration ab 5:00 Uhr fest. Um 9:00 Uhr wird montags bis freitags im Mittel eine etwa 20-fache, sonntags eine etwa 35-fache Konzentration im Vergleich zu 5:00 Uhr erreicht. Besonders abrupt ist auch der Abfall der Konzentration nach 23:00 Uhr. Für den Sektor West lässt sich ebenfalls ein recht ausgeprägter Tagesgang beobachten. Hier steigt die Konzentration der 10 – 30 nm Partikel montags bis freitags von 5:00 Uhr bis 9:00 Uhr auf einen etwa 7-fachen Wert. Der Tagesgang für die Sektoren Autobahn und Ost ist wesentlich schwächer ausgebildet – das Tagesmaximum liegt bei etwa dem 3-fachen Wert des Minimums.

Tabelle 5. Mittlere Anzahlkonzentration verschiedener Partikelgrößenbereiche an der Station Frankfurt-Flughafen-A3 bei Wind aus verschiedenen Sektoren getrennt nach Tag (5 – 23 Uhr Ortszeit) und Nacht (23 – 5 Uhr Ortszeit). Gegeben ist der arithmetische Mittelwert und der Median, sowie die Anzahl (n) der in das jeweilige Mittel eingehenden Größenverteilungen. Die pink und blau markierten Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Wert in jeder Spalte.

	n	arithmetischer Mittelwert			Median				
		10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm	10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm
Flughafen, Tag	17690	56277	11262	296	67835	47537	8549	251	56337
Flughafen, Nacht	4182	4801	3905	263	8969	2540	3091	217	5848
Autobahn, Tag	13318	8942	4183	308	13433	7047	3367	270	10684
Autobahn, Nacht	4844	6219	4404	338	10961	4659	3651	322	8632
Ost, Tag	6980	16148	6133	405	22686	12697	5057	394	18148
Ost, Nacht	2302	8542	5526	397	14465	6569	4780	397	11746
West, Tag	4548	13995	4333	181	18509	8371	2674	145	11190
West, Nacht	1430	3808	2365	185	6358	2526	1679	125	4330

Für die Station Frankfurt-Flughafen-A3 lässt sich zusammenfassen, dass eine sehr große Anzahl an ultrafeinen Partikeln aus Richtung des Flughafengeländes herantransportiert wird. Der Beitrag zusätzlich zur Hintergrundkonzentration (ca. 10000 Partikel pro cm<sup>3</sup>) beläuft sich auf im Mittel ca. 58000 Partikel pro cm<sup>3</sup>. Hier lässt sich, im Gegensatz zu Schwanheim, eindeutig sagen, dass diese Partikel ihren Ursprung ausschließlich auf dem Flughafengelände selbst (Start und Landung der Flugzeuge auf dem Parallelbahnsystem, Rollen, Abfertigung, etc.) haben, da der festgelegte Sektor keine An- oder Abflüge außerhalb des Geländes einbezieht. Die anderen drei Sektoren stehen jeweils im Einfluss sowohl der An- bzw- Abflüge als auch der nahe gelegenen Autobahnen A3 und A5. Eine Differenzierung der beiden Effekte, Autobahn und Flüge, lässt sich somit nicht durchführen. Der zusätzliche Beitrag an ultrafeinen Partikeln aus den Quellen Autobahn, An- und Abflügen in den Sektoren Ost, West und Autobahn lässt sich auf ca. 13000, 9000 bzw. 3000 Partikel pro cm<sup>3</sup> beziffern. Diese Werte sind gegenüber dem hohen Beitrag, der direkt vom Flughafengelände als Ganzes ausgeht, vergleichsweise niedrig. Das bedeutet, dass der Beitrag rein aus An- und Abflügen an diesem Standort, obwohl Vorbeiflüge in sehr geringer Entfernung stattfinden, gegenüber dem Flughafenbetrieb eine untergeordnete Rolle spielen.

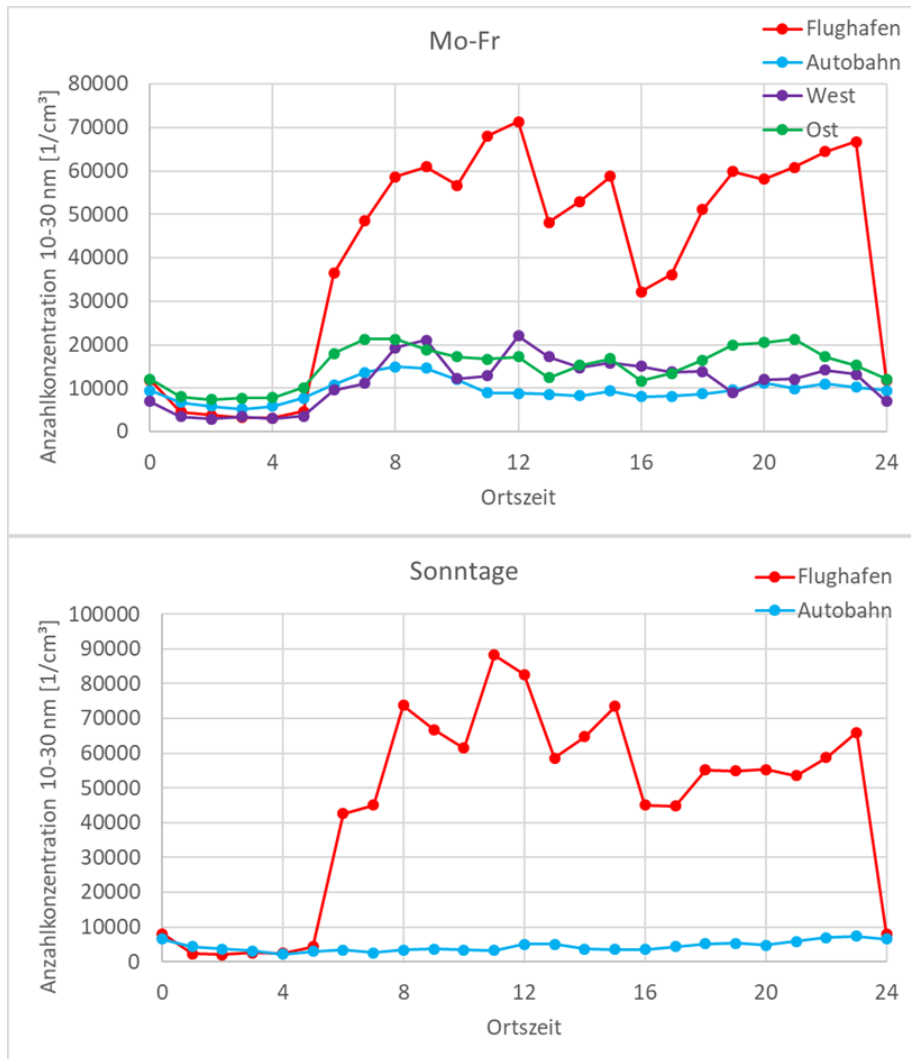


Abbildung 12. Mittlerer Tagesgang der Anzahlkonzentration von 10 – 30 nm Partikeln an der Station Frankfurt-Flughafen-A3 bei Wind aus verschiedenen Sektoren an Montagen bis Freitagen sowie an Sonntagen. Die Partikelkonzentration wurde dafür getrennt nach Windsektoren stundenweise gemittelt. Der Datenpunkt ist jeweils auf das Ende der Stunde gesetzt. Für die Sektoren Ost und West wurde an Sonntagen kein mittlerer Tagesgang berechnet, da keine ausreichende Anzahl an Datenpunkten vorlag.

### 3.2.3 Frankfurt-Sachsenhausen

Für die Station Frankfurt-Sachsenhausen ist, wie schon in Abb. 8d gezeigt, eine sehr eindeutige Windabhängigkeit der Anzahlkonzentration zu beobachten. Für den Sektor Flughafen (Einteilung der Sektoren siehe Abbildung 5) ergibt sich tagsüber eine mittlere Gesamtkonzentration (hier 7 nm – 2,2 µm) von ca. 21000 Partikel pro cm<sup>3</sup> (Tabelle 6). Der Sektor Süd weist tagsüber eine mittlere Gesamtkonzentration von ca. 13000 Partikel pro cm<sup>3</sup> auf, aus Richtung Ost bzw. Stadt findet sich lediglich eine mittlere Konzentration von ca. 8800 Partikel pro cm<sup>3</sup> bzw. 8300 Partikel pro cm<sup>3</sup>.

Tabelle 6. Mittlere Gesamtanzahlkonzentration an der Station Frankfurt-Sachsenhausen bei Wind aus verschiedenen Sektoren getrennt nach Tag (5 – 23 Uhr Ortszeit) und Nacht (23 – 5 Uhr Ortszeit). Gegeben ist der arithmetische Mittelwert und der Median, sowie die Anzahl (n) der in das jeweilige Mittel eingehenden Messwerte. Die pink und blau markierten Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Wert in jeder Spalte.

	n	arithm. Mittelwert	Median
		7nm - 2,2 µm	7nm - 2,2 µm
Flughafen, Tag	1227	20885	18001
Flughafen, Nacht	333	6193	5093
Ost, Tag	1875	8837	7825
Ost, Nacht	479	6030	5522
Süd, Tag	4745	13008	11173
Süd, Nacht	1223	6460	5867
Stadt, Tag	7648	8291	7156
Stadt, Nacht	2719	6145	5866

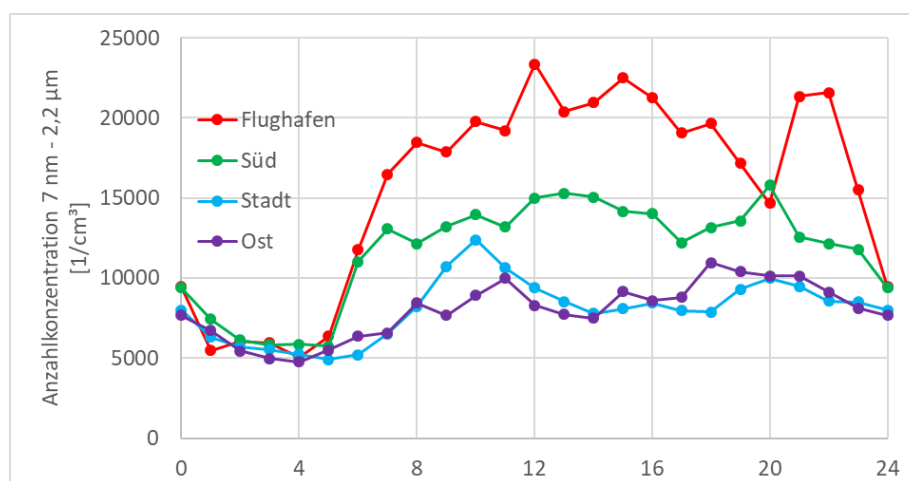


Abbildung 13. Mittlerer Tagesgang der Anzahlkonzentration von 7 nm – 2,2 µm Partikeln an der Station Frankfurt-Sachsenhausen bei Wind aus verschiedenen Sektoren an Montagen bis Freitagen. Die Partikelkonzentration wurde dafür getrennt nach Windsektoren stundenweise gemittelt. Der Datenpunkt ist jeweils auf das Ende der Stunde gesetzt. An Sonntagen wurde für alle Windsektoren kein mittlerer Tagesgang berechnet, da keine ausreichende Anzahl an Datenpunkten vorlag.

Unabhängig von der Windrichtung beträgt die mittlere Konzentration in der Nacht knapp über 6000 Partikel pro cm<sup>3</sup>.

Der Tagesgang weist bei Wind aus den Sektoren Flughafen und Süd jeweils einen starken Anstieg ab 5:00 Uhr und schnellen Abfall ab 22:00 Uhr auf, während der morgendliche Anstieg und abendliche Abfall der Konzentration bei Wind aus Richtung Stadt und Ost wesentlich langsamer von statten geht (Abbildung 13).

Die Messdaten der Station Sachsenhausen zeigen wie auch schon die Daten der anderen beiden Stationen, dass eine große Anzahl an ultrafeinen Partikeln aus Richtung des Flughafens

herantransportiert wird. Der Beitrag zusätzlich zum Hintergrund (ca. 6200 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ) beläuft sich im Mittel auf knapp 15000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ . Ob die Partikel ihren Ursprung ausschließlich auf dem Flughafengelände selbst (Start und Landung der Flugzeuge, Rollen, Abfertigung, etc.) haben oder auch vom Anflug auf die Nordwestlandebahn bzw. das Parallelbahnsystem stammen, lässt sich zwar nicht direkt differenzieren, die scharf abgegrenzten, entsprechend der Windrichtung auftretenden hohen Konzentrationen (Abbildung 8d) sprechen allerdings dafür, dass der mögliche Einfluss der Landeanflüge wesentlich geringer als der Einfluss des Flughafens als Ganzes sein muss. Andernfalls müssten auch stark erhöhte Konzentrationen bei Wind aus südlicheren Richtungen messbar sein, die Konzentrationen sind hier jedoch nur moderat erhöht. Der zusätzliche Beitrag an ultrafeinen Partikeln aus dem Sektor Flughafen ist an diesem Standort etwas höher als in Frankfurt-Schwanheim (15000 vs. 11000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ), was einerseits aus dem unterschiedlichen Partikelgrößenbereich resultiert. Andererseits ist dies darauf begründet, dass der Winkelbereich für den Sektor Flughafen in Frankfurt-Schwanheim weiter bis an die äußeren Grenzen des Flughafens (z.B. inklusive Nordwest-Landebahn) gefasst ist als in Frankfurt-Sachsenhausen.

Im Sektor Süd beläuft sich der Beitrag an ultrafeinen Partikeln zusätzlich zur Hintergrundkonzentration auf ca. 6800 Partikel pro  $\text{cm}^3$ , was zwar mehr als der Beitrag der Stadt oder der Richtung Ost ist (ca. 2000 bzw. 2500 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ), aber doch wesentlich geringer als der des Sektors Flughafen.

Unplausible Messdaten, die auf einen Einfluss des Schornsteins einer Pelletheizung oder der Küchenabluft der Kita, die sich beide in unmittelbarer Nähe zur Messstelle befinden, zurückzuführen wären, konnten bisher nicht ausgemacht werden.

### 3.2.4 Raunheim

Die Anzahlgrößenverteilungen in Raunheim gemittelt über die jeweiligen Windsektoren (Einteilung der Sektoren siehe Abbildung 4) sind in Abbildung 14 dargestellt. Wie auch schon bei den Stationen Schwanheim und Flughafen-A3 weist die Größenverteilung bei Wind aus Sektor Flughafen tagsüber ein ausgeprägtes Maximum im Größenbereich von 10 bis 30 nm auf. Die mittlere Gesamtkonzentration liegt dann bei ca. 17000 Partikeln pro  $\text{cm}^3$  (Tab. 7). Für die Sektoren Nordost und Südost tritt tagsüber ebenfalls ein markantes Maximum bei sehr kleinen Partikeln auf, jedoch mit etwas niedrigeren Gesamtkonzentrationen (ca. 12000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ ). Für alle drei Sektoren nimmt die Anzahlkonzentration in der Nacht im Größenbereich von 10 bis 30 nm stark ab, während die Konzentrationen bei größeren Partikeln ähnlich bleibt. Bei Wind aus Sektor West unterscheidet sich die Form der Größenverteilung kaum zwischen Tag und Nacht, die Gesamtkonzentrationen am Tag sind nur leicht erhöht gegenüber den Nachtwerten.



Tabelle 7. Mittlere Anzahlkonzentration verschiedener Partikelgrößenbereiche in Raunheim bei Wind aus verschiedenen Sektoren getrennt nach Tag (5 – 23 Uhr Ortszeit) und Nacht (23 – 5 Uhr Ortszeit). Gegeben ist der arithmetische Mittelwert und der Median, sowie die Anzahl (n) der in das jeweilige Mittel eingehenden Größenverteilungen. Die pink und blau markierten Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Wert in jeder Spalte.

	n	arithmetischer Mittelwert				Median			
		10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm	10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm
Flughafen, Tag	9438	11397	5513	395	17305	8832	4462	365	13659
Flughafen, Nacht	3362	3662	4974	408	9044	2894	4446	378	7718
Nordost, Tag	25718	6967	4308	351	11626	4829	3285	314	8428
Nordost, Nacht	10556	2941	4566	360	7867	2434	3906	336	6676
Südost, Tag	8926	7080	4835	357	12272	4804	3848	332	8984
Südost, Nacht	2018	3323	4569	350	8242	2709	4095	313	7117
West, Tag	56537	2677	3121	236	6034	2028	2495	191	4714
West, Nacht	14609	1778	2792	222	4792	1458	2281	193	3932

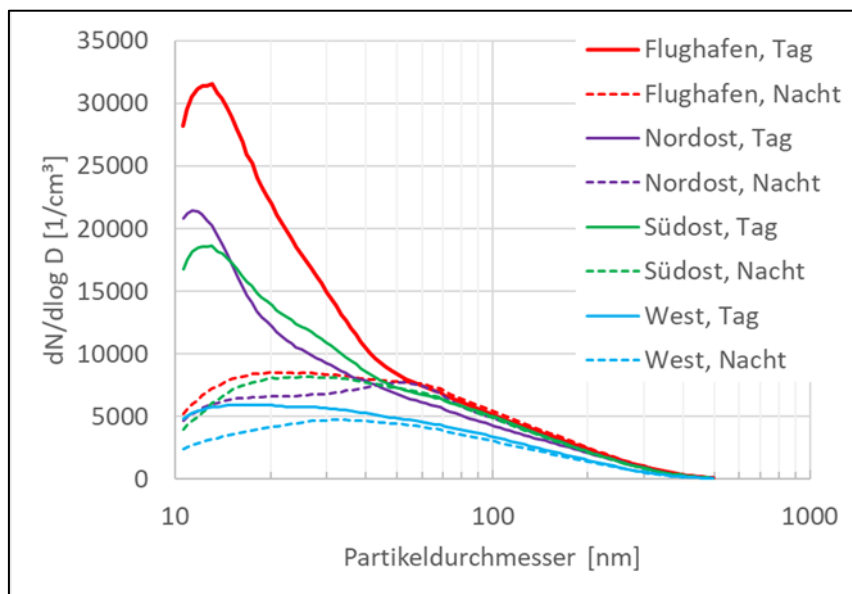


Abbildung 14. Mittlere Anzahlgrößenverteilung in Raunheim bei Wind aus verschiedenen Sektoren getrennt nach Tag (5 – 23 Uhr Ortszeit) und Nacht (23 – 5 Uhr Ortszeit).



Abbildung 15. Mittlerer Tagesgang der Anzahlkonzentration von 10 – 30 nm Partikeln in Raunheim bei Wind aus verschiedenen Sektoren an Montagen bis Freitagen sowie an Sonntagen. Die Partikelkonzentration wurde dafür getrennt nach Windsektoren stundenweise gemittelt. Der Datenpunkt ist jeweils auf das Ende der Stunde gesetzt.

Der Tagesgang der 10 – 30 nm Partikel (Abbildung 15) zeigt, dass die niedrigsten Konzentrationen bei allen Sektoren zwischen 3:00 und 5:00 Uhr zu beobachten sind. Bei Wind aus Sektor Flughafen sowie aus den Sektoren Nordost und Südost steigt die Konzentration unter der Woche (montags bis freitags) bis 9:00 Uhr etwa um den Faktor 6 bzw. 4 an. Die Konzentration fällt um die Mittagszeit etwas ab, steigt dann bis ca. 22:00 Uhr allmählich wieder an und sinkt danach auf das nächtliche Minimum. An Sonntagen ist der Verlauf ähnlich, jedoch auf etwas niedrigerem Niveau. Bei Wind aus dem Sektor West kommt es zwar in der Woche ebenfalls zu einem Maximum am Morgen und am Abend, an Sonntagen bleibt die Konzentration jedoch ganztägig auf einem niedrigen Niveau mit einem schwachen Maximum am Abend.

Die Messdaten zeigen, dass auch an der Station Raunheim eine große Anzahl an ultrafeinen Partikeln aus Richtung des Flughafens herantransportiert wird. Der Beitrag zusätzlich zum Hintergrund (6600 Partikel pro cm<sup>3</sup>) beläuft sich im Mittel auf ca. 10000 Partikel pro cm<sup>3</sup>. Ob die Partikel ihren Ursprung ausschließlich auf dem Flughafengelände selbst (Start und Landung der

Flugzeuge, Rollen, Abfertigung, etc.) haben oder auch vom Anflug auf das Parallelbahnsystem stammen, lässt sich allerdings nicht differenzieren. Die Messwerte bei Wind aus den Sektoren Nordost und Südost, weisen ebenfalls stark erhöhte Konzentrationen und einen markanten Tagesgang der 10 – 30 nm Partikel auf, was einen Einfluss durch Flugzeugemissionen vermuten lässt – im Sektor Nordost befindet sich der Anflug auf die Nordwestlandebahn, im Sektor Südost die Abflüge von der Startbahn 18 West. Der Beitrag an ultrafeinen Partikeln, der in diesen Windsektoren zusätzlich zum Hintergrund antransportiert wird, beläuft sich im Mittel auf ca. 5500 Partikel pro cm<sup>3</sup>.

### ***3.3 Zusammenhang zwischen Überflugereignissen und UFP-Konzentration***

In den Untersuchungen, die das HLNUG seit seinem letzten Zwischenbericht durchgeführt hat, wurde ein besonderer Fokus darauf gelegt, abzuschätzen, ob und wenn ja inwiefern die UFP-Konzentration am Boden direkt durch Überflüge bzw. nahe Vorbeiflüge beeinflusst wird. Unter der Annahme, dass sich die Triebwerksemissionen durch Wirbelschleppen bis zum Boden ausbreiten, könnten kurzzeitige Spitzen in der Partikelkonzentration entstehen. Außerdem könnte auch durch mehrere aufeinander folgende Überflüge ein Anstieg des Grundniveaus der Partikelkonzentration hervorgerufen werden, was dann wieder sinken müsste, sobald keine Überflüge mehr auftreten. Etwaige Effekte müssten umso größer sein, je geringer die Überflughöhe ist, da die Wahrscheinlichkeit, dass Wirbelschleppen bis zum Boden durchdringen, dann umso größer ist.

Um den Effekt von Überflügen zu charakterisieren, wurden zum einen im Rahmen einer Masterarbeit Kurzzeitmessungen an mehreren Standorten unterhalb der Einflugschneisen in Nähe zum Flughafen durchgeführt. Zum anderen wurden die langfristigen, zeitlich hochaufgelösten Messungen an den Standorten Raunheim und Frankfurt-Sachsenhausen im Detail ausgewertet. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden hier anhand einiger Beispiele belegt.

#### **3.3.1 Kurzzeitmessungen mit handgehaltenem Partikelzähler**

Die Ergebnisse der Kurzzeitmessungen unterhalb der Anfluglinien (Standorte siehe Abbildung 6 in Kap. 2.7) sind im Detail in Freund (2019) beschrieben. An dieser Stelle soll nur auf die wesentlichen Ergebnisse Bezug genommen werden.

Ein stets gültiger Zusammenhang zwischen Überflugereignissen und kurzzeitigen Konzentrationsspitzen konnte, selbst in unmittelbarer Nähe zum Flughafen (z.B. Standorte Kelsterbach - Im Taubengrund, DFS-Turm), definitiv ausgeschlossen werden. Einerseits treten zahlreiche Überflugereignisse auf, die keine wesentliche Änderung der Partikelkonzentration hervorrufen (mindestens bei einem Drittel der Überflüge, außer am Standort DFS-Turm),

andererseits treten Konzentrationsänderungen auf, die jedoch nicht eindeutig auf Überflugereignisse zurückzuführen sind.

Bei den meisten Messungen konnte man im zeitlichen Verlauf der Anzahlkonzentration ausgeprägte Kurzzeitspitzen beobachten. Die Höhe dieser Spitzen und ihr zeitlicher Abstand zu einem vorausgehenden Überflugereignis variierten jedoch selbst innerhalb einer Messreihe sehr stark. Es lässt sich somit nicht pauschal festlegen, ob und wenn ja welche bodennahe UFP-Konzentration nach welcher Zeit von einem Überflugereignis ausgelöst werden kann. Auch konnte diesbezüglich kein direkter Zusammenhang zur Überflughöhe hergestellt werden, z.B. unter der Annahme, dass bei niedriger Flughöhe eine höhere maximale Konzentration und ein kürzerer zeitlicher Abstand zum Überflugereignis zu beobachten sein müsste als bei höheren Flughöhen. Dies macht es schwer, in jedem Einzelfall sicher zu belegen, ob ein beobachtetes kurzzeitiges Konzentrationsmaximum tatsächlich die Folge der Partikelemissionen eines Überflugs bzw. nahen Vorbeiflugs ist, da die Konzentrationsschwankungen auch andere Ursachen haben können. Ein weiteres Problem bei der Zuordnung ist, dass in den meisten Fällen nicht auszuschließen ist, dass sich auch der bodennahe Transport von Emissionen, die auf dem Flughafengelände freigesetzt werden, in der Konzentration am Messpunkt widerspiegelt<sup>3</sup>. Je nach Unstetigkeit des Windfeldes kann sich dies durchaus auch in Form von Konzentrationsspitzen bemerkbar machen. Insgesamt konnten an den einzelnen Standorten nie mehr als die Hälfte der beobachteten Konzentrationsmaxima potentiell einem vorausgehenden Überflug zugeordnet werden. Außer am Standort DFS-Turms blieb bei allen Standorten sogar mindestens ein Drittel der Überflugereignisse ohne folgenden Anstieg der UFP-Konzentration am Boden.

Die Mönchhofkapelle (Überflughöhe ca. 110 m) war der einzige Standort, an dem ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Überflugereignissen und Konzentrationsspitzen festgestellt werden konnte, jedoch auch nur unter bestimmten Bedingungen. Solange die Messung genau unterhalb der Anfluglinie erfolgte, konnte nur in einem Fall ein ausgeprägtes Maximum in der UFP-Konzentration aufgezeichnet werden. Erst als der Messstandort um ca. 150 m seitlich zur Anfluglinie verlegt wurde, folgte mit etwas Verzögerung von ca. einer Minute auf fast jeden Überflug ein massiver Anstieg der UFP-Konzentration, der für bis zu zwei Minuten anhielt. Dies hatte eine Verdoppelung der mittleren Konzentration im Messzeitraum an diesem Ort gegenüber der Messung direkt unter der Anfluglinie zur Folge.

---

<sup>3</sup> Aufgrund der Vorgaben zur Betriebsrichtung nähern sich landende Flugzeuge dem Flughafen meist entgegen der Windrichtung (siehe Kap. 2.1). Damit durchfliegen sie auch die Abwindfahne des Flughafens.

### 3.3.2 Raunheim

Um an der Station in Raunheim mögliche Effekte von nahen Vorbeiflügen in der bodennahen UFP-Konzentration zu untersuchen, wurde die mit dem CPC gemessene Gesamtanzahlkonzentration (im Größenbereich 2,5 nm – 1 µm) in einer Zeitauflösung von 5 Sekunden betrachtet und mit den Zeitpunkten verglichen, zu denen Flugzeuge im Landeanflug auf 07C und 07R an der Messstation vorbeiflogen. Der Zeitpunkt des Vorbeiflugs wurde anhand von Daten der Fraport AG vom Aufsetzzeitpunkt zurückgerechnet. Abhängig von der Flugzeugklasse, fliegen die Flugzeuge etwa 90 bis 120 Sekunden vor ihrem Aufsetzen auf der Landebahn an der Messstation vorbei.

Der Vergleich der UFP-Konzentration mit dem Zeitpunkt des nahen Vorbeiflugs lieferte kein generelles Muster, aus dem sich am Standort Raunheim ein eindeutiger Einfluss der nahen Vorbeiflüge auf die bodennahe UFP-Konzentration ableiten ließe. Um einen Überblick zu geben, sind in Abbildung 16 und Abbildung 17 die detaillierten Messwerte beispielhaft für insgesamt zehn Tage im Oktober 2016 jeweils von 4:00 – 7:00 Uhr dargestellt. In der Zeit vom 4.10.2016 bis 14.10.2016 lief der Flugbetrieb an jedem Morgen, außer am 10.10.2016, auf BR07, das heißt, Flugzeuge befanden sich im Landeanflug über Raunheim. Der Zeitraum von jeweils 4:00 – 7:00 Uhr wurde für die Darstellung gewählt, um den Übergang zwischen Nachtmessung und Messung nach einsetzendem Flugbetrieb zu zeigen.

Folgende Beobachtungen lassen sich generell aus den Messdaten in Raunheim erkennen und sind auch in Abbildung 16 und Abbildung 17 beispielhaft zu sehen:

An vielen, aber nicht allen Tagen steigt die Anzahlkonzentration einige Zeit nach einsetzendem Flugbetrieb stark an und bleibt dann für längere Zeit auf diesem Niveau. Die mittlere Konzentration erhöht sich dadurch gegenüber den nächtlichen Werten um ein Vielfaches. Der Zeitpunkt des Konzentrationsanstiegs ist sehr unterschiedlich. Er liegt bei einigen Minuten bis zu mehr als einer Stunde nach 5:00 Uhr und steht offenbar nicht im Zusammenhang mit der Flugdichte, die an den meisten Tagen sehr ähnlich ist. Es macht den Anschein, dass der Zeitpunkt des Konzentrationsanstiegs umso früher ist, je höher die Windgeschwindigkeit ist, allerdings trifft dies auch nicht uneingeschränkt für alle Tage zu. An zwei der zehn gezeigten Tage kam es bereits einige Zeit vor 5:00 Uhr zu einem signifikanten Anstieg der Konzentration (6.10. und 9.10.2016).

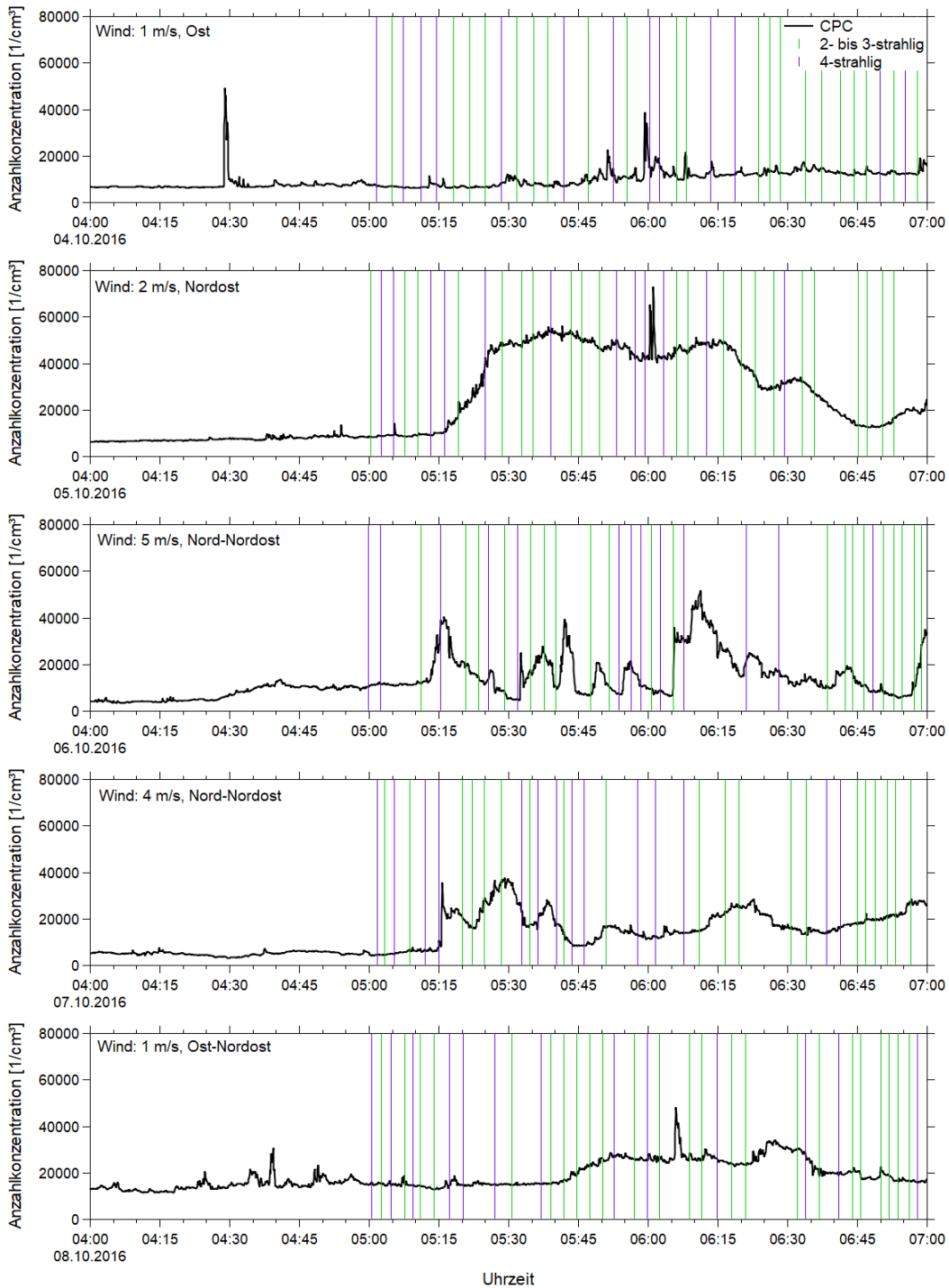


Abbildung 16. Beispielzeitreihen der UFP-Messungen an der Station Raunheim an fünf Tagen im Oktober 2016. Gezeigt ist die Anzahlkonzentration gemessen mit dem CPC als 5-Sekundenwert und der Zeitpunkt der nahen Vorbeiflüge (Anflug auf O7C oder O7R, senkrechte Linien), wobei die grünen Linien 2- bis 3-strahlige Flugzeuge und die violetten Linien 4-strahlige Flugzeuge kennzeichnen. Die Flugdaten stammen von der Fraport AG. In der oberen linken Ecke ist jeweils die mittlere Windgeschwindigkeit und -richtung im dargestellten Zeitraum angegeben (Daten: DWD).

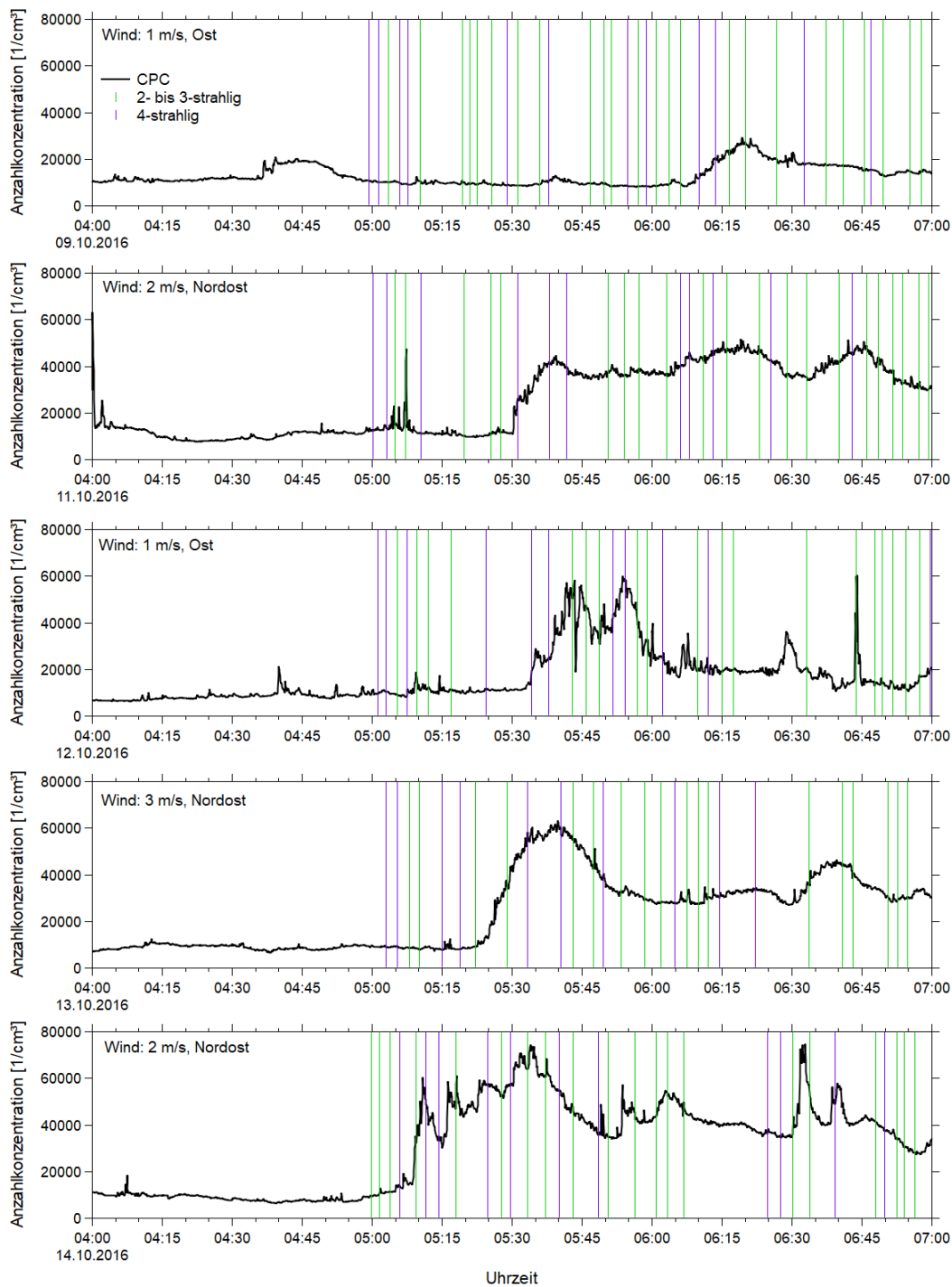


Abbildung 17. Beispielzeitreihen der UFP-Messungen an der Station Raunheim an fünf Tagen im Oktober 2016. Gezeigt ist die Anzahlkonzentration gemessen mit dem CPC als 5-Sekundenwert und der Zeitpunkt der nahen Vorbeiflüge (Anflug auf 07C oder 07R, senkrechte Linien), wobei die grünen Linien 2- bis 3-strahlige Flugzeuge und die violetten Linien 4-strahlige Flugzeuge kennzeichnen. Die Flugdaten stammen von der Fraport AG. In der oberen linken Ecke ist jeweils die mittlere Windgeschwindigkeit und -richtung im dargestellten Zeitraum angegeben (Daten: DWD).

Vereinzelte treten in den Messungen kurzzeitige Spitzen auf, die die Konzentration um mehr als 10000 Partikel pro  $\text{cm}^3$  über einen Zeitraum von wenigen Minuten erhöhen. Die Häufigkeit dieser Konzentrationsspitzen ist sehr unterschiedlich. Während des Flugbetriebs kommt es an den meisten Tagen seltener als dreimal und nie mehr als zehnmal pro Stunde zu solchen kurzzeitigen Ereignissen. An manchen Tagen treten keinerlei kurzzeitige Konzentrationsspitzen auf (z.B. am 9.10. und am 13.10.2016). Die Konzentrationsspitzen treten generell wesentlich seltener auf als Überflüge stattfinden (die Anzahl der Flüge über Raunheim im Oktober 2016 ist im Mittel 17 pro Stunde). Somit kann man klar feststellen, dass, wie auch in den Kurzzeitmessungen mit dem handgehaltenen Partikelzähler beobachtet (Kap. 3.3.1), nicht jedes Überflugereignis einen unmittelbaren Effekt auf die bodennahe UFP-Konzentration hat. Ob es möglicherweise nur unter bestimmten Voraussetzungen zu Konzentrationsspitzen infolge von einzelnen Vorbeiflügen kommt, lässt sich nicht beantworten. Anhand der ausgewerteten Daten lässt sich zumindest keine besondere Häufigkeit von Konzentrationsspitzen bei bestimmten Windbedingungen oder nach Vorbeiflügen bestimmter Flugzeugtypen (z.B. zwei- vs. vierstrahlige Flugzeuge) ableiten. Außerdem kommt es manchmal auch bereits vor Beginn des Flugbetriebs zu Konzentrationsspitzen, die definitiv nicht im Zusammenhang mit Überflügen stehen können (z.B. am 4.10., 8.10. und 11.10.2016). Unter diesem Gesichtspunkt kann man davon ausgehen, dass auch die Konzentrationsspitzen nach 5:00 Uhr nicht ausschließlich die Folge von Überflugereignissen sein müssen.



### 3.3.3 Frankfurt-Sachsenhausen

Abbildung 18 zeigt beispielhaft für vier Zeiträume von jeweils vier Stunden die zeitlich hochaufgelöste Anzahlkonzentration an der Station Frankfurt-Sachsenhausen zusammen mit den Zeitpunkten der nahen Vorbeiflüge (Anflug auf 25R) sowie der weiter entfernten Vorbeiflüge (Anflug auf 25C oder 25L). Der Zeitpunkt des Vorbeiflugs wurde anhand von Daten der Fraport AG vom Aufsetzpunkt zurückgerechnet. So fliegen die Flugzeuge beim Anflug auf 25R etwa 2,5 min vor ihrem Aufsetzen auf der Landebahn südlich an der Messstation vorbei, beim Anflug auf 25C oder 25L etwa 1,5 min vorm Aufsetzen.

Die in Abbildung 18 gezeigten Zeiträume wurden ausgesucht, da sie jeweils über eine längere Zeit keine Anflüge auf die Landebahn Nordwest und somit keine nahen Vorbeiflüge aufweisen. Außerdem gibt es Zeiten, in denen gar keine Anflüge bei BR25 stattfanden.

Anders als in Raunheim, können in Frankfurt-Sachsenhausen keine kurzzeitigen hohen Konzentrationsspitzen beobachtet werden. Die Abbildung zeigt außerdem, dass die gemessene UFP-Konzentration in keinem Zusammenhang mit den nahen Vorbeiflügen (Anflüge auf die Landebahn Nordwest), die in etwa 600 m horizontalem Abstand zur Messstelle auf einer Flughöhe von ca. 650 m stattfinden, steht: So gibt es am 01.01.2019 lediglich vier Landeanflüge auf 25R bis 05:15 Uhr sowie einen um 05:35 Uhr, die Konzentration bleibt aber trotzdem bis 6:05 Uhr auf einem Niveau von ca. 20000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ . Später steigt die Konzentration von 7000 auf 27000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ , ohne dass es zu einem einzigen nahen Vorbeiflug kommt (Abbildung 18a). Im weiteren Verlauf des Tages steigt die Konzentration sogar auf bis zu 75000 Partikel pro  $\text{cm}^3$ , aber erst danach finden wieder Landeanflüge auf 25R statt (Abbildung 18b). Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch am 05.01.2019. Auch hier bleibt die Konzentration in den Zeiten, in denen keine nahen Vorbeiflüge stattfinden, gleich oder steigt sogar (Abbildung 18c). Lediglich zwischen 10:00 und 10:30 Uhr sinkt die Konzentration nachdem keine Landeanflüge mehr auf 25R zu verzeichnen sind, was jedoch eher darauf zurückzuführen ist, dass der Wind zu dieser Zeit auf West bis Nordwest dreht und die Messstelle damit nicht mehr im potentiellen Einflussbereich der Überflüge oder des Flughafens steht (Abbildung 18d).

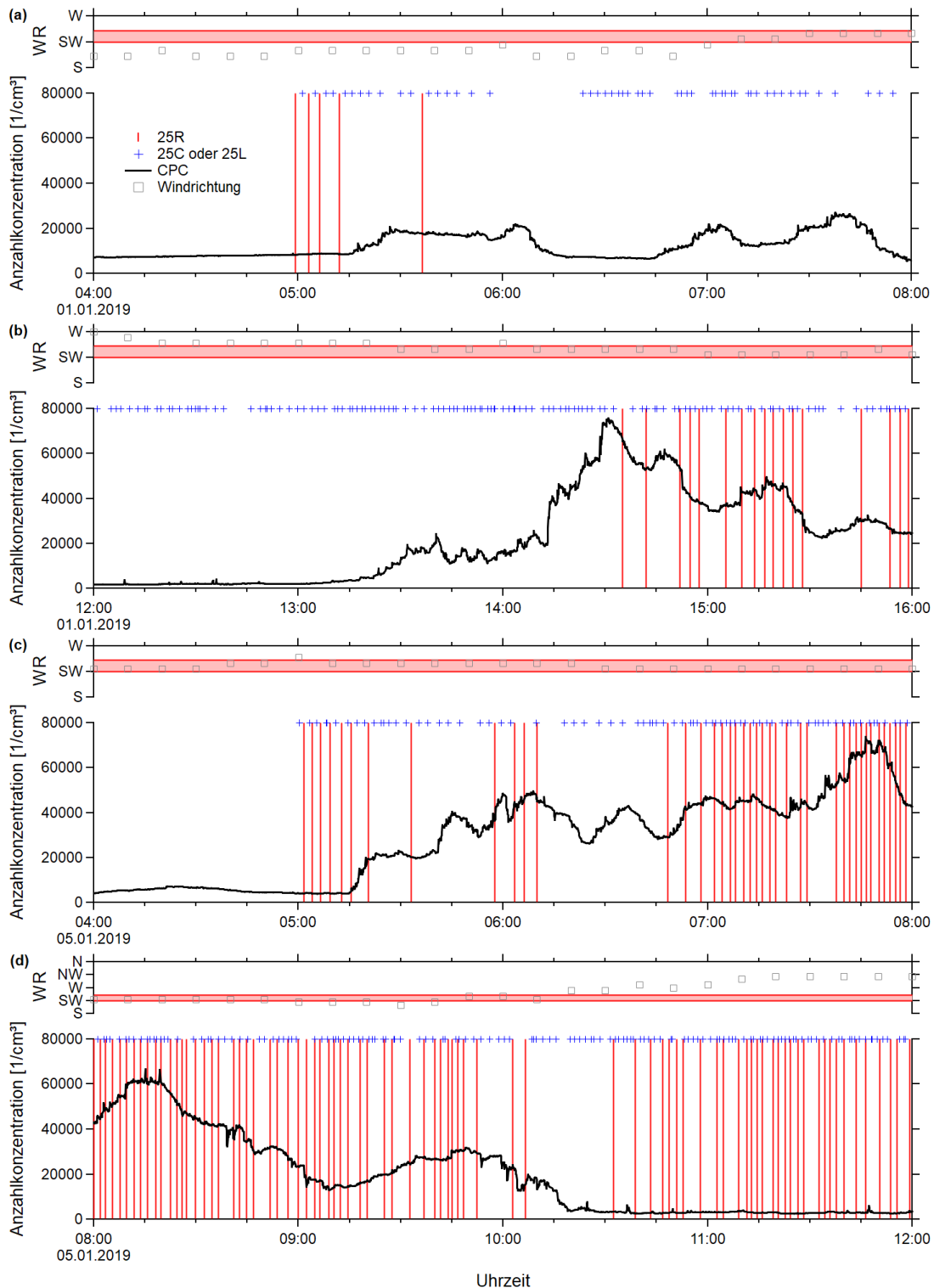


Abbildung 18. Beispielzeitreihen der UFP-Messungen an der Station Frankfurt-Sachsenhausen am 1. und 5. Januar 2019. Gezeigt ist die Anzahlkonzentration als 5-Sekundenwert und der Zeitpunkt der nahen Vorbeiflüge (Anflug auf 25R, rote Linien) sowie der Zeitpunkt der etwas entfernteren Vorbeiflüge (Anflug auf 25C und 25L, blaue Kreuze). Jeweils im oberen Teil der Grafik ist die Windrichtung der DWD-Station Frankfurt-Flughafen gezeigt, wobei die Richtung, die dem Sektor Flughafen entspricht, rot hervorgehoben ist.

Vergleicht man hingegen den zeitlichen Verlauf der UFP-Konzentration mit den Flugbewegungen auf dem Parallelbahnsystem, so lässt sich ein möglicher Zusammenhang vermuten. Solange der Wind aus dem Sektor Süd weht und sich die Messstelle somit nicht im direkten Einflussbereich des Flughafens befindet, treten erhöhte Konzentrationen auf. Auch kommt es während der für eine halbe Stunde andauernden Flugpause am 01.01.2019 (5:50 Uhr bis 6:20 Uhr) zu einem Absinken der Konzentration von ca. 20000 auf 7000 Partikel pro  $\text{cm}^3$  und einem anschließenden Anstieg der Konzentration nach Einsetzen der Flugbewegungen, jeweils um ca. 15 – 20 min zeitlich versetzt (Abb. 18a). Generell ist zu beobachten, was bereits in Kap. 3.2.3 beschrieben wurde, nämlich, dass die höchsten Konzentrationen dann auftreten, wenn die Messstelle in der Abluft des Flughafens liegt und dass die Konzentrationen zügig auf ein Minimum sinken, sobald der Wind Richtung Westen aus dem Sektor Flughafen herausdreht.

## 4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Beobachtungen an den vier Standorten Frankfurt-Schwanheim, Frankfurt-Flughafen-A3, Frankfurt-Sachsenhausen und Raunheim bestätigen die Ergebnisse des ersten Zwischenberichts (Rose & Jacobi, 2018): der Betrieb des Flughafens Frankfurt stellt eine bedeutende Quelle für ultrafeine Partikel dar. An allen vier Standorten treten tagsüber stark erhöhte UFP-Konzentrationen auf, sobald der Wind aus Richtung des Flughafens weht. Insbesondere Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 30 nm kommen dann in besonders hoher Anzahl vor. Der Windrichtungsbereich ist scharf abgegrenzt, das heißt, sobald der Wind nur geringfügig aus dem Sektor Flughafen herausdreht, sinkt die Konzentration auf einen Bruchteil. Außerdem lässt sich bei Wind aus Richtung Flughafen an allen Standorten ein markanter Tagesgang an allen Wochentagen beobachten, der sehr gut den Betriebszeiten des Flughafens folgt: Kurz nach 5:00 Uhr steigt die UFP-Konzentration auf ein Vielfaches des nächtlichen Wertes, bleibt ganztägig auf einem hohen Niveau und fällt nach 23 Uhr rasch wieder auf das nächtliche Minimum ab. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass große Mengen an ultrafeinen Partikeln auf dem Gelände des Flughafens freigesetzt und dann mit dem Wind in die Umgebung transportiert werden. Dabei verdünnen sich die Schadstoffe zwar, aber auch in 7,5 km Entfernung (Standort Frankfurt-Sachsenhausen) sind die UFP-Konzentrationen bei Wind aus Richtung des Flughafens noch deutlich erhöht; sie entsprechen in diesem Fall im Mittel mehr als dem dreifachen Wert der Hintergrundkonzentration an diesem Standort. Die Partikel werden vermutlich von den Flugzeugtriebwerken (Haupt- und Hilfstriebwerken) emittiert. Dies kann einerseits beim Starten und Landen geschehen, aber auch beim Abfertigen und Rollen. Welcher Teil des Lande-Start-Zyklus die größten Mengen an Ultrafeinstaub produziert, lässt sich anhand der Messungen nicht ableiten. Außerdem könnten zusätzlich auch andere Quellen wie zum Beispiel Kraftfahrzeuge und Dieselaggregate auf dem

Flughafengelände ultrafeine Partikel freisetzen. Deren Beitrag ist gegenüber dem der Flugzeugtriebwerke jedoch als eher gering einzuschätzen (UBA, 2019).

Der Standort Frankfurt-Flughafen-A3 in unmittelbarer Nähe zum Flughafen weist unter den vier betrachteten Standorten die mit Abstand höchsten mittleren Anzahlkonzentrationen auf. Sie liegen etwa viermal so hoch wie die gemessenen Konzentrationen in Raunheim, Frankfurt-Schwanheim oder Frankfurt-Sachsenhausen. Die Messungen am Standort Frankfurt-Flughafen-A3 zeigen, dass der Beitrag an ultrafeinen Partikeln von der in nur 100 m Entfernung von der Messstelle verlaufenden Autobahn A3 wesentlich geringer ist, als der des Flughafens.

Bei Wind aus der Richtung, in der sich die Flugzeuge im Anflug auf den Flughafen befinden, zeichnet sich an den Standorten Raunheim und Frankfurt-Sachsenhausen ein ähnlicher Charakter der UFP-Belastung ab wie bei Wind aus Richtung des Flughafengeländes. So treten vor allem 10 – 30 nm große Partikel in besonders hoher Konzentration auf. Außerdem kann ebenfalls der markante Tagesgang mit einem starken Anstieg kurz nach 5:00 Uhr und einem schnellen Abfall nach 23:00 Uhr beobachtet werden. Die Menge an ultrafeinen Partikeln, die aus dem Sektor der Landeanflüge zusätzlich zur Hintergrundkonzentration beigetragen werden, macht je nach Standort höchstens die Hälfte des Zusatzbeitrags aus dem Sektor Flughafen aus.

Weder an der Station Frankfurt-Sachsenhausen, noch in Raunheim, die sich beide fast senkrecht unterhalb der Anfluglinie befinden, lässt sich eine eindeutige Kausalität zwischen einzelnen Überflugereignissen und kurzzeitigen Konzentrationsspitzen am Boden nachweisen. Insgesamt macht es eher den Anschein, dass die Summe der Anflüge unterhalb einer bestimmten Höhe einen Beitrag zu einer generellen Erhöhung der UFP-Konzentration am Boden leistet. Die Messungen am Standort Frankfurt-Sachsenhausen weisen darauf hin, dass die UFP-Konzentration offenbar eher mit den Anflügen auf das Parallelbahnsystem als mit denen auf die Landebahn Nordwest zusammenhängen, obwohl die Anflüge auf das Parallelbahnsystem die Messstelle in mehr als 2 km Entfernung passieren. Dort befinden sich die Flugzeuge jedoch nur noch auf ca. 400 m Höhe, während sie im Anflug auf die Landebahn Nordwest horizontal zwar deutlich näher aber noch auf ca. 600 m Höhe an der Messstelle vorbeifliegen. Der Befund spricht dafür, dass die Triebwerksemissionen infolge von Wirbelschleppen prinzipiell einige hundert Meter vertikal nach unten verfrachtet und die Partikel dann horizontal mehrere Kilometer weit vom Wind transportiert werden können. Befinden sich die Flugzeuge jedoch noch auf zu großer Flughöhe, reichen die Wirbelschleppen nicht bis zum Boden, weshalb dort auch keine erhöhten UFP-Konzentrationen am Boden gemessen werden können.

Das Gebiet, auf dem ultrafeine Partikel aus Flugzeugtriebwerken freigesetzt werden, die dann auch Auswirkungen auf die bodennahen UFP-Konzentrationen haben können, beschränkt sich somit

nicht nur auf das Flughafengelände selbst, sondern erstreckt sich auch entlang der Anfluglinien, in erster Näherung bis in eine Entfernung ab der die Flughöhe ca. 400 m übersteigt. Nach erster Schätzung erstreckt sich dieser Bereich bis zu einem Abstand von etwa 7-8 km vom Aufsetzpunkt. Auf dieser Fläche, bzw. in diesem Luftvolumen, werden große Mengen an UFP emittiert und mit dem Wind in die Umgebung transportiert, so dass dort bodennah signifikant erhöhte Konzentrationen gemessen werden können. So sind prinzipiell nicht die Gebiete, die unterhalb der Einflugschneisen liegen, von erhöhten UFP-Konzentrationen betroffen, sondern vielmehr die Regionen, die sich in der Abluft des Flughafens inklusive der angesprochenen Anflugkorridore unterhalb einer Flughöhe von ca. 400 m befinden. Aufgrund der beiden Hauptwindrichtungen Süd-Südwest sowie Nordost, betrifft dies vor allem das Stadtgebiet Frankfurt sowie Gemeinden südwestlich des Flughafens (z.B. Teile des Kreises Groß-Gerau).

Inwiefern auch *Abflüge* die bodennahe UFP-Konzentration beeinflussen, kann mit den bisherigen Messungen nicht geklärt werden. Unter der Annahme, dass Wirbelschleppen eine Durchdringtiefe von wenigen Hundert Meter erreichen, dürfte sich ein Einfluss von Abflügen hauptsächlich in großer Nähe zum Flughafen in der bodennahen UFP-Konzentration bemerkbar machen, da der Steigwinkel im Gegensatz zum Sinkwinkel relativ groß ist.

Die bisherigen Kurzzeitmessungen, die an mehreren flughafennahen Standorten unterhalb der Einflugschneisen durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass selbst bei geringen Überflughöhen (unter 100 m), also in großer Nähe zum Flughafen, keineswegs jedes Überflugereignis zu einer messbaren Erhöhung der bodennahen UFP-Konzentration führt. Ob die von den Flugzeugtriebwerken auf dieser Höhe emittierten Partikel einen bestimmten Standort am Boden erreichen, hängt offenbar von der Ausbreitung der Wirbelschleppen ab, was wiederum sehr stark von den jeweiligen meteorologischen Bedingungen abzuhängen scheint. So können wenige Hundert Meter horizontale Entfernung darüber entscheiden, ob ein Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt eine unbeeinflusste Hintergrundkonzentration oder eine von Flugzeugen beeinflusste, über mehrere Größenordnungen schwankende Konzentration an ultrafeinen Partikeln erfährt. Daraus folgt, dass ein Ort, der sich in einem größeren Abstand (z.B. einige Kilometer) seitlich versetzt zur Anfluglinie in Richtung der Windströmung befindet, grundsätzlich erhöhten UFP-Konzentrationen bei Flugbetrieb ausgesetzt ist, die sich aus der Gesamtheit der Einzelereignisse, jedoch über die Entfernung verdünnt ergeben. Ein Ort, der sich sehr dicht unterhalb der Anfluglinie befindet, kann dagegen seltener aber wenn, dann unter Umständen kurzzeitig sehr viel höheren, stark schwankenden UFP-Konzentrationen ausgesetzt sein.

## 5 Ausblick

Die Messungen von ultrafeinen Partikeln in der Umgebung des Flughafens Frankfurt werden fortgeführt und ausgeweitet. Es sind dazu bereits vor kurzem drei weitere Standorte mit Ultrafeinstaubmessgeräten eingerichtet worden: Frankfurt-Niedwald, Frankfurt-Oberrad und Frankfurt-Flughafen-Ost (siehe Abbildung 1). Eine weitere Messstelle soll in Kürze am Standort Raunheim-Mönchhof eingerichtet werden.

Inwiefern auch in größerer Entfernung vom Flughafen erhöhte Konzentrationen an UFP auftreten, soll in erster Linie am Standort Frankfurt-Niedwald untersucht werden. Dieser Standort liegt genau in der Verlängerung der Achse Flughafen – Frankfurt-Schwanheim. Somit kann direkt erfasst werden, inwieweit sich die UFP-Konzentrationen, die in Frankfurt-Schwanheim gemessen werden, auf ihrem Weg weiter hin zur Station Frankfurt-Niedwald verdünnen bzw. inwieweit sich die Größenverteilungen verändern.

Der kürzlich neu in Betrieb genommene Standort Frankfurt-Oberrad kann ebenfalls einerseits dazu dienen, zu untersuchen, wie sich die UFP-Belastung mit größer werdender Entfernung zum Flughafen verändert. Andererseits kann auch weiter überprüft werden, bis zu welcher Flughöhe landende Flugzeuge einen Effekt auf die bodennahe UFP-Konzentration haben. Außerdem erlaubt dieser Standort erste Untersuchungen, inwieweit auch startende Flugzeuge die UFP-Konzentration beeinflussen, da bei Ostbetrieb die Abflugroute 07-Nord-lang entlang der Station verläuft.

Die Messstelle Raunheim-Mönchhof soll genau dort eingerichtet werden, wo bei den Kurzzeitmessungen mit einem handgehaltenen Partikelzähler ein klarer Zusammenhang zwischen Überflügen und Konzentrationsspitzen am Boden erkannt werden konnte. Der Standort eignet sich besonders, da er bei BR07 meist nicht gleichzeitig in der Abluft des Flughafens liegt. Es sollen dort kontinuierlich die Gesamtkonzentration der Partikel mit einer Zeitauflösung von einer Sekunde sowie die Windrichtung und -geschwindigkeit gemessen werden, um zu untersuchen, unter welchen meteorologischen Bedingungen Konzentrationsspitzen infolge von Überflugereignissen auftreten. Je nach den dortigen Ergebnissen ist eine Verlagerung des Standorts entlang der Anfluglinie Richtung Flörsheim bzw. Hochheim sinnvoll.

Die chemische Zusammensetzung der flughafenrelevanten ultrafeinen Partikel soll im Rahmen eines Forschungsprojekts untersucht werden. Eine chemische Analyse erfordert immer ein bestimmtes Maß an Partikelmasse, ultrafeine Partikel liefern jedoch aufgrund ihrer geringen Größe nur sehr kleine Massen. Zum aktuellen Zeitpunkt kann noch nicht abgeschätzt werden, ob die Partikelmasse ausreichen wird, qualitative oder sogar auch quantitative Aussagen über die einzelnen chemischen Bestandteile der Partikel machen zu können.

Zukünftig soll auch der Frage nachgegangen werden, ob Abflüge die UFP-Konzentration am Boden beeinflussen. Es bietet sich dafür an, Messungen südlich des Flughafengeländes im Bereich der Flugrouten, die von der Startbahn 18 West ausgehen, durchzuführen. Ein konkreter Standort ist noch nicht ausgesucht.

Die Messungen ultrafeiner Partikel durch das HLNUG sind eingebunden in eine Gesamtstrategie des Landes Hessen. Darin greift außerdem das Forum Flughafen und Region (FFR) das Thema ultrafeine Partikel als zusätzlichen Schwerpunkt auf. Neben der Identifikation von Minderungsmöglichkeiten soll die Untersuchung von eventuellen gesundheitlichen Auswirkungen durch ultrafeine Partikel vorangebracht werden. Ein erster wichtiger Schritt zur Darstellung des Kenntnisstandes und der offenen Fragen, aber auch für die Vorbereitung einer solchen Studie wird eine Expertenanhörung im August 2019 sein, die gemeinsam vom HLNUG, FFR und der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Fluglärmmmissionen (ADF) durchgeführt wird.

## 6 Quellen

Carslaw, D.C. and K. Ropkins, (2012). openair — an R package for air quality data analysis. Environmental Modelling & Software. Volume 27-28, pp. 52–61.

DWD Climate Data Center (CDC): Aktuelle 10-minütige Stationsmessungen der mittleren Windgeschwindigkeit und Windrichtung in Deutschland, Version recent, 2019.

Framap (2015): [http://framap.fraport.de/airport/ISFL/Modul\\_Gis/main.aspx?AID=ISFL2&STY=6](http://framap.fraport.de/airport/ISFL/Modul_Gis/main.aspx?AID=ISFL2&STY=6), abgerufen am 24.05.2019 12:16.

Fraport (2018): Zahlen, Daten, Fakten 2017 zum Flughafen Frankfurt, [https://www.frankfurt-airport.com/content/dam/airport/Dokumente/B2B/Zahlen-Daten-Fakten-2017.pdf/](https://www.frankfurt-airport.com/content/dam/airport/Dokumente/B2B/Zahlen-Daten-Fakten-2017.pdf/jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/Zahlen-Daten-Fakten-2017.pdf) [jcr\\_content/renditions/original.media\\_file.download\\_attachment.file/Zahlen-Daten-Fakten-2017.pdf](https://www.frankfurt-airport.com/content/dam/airport/Dokumente/B2B/Zahlen-Daten-Fakten-2017.pdf/jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/Zahlen-Daten-Fakten-2017.pdf), abgerufen am 24.05.2019 12:18.

Freund, J. (2019): Einfluss von Flugzeugemissionen auf die bodennahe Konzentration von Ultrafeinstaubpartikeln, Masterarbeit der Goethe-Universität Frankfurt am Main, [https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige\\_berichte/ufp/Masterthesis\\_Jannis\\_Freund.pdf](https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/Masterthesis_Jannis_Freund.pdf).

Ohlwein, S., Hoffmann, B., Kappeler, R., Kutlar Joss, M. and Künzli, N. (2018): Health Effects of Ultrafine Particles – Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting. – Umwelt & Gesundheit, **05/2018**, Umweltbundesamt.

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.

Rose, D. und Jacobi, S. (2018): 1. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt, [https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige\\_berichte/ufp/1. Zwischenbericht\\_HLNUG\\_Ultrafeinstaub\\_final\\_Korrigendum\\_20180619.pdf](https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/1_Zwischenbericht_HLNUG_Ultrafeinstaub_final_Korrigendum_20180619.pdf), abgerufen am 24.05.2019 12:22.

Stacey, B. (2018): Measurement of ultrafine particles at airports: A review. – Atmos. Environ., **198**: 463–477.

UBA (2019): UFOPLAN FKZ 3716 52 200 0, 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 PM-10)), Abschlussbericht geplant 2019.



## 8 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, 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.

Dem Umweltamt der Stadt Frankfurt wird gedankt für die Bereitstellung der beiden CPCs (Fa. Grimm, Model EDM 465).

Alle Karten in diesem Dokument wurden mit OpenStreetMap erstellt ([OpenStreetMap-Mitwirkende](#), gemäß CC BY-SA Lizenz).

## 9 Anhang

Ergänzende Tabellen (Monatsmittelwerte):

*Tabelle A1: Verfügbarkeit der Messdaten sowie Mittelwerte und Mediane der Anzahlkonzentrationen in verschiedenen Partikelgrößenbereichen für jeden Monat der SMPS-Messungen in Raunheim. Die pink und blau markierten Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Monatswert in jeder Spalte. In den Monaten mit gelb markierten Belegungsgrad traten größere Datenlücken auf, so dass weniger als 90% der Messdaten vorlagen. Die angegebenen Mittelwerte und Mediane sind demzufolge nicht für den gesamten Monat repräsentativ.*

Monat	Belegung [%]	Arithmetischer Mittelwert				Median			
		10-30nm [1/cm <sup>3</sup> ]	30-200nm [1/cm <sup>3</sup> ]	200-500nm [1/cm <sup>3</sup> ]	10-500nm [1/cm <sup>3</sup> ]	10-30nm [1/cm <sup>3</sup> ]	30-200nm [1/cm <sup>3</sup> ]	200-500nm [1/cm <sup>3</sup> ]	10-500nm [1/cm <sup>3</sup> ]
Sep 17	99,72	4762	4015	281	9058	2812	3339	244	6395
Okt 17	99,59	2818	4184	250	7252	2211	3136	194	5540
Nov 17	93,07	3097	3916	346	7359	2019	2972	288	5279
Dez 17	99,81	2498	2931	245	5674	1752	2421	215	4388
Jan 18	92,37	3463	2975	227	6666	2002	2119	181	4303
Feb 18	99,96	3973	3656	418	8047	2474	2766	372	5611
Mrz 18	99,64	3486	3488	365	7339	2055	2849	305	5210
Apr 18	99,42	4175	4232	238	8645	2394	3449	215	6057
Mai 18	99,42	8101	5901	435	14437	4203	4570	381	9153
Jun 18	99,70	4472	3729	292	8493	2802	2995	266	6063
Jul 18	99,92	4709	4745	301	9754	2770	3944	273	6987
Aug 18	99,79	4096	3759	233	8088	2491	3035	194	5720
Sep 18	76,13	5068	4139	193	9401	3096	3318	159	6573
Okt 18	67,28	4726	3908	302	8937	2778	2926	263	5967
Nov 18	99,93	6969	4352	381	11702	3702	3339	364	7405
Dez 18	99,44	3565	3221	284	7071	1876	2323	264	4463

*Tabelle A2: Verfügbarkeit der Messdaten sowie Mittelwerte und Mediane der Anzahlkonzentrationen für jeden Monat der CPC-Messungen in Raunheim. Die pink und blau markierten Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Monatswert in jeder Spalte. In den Monaten mit gelb markierten Belegungsgrad traten größere Datenlücken auf, so dass weniger als 90% der Messdaten vorlagen. Die angegebenen Mittelwerte und Mediane sind demzufolge nicht für den gesamten Monat repräsentativ. Die Daten ab November 2017 weisen aufgrund eines Gerätedefekts möglicherweise zu hohe Werte auf (vgl. Kap. 2.5).*

Monat	Belegung [%]	arithm. Mittelwert	Median
		2,5 nm - 1 µm [1/cm <sup>3</sup> ]	2,5 nm - 1 µm [1/cm <sup>3</sup> ]
Sep 15	89,79	17051	11606
Okt 15	1,01	21289	9258
Nov 15	41,53	11630	10030
Dez 15	100,00	15348	13146
Jan 16	98,32	16437	11972
Feb 16	99,93	15992	12041
Mrz 16	100,00	17259	13181
Apr 16	9,86	26725	21853
Mai 16	0,00		
Jun 16	79,24	14015	11432
Jul 16	97,24	9755	7914
Aug 16	100,00	16753	11645
Sep 16	99,79	18116	13484
Okt 16	100,00	19718	14514
Nov 16	98,54	19390	14501
Dez 16	99,19	16330	11020
Jan 17	85,95	24122	17462
Feb 17	100,00	19294	14134
Mrz 17	100,00	17680	12452
Apr 17	100,00	12961	10881
Mai 17	64,52	14592	11220
Jun 17	0,00		
Jul 17	47,18	13747	9942
Aug 17	100,00	15422	10698
Sep 17	100,00	15383	10620
Okt 17	100,00	12087	10618
Nov 17	87,15	12268	10043
Dez 17	99,87	11993	10108
Jan 18	99,73	16020	11650
Feb 18	99,85	22385	18477
Mrz 18	61,09	17330	13943
Apr 18	39,93	18663	13084
Mai 18	0,00		
Jun 18	0,00		
Jul 18	73,52	23535	18889
Aug 18	99,93	21351	16316
Sep 18	99,93	24387	19447
Okt 18	35,28	26774	20836

*Tabelle A3: Verfügbarkeit der Messdaten sowie Mittelwerte und Mediane der Anzahlkonzentrationen in verschiedenen Partikelgrößenbereichen für jeden Monat der SMPS-Messungen in Frankfurt-Schwanheim, Die pink und blau markierten*

## Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Monatswert in jeder Spalte, In den Monaten mit gelb markierten Belegungsgrad traten größere Datenlücken auf, so dass weniger als 90% der Messdaten vorlagen, Die angegebenen Mittelwerte und Mediane sind demzufolge nicht für den gesamten Monat repräsentativ,

Monat	Belegung	Arithmetischer Mittelwert				Median			
		10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm	10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm
	[%]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]
Okt 17	99,99	7159	4356	190	11706	2581	2919	141	5641
Nov 17	99,97	5513	3555	206	9274	1890	2268	175	4333
Dez 17	99,99	6999	3265	178	10442	2998	2441	158	5596
Jan 18	99,96	4498	2502	158	7158	1396	1655	124	3175
Feb 18	99,95	2665	2800	302	5767	981	2047	272	3300
Mrz 18	77,54	3682	3051	300	7034	1184	2154	241	3580
Apr 18	99,86	4328	4095	208	8631	1861	3216	183	5260
Mai 18	99,84	2173	3219	254	5646	1257	2673	246	4176
Jun 18	99,92	2489	2777	202	5468	1423	2175	186	3784
Jul 18	99,96	2844	3579	224	6646	1319	2904	208	4431
Aug 18	99,96	3048	2612	154	5814	1322	2128	125	3576
Sep 18	99,78	3240	3006	121	6368	1584	2189	100	3872
Okt 18	63,64	4309	3085	239	7633	1637	2158	210	4005
Nov 18	99,97	4330	3548	347	8225	1591	2741	346	4678
Dez 18	99,92	8358	3353	235	11947	2275	2335	221	4831

Tabelle A4: Verfügbarkeit der Messdaten sowie Mittelwerte und Mediane der Anzahlkonzentrationen in verschiedenen Partikelgrößenbereichen für jeden Monat der SMPS-Messungen in Frankfurt-Flughafen-A3, Die pink und blau markierten Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Monatswert in jeder Spalte, In den Monaten mit gelb markierten Belegungsgrad traten größere Datenlücken auf, so dass weniger als 90% der Messdaten vorlagen, Die angegebenen Mittelwerte und Mediane sind demzufolge nicht für den gesamten Monat repräsentativ,

Monat	Belegung	Arithmetischer Mittelwert				Median			
		10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm	10-30nm	30-200nm	200-500nm	10-500nm
	[%]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]	[1/cm <sup>3</sup> ]
Aug 18	92,04	20112	6231	264	26607	8946	4623	223	13792
Sep 18	99,65	20980	7057	237	28274	10026	5065	206	15297
Okt 18	67,53	22615	6590	323	29528	10032	4578	276	14886
Nov 18	99,97	19408	5966	382	25756	9405	4274	379	14058
Dez 18	96,26	35656	7476	270	43401	18006	5196	264	23466
Jan 19	96,43	26741	6678	314	33734	11383	4286	240	15909
Feb 19	85,70	31212	10752	447	42411	16397	6955	442	23794

Tabelle A5. Verfügbarkeit der Messdaten sowie Mittelwerte und Mediane der Anzahlkonzentrationen für jeden Monat der CPC-Messungen in Frankfurt-Sachsenhausen. Die pink und blau markierten Werte kennzeichnen den höchsten und niedrigsten Monatswert in jeder Spalte.

Monat	Belegung [%]	arithm. Mittelwert	Median
		7 nm – 2,2 µm [1/cm <sup>3</sup> ]	7 nm – 2,2 µm [1/cm <sup>3</sup> ]
Okt 18	99.96%	10178	8223
Nov 18	100.00%	8650	7198
Dez 18	99.93%	9561	7474
Jan 19	100.00%	9052	7270
Feb 19	100.00%	11215	9376