

Ultrafeine Partikel in der Außenluft - ein neues lufthygienisches Thema?

12

DIANA ROSE & STEFAN JACOBI

Einleitung

An über 35 Messstationen verteilt über ganz Hessen überwacht das HLNUG kontinuierlich die Luftqualität in unserem Bundesland. Dies geschieht nach den rechtlichen Vorgaben der 39. Bundesimmissionschutzverordnung (BImSchV). Zu den untersuchten Schadstoffen zählen zum Beispiel Feinstaub oder Stickstoffoxide. Für sie existieren EU-weite Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit.

Die Partikelmassenkonzentrationen der Feinstaubfraktionen PM_{10} (Partikeldurchmesser $< 10 \mu m$) und $PM_{2,5}$ (Partikeldurchmesser $< 2,5 \mu m$) sind deutschlandweit rückläufig – die dafür geltenden Grenzwerte werden in Hessen seit Jahren eingehalten. Seit einiger Zeit jedoch rückt zunehmend der sogenannte Ultrafeinstaub (UFP) in den Fokus. Diese besonders kleinen Feinstaubteilchen stellen ein potentiell höheres gesundheitliches Risiko dar, da sie aufgrund ihrer geringen Größe tief in die Lunge eindringen können, von wo aus sie auf den menschlichen Organismus wirken können. Bisher existieren jedoch zu wenige Studien, die die Effekte der ultrafeinen Partikel epidemiologisch untersuchen, so dass weder Empfehlungen für gesundheitlich vertretbare Höchstmengen noch gesetzlich einzuhaltende Grenzwerte vorliegen (OHLWEIN et al., 2018).

Auch ohne rechtliche Verpflichtung sieht das HLNUG die Notwendigkeit die Immissionsbelastung durch

UFP zu erfassen und zu dokumentieren – auch um damit die Untersuchung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen zu erlauben. Die Wirkungsforschung, die Grundlage für gesundheitliche Empfehlungen und rechtliche Vorgaben ist, ist auf valide Information über die Immissionsbelastung angewiesen. Ohne rechtliche Vorgaben bleibt der Umfang von Immissionsuntersuchungen aber häufig stark eingeschränkt. Die aufgenommenen Messungen sollen einen Beitrag dazu leisten, die Bewertung ultrafeiner Partikel auf eine solide wissenschaftliche Basis zu stellen.

Ultrafeine Partikel stammen sowohl aus natürlichen als auch aus anthropogenen (vom Menschen verursachten) Quellen. Wie bei vielen anderen Luftschadstoffen, ist die Emission ultrafeiner Partikel zumeist mit Verbrennungsprozessen verbunden. Sie werden dabei entweder direkt freigesetzt (primäre Partikel) oder entstehen aus gasförmigen Vorläufersubstanzen (sekundäre Partikel). Da der Verdacht bestand, dass auch der Flugbetrieb eine bedeutende Quelle für ultrafeine Partikel sein könnte, wurden mehrere Messstellen in der Umgebung des Frankfurter Flughafens mit Ultrafeinstaub-Messgeräten ausgerüstet. Der Verdacht hat sich inzwischen bestätigt. Welche wesentlichen Erkenntnisse sich aus den Messungen ergeben und wie das HLNUG das Thema Ultrafeinstaub zukünftig begleitet, soll in diesem Beitrag erläutert werden.

Messung von ultrafeinen Partikeln

Feinstaub im Allgemeinen bezeichnet kleinste, luftgetragene, feste oder flüssige Partikel in unserer Atmosphäre. Diese Partikel sind in Form, Größe und in ihren Inhaltsstoffen sehr verschieden.

Anhand ihres aerodynamischen Durchmessers werden Partikel – abgekürzt PM (*engl.: particulate matter*) – unterhalb von 10 μm in drei Größenkategorien unterteilt:

Feinstaub PM_{10} – Partikel kleiner als 10 μm ,

Feinstaub $\text{PM}_{2,5}$ – Partikel kleiner als 2,5 μm und

Ultrafeinstaub (UFP oder $\text{PM}_{0,1}$) – Partikel kleiner als 100 Nanometer (entspricht < 0,1 μm).

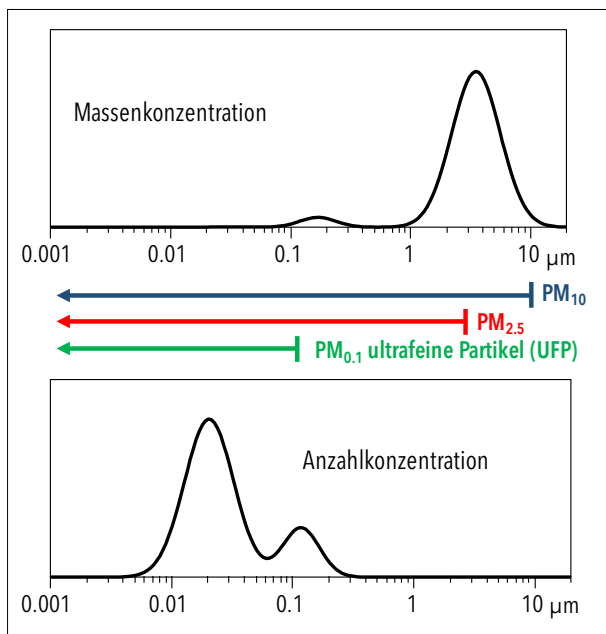


Abb. 1: Schematische Darstellung einer typischen Massen- und Anzahlgrößenverteilung von atmosphärischen Partikeln im städtischen Gebiet. Die Feinstaubfraktionen PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ bezeichnen alle Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 μm bzw. 2,5 μm und werden als Massenkonzentration angegeben. Ultrafeine Partikel (kleiner 0,1 μm) liegen zwar in hoher Anzahl vor, tragen aber aufgrund ihrer geringen Größe kaum zur Massenkonzentration PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ bei. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer können sie in die Lunge eindringen. Damit nimmt ihr Potential, einen Effekt auf die Gesundheit zu haben, zu.

Die Belastung der Luft mit PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ wird als Masse der Partikel pro Luftvolumen gemessen. Gesetzlich vorgegeben ist, dass zum Schutz der menschlichen Gesundheit im Jahresmittel 40 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) bei PM_{10} und 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei $\text{PM}_{2,5}$ nicht überschritten werden dürfen. Zusätzlich darf für PM_{10} zum Schutz vor kurzfristiger Einwirkung ein Tagesmittelwert von 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht häufiger als 35-mal im Kalenderjahr überschritten werden.

Ultrafeine Partikel werden zwar prinzipiell bei der PM_{10} - und $\text{PM}_{2,5}$ -Messung mit erfasst, ihr Anteil an der Partikelmasse ist jedoch aufgrund ihrer geringen Größe vernachlässigbar (Abb. 1). Zum Vergleich: bei gleicher Dichte besitzen eine Million 100 Nanometer-Partikel die gleiche Masse wie ein einziges 10 μm -Partikel. Möchte man das Vorkommen von UFP untersuchen, so muss man deren Anzahlkonzentration bestimmen. Dafür geeignete Messmethoden sind derzeit noch nicht genormt und wurden bisher hauptsächlich zu Forschungszwecken angewendet. Außerdem existieren keine Grenzwerte für UFP. Aus diesen Gründen werden die ultrafeinen Partikel von den Ländermessnetzen im Rahmen der gesetzlich vorgeschriebenen Luftqualitätsüberwachung nicht gesondert erfasst.

Seit einigen Jahren wird die Messung von UFP trotzdem in manchen Ländermessnetzen aufgegriffen, damit eine breitere Datenbasis zum Zweck eines allgemeinen Informationsgewinns geschaffen wird. In Hessen konzentrieren sich die UFP-Messungen besonders darauf, den Einfluss des Flughafens Frankfurt auf die Luftqualität in der Region zu beurteilen. In internationalen Studien wurde gezeigt, dass Flugzeugtriebwerke große Mengen an besonders kleinen ultrafeinen Partikeln emittieren (STACEY, 2018). Damit können in der Nähe von Flughäfen erhöhte Anzahlkonzentrationen von UFP auftreten, wie zum Beispiel in Los Angeles und Amsterdam beobachtet wurde (HUDDA et al., 2014, KEUKEN et al., 2015).

Die UFP-Messungen in Hessen begannen im September 2015. Seitdem wurden an insgesamt 8 Standorten im Umfeld des Frankfurter Flughafens UFP-Messstellen eingerichtet (Abb. 2). Die Standorte wurden so gewählt, dass man einerseits ableiten

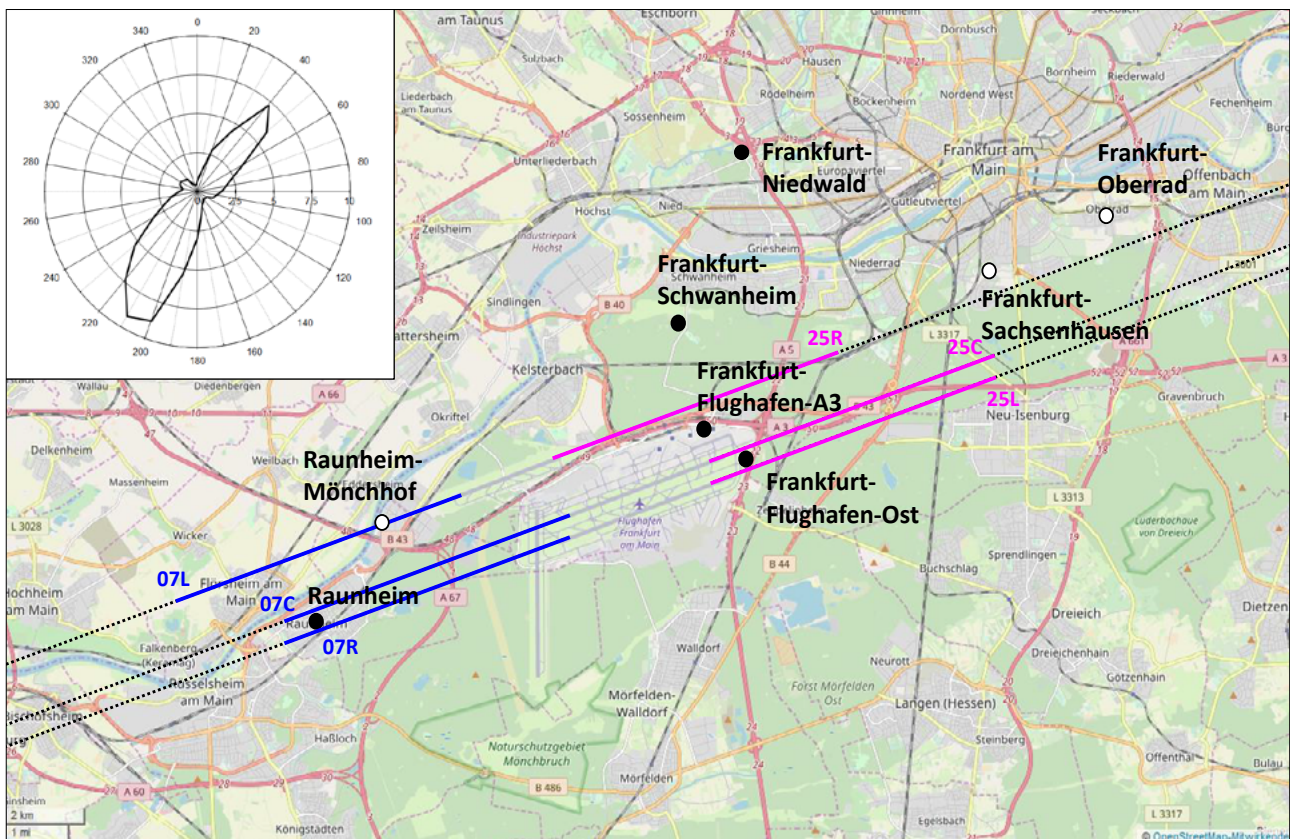


Abb. 2: Standorte der Messstellen, an denen das HLNUG kontinuierlich messende Geräte zur Untersuchung ultrafeiner Partikel betreibt, sowie Flugrouten beim Anflug auf den Flughafen (gepunktete Linien). Die Anflugrichtung wird abhängig von den Windbedingungen von der Deutschen Flugsicherung vorgegeben. An den Standorten mit weißer Markierung wird die Gesamtkonzentration gemessen, an denen mit schwarzer Markierung die Größenverteilung. In der linken oberen Ecke ist die mittlere relative Häufigkeit (in %) der Windrichtung, gemessen an der Messstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt, dargestellt (DWD Climate Data Center, Stations-ID 1420; Zeitraum 09/2017 – 02/2019). Karte: © OpenStreetMap-Mitwirkende; www.openstreetmap.org

kann, inwiefern auf dem Flughafengelände freigesetzte Partikel mit dem Wind ins Umland transportiert werden. Andererseits soll festgestellt werden, ob auch Emissionen, die von den Flugzeugen im An- und Abflug emittiert werden, am Boden nachweisbar sind. Im hier vorliegenden Artikel wurden nur die Daten der Standorte Raunheim, Frankfurt-Flughafen-A3, Frankfurt-Schwanheim und Frankfurt-Sachsenhausen betrachtet, da der Messzeitraum an den anderen Standorten bisher zu kurz für eine Auswertung ist.

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

Die Gesamtpartikelanzahlkonzentration, also die Anzahl aller Partikel innerhalb eines bestimmten Luft-

volumens (Partikel pro Kubikzentimeter), wird mit einem Kondensationspartikelzähler (*CPC*, engl. *condensation particle counter*) gemessen. Vorteil dieser Methode ist, dass die Partikelkonzentration in einer hohen zeitlichen Auflösung (Sekundenwerte) detektiert werden kann. Nachteil ist jedoch, dass man keinerlei Informationen über die Größe der einzelnen Partikel erhält.

Die Anzahlgrößenverteilung der Partikel wird mit einem Partikelgrößenpektrometer (*SMPS*, engl. *Scanning Mobility Particle Sizer*) gemessen. In einem Durchlauf über ca. 5 min wird die Anzahlkonzentration, d. h. die Partikelanzahl pro Kubikzentimeter Luftvolumen ($1/\text{cm}^3$) in 108 Größenkanälen von ca. 10 nm bis 500 nm bestimmt. Anhand der Anzahlgrößenverteilung lässt sich ablesen, in welcher Menge (Anzahl pro Luftvolumen) die Partikel bestimmter

Größen in der Luft vorhanden sind. Anhand der Form der Verteilung lassen sich Rückschlüsse auf dominierende Partikelquellen ziehen. Nachteil dieses Messverfahrens ist die schlechtere Zeitauflösung gegenüber dem CPC.

Eine Übersicht, über welchen Zeitraum mit welchem Messgerät an welchem Standort gemessen wird, ist in Tab. 1 zu finden.

Tab. 1: Details zu den an den verschiedenen Standorten betriebenen Messungen ultrafeiner Partikel, sowie mittlere Anzahlkonzentration im angegebenen Partikelgrößenbereich. Mit einem SMPS wird die Größenverteilung und mit einem CPC die Gesamtkonzentration der Partikel gemessen.

Standort	Gerätetyp	Größenbereich	Messzeitraum	Mittelungszeitraum	Mittelwert (1/cm ³)
Frankfurt-Schwanheim	SMPS	10–500 nm	seit 10/2017	01.10.17–31.12.18	7885
Frankfurt-Flughafen-A3	SMPS	10–500 nm	08/2018 bis 02/2019	02.08.18–25.02.19	32664
Frankfurt-Sachsenhausen	CPC	7 nm–2,2 µm	seit 10/2018	01.10.18–28.02.19	9709
Raunheim	SMPS	10–500 nm	seit 09/2017	01.09.17–31.12.18	8613
Frankfurt-Oberrad	CPC	7 nm–2,2 µm	seit 03/2019	–	–
Frankfurt-Flughafen-Ost	SMPS	10–500 nm	seit 03/2019	–	–
Frankfurt-Niedwald	SMPS	10–500 nm	seit 04/2019	–	–
Raunheim-Mönchhof	CPC	7 nm–2,5 µm	seit 10/2019	–	–

Ergebnisse aus den Messungen

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass das Gelände des Flughafens eine bedeutende Quelle für UFP in der Umgebung ist. Emissionen, die beim Betrieb auf dem Flughafengelände bodennah freigesetzt werden, z. B. von Flugzeugtriebwerken bei der Abfertigung sowie beim Starten, Landen, Rollen, etc., werden mit dem Wind in die Umgebung transportiert und führen dort zu stark erhöhten Konzentrationen an UFP während der Betriebszeiten des Flughafens. Dies macht sich an allen Standorten dadurch bemerkbar, dass stark erhöhte Partikelkonzentrationen auftreten, sobald der Wind aus Richtung des Flughafens weht. Der betreffende Windrichtungsbereich ist scharf abgegrenzt; sobald der Wind nur geringfügig aus dem Sektor Flughafen herausdreht, sinkt die Konzentration auf einen Bruchteil. An allen Standorten tritt außerdem bei Wind aus Richtung des Flughafens ein markanter Tagesgang der Partikelkonzentration auf. An allen Wochentagen steigt die Konzentration kurz nach 5 Uhr innerhalb einer Stunde auf ein Vielfaches des nächtlichen Wertes, bleibt den ganzen Tag auf einem hohen Niveau und fällt gegen 23 Uhr relativ schnell wieder auf das nächtliche Minimum

zurück. Dieser Verlauf ähnelt den Betriebszeiten des Flughafens. Die Windabhängigkeit sowie der Tagesgang der Anzahlkonzentration der Partikel ist in Abb. 3 am Beispiel Frankfurt-Schwanheim gezeigt. Die Ergebnisse an den anderen Standorten können unter <https://www.hlnug.de/?id=12083> eingesehen werden.

Die höchste mittlere Anzahlkonzentration tritt am Standort Frankfurt-Flughafen-A3 auf (33 000 Partikel pro cm³). Sie liegt dort bezogen auf denselben Größenbereich (10–500 nm) etwa viermal so hoch wie in Frankfurt-Schwanheim (7 900 Partikel pro cm³) oder Raunheim (8 600 Partikel pro cm³). An diesen Standorten ist im Mittel mindestens die Hälfte der Partikel kleiner als 30 nm. Die mittleren Konzentrationen am Standort in Frankfurt-Sachsenhausen sind vergleichbar mit denen in Raunheim oder Frankfurt-Schwanheim, weisen aber aufgrund des abweichenden Messbereichs etwas höhere Werte auf (9 700 Partikel pro cm³, im Größenbereich 7 nm–2,2 µm). Die mittleren Konzentrationen im Umfeld des Frankfurter Flughafens sind in etwa vergleichbar mit Werten, die

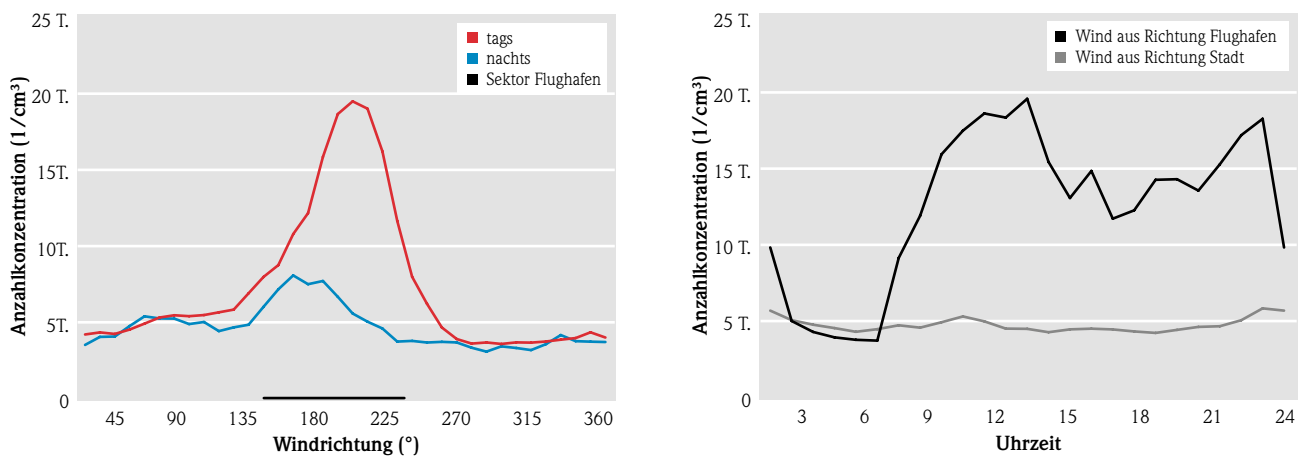


Abb. 3: Windrichtungsabhängigkeit und Tagesgang der mittleren Anzahlkonzentration der Partikel im Größenbereich 10–500 nm am Standort Frankfurt-Schwanheim. Oben: Während der Betriebszeiten des Flughafens (rote Linie) steigt die Konzentration stark an, sobald der Wind aus Richtung des Flughafens weht. In der Nacht dagegen variiert die Konzentration nur wenig mit der Windrichtung (blaue Linie). Unten: Bei Wind aus Richtung des Flughafens (schwarze Linie) ist die Konzentration während der Betriebszeiten des Flughafens (5–23 Uhr) stark erhöht. Bei Wind aus Richtung des Stadtgebiets variiert die Konzentration nur wenig über den Tag (graue Linie).

typischerweise im städtischen Hintergrund gemessen werden (BIRMILI et al., 2015).

An allen Standorten treten auch bei Wind aus der Richtung, in der sich Flugzeuge im Landeanflug auf den Flughafen befinden, im Mittel signifikant höhere Partikelkonzentrationen als bei Wind aus Sektoren ohne Einfluss des Flugbetriebs auf. Diese sind jedoch in Raunheim und Frankfurt-Sachsenhausen ca. 30–40 % und an den Standorten Flughafen-A3 und Schwanheim mehr als 60 % niedriger als die Konzentrationen bei Wind direkt aus Richtung des Flughafengeländes. In Raunheim und Frankfurt-Sachsenhausen tritt bei dieser Windrichtung ebenfalls ein markanter Tagesgang mit starkem Anstieg um kurz nach 5 Uhr und schnellem Abfall gegen 23 Uhr auf, dieser ist jedoch schwächer ausgeprägt, als bei Wind direkt aus Richtung des Flughafengeländes.

An zahlreichen Standorten nahe des Flughafengeländes wurden unterhalb der Anfluglinien zusätzliche Kurzzeitmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen deuten darauf hin, dass kein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen Überflügeignissen und Konzentrationsspitzen besteht, auch nicht in geringem Abstand zum Flughafen, d. h. bei geringen Überflughöhen (weniger als 100 m über Grund). Nur an einem Standort folgte bei einer Messung – unter bestimmten Bedingungen – auf fast jeden Überflug mit etwas Verzögerung ein kurzzeitiger,

starker Anstieg der Partikelkonzentration. An den anderen Standorten traten zwar Konzentrationsspitzen auf, diese konnten jedoch nicht eindeutig auf einzelne Überflügeignisse zurückgeführt werden.

Auch an den kontinuierlichen Messstationen Raunheim und Frankfurt-Sachsenhausen, die sich beide fast senkrecht unterhalb der Anfluglinie befinden, lässt sich anhand der bislang vorgenommenen Auswertungen keine Kausalität zwischen einzelnen Überflügeignissen und kurzzeitigen Konzentrationsspitzen am Boden nachweisen. Die Ergebnisse an den beiden Standorten weisen jedoch darauf hin, dass die Gesamtheit der Anflüge unterhalb einer bestimmten Flughöhe einen Beitrag zu einer generellen Erhöhung der UFP-Konzentration am Boden leistet.

Diese Befunde zeigen, dass der Flugbetrieb eine bedeutende Quelle für ultrafeine Partikel darstellt, die zu erhöhten Konzentrationen in der Umgebung führt. Das Gebiet, auf dem ultrafeine Partikel aus Flugzeugtriebwerken freigesetzt werden, die dann auch Auswirkungen auf die bodennahen UFP-Konzentrationen haben können, beschränkt sich nicht nur auf das Flughafengelände selbst, sondern erstreckt sich auch entlang der Anfluglinien, nach erster Schätzung bis zu einem Abstand von etwa 7–8 km vom Aufsetzpunkt. Auf dieser Fläche werden große Mengen an UFP entweder bodennah (auf dem Flughafengelände) oder auf geringen Flughöhen

(unterhalb etwa 400 m) emittiert, die anschließend auch von Wirbelschleppen zum Boden verfrachtet werden können (entlang der Anflugkorridore). Mit dem Wind werden sie dann in die Umgebung transportiert, so dass dort bodennah signifikant erhöhte Konzentrationen gemessen werden können. So sind nach bisheriger Erkenntnislage nicht die Gebiete von erhöhten UFP-Konzentrationen betroffen, die direkt unterhalb der Einflugschneisen liegen, sondern vielmehr die Regionen, die sich in der Abluft des

Flughafens inklusive der Anflugkorridore unterhalb einer Flughöhe von ca. 400 m befinden. Dabei sind die Beiträge an ultrafeinen Partikeln, die direkt vom Flughafengelände ausgehen, größer als die, die von den Anflugkorridoren ausgehen. Aufgrund der beiden Hauptwindrichtungen Süd-Südwest sowie Nordost, sind somit vor allem das Stadtgebiet Frankfurt sowie Gemeinden südwestlich des Flughafens (z. B. Kreis Groß-Gerau) von erhöhten UFP-Konzentrationen durch den Flugbetrieb betroffen.

Ausblick

Das HLNUG wird die Messungen ultrafeiner Partikel fortsetzen und auch erweitern. Es soll weiter untersucht werden, bis zu welcher Entfernung vom Flughafen sich der Einfluss des Flugbetriebs in den UFP-Konzentrationen am Boden widerspiegelt. Außerdem soll der Beitrag durch An- und Abflüge besser quantifiziert werden. Zukünftig sind auch noch Messungen an weiteren Standorten in Erwägung zu ziehen. Diese sollen sich an der wachsenden Erkenntnislage orientieren und das Ziel haben, möglichst umfassende und räumlich differenzierte Informationen über Zusammenhänge zwischen Flugbetrieb in der Luft, Bodenbetrieb und UFP-Immissionen zu erhalten.

Ultrafeine Partikel können aufgrund ihrer geringen Größe besonders tief in die Lunge eindringen. In welchem Ausmaß gesundheitliche Risiken von Ultrafeinstäuben ausgehen, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausreichend beurteilt werden, da es u. a. noch

an epidemiologischen Studien mangelt, anhand derer man die Gesundheitseffekte von UFP belegen und quantifizieren könnte. Die vorliegenden Messergebnisse und fortlaufend weiter erfolgende Messungen sollen auch einen Beitrag dazu leisten, solche Wirkungszusammenhänge wissenschaftlich untersuchen zu können.

Die Messungen ultrafeiner Partikel durch das HLNUG sind eingebunden in eine Gesamtstrategie des Landes Hessen. Darin greift außerdem das Forum Flughafen und Region (FFR) das Thema ultrafeine Partikel als zusätzlichen Schwerpunkt auf. Neben der Identifikation von Minderungsmöglichkeiten soll die Untersuchung von eventuellen gesundheitlichen Auswirkungen durch ultrafeine Partikel vorangebracht werden.

Literatur

- BIRMILI et al. (2015) Atmospheric aerosol measurements in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN) -Part III: Black Carbon mass and particle number concentrations 2009–2014, *Gefahrst. Reinh. Luft*, 75(11/12), 479–488, 2015.
- HUDDA, N., GOULD, T., HARTIN, K., LARSON, T.V. & FRUIN, S.A. (2014): Emissions from an International Airport Increase Particle Number Concentrations 4-fold at 10 km Downwind. – *Environ. Sci. Technol.*, **48**: 6628–6635.
- KEUKEN, M.P., MOERMAN, M., ZANDVELD, P., HENZING, J.S. & HOEK, G. (2015): Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). – *Atmos. Environ.*, **104**: 132–142.
- OHLWEIN, S., HOFFMANN, B., KAPPELER, R., KUTLAR JOSS, M. & KÜNZLI, N. (2018): Health Effects of Ultrafine Particles – Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting. – *Umwelt & Gesundheit*, **05/2018**, Umweltbundesamt.
- STACEY, B. (2018): Measurement of ultrafine particles at airports: A review. – *Atmos. Environ.*, 198: 463–477.