



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

Auswirkungen des reduzierten Flugbetriebs während der COVID-19-Pandemie

Diana Rose, Florian Ditas, Stefan Jacobi

Oktober 2020



Für eine lebenswerte Zukunft

Zusammenfassung

Ultrafeine Partikel (UFP, Partikel kleiner als 100 nm) gelten auf Grund ihrer spezifischen Eigenschaften sowie der Fähigkeit besonders effektiv in die Lunge einzudringen als möglicherweise gesundheitsschädlich. Trotz vieler Indizien aus toxikologischen Untersuchungen fehlen bislang jedoch noch systematische epidemiologische Studien, auf deren Basis die gesundheitlichen Risiken durch UFP quantifiziert und beurteilt werden könnten.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) hat bereits in zwei vorangegangenen Berichten gezeigt, dass der Flugbetrieb am Flughafen Frankfurt eine bedeutende Quelle für ultrafeine Partikel ist und zu erhöhten Konzentrationen im Umfeld des Flughafens führt. Die COVID-19-Pandemie und die damit einhergegangenen Reisebeschränkungen lösten ab März 2020 einen drastischen Rückgang der Flugbewegungen am Frankfurter Flughafen aus. Im April 2020 lag die Zahl der Starts und Landungen im Mittel bei nur noch etwa 15 % der sonst üblichen Flugbewegungen. Im vorliegenden dritten Bericht wird gezeigt, wie sich die durch die COVID-19-Pandemie ausgelösten Einschränkungen des Flugbetriebs auf die Luftqualität in der Umgebung des Frankfurter Flughafens ausgewirkt haben.

Für die Auswertung wurden die Messwerte der Stationen Raunheim, Frankfurt-Schwanheim, Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad im Zeitraum März 2019 bis Juni 2020 betrachtet. Vor der COVID-19-Pandemie lagen die mittleren UFP-Konzentrationen dort zwischen ca. 8000 und 11000 Partikel pro cm^3 , wobei die höchsten Werte in Frankfurt-Schwanheim und die niedrigsten Werte in Raunheim gemessen wurden. Während der COVID-19-Pandemie sank die mittlere UFP-Konzentration um 44 % in Frankfurt-Schwanheim und um 18 % in Frankfurt-Sachsenhausen. In Frankfurt-Oberrad und Raunheim ging die mittlere Konzentration aber lediglich um etwa 6 - 7 % zurück.

Dass die mittlere UFP-Konzentration an den vier Standorten sehr unterschiedlich stark abnahm, hat zwei wesentliche Gründe:

1. Je nach Lage und typischerweise vorherrschender Windrichtung befinden sich die Standorte unterschiedlich häufig in der Abluft des Flughafens. Der zusätzlich durch den Flugbetrieb verursachte Beitrag an UFP fällt demzufolge an allen Standorten unterschiedlich hoch aus.
2. Je höher dieser Zusatzbeitrag an UFP im Vergleich zur an der Station typischen Hintergrundkonzentration ist, desto stärker wirkt sich eine Minderung der Flugverkehrsemissionen auch mindernd auf die mittlere UFP-Konzentration an einem Standort aus.

Um den wetterbedingten Einfluss auf die Ergebnisse zu minimieren, ist es sinnvoll die UFP-Konzentration in Abhängigkeit der Windrichtung zu betrachten. Bereits in den vorangegangenen Berichten konnte mit Hilfe dieser Betrachtungsweise gezeigt werden, dass an allen Standorten die höchsten UFP-Konzentrationen auftreten, wenn der Wind während der Betriebszeiten des Flughafens (5 – 23 Uhr) aus Richtung des Flughafens weht. Diese Ergebnisse verdeutlichen,

dass die durch den Flugbetrieb verursachten Emissionen bis mindestens in eine Entfernung von 8 km vom Flughafen zu einer deutlichen Erhöhung der UFP-Konzentration führen. Aus den Daten des Standorts Frankfurt-Oberrad, die für diesen Bericht neu hinzugezogen wurden, lässt sich diese Erkenntnis noch erweitern - auch bis in eine Entfernung von ca. 11 km spiegelt sich der Einfluss des Flugbetriebs in den UFP-Konzentrationen wider.

Während der COVID-19-Pandemie traten die höchsten Konzentrationen immer noch dann auf, wenn der Wind aus Richtung Flughafen wehte, aber die Konzentration war im Vergleich zu vor der Pandemie an allen Standorten deutlich reduziert. Die Höhe der Reduktion ist abhängig von der Entfernung der Messstelle zum Flughafen. Bei Wind aus Richtung Flughafen verringerte sich folglich die Belastung in Frankfurt-Oberrad um 25 % und in Frankfurt-Sachsenhausen um 37 %. In Raunheim war bei Wind aus Richtung Flughafen die UFP-Konzentration um 42 % geringer als vor der Pandemie. Der größte Rückgang war an der dem Flughafen nächstgelegenen Station, Frankfurt-Schwanheim, messbar mit ca. 58 %. Abbildung 1 zeigt, wie stark sich die Konzentration während der COVID-19-Pandemie an den einzelnen Standorten bei Wind aus Sektor Flughafen (also unter Flughafeneinfluss) reduziert hat und wie sich diese Minderung auf das Gesamtmittel an diesen Standorten auswirkt.

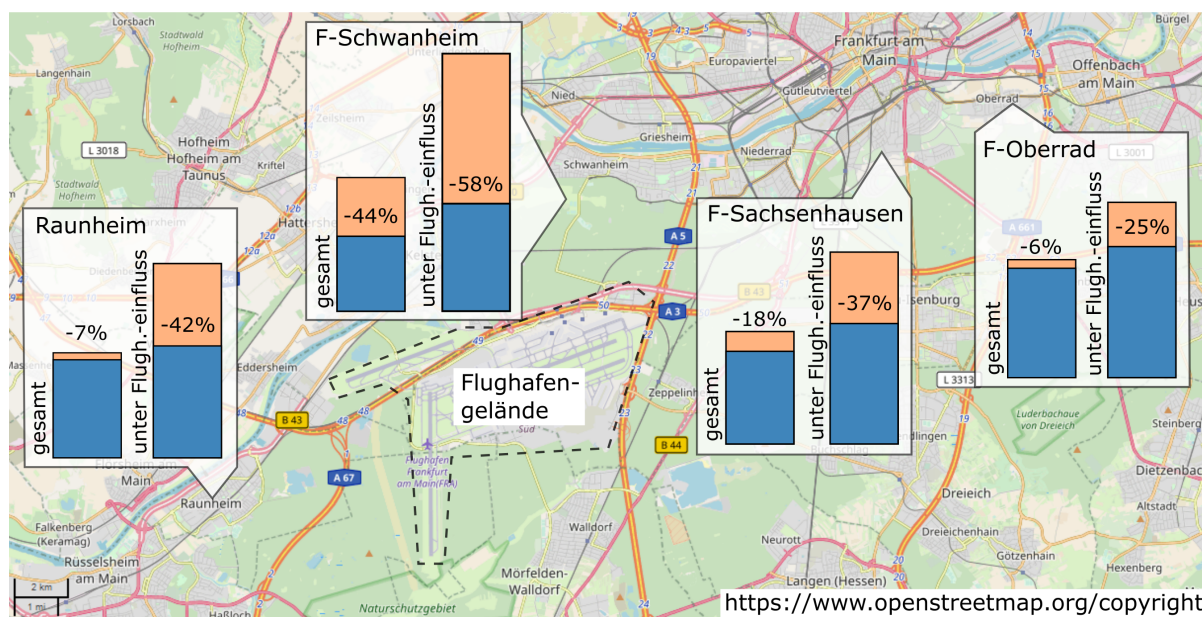


Abbildung 1: Karte der Region um den Frankfurter Flughafen. Die Balkendiagramme stellen maßstabsgetreu die UFP-Konzentration der Stationen Raunheim (Größenbereich 10 – 500 nm), F-Schwanheim (10 – 500 nm), F-Sachsenhausen (7 – 2200 nm) und F-Oberrad (7 – 2200 nm) dar. Die gesamte Höhe des Balkens entspricht jeweils der Konzentration gemittelt über den Zeitraum vor der COVID-19-Pandemie. Der orange Bereich entspricht dem Anteil, um den die Konzentration während der Pandemie zurückgegangen ist. An jeder Station bezieht sich der linke Balken auf den Mittelwert ohne Einschränkung der Uhrzeit oder Windrichtung (exakte Werte in Tab. 3). Der rechte Balken bezieht sich ausschließlich auf den Zeitraum, in dem der Standort unter Flughafeneinfluss steht (Wind aus Sektor Flughafen, 5 – 23 Uhr; exakte Werte in Tab. 4). <https://www.openstreetmap.org/copyright>

Die stärkste Konzentrationsminderung während der COVID-19-Pandemie war für Partikel mit einem Durchmesser kleiner 30 nm zu verzeichnen. Dieser Größenbereich ist besonders stark vertreten, wenn Emissionen aus dem Flugbetrieb eine größere Rolle spielen. Bei Wind aus Richtung Flughafen nahm die Konzentration dieser besonders kleinen Partikel im Vergleich

zu vor der COVID-19-Pandemie in Raunheim um 52 % und in Frankfurt-Schwanheim um 68 % ab. In Raunheim ist außerdem ein Rückgang der UFP-Konzentration für nördliche Windrichtungen zu verzeichnen. Bei dieser Windrichtung kommt die Luft aus Richtung der niedrigen Landeanflüge auf die Landebahn Nordwest, welche für den ausgewerteten Zeitraum während der COVID-19-Pandemie geschlossen blieb. Entsprechend bestätigt dies die Ergebnisse des letzten Zwischenberichts, wonach Landeanflüge bei niedrigen Flughöhen (bis ca. 400 m) einen Beitrag zur Gesamtkonzentration ultrafeiner Partikel leisten können.

Analog zu den vorangegangenen Berichten wurde der durch den Flugbetrieb verursachte zusätzliche Beitrag von UFP zur UFP-Gesamtkonzentration abgeschätzt. Dieser zusätzliche Beitrag an Partikeln kleiner als 30 nm ist je nach Station unterschiedlich stark ausgeprägt. In Raunheim führte der zusätzliche Beitrag des Flugbetriebs vor der Pandemie und bei den entsprechenden Windverhältnissen zu einer mittleren Erhöhung von etwa 7000 Partikeln pro cm^3 . In Frankfurt-Schwanheim erhöhte sich die Konzentration bei Wind aus Richtung Flughafen vor der Pandemie um durchschnittlich 13000 Partikel pro cm^3 . Während der Pandemie ist dieser zusätzliche Beitrag deutlich um etwa 75-80 % gesunken und ist damit ähnlich stark zurückgegangen wie die durchschnittliche Anzahl der Flugbewegungen (ca. 80 %).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der stark eingeschränkte Flugbetrieb während der COVID-19-Pandemie eine unterschiedlich hohe, teils deutliche Reduzierung der UFP-Konzentration an den umliegenden Messstellen zur Folge hatte. Je nachdem wie hoch der zusätzliche Beitrag durch den Flugbetrieb gegenüber der Hintergrundkonzentration ist und wie häufig ein Standort aufgrund der vorherrschenden Windbedingungen im Einflussbereich des Flughafens liegt, reduziert sich die mittlere UFP-Konzentration infolge der stark reduzierten Flugbewegungen mehr oder weniger stark. Aufgrund der typischerweise häufig auftretenden südwestlichen Windrichtungen profitieren die Regionen, die relativ nah in nordöstlicher Richtung des Flughafens liegen (südliche Stadtteile Frankfurts) wahrscheinlich am meisten von der, in Bezug auf ultrafeine Partikel, verbesserten Luftqualität infolge der reduzierten Flugbewegungen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Standorte, Mess- und Auswertemethoden	3
2.1	Flughafenbetrieb	3
2.2	Standorte und Messzeitraum	3
2.3	Geräte zur UFP-Messung	5
2.4	Winddaten	6
3	Ergebnisse	7
3.1	Überblick über die mittlere UFP-Belastung an vier Standorten	8
3.2	Windrichtungsabhängige Betrachtung der UFP-Konzentration	9
3.3	Größenaufgelöste Betrachtung der UFP-Konzentration	11
3.4	Ermittlung des Zusatzbeitrags durch den Flugbetrieb	13
4	Fazit & Ausblick	16
5	Anhang	18
	Definition des Windsektors Flughafen	18
	Glossar	19
	Danksagung	20
	Literaturangaben	22

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 weitere 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).

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). Außerdem zeigen Studien, dass Flugzeugtriebwerke große Mengen an besonders kleinen ultrafeinen Partikeln emittieren (Stacey 2019).

In den letzten beiden Jahren wurde jeweils ein Bericht veröffentlicht, der die Erkenntnisse der UFP-Messungen des HLNUG erläutert (Rose und Jacobi 2018; Rose und Jacobi 2019). Die bisherigen Befunde zeigen eindrucksvoll, dass auch der Flugbetrieb durch den Frankfurter Flughafen eine bedeutende Quelle für ultrafeine Partikel darstellt.

Es konnte festgestellt werden, dass zu den Betriebszeiten des Flughafens die UFP-Konzentration an den umliegenden Messstellen deutlich ansteigt, sobald der Wind aus Richtung Flughafen weht. An der Luftmessstation in Frankfurt-Schwanheim zeigte sich so beispielsweise ein mittlerer Anstieg der UFP-Konzentration von etwa 5000 auf über 15000 Partikel pro cm^3 (Rose und Jacobi 2019). Partikel kleiner als 30 nm machen daran den größten Teil aus.

Erste Schätzungen ergaben, dass die durch den Flugbetrieb verursachten Emissionen bei entsprechendem Wind bis in eine Entfernung von mindestens 8 km zu einer deutlichen Erhöhung der UFP-Konzentration beitragen können (Rose und Jacobi 2019). Hierbei sind nicht nur die Emissionen auf dem Flughafengelände selbst, sondern auch die Emissionen in den Regionen entlang der Anfluglinien bis zu einer Flughöhe von etwa 400 m von Bedeutung. Insgesamt werden große Mengen an UFP bodennah beim Betrieb der Flugzeuge (Abfertigung, Rollen, etc.), bei Start und Landung und auf geringen Flughöhen ausgestoßen. Diese werden anschließend mit dem Wind in die Umgebung transportiert, so dass dort deutlich erhöhte Konzentrationen gemessen werden können.

Seit März 2020 hat die Anzahl der Flugbewegungen auf dem Frankfurter Flughafen aufgrund der COVID-19-Pandemie drastisch abgenommen, zeitweise lag sie nur noch bei ca. 15 % der sonst üblichen Anzahl. Außerdem wurden die Landebahn Nordwest und die Startbahn West für einige Zeit außer Betrieb genommen. Infolge des geringeren Flugbetriebs ist die Belastung mit ultrafeinen Partikeln in der Region merklich zurückgegangen.

Der hier vorliegende dritte Bericht soll nun diese besondere Situation am Frankfurter Flughafen zum Anlass nehmen, besser zu quantifizieren, wie groß der Beitrag an UFP aus dem Flugbetrieb für einzelne Standorte der Region ist.

Hierbei wurden Schwerpunkte auf verschiedene Aspekte gelegt:

1. Feststellung der grundsätzlichen Belastung durch ultrafeine Partikel an verschiedenen Messstellen.
2. Belastung durch Ultrafeinstaub bei Wind aus Richtung des Flughafens als Maß für die Belastung bei direktem Einfluss durch den Flugbetrieb.
3. Veränderung des Zusatzbeitrags von ultrafeinen Partikeln durch den Flugbetrieb im Zusammenhang mit der Reduzierung der Flugbewegungen.

In diesem Bericht wurden dazu die Messdaten der Stationen Raunheim, Frankfurt-Schwanheim, Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad ausgewertet. Die Messdaten anderer Messstationen sind nicht Gegenstand dieses Berichts. Die Erkenntnisse daraus sollen an anderer Stelle thematisiert werden.

Die bisherigen Messungen zur Charakterisierung ultrafeiner Aerosolpartikel durch das HL-NUG werden zudem fortgesetzt und intensiviert. Es ist in absehbarer Zeit nicht geplant, diese Messungen einzustellen oder abzuschließen, entsprechend ist auch kein *abschließender* Bericht zu erwarten. Diese und zukünftig gewonnene Erkenntnisse werden weiterhin in regelmäßigen Berichten thematisiert und dokumentiert. Daher werden dieser und folgende Berichte nicht mehr als *Zwischenberichte* sondern einfache *Berichte* bezeichnet.

2 Standorte, Mess- und Auswertemethoden

2.1 Flughafenbetrieb

Der Verkehrsflughafen Frankfurt am Main liegt im Südwesten der Stadt Frankfurt etwa 10 km vom Stadtkern entfernt. Pro Tag landen und starten im Durchschnitt ca. 1400 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.

Infolge der COVID-19-Pandemie wurde der Flugbetrieb weltweit eingeschränkt. Bereits Ende Januar 2020 strich die Lufthansa AG alle Flüge nach China (FRAPORT 2020a). Im Februar wurden nach und nach immer mehr Flüge ab Frankfurt gestrichen. Im März führte die weltweite Ausbreitung des Coronavirus SARS-CoV-2 zu einem Einreisestopp in die EU und zu starken Reisebeschränkungen innerhalb der EU, so dass der Flugverkehr in ganz Europa fast zum Erliegen kam. Am Flughafen Frankfurt landeten und starteten zu diesem Zeitpunkt zeitweise kaum mehr als 200 Flugzeuge pro Tag. Ab Mai nahm die Anzahl der Flugbewegungen langsam wieder zu, blieb aber zunächst bei wenigen hundert pro Tag. Die Landebahn Nordwest (07L bzw. 25R) blieb zwischen dem 23.03.2020 und dem 07.07.2020 komplett geschlossen (FRAPORT 2020b). Ebenfalls ab dem 23.03.20 wurde auch die Startbahn West geschlossen und lediglich für einen Zeitraum vom 06.04. bis 30.04.20 aufgrund von Baumaßnahmen zwischenzeitlich als Startbahn genutzt. Seit Anfang Juli stieg die Anzahl der Flugbewegungen wieder an und erreichte bei Redaktionsschluss dieses Berichts (31.08.20) knapp 600 Flugbewegungen pro Tag.

2.2 Standorte und Messzeitraum

Für diesen Bericht wurden die Messdaten der Stationen Raunheim, Frankfurt-Schwanheim, Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad ausgewertet. Im Folgenden werden die Frankfurter Stationsnamen abgekürzt (bspw. F-Schwanheim). **Betrachtet wurde der Zeitraum vom 10.03.2019 bis 30.06.2020.** In diesem Zeitraum liefen die Messungen bis auf kleinere Unterbrechungen an allen Stationen parallel. Um die Auswirkungen der verminderten Flugbewegungen auf die UFP-Konzentration analysieren zu können, wurde der Gesamtzeitraum in zwei Teilzeiträume – **vor COVID-19 (10.03.2019 bis 22.03.2020) und während COVID-19 (23.03.2020 bis 30.06.2020) – unterteilt.** Der 10.03.2019 als Anfangszeitpunkt ergibt sich hierbei aus dem Zeitpunkt des Messbeginns an der *jüngsten* hierbei berücksichtigten Station, F-Oberrad. Damit ist die Gleichwertigkeit des Beobachtungszeitraums an allen Stationen gewährleistet. Der 30.06.2020 wurde als Endzeitpunkt gewählt, da ab Juli die Anzahl der Flugbewegungen deutlich anstieg.

Im letzten Zwischenbericht (Rose und Jacobi 2019) wurde bereits über die Ergebnisse aus Raunheim, F-Schwanheim und F-Sachsenhausen berichtet. Für eine detaillierte Beschreibung der Standorte wird auf diesen Bericht verwiesen.

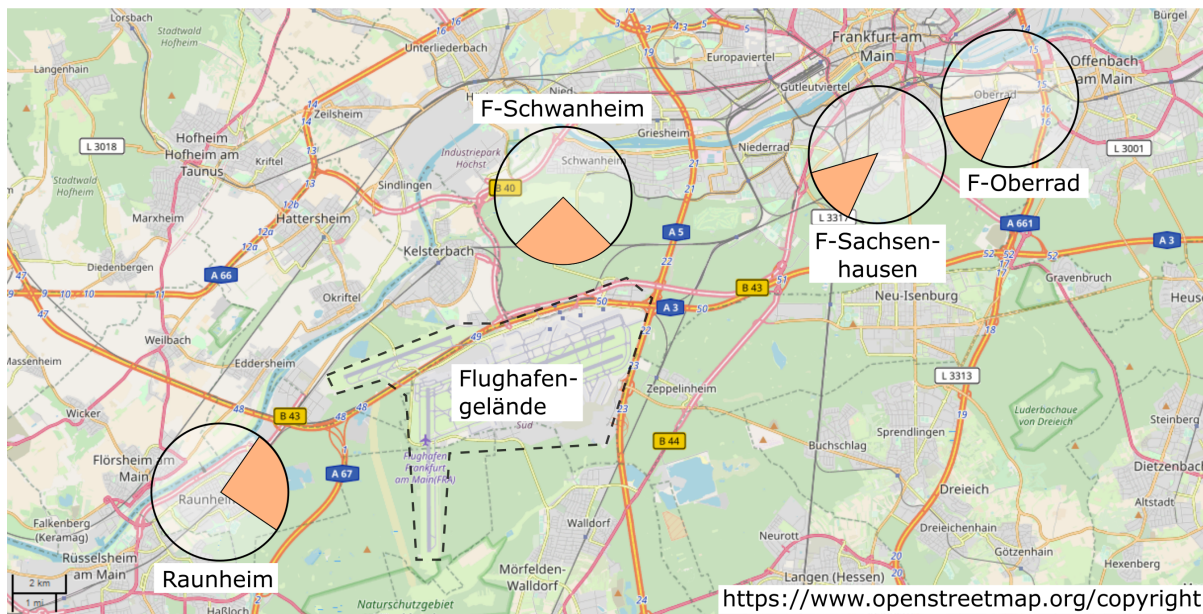


Abbildung 2: Karte der Region um den Frankfurter Flughafen. Markiert sind die Standorte der UFP-Messstellen im Großraum Frankfurt, die in diesem Bericht thematisiert werden. Die orange gefärbten Flächen markieren den Windrichtungsbereich der jeweiligen Stationen für den die UFP-Immissionen maßgeblich durch den Frankfurter Flughafen beeinflusst werden. Die Karte wurde mit Hilfe von OpenStreetmap erstellt.
<https://www.openstreetmap.org/copyright>

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 und Westen befindet sich in unmittelbarer Umgebung der Messstelle eine Anlage aus Garten- bzw. Freizeitgrundstücken. Im Süden, in etwa 400 m Entfernung, beginnt der Frankfurter Stadtwald, der sich über mehrere Quadratkilometer erstreckt. 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. 11 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.

Abbildung 2 zeigt eine Karte der Region um den Frankfurter Flughafen. Im jeweiligen Zentrum der abgebildeten Kreise befinden sich die in diesem Bericht thematisierten Messstellen. Die farblich gekennzeichneten Kreissegmente markieren den Windrichtungsbereich, in dem der jeweilige Standort maßgeblich durch den Flughafen beeinflusst wird (siehe auch Kap. 2.4). Die Stationen liegen unterschiedlich häufig im Einflussbereich des Flughafens. In Tab. 1 sind die Häufigkeiten für die einzelnen Stationen zusammengefasst.

2.3 Geräte zur UFP-Messung

Zur physikalischen Charakterisierung der ultrafeinen Partikel setzt das HLNUG zwei verschiedene Messmethoden ein. An den Standorten F-Sachsenhausen und F-Oberrad wird jeweils ein Kondensationspartikelzähler (CPC, engl. **C**ondensation **P**article **C**ounter) der Fa. Grimm Aerosol Technik (Modell 465) betrieben. Dieser erfasst die Gesamtpartikelanzahlkonzentration, also die Anzahl aller Partikel innerhalb eines bestimmten Luftvolumens (Partikel pro Kubikzentimeter) ohne eine Aussage zur Größe der Partikel treffen zu können. Die kleinste Größe ab der Partikel von den hier eingesetzten CPCs detektiert werden können, liegt bei ca. 7 nm. Oberhalb von ca. 2200 nm werden keine Partikel mehr erfasst.

An den Standorten Raunheim und F-Schwanheim wird die Anzahlgrößenverteilung der Partikel mit einem Partikelgrößenpektrometer (SMPS, engl. **S**canning **M**obility **P**article **S**izer) 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 im Bereich von ca. 10 nm bis 500 nm bestimmt. Hierbei liegt zeitlich gesehen ein Schwerpunkt auf der Erfassung des Größenbereichs von 10 nm bis 100 nm auf den etwa 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. Anhand der Form der Verteilung lassen sich gegebenenfalls Rückschlüsse auf dominierende Partikelquellen ziehen. 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 in F-Sachsenhausen und F-Oberrad vergleichbar, da die dort betriebenen CPCs ebenfalls Partikel kleiner als 10 nm und größer als 500 nm detektieren. Während die Partikel größer 500 nm bei dieser Betrachtung anzahlmäßig 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 (Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig) überprüft und kalibriert. Die Kondensationspartikelzähler 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. 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).

2.4 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 Zeitpunkt die Strömungsverhältnisse am Standort der UFP-Messung mit denen am Standort der Windmessung gleichzusetzen sind. 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°, zeitliche Auflösung: 10 Minuten) einzuschätzen ist. Je nach geografischer Lage werden die unterschiedlichen UFP-Messstellen für unterschiedliche Windrichtungsbereiche durch den Frankfurter Flughafen beeinflusst. In Abb. 2 sind die entsprechenden Windbereiche bzw. Windsektoren für die jeweiligen Stationen farblich gekennzeichnet. Die hier verwendeten Windrichtungsbereiche wurden anhand von zwei Kriterien festgelegt, die im Anhang 5 näher erläutert werden. Tabelle 1 benennt die Windsektoren für die sich die einzelnen Standorte im Einflussbereich des Flugbetriebs befinden und zeigt deren Auftrittshäufigkeit.

Tabelle 1: Windrichtungsbereiche für die sich die jeweiligen Messstellen im Einflussbereich des Flughafens Frankfurt befinden und deren Auftrittshäufigkeit im betrachteten Zeitraum.

	Windsektor Flughafen	Häufigkeit	
		vor COVID-19	während COVID-19
Raunheim	35° – 124°	22%	32%
F-Schwanheim	145° – 224°	40%	19%
F-Sachsenhausen	205° – 254°	25%	16%
F-Oberrad	205° – 254°	26%	16%

3 Ergebnisse

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit den Auswirkungen der im Zuge der COVID-19-Pandemie ergriffenen Maßnahmen und den damit verbundenen geringeren Flugverkehrsemissionen auf die UFP-Konzentration im Umfeld des Frankfurter Flughafens.

Abbildung 3 zeigt Monatsmittelwerte ohne Einschränkungen bezüglich der Flugbetriebszeiten oder der vorherrschenden Windrichtung. Die Flugbewegungen (Abb. 3, oben) lagen im Sommerhalbjahr 2019 mit ca. 1500 pro Tag etwas höher als im Winterhalbjahr 2019/2020 (ca. 1300 pro Tag), was sich aus dem regulären Flugplanwechsel ergibt. Ab März 2020 ging die Anzahl der Flugbewegungen aus den in Kap. 2.1 genannten Gründen deutlich zurück und lag im April 2020 bei nur noch 220 pro Tag. In Tabelle 2 sind die mittleren täglichen Flugbewegungen für den Zeitraum vor und während der COVID-19-Pandemie zusammengefasst. Die entsprechenden Mittelwerte der UFP-Konzentration sind in Tab. 3 dargestellt.

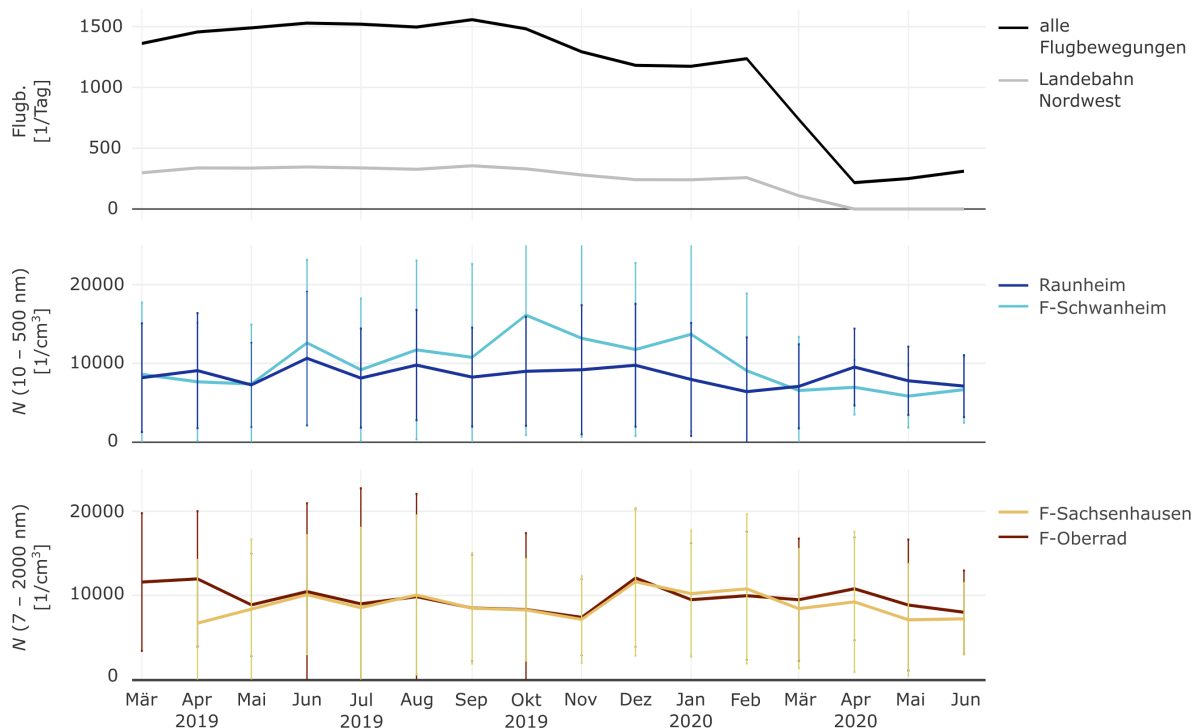


Abbildung 3: Oben: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Flugbewegungen sowie Landungen auf der Landebahn Nordwest. Monatsmittelwerte und Standardabweichung der UFP-Konzentration im Größenbereich 10 – 500 nm, $N(10-500 \text{ nm})$, für die Stationen Raunheim und F-Schwanheim (mittleres Panel) sowie für den Größenbereich 7 – 2200 nm, $N(7-2200 \text{ nm})$, für die Stationen in F-Sachsenhausen und F-Oberrad (unteres Panel). In dieser Auswertung wird keinerlei Einschränkung bezüglich Flugbetriebszeiten oder der Windrichtung vorgenommen.

Tabelle 2: Mittlere tägliche Flugbewegungen (Mittelwert \pm Standardabweichung) am Frankfurter Flughafen vor und während der COVID-19-Pandemie.

	Anzahl der Flugbewegungen
vor COVID-19 (09.03.2019 – 20.03.2020)	1377 \pm 189 pro Tag
während COVID-19 (21.03.2020 – 30.06.2020)	263 \pm 50 pro Tag

Tabelle 3: Mittlere UFP-Konzentration (Mittelwert \pm Standardabweichung) an verschiedenen Messstellen in der Region um den Frankfurter Flughafen vor und während der COVID-19-Pandemie. In dieser Auswertung wurden keinerlei Einschränkungen bezüglich Windrichtung oder Flughafenbetriebszeiten vorgenommen. An den verschiedenen Messstellen werden UFP-Geräte mit unterschiedlichem Messbereich verwendet.

	Messbereich	UFP-Konzentration [$1/\text{cm}^3$]		proz. Rückgang
		vor COVID-19	während COVID-19	
Raunheim	10 – 500 nm	8590 \pm 7100	7980 \pm 4580	7 %
F-Schwanheim	10 – 500 nm	10900 \pm 11060	6180 \pm 3860	44 %
F-Sachsenhausen	7 – 2200 nm	9170 \pm 7950	7590 \pm 6480	18 %
F-Oberrad	7 – 2200 nm	9580 \pm 9010	9010 \pm 6290	6 %

3.1 Überblick über die mittlere UFP-Belastung an vier Standorten

Die für den Zeitraum vor der COVID-19-Pandemie gemittelten UFP-Konzentrationen liegen zwischen ca. 8000 und 11000 Partikeln pro cm^3 , wobei die höchsten Werte in F-Schwanheim und die niedrigsten Werte in Raunheim gemessen wurden (Tab. 3). Ähnlich hohe UFP-Konzentrationen sind typisch für verkehrsbezogene und städtische Hintergrund-Stationen in Europa (Laj et al. 2020; Sun et al. 2020). Mit Blick auf die monatlichen UFP-Konzentrationen (Abb. 3) fällt für alle vier Stationen eine sehr hohe Variabilität auf. Von Monat zu Monat schwanken die Mittelwerte um teils mehrere Tausend Partikel pro cm^3 .

Aufgrund der Einschränkungen im Flugverkehr und der daraus folgenden Reduktion der Flugbewegungen ab März 2020 lässt sich aus den in Abb. 3 dargestellten Monatsmittelwerten zunächst nur für F-Schwanheim ein deutlicher Rückgang der UFP-Konzentration beobachten. Hier liegen die Monatsmittelwerte für März bis Juni alle deutlich niedriger als die der vorangegangenen Monate. In Raunheim, F-Sachsenhausen und F-Oberrad wurden jedoch auch schon vor der COVID-19-Pandemie Monatsmittel beobachtet, die ähnliche Werte aufwiesen wie die seit März 2020 beobachteten.

Mittelt man jeweils über den gesamten Zeitraum vor und während der COVID-19-Pandemie, wird deutlich, dass die UFP-Konzentration während der Pandemie an allen 4 Messstellen um unterschiedliche Beträge abnimmt. Der stärkste Rückgang ist in F-Schwanheim zu verzeichnen (ca. 44 %) gefolgt von F-Sachsenhausen (18 %). An den Stationen in Raunheim und F-Oberrad ist nur ein geringer Rückgang um etwa 6 - 7 % zu beobachten.

Wie bereits im ersten Zwischenbericht (Rose und Jacobi 2018) festgestellt wurde, hängt die an den Standorten im Umfeld des Frankfurter Flughafens zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessene UFP-Konzentration sehr stark von der gleichzeitig auftretenden Windrichtung ab. Weht der Wind in einem betrachteten Zeitraum häufig aus Richtung des Flughafens, so liegt die mittlere UFP-Konzentration an einem Standort höher als in einem Zeitraum mit häufigem Wind aus anderen Richtungen.

Demzufolge ist die mittlere UFP-Konzentration vor und während der COVID-19-Pandemie nicht nur von der Höhe der Emissionen, die im Zusammenhang mit dem Flugbetrieb am Frankfurter Flughafen stehen, abhängig, sondern auch in starkem Maße von der Häufigkeit bestimm-

ter Windrichtungen. Ein direkter Vergleich der Zeit vor und während der COVID-19-Pandemie muss demnach auf ausreichend langen Zeiträumen basieren um sicherzustellen, dass gleichwertige Wetterbedingungen vorherrschend waren. Da die Wetterbedingungen und speziell die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung sich vor und während der COVID-19-Pandemie sehr stark voneinander unterschieden (vgl. Tab. 1, Abb. 4), ist ein einfacher Vergleich der mittleren Konzentrationen nicht aussagekräftig, um abzuschätzen, welchen Effekt die reduzierten Flugbewegungen auf die UFP-Konzentration hatten.

Um einen möglichen wetterbedingten Einfluss auf die Ergebnisse zu minimieren, wurden nachfolgende Auswertungen in Abhängigkeit der Windrichtung durchgeführt.

3.2 Windrichtungsabhängige Betrachtung der UFP-Konzentration

Abbildung 4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an der DWD-Messstation auf dem Flughafengelände (Stations-ID 1420) in Form einer Windrose. Hierbei wurde der Datensatz in den Zeitraum vor und während der COVID-19-Pandemie unterteilt. Für den Zeitraum vor der COVID-19-Pandemie ergibt sich die für die Region typische Windverteilung mit zwei wesentlichen Maxima. Es überwiegt Wind aus südwestlichen Richtungen ($175^\circ - 274^\circ$, Auftrittshäufigkeit ca. 50 %) gegenüber Wind aus Nordosten ($5^\circ - 94^\circ$, ca. 30 %). Während der COVID-19-Pandemie änderten sich die Windverhältnisse hin zu überwiegend nordöstlichen Richtungen (Auftrittshäufigkeit ca. 52 %). In nur noch ca. 30 % dieses Messzeitraums kam der Wind aus südwestlichen Richtungen.

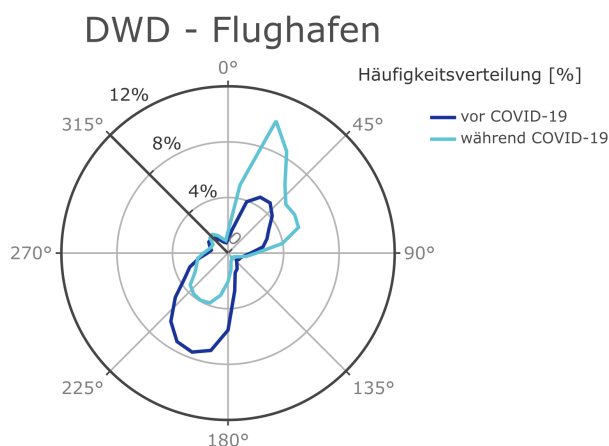


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung vor und während der COVID-19-Pandemie gemessen auf dem Flughafengelände (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420).

Nachfolgend wird die UFP-Konzentration entsprechend der zeitgleich auftretenden Windrichtung betrachtet. Abbildung 5 zeigt Mittelwerte der UFP-Konzentration zwischen 5 und 23 Uhr Ortszeit für die vier UFP-Standorte in Abhängigkeit der Windrichtung als sogenannte Konzentrationsrose. Für jede Konzentrationsrose wurde der Datensatz wieder in den Zeitraum vor und während der COVID-19-Pandemie unterteilt. Zusätzlich wurde der Windrichtungsbereich, der durch die Flughafenemissionen beeinflusst wird (Definition siehe Kap. 5) orange markiert dargestellt.

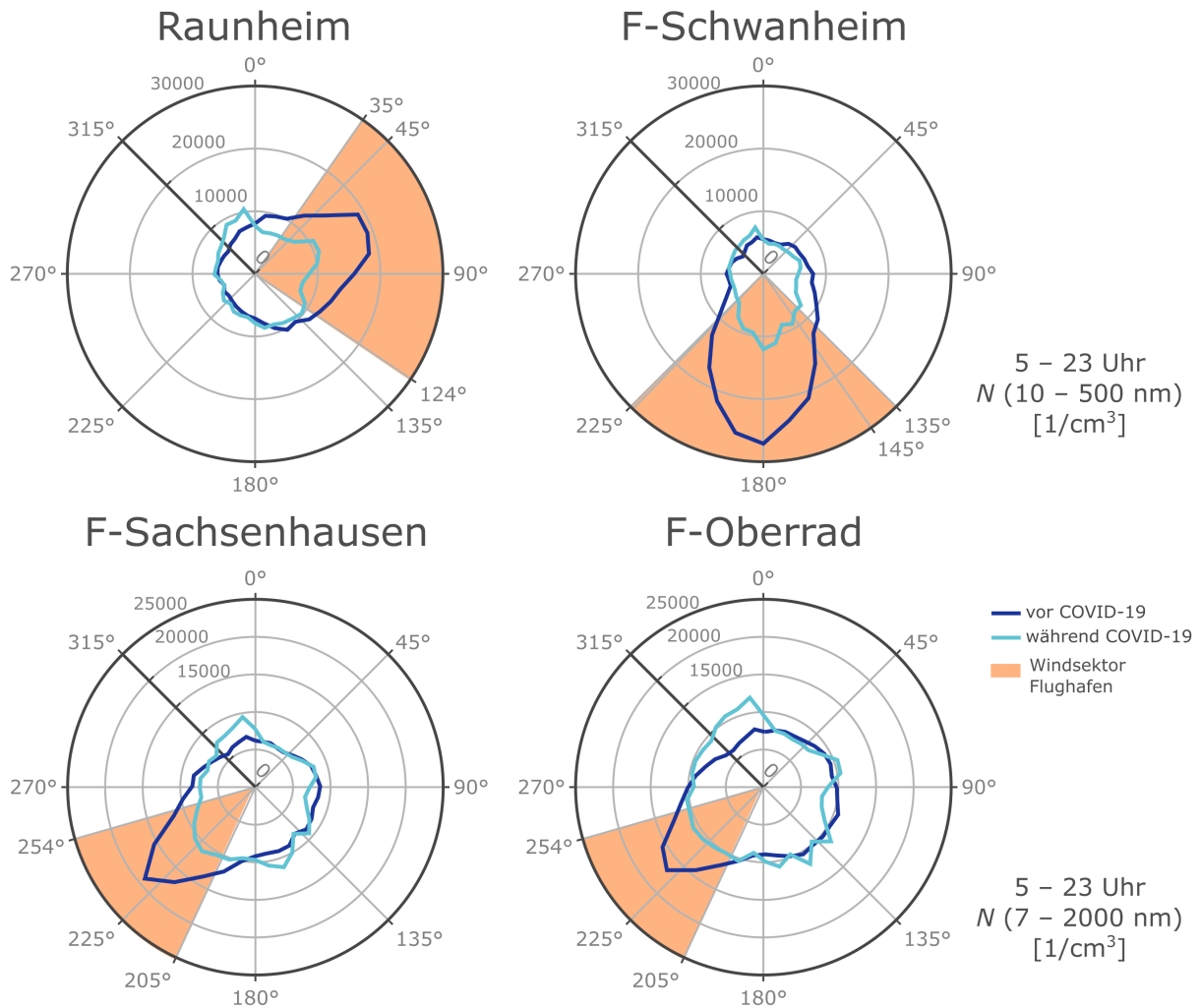


Abbildung 5: Windrichtungsabhängige Mittelwerte der UFP-Konzentration im Größenbereich 10–500 nm, $N(10-500 \text{ nm})$, für die Stationen Raunheim und F-Schwanheim sowie für den Größenbereich 7–2200 nm, $N(7-2200 \text{ nm})$, für die Stationen in F-Sachsenhausen und F-Oberrad. In der Abbildung sind die Zeiträume vor und während der COVID-19-Pandemie getrennt dargestellt. Der orange hinterlegte Bereich markiert die Windrichtungen assoziiert mit dem Flughafen Frankfurt (Transport aus Richtung Flughafen). Die Darstellung bezieht sich ausschließlich auf den Zeitraum zwischen 5–23 Uhr Ortszeit, dem Betriebszeitraum des Frankfurter Flughafens. Der Abbildung liegen die Winddaten der DWD-Messstation auf dem Flughafengelände zugrunde (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420).

Weht der Wind während der Betriebszeiten des Flughafens (5–23 Uhr) aus Richtung Flughafen, so treten an jedem Standort sehr hohe Konzentrationen auf. Dreht der Wind nur leicht aus dem entsprechendem Sektor Flughafen heraus, sinken die Konzentrationen merklich ab. Dies lässt sich sehr deutlich für die Zeit vor der COVID-19-Pandemie beobachten. Während der Pandemie schwächt sich dieser Effekt ab, ist jedoch teilweise weiterhin sichtbar.

An jedem Standort sind die Konzentrationen für die Windrichtung, bei der sie vor der Pandemie am höchsten waren, während der Pandemie am stärksten zurückgegangen. Besonders deutlich ist dies in F-Schwanheim zu beobachten, in F-Oberrad hingegen ist dieser Effekt am geringsten ausgeprägt.

Demzufolge ist die Belastung durch ultrafeine Partikel, die dem Flugbetrieb zuzuordnen sind, während der Pandemie deutlich zurückgegangen. Aus den Konzentrationsrosen wird ebenfalls ersichtlich, dass bei Wind aus anderen Richtungen die UFP-Konzentration nahezu gleich ge-

Tabelle 4: Mittlere UFP-Konzentration (Mittelwert \pm Standardabweichung) an verschiedenen Messstellen in der Region um den Frankfurter Flughafen vor und während der COVID-19-Pandemie. Diese Auswertung beschränkt sich auf die Flughafenbetriebszeiten (5 – 23 Uhr Ortszeit) und die jeweiligen Windrichtungsbereiche der Messstellen, die mit dem Frankfurter Flughafen assoziiert sind (siehe Tab. 1). An den verschiedenen Messstellen werden UFP-Geräte mit unterschiedlichem Messbereich verwendet.

	Messbereich	UFP-Konz. bei Einfluss durch Flugbetrieb [$1/\text{cm}^3$]		
		vor COVID-19	während COVID-19	proz. Rückgang
Raunheim	10 – 500 nm	15770 \pm 10760	9130 \pm 5780	42%
F-Schwanheim	10 – 500 nm	20900 \pm 14240	8800 \pm 5880	58%
Raunheim	10 – 30 nm	10090 \pm 8560	4830 \pm 4560	52%
F-Schwanheim	10 – 30 nm	15540 \pm 11840	4910 \pm 5020	68%
F-Sachsenhausen	7 – 2200 nm	15610 \pm 10240	9880 \pm 5560	37%
F-Oberrad	7 – 2200 nm	14220 \pm 9430	10690 \pm 5870	25%

blieben ist. Folglich ist die Belastung mit UFP aus anderen Quellen, die nicht dem Flugbetrieb zuzuordnen sind, während der COVID-19-Pandemie weitestgehend ähnlich geblieben. Lediglich bei Wind aus Nord-Nordwest hat die Konzentration an allen Standorten etwas zugenommen. Hierbei ist aber zu beachten, dass diese Windrichtung vergleichsweise selten aufgetreten ist.

Tabelle 4 fasst die Mittelwerte der UFP-Konzentrationen und deren Standardabweichung während des Betriebszeitraums des Flughafens und für Wind aus dem entsprechenden Windsektor Flughafen der jeweiligen Stationen vor und während der COVID-19-Pandemie zusammen. Die dargestellten Werte sind somit ein Maß für die UFP-Belastung in der Abluft des Flughafens. An allen Stationen wird für Wind aus Richtung Flughafen während der Pandemie ein deutlicher Rückgang der UFP-Konzentration sichtbar, auch die Variabilität nimmt deutlich ab. Der Rückgang ist am wenigsten ausgeprägt für die Stationen, die am weitesten vom Flughafen entfernt sind. In F-Oberrad und F-Sachsenhausen ergeben sich Reduktionen um 25 % bzw. 37 %. In Raunheim verringert sich bei Wind aus Richtung Flughafen die UFP-Konzentration im Größenbereich von 10 – 500 nm um 42 %. Der größte Rückgang bei Wind aus Richtung Flughafen ist an der Station F-Schwanheim messbar mit ca. 58 % (betrifft ebenfalls den Größenbereich von 10 – 500 nm).

3.3 Größenaufgelöste Betrachtung der UFP-Konzentration

Ein Vorteil, der sich aus der Verwendung von größenaufgelösten Messungen mit Hilfe von Mobilitätsspektrometern ergibt, ist die mögliche Identifizierung von Quellen anhand ihrer typischen Partikelanzahlgrößenverteilungen. Wie bereits in den vorangegangenen Zwischenberichten festgestellt, ist der Beitrag ultrafeiner Partikel, der auf den Flugbetrieb zurückzuführen ist, für Partikel mit Durchmessern kleiner als 30 nm besonders ausgeprägt. In diesem Abschnitt wird darauf eingegangen, wie sich die Konzentration dieser besonders kleinen Partikel während der COVID-19-Pandemie verändert hat.

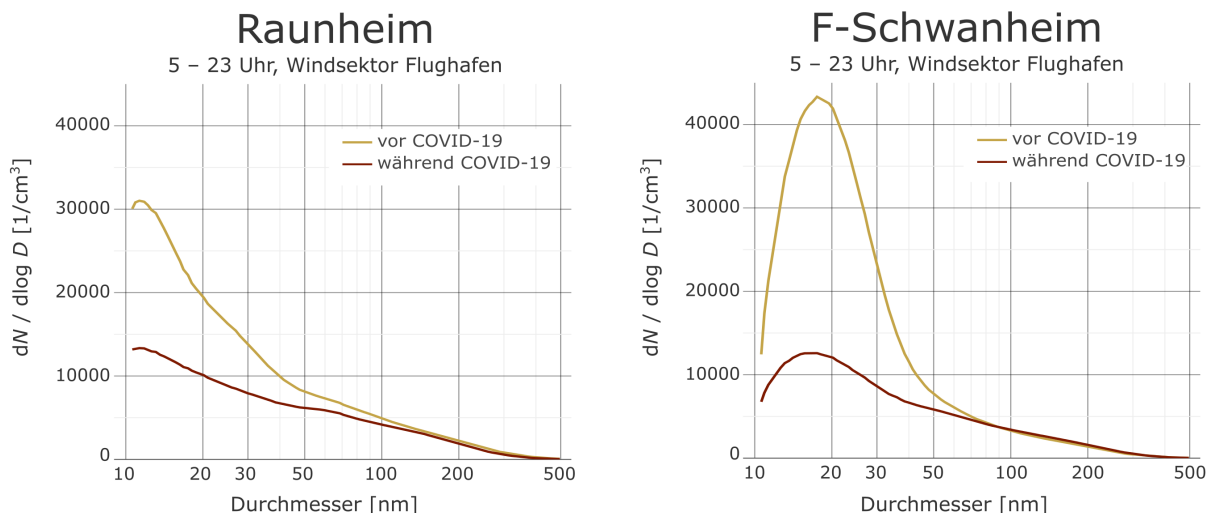


Abbildung 6: Mittlere Anzahlgrößenverteilung ultrafeiner Partikel im Größenbereich 10 – 500 nm für die Stationen Raunheim und F-Schwanheim vor und während der COVID-19-Pandemie für den Windsektor der am jeweiligen Standort durch den Flugbetrieb beeinflusst wird. Der gemittelte Zeitraum bezieht sich ausschließlich auf den Zeitraum zwischen 5 – 23 Uhr Ortszeit, dem Betriebszeitraum des Frankfurter Flughafens. Die Anzahlgrößenverteilung ist dargestellt in $dN / d\log D$, der Partikelanzahl im jeweiligen Größenkanal, normiert auf dessen Kanalbreite.

Abbildung 6 zeigt die mittlere Partikelanzahlgrößenverteilungen der Stationen Raunheim und F-Schwanheim bei Wind aus Richtung Flughafen, während der Flugbetriebszeiten. Auch hier wurde der Datensatz wieder in einen Zeitraum vor und während der COVID-19-Pandemie unterteilt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass der Hauptanteil der Partikel, die durch den Flugbetrieb hinzukommen, im Größenbereich kleiner als 30 nm liegt. Die Verteilungen vor und während der COVID-19-Pandemie weisen an den jeweiligen Stationen grundsätzlich eine ähnliche Form auf. Die Höhe der Konzentration ist jedoch während der Pandemie deutlich, insbesondere bei den sehr kleinen Partikeln, zurückgegangen. Es zeigt sich, dass die Mehrbelastung in F-Schwanheim für den Größenbereich 10–50 nm wesentlich höher ist, als die in Raunheim, wie bereits aus den Mittelwerten der UFP-Konzentration ersichtlich. Auffällig ist darüber hinaus eine deutliche Verschiebung der Größenverteilung hin zu kleineren Partikeln an der Station in Raunheim, deren Ursache Gegenstand aktueller Untersuchungen durch das HLNUG ist.

Betrachtet man die Konzentrationsrose von Partikeln kleiner als 30 nm während des Flugbetriebs für den Zeitraum vor und nach der COVID-19-Pandemie (Abb. 7) so ergibt sich ein ähnliches Bild wie in Abb. 5: Für Windbereiche, die wenig oder gar nicht durch den Flugbetrieb beeinflusst werden, gleichen sich die Werte vor und während der Pandemie. Für Windbereiche, für die die beiden Stationen im Einflussbereich des Flugbetriebs stehen, reduziert sich die Konzentrationen der 10-30 nm großen Partikel während der COVID-19-Pandemie stark. Im Mittel macht diese Reduktion der besonders kleinen Partikel etwa 52 % in Raunheim und 68 % in F-Schwanheim aus (Tab. 4). Für F-Sachsenhausen und F-Oberrad lässt sich darüber keine Aussage treffen, da die dort verwendeten Messgeräte keine Größenverteilung liefern.

Bei genauerer Betrachtung der Konzentrationsrosen in Abb. 7 kann man in Raunheim während der COVID-19-Pandemie zusätzlich eine auffällige Reduktion der Konzentration bei nord-

nordöstlicher Windrichtung erkennen. Bei dieser Windrichtung kommt die Luft nicht mehr direkt vom Flughafengelände, sondern eher aus Richtung der niedrigen Landeanflüge auf die Landebahn Nordwest. Diese Konzentrationsabnahme könnte daraus resultieren, dass in dieser Zeit keinerlei Landeanflüge auf diese Landebahn stattfanden. Entsprechend bestätigt dies die Ergebnisse des zweiten Zwischenberichts, wonach Landeanflüge bei niedrigen Flughöhen (bis ca. 400 m) einen Beitrag zur UFP-Konzentration leisten können.

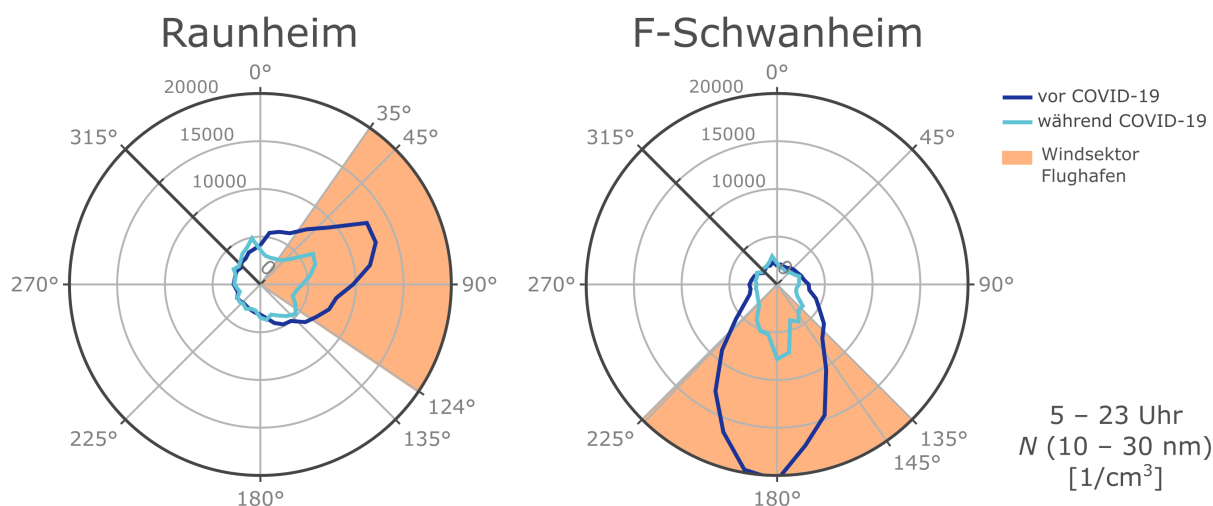


Abbildung 7: Windrichtungsabhängige Mittelwerte der UFP-Konzentration im Größenbereich 10 – 30 nm, $N(10-30\text{ nm})$, für die Stationen Raunheim und F-Schwanheim vor und während der COVID-19-Pandemie. Der orange hinterlegte Bereich markiert die Windrichtungen assoziiert mit dem Flughafen Frankfurt (Transport aus Richtung Flughafen). Die Mittelwerte beziehen sich ausschließlich auf die Messdaten im Zeitraum zwischen 5 – 23 Uhr Ortszeit, dem Betriebszeitraum des Frankfurter Flughafens. Der Abbildung liegen die Winddaten der Messstation auf Flughafengelände zugrunde (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420).

3.4 Ermittlung des Zusatzbeitrags durch den Flugbetrieb

Die vorangegangenen Abbildungen zeigen, dass der Flugbetrieb des Frankfurter Flughafens eine erhebliche Quelle für Ultrafeinstaub darstellt. Dadurch erhöht sich die UFP-Konzentration im Umfeld des Flughafens, je nach Lage des betrachteten Standorts um einen gewissen Betrag sobald der Wind aus Richtung des Flughafens weht. Um den zusätzlichen Beitrag des Flugbetriebs abzuschätzen, muss ein geeigneter Referenzwert oder Hintergrundwert gefunden und von der gemessenen Konzentration abgezogen werden. Dieser Bericht sowie die vorangegangenen Zwischenberichte haben gezeigt, dass vor allem Partikel kleiner als 30 nm dem Flugbetrieb zuzuschreiben sind. Um eine möglichst robuste Abschätzung des durch den Flugbetrieb verursachten Zusatzbeitrags zur UFP-Konzentration zu ermöglichen, beschränkt sich die Auswertung im Rahmen dieses Berichts auf Partikel der Größe zwischen 10 und 30 nm. Für Wind aus dem Windsektor Flughafen wird der Beitrag des Flugbetriebs hier im Folgenden als Differenz zwischen der Belastung während der Flugbetriebszeiten und der Belastung während der Nachtstunden (Referenzwert) definiert.

Für die Stationen F-Schwanheim und Raunheim werden dazu Monatsmittelwerte unter Flug-

betriebsbedingungen (Wind aus Richtung Flughafen, 5 – 23 Uhr Ortszeit) und unter Referenzbedingungen (Wind aus Richtung Flughafen, 0 – 5 Uhr Ortszeit) gebildet und voneinander abgezogen. Der Zeitraum von 23 bis 0 Uhr wird nicht mit einbezogen, da in dieser Zeit die UFP-Konzentration typischerweise stark abnimmt bis schließlich im späteren Verlauf eine Hintergrundkonzentration erreicht wird. Dies kann als eine Art *Abklingzeit* bis zum Erreichen der Hintergrundbelastung verstanden werden, nachdem der Flugbetrieb eingestellt wird.

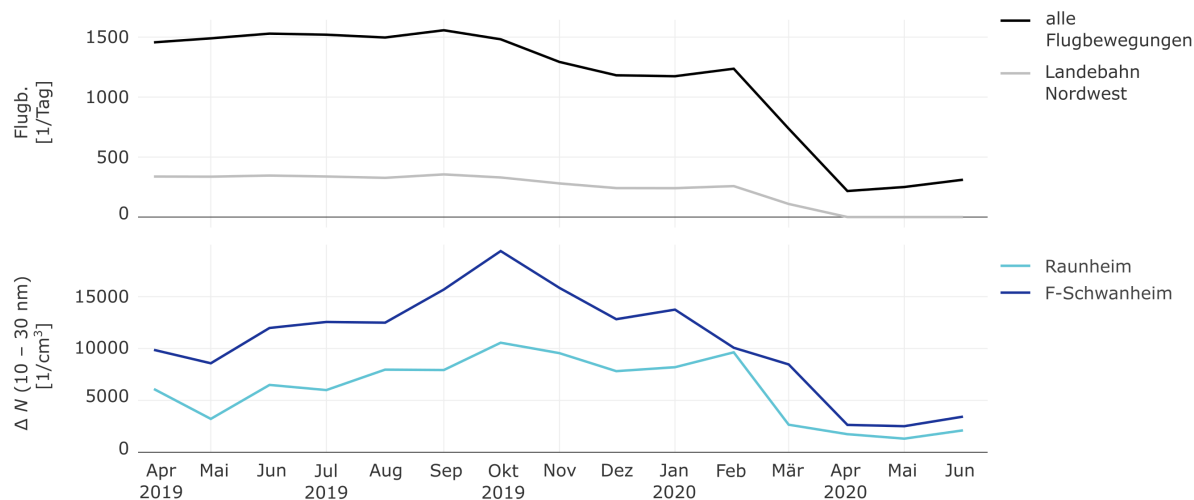


Abbildung 8: Mittlerer zeitlicher Verlauf aller Flugbewegungen sowie Landungen auf der Landebahn Nordwest. Monatsmittelwerte des durch den Flugbetrieb verursachten Zusatzbeitrags der UFP-Konzentration im Größenbereich 10 – 30 nm, $\Delta N(10-30 \text{ nm})$, für die Stationen Raunheim und F-Schwanheim.

Abbildung 8 zeigt den mittleren Verlauf des Beitrags des Flugbetriebs, $\Delta N(10-30 \text{ nm})$, zur Konzentration ultrafeiner Partikel an den beiden Messstellen. Der typische zusätzliche Beitrag an ultrafeinen Partikeln bei Wind aus Richtung Flughafen beläuft sich vor der COVID-19-Pandemie auf Werte zwischen ca. 5000 und 10000 Partikel pro cm^3 in Raunheim und ca. 10000 bis 20000 Partikel pro cm^3 in F-Schwanheim. Die teils großen Unterschiede von Monat zu Monat lassen sich auf Variationen in der exakten Windrichtung innerhalb des Flughafen-sektors zurückführen. Zum Beispiel lag im Oktober 2019 die häufigste Windrichtung innerhalb des Flughafensektors für F-Schwanheim bei ca. 190° und damit sehr nahe am Maximum der windabhängigen UFP-Konzentration (vgl. Abb. 7). Im April und Mai 2019 dagegen lagen die häufigsten Windrichtungen innerhalb des Flughafensektors weiter westlich bei $200^\circ - 210^\circ$, was typischerweise geringere Konzentrationen für F-Schwanheim mit sich bringt. Aufgrund des scharfen Konzentrationsmaximums wirkt sich eine vermeintlich geringe Abweichung von $10^\circ - 20^\circ$ hierbei stark auf die UFP-Konzentration aus (vgl. Abb. 7, Abb. 9).

Mit Beginn der Einschränkungen des Flugverkehrs sinkt der Beitrag des Flugbetriebs an beiden Stationen drastisch auf weniger als 4000 Partikel pro cm^3 . Dieser Rückgang ist an der Station Raunheim quasi instantan zu erkennen, da in der zweiten März-Hälfte besonders häufig Ostwind vorherrschte. Der leichte Anstieg für den Monat Juni folgt dem leichten Anstieg der Flugbewegungen, sollte aber aufgrund der hohen Variabilität nicht überinterpretiert werden.

Tabelle 5 fasst den zusätzlichen Beitrag an ultrafeinen Partikeln durch den Flugbetrieb für

Tabelle 5: Mittlerer Beitrag des Flugbetriebs zur UFP-Konzentration im Größenbereich 10 – 30 nm an verschiedenen Messstellen in der Region um den Frankfurter Flughafen vor und während der COVID-19-Pandemie. Diese Auswertung beschränkt sich auf die jeweiligen Windrichtungsbereiche der Messstellen, die mit dem Frankfurter Flughafen assoziiert sind (siehe Tab. 1).

		Zusatzbeitrag durch Flugbetrieb [1/cm ³]		
	Messbereich	vor COVID-19	während COVID-19	proz. Rückgang
Raunheim	10 – 30 nm	6900	1710	75%
F-Schwanheim	10 – 30 nm	13230	2640	80%

Wind aus Richtung Flughafen für den Zeitraum vor und während der Pandemie zusammen. Für die Stationen Raunheim und F-Schwanheim ist im Mittel ein deutlicher Rückgang der mit dem Flugbetrieb in Verbindung stehenden ultrafeinen Partikel von 75-80% zu beobachten. Besonders auffällig ist, dass der verzeichnete Rückgang in derselben Größenordnung wie der Rückgang der Flugbewegungen liegt.

4 Fazit & Ausblick

Die COVID-19-Pandemie stellt mit den damit verbundenen gesundheitlichen Gefahren und Einschränkungen des öffentlichen Lebens eine sehr große Herausforderung für unsere Gesellschaft dar. Auf die Luftqualität wirkt sich die COVID-19-Pandemie aufgrund des geringeren Schadstoffausstoßes allgemein und auf die ultrafeinen Partikel aus dem Flugverkehr im Besonderen jedoch positiv aus.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass sich die Konzentration der Partikel, die eindeutig dem Flugverkehr zuzuschreiben sind, an den untersuchten Standorten in guter Näherung proportional zur Anzahl der Flugbewegungen und damit zur Menge an Emissionen verhält. So ist während der COVID-19-Pandemie der durch den Flugbetrieb verursachte Zusatzbeitrag an UFP im Mittel um ca. 75 bis 80 % und damit etwa in gleichem Maße wie auch die Flugbewegungen zurückgegangen.

Wie sich diese Minderung auf die mittlere UFP-Konzentration auswirkt, ist an den einzelnen Standorten jedoch sehr unterschiedlich. Je höher der absolute Beitrag des Flugbetriebs gegenüber der Hintergrundkonzentration ist, desto stärker wirkt sich eine Minderung der Flugbewegungen auf die mittlere UFP-Konzentration aus. Der absolute Beitrag des Flugbetriebs wiederum ist umso größer, je häufiger sich ein Standort aufgrund seiner Lage und der herrschenden Windverhältnisse in der Abluft des Flughafens befindet und je näher er zum Flughafen liegt.

Da F-Schwanheim eine geringe Hintergrundkonzentration aufweist, sehr nah zum Flughafen und aufgrund der Hauptwindrichtung Südwest relativ häufig in der Abluft des Flughafens liegt, führt die drastische Abnahme der Flugbewegungen zu einem entsprechend starken Rückgang der mittleren UFP-Konzentration. An den anderen drei Standorten fällt der durch den Flugbetrieb verursachte Zusatzbeitrag an UFP im Vergleich zur Hintergrundkonzentration wesentlich geringer aus, deshalb sanken die mittleren UFP-Konzentrationen während der COVID-19-Pandemie hier deutlich weniger stark.

Aus den Erkenntnissen, die anhand der Messungen in Raunheim, F-Schwanheim, F-Sachsenhausen und F-Oberrad gewonnen wurden, lässt sich schlussfolgern, dass aufgrund der typischerweise häufig auftretenden südwestlichen Windrichtungen die Regionen, die relativ nah in nordöstlicher Richtung des Flughafens liegen (südliche Stadtteile Frankfurts) wahrscheinlich am meisten von einer verbesserten Luftqualität, in Bezug auf ultrafeine Partikel, durch reduzierte Flugbewegungen profitieren. Allgemein lässt sich durch die neusten Auswertungen bestätigen, dass die Emissionen aus dem Flugbetrieb bis mindestens eine Entfernung von ca. 11 km vom Flughafen zu einer Erhöhung der UFP-Konzentration führen.

Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie plant die bisherigen UFP-Messungen weiter fortzusetzen. Dabei wird verstärkt auf verschiedene Aspekte eingegangen. So soll beispielsweise die Ausbreitung ultrafeiner Partikel entlang der Hauptwindrichtung in Richtung Nordosten (Stationen Frankfurt-Niedwald, Frankfurt-Riedberg) charakterisiert werden. Außerdem sollen die Messungen in Raunheim, Raunheim-Mönchhof und Flörsheim dazu beitragen, zu klären, inwiefern anfliegende Flugzeuge zur UFP-Belastung am Boden beitragen.

Dabei wird ebenfalls die typischerweise zu kleinen Partikeln verschobene Partikelanzahlgrößenverteilung in Raunheim thematisiert. Die bisherigen Erkenntnisse wurden aus den Messdaten in Gebieten unterhalb der Anfluglinien und im Stadtgebiet Frankfurt gewonnen. Bei zukünftigen Messungen sollen auch Standorte südlich des Flughafengeländes einbezogen werden, die aufgrund ihrer Lage und der typischen Windverteilung weniger häufig in der Abluft des Flughafengeländes liegen. Außerdem sollen damit auch mögliche Auswirkungen der Abflüge von der Startbahn West auf die UFP-Belastung am Boden untersucht werden.

5 Anhang

Definition des Windsektors Flughafen

Die hier verwendeten Windrichtungsbereiche wurden anhand von zwei 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. Von der resultierenden Partikelanzahlkonzentration wurde der Minimalwert abgezogen und anschließend auf das Maximum normiert. Der Windrichtungsbereich für den 50% des Maximums erreicht wird, markiert den potentiellen Einflussbereich des Flughafens. In Abbildung 9 ist dies exemplarisch anhand der Messstelle in F-Schwanheim dargestellt.

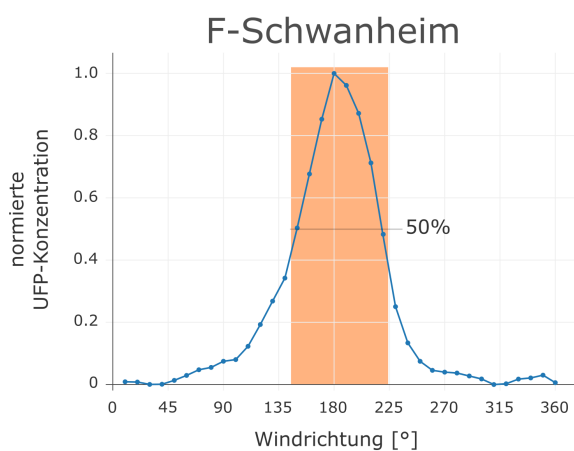


Abbildung 9: Bestimmung des Windrichtungsbereiches für den die UFP-Immissionen an der Messstelle F-Schwanheim maßgeblich durch den Frankfurter Flughafen beeinflusst werden. Der Abbildung liegen die Winddaten der Messstation auf dem Flughafengelände zugrunde (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420).

Glossar

$\Delta N(10 - 30 \text{ nm})$ durch den Flugbetrieb verursachter Zusatzbeitrag zur UFP-Konzentration im Größenbereich 10 – 30 nm.

$N(10 - 30 \text{ nm})$ UFP-Konzentration im Größenbereich 10 – 30 nm.

$N(10 - 500 \text{ nm})$ UFP-Konzentration im Größenbereich 10 – 500 nm.

$N(7 - 2200 \text{ nm})$ UFP-Konzentration im Größenbereich 7 – 2200 nm.

$dN / d\log D$ Partikelanzahlkonzentration im jeweiligen Größenkanal normiert auf dessen Kanalbreite.

DWD Deutscher Wetterdienst.

GUAN German Ultrafine Aerosol Network.

HLNUG Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.

PM_{10} Partikelmassenkonzentration für Partikel kleiner als 10 μm .

$PM_{2,5}$ Partikelmassenkonzentration für Partikel kleiner als 2,5 μm .

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

UFP-Konzentration Anzahlkonzentration ultrafeiner Partikel; aus messtechnischen Gründen umfasst die UFP-Konzentration zusätzlich auch Partikel größer als 100 nm.

Danksagung

Dem Umwelt-und Nachbarschaftshaus 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.

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.
- FRAPORT. (2020a). Fraport-Verkehrszahlen im Januar 2020: Rückläufige Passagierentwicklung in Frankfurt zu Jahresbeginn. <https://www.fraport.com/de/newsroom/pressemitteilungen/2020/q1-2020/fraport-verkehrszahlen-im-januar-2020--ruecklaeufige-passagieren.html>. letzter Zugriff: 20.07.2020.
- FRAPORT. (2020b). Sperrung der Landebahn Nordwest. <https://www.fraport.com/de/umweltschallschutz/news/2020/sperrung-der-landebahn-nordwest.html>. letzter Zugriff: 20.07.2020.
- 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>
- 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
- 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>
- 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/themen/luft/ultrafeine-partikel>
- 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/themen/luft/ultrafeine-partikel>

- 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>
- 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>