

Auswertung von Langzeitmessungen in Raunheim, nahe des Flughafens Frankfurt am Main

# Zusammenhang von Ultrafeinstaubkonzentration und Flugverkehr

C. Maron, F. Schönfeld

**ZUSAMMENFASSUNG** In der vorliegenden Arbeit werden Anzahlkonzentrationen ultrafeiner Partikel (UFP) für den Messstandort Raunheim, nahe des Flughafens Frankfurt am Main, über einen Zeitraum von ca. zwei Jahren ausgewertet. Für die Betriebszeiten des Flughafens zeigt die Gesamtauswertung der Daten eine um den Faktor 2,4 erhöhte mittlere UFP-Konzentration für Windrichtungen Nord bis Ost, d. h. für Wind aus Richtung des Flughafensektors, im Vergleich zur mittleren UFP-Konzentration für andere Windrichtungen. Um – bis zu einem gewissen Grad – zu differenzieren, inwieweit Überflüge bzw. Landeanflüge oder der Bodenbetrieb am Flughafen für hohe UFP-Konzentrationen in Raunheim verantwortlich sind, werden zusätzlich aus Schallpegelmessungen extrahierte Überflugzahlen herangezogen. Einzelne Tagesgänge stundengemittelter UFP-Konzentrationen und Überflugzahlen legen eine gewisse Korrelation nahe, erlauben aber nicht die Ableitung einer allgemeingültigen Zusammenhangsbeziehung. Die statistische Auswertung der Gesamtheit aller Daten zeigt hingegen einen Zusammenhang zwischen Konzentrationsmittelwerten und Überfluganzahl. Statistisch ergibt sich eine Zunahme von ca. 1 100 Partikeln pro  $\text{cm}^3$  pro zusätzlichem Überflug (pro Stunde).

## Correlation between ultrafine particle concentrations and aviation – Evaluation of long-term measurements at Raunheim, close to Frankfurt am Main airport

**ABSTRACT** In the present study we evaluate number concentrations of ultrafine particles (UFP) at a measurement site in the city of Raunheim, close to Frankfurt am Main airport over a period of almost two years. For airport operation times, data show a 2.4-fold increase of average UFP concentrations for wind directions north to east, i.e. wind from the direction of the airport, as compared to UFP-concentrations for other wind directions. Furthermore, we take into account numbers of overflights, which are extracted from noise level measurements, in order to identify – at least to a certain extent – the relevant UFP source: Ground operations at the airport or approaching flights over Raunheim. Diurnal variations of hourly mean UFP-concentrations and overflights suggest a certain link between both, yet do not allow for the derivation of a general correlation. The analysis of the entire data, however, reveals that there is a statistical increase of about 1,100 particles per  $\text{cm}^3$  for each additional overflight per hour.

## 1 Einleitung

Luftfahrtbedingte Emissionen rücken zunehmend in den Fokus der allgemeinen und wissenschaftlichen Aufmerksamkeit. Neben den viel diskutierten Klimaeffekten betrifft dies auch Schadstoffemissionen und hier insbesondere Ultrafeinstaubemissionen. Als ultrafeine Partikel (UFP) werden typischerweise Staubpartikel mit einem Durchmesser  $< 100$  nm bezeichnet. Aufgrund der extrem kleinen Durchmesser und der damit einhergehenden Alveolengängigkeit ist davon auszugehen, dass UFP mit erheblichen gesundheitlichen Gefahren verbunden sind. Tatsächlich deuten verschiedene Studien auf entsprechende Gesundheitsgefährdungen hin, allerdings geben die bisherigen Untersuchungen vielfach noch kein schlüssiges Bild [1 bis 3].

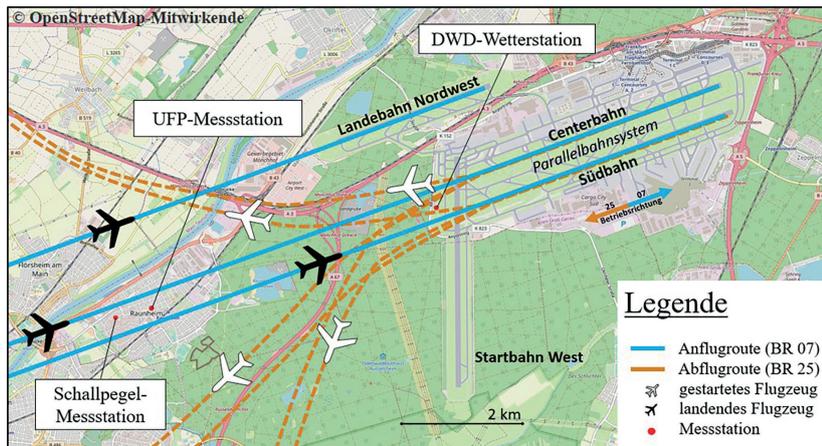
Durch hohe Temperaturen und Drücke in Strahltriebwerken sind dort entstehende Partikel kleiner als bei vielen klassischen Verbrennungsmotoren und liegen mit Durchmessern von typischerweise 5 bis 40 nm im ultrafeinen Bereich [4]. Die geringen Partikelgrößen gehen mit extrem hohen Anzahlkonzentrationen einher. Die Menge der von Triebwerken ausgestoßenen Partikel hängt dabei von vielen Faktoren ab, Messungen ergeben Werte zwischen  $10^{14}$  und  $10^{17}$  Partikel pro kg Treibstoff [5].

Eine große Variabilität zeigt sich auch in Messwerten von UFP-Konzentrationen auf dem Flughafenvorfeld. Je nach Flug-

zeugtyp, Position und verwendeter Messtechnik wurden beispielsweise am Flughafen Frankfurt am Main (FRA) Partikelkonzentrationen von ca. 130 000 bis ca. 700 000 Partikeln pro  $\text{cm}^3$  gemessen [6]. UFP-Konzentrationen an und um Flughäfen wurden schon vor über zehn Jahren vereinzelt untersucht (siehe beispielsweise [7; 8]). Jedoch wurden vor allem innerhalb der letzten ca. fünf Jahre vermehrt Studien durchgeführt, die ein zunehmend schlüssiges Bild ergeben. Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass Flughäfen eine wesentliche Quelle von UFP-Emissionen darstellen. Beispielsweise berichten Hudda et al. [9; 10] und Keuken et al. [11] von signifikanten Konzentrationserhöhungen in der Abwindfahne des Flughafens Los Angeles (LAX) in einem Abstand von 18 km bzw. des Flughafens Schiphol, Amsterdam (AMS) in einem Abstand von 40 km.

Bezüglich der Vielzahl von Studien zu UFP-Belastungen in Flughafengebieten sei auf die umfassenden Übersichtsartikel von Frenzel und Kohnert [5] sowie von Stacey [4] verwiesen.

Aufgrund der bisherigen Erkenntnislage gilt es demnach als gesichert, dass Flughäfen zu einer wesentlichen Erhöhung von UFP-Konzentrationen im Umfeld führen. Unklar ist, inwieweit der Flughafenbetrieb mit dortigen bodennahen Quellen ausschlaggebend ist oder ob erhöhte UFP-Werte in Flughafennähe auch zu einem gewissen Grad mit direkten Überflügen zusammenhängen.



**Bild 1.** Flughafen Frankfurt am Main mit An- und Abflugrouten in Blau bzw. Orange. Weiterhin sind die Messstandorte für die Schall- und UFP-Messungen in der Stadt Raunheim gezeigt sowie die Lage der Wetterstation des DWD. Quelle: [www.openstreetmap.org/copyright](http://www.openstreetmap.org/copyright); Autoren

Riley et al. [12] verweisen auf erhöhte UFP-Konzentrationen unter Landeanfluglinien an den Flughäfen von Los Angeles (LAX) sowie Atlanta (ATL) und diskutieren die Möglichkeit des Transports durch Wirbelschleppen – mit dem Verweis, dass hierzu weitere Untersuchungen notwendig sind.

Bisherige Untersuchungen des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) in der Nähe des Flughafens Frankfurt am Main ergaben, dass bislang kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Überflügeereignissen und Konzentrationsspitzen erkennbar ist. Lediglich einzelne Messungen bei geeigneten Standorten, meteorologischen Bedingungen und Überflughöhen lassen teilweise einen Zusammenhang erkennen [13 bis 15]. Die Fragestellung ist weiterhin im Fokus aktueller Untersuchungen.

Bei der Betrachtung von Schadstoffdispersionen durch Wirbelschleppen ist generell deren stochastische Natur zu beachten. Bedingt durch Turbulenz, Wirbelinstabilitäten sowie Unbestimmtheiten in Flugzeug- und meteorologischen Parametern kann Wirbelschleppenverhalten nur probabilistisch beschrieben bzw. untersucht werden [16]. Eine deterministische Betrachtung und damit verbunden eine Identifizierung einer allgemeingültigen Eins-zu-eins-Korrelation zwischen Überflügen und UFP-Konzentrationsspitzen ist daher grundsätzlich nicht aussichtsreich. Aus diesem Grund werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung keine Einzelereignisse betrachtet. Vielmehr werden für einen Untersuchungszeitraum von ca. zwei Jahren Stundenmittelwerte von UFP- und Überflugdaten von Messstationen in Raunheim ausgewertet. Wesentliches Ziel dabei ist es, etwaige Korrelationen darzustellen bzw. zu quantifizieren. Aufgrund der umfangreichen Datenlage können belastbare Aussagen bzgl. des Zusammenhangs von UFP-Belastung und Überflugzahlen abgeleitet werden.

## 2 Grundlagen und Datenbasis

### 2.1 Flughafen Frankfurt am Main

Der Flughafen Frankfurt am Main (FRA) ist mit ca. 70 Mio. Passagieren und ca. 510 000 Flugbewegungen (Jahr 2018) einer der größten Flughäfen Europas [17]. Der Flughafen befindet sich südwestlich der Frankfurter Innenstadt in ca. 9 km Entfernung. Im direkten Umkreis von ca. 5 km liegen mehrere Ortschaften, darunter auch die Stadt Raunheim.

### 2.1.1 Bahnsystem und Betriebsrichtung

Das Bahnsystem des Frankfurter Flughafens besteht aus insgesamt vier Bahnen (**Bild 1**). Das Parallelbahnsystem, bestehend aus Center- und Südbahn, ist mit 70°/250° in Ost-West-Richtung ausgerichtet. Zusammen mit den angrenzenden Terminals sowie weiterer Infrastruktur bilden sie das Zentrum des Flughafengeländes. Die Centerbahn wird überwiegend als Startbahn und die Südbahn überwiegend als Landebahn genutzt. Die Startbahn West ist mit 180° in Nord-Süd-Richtung ausgerichtet und wird ausschließlich als Startbahn Richtung Süden genutzt. Die Landebahn Nordwest ist in gleicher Richtung wie das Parallelbahnsystem ausgerichtet und wird ausschließlich als Landebahn genutzt, jedoch nicht von Großflugzeugen der Typen McDonnell Douglas/Boeing MD-11, Boeing 747 und Airbus A380 [18].

Die aktuellen Windverhältnisse sind maßgebend dafür, in welche Richtung gestartet bzw. gelandet wird, da dies in der Regel entgegen der Windrichtung erfolgt. Der Flughafen unterscheidet hierbei zwischen Betriebsrichtung (BR) West (BR 25) und Ost (BR 07). Bei Westbetrieb starten und landen die Flugzeuge in Richtung Südwesten. Aufgrund der Rückenwindkomponente kann BR 25 bis zu einer Windgeschwindigkeit von 5 Knoten (2,6 m/s) auch bei Wind aus östlichen Richtungen festgelegt werden [19]. Da südwestliche Windrichtungen in dieser Region deutlich häufiger vorkommen als andere Windrichtungen, stellt BR 25 die Hauptbetriebsrichtung des Flughafens dar.

### 2.1.2 Betriebsbeschränkungen

Seit dem im Jahr 2012 eingeführten Nachtflugverbot dürfen in der Nacht von 23:00 Uhr bis 5:00 Uhr, von wenigen Ausnahmen<sup>1)</sup> abgesehen, keine Flugbewegungen auf dem Frankfurter Flughafen stattfinden [18]. In den Nachtrandzeiten von 5:00 Uhr bis 6:00 Uhr bzw. 22:00 Uhr bis 23:00 Uhr dürfen, bezogen auf das Kalenderjahr, im Schnitt insgesamt 133 Flugbewegungen pro Nacht stattfinden. Der Zeitraum 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr stellt die Hauptbetriebszeit dar, innerhalb dessen uneingeschränkt gestartet und gelandet werden darf.

### 2.2 Messeinrichtungen

In der vorliegenden Untersuchung werden Daten zweier Messstationen in Raunheim westlich des Flughafens Frankfurt

sowie einer Messstation am Rand des Flughafengeländes herangezogen (Bild 1).

### 2.2.1 UFP-Messung

Die vom HLNUG betriebene Luftmessstation wurde im Jahr 2015 mit einem Messgerät zur Bestimmung der UFP-Gesamt-Anzahlkonzentration ausgestattet. Die Station befindet sich südwestlich des Frankfurter Flughafens in ca. 5,5 km Entfernung und ist bei Ostbetrieb von den beiden Anfluglinien des Parallelbahnsystems umgeben. Die horizontalen Abstände zu diesen Anfluglinien betragen jeweils ca. 250 m, die Überflughöhe der Landeanflüge beträgt ca. 350 m. Aus der Lage der Messstation ergibt sich, dass für die vorliegende Auswertung der Einfluss von Landeanflügen als relevanter einzuschätzen ist, da die Abflugrouten bei Westbetrieb wesentlich weiter entfernt verlaufen und die startenden Flugzeuge durch steilere Anstiegswinkel schnell an Höhe gewinnen und somit auch vertikal weiter entfernt sind.

Der in dieser Messstation eingesetzte Kondensationspartikelzähler (TSI, Modell: 3776) zur Erfassung von UFP hat im Zeitraum 09/2015 bis 10/2017 kontinuierlich die Gesamtanzahl an Partikeln pro Kubikzentimeter [ $1/\text{cm}^3$ ] gemessen. Das Messgerät deckt einen Partikelgrößenbereich von 2,5 bis 1 000 nm ab. Die Messdaten wurden vom HLNUG zu Halbstundenmittelwerten aggregiert und veröffentlicht [20].

### 2.2.2 Überflugerfassung

Von der Luftmessstation aus betrachtet befindet sich in südwestlicher Richtung in etwa 600 m Entfernung eine Schallpegel-Messstation, die von der Stadt Raunheim bzw. von der Gemeinnützigen Umwelthaus GmbH (Kelsterbach) betrieben wird. Die Messdaten werden vom Deutschen Fluglärmdienst (DFLD) aufbereitet, veröffentlicht und archiviert [21].

Die Schallpegelmessungen erfolgen mit einem kalibrierten Schallpegelmonitor nach der Norm DIN 61672 mit der Genauigkeitsklasse 1. Da sich Überflüge in charakteristischen Pegelspitzen niederschlagen (Peakhöhe bezogen auf den Grundpegel mind. 15 dB(A), typische Peakbreite ca. 150 s), kann die Anzahl der Überflüge aus den zeitlichen Pegelverläufen extrahiert werden. Dies wird für den Stationsbetreiber vom DFLD mittels einer zweistufigen Überflugererkennung übernommen. Die Daten sind online in aggregierter Form im Rahmen verschiedener Statistiken abrufbar [21]. In einzelnen Fällen kann es vorkommen, dass ein Überflug, z. B. wegen eines gleichzeitig stattfindenden Schallereignisses, nicht erkannt wird. Diese Fälle liegen jedoch im geringen Prozentbereich und sind für die nachfolgende statistische Betrachtung unerheblich.

Für die vorliegende Untersuchung wurden den Autoren die nicht aggregierten Daten des Zeitraums 09/2015 bis 10/2017 zur Verfügung gestellt, woraus die Anzahlen der Überflüge pro Stunde [ $1/\text{h}$ ] extrahiert wurden.

### 2.2.3 Windmessung

Weiterhin wurden auch Messdaten zu Windrichtung sowie -geschwindigkeit herangezogen. Beide Windparameter werden neben weiteren meteorologischen Daten von einer Messstation (Stations-ID: 1420) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) am westlichen Rand des Flughafengeländes aufgezeichnet. Die Mess-

**Tabelle 1.** Angaben zu vorhandenen Stundenmittelwerten des UFP- und Überflug-Datensatzes und des gemeinsamen Messzeitraums im Untersuchungszeitraum 03.09.2015 bis 31.10.2017. Der gemeinsame Messzeitraum enthält nur die Stunden, zu denen für beide Parameter ein Messwert vorliegt.

Datensatz	Anzahl Stundenmittel
UFP-Konzentration	14 705
Überfluganzahl	17 999
gemeinsamer Messzeitraum	14 041

daten werden nach VDI-Richtlinie 3786 Blatt 2 erfasst, geprüft, vektoriell gemittelt und anschließend veröffentlicht [22; 23]. Für die vorliegende Untersuchung wurden die Stundenmittel von Windrichtung in [ $^\circ$ ] und Windgeschwindigkeit in [ $\text{m/s}$ ] für den Zeitraum 09/2015 bis 10/2017 herangezogen.

Die Tatsache, dass Windrichtung und -geschwindigkeit nicht unmittelbar am Messort der UFP-Immissionen, sondern am Flughafengelände erhoben werden, ist für die durchgeführte Auswertung nicht nachteilig. Da hier Stundenmittel betrachtet werden, sind etwaige Zeitversätze bei Windänderungen unproblematisch. Zudem ist der Transport von Schadstoffemissionen auf dem Flughafengelände durch die dortigen Windverhältnisse wesentlich bestimmt. Generell ist der DWD-Messstandort repräsentativ für die lokalen sowie regionalen Windverhältnisse im Einflussgebiet des Flughafens.

### 2.3 Messzeiträume und Datenlage

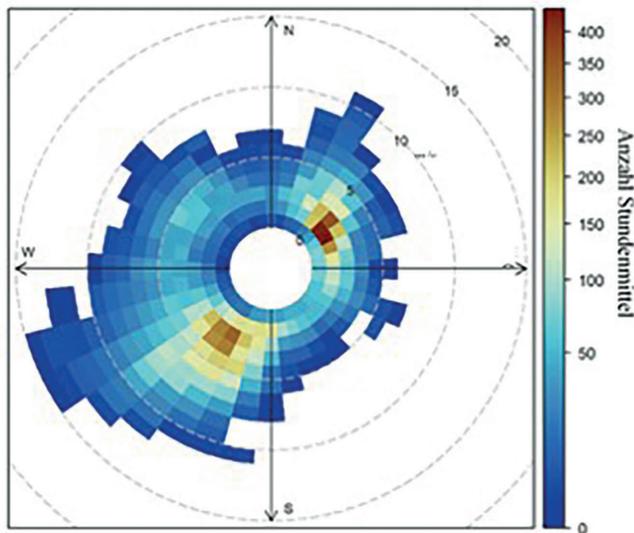
In den vorliegenden Untersuchungen wurde der Zeitraum 03.09.2015 bis 31.10.2017 betrachtet. Alle vorhandenen UFP-Halbstundenmittelwerte wurden zu Stundenmittelwerten mit Endzeitstempel<sup>2)</sup> aggregiert. Für diesen Untersuchungszeitraum kämen somit ca. 19 000 Stundenmittelwerte in Betracht. Für die Betrachtung eines etwaigen Zusammenhangs mit Flugbewegungen wurden jedoch nur die Stunden berücksichtigt, für die sowohl UFP-Daten als auch Überflugzahlen vorliegen. Aufgrund unterschiedlicher Lücken im UFP- und im Überflugdatensatz reduziert sich die Gesamtanzahl an betrachteten Stunden auf ca. 14 000 Stunden, was einem Zeitraum von etwa 585 Tagen bzw. 1,6 Jahren entspricht. In **Tabelle 1** ist die jeweilige Stundenmittelanzahl beider Parameter und des gemeinsamen Messzeitraums angegeben.

### 2.4 Emissionstransport

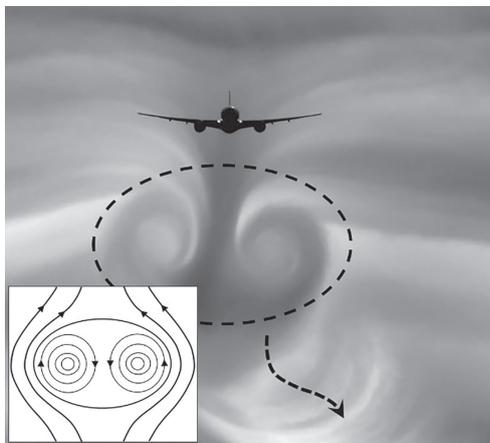
Hinsichtlich der Immissionen am Messort stellen Flughafen, Überflüge und der Autoverkehr potenziell relevante Emissionsquellen dar.

<sup>1)</sup> Zu den Ausnahmen zählen: Starts und Landungen zur Durchführung von Funk- und Radarmessungen oder für Überprüfungsmaßnahmen; Landungen aus meteorologischen, technischen und sonstigen Sicherheitsgründen; Starts und Landungen in medizinischen Hilfeleistungs- oder Katastropheneinsätzen, Evakuierungsflüge und Flüge mit besonderem öffentlichem Interesse [18].

<sup>2)</sup> Beispielsweise wird der Mittelwert für 13:00 Uhr aus den Halbstundenmittelwerten von 12:30 Uhr und 13:00 Uhr gebildet.



**Bild 2.** Häufigkeitsverteilung der Stundenmittel von Windrichtung und -geschwindigkeit im Untersuchungszeitraum (DWD, Stations-ID: 1420). Die Achsen markieren die Windrichtung; die Windgeschwindigkeit [m/s] nimmt mit radialem Abstand zum Mittelpunkt zu. Windrichtung und -geschwindigkeit wurden einzelnen Klassen zugeordnet und je nach Häufigkeit eingefärbt (siehe nicht-lineare Farbskala, rechts). Die Klassen ergeben sich aus der vektoriellen Mittelung der Windrichtung auf 10er-Grade (10°, 20°, ...) und der Windgeschwindigkeit auf ganze Meter pro Sekunde (1 m/s, 2 m/s, ...), jeweils aufgerundet. *Quelle: Autoren*



**Bild 3.** Wirbelschlepe einer Boeing 777. Die gestrichelte Linie markiert den Strömungsbereich der gegenläufigen, absinkenden Wirbel. Inset: Schematische Darstellung der Strömungslinien im Bezugssystem, das mit dem Wirbelpaar absinkt. *Quelle: Photo Steve Morris, <https://www.jetphotos.com/photo/5768059>; Autoren*

**2.4.1 Horizontalverfrachtung luftverkehrsbedingter Emissionen**

Neben anderen meteorologischen Größen stellen Windrichtung und -geschwindigkeit wesentliche Einflussfaktoren für Schadstoffverfrachtung und -dispersion dar. In einer Vielzahl von Studien wurden in Abwindfahrten von Flughäfen, d.h. bei Wind aus Flughafengerichtung [4, 5], signifikant erhöhte UFP-Konzentrationen ermittelt.

Für den Flughafen Frankfurt am Main sind die Windverhältnisse im gemeinsamen Messzeitraum in **Bild 2** dargestellt<sup>3)</sup> und entsprechen im Wesentlichen der Windverteilung im langjährigen Mittel. Im gemeinsamen Messzeitraum lagen bei insgesamt 4 406

Stunden (~31%) mittlere Windrichtungen im Bereich Nord bis Ost (0° bis 90°) vor. Während insgesamt 7 027 Stunden (~50%) lagen mittlere Windrichtungen im Bereich Süd bis West (180° bis 270°) vor. Die Windgeschwindigkeit lag dabei häufig zwischen 1 und 6 m/s und erreichte nur selten Werte größer 10 m/s.

**2.4.2 Vertikalverfrachtung / Wirbelschleppen**

Gemäß des Gegenwirkungsprinzips („*actio est reactio*“) bedingt der durch die Tragflächenumströmung generierte Auftrieb eine entsprechend starke Luftströmung nach unten, den sogenannten Downwash. Die damit verbundenen Druckunterschiede führen zu ausgeprägten Wirbeln an den Flügelspitzen, die sich in der Nachlaufströmung zu einem Wirbelpaar vereinigen. Die Konfiguration der gegenläufigen Wirbel innerhalb eines gewissen Strömungsovals ist dabei sehr stabil und bleibt bis zu mehreren Minuten erhalten (**Bild 3**). Durch das langsame Absinken entsteht die charakteristische Form der sogenannten Wirbelschlepe. Da Wirbelschleppen großer Flugzeuge eine Gefahr für nachfolgende Flugzeuge darstellen, gelten entsprechende Staffellungsabstände, die von den Gewichtsklassen der beteiligten Flugzeuge abhängen [31]. Umfassende Darstellungen zu etablierten und aktuellen Wirbelschleppenmodellen und Bewertungsansätzen finden sich in [32; 33] sowie in den dort zusammengefassten Referenzen.

Darüber hinaus können Wirbelschleppen bei Landeanflügen auch eine Gefahr am Boden darstellen. Durch große Luftgeschwindigkeiten und Unterdrücke im Wirbelkern können beispielsweise Hausdächer beschädigt werden. Systematische Untersuchungen hierzu wurden in London Heathrow bereits vor 25 Jahren durchgeführt [34].

Die Absinkhöhe einer Wirbelschlepe hängt von deren Stärke ab und damit verbunden auch von der Spannweite des erzeugenden Flugzeuges. Bei ruhigen atmosphärischen Bedingungen können Absinkhöhen typischerweise bis ca. 300 m auftreten [32; 35 bis 37], bei ungünstigen Kombinationen von Flugzeugparametern und meteorologischen Bedingungen können Absinkhöhen jedoch auch mehr als 450 m betragen [38].

Am Frankfurter Flughafen hat die Betreiberfirma mit einem Dachsicherungsprogramm auf wiederholt auftretende Dachschädigungen durch Wirbelschleppen reagiert [38; 39]. Auch Raunheim und damit der Standort der betrachteten Messstationen liegt in diesem Sicherungsgebiet. Wirbelschleppen bewirken also – zumindest in einzelnen Fällen – einen massiven vertikalen Lufttransport bis zum Boden. Mit diesem Downwash ist erwartungsgemäß ein erheblicher Transport von Turbinenabgasen verbunden, indem Abgase mit dem absinkenden Wirbelpaar nach unten verfrachtet werden. Die Wechselwirkung von Wirbelschleppen und Abgasfahnen für Reiseflughöhen ist Gegenstand verschiedener Untersuchungen (siehe [40] und enthaltene Referenzen). Large-Eddy-Simulationen von *Unterstrasser et al.* zeigen beispielsweise, dass Abgase unter Reiseflughöhen mehr als 400 m unterhalb des Flugzeugs verfrachtet werden können [40].

Es existieren jedoch nur wenige Arbeiten, welche dies für Landeanflüge oder Starts betrachten. *Graham* und *Raper* untersuchen durch Wirbelschleppen dominierte Schadstoffdispersionen

<sup>3)</sup> Diese und weitere Grafiken wurden mit der Statistik-Software „R-Studio“ erstellt [24 bis 30].

[41]. Mithilfe des formulierten Modells wird der Beitrag von Wirbelschleppenverfrachtungen von Stickoxiden am Flughafen Manchester abgeschätzt [42]. Modell und Ergebnisse sind jedoch nicht unmittelbar auf die Gegebenheiten der vorliegenden Auswertungen für Raunheim übertragbar.

Da Turbinenabgase mit Wirbelschleppen verfrachtet werden und Wirbelschleppen aus beträchtlichen Höhen den Boden erreichen können, liegt es nahe, Messungen von UFP-Konzentrationspeaks mit bestimmten Überflügen in Verbindung zu bringen. Dies kann im Einzelfall möglich sein, jedoch nicht generell. Bedingt durch die stochastische Natur von Turbulenz, verschiedenen Wirbelinstabilitäten sowie Unbestimmtheiten in Flugzeug- und meteorologischen Parametern kann das Wirbelschleppenverhalten nur mit stochastischen Methoden beschrieben werden. Entsprechend basieren aktuelle Wirbelschleppenberechnung maßgeblich auf probabilistischen Ansätzen [16]. Neben atmosphärischen Parametern wie Turbulenzgrad und Stabilität der Schichtung hat allein der Seitenwind einen starken Einfluss darauf, an welcher Stelle eine hinreichend absinkende Wirbelschleppe auf den Boden trifft und wie sich die Wirbel anschließend entwickeln. Eine deterministische Betrachtung und die Identifizierung einer allgemeingültigen Eins-zu-eins-Korrelation zwischen Überflügen und UFP-Konzentrationspitzen ist daher nicht aussichtsreich.

#### 2.4.3 Einfluss des Autobahnverkehrs

Die UFP-Messstation in Raunheim liegt in einem Wohngebiet. Die Autobahnen A3 und A67 verlaufen in ca. 2,5 km Abstand vom Messstandort. Allgemein stellt Straßenverkehr eine wesentliche Quelle von UFP-Emissionen dar. Untersuchungen an vielbefahrenen Highways in Los Angeles ergaben jedoch, dass UFP-Konzentrationen schon in einem Abstand von ca. 50 m (in Windrichtung) auf die Hälfte abklingen und in einem Abstand von 300 m nicht mehr vom (dortigen) Hintergrund zu unterscheiden sind [43]. Ein wesentlicher Einfluss der Autobahnen für den Messstandort Raunheim ist daher als unwahrscheinlich einzuschätzen.

In Übereinstimmung damit zeigen auch Messungen in Frankfurt-Schwanheim, dass der Einfluss der ebenfalls in einem Abstand von ca. 2,5 km vorbeiführenden A3 unwesentlich ist [14].

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Gesamtmittelwerte

Wird der gesamte Untersuchungszeitraum betrachtet, ergibt sich am Messstandort Raunheim eine mittlere UFP-Konzentration von ca.  $16\,300\text{ 1/cm}^3$  – in Übereinstimmung mit publizierten Werten [14; 44; 45]. In den zitierten Untersuchungen wird zudem festgestellt, dass bei Wind aus Richtung des Flughafens deutlich höhere UFP-Konzentrationen verglichen mit anderen Windrichtungen gemessen werden.

Um den Einfluss des Flugbetriebs und der Windrichtung im Rahmen einer ersten Gesamtbetrachtung des Untersuchungszeitraumes zu verdeutlichen, sind in **Tabelle 2** die Konzentrationswerte differenziert nach Tag/Nacht sowie nach eingeteilten Windrichtungssektoren angegeben.

Als Tagzeitraum wurden hier der Betriebszeitraum des Flughafens gewählt (5:00 Uhr bis 23:00 Uhr), als Nachtzeitraum der Zeitraum zwischen 0:00 Uhr und 4:00 Uhr, um einen Einfluss des Flughafenbetriebs weitgehend auszuschließen. Zur klaren Ab-

**Tabelle 2.** Mittlere UFP-Konzentration, differenziert nach Windrichtungssektor und Tageszeit, Tag: 5:00 bis 23:00 Uhr, Nacht: 0:00 bis 4:00 Uhr.

Zeitraum	Windsektor	Flughafen 0 bis 90°	Nicht-Flughafen 90 bis 360°
Tag in $1/\text{cm}^3$		31 200	13 000
Nacht in $1/\text{cm}^3$		11 700	8 500

grenzung beider Zeiträume werden die Randstunden (23:00 Uhr bis 24:00 Uhr, sowie 4:00 Uhr bis 5:00 Uhr) nicht berücksichtigt. Die Windrichtungen sind hier zunächst grob in zwei Sektoren eingeteilt: Sektor „Flughafen“ (0° bis 90°) und Sektor „Nicht-Flughafen“ (90° bis 360°). Die Einteilung ergibt sich aus der Lage des Flughafens und einer möglichen Schadstoffverfrachtung von der Quelle zur Messstation bei entsprechender Windrichtung.

Am Tag ergibt sich eine mittlere UFP-Konzentration von  $13\,000\text{ 1/cm}^3$ , wenn der Wind nicht aus Richtung des Flughafens weht (Windrichtungen von 90° bis 360°). Dieser Wert liegt zwar über publizierten städtischen Langzeitmitteln [46], aufgrund der verschiedenen Messbereiche kann jedoch kein detaillierter quantitativer Vergleich gezogen werden.

Auffällig ist die ausgeprägte Abhängigkeit vom betrachteten Windsektor. Bei Wind aus Flughafenrichtung (0° bis 90°) wird eine mittlere UFP-Konzentration von  $31\,200\text{ 1/cm}^3$  gemessen, was, verglichen mit dem anderen Sektor, einer Erhöhung um das 2,4-fache entspricht.

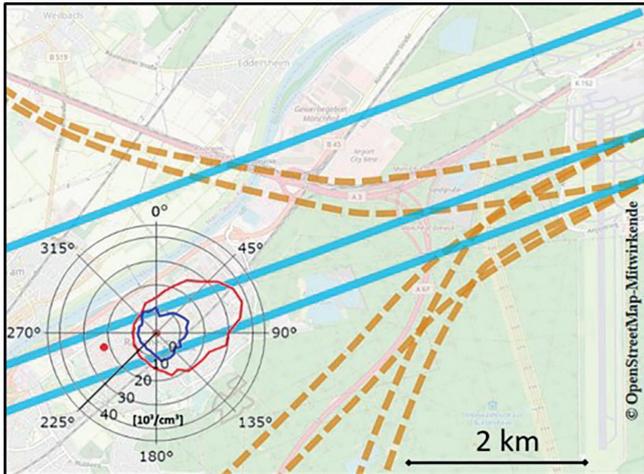
Nachts ergeben sich wesentlich geringere UFP-Konzentrationen. Bemerkenswert ist, dass auch außerhalb der Flugbetriebszeiten ein signifikanter Einfluss der Windrichtung zu erkennen ist. Bei Wind aus Richtung Flughafen werden hier im Mittel um ca. 40 % erhöhte UFP-Konzentrationen gemessen.

Ein detaillierteres Bild ergibt sich aus der zweidimensionalen Polardarstellung der mittleren UFP-Konzentration in Abhängigkeit der Windrichtung für Tag und Nacht (**Bild 4**).

Extrem hohe mittlere UFP-Konzentrationen von über  $30\,000\text{ 1/cm}^3$  werden ausschließlich am Tag und bei Wind aus Richtung des Flughafens gemessen. Bei diesen Windrichtungen ist in der Regel BR 07 mit Landeanflügen (auf das Parallelbahnsystem) über Raunheim gegeben. Die maximale mittlere UFP-Konzentration von ca.  $37\,700\text{ 1/cm}^3$  liegt bei 70° vor, was genau der Ausrichtung des Parallelbahnsystems entspricht. Von dort aus betrachtet nimmt die Konzentration in Richtung der Außengrenzen des Flughafens immer weiter ab, wobei UFP-Konzentrationen teilweise auch außerhalb des Flughafengeländes noch höher als  $20\,000\text{ 1/cm}^3$  sind.

Bei Windrichtungen von 230° bis 320° werden minimale mittlere Konzentrationen zwischen  $9\,100\text{ 1/cm}^3$  und  $10\,700\text{ 1/cm}^3$  gemessen. Bei diesen Windrichtungen ist keine relevante UFP-Verfrachtung vom Flughafengelände zu erwarten. Zudem ist bei diesen Windrichtungen in der Regel BR 25 festgelegt, so dass der Einfluss des Flughafens weitestgehend entfällt. Mittlere Konzentrationen in diesem Bereich bzw. um  $10\,000\text{ 1/cm}^3$  können folglich als repräsentative durchschnittliche UFP-Belastungen, die nicht direkt flughafenbedingt sind, angesehen werden.

In der Nacht zeigt sich im Vergleich zum Tag eine deutlich niedrigere Variabilität der mittleren Konzentrationen. Dennoch lässt sich auch hier eine leicht erhöhte UFP-Konzentration bei Wind aus Richtung Flughafenzentrum erkennen. Die maximale mittlere Konzentration von ca.  $14\,100\text{ 1/cm}^3$  liegt hier ebenfalls



**Bild 4.** Mittlere UFP-Konzentration in Abhängigkeit von der Windrichtung (in 10°-Schritten), Untersuchungszeitraum: 03.09.2015 bis 31.10.2017. Gezeigt sind mittlere Tages- (5:00 bis 23:00 Uhr, rote Linie) und Nachtkonzentrationen (0:00 bis 4:00 Uhr, blaue Linie) in 1000 Partikel pro cm<sup>3</sup>. Quelle: <https://www.openstreetmap.org/copyright>; Autoren

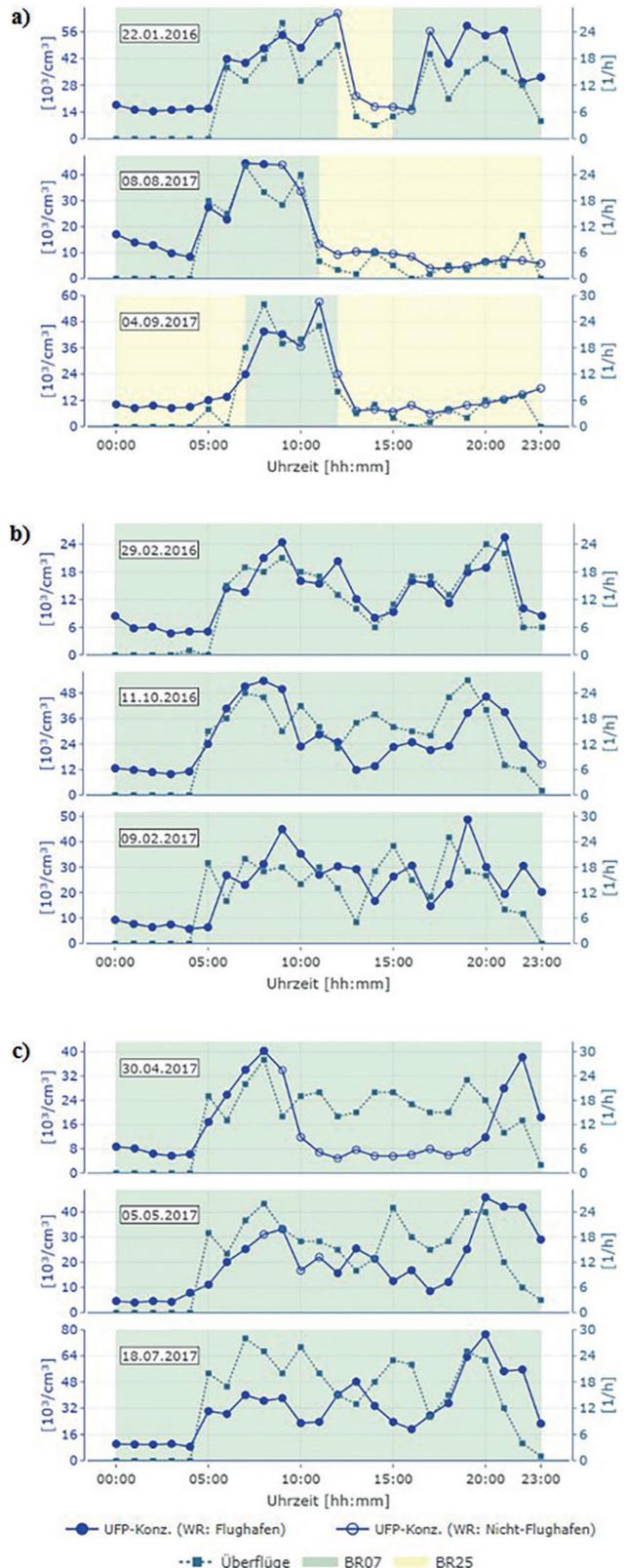
bei einer Windrichtung von 70° vor. Es ist möglich, dass diese leicht erhöhten Konzentrationen in der Nacht durch das noch nicht vollständige Abklingen der extrem hohen Konzentrationen am Tag zu erklären sind. Zudem werden auf dem Flughafengelände auch nachts Arbeiten verrichtet, was ebenfalls einen Einfluss haben könnte.

### 3.2 Tagesgänge

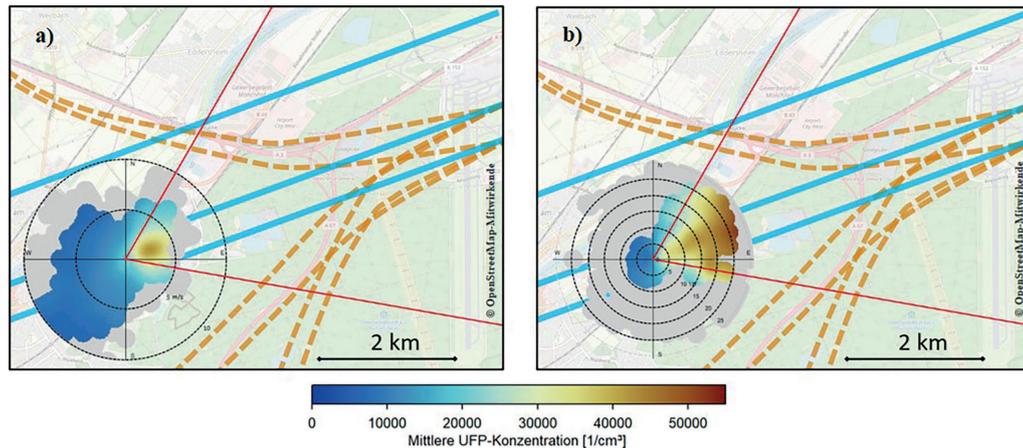
Um einen möglichen Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und der Überfluganzahl zu untersuchen, werden zunächst Tagesgänge beider Parameter miteinander verglichen. Beispielhaft wurden neun charakteristische Tagesgänge im gemeinsamen Messzeitraum ausgewählt. Da in Raunheim ein eventueller Einfluss von Landeanflügen nur bei Ostbetrieb möglich ist, wurden überwiegend Tage mit durchgehendem Ostbetrieb ausgewählt. Um weiterhin die Auswirkung von Betriebsrichtungswechseln auf die UFP-Konzentration zu überprüfen, wurden zudem Tage gewählt, an denen mindestens einmal die Betriebsrichtung geändert wurde. Die Tagesgänge sind in **Bild 5** dargestellt.

Anhand der in Bild 5 a) gezeigten Tagesgänge ist generell ein deutlicher Zusammenhang zwischen Betriebsrichtung und gemessener UFP-Konzentration zu erkennen. Da die Überflugzahl sich im Wesentlichen auf Landeanflüge bezieht, sind Betriebsrichtungswechsel von Ost nach West mit stark abnehmenden Überflugzahlen verbunden. Gleichzeitig sind auch starke Rückgänge der Konzentrationswerte zu beobachten. Erwartungsgemäß zeigen Betriebsrichtungswechsel von West nach Ost starke Anstiege beider Größen. Bei Betriebsrichtung Ost liegen in der Regel nordöstliche Windrichtungen mit Windgeschwindigkeiten > 1 bis 2 m/s vor. Die daraus resultierende ausgeprägte Windrichtungsabhängigkeit der UFP-Konzentration steht im Einklang mit Ergebnissen von [14].

Darüber hinaus zeigen die Tagesverläufe in Bild 5 a) für einzelne Stunden das Auftreten hoher UFP-Konzentrationen, wobei der Wind nicht aus Richtung des Flughafensektors weht (offene Kreissymbole, linke Ordinate). Für diese Situationen hängt die UFP-Konzentration am naheliegendsten mit vertikalem Schad-



**Bild 5.** Charakteristische Tagesgänge der UFP-Konzentration (Ordinate links) und Anzahl von Überflügen pro Stunde (Ordinate rechts): a) Tagesgänge mit Betriebsrichtungswechsel, b) Tagesgänge mit erkennbarer Korrelation und c) mit nicht erkennbarer Korrelation zwischen UFP-Konzentration und Überfluganzahl bei Betriebsrichtung Ost (BR 07). Ausgefüllte Kreismarkierungen: Wind aus Flughafensektor (0 bis 90°), offene Kreismarkierungen: Wind aus Nicht-Flughafensektor (90 bis 360°), Hintergrund: grün/BR 07, gelb/BR 25. Quelle: Autoren



**Bild 6.** Polardiagramme der mittleren UFP-Konzentration der Messstation Raunheim: a) in Abhängigkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit, b) in Abhängigkeit von Windrichtung und Anzahl an Überflügen pro Stunde. Datengrundlage ist jeweils der gemeinsame Messzeitraum, wobei nur Messwerte zu den Betriebsstunden des Flughafens (5:00 bis 23:00 Uhr) herangezogen wurden. Die Windrichtung ist in 10°-Schritten aufgelöst. Grau dargestellt sind Parameterkombinationen, bei denen weniger als zehn Stundenmittel vorliegen. Im Windsektor von 30 bis 100° (rote Linien) liegen die mittleren UFP-Konzentrationen über 25 000 Partikeln pro  $\text{cm}^3$ , außerhalb dieses Sektors darunter. *Quelle: Autoren*

stofftransport, d. h. mit Überflügen zusammen, während bei Wind aus Richtung Flughafensektor vertikaler und horizontaler UFP-Transport zusammenspielen.

In Bild 5 b) sind Tagesverläufe gezeigt, bei denen augenscheinlich eine gewisse Korrelation zwischen UFP-Konzentration und Überfluganzahl vorliegt, während in Bild 5 c) Tagesverläufe gezeigt sind, bei denen keine nennenswerte Korrelation erkennbar ist.

Wie aufgrund der deutlichen Unterschiede der in Bild 5 gezeigten Tagesverläufe zu erwarten ist, variieren zugehörige empirische Korrelationskoeffizienten erheblich (ca. zwischen 0,1 und 0,9). Auf Grundlage einzelner Tagesgänge kann folglich kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen UFP-Konzentration und Überfluganzahl abgeleitet werden.

Darüber hinaus erlauben es die Tagesauswertungen auch nicht, bestimmte Bedingungen, wie beispielsweise Windverhältnisse bzw. allgemein meteorologische Verhältnisse, zu identifizieren, die eindeutig mit ausgeprägten Korrelationen in Verbindung gebracht werden können.

Im Folgenden wird die Gesamtheit aller Daten betrachtet. Für Darstellung und Analyse der aggregierten Daten werden dabei verschiedene statistische Methoden und Diagrammtypen herangezogen.

### 3.3 Polardiagramme

Wie im Zusammenhang mit Tabelle 2, Bild 4 und Bild 5 a) diskutiert, besteht eine ausgeprägte Windrichtungsabhängigkeit der gemessenen UFP-Konzentration in Raunheim. Dies wird im Folgenden mit Hilfe von Polardiagrammen mit zusätzlichen Parametern detaillierter dargestellt. **Bild 6** zeigt zwei Polardiagramme, welche die mittlere UFP-Konzentration jeweils in Abhängigkeit von Windrichtung und a) Windgeschwindigkeit bzw. b) Überfluganzahl farbocodiert darstellen.

Anhand beider Darstellungen lässt sich ein entsprechender „UFP-Sektor“ von ca. 30° bis ca. 100° identifizieren, innerhalb dessen die mittleren UFP-Konzentrationen der einzelnen Windrichtungen (30°, 40°, ..., 100°) über 25 000  $1/\text{cm}^3$  liegen. Hohe UFP-Konzentrationen ergeben sich demnach bei Wind aus Richtung des Flughafenzentrums und des kompletten Flughafengeländes sowie zum Teil aus Richtungen außerhalb dessen. Abschnitte

der Anfluglinien und Abflugrouten des Parallelbahnsystems und der Landebahn Nordwest befinden sich ebenfalls innerhalb dieses UFP-Sektors.

Neben der ausgeprägten Windrichtungsabhängigkeit lässt sich in Bild 6 a) zudem ablesen, dass maximale Konzentrationen bei niedrigen Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 4 m/s auftreten. Bei höheren Windgeschwindigkeiten nimmt die mittlere UFP-Konzentration tendenziell wieder ab.

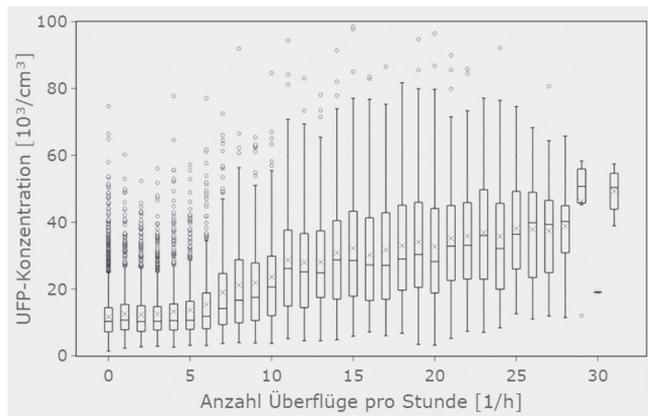
In der Polardarstellung in Bild 6 b) wurde der Parameter Windgeschwindigkeit durch die Anzahl der erfassten Überflüge pro Stunde ersetzt, was zu einer unkonventionellen, aber ebenfalls aussagekräftigen Darstellung führt. Die Verteilung der Konzentrationsmittelwerte innerhalb des UFP-Sektors zeigt, dass hohe mittlere Partikelkonzentrationen tendenziell mit hohen Überflugzahlen einhergehen. Dieser Sachverhalt erlaubt nicht unbedingt eine eindeutige Interpretation, da nicht differenziert werden kann, aus welcher Höhe landeanflugbedingte Immissionen stammen. Die Tatsache, dass erhöhte mittlere Konzentrationen auch bei Wind nicht direkt aus Richtung des Flughafenzentrums auftreten, kann jedoch für einen alternativen Transportmechanismus sprechen. Wie erwähnt, sind das Verhalten von Wirbelschleppen und der damit verbundene Schadstofftransport stochastischer Natur. Es ist möglich, dass sich wirbelschleppenbedingte Konzentrationserhöhungen erst bei hohen Überflugzahlen in den mittleren Konzentrationswerten bemerkbar machen.

Letztendlich kann jedoch keine eindeutige Aussage über die genaue Herkunft der hohen UFP-Konzentrationen getroffen werden. Es ist anzunehmen, dass sowohl die landenden Flugzeuge als auch die Bodenabfertigung auf dem Flughafengelände bei nord-östlichen bis östlichen Windrichtungen für erhöhte UFP-Immissionen in Raunheim verantwortlich sind.

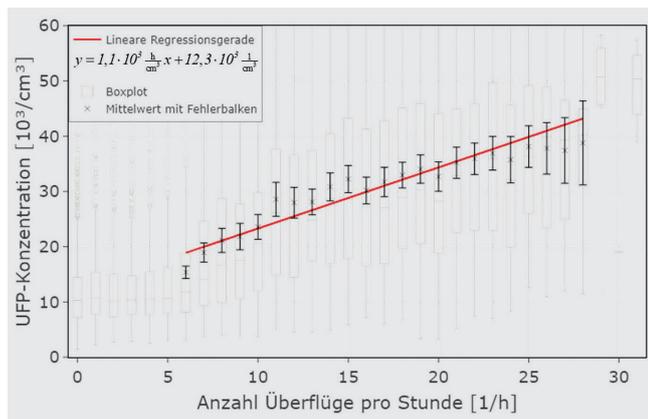
### 3.4 Statistische Auswertung

Der in Bild 6 b) dargestellte Zusammenhang zwischen Partikelkonzentrationen und Überflugzahlen wird im Folgenden für den gemeinsamen Messzeitraum detailliert dargestellt und quantifiziert.

In **Bild 7** sind alle Stundenmittel der UFP-Konzentration als Boxplot dargestellt und gegen die Überfluganzahl pro Stunde aufgetragen.



**Bild 7.** Boxplot mit unterem und oberem Quartil (Box), Median (waagerechte Linie), Mittelwert („x“-Markierung), oberem und unterem Whisker (senkrechte Linien ober- und unterhalb der Box) und Ausreißern (Kreismarkierungen). Datengrundlage sind hier alle verfügbaren Stundenmittelwerte der UFP-Konzentration und Überflüge im gemeinsamen Messzeitraum. *Quelle: Autoren*



**Bild 8.** Regressionsgerade auf Basis aller UFP-Stundenmittelwerte mit sechs bis 28 Überflügen pro Stunde (rote Linie). Zusätzlich sind die Mittelwerte mit jeweiligen Fehlerbalken für sechs bis 28 Überflüge pro Stunde eingezeichnet. *Quelle: Autoren*

Für geringe Überflugzahlen  $\leq 5$  liegen Konzentrationsmittelwerte im Bereich zwischen ca. 11 500 und 13 700 Partikel pro  $\text{cm}^3$  und zeigen eine geringe Abhängigkeit von der Flugbewegungsanzahl. Dies entspricht in der Regel Situationen, bei denen der Wind nicht aus Flughafen- bzw. östlicher Richtung weht (vgl. Tabelle 2) und somit nur selten direkt Überflüge über den Messstationen stattfinden. Auch die weiteren Kennwerte der Boxen zeigen hier keine großen Variationen.

Fast im gesamten Bereich (0 bis 24 Überflüge pro Stunde) liegen die Mediane deutlich unter den entsprechenden Mittelwerten. Dies ergibt sich aus der Asymmetrie der zugrundeliegenden Verteilung bzw. aus den Ausreißern, die naturgemäß durch hohe Konzentrationswerte gegeben sind.

Ab ca. 10 Überflügen pro Stunde zeigt ein erheblicher Anteil der Daten extrem hohe Konzentrationsmittelwerte, beispielsweise liegen ca. 200 Stundenmittelwerte über  $60\,000\ \text{1/cm}^3$ .

Für Überfluganzahlen  $> 5$  zeigen sich zwei Trends mit ansteigender Überflugzahl: Zum einen verbreitern sich die Konzentrationsverteilungen, Quartilsabstände liegen bei  $20\,000\ \text{Partikel pro cm}^3$  und darüber, zum anderen zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Konzentrationsmediane und -mittelwerte. Für 28 Überflüge

pro Stunde liegen maximale Mediane und Mittelwerte bei ca.  $40\,000\ \text{Partikel pro cm}^3$ . Für höhere Überflugzahlen (ab 29) liegt die Anzahl der Datenpunkte jeweils im einstelligen Bereich. Aufgrund der daraus resultierenden geringen statistischen Aussagekraft werden diese Datenpunkte im Weiteren nicht berücksichtigt.

Um den Zusammenhang zwischen dem Anstieg der UFP-Konzentrationen und Überflugzahlen pro Stunde auf einfache Art zu quantifizieren, ist in **Bild 8** die Regressionsgerade für Datenpunkte zwischen einschließlich 6 bis 28 Überflügen pro Stunde dargestellt. Bei der linearen Regression wurde die Gesamtheit aller Daten im entsprechenden Intervall berücksichtigt. Der empirische Korrelationskoeffizient ergibt sich dabei zu lediglich 0,38. Die geringe Korrelation und damit die geringe Güte der Anpassungsgeraden hängt im Wesentlichen mit den extrem breiten Konzentrationsverteilungen für höhere Überflugzahlen zusammen. Während also nur ein schwacher linearer Zusammenhang zwischen UFP-Konzentrationen und Überflugzahlen existiert, zeigt sich jedoch, dass die Mittelwerte der UFP-Konzentrationen relativ gut durch die Regressionsgerade beschrieben werden und die UFP-Mittelwerte im Rahmen der Fehlerbalken<sup>4)</sup> mehrheitlich mit dem ermittelten linearen Anstieg übereinstimmen.

Im Rahmen dieser Betrachtung ergibt sich ein Zunahmefaktor von ca.  $1\,100\ \text{1/cm}^3$  pro Überflug pro Stunde. Für den betrachteten Bereich (sechs bis 28 Überflüge pro Stunde) bedeutet dies eine Zunahme der Mittelwerte von ca.  $15\,000\ \text{1/cm}^3$  auf ca.  $40\,000\ \text{1/cm}^3$ .

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden ca. 14 000 Stundenmittelwerte von UFP-Konzentrationen und Überflügen ausgewertet. Die Messdaten wurden an zwei nahe beieinander gelegenen Messstationen in Raunheim in einem Zeitraum von September 2015 bis Oktober 2017 erfasst.

### 4.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse und Schlussfolgerungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1.) Wind- und Betriebsrichtung sind generell die ausschlaggebenden Faktoren für UFP-Tagesverläufe.

Für eine Beurteilung der durch Flughafen und Luftverkehr bedingten UFP-Emissionen ist eine Differenzierung nach Windrichtungen und Betriebszeiten unerlässlich. Hierfür wiederum muss eine hinreichende Datengrundlage gegeben sein. Dies ist in der vorliegenden Untersuchung der Fall, da auf Langzeitmessungen des HLNUG zurückgegriffen werden konnte.

Für die Betriebszeiten des Flughafens (5:00 Uhr bis 23:00 Uhr) ergibt sich eine mittlere UFP-Konzentration von ca.  $31\,200\ \text{1/cm}^3$  für Wind aus nordöstlichen Richtungen ( $0^\circ$  bis  $90^\circ$ ) und eine mittlere UFP-Konzentration von ca.  $13\,000\ \text{1/cm}^3$  für die übrigen Windrichtungen.

2.) An etlichen Tagen kann ein deutlicher Zusammenhang der Tagesverläufe von UFP-Konzentrationen und Überflugzahlen beobachtet werden. Jedoch gibt es andererseits verschiedene Tage, bei denen keine direkte Korrelation erkennbar ist. Somit deutet die Analyse der Tagesverläufe einerseits auf einen gewissen Zu-

<sup>4)</sup> 95%-Konfidenzintervalle

sammenhang hin, andererseits kann daraus aber keine allgemeingültige Zusammenhängebeziehung abgeleitet werden.

3.) Aufgrund der Tatsache, dass gegen die Windrichtung gelandet wird, hängt die Betriebsrichtung und damit die Anzahl der Überflüge an den Messstandorten in Raunheim unmittelbar von der Windrichtung ab. Direkte Überflüge finden in der Regel nur bei Wind aus östlicher Richtung, d. h. aus Richtung Flughafen, statt. Eine allgemeingültige, gesicherte Aussage, welcher Anteil der UFP-Konzentration vom Flughafen bzw. vom unmittelbaren Umfeld nach Raunheim verfrachtet wird und welcher Anteil direkten Überflügen über Raunheim zuzuschreiben ist, lässt sich für diese Situationen nicht ableiten.

Anders verhält es sich bei Situationen mit Landeanflügen über Raunheim, bei denen der Wind nicht aus Richtung des Flughafen-sektors weht. Hier liegt ein direkter Zusammenhang von UFP-Konzentration und Überflügen nahe. Diese relativ seltenen Situationen erlauben jedoch keine statistisch abgesicherte Ableitung einer Korrelation.

4.) Die Untersuchung der Gesamtheit aller Daten zeigt hingegen einen klaren Zusammenhang zwischen Konzentrationsmittelwerten und Überfluganzahl. Für den betrachteten Zeitraum ergibt sich statistisch eine Zunahme von 1 100 Partikeln pro  $\text{cm}^3$  pro zusätzlichem Überflug (pro Stunde). Aufgrund dieses Ergebnisses ist es naheliegend, dass die unmittelbaren Überflüge bzw. Landeanflüge eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen. Auch in diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche Rolle dem Bodenbetrieb am Flughafen zukommt, da Überflüge (Lande-anflüge) einen entsprechenden Abfertigungsbetrieb am Boden bedingen. Der Bodenbetrieb am Flughafen hängt jedoch maßgeblich von der Gesamtheit aller Starts und Landungen ab. Daher lässt sich der Zusammenhang von UFP-Mittelwerten und Überflugzahlen am ehesten damit erklären, dass die tatsächlichen Überflüge für entsprechende UFP-Immissionen in Raunheim mitverantwortlich sind. Diese Schlussfolgerung steht im Einklang mit Untersuchungen an verschiedenen Flughäfen in den USA (Los Angeles, Atlanta und Seattle), bei denen erhöhte UFP-Konzentrationen unterhalb von Landeanflügen identifiziert, jedoch nicht wie in der vorliegenden Arbeit quantifiziert wurden [10; 12; 47].

## 4.2 Weitere Maßnahmen

Die Erhebung von UFP-Daten ist ein wichtiger Bestandteil des Monitorings luftverkehrsbedingter Emissionen und sollte standardmäßig in der Umgebung von Großflughäfen erfolgen. Initiativen, wie das im letzten Jahr angelaufene EU-Projekt AVIATOR [48], können hierfür ein wichtiger Schritt sein, dem weitere folgen sollten.

Zeitreihen von UFP-Konzentrationen in Flughafennähe zeigen typischerweise extrem starke Schwankungen. UFP-Konzentrationen variieren dabei über mehr als zwei Größenordnungen (zwischen  $10^3$  und  $10^5$  Partikel/ $\text{cm}^3$ ) auf einer Zeitskala von einigen Sekunden (siehe beispielsweise [12; 13]). Bei Messungen ist daher auf eine hinreichende zeitliche Auflösung im Sekundenbereich zu achten. Die vorliegende Langzeitstudie hingegen basiert auf der Auswertung von Stundenmittelwerten. Generell bleibt zu untersuchen, inwieweit zur Beurteilung von Gesundheitsrisiken Konzentrationsmittelwerte herangezogen werden können bzw. ob extreme Konzentrationsspitzen explizit berücksichtigt werden müssen.

Einfachen mathematischen Ausbreitungsmodellen liegt oft die Annahme einer im Wesentlichen radialen Schadstoffausbreitung

zugrunde, was zur charakteristischen  $1/r^2$ - bzw.  $1/r$ -Konzentrationsabnahme für Punkt- bzw. Linienquellen führt. Demgegenüber führen Downwash und Wirbelschleppen jedoch zu einer gerichteten Ausbreitung, mit wesentlich geringerer Konzentrationsabnahme in Ausbreitungsrichtung. Aktuelle Lagrange-Partikel-Modelle erlauben prinzipiell die Berücksichtigung solcher Richtungseffekte [49]. Die Kombination von Wirbelschleppen- und Ausbreitungsmodellen und die Evaluation entsprechender Ansätze steht jedoch noch aus.

Im Zusammenhang mit der Modellierung von Immissionen in Einzugsgebieten von Flughäfen liegt der Fokus oft auf der Frage, bis zu welcher Höhe Schadstoffemissionen und Ausbreitung erfasst werden. Mindestens so wichtig ist zudem die Frage, mit welchem Modell dies geschieht und ob hierbei Downwash-Effekte berücksichtigt werden.

Die Maßnahmen zur Eindämmung des Corona-Virus im Frühjahr 2020 hatten unter anderem erhebliche Auswirkungen auf den Luftverkehr, was unmittelbar zu einem Rückgang der UFP-Konzentration in Raunheim um ca. 40 Prozent geführt hat [50]. Eine detaillierte Auswertung dieser einmaligen (Luft-)Verkehrssituation sollte wichtige zusätzliche Erkenntnisse bringen.

Da die Messstandorte in Raunheim unter den Anfluglinien liegen, bezieht sich die vorliegende Auswertung weitgehend auf den Einfluss von landenden Flugzeugen. Weitere Studien sollten sich auch auf die Rolle von Starts und Abflugrouten fokussieren.

Neben den quantitativen Analysen sollte die chemische Charakterisierung von UFP weiter vorangetrieben werden.

## DANKSAGUNG

Wir danken dem Deutschen Fluglärmdienst (DFLD), insbesondere Herrn *Horst Weise*, für die Erhebung bzw. Zurverfügungstellung von Schall- und Überflugdaten. Dank auch an das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) für die im Jahr 2015 begonnene und seither ausgebaute Erhebung von UFP-Anzahlkonzentrationen in der Flughafenregion.

## Literatur

- [1] *Ohlwein, S.; Hoffmann, B.; Kappeler, R.; Kutlar Joss, M.; Künzli, N.*: Health Effects of Ultrafine Particles – Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting. Hrsg.: Umweltbundesamt. Umwelt & Gesundheit (2018) Nr. 05.
- [2] *Ohlwein, S.; Kappeler, R.; Kutlar Joss, M.; Künzli, N.; Hoffmann, B.*: Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence. Int. J. Public Health 64 (2019) Nr. 4, S. 547-559.
- [3] *Baldauf, R. W.; Devlin, R. B.; Gehr, P.; Giannelli, R.; Hassett-Sipple, B.; Jung, H. et al.*: Ultrafine Particle Metrics and Research Considerations: Review of the 2015 UFP Workshop. Int. J. Environ. Res. Public Health 13 (2016) Nr. 11, 1054.
- [4] *Stacey, B.*: Measurement of ultrafine particles at airports: A review. Atmos. Environ. 198 (2019), S. 463-477.
- [5] *Frenzel, W.; Kohnert, B.*: Beiträge des Flugverkehrs zur Ultrafeinstaubbelastung – Ein Review. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 80 (2020) Nr. 1/2, S. 7-18.
- [6] *Breuer, D.; Flemming, B.; Sye, T.; Auras, S.; Heise, O.; Thullner, I. et al.*: Gefahrstoffbelastung auf dem Flughafenvorfeld. Teil 2: Gefahrstoffexpositionen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 70 (2019) Nr. 11/12, S. 408-418.

- [7] *Fanning, E.; Chun, R.; Lu, R.; Froines, J.*: Monitoring and Modeling of Ultrafine Particles and Black Carbon at the Los Angeles International Airport. Final Report, ARB Contract #04-325. Technical Report, 2007. [www.arb.ca.gov/research/apr/past/04-325.pdf](http://www.arb.ca.gov/research/apr/past/04-325.pdf), abgerufen am: 20.08.2020.
- [8] *Herndon, S. C.; Jayne, J. T.; Lobo, P.; Onasch, T. B.; Fleming, G.; Hagen, D. E.* et al.: Commercial aircraft engine emissions characterization of in-use aircraft at Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport. *Environ. Sci. Technol.* 42 (2008) Nr. 6, S. 1877-1883.
- [9] *Hudda, N.; Gould, T.; Hartin, K.; Larson, T. V.; Fruin, S. A.*: Emissions from an international airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind. *Environ. Sci. Technol.* 48 (2014) Nr. 12, S. 6628-6635.
- [10] *Hudda, N.; Fruin, S. A.*: International Airport Impacts to Air Quality: Size and Related Properties of Large Increases in Ultrafine Particle Number Concentrations. *Environ. Sci. Technol.* 50 (2016) Nr. 7, S. 3362-3370.
- [11] *Keuken, M. P.; Moerman, M.; Zandveld, P.; Henzing, J. S.; Hoek, G.*: Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmos. Environ.* 104 (2015), S. 132-142.
- [12] *Riley, E. A.; Gould, T.; Hartin, K.; Fruin, S. A.; Simpson, C. D.; Yost, M. G.* et al.: Ultrafine particle size as a tracer for aircraft turbine emissions. *Atmos. Environ.* 139 (2016), S. 20-29.
- [13] *Freund, J.*: Einfluss von Flugzeugemissionen auf die bodennahe Konzentration von Ultrafeinstaubpartikeln. Master thesis, Goethe Universität Frankfurt am Main. Frankfurt am Main 2019.
- [14] *Rose, D.; Jacobi, S.*: 2. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt. Hrsg.: Hessisches Umweltamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2019. [www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige\\_berichte/ufp/UFP-Zweiter\\_Zwischenbericht\\_20190819.pdf](http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/UFP-Zweiter_Zwischenbericht_20190819.pdf), abgerufen am: 30.06.2020.
- [15] *Maron, C.*: Einfluss von Überflügen auf die Ultrafeinstaubkonzentration am Boden anhand Daten der Messstationen Frankfurt-Sachsenhausen und Frankfurt-Oberrad. Master thesis, Hochschule RheinMain, Wiesbaden/Rüsselsheim 2020.
- [16] *Holzäpfel, F.*: Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model. *J. Aircraft* 40 (2003) 2003, S. 323-331.
- [17] Fraport AG: Zahlen, Daten Fakten > Verkehrszahlen 2018. [www.fraport.com/de/konzern/ueber-uns/zahlen--daten-und-fakten1.html](http://www.fraport.com/de/konzern/ueber-uns/zahlen--daten-und-fakten1.html), abgerufen am 27.07.2020.
- [18] *Meyer-Schuchardt, N.*: Einschränkungen des Nachtflugverkehrs sowie Betriebsbeschränkungen außerhalb der Nachtzeit für die Zivilluftfahrt am Flughafen Frankfurt. Fraport AG (2012).
- [19] Umwelt- und Nachbarschaftshaus: Betriebsrichtung und Rückenwind. Gemeinnützige Umwelthaus GmbH, 2020. [www.umwelthaus.org/flug/laerm/basiswissen/betriebsrichtung-und-rueckenwind/](http://www.umwelthaus.org/flug/laerm/basiswissen/betriebsrichtung-und-rueckenwind/), abgerufen am 23.07.2020.
- [20] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: Messwerte>Luft>Recherche, 2020. [www.hlnug.de/?id=9231&station=601](http://www.hlnug.de/?id=9231&station=601), abgerufen am 02.08.2020.
- [21] Deutscher Fluglärmdienst e.V.: Messwerte > Raunheim Nord, 2020. [www.dfd.de/Mess/Messwerte.php?R=1&S=11&D=06.05.2020](http://www.dfd.de/Mess/Messwerte.php?R=1&S=11&D=06.05.2020), abgerufen am 06.05.2020.
- [22] VDI 3786 Blatt 2: Umweltmeteorologie Meteorologische Messungen – Wind (5/2018). Berlin: Beuth 2018.
- [23] Deutscher Wetterdienst: Klima und Umwelt > CDC (Climate Data Center) > Zugang CDC-Portal, 2020. <https://cdc.dwd.de/portal/202007291339/view1>, abgerufen am 24.08.2020.
- [24] *Carlslaw, D. C.*: The openair manual – open-source tools for analysing air pollution data. Manual for version 1.1-4, 2015.
- [25] *Carlslaw, D. C.; Ropkins, K.*: openair – an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*. *Environ. Mod. Softw.* (2012) 27/28, S. 52-61.
- [26] *Grolemund, G.; Wickham, H.*: Dates and Times Made Easy with lubridate. *J. Stat. Softw.* 40 (2011) 3, S. 1-25.
- [27] *Pedersen, T. L.; Cramer, F.*: scico: Colour Palettes Based on the Scientific Colour-Maps. R package version 1.1.0. <https://CRAN.R-project.org/package=scico>, abgerufen am 24.08.2020.
- [28] R Core Team: R: A language and environment for statistical computing, Vienna, Austria 2019. [www.R-project.org/](http://www.R-project.org/), abgerufen am 24.08.2020.
- [29] *Sievert, C.*: plotly for R, 2018. <https://plotly-r.com>.
- [30] *Wickham, H.; Averick, M.; Bryan, J.; Chang, W.; McGowan, L.; François, R.* et al.: Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software* 4 (2019) Nr. 43, S. 1686.
- [31] EUROCONTROL: European Wake Turbulence Categorisation and Separation Minima on Approach and Departure, 2020. [www.eurocontrol.int/publication/european-wake-turbulence-categorisation-and-separation-minima-approach-and-departure](http://www.eurocontrol.int/publication/european-wake-turbulence-categorisation-and-separation-minima-approach-and-departure), abgerufen am 02.08.2020.
- [32] *Holzäpfel, F.*: Aircraft Wake Vortex Evolution and Prediction. Habilitationsschrift. Technische Universität München. München 2005.
- [33] *Hallock, J. N.; Holzäpfel, F.*: A review of recent wake vortex research for increasing airport capacity. *Progress in Aerospace Sciences* 98 (2018), S. 27-36.
- [34] *Blackmore, P. A.*: The effects of aircraft trailing vortices on house roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 52 (1994), S. 155-170.
- [35] *Holzäpfel, F.; Gerz, T.; Baumann, R.*: The turbulent decay of trailing vortex pairs in stably stratified environments. *Aerosp. Sci. Technol.* 5 (2001) Nr. 2, S. 95-108.
- [36] *Holzäpfel, F.*: Effects of Environmental and Aircraft Parameters on Wake Vortex Behavior. *J. Aircraft* 51 (2014) Nr. 5, S. 1490-1500.
- [37] openJur e.V.: Hessischer VGH, Urteil vom 30.04.2015 – 9 C 1507/12.T. <https://openjur.de/u/775785.html>, abgerufen am 02.08.2020.
- [38] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen: Planergänzungsbeschluss Wirbelschleppen II vom 26.5.2014, 2014. [https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/media/hmwvl/140526\\_planergaenzungsbeschluss\\_wirbelschleppenii.pdf](https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/media/hmwvl/140526_planergaenzungsbeschluss_wirbelschleppenii.pdf).
- [39] Fraport AG: Dachsicherungsprogramm, 2020. <https://www.fraport.com/de/umwelt/schallschutz/dachsicherung.html>, abgerufen am 02.08.2020.
- [40] *Unterstrasser, S.; Paoli, R.; Sölch, I.; Kühnlein, C.; Gerz, T.*: Dimension of aircraft exhaust plumes at cruise conditions: effect of wake vortices. *Atmos. Chem. Phys.* 14 (2014) Nr. 5, S. 2713-2733.
- [41] *Graham, A.; Raper, D. W.*: Transport to ground of emissions in aircraft wakes. Part I: Processes. *Atmos. Environ.* 40 (2006) Nr. 29, S. 5574-5585.
- [42] *Graham, A.; Raper, D. W.*: Transport to ground of emissions in aircraft wakes. Part II: Effect on NOx concentrations in airport approaches. *Atmos. Environ.* 40 (2006) Nr. 30, S. 5824-5836.
- [43] *Zhu, Y.; Hinds, W. C.; Kim, S.; Sioutas, C.*: Concentration and size distribution of ultrafine particles near a major highway. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 52 (2002) Nr. 9, S. 1032-1042.
- [44] *Rose, D.; Jacobi, S.*: 1. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikel im Bereich des Flughafens Frankfurt, 2018. [www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige\\_berichte/ufp/1\\_Zwischenbericht\\_HLNUG\\_Ultrafeinstaub\\_final\\_Korrigendum\\_20180619.pdf](http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/1_Zwischenbericht_HLNUG_Ultrafeinstaub_final_Korrigendum_20180619.pdf), abgerufen am 30.07.2020.
- [45] *Gerwig, H.; Jacobi, S.; Travniecek, W.; Wirtz, K.*: Messung ultrafeiner Partikel im Umfeld eines Großflughafens, Wiesbaden 2016. [www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige\\_berichte/ufp/MTK51\\_gerwig\\_jacobieteta.pdf](http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/MTK51_gerwig_jacobieteta.pdf), abgerufen am 30.06.2020.
- [46] *Birmili, W.; Weinhold, K.; Rasch, F.; Sonntag, A.; Sun, J.; Merkel* et al.: Long-term observations of tropospheric particle number size distributions and equivalent black carbon mass concentrations in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). *Earth Syst. Sci. Data* 8 (2016) Nr. 2, S. 355-382.
- [47] *Austina, E.; Xianga, J.; Gould, T.; Shirai, J.; Yun, S.; Yost, M. G.* et al.: Mobile Observations of Ultrafine Particles: The MOV-UP study report, University of Washington, Seattle, WA, USA 2019.
- [48] AVIATOR Project. Assessing aViation emission Impact on local Air quality at airports: Towards Regulation, 2020. <https://aviatorproject.eu/>, abgerufen am 02.08.2020.
- [49] VDI 3945 Blatt 3: Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Partikelmodell (4/2020). Berlin: Beuth 2020.
- [50] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: Saubere Luft durch Corona, Wiesbaden 2020. [www.hlnug.de/presse/pressemitteilung/saubere-luft-durch-corona](http://www.hlnug.de/presse/pressemitteilung/saubere-luft-durch-corona), abgerufen am 01.08.2020.



**M. Eng. Christian Maron**,  
Umweltingenieur, Bio- und Umweltechnik,  
Hochschule RheinMain, Wiesbaden Rüsselsheim.



**Prof. Dr. Friedhelm Schönfeld**,  
Fachbereich Ingenieurwissenschaften,  
Hochschule RheinMain, Wiesbaden Rüsselsheim.