



4. Bericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt

Überblick über die bisherigen Messungen zu ultrafeinen Partikeln in der Region

Florian Ditas, Diana Rose, Stefan Jacobi

Januar 2022

Zusammenfassung

Im vorliegenden 4. Bericht zur Luftqualität in Bezug auf ultrafeine Partikel (UFP) in der Rhein-Main-Region wurden die bisherigen Messungen ultrafeiner Partikel seit 2017 zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass außerhalb der unmittelbaren Umgebung des Flughafens die mittlere UFP-Konzentration im Wesentlichen im Bereich von 6.500 bis 10.000 Partikel pro cm^3 liegt. Höhere mittlere UFP-Konzentrationen wurden auf dem Flughafen-Gelände und im Gewerbegebiet Raunheim-Mönchhof verzeichnet. An allen Standorten steigt jeweils die UFP-Konzentration an, wenn zu Zeiten des Flugbetriebs der Wind aus Richtung des Flughafengeländes weht. Die stationstypische Hintergrundkonzentration wird dabei teilweise um ein Vielfaches überschritten.

Die größen aufgelösten Messungen in unmittelbarer Nähe des Flughafens und in dessen erweiterten Umfeld erlauben die Identifikation eines charakteristischen „Fingerabdrucks“ der UFP-Emissionen durch den Flugbetrieb und den damit verbundenen weiteren Quellen. Dieser typische „Fingerabdruck“ ist unter anderem gekennzeichnet durch eine charakteristische Partikelanzahl-Größenverteilung und kann an allen bisherigen HLNUG-Messstationen mit größen aufgelösten Messungen eindeutig identifiziert und auch von anderen Quellen, wie beispielsweise dem Kfz-Verkehr, unterschieden werden. Messungen an einer Hauptverkehrsstraße (Friedberger Landstraße in Frankfurt) zeigen weiterhin, dass die UFP-Konzentration durch die Emissionen aus dem Kfz-Verkehr deutlich (ca. 50 %) gegenüber dem städtischen Hintergrund von ca. 6.000 - 7.000 Partikel pro cm^3 erhöht ist. Bei Wind aus Richtung des 11 km entfernten Flughafens führen die Emissionen aus dem lokalen Kfz-Verkehr zu einer ähnlich hohen Belastung, wie die herantransportierten UFP-Emissionen verursacht durch den Flugbetrieb.

Die Ausbreitung der UFP-Emissionen vom Flughafen in das Umland wurde exemplarisch entlang der Hauptwindrichtung in Richtung Nordosten durch Messungen in F-Schwanheim und F-Niedwald bis zur 14 km entfernten Station in F-Riedberg dokumentiert. Die typischen UFP-Emissionen aus dem Flugbetrieb sind, wenn auch in deutlich geringerer Konzentration, bis in diese Entfernung nachweisbar. Der durch diese Emissionen im Vergleich zur Hintergrundkonzentration verursachte zusätzliche Beitrag zur UFP-Immission nimmt mit zunehmender Entfernung exponentiell ab. In F-Riedberg führen die zusätzlichen Emissionen bei Wind aus Richtung Flughafen zu einer Erhöhung der UFP-Konzentration von etwas mehr als 25 %. Sie beeinflussen somit bei südwestlichem Wind vermutlich unter anderem weite Teile des Frankfurter Stadtgebiets. Es ist zu erwarten, dass bei anderen Windrichtungen die UFP-Emissionen ähnlich weit in das Umland verbreitet werden. Inwieweit dies die entsprechende mittlere Belastung durch UFP an einzelnen Standorten beeinflusst, hängt wiederum hauptsächlich davon ab, wie häufig sich ein Standort in der Abluft des Flughafens befindet.

Die vorübergehend sehr niedrigen Flugbewegungszahlen infolge der Covid-19-Pandemie nehmen aktuell kontinuierlich zu und führen auch bei dem verursachten Zusatzbeitrag an ultrafeinen Partikeln zu einem Anstieg. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Anstieg mit den weiter steigenden Flugbetriebszahlen ebenfalls fortsetzen wird.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Methoden	3
2.1	Flugbetrieb	3
2.2	Geräte zur UFP-Messung	3
2.3	Winddaten	4
2.4	Windsektoren und Hintergrundwerte	5
2.5	Standorte und Messzeitraum	6
3	Ergebnisse	9
3.1	Überblick über die UFP-Konzentration an verschiedenen Standorten	9
3.2	Entwicklung der UFP-Konzentration während der Covid-19-Pandemie	13
3.3	Einfluss des Straßenverkehrs auf die UFP-Konzentration	15
3.4	Räumliche Ausbreitung der UFP-Emissionen	19
4	Diskussion und Schlussfolgerungen	22
5	Ausblick	23
6	Anhang	24
6.1	Kurzbeschreibung der Messstationen mit UFP-Messungen	24
6.2	Mittlere UFP-Konzentration in Abhängigkeit der Windrichtung	27
6.3	Definition des Windsektors Flughafen	30
	Glossar	31
	Danksagung	32
	Literaturangaben	34

1 Einleitung

Als ultrafeine Partikel (UFP) beziehungsweise Ultrafeinstaub werden alle Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 100 Nanometer (nm) bezeichnet. Sie bilden damit die kleinsten festen und flüssigen Teilchen in unserer Luft. Ultrafeine Partikel entstehen als Produkt aus gasförmigen Vorläufern und während Verbrennungsprozessen. Abhängig von ihrer jeweiligen Quelle, weisen UFP sehr unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften auf. 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 hauptsächlich im Rahmen von Forschungsprojekten erfasst, nicht aber kontinuierlich innerhalb der Luftqualitätsüberwachung der Messnetze der Bundesländer. Der bisher umfassendste Satz an UFP-Messdaten in Deutschland wurde im Rahmen des *German Ultrafine Aerosol Network* (GUAN) erhoben. Dieser umfasst UFP-Messdaten über mehrere Jahre von aktuell 17 deutschen Standorten (Birmili et al. 2016; Sun et al. 2020).

Ultrafeinstaub ist in den letzten Jahren vor allem durch mögliche gesundheitliche Auswirkungen in den Fokus geraten. Ultrafeine Partikel können aufgrund ihrer geringen Größe besonders tief in die Lunge eindringen und grundsätzlich in geringem Maße auch in den Blutkreislauf gelangen (u.a., Geiser et al. 2013). Außerdem bieten ultrafeine Partikel eine große spezifische Oberfläche für die Anlagerung weiterer Schadstoffe (Cassee et al. 2019). Während sich in toxikologischen Studien bereits erste gesundheitliche Effekte konkretisieren, mangelt es jedoch noch an systematischen und quantitativen epidemiologischen Studien, anhand derer man Gesundheitseffekte und mögliche Dosis-Wirkungs-Beziehungen von UFP belegen und quantifizieren könnte (u.a., Ohlwein et al. 2018, Cassee et al. 2019). Durch die wachsende Anzahl an Studien zur gesundheitlichen Wirkung ultrafeiner Partikel, spricht sich die Weltgesundheitsorganisation (WHO) in ihren neuesten Empfehlungen zur Luftqualität dafür aus, bestehende Luftmessnetze um zusätzliche, harmonisierte UFP Messungen zu erweitern (World Health Organization 2021).

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) beschäftigt sich bereits seit 2015 mit dem Thema ultrafeine Partikel, da insbesondere der Flughafen Frankfurt in den Fokus als mögliche Quelle für Ultrafeinstaub in der Region gerückt ist. Internationale wissenschaftliche Studien haben gezeigt, dass im Einflussbereich von internationalen Flughäfen teilweise stark erhöhte Anzahlkonzentrationen von UFP zu finden sind (z.B. Hudda et al. 2014; Keuken et al. 2015). Messungen in London, Barcelona, Zürich und Helsinki legen nahe, dass sich ultrafeine Partikel der jeweiligen Flughäfen bis in die nahegelegenen Stadtgebiete ausbreiten können (Rivas et al. 2020, Zhang et al. 2020). Außerdem zeigen Studien, dass Flugzeugtriebwerke große Mengen an besonders kleinen ultrafeinen Partikeln emittieren (Stacey 2019). Studien zur Gesundheitswirkung von UFP aus dem Flugbetrieb weisen auf kurzfristige Beeinträchtigungen der Lungenfunktion und erhöhte Entzündungswerte hin (z.B. Lammers et al. 2020, Habre et al. 2018).

Das HLNUG hat die bisherigen Ergebnisse in drei Berichten veröffentlicht (Rose und Jacobi 2018, Rose und Jacobi 2019, Rose, Ditas et al. 2020). Wesentliche Erkenntnisse werden hier noch einmal kurz zusammengefasst.

- Die Emissionen aus Triebwerken erzeugen sehr viele sehr kleine Partikel (< 30 nm). Diese führen im Umfeld des Flughafens zu Zeiten mit Flugbetrieb und bei Wind aus Richtung Flughafen zu einer deutlichen Erhöhung der UFP-Konzentration (Rose und Jacobi 2018).
- Hierbei wurden Emissionen auf dem Flughafengelände und in unmittelbarer Umgebung des Flughafens als dominante Quelle für UFP identifiziert.
- Der Einfluss landender Flugzeuge auf die bodennahe UFP-Konzentration ist bis zu Flughöhen < 400 m nachweisbar (Rose und Jacobi 2019, Maron 2020).
- Wie stark letztlich ein Standort von den Emissionen des Flughafens beeinflusst wird, hängt von der Entfernung vom Flughafen ab und davon, wie häufig sich dieser Standort aufgrund der vorherrschenden Windrichtung in der Abluft des Flughafens befindet (Rose und Jacobi 2019, Rose, Ditas et al. 2020).
- Die mit der Covid-19-Pandemie verbundenen, geringen Flugbewegungszahlen während der ersten Phasen der Pandemie haben gezeigt, dass der Beitrag der Flughafen-UFP zusätzlich zur Hintergrundkonzentration proportional zur Anzahl der Flugbewegungen ist. Dies bedeutet, dass je intensiver der Flugbetrieb ist (in Bezug auf Flugbewegungen), desto höher ist die Konzentration ultrafeiner Partikel an den entsprechenden Messstellen (Rose, Ditas et al. 2020).

Die UFP-Messungen des HLNUG wurden in den letzten Jahren kontinuierlich ausgebaut. Mittlerweile gibt es 9 Standorte, an denen UFP gemessen werden. Drei dieser Standorte sollen dauerhaft betrieben werden (F-Schwanheim, Raunheim, F-Friedberger Landstraße) und perspektivisch auch einen Beitrag im GUAN-Netzwerk leisten. Die weiteren sechs Standorte werden je nach Fragestellung im Rhein-Main-Gebiet verlagert.

In dem vorliegenden 4. Bericht sollen die Ergebnisse der Messungen an den bisherigen Standorten der letzten Jahre zusammengefasst und eingeordnet werden. Hierbei wird darauf eingegangen bis zu welcher Entfernung sich die typischen Emissionen des Flugbetriebs nachweisen lassen und inwieweit sich diese von denen aus dem Straßenverkehr unterscheiden. Weiterhin wird die Entwicklung der UFP-Konzentration bei wieder steigenden Flugbetriebszahlen thematisiert.

2 Methoden

2.1 Flugbetrieb

Der Verkehrsflughafen Frankfurt am Main liegt im Südwesten der Stadt Frankfurt, etwa 10 km vom Stadtkern entfernt. Im Jahr 2019 landeten und starteten im Durchschnitt ca. 1400 Flugzeuge pro Tag. Mit Beginn der COVID-19-Pandemie ging die Anzahl der Flugbewegungen deutlich zurück. Im Zeitraum von April bis Ende Mai 2020 fanden im Durchschnitt ca. 240 Flüge pro Tag statt. Seit April 2021 nahm der Flugverkehr wieder deutlich zu, so dass bis Ende August 2021 ca. 950 Flugbewegungen pro Tag erreicht wurden.

Die Anzahl der Flugbewegungen ist am Wochenende 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: die Centerbahn und Südbahn, die sowohl zum Starten als auch zum Landen ausgelegt sind, die Landebahn Nordwest (LBNW) und die Startbahn 18 West (SBW). Die beiden letzteren blieben seit Beginn der COVID-19-Pandemie jeweils für einige Monate geschlossen (LBNW: 23.03.2020 – 07.07.2020 sowie 14.12.2020 – 31.05.2021; SBW: 23.03.2020 – 15.10.2020). In Abhängigkeit der Windrichtung und -geschwindigkeit werden die Landebahn Nordwest und das Parallelbahnsystem aus unterschiedlichen Richtungen angefliegen. Es wird hier zwischen Ost- und Westbetrieb (BR 07 bzw. BR 25) unterschieden, wobei sich die Bezeichnung an der Lande- und Startrichtung orientiert (bei bspw. Westbetrieb wird in Flugrichtung West gestartet und gelandet).

2.2 Geräte zur UFP-Messung

Zur physikalischen Charakterisierung der ultrafeinen Partikel setzt das HLNUG zwei verschiedene Messmethoden ein. Aktuell werden an drei Standorten Kondensationspartikelzähler (CPC, engl. **C**ondensation **P**article **C**ounter) betrieben. Diese erfassen die Gesamtpartikelanzahlkonzentration, also die Anzahl aller Partikel innerhalb eines bestimmten Luftvolumens (Partikel pro Kubikzentimeter) ohne eine Aussage zur Größe der Partikel treffen zu können. Es werden zwei verschiedene Gerätetypen eingesetzt, an zwei Standorten ein CPC der Fa. Grimm Aerosol Technik (Modell 465) und an einem Standort ein CPC der Fa. TSI (Modell 3750). Die kleinste Größe ab der Partikel von den hier eingesetzten CPCs detektiert werden können, liegt bei ca. 7 nm. Oberhalb von ca. 2200 nm (Modell der Fa. Grimm) bzw. oberhalb von 1000 nm (Modell der Fa. TSI) werden keine Partikel mehr erfasst. Die Anzahlkonzentration von Partikeln größer als 1000 nm ist in der Regel vernachlässigbar gegenüber der Anzahlkonzentration von Partikeln kleiner als 1000 nm. Daher werden die Partikelanzahl-Konzentrationen, welche durch die unterschiedlichen CPCs erhoben werden, als gleichwertig betrachtet und der Messbereich im Folgenden einheitlich als > 7 nm (ohne Obergrenze) angegeben.

An derzeit sechs Standorten wird die Anzahlgrößenverteilung der Partikel mit einem Partikelgrößenspektrometer (SMPS, engl. **S**canning **M**obility **P**article **S**izer) der Fa. TSI GmbH (Modell 3938) gemessen (siehe Abb. 1). In einem Durchlauf über ca. 5 min wird die Anzahlkonzentration, d. h. die Partikelanzahl pro Kubikzentimeter Luftvolumen ($1/\text{cm}^3$) in 108 Größenkanälen im Bereich von ca. 10 nm bis 500 nm bestimmt. An Messstellen, die durch sehr schnell variierende Partikelanzahlkonzentration gekennzeichnet sind (F-Friedberger Landstraße, Flughafen-

West, Flughafen-Ost), wurde die Scanzeit auf 2 min reduziert. Hierbei liegt zeitlich gesehen ein Schwerpunkt auf der Erfassung des Größenbereichs von 10 nm bis 100 nm, auf den etwas mehr als die Hälfte der Scanzeit entfällt. Anhand der Anzahlgrößenverteilung lässt sich ablesen, in welcher Menge (Anzahl pro Luftvolumen) die Partikel bestimmter Größen in der Luft vorhanden sind. Aus der Form der Verteilung lassen sich gegebenenfalls Rückschlüsse auf dominierende Partikelquellen ziehen. Die Partikelanzahl-Größenverteilung wird in der Regel normiert auf die jeweilige Kanalbreite angegeben ($dN / d\log D$). Nachteil dieses Messverfahrens ist die geringere Zeitauflösung gegenüber dem CPC, der eine Messung im Sekundenbereich erlaubt. 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). Diese ist jedoch nicht direkt mit der Gesamtkonzentration an den Standorten mit CPC-Messungen vergleichbar, da die betriebenen CPCs zusätzlich Partikel kleiner als 10 nm und größer als 500 nm detektieren. Während die Partikel größer 500 nm bei der Betrachtung der Anzahl kaum ins Gewicht fallen, kann der Beitrag unter 10 nm erheblich sein.

Bei allen Messungen wird die angesaugte partikelhaltige Luft jeweils vor dem Eintritt in das Messgerät mit einem Nafion[®]-Trockner auf unter 35 % relative Feuchte getrocknet. Im laufenden Betrieb werden alle UFP-Messdaten kontinuierlich auf Plausibilität überprüft und die Geräte in einem vierwöchigen Zyklus gewartet. Zusätzlich werden in regelmäßigen Abständen die Partikelgrößenpektrometer im Weltkalibrierzentrum für Aerosolphysik (WCCAP, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig) überprüft und kalibriert. Die Kondensationspartikelzähler der Fa. Grimm werden regelmäßig durch den Hersteller kalibriert. Das HLNUG folgt damit den Empfehlungen des Weltkalibrierzentrums für Aerosolphysik zur Durchführung und Qualitätssicherung von Ultrafeinstaubmessungen (Wiedensohler, Birmili et al. 2012; Wiedensohler, Wiesner et al. 2018).

Zur Vereinheitlichung wird im Folgenden der Begriff *UFP-Konzentration* als Synonym für die Anzahlkonzentration der gemessenen Partikel verwendet. Da die verwendeten Kondensationspartikelzähler auch Partikel größer als 100 nm erfassen, handelt es sich hierbei jedoch streng genommen nicht mehr nur um ultrafeine Partikel. Stattdessen wird die Summe aus feinen und ultrafeinen Partikel detektiert, eine Unterscheidung zwischen den beiden Größenfraktionen ist bei diesem Messverfahren nicht möglich. In diesem Zusammenhang wird auch häufig von Messungen im „submikronen Bereich“ gesprochen, womit Partikel $< 1 \mu\text{m}$ Durchmesser gemeint sind. Die Anzahlkonzentration von Partikeln größer als 100 nm ist im Kontext dieses Berichts allerdings deutlich kleiner als die Anzahlkonzentration ultrafeiner Partikel. Insofern wirkt sich diese Vereinfachung nicht auf die inhaltlichen Aussagen dieses Berichts in Bezug auf die UFP-Konzentration aus. Diese Konvention ist weit verbreitet und findet auch in anderen Betrachtungen Anwendung (bspw. Cassee et al. 2019).

2.3 Winddaten

Die in diesem Bericht verwendeten Winddaten stammen von der Messstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) auf dem Flughafengelände (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420). Bei der Auswertung der Partikelmessdaten wurde angenommen, dass zu einem Zeit-

punkt die Strömungsverhältnisse am Standort der UFP-Messung mit denen am Standort der Windmessung gleichzusetzen sind. Zwar ergibt sich durch die Entfernung verschiedener 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 °, zeitliche Auflösung: 10 Minuten) einzuschätzen ist.

2.4 Windsektoren und Hintergrundwerte

Je nach geografischer Lage werden die unterschiedlichen UFP-Messstellen für unterschiedliche Windrichtungsbereiche vom Frankfurter Flughafen beeinflusst. Die hier verwendeten Windrichtungsbereiche wurden anhand zweier Kriterien festgelegt. Hierbei wurden sowohl die geografische Lage der Messstation zum Flughafen, als auch die windrichtungsabhängige UFP-Konzentration berücksichtigt. Die Vorgehensweise wird im Anhang auf Seite 30 näher erläutert. Tabelle 1 benennt die Windsektoren, für die sich die einzelnen Standorte im Einflussbereich des Flugbetriebs befinden, und zeigt deren Auftrittshäufigkeit.

Im Folgenden werden die Messungen für verschiedene Auswertungen in unterschiedliche Zeiträume unterteilt, um den Effekt der Emissionen durch den Flugbetrieb gegenüber der sonst vorherrschenden UFP-Konzentration zu verdeutlichen. Es werden einerseits Zeiträume zu denen der Wind aus Richtung des Flughafens weht und der Flughafen in Betrieb ist (5-23 Uhr Ortszeit) zusammengefasst (*Flughafen Tag*). Andererseits werden alle Zeiträume, zu denen der Flughafen nicht in Betrieb ist (0-5 Uhr Ortszeit; inklusive *Abklingphase* nach Ende des Flugbetriebs) oder der Wind aus anderen Windrichtungen weht, als stationstypische *Hintergrundkonzentration* definiert.

Tabelle 1: Überblick über die an den Messstellen verwendeten Messgeräte, den hier betrachteten Messzeitraum und die Datenverfügbarkeit in diesem Zeitraum. Weiterhin werden die Entfernung der Messstelle zur Grenze des Flughafengeländes, der Windrichtungsbereich, für den der Flugbetrieb die Messungen an der Messstelle beeinflusst, und die Häufigkeit, wie oft die Windrichtung im betrachteten Zeitraum in diesen Bereich fiel, angegeben.

Station	Gerät	Messzeitraum		Verfügbarkeit	Bezug zum Flughafen		
		von:	bis:		Entf. [km]	Wind-sektor	Häufigkeit
Raunheim	SMPS	2017-09-01	2021-08-31	97,3%	5,3	35° – 124°	23,3%
F-Schwanheim	SMPS	2017-09-28	2021-08-31	96,4%	2,8	145° – 224°	35,7%
Flughafen-A3	SMPS	2018-08-02	2019-02-25	91,3%	0,2	125° – 244°	43,8%
Flughafen-Ost	SMPS	2019-02-25	2020-04-29	98,8%	-	235° – 334°	18,9%
F-Niedwald	SMPS	2019-04-25	2021-01-11	97,3%	7	175° – 214°	26,4%
Flughafen-West	SMPS	2020-04-29	2021-08-31	96,6%	-	15° – 134°	32,4%
F-Friedb. Landstr.	SMPS	2020-04-29	2021-08-31	91%	11,5	195° – 234°	25%
F-Riedberg	SMPS	2020-09-24	2021-08-31	96%	14,1	135° – 224°	38,8%
Mörfelden	SMPS	2021-02-17	2021-08-31	96,9%	4,5	335° – 34°	16,6%
F-Sachsenh.	CPC	2018-09-28	2021-08-31	85,3%	7,1	205° – 254°	25,5%
F-Oberrad	CPC	2019-03-08	2021-08-31	82,9%	10,1	205° – 254°	25,4%
Raunheim-Mönchhof	CPC	2019-09-25	2020-07-29	92,1%	1,5	45° – 124°	17,3%
Flörsheim	CPC	2020-08-06	2021-08-31	98%	5	35° – 144°	23,1%

2.5 Standorte und Messzeitraum

In diesem Bericht werden sämtliche Messdaten und Messstellen seit September 2017 bis 31. August 2021 ausgewertet. Tabelle 1 fasst Informationen zu den einzelnen Messstellen zusammen. Weitere Messungen in Kooperation mit dem Umweltbundesamt mit einem anderen Kondensationspartikelzähler (Fa. TSI, UCPC) aus den Jahren davor werden in diesem Bericht nicht thematisiert. Die Messungen mit diesem Gerät wurden eingestellt, da sie einen anderen Größenbereich umfassen und der UCPC bei der Kalibration durch das WCCAP nicht die notwendigen Qualitätsziele erfüllt hat. Informationen zu den Messungen vor 2017 können im zweiten Zwischenbericht (Rose und Jacobi 2019) eingesehen werden.

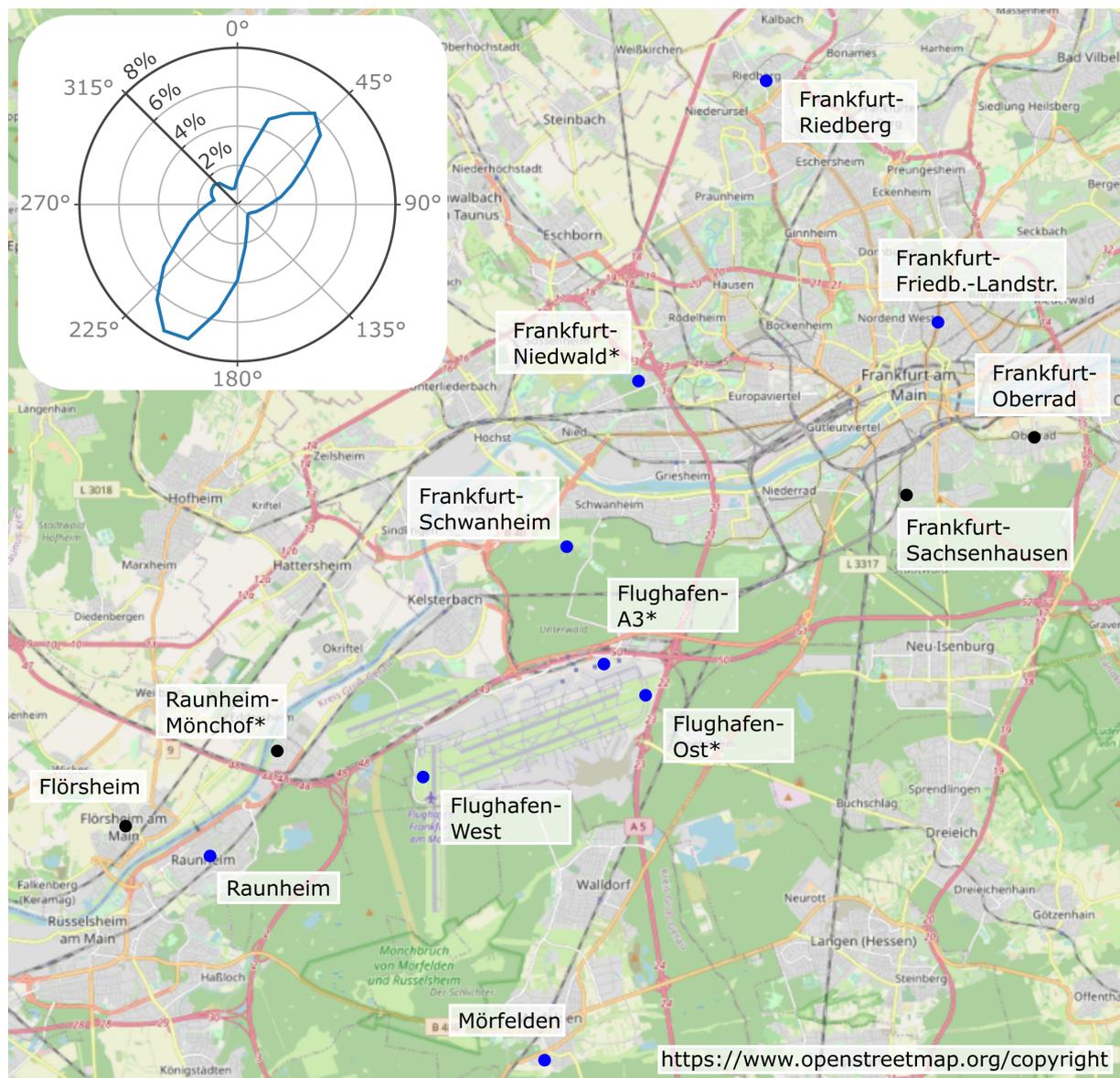


Abbildung 1: Karte mit allen UFP-Messungen seit September 2017. Blaue Punkte markieren Messstellen mit großenaufgelösten UFP-Messungen (SMPS-Geräte). Schwarze Punkte markieren Messstellen mit Geräten zur Erfassung der Gesamtpartikelanzahl (CPC-Geräte). Bei markierten Messstellen (*) sind die Messungen bereits abgeschlossen. Die Windrose im oberen linken Teil der Grafik stellt eine Häufigkeitsverteilung der Windrichtung für Windgeschwindigkeiten größer als 1 m/s im Zeitraum von September 2017 bis einschließlich August 2021 dar. <https://www.openstreetmap.org/copyright>

Abbildung 1 zeigt eine Karte der Region um den Frankfurter Flughafen inklusive der Standorte an denen UFP-Messungen stattfinden oder stattgefunden haben (*). Hierbei wird zwischen Standorten mit größen aufgelösten Messungen (SMPS, blaue Markierungen) und Messungen der Partikelanzahl-Konzentration (schwarze Markierungen) unterschieden.

Die Standortwahl orientiert sich an unterschiedlichen Aspekten und Fragestellungen. Die Standorte in Raunheim und F-Schwanheim wurden nach den im Rhein-Main-Gebiet vorherrschenden Hauptwindrichtungen Süd-Südwest und Nordost ausgewählt. Eine entsprechende Windverteilung ist als Inlay in Abb. 1 dargestellt. Beide Standorte liegen relativ nah zum Flughafengelände und bei einer der jeweiligen Hauptwindrichtungen in der Abluft des Flughafens. Die Station Raunheim liegt zwischen den Anfluglinien auf die Center- und die Südbahn und soll somit zusätzlich den Einfluss landender Flugzeuge charakterisieren.

Die Messstellen F-Niedwald und F-Riedberg folgen der Hauptwindrichtung aus Südwest und sollen Aufschluss geben über die Ausbreitung ultrafeiner Partikel vom Flughafengelände in das Stadtgebiet Frankfurt. Die Stationen F-Sachsenhausen, F-Oberrad, Flörsheim und Raunheim-Mönchhof befinden sich bei West- bzw. Ostbetrieb in der unmittelbaren Nähe der Anfluglinien auf die Landebahn-Nordwest und sollen den Einfluss landender Flugzeuge charakterisieren. Der Standort Mörfelden befindet sich südlich des Flughafengeländes in der Nähe einer Abfluglinie der Startbahn-West. Die Station in der Friedberger Landstraße in Frankfurt stellt eine verkehrsbezogene Messstelle dar und soll Unterschiede zwischen dem Einfluss der Kfz-Emissionen und dem Einfluss des Flugbetriebs beleuchten. Die Stationen auf und in unmittelbarer Nähe zum Flughafengelände (Flughafen-A3, Flughafen-Ost, Flughafen-West) sollen die Bedingungen nah an der Quelle charakterisieren.

Die Stationen liegen aufgrund der markanten Windrichtungsverteilung mit den beiden Hauptwindrichtungen Süd-Südwest und Nordost unterschiedlich häufig im Einflussbereich des Flughafens. In Tab. 1 sind die Windsektoren für den jeweiligen Einflussbereich des Flugbetriebs und die Auftretshäufigkeiten für die einzelnen Stationen zusammengefasst.

Abbildung 2 fasst die Messzeiträume und zugehörige Datenverfügbarkeit an den einzelnen Stationen grafisch zusammen. Während die Stationen Raunheim und F-Schwanheim seit 2017 dauerhaft messen, sind andere Messstellen als temporäre Messstellen vorgesehen. Als weitere vorerst dauerhafte Messstelle für ultrafeine Partikel wurde die Station Frankfurt Friedberger Landstraße ausgewählt. Die Grafik visualisiert ebenfalls den zügigen Umzug von Messcontainern von einer Messstelle zu einer neuen. So sind Messungen beispielsweise von Flughafen-Ost nach -West oder von F-Niedwald nach Mörfelden verlagert worden. Die Datenverfügbarkeit ist für fast alle Standorte deutlich höher als 90 %. Mit 83 % und 85 % ist die Datenabdeckung der CPCs in F-Oberrad und F-Sachsenhausen durch einen technischen Defekt und die dadurch notwendige intensive Wartung und Reparatur beim Hersteller etwas niedriger. Weitere Details zu den Messstellen sind in Tab. 1 zu finden.

Im vergangenen Bericht (Rose, Ditas et al. 2020) wurde bereits ausführlich über den Einfluss der durch die Covid-19-Pandemie verursachten verringerten Emissionen auf die UFP-Konzentration an einigen Messstellen eingegangen. Es konnte festgestellt werden, dass der starke Rückgang der Flugbewegungen einen ähnlich starken Rückgang der durch den Flugbetrieb verursachten UFP-Konzentration zur Folge hatte. Um diesen starken Veränderungen

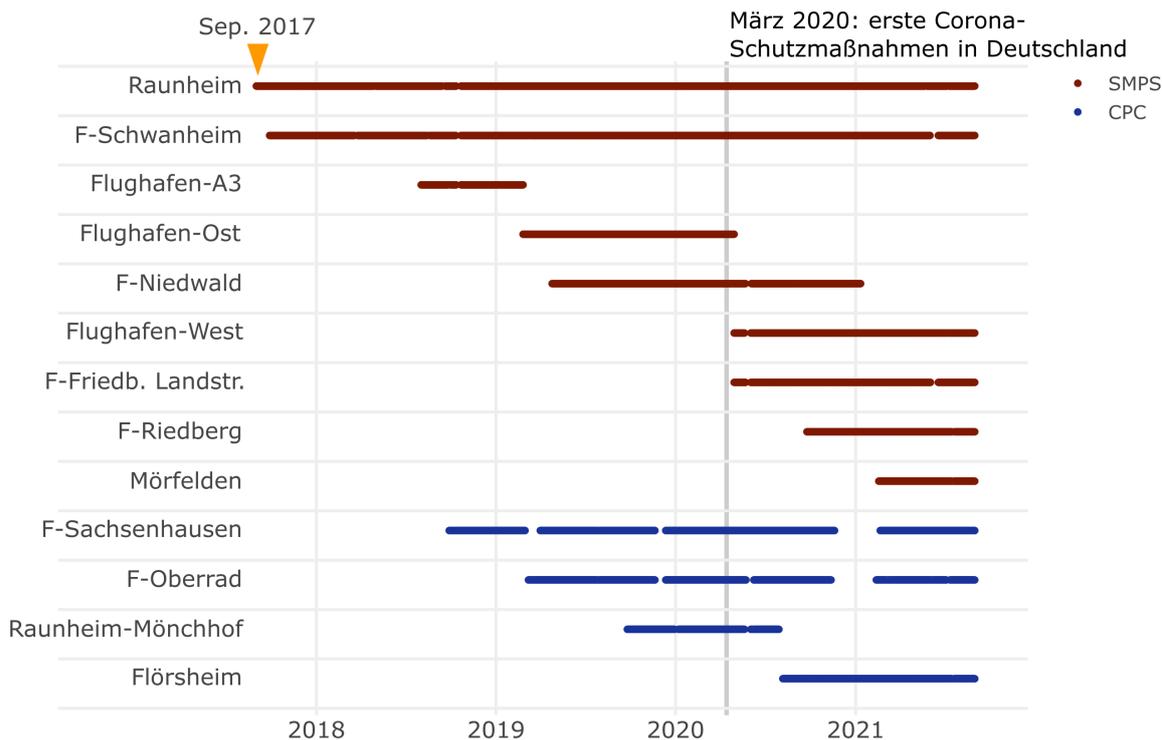


Abbildung 2: Übersicht über die Messzeiträume bisheriger UFP-Mesungen seit September 2017. Im oberen Teil der Abbildung sind Messstellen mit größen aufgelösten Messungen (SMPS, rot), im unteren Teil Messungen der Gesamtpartikelanzahlkonzentration (CPC, blau) dargestellt.

durch die Covid-19-Pandemie gerecht zu werden, wurde der Datensatz teilweise in den Zeitraum *vor Covid-19* und *während Covid-19* (nach dem 23. März 2020) unterteilt.

Im Anhang auf Seite 24 sind Kurzbeschreibungen der einzelnen Messstationen zu finden.

3 Ergebnisse

3.1 Überblick über die UFP-Konzentration an verschiedenen Standorten

In Abb. 3 wird ein Überblick über die Konzentration bisheriger kontinuierlicher UFP-Messungen seit 2017 dargestellt. Die Balken stellen dabei den Konzentrationsbereich von 50 % der jeweiligen Daten dar; 25 % der Messwerte weisen niedrigere und 25 % höhere Konzentrationswerte auf. Es wird hierbei zwischen Messungen während des Flugbetriebs und bei Wind aus Richtung des Flughafensektors (orange, bzgl. Windsektor siehe Tab. 1) und Messungen bei allen anderen Bedingungen unterschieden (blau). Der blaue Balken gibt damit eine stationstypische Hintergrundkonzentration an, während der orange Balken ein Maß für die UFP-Konzentration unter dem Einfluss des Flugbetriebs darstellt.

In dieser Abbildung wird nicht in unterschiedliche Zeiträume vor oder während der Covid-19-Pandemie unterschieden. Sie soll vor allem die unterschiedlich hohen UFP-Konzentrationen an unterschiedlichen Standorten sowie deren unterschiedliche Variabilität grafisch verdeutlichen. Mittlere UFP-Konzentrationen in Abhängigkeit der Windrichtung und der Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens sind in Abb. 10 und Abb. 11 im Anhang (Kap. 6.2) zu finden.

Ergänzend zu Abb. 3 sind in Tab. 2 die entsprechenden Mittelwerte für die unterschiedlichen Bedingungen während des Flugbetriebs und bei Wind aus Richtung Flughafen, sowie der typischen Hintergrundkonzentration zusammengefasst. Im Gegensatz zu Abb. 3 wurden hierbei jedoch die Zeiträume vor und während der Covid-19-Pandemie unterschieden, um bei den Konzentrationswerten eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Erwartungsgemäß ist der Einfluss durch den Flugbetrieb gegenüber der Hintergrundkonzentration am größten an den Messstellen auf dem und in unmittelbarer Nähe zum Flughafengelände. So steigt beispielsweise unter dem Einfluss des Flugbetriebs die UFP-Konzentration an der Station Flughafen-A3 um etwa das Vierfache an von ca. 14.000 für den stationstypischen Hintergrund auf etwa 68.000 Partikel pro cm^3 . Durch die unmittelbare Nähe und daraus folgenden breiten Windrichtungsbereich (vgl. Abb. 10) lag die Messstelle auch besonders häufig (ca. 44 %) im Einflussbereich des Flugbetriebs. An den Stationen Flughafen-Ost und Flughafen-West ist der Unterschied zwischen Konzentration bei Einfluss des Flugbetriebs und Hintergrundkonzentration weniger stark ausgeprägt. Eine mögliche Ursache könnte ein geringerer Einfluss durch die Aktivitäten an den Terminals und auf dem Vorfeld sein, welche räumlich weiter entfernt von diesen Messstellen sind. Hinzu kommt weiterhin, dass die Messungen an der Station Flughafen-West erst während der Covid-19-Pandemie, also bei geringeren Flugverkehrszahlen, begonnen haben.

Ein ebenfalls hoher Anstieg der Hintergrundkonzentration von etwa 16.000 auf 55.000 Partikel pro cm^3 (vor der Covid-19-Pandemie) ist für die Messungen in Raunheim-Mönchhof zu verzeichnen. An dieser Messstelle befinden sich Flugzeuge im Anflug auf die Landebahn-Nordwest in einer Höhe von etwa 100 m über Grund. Einzelne dieser Überflüge verursachen teilweise erhebliche Konzentrationsspitzen am Boden (siehe auch Freund 2019). Die mittlere UFP-Konzentration ist am höchsten bei Wind aus den Richtungen $60^\circ - 80^\circ$ (vgl. Abb. 11), welches den Schluss nahelegt, dass an dieser Station sowohl Überflüge als auch der horizontale Trans-

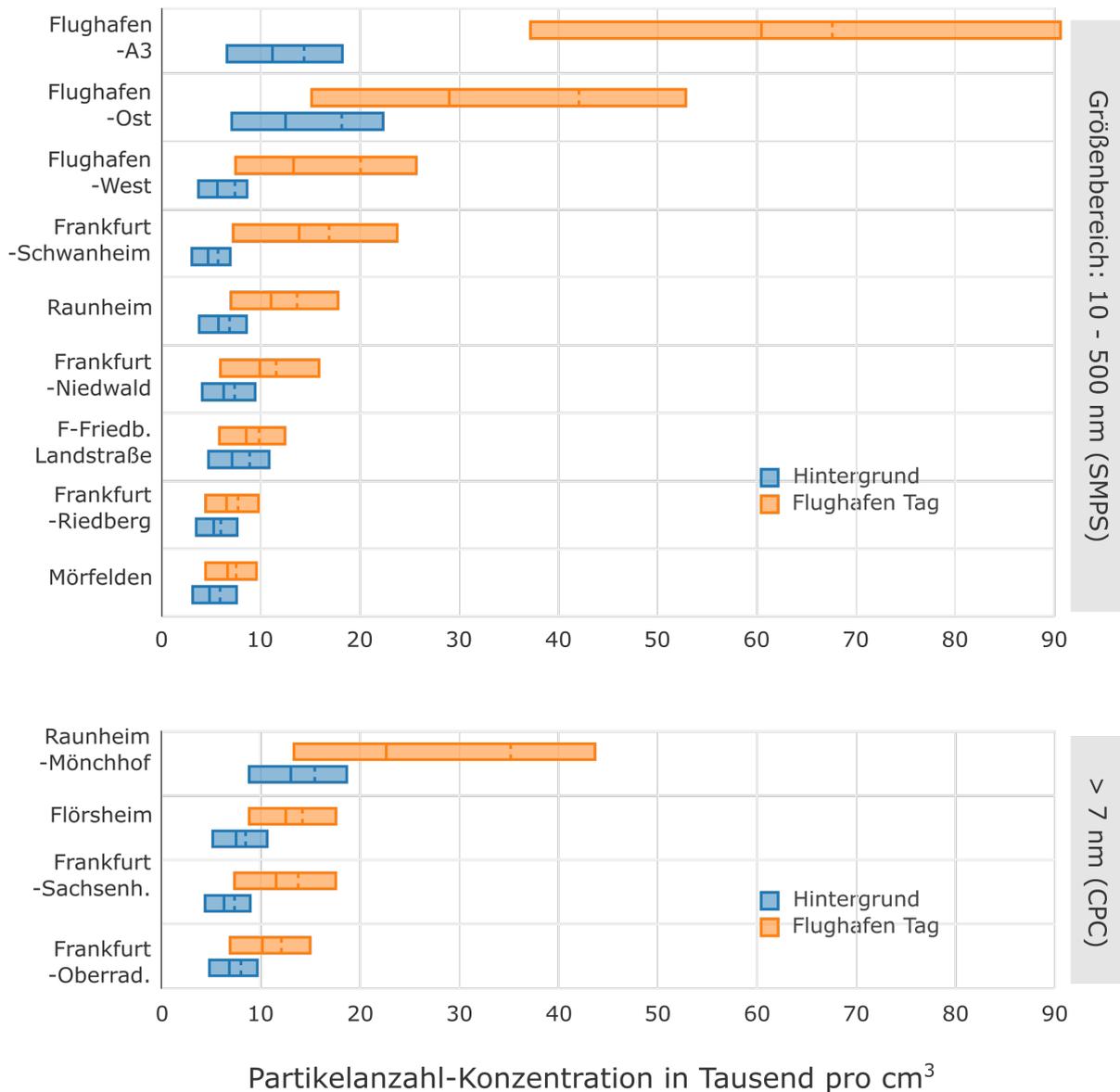


Abbildung 3: Boxplots über die Konzentration bisheriger UFP-Messungen seit September 2017. Die Boxen spannen jeweils den Interquartilsabstand auf. Das bedeutet 25 % der Messwerte liegen höher und 25 % sind niedriger als der angegebene Bereich. Der senkrechte durchgezogene Strich innerhalb der Boxen kennzeichnet den Median, der unterbrochene Strich kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert. Orange-farbene Boxen markieren Messungen bei Wind aus Richtung Flughafen und zu den Betriebszeiten des Flughafens zwischen 5 - 23 Uhr. Blaue Boxen fassen alle anderen Messungen zusammen und charakterisieren den stationstypischen Hintergrund. An den unterschiedlichen Messstellen werden unterschiedliche Messgeräte eingesetzt, die sich in ihrem Messbereich unterscheiden. Die SMPS-Messungen beziehen sich auf den Größenbereich zwischen 10 – 500 nm, die CPC-Messungen auf > 7 nm. Die Grafik bezieht sich auf die in Tab.1 angegebenen Zeiträume und beinhaltet somit sowohl Zeiträume vor als auch während der Covid-19-Pandemie.

port vom Flughafengelände zur Belastung durch UFP beitragen. Die besonders hohe Hintergrundkonzentration an der Station Raunheim-Mönchhof resultiert aus weiteren umliegenden Quellen im angrenzenden Gewerbegebiet sowie der nah gelegenen Bundesautobahn. So wurden insbesondere nachts (in Abwesenheit anfliegender Flugzeuge) hohe UFP-Konzentrationen verursacht durch den Lkw-Verkehr im Gewerbegebiet verzeichnet.

Ein ebenfalls auffällig hoher Unterschied zwischen der UFP-Belastung im Hintergrund und bei Einfluss durch den Flugbetrieb ist an den Stationen in F-Schwanheim und Raunheim sichtbar. Vor der Covid-19-Pandemie stieg in Raunheim die UFP-Konzentration im Mittel von knapp 7.000 auf 15.000 Partikel bei entsprechendem Einfluss durch den Flugbetrieb, während der Covid-19-Pandemie ist der Effekt deutlich weniger stark ausgeprägt. Für F-Schwanheim ergibt sich ein Anstieg von knapp 6.000 auf über 18.000 Partikel pro cm^3 (vor der Covid-19-Pandemie).

Um die Verbreitung der UFP-Emissionen entlang der Hauptwindrichtung in das Stadtgebiet Frankfurt zu verfolgen, wurden zusätzlich zu F-Schwanheim die Stationen F-Niedwald und F-Riedberg eingerichtet. Sowohl für F-Niedwald als auch für F-Riedberg sind erhöhte UFP-Konzentrationen für den Windrichtungsbereich des Flughafens feststellbar (vgl. Abb. 10). Diese fallen im Vergleich zu F-Schwanheim deutlich geringer aus, was in Abhängigkeit der Entfernung auf einen zunehmend geringer werdenden Einfluss schließen lässt. Im Fall von F-Riedberg ist allerdings zu beachten, dass die Messungen hier erst während der Covid-19-Pandemie begannen. Nichtsdestotrotz sind die typischen Eigenschaften der UFP aus Flughafenemissionen (charakteristische Partikelanzahl-Größenverteilung, Tagesgang) auch bis in die nördlichen Stadtteile Frankfurts nachweisbar. Weiteres zur räumlichen Verbreitung der UFP ist in Kap. 3.4 zu finden.

Die Messstelle in Mörfelden liegt als einzige Messstelle südlich des Flughafengeländes und befindet sich entsprechend der Hauptwindrichtungen verhältnismäßig selten in der Abluft des Flughafens. Für Wind aus nördlichen Richtungen ergibt sich dort eine erhöhte UFP-Konzentration (vgl. Abb. 10). Der Anstieg ist jedoch weniger stark ausgeprägt als beispielsweise in der ähnlich weit vom Flughafen entfernten Messstation in Raunheim. Inwieweit der bisher relativ kurze Messzeitraum (seit Februar 2021) und der durch die Covid-19-Pandemie bedingte reduzierte Flugbetrieb hierbei eine Rolle spielen, ist noch nicht abschließend geklärt. Dies und unter anderem auch ein möglicher Einfluss startender Flugzeuge auf die UFP-Belastung in Mörfelden ist Gegenstand aktueller und zukünftiger Untersuchungen.

An der Messstelle in Flörsheim zeichnet sich ein ähnliches Bild wie in Raunheim ab. Die UFP-Konzentrationen liegen in Flörsheim etwas höher als in Raunheim. Zumindest teilweise lässt sich dies durch den abweichenden Messbereich erklären. Bei entsprechendem Einfluss durch den Flugbetrieb ergibt sich jedoch an beiden Stationen ein ähnlicher relativer Anstieg (60 - 70 %) gegenüber der Hintergrundkonzentration.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass an allen hier dargestellten Messstationen ein Einfluss durch den Flugbetrieb nachweisbar ist. Der Einfluss ist umso größer, je häufiger sich eine Station im Einflussbereich des Flugbetriebs befindet und je geringer die Distanz zwischen Station und Flughafengelände ist.

Tabelle 2: Mittlere Partikelanzahlkonzentrationen an verschiedenen Messstellen. Die Auswertung wurde unterteilt in die Zeiträume vor und während der Covid-19-Pandemie, sowie für verschiedene Windsektoren. An den Stationen werden verschiedene Messgeräte verwendet (SMPS, CPC) deren Messbereiche sich unterscheiden. Partikelanzahlkonzentrationen gemessen mit SMPS-Geräten beziehen sich auf den Größenbereich 10 – 500 nm. Die CPC-Geräte messen im Bereich von > 7 nm. Die Messungen wurden für den jeweiligen Windsektor Flughafen (*Flugh.*) zur Zeit des Flugbetriebs und alle anderen Zeiträume unterteilt (stationstypischer Hintergrund; *HG*). Zusätzlich wird auch der Mittelwert unabhängig von der Windrichtung und den Flugbetriebszeiten (*gesamt*) ausgewertet. Der betrachtete Zeitraum bezieht sich auf die in Tab. 1 dargestellten Zeiträume.

Station	Gerät	gesamt [1/cm ³]	vor Covid-19			während Covid-19		
			gesamt [1/cm ³]	Flugh. [1/cm ³]	HG [1/cm ³]	gesamt [1/cm ³]	Flugh. [1/cm ³]	HG [1/cm ³]
Raunheim	SMPS	8.380	8.600	15.090	6.770	7.990	11.040	6.920
F-Schwanheim	SMPS	8.770	9.390	18.780	5.600	7.710	13.120	5.770
Flughafen-A3	SMPS	32.500	32.500	67.600	14.350	-	-	-
Flughafen-Ost	SMPS	22.290	23.170	43.300	18.830	13.410	21.490	11.800
F-Niedwald	SMPS	8.350	8.760	12.880	7.330	7.870	9.440	7.360
Flughafen-West	SMPS	10.900	-	-	-	10.900	20.030	7.370
Friedb. Landstr.	SMPS	9.220	-	-	-	9.220	9.810	8.860
F-Riedberg	SMPS	6.600	-	-	-	6.600	7.490	5.870
Mörfelden	SMPS	6.330	-	-	-	6.330	7.680	5.950
F-Sachsenh.	CPC	8.640	9.360	15.950	7.730	7.840	11.180	6.980
F-Oberrad	CPC	8.890	9.740	14.260	8.500	8.150	9.940	7.610
R.-Mönchhof	CPC	18.670	21.040	55.300	16.370	15.200	18.690	14.010
Flörsheim	CPC	9.810	-	-	-	9.810	14.210	8.490

Betrachtet man die UFP-Konzentrationen im Größenbereich 10 – 500 nm für Hintergrundbedingungen, so ist auffällig, dass an den Messstellen F-Riedberg, F-Schwanheim und Mörfelden sehr ähnliche Konzentrationen in Höhe von etwa 6.000 Partikel pro cm³ auftreten. Weitere Stationen im städtischen Hintergrund wie etwa F-Niedwald und Raunheim liegen mit etwa 7.000 Partikel pro cm³ etwas darüber. In F-Niedwald könnte dies an der Nähe zum Autobahnkreuz „Frankfurt West“ liegen. Raunheim wiederum zeichnet sich durch eine deutlich dichtere Wohnbebauung in der Nähe der Messstelle aus. Damit ordnen sich die Hintergrundkonzentrationen der hier dargestellten Messstellen in eine Reihe mit weiteren Messungen im städtischen Hintergrund ein (z.B. Sun et al. 2020, Laj et al. 2020)

3.2 Entwicklung der UFP-Konzentration während der Covid-19-Pandemie

Im vorangegangenen Bericht zur Luftqualität in Bezug auf die UFP-Konzentration (Rose, Ditas et al. 2020) wurde über die Entwicklung der UFP-Konzentration während der ersten Monate der Covid-19-Pandemie berichtet. Es zeigte sich unter anderem, dass in den ersten Monaten an den Messstellen Raunheim und F-Schwanheim ein deutlicher Rückgang der UFP-Konzentration bei Wind aus Richtung des Flughafens zu verzeichnen war. Aus den größen aufgelösten Messungen konnte für den Größenbereich von 10 - 30 nm ein durch den Flugbetrieb verursachter Zusatzbeitrag an ultrafeinen Partikeln abgeleitet werden. Die Ableitung dieses Zusatzbeitrags beruhte im Wesentlichen auf dem Vergleich der Messungen während und außerhalb der Flugbetriebszeiten und bei Wind aus Richtung des Flughafensektors. Details können dem entsprechenden Bericht (Rose, Ditas et al. 2020) entnommen werden.

Eine zentrale Feststellung des Berichts war, dass sich die Verringerung der Flugbetriebszahlen auf den zusätzlichen UFP-Beitrag proportional ausgewirkt haben. Für den damaligen Bezugszeitraum von April bis einschließlich Juni 2020 wurde ein Rückgang des UFP-Beitrags durch den Flugbetrieb von ca. 80 % festgestellt, der in nahezu gleicher Höhe auch für die Anzahl der Flugbewegungen beobachtet wurde.

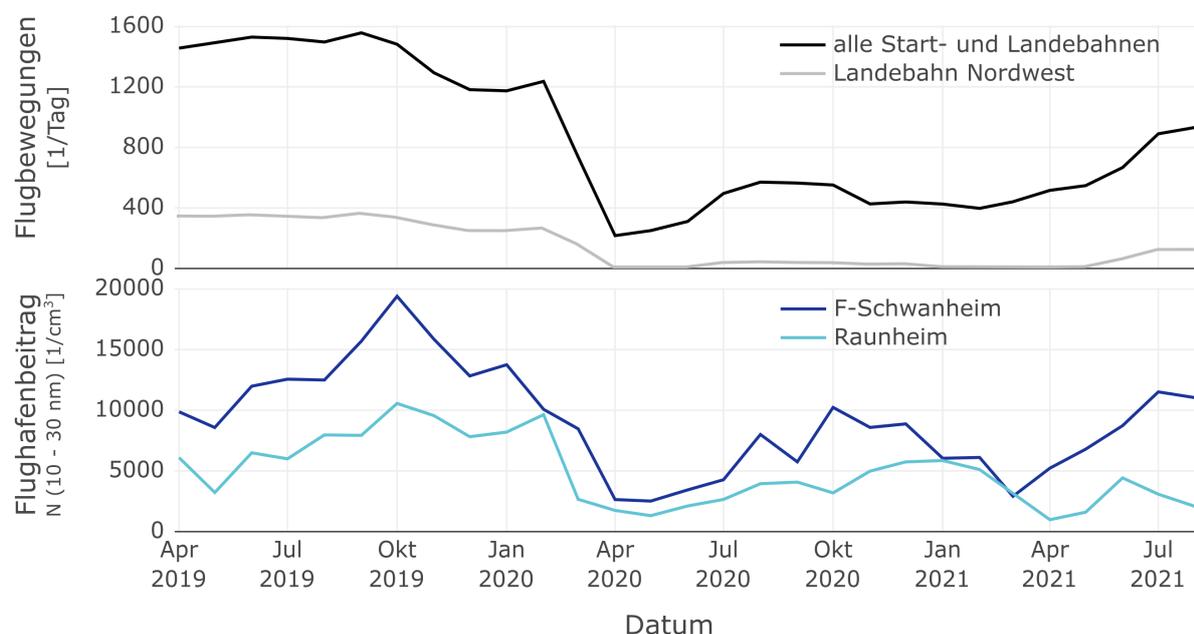


Abbildung 4: Im oberen Panel sind die mittleren Tagessummen der Flugbewegungen (Monatsmittel) insgesamt (schwarze Linie) und separat für die Landebahn Nordwest (grau) dargestellt. Darunter sind Monatsmittelwerte des durch den Flugbetrieb verursachten Zusatzbeitrags der UFP-Konzentration im Größenbereich 10 – 30 nm für die Messstationen in F-Schwanheim (blau) und Raunheim (cyan) gezeigt. Die Abbildung entspricht der zeitlichen Fortsetzung der Abbildung 8 aus Rose, Ditas et al. 2020.

An dieser Stelle soll nun darauf eingegangen werden, wie sich die Anzahl der Flugbewegungen und dementsprechend der Flughafenbeitrag an den Stationen Raunheim und F-Schwanheim seit Juli 2020 entwickelt haben. In Abb. 4 werden Monatsmittelwerte der Tagessummen der Flugbewegungen insgesamt und auf die Landebahn-Nordwest aufgeschlüsselt

dargestellt. Zusätzlich wird im unteren Teil der Abbildung der durch den Flughafen verursachte zusätzliche Beitrag an ultrafeinen Partikeln im Größenbereich von 10 – 30 nm dargestellt. Abbildung 4 stellt damit die zeitliche Fortsetzung der Abb. 8 aus Rose, Ditas et al. 2020 dar.

Es wird ersichtlich, dass seit dem Minimum der Flugbewegungen von etwa 200 pro Tag im April 2020 die Anzahl der Flugbewegungen zunächst wieder anstieg und dann bis etwa Ende 2020 stagnierte. Seit Anfang 2021 stellte sich ein kontinuierlicher Anstieg ein. Diese Entwicklung spiegelt sich teilweise sehr ähnlich beim durch den Flugbetrieb verursachten zusätzlichen Beitrag an UFP wider. Nach dem deutlichen Rückgang im April 2020 setzte ein Anstieg bis etwa zum Jahresende ein, der sich zumindest für die Messstation in F-Schwanheim auch seit Anfang 2021 weiter verstärkt. Der zusätzliche UFP-Beitrag an der Messstation in Raunheim ist insbesondere im Frühjahr 2021 nochmal deutlich geringer. Inwiefern sich dies möglicherweise auf die gesperrte Landebahn Nordwest oder meteorologisch bedingte Schwankungen zurückführen lässt, ist unklar.

Der hier berechnete zusätzliche Beitrag an UFP unterliegt grundsätzlich starken Schwankungen. Ursache für die starken Schwankungen ist die starke Windrichtungsabhängigkeit der UFP-Konzentration. Hier können wenige 10° Unterschied hohe Konzentrationsunterschiede bewirken (siehe auch Abb. 10). Betrachtet man ausschließlich Messungen bei Wind aus Richtung des jeweiligen Flughafensektors, so ist beispielsweise der herausragend hohe Beitrag von knapp 20.000 Partikeln pro cm³ für die Station F-Schwanheim im Oktober 2019 auf eine Häufung von Wetterlagen mit Wind aus eher südlichen Richtungen zu erklären, bei der die Station direkt vom zentralen Teil des Flughafens angeströmt wurde. Im März 2021 herrschte dagegen häufiger eine südwestliche Strömung, sodass die Station eher von den Randbereichen des Flughafens angeströmt wurde, was zu einem wesentlich geringeren Beitrag durch den Flugbetrieb führte.

Trotz starker Schwankungen zeichnet sich jedoch ein Anstieg des zusätzlichen UFP-Beitrags durch den Flughafen ab, der dem Trend ansteigender Flugbewegungen folgt. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Anstieg mit den weiter steigenden Flugbetriebszahlen fortsetzt.

3.3 Einfluss des Straßenverkehrs auf die UFP-Konzentration

Neben dem Betrieb am Frankfurter Flughafen gibt es weitere wichtige Emittenten für ultrafeine Partikel in der Rhein-Main-Region. Eine weitere Quelle sind Emissionen aus dem Kfz-Verkehr. Zur Charakterisierung und Einordnung dieser Emissionen wurde die Luftmessstation in der Friedberger Landstraße in Frankfurt zusätzlich mit einem SMPS für UFP-Messungen ausgestattet. Hierbei spielen mehrere Fragestellungen eine Rolle. Zum einen soll charakterisiert werden, inwieweit die mittlere UFP-Konzentration an einer verkehrsbelasteten Messstelle erhöht ist gegenüber dem städtischen Hintergrund. Zum anderen stellt sich die Frage, ob ein möglicher Einfluss durch den Flugbetrieb an der etwa 11 km vom Flughafen entfernten Messstelle in der Friedberger Landstraße noch von den lokalen Emissionen durch den Kfz-Verkehr unterscheidbar ist, oder durch diese möglicherweise überdeckt wird.

In Tab. 2 wurden bereits die mittleren UFP-Konzentrationen gezeigt. Im Vergleich zu den Messungen an den anderen Messstellen im gleichen Größenbereich (SMPS-Messungen), ist festzustellen, dass die mittlere UFP-Konzentration in der Friedberger Landstraße, abgesehen von den Messstellen auf dem Flughafengelände, am höchsten ist. Mit im Mittel mehr als 9.000 Partikel pro cm^3 ist die mittlere UFP-Konzentration etwa 50 % höher als man für den städtischen Hintergrund von 6.000 - 7.000 Partikel pro cm^3 erwarten kann (siehe Kap. 3.1).

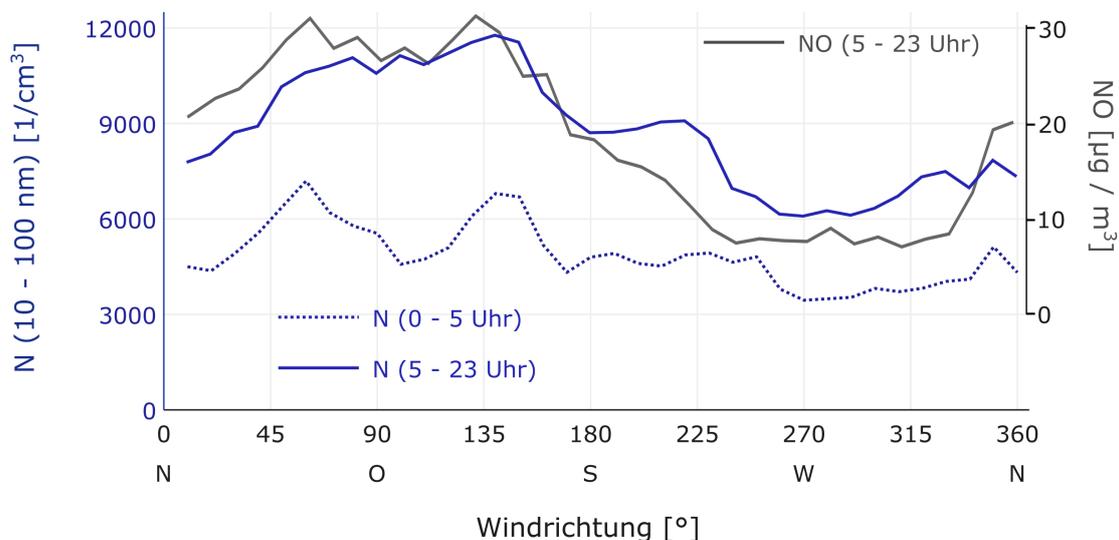


Abbildung 5: Vergleich der UFP-Konzentration (N) und Stickstoffmonoxid-Konzentration (NO) in Abhängigkeit der Windrichtung an der Messstelle in der Friedberger Landstraße in Frankfurt. Dargestellt sind Mittelwerte der Partikelanzahl-Konzentrationen (linke Y-Achse) im Größenbereich von 10 – 100 nm für die Zeiträume 0 - 5 Uhr (blau, unterbrochen) und 5 - 23 Uhr (blau). Die mittlere NO-Konzentration von 5 - 23 Uhr (grau) bezieht sich auf die rechte Y-Achse. Die Zeiträume beziehen sich auf den Zeitraum der UFP-Messungen (siehe Tab. 1).

Die Konzentration ist dabei sehr stark von der Windrichtung abhängig (vgl. Abb. 5). Es zeichnet sich ein für eine Straßenschlucht typisches Bild. Die Station in der Friedberger Landstraße befindet sich auf der Ostseite der Straße, welche im Umfeld der Messstation nahezu in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet ist. Folglich prägt sich bei Wind aus östlichen Richtungen durch die recht hohe Bebauung ein Luftwirbel aus, der an der Fassade der westlichen Straßenseite nach unten über die Straße zur Messstation gelenkt wird. Dadurch werden bei östlichem Wind die

lokalen Emissionen vermehrt zur Messstation gelenkt. Bei Wind aus westlichen Richtungen stellt sich eine umgekehrte Strömung ein und es wird weniger stark belastete Luft von oben in Richtung der Messstation transportiert. Dies lässt sich gut anhand der Konzentration von Stickstoffmonoxid (NO) nachvollziehen (siehe Abb. 5), das als typischer Schadstoff aus dem Straßenverkehr angesehen werden kann. Durch die Ausbildung des Wirbels liegen die gemessenen NO-Konzentrationen bei Wind aus östlicher Richtung deutlich höher, als bei Wind aus westlichen Richtungen. Die UFP-Konzentration verhält sich in ihrer Abhängigkeit von der Windrichtung grundsätzlich sehr ähnlich wie die NO-Konzentration. Aus Abb. 5 wird aber deutlich, dass sie für den Windrichtungsbereich von 190 - 230° deutlich erhöht ist und somit dem nahezu linearen Rückgang der NO-Konzentration von etwa 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 140° auf etwa 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei 240° entgegen steht. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die erhöhten UFP-Konzentrationen für den Windrichtungsbereich von 190 - 230° nicht dem Kfz-Verkehr zuzuordnen sind, sondern aus dem deutlichen Einfluss der Emissionen vom Flughafen resultieren.

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Szenarien gegenübergestellt, die die beiden typischen Anströmverhältnisse (Wind aus Ost und Wind aus Richtung Flughafen) widerspiegeln.

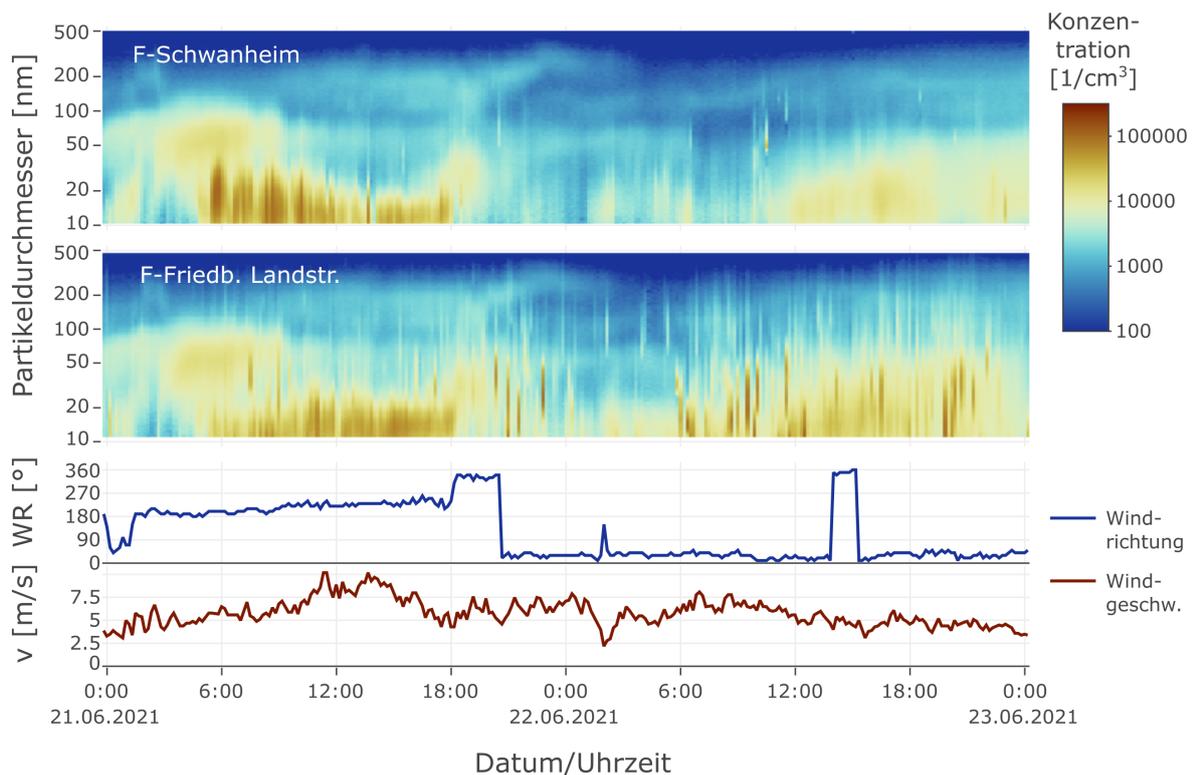


Abbildung 6: Partikelanzahl-Größenverteilung für F-Schwanheim und F-Friedberger-Landstraße als Konturplot (Partikelgröße auf Y-Achse, zeitlicher Verlauf auf der X-Achse, Konzentration (dN / dlog D) als Farbcode). Zusätzlich Windrichtung und -geschwindigkeit. Dargestellt ist der Zeitraum vom 21.06.21 bis 22.06.21. Der Zeitraum wurde exemplarisch ausgewählt und spiegelt zwei typische aber unterschiedliche Belastungssituationen bei nordöstlicher und südwestlicher Anströmung wider.

In Abb. 6 ist in den oberen beiden Teilen die zeitliche Entwicklung der Partikelanzahl-Größenverteilung in F-Schwanheim und F-Friedberger Landstraße als sogenannte Konturplots dargestellt. Bei dieser Art der Darstellung wird die Partikelgröße auf der Y-Achse und deren Konzentration als Farbcode dargestellt, wodurch die zeitliche Entwicklung (X-Achse) sichtbar gemacht

werden kann. Im unteren Bereich der Grafik sind Windrichtung und -geschwindigkeit gezeigt. Das Fallbeispiel vom 21. bis einschließlich 22. Juni 2021 zeigt den zeitlichen Verlauf während eines Wetterwechsels, bei dem die Anströmrichtung von anfangs Süd bis Südwest auf Nordost wechselt.

Grundsätzlich wird aus Abb. 6 ersichtlich, dass die Partikelanzahl für Partikel kleiner als 100 nm am höchsten ist (gelb-braune Farbbereiche). Für den Zeitraum von etwa 5:00 bis 18:00 Uhr des 21. Juni dominieren jedoch Partikel kleiner als 30 nm an beiden Messstellen. Da anfangs der Wind eher aus südlichen Richtungen weht, ist die UFP-Konzentration zunächst in F-Schwanheim höher. Je weiter der Wind jedoch auf Richtung Südwest dreht, desto stärker wird der Einfluss in der Friedberger Landstraße (vgl. geografische Lage der Stationen dargestellt in Abb. 1). Partikel in diesem Größenbereich, sowie die typische Form der Partikelanzahl-Größenverteilung mit einem Maximum im Bereich 10 – 20 nm und einem schnellen Abfall für größere Partikel, sind charakteristisch für Emissionen, die im Zusammenhang mit dem Flugbetrieb stehen (Stacey et al. 2020).

Der Windrichtungswechsel am Abend des 21. Juni auf Nord und später Nordost führt dazu, dass der Transport der Partikel im Bereich von 10 – 30 nm zu beiden Messstationen abrupt unterbrochen wird. Für F-Schwanheim stellen sich in der Nacht geringe Partikelanzahl-Konzentrationen für weite Teile des gemessenen Größenbereichs ein, welche am Folgetag durch eine breite Partikelanzahl-Größenverteilung mit moderaten Konzentrationen abgelöst wird.

Die Messungen in der Friedberger Landstraße verhalten sich ähnlich, sie werden jedoch überlagert von häufigen Konzentrationsspitzen. In der hier dargestellten Weise äußern sich diese Konzentrationsspitzen als kurze „nadelartige“ vertikal-verlaufende Striche über einen teilweise recht weiten Größenbereich.

Solche kurzen Konzentrationsspitzen sind charakteristisch für sehr lokale Quellen und in diesem Fall größtenteils dem Verkehr auf der Friedberger Landstraße zuzuordnen. Wie eingangs erwähnt, ist ein solch starker Einfluss des Verkehrs aufgrund der räumlichen Anordnung der Station in der Straßenschlucht eher bei östlichen Windrichtungen zu erwarten. Folglich treten diese kurzen „nadelartigen“ Konzentrationsspitzen auch deutlich weniger häufig für den Vortag auf.

Die beiden unterschiedlichen und offenbar dominierenden Quellen (Flugverkehr und Kfz-Verkehr) haben Einfluss auf die Partikelanzahl-Größenverteilungen. Abbildung 7 zeigt die Partikelanzahl-Größenverteilungen (in $dN / d\log D$) für die Messstationen in F-Schwanheim und der Friedberger Landstraße in Frankfurt jeweils als Mittelwert für den Windrichtungsbereich, bei dem während der Betriebszeiten ein Einfluss des Flughafens zu erwarten ist, sowie als Mittelwert über alle anderen Messungen (stationstypischer Hintergrund).

Für F-Schwanheim ergibt sich ein sehr starker Kontrast zwischen den Messungen, die nicht im Zusammenhang mit den Emissionen am Flughafen stehen (Hintergrundkonzentration, unterbrochene rote Linie) und den Messungen unter dem Einfluss des Flugbetriebs (durchgezogene rote Linie). Hierbei wird der typische Beitrag des Flugbetriebs vor allem im Größenbereich von 10 – 30 nm deutlich, welcher auch zu einer sehr starken Erhöhung der Gesamtkonzentration beiträgt. Für die Friedberger Landstraße ergibt sich jedoch ein weniger stark ausgeprägter

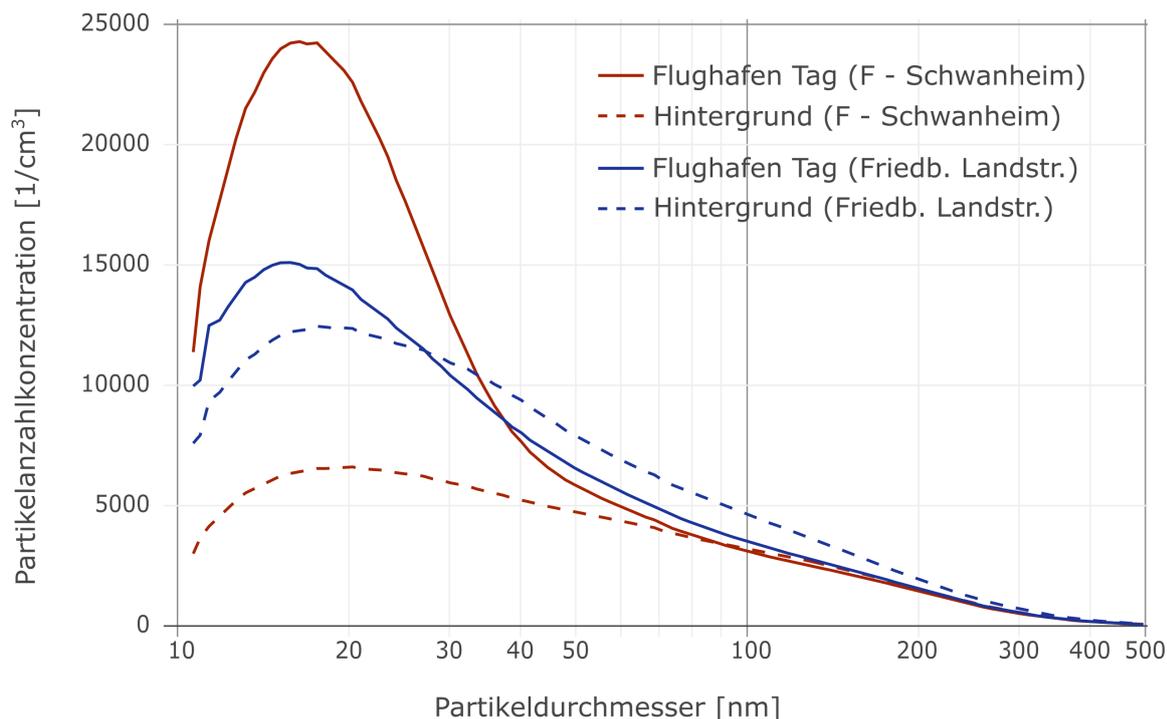


Abbildung 7: Mittlere Partikelanzahl-Größenverteilungen ($dN / d \log D$) an den Messstationen in F-Schwanheim und F-Friedberger-Landstraße jeweils für den Windrichtungsbereich des Flughafens bei Flugbetrieb (*Flughafen Tag*) und für Hintergrundbedingungen. Um die direkte Vergleichbarkeit sicher zu stellen, wurde der Mittelungszeitraum auf die Zeit während der Covid-19-Pandemie beschränkt.

Unterschied zwischen der Partikelanzahl-Größenverteilung, die durch den Flugbetrieb beeinflusst wird, und den sonstigen Messungen. Die mittlere Konzentration bei Flughafeneinfluss liegt nur etwa 11 % höher als die Hintergrundkonzentration (vgl. Tab 2). Die Form der Verteilungen unterscheidet sich jedoch deutlich. Die mittlere Verteilung für Hintergrundbedingungen an der Friedberger Landstraße ist deutlich breiter und weist auch ab etwa 30 nm höhere Partikelanzahlkonzentrationen auf. Bei Windrichtungen, die durch den Flugbetrieb beeinflusst werden, ergibt sich eine typische Verteilung mit einem Maximum bei weniger als 20 nm und deutlich niedrigeren Konzentrationswerten für größere Partikel.

Das beschriebene Fallbeispiel und weitere Aspekte, wie beispielsweise die typische Partikelanzahl-Größenverteilung, die charakteristische Windrichtungsabhängigkeit von Partikeln speziell im Bereich von 10 – 30 nm, sowie die tageszeitliche Übereinstimmung mit den Betriebszeiten des Frankfurter Flughafens legen nahe, dass unter bestimmten Bedingungen auch die Messstation in der Friedberger Landstraße von den Emissionen am Flughafen beeinflusst wird. Aufgrund der typischen Windverteilung im Rhein-Main-Gebiet trifft dies auf etwa ein Viertel aller Messungen während der Flugbetriebszeiten zu. Zu Zeiten wenn der Wind aus Richtung Flughafen weht, ist der mittlere Einfluss des etwa 11 km entfernten Flughafens als ähnlich hoch einzuschätzen, wie die mittleren lokalen Emissionen durch den Kfz-Verkehr.

3.4 Räumliche Ausbreitung der UFP-Emissionen

Ein wichtiger Aspekt bei der Beurteilung der Luftqualität in Bezug auf ultrafeine Partikel ist deren Ausbreitung vom Flughafengelände in die umliegenden Gebiete. Um exemplarisch die Ausbreitung mit der Hauptwindrichtung nach Nordosten ins Stadtgebiet Frankfurt zu untersuchen, wurden verschiedene Messungen teilweise zeitgleich in F-Schwanheim, F-Niedwald und F-Riedberg durchgeführt (siehe Tab. 1 und Abb. 1). Für diese Auswertung wurden Standorte entlang der Hauptwindrichtung ausgewählt, um möglichst häufig von der Abluft des Flughafens beeinflusst zu werden. Es ist davon auszugehen, dass die Auswertung jedoch auch auf andere Windrichtungen übertragbar ist.

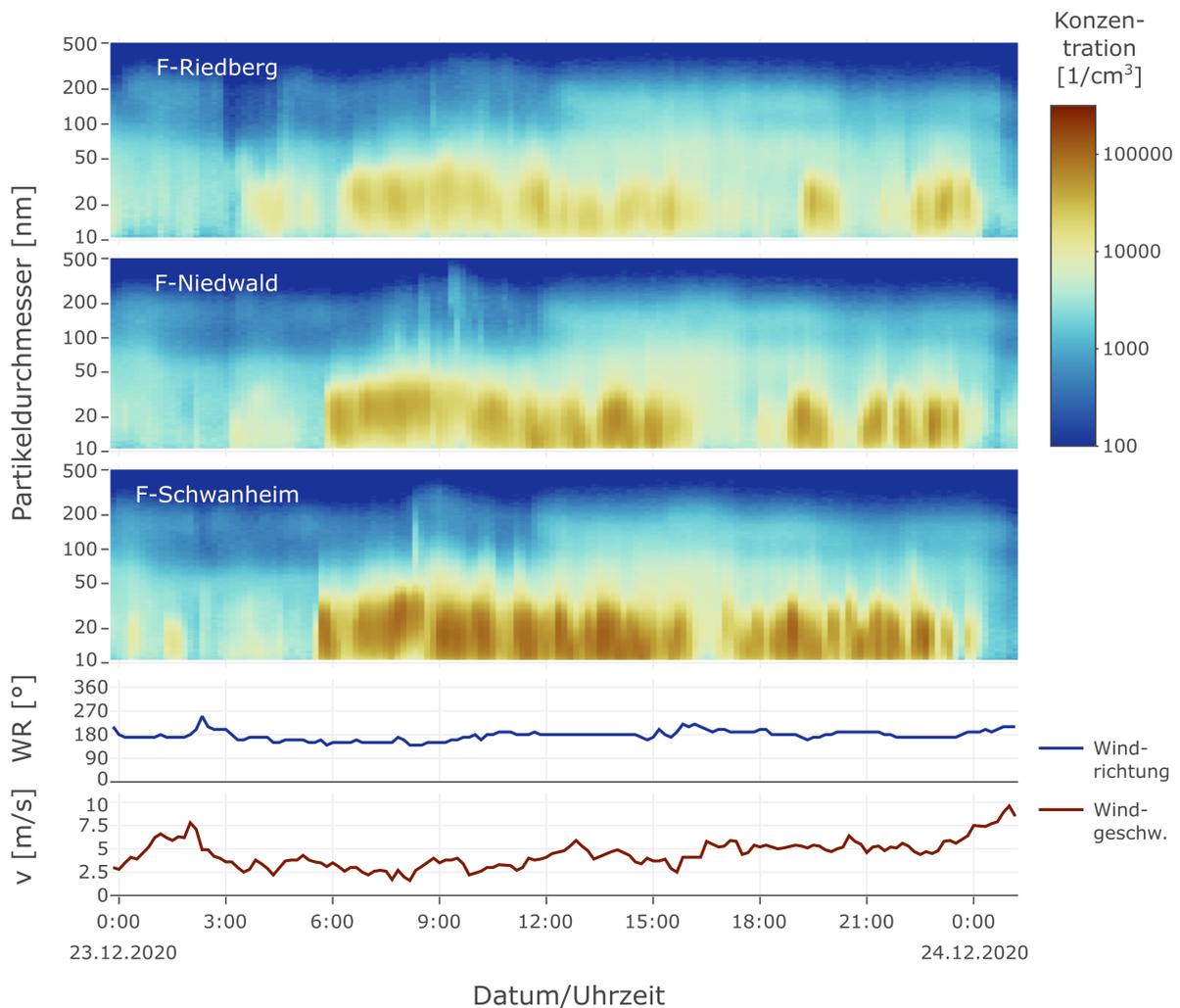


Abbildung 8: Partikelanzahl-Größenverteilung für F-Schwanheim, F-Niedwald und F-Riedberg als Konturplot (Partikelgröße auf Y-Achse, zeitlicher Verlauf auf der X-Achse, Konzentration (dN / dlog D) als Farbcode). Zusätzlich Windrichtung und -geschwindigkeit. Dargestellt ist der Zeitraum vom 23.12.20 bis 24.12.20. Der Zeitraum wurde exemplarisch ausgewählt und spiegelt die typische Ausbreitung von UFP bei südlicher Anströmung wider.

Die Messungen in F-Schwanheim haben bereits gezeigt, dass bei Wind aus Richtung Flughafen und während der Flugbetriebszeiten die UFP-Konzentration vor allem im Bereich von 10 – 30 nm stark ansteigen (vgl. Tab. 2 und Abb. 3 sowie vorangegangene Berichte Rose und Jacobi 2018, Rose und Jacobi 2019, Rose, Ditas et al. 2020). Abbildung 8 zeigt nun exempla-

risch für den 23.12.2020 anhand der zeitlichen Entwicklung der Partikelanzahl-Größenverteilung als Konturplot in F-Schwanheim, F-Niedwald und F-Riedberg, wie sich die UFP-Emissionen bei Wind aus südlicher Richtung ausbreiten. Zusätzlich sind im unteren Teil der Grafik Windrichtung und -geschwindigkeit angegeben. Der Tag wurde ausgewählt, da die Windverhältnisse, insbesondere die Windrichtung verhältnismäßig konstant waren und einen kontinuierlichen Transport von Emissionen durch den Flugbetrieb in nördliche Richtungen ermöglichten.

An allen drei Stationen ist ein deutlicher Anstieg der Partikelanzahl-Konzentration für Partikel kleiner als 50 nm nach etwa 5:00 Uhr zu beobachten, welcher gegen 0 Uhr des 24.12. wieder abklingt. Der zeitliche Beginn fällt dicht zusammen mit dem Beginn des Flugbetriebs um 5:00 Uhr und ist besonders in F-Schwanheim mit einem scharfen Anstieg der UFP-Konzentration verbunden. Nach Ende des Flugbetriebs um 23:00 Uhr fällt die UFP-Konzentration langsamer ab, was darauf schließen lässt, dass im weiteren Betriebsablauf ebenfalls UFP emittiert werden. Zeitlich gesehen ergibt sich beim morgendlichen Anstieg zwischen den einzelnen Messstationen ein leichter Versatz, der der zunehmenden Entfernung zum Flughafengelände entspricht. Während für F-Schwanheim die Partikelanzahl-Konzentration während der Flugbetriebszeit, bis auf ein Minimum gegen 16:00 - 17:00 Uhr, verhältnismäßig konstant hoch ist, kommt es an den weiter entfernten Stationen in F-Niedwald und F-Riedberg zu Unterbrechungen. Solche Unterbrechungen sind am stärksten an der Station ausgeprägt, die am weitesten entfernt ist, und sind wahrscheinlich auf räumliche Unterschiede bei der Windrichtung zurückzuführen.

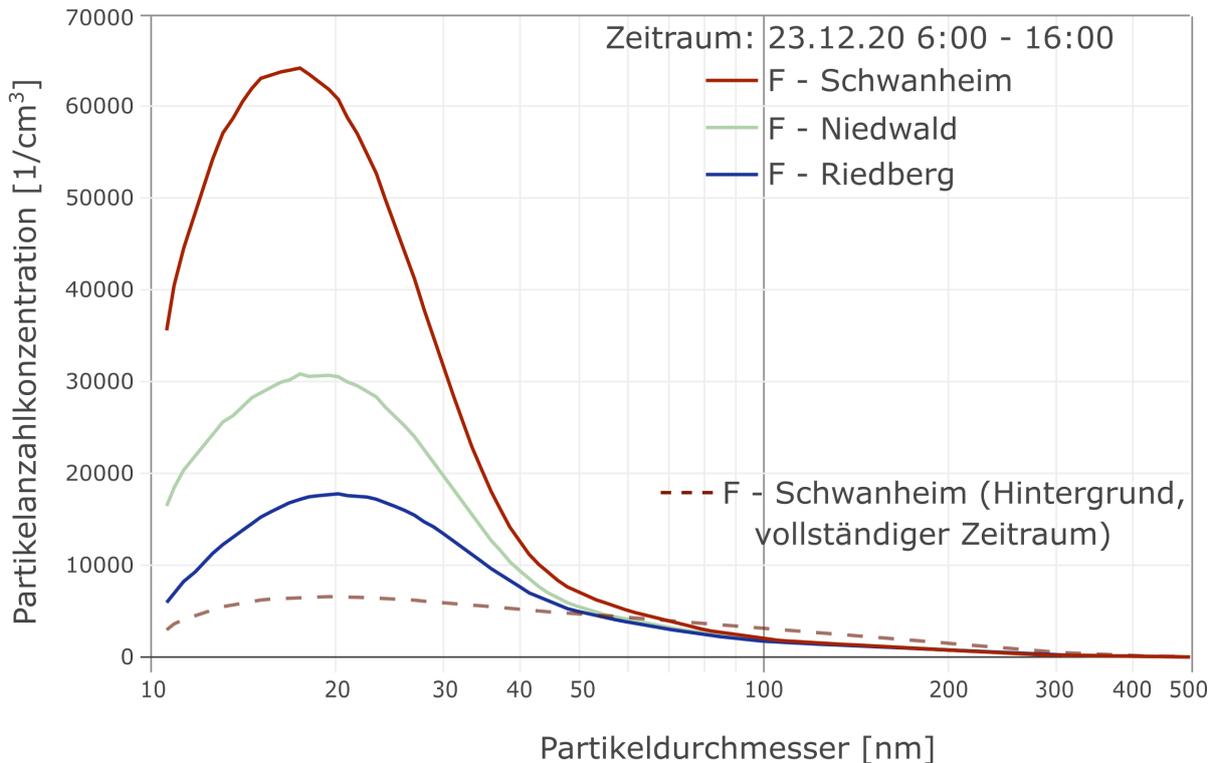


Abbildung 9: Mittlere Partikelanzahl-Größenverteilungen (dN / dlog D) der Messstationen in F-Schwanheim, F-Niedwald und F-Riedberg jeweils für den Zeitraum von 6:00 bis 16:00 Uhr am 23.12.20 (durchgezogene Linien). Die unterbrochene Linie zeigt den Mittelwert aller Messungen in F-Schwanheim, die nicht durch den Flugbetrieb beeinflusst wurden (Hintergrundkonzentration).

Abbildung 9 zeigt die mittleren Partikelanzahl-Größenverteilungen der drei Stationen in F-Schwanheim, F-Niedwald und F-Riedberg für den Zeitraum von 6:00 bis 16:00 Uhr (durchgezogene Linien). Um die durch den Flugbetrieb verursachten UFP-Emissionen gegenüber einer für den Hintergrund typischen Partikelanzahl-Größenverteilung einzuordnen, ist zusätzlich die mittlere Partikelanzahl-Größenverteilung für Hintergrundbedingungen an der Messstation in F-Schwanheim dargestellt (unterbrochene Linie).

Die für den oben genannten Zeitraum gemittelten Partikelanzahl-Größenverteilungen weisen für alle drei Stationen die für Emissionen aus dem Flugbetrieb typische Form auf. Alle drei haben ein ausgeprägtes Maximum zwischen 10 – 20 nm, sowie stark erhöhte Partikelanzahl-Konzentrationen im Bereich 10 – 30 nm und übersteigen die Partikelanzahl-Größenverteilung für die Hintergrundkonzentration in F-Schwanheim deutlich. Mit zunehmender Entfernung zum Flughafen sinkt der Beitrag im Größenbereich von 10 – 30 nm. Für den hier exemplarisch dargestellten Zeitraum von 6:00 bis 16:00 Uhr am 23.12.20, beläuft sich die Gesamtpartikelanzahl-Konzentration für F-Schwanheim auf 29.500 Partikel pro cm^3 , wobei ca. 24.300 Partikel pro cm^3 auf den Größenbereich zwischen 10 – 30 nm entfallen. Für F-Niedwald liegt die Konzentration in etwa bei 15.900 (12.000 für 10 – 30 nm) Partikel pro cm^3 . An der Station in F-Riedberg ist die Gesamtpartikelanzahl bei etwa 9.900 Partikel pro cm^3 wobei 6.600 davon im Größenbereich zwischen 10 – 30 nm liegen. Betrachtet man alle bisherigen Messungen, so ergibt sich aus dem Vergleich von Messungen bei Wind aus Richtung des Flughafengeländes und den übrigen Messungen auch im Mittel für diese drei Stationen ein deutlicher Einfluss des Flugbetriebs, der mit zunehmender Entfernung geringer wird (vgl. Tab. 2).

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Der in diesem Bericht dargestellte Überblick über die bisherigen kontinuierlichen UFP-Messungen seit 2017 erlaubt eine großräumige Charakterisierung der UFP-Belastung im erweiterten Umfeld des Frankfurter Flughafens.

Den Emissionen aus dem Flugbetrieb und den damit assoziierten Prozessen können an unterschiedlichen Messstellen jeweils sehr ähnliche charakteristische Merkmale zugeordnet werden. Neben der deutlichen Windrichtungsabhängigkeit, die sich ausschließlich zu Zeiten des Flugbetriebs einstellt, ist vor allem die typische Partikelanzahl-Größenverteilung mit ausgeprägtem Maximum für Partikel kleiner als 30 nm kennzeichnend. Dieser charakteristische „Fingerabdruck“ konnte bislang an allen HLNUG-Messstellen mit größen aufgelösten UFP-Messungen eindeutig nachgewiesen werden.

Erwartungsgemäß ist der Einfluss durch den Flugbetrieb gegenüber den stationstypischen Hintergrundkonzentrationen am größten an den Messstellen auf dem Flughafengelände und in dessen unmittelbarer Nähe. Die Gesamtbelastung durch ultrafeine Partikel aus dem Flugbetrieb hängt an den einzelnen Messstandorten letztlich davon ab, wie häufig sich der Standort in der Abluft des Flughafens befindet und wie weit er vom Flughafengelände entfernt ist. Messungen entlang der Hauptwindrichtung in F-Schwanheim, F-Niedwald und F-Riedberg zeigen, dass bei Wind aus Richtung des Flughafengeländes der typische „Fingerabdruck“ der Emissionen aus dem Flugbetrieb bis in 14 km Entfernung zum Flughafen in geringerer Konzentration nachweisbar ist. Hierbei nimmt der Einfluss exponentiell mit zunehmender Entfernung ab. Die Ergebnisse sind jedoch nicht auf die exemplarisch ausgewählte Hauptwindrichtung beschränkt, sondern können auch auf andere Windrichtungen übertragen werden. Ähnliche Rückschlüsse sind auch bei anderen internationalen Flughäfen im Rahmen von weiteren Studien gezogen worden (z.B. Rivas et al. 2020, Zhang et al. 2020).

Aktuelle Messungen an einer verkehrsbezogenen Messstation in der Friedberger Landstraße in Frankfurt lassen einen Vergleich der lokalen Emissionen durch den Verkehr mit den herantransportierten Flughafenemissionen zu. Auch hier ist der charakteristische „Fingerabdruck“ der Emissionen aus dem Flugbetrieb deutlich von den lokalen Emissionen zu unterscheiden. Während beim Einfluss durch die lokalen Emissionen starke und häufige Konzentrationsspitzen in einem weiten Partikelgrößenbereich auftreten, ist unter Einfluss des Flugbetriebs die UFP-Konzentration eher durch eine kontinuierliche Erhöhung im typischen Größenbereich von 10 – 30 nm geprägt. Im Vergleich zu typischen UFP-Konzentrationen im städtischen Hintergrund (6.000 - 7.000 Partikel pro cm^3) ist die mittlere UFP-Konzentration in der Friedberger Landstraße um etwa 50 % erhöht. Bei Wind aus Richtung Flughafen tragen die lokalen Emissionen und die Emissionen vom etwa 11 km entfernten Flughafen in etwa gleichem Maße zur UFP-Konzentration bei.

Die jüngsten Messungen an den weiter entfernten Stationen in F-Riedberg und der Friedberger Landstraße in Frankfurt wurden erst nach Beginn der Covid-19-Pandemie begonnen. Trotz der noch im Vergleich zur Zeit vor der Pandemie geringeren Flugbewegungen, ist der Einfluss des Flugbetriebs auch an diesen Messstellen nachweisbar. Es ist zu vermuten, dass bei zunehmend steigenden Flugbewegungszahlen der Einfluss weiter steigen wird.

5 Ausblick

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie plant die Messungen ultrafeiner Partikel weiter fortzusetzen. Drei der UFP-Messstellen sollen darüber hinaus als permanente UFP Messstellen (Raunheim, F-Schwanheim, F-Friedberger Landstraße) eingerichtet und perspektivisch auch in das *German Ultrafine Aerosol Network* integriert werden. Ziel ist es, harmonisierte und kontinuierliche UFP-Messungen hoher Qualität für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung zu stellen. Die weiteren Messstellen werden je nach Fragestellung und Messaufgabe weiterhin im Rhein-Main-Gebiet an unterschiedlichen Stellen zum Einsatz kommen.

Zusätzlich zu den bisherigen Messungen mit Kondensationspartikelzählern und Mobilitätspartikelspektrometern wird ein weiteres Messgerät zum Einsatz kommen. Es handelt sich hierbei um ein Mobilitätspartikelspektrometer mit besonders hoher zeitlicher Auflösung. Durch die besonders hohe zeitliche Auflösung eignet sich das Messgerät zur Anwendung insbesondere im Umfeld schnell veränderlicher UFP-Konzentrationen. Für dieses Messgerät wurde ein neuer mobiler und sehr kompakter Messcontainer konzipiert, der flexibel eingesetzt werden soll.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) führt das Forum Flughafen und Region (FFR) eine umfassende Untersuchung der Belastung durch UFP und deren potenziell gesundheitlicher Wirkung in der Rhein-Main-Region durch. In diesem mehrjährigen Prozess wird aktuell in einem ersten Schritt der Entwurf eines Studiendesigns für die vorgesehene Belastungsstudie durch ein Konsortium mehrerer Forschungseinrichtungen unter Leitung des Leibniz-Instituts für Troposphärenforschung e.V. erstellt. Weitere Schritte zur Umsetzung der Belastungsstudie und Vorbereitung der Wirkungsstudie werden 2022 folgen.

6 Anhang

6.1 Kurzbeschreibung der Messstationen mit UFP-Messungen

Im Folgenden werden sämtliche in diesem Bericht vorgestellten Standorte kurz beschrieben:

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 PM₁₀, NO₂, etc. ist charakteristisch für städtischen Hintergrund. Die Messstation in Raunheim befindet sich in der Abluft des Flughafens, wenn der Wind aus nordöstlichen Richtungen weht. Läuft 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.

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. 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.

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 nah gelegenen Autobahn oder der angrenzenden Straße stammen.

Flughafen-Ost

Der Standort befindet sich am östlichen Rand des Flughafengeländes ca. 50 m nördlich der Anfluglinie auf die Südbahn. Der Aufsetzpunkt auf der Südbahn ist etwa 1 km entfernt. In unmittelbarer Nähe befinden sich Rollbahnen und weitere Straßen auf dem Flughafengelände. In etwa 150 m Entfernung in Richtung Osten befindet sich die Bundesautobahn A5.

Frankfurt-Niedwald

Auf dem Gelände des Wassersport Westend e.V. wurden im Jahr 2019 UFP-Messungen begonnen. Der Standort stellt die weitere Fortsetzung einer gedachten Linie vom Flughafen zur Messstation in F-Schwanheim entlang der Hauptwindrichtung (SW) dar. Die Station befindet sich im Norden eines Wohngebietes am nördlichen Rand des Frankfurter Niedwaldes. Unmittelbar nördlich der Station befindet sich das Autobahnkreuz Frankfurt Westkreuz. Die kürzeste Entfernung zur Autobahn ist ca. 100 m in Richtung Nordosten. Die Entfernung zur nördlichen Grenze des Flughafengeländes beträgt etwa 7 km.

Flughafen-West

Der Standort befindet sich auf dem Flughafengelände am westlichen Rand in unmittelbarer Nähe zur Messstelle des Deutschen Wetterdienstes (DWD), ca. 400 m entfernt von der Startbahn West. In unmittelbarer Nähe befinden sich Rollbahnen und weitere Straßen auf dem Flughafengelände. In etwa 50 m Entfernung in Richtung Westen befinden sich der Airport-Ring und ein Parkplatz. Die Messstelle liegt zwischen den Ab- und Anfluglinien des Parallelbahnsystems und ist etwa 1,4 km vom Aufsetzpunkt auf der Südbahn entfernt.

Frankfurt-Friedb. Landstr.

Die Luftmessstation Frankfurt Friedberger Landstraße ist eine „verkehrsbezogene Messstelle“ des Luftmessnetzes Hessen. Die Station liegt direkt an einer stark befahrenen Straße mit enger, mehrstöckiger Wohnbebauung. Dadurch können sich die am Boden ausgestoßenen Schadstoffe nur schlecht verteilen, was zu einer vergleichsweise hohen Konzentration an Luftschadstoffen (z.B. NO, NO₂, CO) führt. Der genaue Standort befindet sich auf der Ostseite der Straße etwa 150 m nördlich des Friedberger Platzes. Die Entfernung zur nordöstlichen Grenze des Flughafengeländes beträgt etwa 11,5 km.

Frankfurt-Riedberg

Der Messstandort befindet sich am süd-östlichen Rand des Geländes der Goethe-Universität Frankfurt (Campus-Riedberg). In unmittelbarer Nähe befindet sich die Altenhöferallee, sowie in etwa 1 km in Richtung Osten die A661 und in etwa 1,5 km in Richtung Westen die A5. Der Standort wurde ausgewählt, um die Ausbreitung von UFP vom Flughafen entlang der Hauptwindrichtung (SW) weiter zu verfolgen. Er stellt die Verlängerung einer gedachten Linie vom Flughafen über F-Schwanheim und F-Niedwald dar. Die Entfernung zur nördlichen Grenze des Flughafengeländes beträgt etwa 14 km.

Mörfelden

Der Standort befindet sich an der Südspitze der Gemeinde Mörfelden. In unmittelbarer Umgebung der Messstation befindet sich ein Abstellplatz eines lokalen Busunternehmens. Die Station ist von wenig befahrenen Nebenstraßen umgeben. Südlich der Station befindet sich ein ausgedehntes Waldgebiet. Die Station liegt unterhalb einer Startroute ausgehend von der Startbahn West, ihre Entfernung zur südlichen Grenze des Flughafengeländes beträgt etwa 4 km.

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 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 bzw. 2,5 km Entfernung im Anflug auf die Landebahn 25C bzw. 25L (Flughöhe ca. 400 m). Mögliche nahegelegene Quellen für ultrafeine Partikel bieten die schuleigene Pelletheizung sowie die Küchenabluft einer Kita, die sich in unmittelbarer Nähe der Messstelle befinden.

Frankfurt-Oberrad

Der Standort in F-Oberrad befindet sich auf dem Gelände des Friedhofs Alt Oberrad in einer ruhigen Wohngegend mit hauptsächlich Ein- und Mehrfamilienhäusern. Im Süden, in etwa 400 m Entfernung, beginnt der Frankfurter Stadtwald. Im Osten, in etwa 1,3 km Entfernung, befindet sich die BAB 661. Im Norden verläuft ca. 500 m entfernt die Offenbacher Landstraße, die eine wesentliche Verbindung zwischen dem Frankfurter Süden und Offenbach bildet.

Der Flughafen liegt in ca. 10 km Entfernung südwestlich der Messstelle F-Oberrad. Die Messstelle befindet sich ca. 500 m nördlich zur Anfluggrundlinie auf die Landebahn Nordwest (Flughöhe ca. 800 m) und ca. 2,5 km nördlich zur Anfluggrundlinie auf die Südbahn (Flughöhe ca. 600 m). Ebenso verläuft eine Startroute der Flugzeuge ca. 500 m südlich und östlich des Messortes. Weitere mögliche Quellen für ultrafeine Partikel in der unmittelbaren Umgebung des Messpunktes sind Kleinf Feuerungsanlagen der umliegenden Wohnhäuser, sowie regelmäßig stattfindende Grünflächenarbeiten auf dem Friedhofsgelände.

Raunheim-Mönchhof

Dieser Standort befindet sich in einem Gewerbegebiet der Gemeinde Raunheim. Das Gewerbegebiet befindet sich zwischen der Bundesautobahn A3 und der Bundesstraße B43. Die Messstelle ist in unmittelbarer Nähe zur Mönchhof-Kapelle gelegen und liegt direkt unterhalb der Anfluglinie auf die Landebahn-Nordwest. Landende Flugzeuge haben hier typischerweise nur noch eine Höhe von etwa 100 m über Grund. Im direkten Umfeld der Station befinden sich neben den genannten Straßen auch ein Wendepunkt für Lkw-Verkehr sowie die Zufahrt zu einem Logistikzentrum. Die Entfernung zur westlichen Grenze des Flughafengeländes bei der Landebahn Nordwest beträgt etwa 1,5 km.

Flörsheim

Dieser Standort befindet sich im Christian-Georg-Schütz-Park der Gemeinde Flörsheim. Der Park ist umgeben von Mehrfamilienhäusern und über wenig befahrene Nebenstraßen erreichbar. Die Anfluglinie auf die Landebahn-Nordwest liegt etwa 250 m in nördlicher Richtung. Die Entfernung zur westlichen Grenze des Flughafengeländes beträgt etwa 5 km.

6.2 Mittlere UFP-Konzentration in Abhängigkeit der Windrichtung

In Abb. 10 ist die Partikelanzahl-Konzentration im Größenbereich von 10 – 30 nm in Abhängigkeit der Windrichtung für die Zeiträume von 0 - 5 Uhr und 5 - 23 Uhr für die Messstationen mit SMPS-Messungen dargestellt. Der Zeitraum von 5 - 23 Uhr entspricht dem Betriebszeitraum des Frankfurter Flughafens. Nach 23 Uhr sinkt bei Wind aus Richtung des Flughafens typischerweise die Partikelkonzentration schnell ab, sodass der Zeitraum von 0 - 5 Uhr als Vergleichszeitraum gewählt wurde. Grundlage für die Windrichtung sind die Daten der DWD-Messstation auf dem Flughafengelände (siehe Kap. 2.3).

Abbildung 11 zeigt ebenfalls die windrichtungsabhängige Partikelanzahl-Konzentration. Dieser Abbildung liegen die Daten der Kondensationspartikelzähler zugrunde und beziehen sich auf den Größenbereich von > 7 nm.

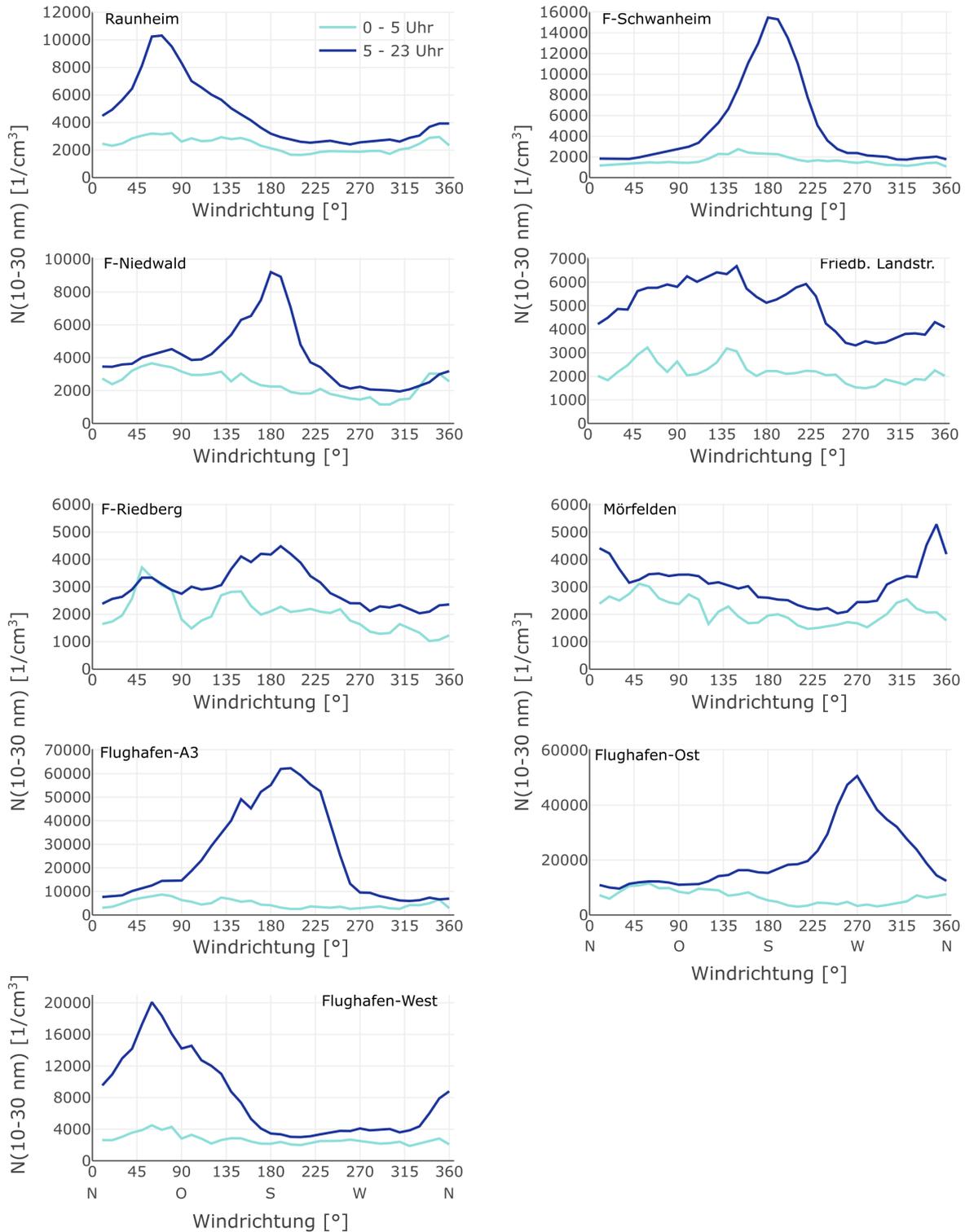


Abbildung 10: Mittelwerte der Partikelanzahl-Konzentrationen im Größenbereich von 10 – 30 nm in Abhängigkeit der Windrichtung und für die Zeiträume 0 - 5 Uhr (cyan) und 5 - 23 Uhr (blau). Dargestellt sind alle 9 Messstellen mit größenaufgelösten UFP-Messungen. Gemittelt wurde über den gesamten an den jeweiligen Stationen vorliegenden Messzeitraum (siehe auch Tab. 1).

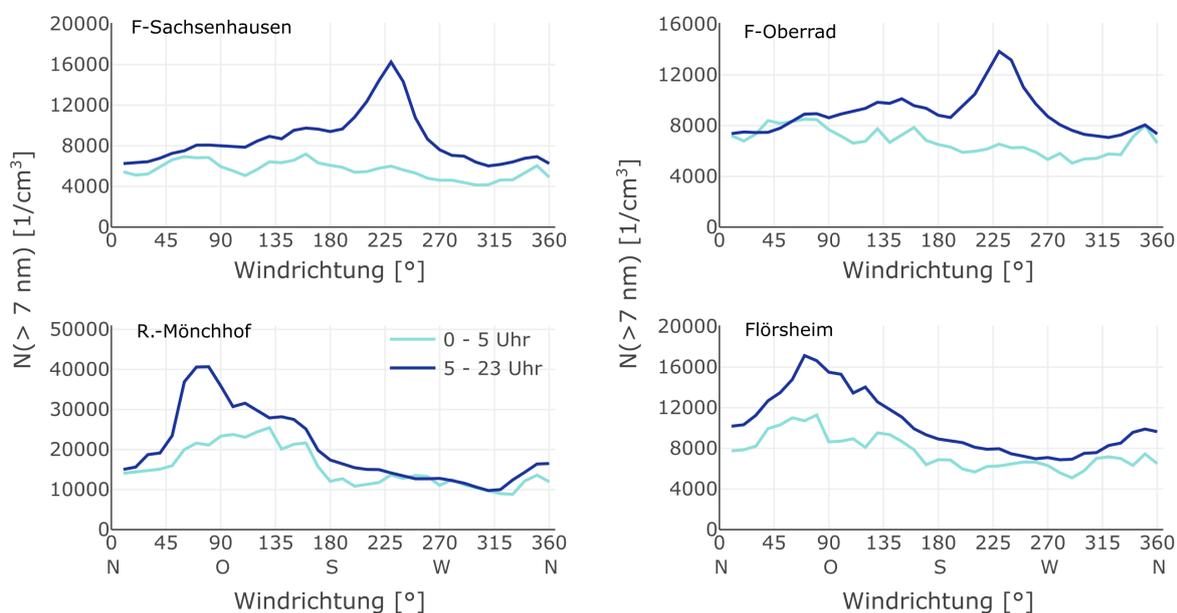


Abbildung 11: Mittelwerte der Partikelanzahl-Konzentrationen im Größenbereich von > 7 nm in Abhängigkeit der Windrichtung und für die Zeiträume 0 - 5 Uhr (cyan) und 5 - 23 Uhr (blau). Dargestellt sind alle 4 Messstellen mit UFP Messungen für die Gesamtpartikelanzahl-Konzentration. Gemittelt wurde über den gesamten an den jeweiligen Stationen vorliegenden Messzeitraum (siehe auch Tab. 1).

6.3 Definition des Windsektors Flughafen

Die hier verwendeten Windrichtungsbereiche wurden anhand zweier Kriterien festgelegt. Einerseits wurde die geografische Lage der Messstelle in Bezug auf das gesamte Flughafengelände und tiefliegende Anfluglinien in Betracht gezogen. Andererseits wurde die mittlere Partikelanzahlkonzentration während des Flugbetriebs in Abhängigkeit der Windrichtung bestimmt (Abb. 10 und 11). Von der resultierenden Partikelanzahlkonzentration wurde der Minimalwert abgezogen und anschließend alle Werte auf das Maximum normiert. Der Windrichtungsbereich für den 50 % des Maximums erreicht wird, markiert den potentiellen Einflussbereich des Flughafens (Abb. 12). Die jeweiligen Windsektoren der einzelnen Messstandorte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

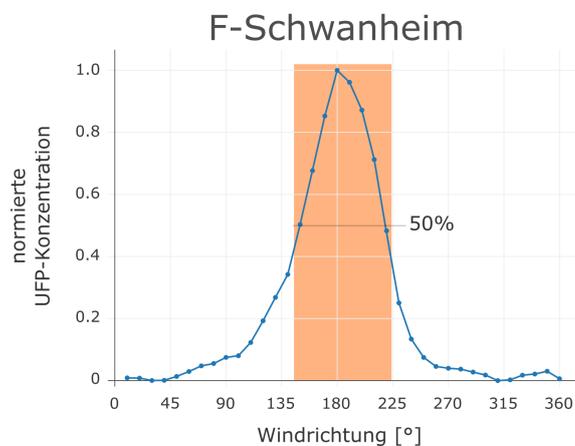


Abbildung 12: Bestimmung des Windrichtungsbereiches für den die UFP-Immissionen an der Messstelle F-Schwanheim maßgeblich durch den Frankfurter Flughafen beeinflusst werden. Der Abbildung liegen die Winddaten der DWD-Messstation auf dem Flughafengelände zugrunde (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420).

Glossar

CPC Condensation Particle Counter.

$dN / d\log D$ Partikelanzahlkonzentration im jeweiligen Größenkanal normiert auf den dekadischen Logarithmus der entsprechenden Kanalbreite.

DWD Deutscher Wetterdienst, <https://www.dwd.de>.

GUAN German Ultrafine Aerosol Network, <http://wiki.tropos.de/index.php/GUAN>.

HLNUG Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, <https://www.hlnug.de>.

PM_{10} Partikelmassenkonzentration für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als $10 \mu m$.

$PM_{2,5}$ Partikelmassenkonzentration für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als $2,5 \mu m$.

SMPS Scanning Mobility Particle Sizer.

UCPC Ultrafine Condensation Particle Counter.

UFP Ultrafeine Partikel bzw. Ultrafeinstaub; alle Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 100 nm.

UFP-Konzentration Anzahlkonzentration ultrafeiner Partikel; aus messtechnischen Gründen umfassen Angaben zur UFP-Konzentration häufig zusätzlich auch Partikel größer als 100 nm.

WCCAP World Calibration Center for Aerosol Physics,
<http://www.wmo-gaw-wcc-aerosol-physics.org/>.

WHO Weltgesundheitsorganisation, <https://www.who.int>.

Danksagung

Dem Umwelt- und Nachbarschaftshaus (Forum Flughafen und Region) wird gedankt für die finanzielle Unterstützung bei der Erhebung und Auswertung der UFP-Messdaten durch Sach- und Personalmittel. Dem Umweltamt der Stadt Frankfurt wird gedankt für die Bereitstellung der beiden CPCs (Fa. Grimm, Model EDM 465). Der Fraport AG wird gedankt für die Bereitstellung der Flugbewegungsdaten. Ausdrücklicher Dank geht auch an alle Städte und Gemeinden sowie Grundstückseigner für die Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur zur Aufstellung der Messstationen.

Literaturangaben

- Birmili, W., Weinhold, K., Rasch, F., Sonntag, A., Sun, J., Merkel, M., ... Fiebig, M. (2016). Long-term observations of tropospheric particle number size distributions and equivalent black carbon mass concentrations in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). *Earth System Science Data*, 8(2), 355–382. doi:10.5194/essd-8-355-2016
- Cassee, F., Morawska, L., Peters, A., Wierzbicka, A., Buonanno, G., Cyrus, J., ... Aurelio, T. (2019). White Paper: Ambient ultrafine particles: evidence for policy makers.
- 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.
- Geiser, M., Quaile, O., Wenk, A., Wigge, C., Eigeldicher-Berthou, S., Hirn, S., ... Kreyling, W. G. (2013). Cellular uptake and localization of inhaled gold nanoparticles in lungs of mice with chronic obstructive pulmonary disease. *Part Fibre Toxicol*, 10(19). doi:10.1186/1743-8977-10-19. eprint: <https://doi.org/10.1186/1743-8977-10-19>
- Habre, R., Zhou, H., Eckel, S. P., Enebish, T., Fruin, S., Bastain, T., ... Gilliland, F. (2018). Short-term effects of airport-associated ultrafine particle exposure on lung function and inflammation in adults with asthma. *Environment International*, 118, 48–59. doi:10.1016/j.envint.2018.05.031
- 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. *Environmental Science & Technology*, 48(12), 6628–6635. PMID: 24871496. doi:10.1021/es5001566. eprint: <https://doi.org/10.1021/es5001566>
- Keuken, M., Moerman, M., Zandveld, P., Henzing, J. & Hoek, G. (2015). Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmospheric Environment*, 104, 132–142. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.015>
- Laj, P., Bigi, A., Rose, C., Andrews, E., Lund Myhre, C., Collaud Coen, M., ... Zikova, N. (2020). A global analysis of climate-relevant aerosol properties retrieved from the network of Global Atmosphere Watch (GAW) near-surface observatories. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(8), 4353–4392. doi:10.5194/amt-13-4353-2020
- Lammers, A., Janssen, N., Boere, A., Berger, M., Longo, C., Vijverberg, S., ... Cassee, F. (2020). Effects of short-term exposures to ultrafine particles near an airport in healthy subjects. *Environment International*, 141, 105779. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105779>
- Maron, C. (2020). Einfluss von Überflügen auf die Ultrafeinstaubkonzentration am Boden anhand Daten der Messstationen Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad, Masterarbeit, Hochschule RheinMain, Wiesbaden. <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/luftqualitaet/sondermessprogramme/ufp/Masterarbeit-Maron-Christian.pdf>.
- Ohlwein, S., Hoffmann, B., Kappeler, R., Joss, M. K. & Künzli, N. (2018). Health Effects of Ultrafine Particles - Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting. *UMWELT & GESUNDHEIT*, 5. Zugriff unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

- Rivas, I., Beddows, D. C., Amato, F., Green, D. C., Järvi, L., Hueglin, C., ... Kelly, F. J. (2020). Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities. *Environment International*, 135, 105345. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105345>
- Rose, D., Ditas, F. & Jacobi, S. (2020). 3. Bericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt. *Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie*. Zugriff unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/UFP_Bericht_Teil3_20201016.pdf
- Rose, D. & Jacobi, S. (2018). 1. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt. *Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie*. Zugriff unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/1._Zwischenbericht_HLNUG_Ultrafeinstaub_final_Korrigendum_20180619.pdf
- Rose, D. & Jacobi, S. (2019). 2. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt. *Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie*. Zugriff unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/UFP-Zweiter_Zwischenbericht_20190819.pdf
- Stacey, B. (2019). Measurement of ultrafine particles at airports: A review. *Atmospheric Environment*, 198, 463–477. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.041>
- Stacey, B., Harrison, R. M. & Pope, F. (2020). Evaluation of ultrafine particle concentrations and size distributions at London Heathrow Airport. *Atmospheric Environment*, 222, 117148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117148>
- Sun, J., Birmili, W., Hermann, M., Tuch, T., Weinhold, K., Merkel, M., ... Wiedensohler, A. (2020). Decreasing trends of particle number and black carbon mass concentrations at 16 observational sites in Germany from 2009 to 2018. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(11), 7049–7068. doi:10.5194/acp-20-7049-2020
- Wiedensohler, A., Birmili, W., Nowak, A., Sonntag, A., Weinhold, K., Merkel, M., ... Bastian, S. (2012). Mobility particle size spectrometers: harmonization of technical standards and data structure to facilitate high quality long-term observations of atmospheric particle number size distributions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(3), 657–685. doi:10.5194/amt-5-657-2012
- Wiedensohler, A., Wiesner, A., Weinhold, K., Birmili, W., Hermann, M., Merkel, M., ... Nowak, A. (2018). Mobility particle size spectrometers: Calibration procedures and measurement uncertainties. *Aerosol Science and Technology*, 52(2), 146–164. doi:10.1080/02786826.2017.1387229. eprint: <https://doi.org/10.1080/02786826.2017.1387229>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
- Zhang, X., Karl, M., Zhang, L. & Wang, J. (2020). Influence of Aviation Emission on the Particle Number Concentration near Zurich Airport. *Environmental Science & Technology*, 54(22), 14161–14171. PMID: 33115230. doi:10.1021/acs.est.0c02249. eprint: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02249>