

Auswirkungen des reduzierten Flugbetriebs während der Corona-Pandemie auf die Konzentration von ultrafeinen Partikeln

W. Herrmann, R. Kendlbacher, J. Cyrus, O. Rottmann

ZUSAMMENFASSUNG Der Kreistag Freising hat eine Messkampagne initiiert, mit dem Ziel, die Ultrafeinstaub-Belastung im Umland des Flughafens München und deren Rückgang während des Corona-bedingten Lockdowns zu ermitteln. Dazu wurden von Juni bis August 2020 an sieben Standorten in und um den Flughafen München Konzentrationen von ultrafeinen Partikeln (UFP) mit Discmini-Geräten gemessen und, soweit vorhanden, mit bereits vor dem Lockdown erfassten Daten verglichen. Der Konzentrationsverlauf der UFP während der Lockdown-Monate im Frühjahr 2020 zeigt am Flughafen München einen engen Zusammenhang mit der Zahl der Flugbewegungen. So wurden im Februar 2020 direkt am Flughafen bei 1 020 Flugbewegungen pro Tag durchschnittlich rund 51 000 1/cm³ gemessen. Im Lockdown sank die Konzentration im April 2020 auf rund 7 000 1/cm³ bei 68 Flugbewegungen pro Tag. Das entspricht einem Rückgang von ca. 95 %, parallel zum Rückgang der Zahl der Flugbewegungen. Mit steigender Zahl an Flügen erhöht sich auch die UFP-Konzentration wieder. Bei Wind aus Richtung Flughafen ist die UFP-Konzentration eng mit der Entfernung des Messstandortes zum Flughafen korreliert. Selbst bei stark reduzierten Flugzahlen wurde in 11 km Entfernung noch die 1,5-fache UFP-Konzentration im Vergleich zu unbelasteter Luft gemessen. Es gibt wirksame Möglichkeiten und Maßnahmen, die UFP-Mengen aus dem Flugverkehr zu reduzieren. Dazu gehören die Entschwefelung des Kerosins, die Elektrifizierung des gesamten Bodenverkehrs einschließlich des Einsatzes von emissionsfreien Flugzeugschleppern vom und zum Gate und die Vermeidung unnötiger Flüge – vor allem solcher Flüge, die durch umweltschonendere Verkehrsträger bedient werden können (z. B. Ersatz von Kurzstreckenflügen durch die Bahn).

Effects of reduced aircraft movements after the COVID-19-shutdown on the concentration of ultrafine particles

ABSTRACT The Freising district council (Kreistag Freising) has initiated a measurement campaign to determine the concentrations of ultrafine particles (UFP) in the area around Munich Airport and the effects of the corona-related lockdown. In the framework of this measurement campaign, concentrations of ultrafine particles were determined with Discmini devices at seven locations in and around Munich Airport from June to August 2020 and, where available, compared with data recorded before the lockdown. The month-to-month values of UFP concentrations during the lockdown in spring 2020 correlates closely with the number of aircraft movements at Munich Airport. In February 2020 the average value was approximately 51,000 1/cm³, corresponding to 1,020 aircraft movements per day. During lockdown, in April 2020, UFP concentration dropped to around 7,000 1/cm³ with 68 aircraft movements per day – an approximately 95% reduction in UFP concentrations in parallel with the decrease in aircraft movements. As soon as the number of flights increased, UFP concentrations again increased. In the airport downwind plume, the UFP concentration is strongly correlated with the distance between the measurement location and the airport. Even with the significantly reduced numbers of flights during the lockdown, 1.5 times higher UFP concentration was measured at a distance of 11 km compared to the upwind concentration. Effective means of reducing UFP generated by air traffic are already available. These include: the desulfurization of kerosene, the electrification of the entire ground traffic at the airport including the use of emission-free aircraft tugs to haul the planes to and from the runway and the avoidance of unnecessary flights – especially flights that can be served by more environmentally friendly modes of transport (e. g. replacement of short-haul flights by rail journeys).

1 Einleitung

1.1 Definition von UFP und der Flugverkehr als eine Quelle

Als ultrafeine Partikel (UFP) werden luftgetragene Partikel mit einem Durchmesser bis 100 Nanometer (nm) bezeichnet. Die Konzentration von UFP in der Luft ist im Unterschied zum PM_{2,5}- und PM₁₀-Feinstaub (PM: *particulate matter*, PM₁₀: Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 µm, PM_{2,5}: Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 2,5 µm) nicht die Gewichtskonzentration (µg/m³), sondern die Anzahlkonzentration (1/cm³). Sehr häufig wird auch die Gesamtparti-

kelzahl gemessen, die stark mit der Konzentration der UFP korreliert. Sie enthält neben UFP (ca. 80 %) auch Partikel, deren Durchmesser größer als 100 nm ist (ca. 20 %).

UFP entstehen vor allem bei unvollständigen Verbrennungsprozessen. Dazu zählen in urbanen Gebieten hauptsächlich Emissionen aus dem Straßen-, Schiffs- und Eisenbahnverkehr, Kraftwerken und Industrieanlagen. Eine weitere Quelle der UFP, auch in ländlichen Regionen, ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe, so z. B. die Holzverbrennung oder Waldbrände. UFP werden auch als sekundäre Partikel durch photochemische Prozesse aus gasförmigen Vorläufersubstanzen gebildet.

Der Beitrag des Flugverkehrs zu bodennahen UFP-Emissionen in der Umgebung von Flughäfen war bis vor einigen Jahren eine relativ wenig beachtete Quelle von UFP. Die ersten Untersuchungen zu UFP-Immissionen in Flughafennähe wurden im Umfeld des Flughafens Los Angeles (LAX) durchgeführt und 2008 publiziert [1]. Diese Studie lieferte erste Hinweise auf deutlich erhöhte Konzentrationen von UFP, bedingt durch das Landen und Starten von Flugzeugen. Seit einigen Jahren finden intensive Messungen zu UFP-Konzentrationen in der Umgebung von Verkehrsflughäfen statt. Alle Studien zeigen übereinstimmend, dass der Flugverkehr eine relevante Quelle für UFP ist, die selbst an Messstandorten in mehreren Kilometern Entfernung vom Flughafen zu signifikant erhöhten UFP-Anzahlkonzentrationen führen kann. Somit ist der Flugverkehr als starke bodennahe UFP-Emissionsquelle in der Umgebung der großen Flughäfen auch unmittelbar für den Menschen relevant. Einige nach bestimmten Kriterien ausgewählte Studien zu UFP-Immissionen in der Nähe eines Flughafens haben *Frenzel* und *Kohnert* umfassend in einem Übersichtsartikel dargestellt [2]. Das europäische Airports Council International Europe (ACI) hat 2018 ebenfalls eine Übersicht über die UFP-Messkampagnen erstellt, die seit 2012 an unterschiedlichen Flughäfen durchgeführt wurden [3]. Dieser Bericht fasst die Ergebnisse der Untersuchungen an folgenden Flughäfen zusammen: Kopenhagen, Schiphol (Amsterdam), Heathrow (London), Brüssel, Zürich, Frankfurt/Main und Berlin. Beide Übersichtsartikel zeigen außerdem, dass die Flugzeugemissionen neben der in allen Studien beobachteten erhöhten Anzahl der Partikel in der Nähe von Flughäfen von einer hohen Anzahl besonders kleiner Partikel mit einer Größe zwischen 10 und 20 nm dominiert sind [2; 3]. Damit unterscheiden sich die Partikel deutlich von UFP aus anderen Quellen (Partikel aus dem herkömmlichen Straßenverkehr weisen überwiegend eine Größe zwischen 30 bis 50 nm auf) und können aufgrund dieser Unterschiede leichter identifiziert werden.

1.2 Gesundheitliche Wirkung der UFP

UFP zeichnen sich durch eine hohe spezifische Oberfläche aus. An den Oberflächen rußhaltiger UFP sind toxische Verbindungen angelagert, die mit der Aufnahme der Partikel im Körper über die Alveolen in die Blutbahn gelangen können. Nach *Knol* et al. [4] können die initialen pathophysiologischen Effekte von UFP grob unterteilt werden in a) Entzündungen der Atemwege und daraus resultierenden systemischen Entzündungen (lokale Effekte), b) Translokation von Partikeln in die Blutbahn (systemische Effekte) und c) respiratorische Reflexe und anschließende Dysfunktion des autonomen Nervensystems (neuronale Effekte).

1.2.1 Erkenntnisse aus toxikologischen Studien

Die ersten Hinweise auf spezifische gesundheitliche Auswirkungen der UFP kamen aus toxikologischen Untersuchungen. Versuche mit Modellpartikeln verschiedener Größe haben gezeigt, dass UFP toxischer wirken als größere Partikel mit vergleichbarer Zusammensetzung, was auf die größere Oberfläche der UFP zurückgeführt wurde [5]. Auch andere klinische und toxikologische Studien belegen, dass UFP zumindest teilweise durch andere Mechanismen als größere Partikel wirken [6; 7]. Als zentraler Mechanismus der gesundheitsschädlichen Wirkung von UFP werden die Bildung von reaktiven Sauerstoffverbindungen (ROS) und die Auslösung von oxidativem Stress in Lungenzellen angesehen [8]. Oxidativer Stress senkt die Fähigkeit des

biologischen Systems, reaktive Zwischenprodukte durch Antioxidantien zu entgiften. Dies wird als ein Schlüsselmechanismus bei der Entwicklung und dem Verlauf verschiedener kardiopulmonaler Erkrankungen angesehen [9]. In-vitro-Untersuchungen belegen, dass die ROS innerhalb von Minuten ansteigen und die Toxizität dosisabhängig ist [10]. Partikel aus der Dieselverbrennung verursachen DNA-Brüche in embryonalen Lungenzellen, was dosisabhängig zu stark gestörter Genexpression führt [11]. Allerdings wurden in dieser Studie keine ultrafeinen Dieselpartikel verwendet, sondern Referenzpartikel, die für die toxikologische In-vitro-Forschung hergestellt wurden und einen durchschnittlichen Durchmesser von 284 nm aufweisen.

UFP aus dem Straßenverkehr wirken auch auf den ganzen menschlichen Organismus, wie anhand verschiedener Biomarker nachgewiesen werden konnte: Lipid-Peroxidation, In-vivo-Erzeugung von ROS, verschiedene Entzündungsreaktionen oder Schäden in den Endothelzellen [12]. Eine Besonderheit von UFP besteht zudem darin, dass sie aufgrund ihrer geringen Größe tief in die menschliche Lunge bis in den für die Körperabwehr empfindlichen Alveolarbereich vordringen. Dort können sie in Zellen hinein diffundieren, in die Blutbahn übergehen, die Plazentaschranke überwinden sowie letztlich in alle Körperorgane inklusive des Gehirns und Nervensystems gelangen [13] und so zu direkten Effekten wie lokalen Entzündungsreaktionen führen.

1.2.2 Erkenntnisse aus epidemiologischen Studien

Im Gegensatz zu Untersuchungen der gesundheitlichen Auswirkungen von $PM_{2,5}$ - und PM_{10} -Feinstaub liegt nur eine begrenzte Zahl epidemiologischer Studien zu UFP vor. Während es also erhebliche toxikologische Evidenz für die nachteiligen Wirkungen von UFP auf die menschliche Gesundheit gibt, ist die epidemiologische Evidenz unzureichend, um eine Expositions-Wirkungs-Beziehung für UFP abzuleiten. Es gibt bisher nur wenige Langzeiteffektstudien [7] – die überwiegende Mehrheit der UFP-Studien sind Kurzzeiteffektstudien. So wurde in der Überarbeitung der WHO-Richtwerte 2016 festgehalten, dass zwar einige Hinweise auf die Gesundheitswirkungen von UFP vorliegen, diese aber nicht ausreichend für die Festlegung von Richtwerten bzw. Grenzwerten sind, insbesondere durch das Fehlen von Studien zur Langzeitwirkung [14].

In einem Gutachten des Umweltbundesamtes (UBA) wurde eine systematische Literaturrecherche der Studien durchgeführt, die nach der Veröffentlichung des HEI-Berichts von 2013 [7] publiziert wurden [15]. Auch dieses Gutachten kommt zu dem Schluss, dass trotz der weiteren Hinweise auf Zusammenhänge zwischen UFP-Belastung und gesundheitlichen Effekten aus zahlreichen Kurzzeiteffektstudien immer noch keine konsistente Aussage über die Wirkung der UFP möglich ist. Es wurden zwar schon einige Langzeiteffektstudien durchgeführt, aber nur in einer Studie wurde auf die Wirkung anderer Luftschadstoffe adjustiert.

1.2.3 Gesundheitliche Wirkung der UFP aus dem Luftverkehr

Da die aus den Triebwerken ausgestoßenen Partikel kleiner sind als die UFP aus dem Straßenverkehr, liegt die Vermutung nahe, dass sie auch eine andere Zusammensetzung und damit eine andere Toxizität haben als die bisher untersuchten „städtischen“ UFP. Somit lassen sich die Erkenntnisse aus epidemiologischen Studien, die fast ausschließlich in Städten durchgeführt wurden,

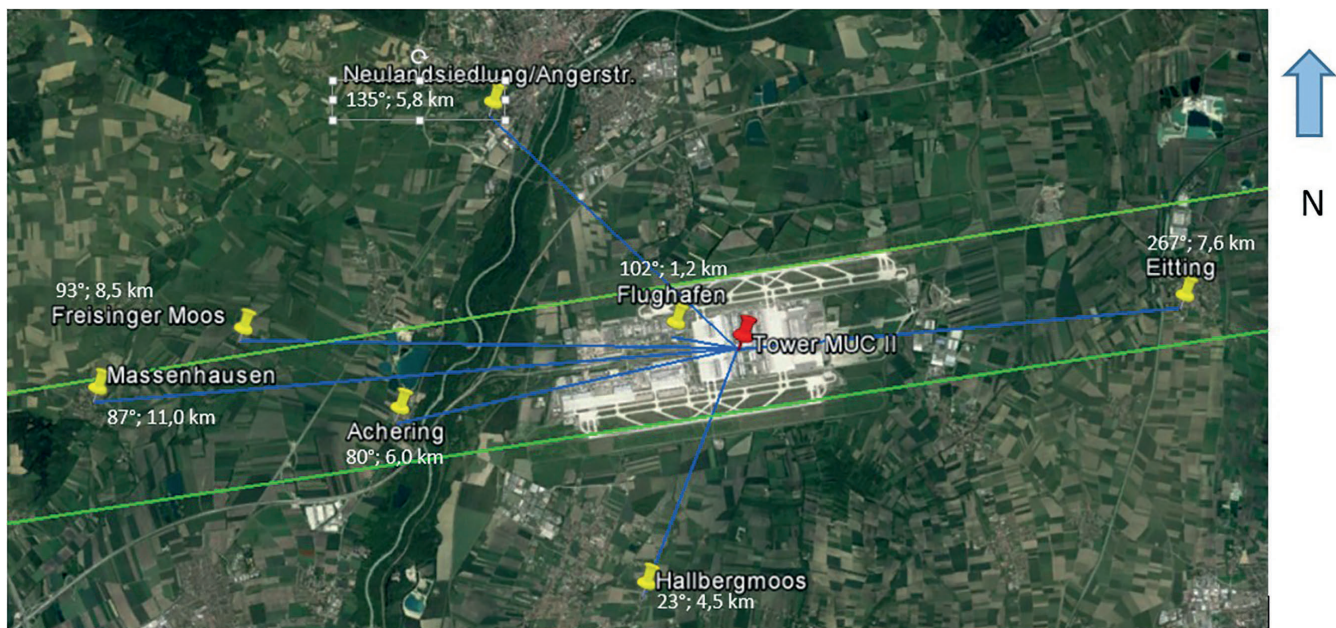


Bild 1 Lage der Messstandorte (Standorte sind gelb gekennzeichnet). Die grünen Linien markieren die Verlängerung der Startbahnen und damit die Hauptwindrichtungen. Blau sind die Luftlinien zwischen Messstandort und Flughafenzentrum (Tower) eingezeichnet, mit Angabe der Himmelsrichtung (in Grad) und Entfernung (in km) zum Tower des Flughafens. *Grafik: Autoren, Google Maps*

nicht direkt auf die UFP aus dem Flugverkehr übertragen. Es gibt bisher sehr wenige umweltepidemiologischen Studien, die die Wirkung von UFP aus dem Flugverkehr untersucht haben. Eine Pilotstudie in Los Angeles zeigte, dass Spaziergänge in der Windfahne des Flughafens bei erwachsenen Asthmatikern zu signifikant erhöhten Entzündungsparametern führten [16]. In einer weiteren Studie aus Los Angeles wurde ein erhöhtes Risiko einer Frühgeburt bei Schwangeren festgestellt, die in der Windfahne des Los Angeles International Airports (LAX) leben [17]. Die Ergebnisse deuten auch darauf hin, dass Emissionen von Flugzeugen unabhängig von anderen Luftschadstoffen zu einer negativen Entwicklung des Fötus beitragen können. Eine Studie aus Amsterdam zeigte, dass eine kurzfristige Exposition gegenüber hohen UFP-Konzentrationen in der Nähe des Flughafens Schiphol mit einer verminderten Lungenfunktion (hauptsächlich FVC = forcierte Vitalkapazität – ein Maß für die Lungenfunktion) und einer verlängerten Repolarisation des Herzens (QTc) unmittelbar nach der Exposition assoziiert war. Die Auswirkungen waren relativ gering, sie traten jedoch bereits nach einmaliger Exposition von fünf Stunden bei jungen und gesunden Erwachsenen auf [18].

2 Fragestellung und Ziel der Studie

Die Corona-Pandemie und die damit einhergegangenen Reisebeschränkungen lösten ab Mitte März 2020 weltweit einen drastischen Rückgang der Flugbewegungen aus. Dies bot die einmalige Chance, die UFP-Belastung während des Lockdowns, also bei sehr geringem Flugverkehr, systematisch zu erfassen und damit den Beitrag des Flugverkehrs in der Nähe eines Großflughafens besser zu quantifizieren. In einer Untersuchung des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) zu den Auswirkungen des Lockdowns in der Umgebung des Flughafens Frankfurt/Main [19; 20] wurde gezeigt, dass der stark

eingeschränkte Flugbetrieb während der Corona-Pandemie eine unterschiedlich hohe, teils deutliche Reduzierung der UFP-Konzentration an den umliegenden Messstellen zur Folge hatte. So war in Frankfurt-Schwanheim der vor der Pandemie beobachtete Anstieg der UFP-Konzentration bei Wind aus Richtung Flughafen während der Pandemie um etwa 75 bis 80 % gesunken und ist damit ähnlich stark zurückgegangen wie die durchschnittliche Anzahl der Flugbewegungen (ca. 80 %). Dieser Effekt war je nach Messstandort unterschiedlich stark ausgeprägt.

Um die Auswirkungen der Corona-Pandemie auch im Umfeld des Flughafens München zu erfassen, wurden von Juni bis August 2020 am und um den Flughafen UFP-Messungen durchgeführt. Die Aktion wurde vom Landkreis Freising initiiert und der Bürgerverein Freising zur Vermeidung von Lärm und Schadstoffbelastungen e.V. mit der Durchführung beauftragt. In der vorliegenden Studie werden die Ergebnisse detailliert beschrieben und mit Messungen vom Februar 2020 (vor dem Lockdown) verglichen. Damit kann die Ultrafeinstaub-Belastung bei unterschiedlichen Windverhältnissen und stark variierendem Flugverkehr dargestellt und quantifiziert werden.

3 Studiengebiet und Methoden

3.1 Studiengebiet

Der Flughafen München ist der internationale Verkehrsflughafen der bayerischen Landeshauptstadt München. Im Jahr 2019 zählte der Münchner Flughafen mit rund 48 Millionen Passagieren zu den zehn verkehrsreichsten Drehkreuzen in Europa. Der Flughafen liegt ca. 28 km nordöstlich von München im Erdinger Moos in unmittelbarer Nähe der Stadt Freising und verfügt über eine Gesamtfläche von 1 618 ha.

Bereits vor dem Lockdown und auch in April und Mai 2020 fanden sporadisch an einzelnen Tagen UFP-Messungen auf dem öffentlich zugänglichen Bereich des Flughafens auf dem Parkplatz unterhalb des Besucherhügels statt, der 1,2 km westlich des Flug-

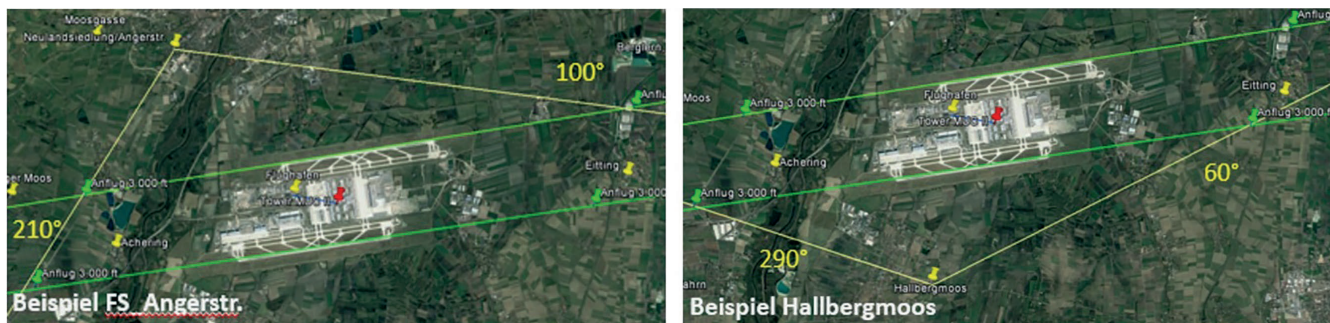


Bild 2 Festlegung der Anflugpunkte für Freising Angerstraße und Hallbergmoos. Grafik: Autoren, Google Maps

Tabelle 1 Messpunkte und Windrichtungen.

Ort	WR _{Ab} [°]	Entfernung zum Tower [km]	G1 [°]	G2 [°]
Achering	80	6	60	100
Eitting	267	7,6	250	290
Freisinger Moos	93	8,5	80	110
Freising Angerstraße	135	5,8	100	210
Hallbergmoos	23	4,5	290	60
Massenhausen	87	11	70	110
Freising Neulandsiedlung	135	5,8	110	220

hafen-Towers liegt. Nach den ersten Datenauswertungen wurden die Voraussetzungen geschaffen, ab Juni 2020 auch Messungen über mehrere Monate zu ermöglichen. Dazu wurde am Parkplatz Besucherhügel ein Messstandort eingerichtet, da UFP-Messungen direkt auf dem Gelände des Flughafens bzw. an den dort bereits vorhandenen Messstationen nicht zugelassen waren.

Im Zeitraum Juni bis einschließlich August fanden Messungen an sechs weiteren Orten in der Umgebung des Flughafens München statt: Freising Angerstraße bzw. Neulandsiedlung (300 m voneinander entfernt), Achering, Eitting, Freisinger Moos, Hallbergmoos und Massenhausen (Bild 1).

3.2 Definition der Windrichtung „Wind vom Flughafen“

Die Richtungen „Wind vom Flughafen“ ergeben sich über die Projektion der Flughafenkonturen auf den jeweiligen Messstandort. Dazu wurden die Konturen des Flughafens in Richtung der Achse der Startbahnen bis zu dem Punkt verlängert, wo sich die Flugzeuge im Landeanflug in einer Höhe von 3 000 ft (466 m über Grund) befinden. Die Festlegung der Anflugpunkte „3 000 ft“ erfolgte nach Stanly Track der Deutschen Flugsicherung (DFS). Für die quer zu den Hauptrichtungen liegenden Orte Freising Angerstraße/Neulandsiedlung und Hallbergmoos ergeben sich dadurch sehr breite Anströmwinkel (Bild 2 und Tabelle 1), wodurch auch für diese Orte die Emissionen kurz vor der Landung in wenigen hundert Metern Höhe erfasst werden, die mit den Wirbelschleppen zu Boden gelangen.

Tabelle 1 listet die Messstandorte in den Kommunen mit Angaben zu ihrer Windrichtung, bei der sie vollständig im Abwind des Flughafens liegen (WR_{Ab}), sowie ihrer Entfernung zum Flughafenzentrum und dem verwendeten Anströmwinkel [siehe 19]. Entsprechend der gewählten Systematik werden z. B. für den

Standort Achering alle Windrichtungen zwischen G1 = 60° (NO) und G2 = 100° (OSO) als „Wind vom Flughafen“ definiert – der Messstandort liegt in diesem Windsegment in den Abwinden der Flughafenfläche (G1 und G2 in Tabelle 1).

3.3 Messmethodik und Auswertung der Daten

Für die stationären Messungen wurden Discmini-Geräte (Fa. Testo) verwendet, deren Messprinzip auf der elektrischen Aufladung der Partikel beruht, gefolgt von einer zweistufigen Detektion. In der ersten Detektorstufe werden bevorzugt kleine Partikel durch Diffusion abgeschieden. In der zweiten Stufe werden alle übrigen Partikel auf einem Partikelfilter eingefangen. Aus dem Verhältnis der Ströme, kann der mittlere Partikeldurchmesser (Modalwert) und die Partikelanzahl ermittelt werden. Die Genauigkeit der Messung hängt von der Form der Partikelgrößenverteilung ab und wird vom Hersteller sowohl für den Modalwert als auch für die Partikelanzahlkonzentration mit 30 % angegeben. Es ist auch zu beachten, dass Vergleiche der Discmini-Geräte mit Kondensationspartikelzählern (CPC), in denen die Partikel durch Aufkondensieren in einer übersättigten Umgebung optisch vergrößert und anschließend mittels Laserlicht gezählt werden, eher einen qualitativen Charakter haben, da die Ergebnisse beider Messverfahren nicht äquivalent sind. Nichtsdestotrotz können die Änderungen der UFP-Konzentrationen durch beide Messmethoden gut erfasst und verglichen werden. Die in dieser Studie verwendeten Geräte waren wettergeschützt aufgestellt und wurden regelmäßig nach etwa drei Tagen gewartet. Die Wartung beinhaltete Überprüfung der Funktion, Reinigung des Impaktors und Auslesen der Daten.

Für Design und Auswertung der erfassten Daten wurden grundsätzlich die von Rose et al. [19] beschriebenen Kriterien zu-

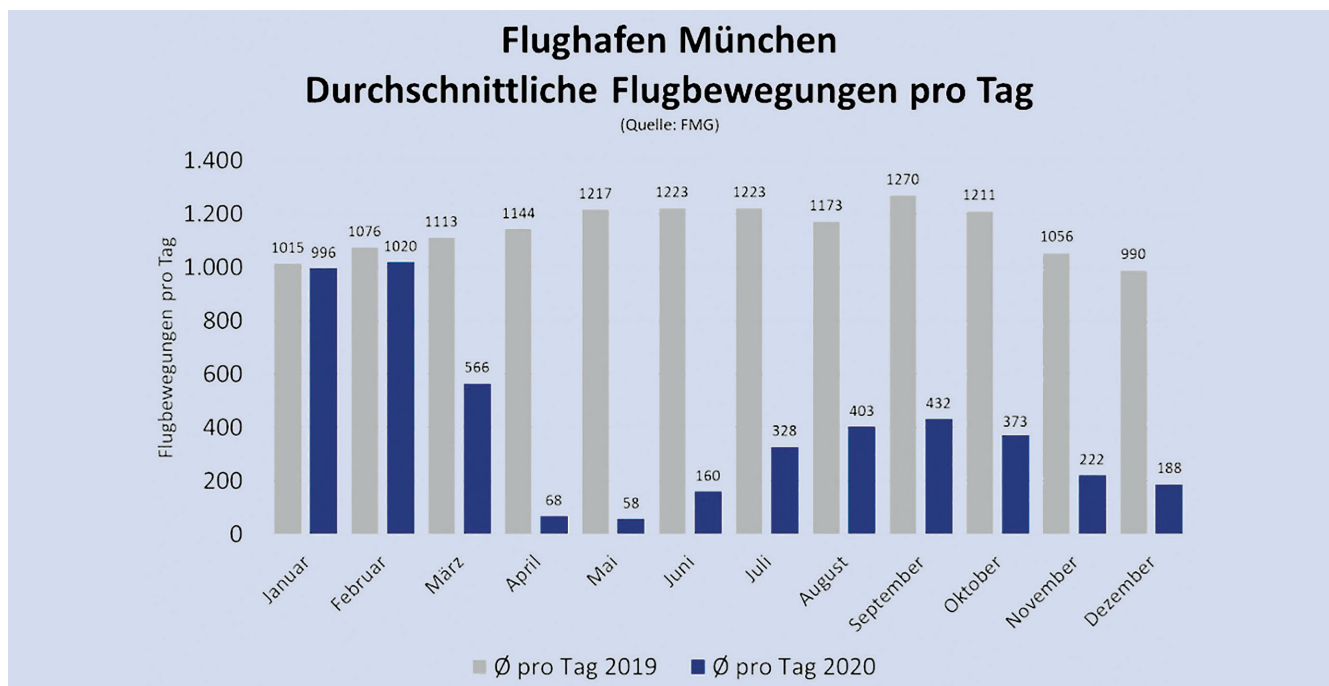


Bild 3 Flugbewegungen nach Monaten und Durchschnitt pro Tag in den Jahren 2019 und 2020. Grafik: Autoren

grunde gelegt. Abweichungen von den dort definierten Kriterien sind vermerkt. Die Auswertung basierte auf folgenden Randbedingungen:

- Berücksichtigung von Daten mit Windgeschwindigkeiten > 1 m/s (Minimierung lokaler Einflüsse),
- Verwendung der vom Deutschen Wetterdienst (DWD) am Flughafen gemessenen Wetterdaten (Stationsnummer 1262) für Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, relative Feuchte (RF),
- RF < 85 %, bezogen auf die Messstelle des DWD am Flughafen München (Stationsnummer 1262). Hintergrund: Einhaltung der vom Hersteller des Messgerätes vorgegebenen Randbedingungen (RF < 90 %),
- Nichtberücksichtigung unplausibler Daten,
- Nichtberücksichtigung von Daten, die mit Fehlermeldungen des Gerätes verknüpft sind.

In der Messkampagne von Juni bis August 2020 wurden an den 100 Messtagen ca. 45 Mio. Datensätze erhoben und ausgewertet. Neben der UFP-Konzentration (in Anzahl pro Kubikzentimeter, $1/\text{cm}^3$) wird auch der mittlere Partikeldurchmesser in Nanometer (nm) als Modalwert angegeben.

3.4 Flugbewegungen am Flughafen München in den Jahren 2019 und 2020

Bild 3 zeigt den Verlauf der Flugbewegungen in den Jahren 2019 (grau) und 2020 (blau). Die UFP-Messungen begannen vereinzelt schon im April 2020, jedoch sind erst ab Juni 2020 fortlaufende Daten vorhanden.

Die stark reduzierten Flugbewegungen ermöglichten Reparaturarbeiten an den Start- und Landebahnen. Vom 5. Mai bis zum 15. Juli 2020 lief der gesamte Verkehr über die Nordbahn und anschließend vom 16. Juli bis 2. August 2020 nur über die Südbahn. Die UFP-Emissionen entstanden zu diesen Zeiten deshalb schwerpunktmäßig auf der nördlichen bzw. südlichen Hälfte des Flughafengebietes, was sich auch auf die Messergebnisse auswirk-

te. In Juni und Juli herrschten vornehmlich Winde aus WSW, während sie im August annähernd gleich aus WSW bzw. Ost kamen.

4 Ergebnisse

4.1 UFP-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Windrichtung während des Lockdowns (Zeitraum Juni bis August 2020)

Aus **Bild 1** geht die Lage der Messstationen im Umland des Flughafens hervor. Diese Messstandorte liegen entsprechend der jeweiligen Windrichtung im Abwindkegel des Flughafens oder sind nicht bzw. nur teilweise berührt. Deswegen wurden die UFP-Konzentrationen folgenden drei Richtungssegmenten zugeteilt: 1. „Wind zum Flughafen“, was der Hintergrundbelastung entspricht, 2. „Quersegment“, mit sehr geringen Wind-Anteilen vom Flughafen und 3. „Wind vom Flughafen“, mit aus dem in **Tabelle 1** beschriebenen Winkel vom Flughafen kommenden Wind.

In **Bild 4** sind die durchschnittlichen UFP-Konzentrationen der drei Segmente aller Messstationen während der Monate Juni bis August 2020 dargestellt. Es ist ein einheitliches Muster hinsichtlich der Windverhältnisse erkennbar, jeweils mit sehr hohen UFP-Werten bei „Wind vom Flughafen“. Trotz der stark reduzierten Flugbewegungen im Lockdown von durchschnittlich nur 297 Flügen pro Tag (Februar 2020: 1 020 Flüge pro Tag) liegen die UFP-Konzentrationen im Abwind des Flughafens (Segment 3) um 42 bis 65 % höher als im Segment 1 „Wind zum Flughafen“. Ähnliche Verhältnisse wurden in der Umgebung des Flughafens Frankfurt/Main festgestellt [19]. Lediglich die Ergebnisse aus Hallbergmoos weichen von diesem deutlichen Muster ab und zeigen einen schwächer ausgeprägten Anstieg der UFP-Konzentrationen bei „Wind vom Flughafen“ (+ 6 %).

Die drei westlich des Flughafens gelegenen Messstandorte Achering, Freisinger Moos und Massenhausen liegen in vergleichbaren Windsegmenten (siehe **Tabelle 1**) und in unterschiedlicher Entfernung zum Flughafen. In **Bild 5** ist das Verhältnis der UFP-

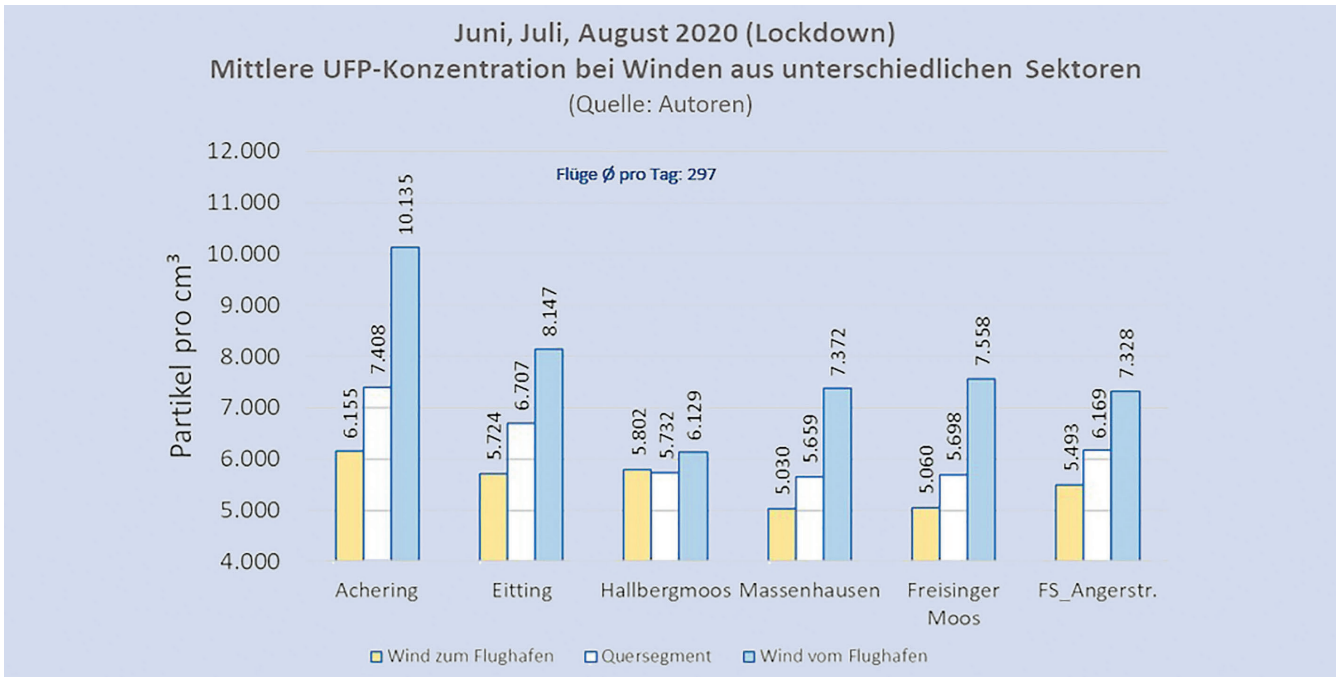


Bild 4 Ultrafeinstaub-Konzentrationen bei Wind zum Flughafen, Querwinden und Wind vom Flughafen (6 bis 24 Uhr). Grafik: Autoren

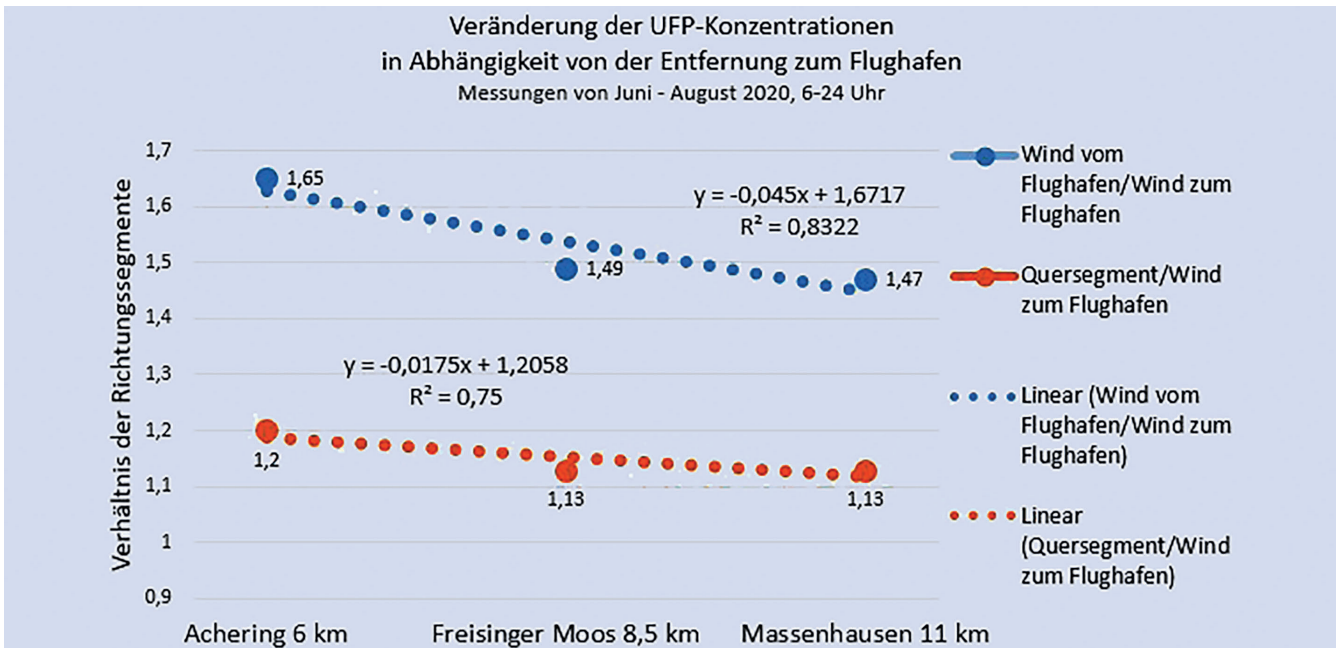


Bild 5 Verhältnisse der Richtungssegmente in Bezug auf die Entfernung zum Flughafen. Grafik: Autoren

Konzentrationen, gemessen bei Richtungssegment 3 („Wind vom Flughafen“) zu UFP-Konzentrationen, gemessen bei Richtungssegment 1 („Wind zum Flughafen“) für die drei Standorte dargestellt (blaue Punkte). Je weiter der Standort vom Flughafen entfernt, desto kleiner wird das Verhältnis, d.h. der Abwind wird mit der zunehmenden Entfernung vom Flughafen stärker verdünnt. Bemerkenswert ist, dass trotz der geringen Zahl an Flugbewegungen die Zunahme der UFP-Konzentration bei Wind vom Flughafen selbst in elf Kilometer Entfernung (Standort Massenhausen) noch das 1,5-fache der Hintergrundbelastung beträgt. Das Verhältnis Segment 2 zu Segment 1 („Quersegment“ zu „Wind zum

Flughafen“) ist durch die orangenen Punkte dargestellt. Die Werte liegen naturgemäß niedriger, zeigen aber die gleiche Tendenz.

4.2 Partikelgrößen in Abhängigkeit von der Windrichtung während des Lockdowns (Zeitraum Juni bis August 2020)

Die Messstandorte Achering, Freisinger Moos und Massenhausen liegen annähernd auf gleicher Linie westlich des Flughafens in 6, 8,5 bzw. 11 km Entfernung. **Bild 6** zeigt den Durchschnitt der Partikelgrößen über die Monate Juni bis August 2020 während des Lockdowns. Die jeweils linke Säule repräsentiert die

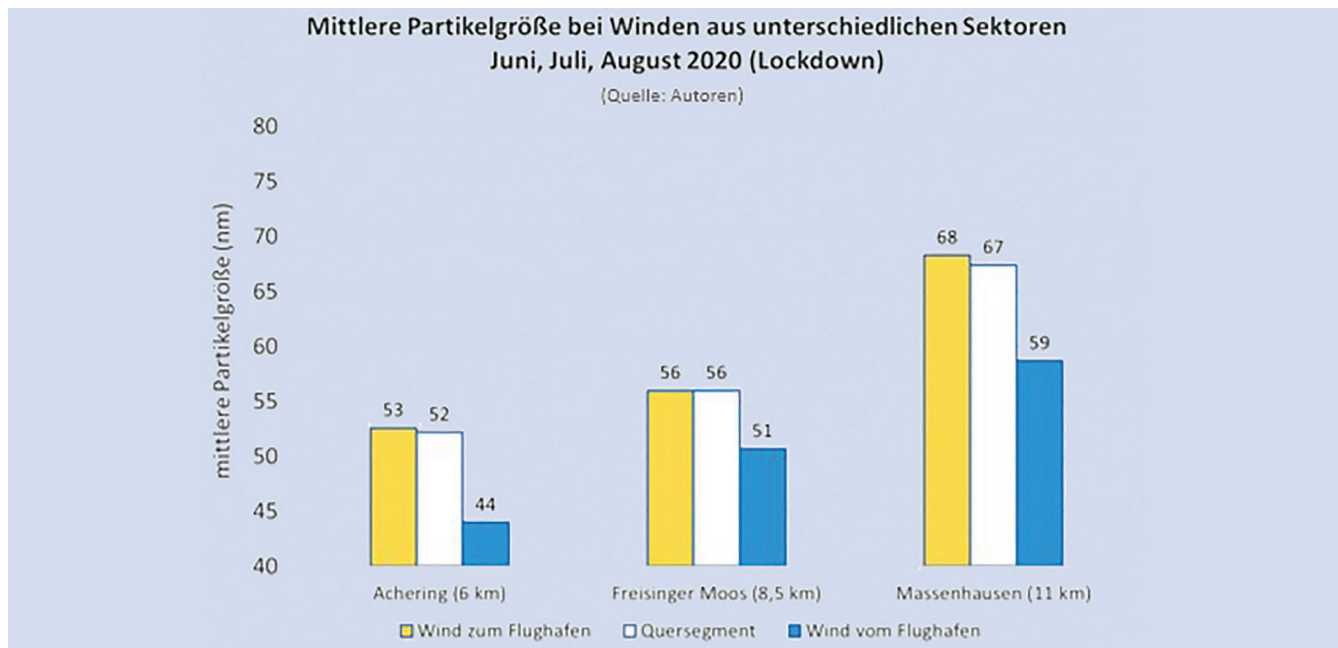


Bild 6 Partikelgrößen an den Messorten Achering, Freisinger Moos und Massenhausen, jeweils bei Wind zum Flughafen, bei Querwinden und bei Wind vom Flughafen. Grafik: Autoren

Modalwerte bei „Wind zum Flughafen“, die mittlere Säule zeigt die Werte bei „Querwind“ und die rechte Säule steht für die Werte bei „Wind vom Flughafen“. Bei „Wind zum Flughafen“ sind die Partikel umso größer, je weiter entfernt der Messstandort vom Flughafen liegt. Bei „Wind vom Flughafen“ werden die Partikel kleiner, je näher der Messstandort am Flughafen liegt. Am Flughafen selbst betrug die Partikelgröße knapp 40 nm, wie aus Bild 8 hervorgeht. Die UFP nehmen also über die Entfernungen 6, 8,5 und 11 km von 44 auf 50,7 bzw. 58,7 nm Durchmesser zu.

4.3 UFP-Konzentrationen und Partikelgrößen am Standort „Flughafen-Zentrum“ in den Zeitperioden „vor Lockdown“ und „im Lockdown“

Wie im Abschnitt Studienggebiet beschrieben, wurden auf dem Standort „Flughafen-Zentrum“ (Parkplatz Besucherhügel) bereits vor dem Lockdown und im Lockdown (April bis August 2020) Messungen durchgeführt. Die Auswertung der Daten erfolgte unabhängig von Windrichtung oder Windgeschwindigkeit. Die Konzentrations- und Größenwerte von Februar, April und Mai 2020 stammen aus Kurzzeitmessungen (2 bis 3 Tage), während von Juni bis August 2020 kontinuierlich gemessen wurde. So konnten die Werte aus dem normalen Flugbetrieb mit durchschnittlich 1 020 Flugbewegungen pro Tag im Februar 2020 mit den Werten bei deutlich reduziertem Betrieb in den Monaten Juni (160 Flüge pro Tag), Juli (328 Flüge pro Tag) und August 2020 (403 Flüge pro Tag) verglichen werden (Bild 7). Wenn man eine Hintergrundkonzentration von durchschnittlich 5 000 1/cm³ zugrunde legt (eigene Messungen bei „Wind zum Flughafen“), so beträgt der Rückgang der UFP-Konzentration zwischen Februar und April etwa 95 %. Im gleichen Zeitraum gingen die Flugbewegungen um 93 % (von 1 020/Tag auf 68/Tag) zurück. Bild 7 zeigt, wie die UFP-Werte dann von April/Mai bis zum Ende der

Messungen im August kontinuierlich ansteigen, gleichlaufend mit der Zunahme der Flugbewegungen. Trotz der reduzierten Datenbasis vor dem Lockdown mit Messungen an nur drei Tagen zeigt die Auswertung eine hohe Korrelation zwischen Anzahl von Flügen und den UFP-Konzentrationen mit einem Pearson-Korrelationskoeffizienten von $r = 0,97$.

Bei den Werten der Partikelgröße handelt es sich um den Modalwert, also den am häufigsten vorkommenden Wert der Größenverteilung. Er kann als grober Hinweis auf die Herkunft der Partikel dienen. Der Durchmesser der Partikel in der Flughafenluft vor dem Lockdown lag bei durchschnittlich 38 nm, ein Wert, der relativ hoch im Vergleich zu den direkten Triebwerksemissionen (10 bis 20 nm) ist. Zu berücksichtigen sind hierbei die oft wechselnden Winde mit Böen, wodurch stark und weniger stark von den Triebwerksemissionen belastete Luft an den Messstandort Parkplatz Besucherhügel gelangt, so wie auch der Wechsel in der Belegung der Startbahnen in den Monaten Mai bis August 2020. Der relativ hohe Durchmesser deutet also auf eine Durchmischung mit Partikeln aus anderen Quellen hin. Bei sehr stark reduziertem Flugverkehr erhöht sich der Anteil anderer Quellen an der Gesamtpartikelzahl, weswegen der Durchmesser deutlich höher als 40 nm liegt, die bei „normalem“ Flugverkehr am Standort „Flughafen-Zentrum“ beobachtet werden (Bild 8). Wie in Bild 8 dargestellt, verringert sich mit zunehmendem Flugverkehr die durchschnittliche Größe der Partikel wieder, gegenläufig zum steigenden Kerosinverbrauch und den entsprechenden Emissionen kleinster Partikel aus den Triebwerken. Nach den Angaben des Deutschen Fluglärmdienstes lag die im LTO-Zyklus verbrannte Kerosinmenge im April 2020 unter 5 Tonnen pro Tag, wohingegen der Verbrauch im August 2020 auf 77 Tonnen pro Tag gestiegen war. Zum Vergleich: Im Februar 2020 wurden am Flughafen München 308 Tonnen pro Tag verbraucht [21].

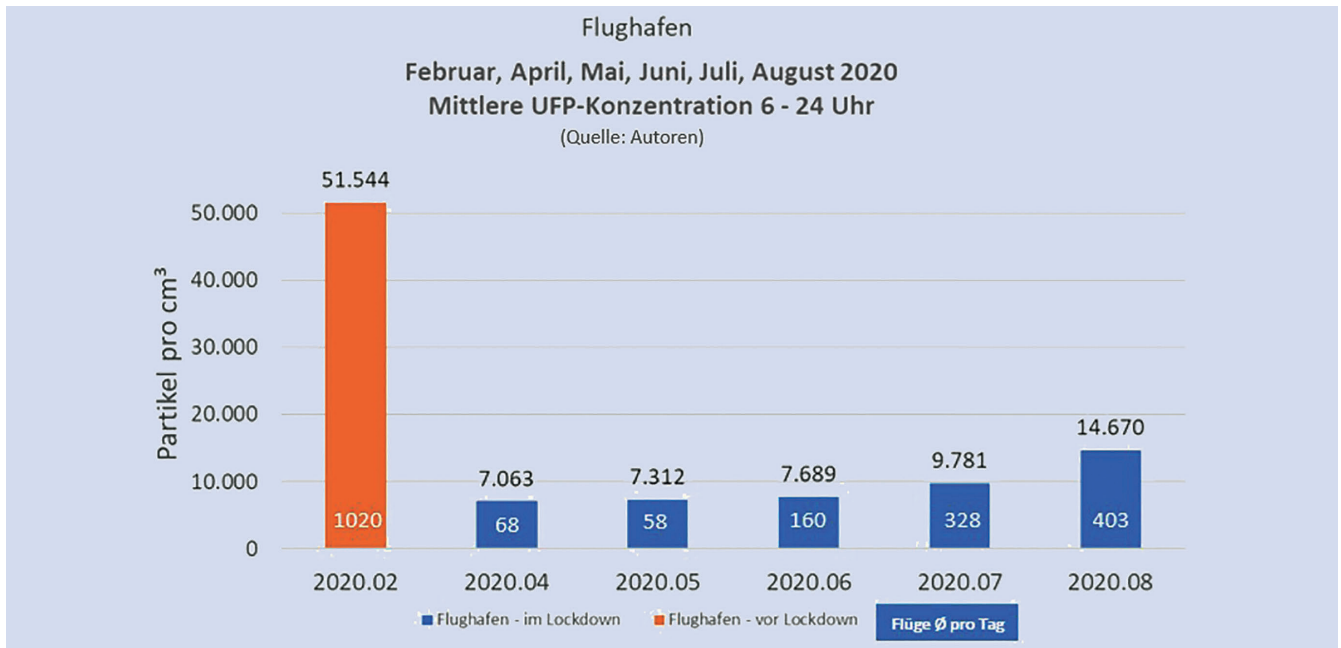


Bild 7 Vergleich der UFP-Konzentrationen vor und während des Lockdowns. Grafik: Autoren

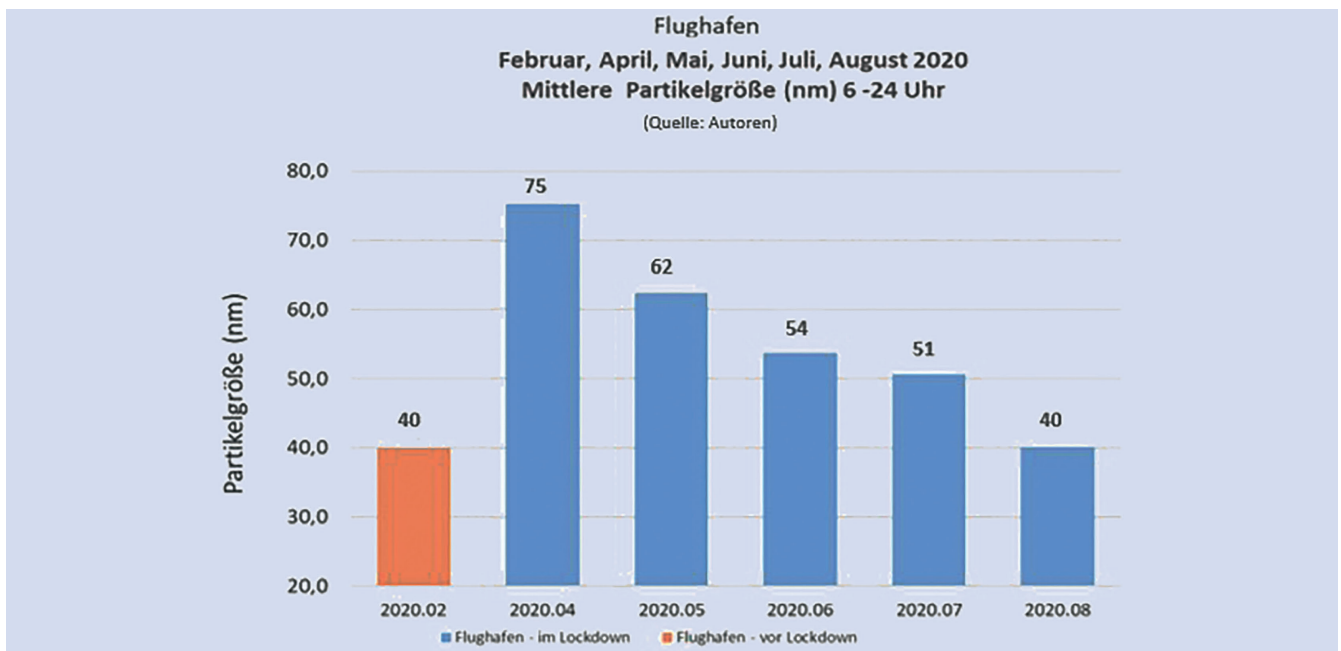


Bild 8 Partikelgrößen am Parkplatz Besucherhügel vor (Februar) und im Lockdown (April bis August). Grafik: Autoren

4.4 UFP-Konzentrationen am Standort „Freising-Neu-landsiedlung“ in den Zeitperioden „vor Lockdown“ und „im Lockdown“

Bild 9 zeigt die Messwerte des Messstandortes „Freising-Neu-landsiedlung“, der sich ca. 300 m neben dem Messstandort Angerstraße und 6 km vom Flughafen entfernt befindet. An diesem Standort wurden ebenfalls Daten vor dem Lockdown erhoben. Hier stellt sich der Vergleich „vor Lockdown“ und „im Lockdown“ unter Einbeziehung der Windsegmente folgendermaßen dar: Für alle drei Windsegmente beobachtet man einen Rückgang der UFP-Konzentrationen während des Lockdowns. Im Vergleich zur Belastung vor dem Lockdown reduzierte sich im Lockdown

die UFP-Konzentrationen im Segment 1 („Wind zum Flughafen“) um 15 % (von 5 631 auf 4 760 1/cm³) und im Segment 2 („Quersegment“) um ca. 20 % (von 6 587 auf 5 301 1/cm³). Sehr deutlich unterscheiden sich die Werte „vor Lockdown“ und „im Lockdown“ im Segment 3, wenn der Wind vom Flughafen kommt. Hier beträgt der Rückgang der UFP-Konzentration nach dem Lockdown fast 60 %, von 14 429 (bei 1 020 Flügen/Tag) auf 5 918 1/cm³ (weniger als 100 Flüge pro Tag). So liegt der Wert vor dem Lockdown um das mehr als 2,4-fache höher als im Lockdown. Der Rückgang der UFP-Konzentrationen in den Segmenten 1 und 2, der allerdings deutlich schwächer ausgeprägt ist als im Segment 3, könnte auch durch die Reduzierung der loka-

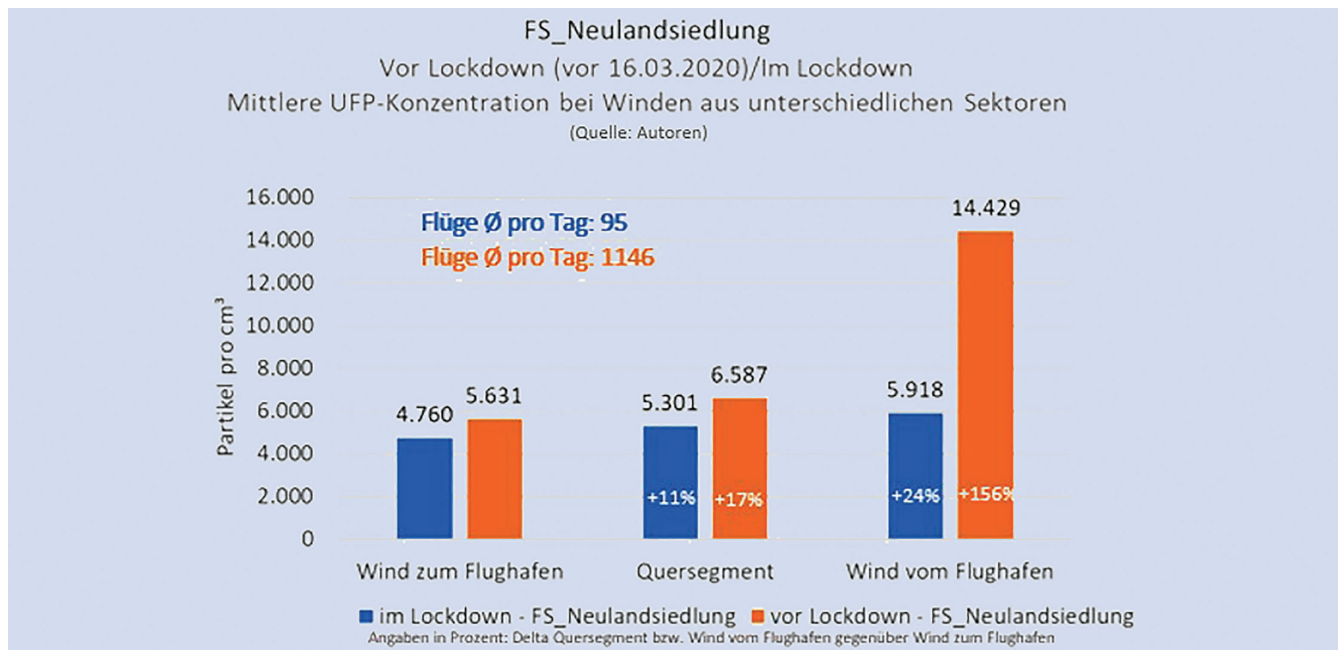


Bild 9 UFP-Konzentrationen der drei Segmente in Freising-Neulandsiedlung. Grafik: Autoren

Tabelle 2 Flugbewegungen, Kerosinverbrauch und UFP-Konzentrationen am Flughafen München vor und nach dem Lockdown.

2020	Flugbewegungen pro Tag	Tonnen Kerosin im LTO-Zyklus	UFP-Konzentration [1/cm ³]
Februar	1020	308	51544
März	554	192	n. d.
April	68	4,9	7063
Mai	58	2,2	7312
Juni	160	k. A.	7689
Juli	328	37	9781
August	403	77	14670

len Emissionen verursacht worden sein, z. B. durch weniger Kfz-Verkehr im Lockdown.

5 Diskussion

Nach dem Bericht des HLNUG [19; 20] ist dies nach unserem Kenntnisstand die zweite Untersuchung über UFP-Konzentrationen und deren Rückgang aufgrund der Corona-Pandemie an einem deutschen Flughafen.

In Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen [1; 2; 22; 32] ist davon auszugehen, dass die in Frankfurt/Main und München, den beiden größten deutschen Flughäfen, beobachteten Änderungen der UFP-Konzentrationen im Grunde an allen (Groß-)Flughäfen auftreten. Wie bereits in zahlreichen Studien gezeigt, bestimmen die Zahl der Flugbewegungen, die Flugzeugflotte und die jeweiligen Betriebszeiten im LTO-Zyklus die Menge der emittierten Luftschadstoffe. Ihre Ausbreitung hängt von den jeweiligen Wetter- und Windverhältnissen ab.

In dieser Studie konnte ermittelt werden, wie stark die durchschnittliche UFP-Konzentration auf dem Flughafengelände von der Anzahl der Flugbewegungen abhängt. So ist die UFP-Konzentration

von 51 544 1/cm³ bei 1 020 Flugbewegungen pro Tag im Februar 2020 auf 7 063 1/cm³ im April 2020 gesunken, als nur 68 Flüge pro Tag stattfanden (Bild 7). Das ist ein Rückgang von 93 % bei den Flugbewegungen und 86 % bei der UFP-Konzentration. Beide Änderungen verlaufen nahezu parallel, wenn man die übliche Hintergrundbelastung von 5 000 1/cm³ berücksichtigt. Dieser enge Zusammenhang zwischen der Anzahl der Flüge und der UFP-Konzentrationen am Flughafen besteht auch in den Folgemonaten (Pearson-Korrelationskoeffizient von $r = 0,97$). Die UFP-Konzentrationen stiegen in gleichem Maße an wie die Zahl der Flüge.

Im Zeitraum von Juni bis August 2020 wurden am Flughafen München im Schnitt 160, 328 bzw. 403 Flüge pro Tag durchgeführt (Bild 3). Im Vergleich zum Februar 2020 mit 1 020 Flügen pro Tag sind dies 16 %, 32 % bzw. 40 % der normalen Flugfrequenz. Dem Anstieg der Flugzahlen entsprechend hat sich auch der Kerosinverbrauch in diesen Monaten wieder erhöht, nach dem Lockdown laut Deutschem Fluglärmdienst (DFLD) [21] von 5 Tonnen im April 2020 bis 77 Tonnen pro Tag im August 2020. Prozentual entspricht dieser Verlauf 12 % im Juli 2020 auf 25 % im August 2020 (für Juni liegen keine Verbrauchsdaten

vor) der Kerosinmenge von 308 Tonnen pro Tag im Februar 2020 bei Flugbetrieb vor dem Lockdown. Hinsichtlich der Zahl der Flüge in Juli und August würde man einen höheren Kerosinverbrauch in diesen Monaten erwarten. Dabei ist zu bedenken, dass überwiegend kleinere Flugzeuge – mit entsprechend geringerem Treibstoffverbrauch – im Sommer 2020 eingesetzt wurden. Dennoch sollte der Anstieg der Flugbewegungen und des Kerosinverbrauchs parallel zu den Ultrafeinstaub-Mengen verlaufen. Tatsächlich betragen die UFP-Konzentrationen in den Monaten Juni bis August 2020 15 %, 20 % bzw. 28 % im Vergleich zum Wert $51\,544\text{ 1/cm}^3$ im Februar 2020 (Bild 7). Die Anzahl Flugbewegungen bzw. Tonnen Kerosin sind sehr hoch mit der UFP-Konzentration korreliert (Tabelle 2; $r = 0,97$ bzw. $r = 0,99$).

Im Gegensatz zur Untersuchung des HLNUG [19; 32] konnten in dieser Studie keine systematischen Vergleichsmessungen an externen Standorten vor bzw. im Lockdown gemacht werden. Wie in Frankfurt zeigen aber die Ergebnisse, dass die Windverhältnisse neben der Flugfrequenz der entscheidende Faktor für die UFP-Belastung durch den Flughafen sind. So beträgt das Verhältnis der UFP-Konzentrationen aus dem Segment 1 („Wind vom Flughafen“) und aus dem Segment 2 („Wind zum Flughafen“) mehr als das 1,6-fache der Hintergrundbelastung in 6 km Entfernung vom Flughafen und noch fast das 1,5-fache in 11 km Entfernung (Bild 5). Der Zusammenhang zwischen Entfernung und UFP-Konzentration ist fast linear ($R^2 = 0,93$). Bemerkenswert ist auch, dass trotz massiv reduzierten Flugbetriebs selbst in 11 km Entfernung von der UFP-Quelle Flughafen noch deutlich erhöhte UFP-Konzentrationen in der Außenluft vorhanden sind. Bei vollem Flugbetrieb vor dem Lockdown wurde in gleicher Entfernung und bei Wind vom Flughafen eine 6,8-fache Erhöhung festgestellt.

An den beiden Messstandorten Hallbergmoos und Angerstraße war der UFP-Rückgang im Lockdown weniger deutlich ausgeprägt. Dies erklärt sich zum Teil aus ihrer Lage beidseits seitlich der Startbahnen. Die Werte von Hallbergmoos zeigen einen besonders schwachen Anstieg der UFP-Konzentrationen bei „Wind vom Flughafen“ (+6 %). Ob dies an der Definition der Winkelbereiche oder an der Bahnbelegung liegt oder andere Hintergründe hat, müssen weitere Messungen zeigen.

Auch die Daten der HLNUG-Untersuchungen [19] zeigen den Zusammenhang zwischen Entfernung des Messstandortes zum Flughafen Frankfurt und der UFP-Konzentration bei vollem Flugbetrieb (vor Lockdown) klar, aber weniger ausgeprägt. Überraschenderweise kehrt sich der Zusammenhang im Lockdown um, wobei in 11 km Entfernung in Oberrad $10\,690\text{ 1/cm}^3$ gemessen wurden und im nächstliegenden Schwanheim etwa 20 % weniger. Eine Erklärung für die abweichenden Ergebnisse in Frankfurt und München könnte in den unterschiedlichen Verkehrsbedingungen und der andersartigen Umgebung der Flughäfen liegen.

Wie schon in Abschnitt 3.3 beschrieben, ist der Vergleich der UFP-Konzentrationen, die durch Discmini-Geräte und Kondensationspartikelzähler (CPC) ermittelt wurden, nur bedingt möglich. In der HLNUG-Studie wurden CPCs verwendet, die Partikel von 7 bis $2\,200\text{ nm}$ erfassen, während das Discmini einen Größenbereich von 10 bis 700 nm abdeckt. Auch das unterschiedliche Messprinzip führt zu weiteren Differenzen zwischen den CPC- und Discmini-Messergebnissen. Allerdings sind die absoluten UFP-Konzentrationen für die Erfassung der Beziehung zwi-

schen der Änderung der UFP-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Anzahl der Flugbewegungen oder auch Entfernung vom Flughafen weniger von Bedeutung. Wichtig sind die Konzentrationsänderungen, die durch beide Messverfahren ermittelt werden können. Diese wurden in einer Vergleichsmessung mit einem P Trak (CPC der Fa. TSI mit einem Messbereich von 20 bis $1\,000\text{ nm}$) und einem Discmini untersucht. Obwohl die absoluten Werte des Discmini um 60 % höher lagen als die des P Trak, verliefen die Konzentrationskurven weitgehend parallel (eigene Messungen, Daten können auf Anfrage gezeigt werden). Somit waren die durch beide Geräte erfassten Konzentrationsänderungen sehr gut vergleichbar.

Am Flughafen LAX fanden Hudda et al. [2] eine 4 bis 5-fach erhöhte Partikelkonzentration in 8 bis 10 km und eine 2-fach erhöhte in 16 km Entfernung vom Flughafen. Hier zeigt sich ein sehr deutlicher Zusammenhang zwischen Entfernung und Konzentration. Allerdings sind die Verhältnisse dort nicht ganz vergleichbar mit denen des Flughafens München. LAX hatte im Jahr 2014 nahezu doppelt so viele Flugbewegungen wie der Flughafen München.

Diese Ergebnisse zeigen übereinstimmend, dass das Umland eines jeden Flughafens zusätzlich zu den lokal üblichen Emissionen mit Ultrafeinstaub belastet ist. Diese Mehrbelastung ist umso höher, je größer der Flughafen, bzw. je mehr Flugbewegungen stattfinden. Auch Fleuti [23] bestätigt, dass die Schadstoffkonzentrationen eng mit der Flugfrequenz korreliert sind. Mit zunehmender Entfernung erfolgt eine Verdünnung und auch eine Verbreiterung der Abwindfahne, die sich unter Umständen über 40 km erstrecken kann [24].

Die vorliegende Studie hat ebenfalls deutlich gezeigt, dass nicht nur die UFP-Konzentrationen sehr stark durch die Nähe zum Flughafen beeinflusst werden, sondern auch der Durchmesser der Partikel (Bild 6). Triebwerke emittieren ausschließlich Gase und ultrafeine Partikel [25; 26]. Ihr Durchmesser liegt im Bereich 10 bis 20 nm und damit deutlich unter dem von Dieselpartikeln (50 nm). Die Partikel nehmen mit der Zeit an Größe zu [27] und vermischen sich mit Partikeln aus anderen Quellen, sodass mit steigender Entfernung vom Flughafen eine klare Trennung nach Größe und Herkunft immer schwieriger wird. Dennoch kann man den Anteil der Partikel aus den Triebwerken erkennen, da die durchschnittliche Partikelgröße im Abwind des Flughafens erkenntlich niedriger ist als in der vom Flughafen unbelasteten Luft. In dieser Studie zeigt sich, dass die Partikel im Wind vom Flughafen bis zu 16 % kleiner sind als in unbelasteter Luft. Der Unterschied ist nahe dem Flughafen etwas größer (16 % in Acherding) als in Massenhausen (14 %). Die Partikelgrößen in den Querschnitten unterscheiden sich kaum von denen im Wind zum Flughafen. Diese Ergebnisse unterstützen die Annahme, dass die Partikelgröße einen Hinweis auf die Quelle „Flughafen“ geben können, insbesondere in Kombination mit klar erkennbarer Windrichtung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zahl der Flugbewegungen nicht nur die UFP-Konzentration am Flughafengelände beeinflusst, sondern auch die Partikelgröße. Bei über 1 000 Flügen pro Tag (Februar 2020) betrug die durchschnittliche Partikelgröße $39,8\text{ nm}$. Im April 2020 mit nur 68 Flügen pro Tag lag der Durchmesser bei $75,3\text{ nm}$, um dann mit zunehmenden Flugzahlen einen Wert von über 40 nm im August 2020 zu erreichen (Bild 8). In der Zeit des geringen Flugverkehrs im Lockdown

fehlen die kleinsten Partikel aus den Triebwerken und der Anteil größerer Partikel aus anderen Quellen überwiegt.

Es ist anzunehmen, dass mit der Erhöhung der Flugbewegungen nach der Corona-Pandemie die Belastungen durch ultrafeine Partikel wieder ansteigen werden. Im Gegensatz zu den Verbrennungsmotoren im Straßenverkehr können weder Filter noch Katalysatoren die Emissionen der Triebwerke mindern. Gleichwohl gibt es viele organisatorische und technische Möglichkeiten, die UFP-Mengen deutlich zu reduzieren. Eine vielversprechende Maßnahme wäre die Verwendung schwefelarmen Kerosins, auf die auch *Frenzel* und *Kohnert* [2] hinweisen. Im Gegensatz zum Kerosin mit einer maximalen Schwefel-Konzentration von 3 000 ppm wurden in der EU die Schwefelanteile in Heizöl, Diesel und Benzin auf < 10 ppm reduziert. Eine Studie aus London hat gezeigt, dass nach Einführung dieser Vorschrift die Ultrafeinstaubkonzentrationen in den Straßen um 30 bis 59 % zurückgegangen sind [28]. Da die Schwefelverbindungen eine der Ursachen für die Bildung UFP sind, könnte mit der Entschwefelung des Kerosins ein wichtiger Beitrag für eine schadstoffärmere Luft

in den Flughafenregionen geleistet werden. Die Kosten dafür belaufen sich auf 1 bis 1,5 Eurocent pro Liter [29; 30]. Ein Flug von München nach Hamburg würde sich dadurch um ca. 50 Cent verteuern.

Die größte Menge des Ultrafeinstaubes von mehr als 50 % aller Emissionen im LTO-Zyklus¹⁾ entsteht auf den Vorfeldern beim Rollen (Taxiing) der Flugzeuge und durch die Hilfstriebwerke am Gate [23]. Neben der Verwendung schwefelarmen Kerosins würde auch die vollständige Elektrifizierung des Bodenverkehrs, insbesondere der Flugzeugschlepper zum und vom Gate, enorme UFP-Emissionen vermeiden [31]. Wie bereits erwähnt, bestimmen, neben der Qualität des verwendeten Kerosins, die Zahl der Flugbewegungen, die Zusammensetzung der Flugzeugflotte und die jeweiligen Betriebszeiten im LTO-Zyklus die Menge der emittierten Luftschadstoffe.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Studie sehr deutlich, dass ein Großflughafen eine starke lokale UFP-Quelle ist, die man noch in größerer Entfernung vom Flughafen messtechnisch nachweisen kann. ■

DANKSAGUNG

Unser Dank geht an alle, die mit Rat und Tat zur Seite standen, besonders an alle, die im UFP-Messnetzwerk mitgewirkt, die Messkampagne initiiert, die erforderliche Software entwickelt, die Infrastruktur für die Aufstellung der Messgeräte und die Messgeräte bereitgestellt haben: Dr. *Christopher Aichinger* (Netzwerk), *Marita Anzinger* (Netzwerk), *Tobias Eschenbacher* (Oberbürgermeister Freising), *Ute Freiwald* (Netzwerk), *Markus Geier* (Netzwerk), *Erwin Grießer* (Netzwerk), *Gabi Hartinger* (Netzwerk), *Michael Hauner* (BV), *Jochen Hellmich* (BV), *Hermann Hofer* (Netzwerk), *Konrad Huber* (Netzwerk), *Brigitte Huppertz* (Netzwerk), *Andreas Kern* (BV), *Stefan Kiesl* (Netzwerk), *Georg Kramer* (Netzwerk), *Christoph Kröhlinger* (Netzwerk), *H. Langenbacher* (Fa. Testo), *Silvana Mayrthaler* (Netzwerk), Prof. Dr. *Gerhard Müller-Stark* (BV), *Christian Oberhofer* (Netzwerk), *Christel Orthen-Schmuker* (BV), *Helmut Petz* (Landrat Freising), *Pfarrverband Freising*, *Florian Pflügler* (Netzwerk), *Manfred Pointner* (Schutzgemeinschaft Nord), *Harald Printz* (Netzwerk), *Manfred Ranft* (Alt-Bürgermeister Wartenberg), *Leo Rauschecker* (Netzwerk), *Karl-Heinz Reingruber* (Netzwerk), *Ferdinand Reuss* (Netzwerk), *Michael Rottenkolber* (Netzwerk), *Peter Schickinger* (Netzwerk), *Michael Url* (Netzwerk), *Robert Wäger* (Netzwerk), Dr. *Katrin Wolf* (Netzwerk). Das Projekt wurde dankenswerterweise vom Landkreis Freising finanziert. Herzlichen Dank an die Gemeinden Wartenberg/Berglern/Fraunberg, Hallbergmoos und Neufahrn und das Helmholtz Zentrum München für die Bereitstellung der Geräte.

Literatur

- [1] *Westerdahl, D.; Fruin, S. A.; Fine, P. M.; Sioutas, C.*: The Los Angeles International Airport as a source of ultrafine particles and other pollutants to nearby communities. *Atmos. Environ.* 42 (2008) 3143-55.
- [2] *Frenzel, W.; Kohnert, B.*: Beiträge des Flugverkehrs zur Ultrafeinstaubbelastung – ein Review. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 80 (2020) Nr. 1/2, S. 7-18.
- [3] ACI – Airports Council International Europe: Ultrafine Particles at Airports. Current understanding of ultrafine particle emissions and concentrations at airports in www.aci-europe.org/component/downloads/downloads/5566.html (2018).
- [4] *Knol, A. B.; de Hartog, J. J.; Boogaard, H.; Slottje, P.; van der Sluijs, J. P.; Lebret, E.* et al.: Expert elicitation on ultrafine particles: likelihood of health effects and causal pathways. *Part Fibre Toxicol* 6, 19 (2009). doi.org/10.1186/1743-8977-6-19.
- [5] *Oberdörster, G.*: Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*; 74 (2001) 1-8.
- [6] Regional Office for Europe – Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. Technical Report. Hrsg.: WHO Regional Office for Europe, Kopenhagen (2013).
- [7] HEI Review Panel on Ultrafine Particles: Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles. HEI Perspectives 3. Hrsg.: Health Effects Institute, Boston, MA (2013).
- [8] *Donaldson, K.; Stone, V.; Borm, P. J. A.; Jimenez, L. A.; Gilmour, P. S.* et al.: Oxidative stress and calcium signaling in the adverse effects of environmental particles (PM10). *Free Radical Biol. Med.* 34 (2003), S. 1369-1382.
- [9] *Mills, N. L.; Donaldson, K.; Hadoke, P. W.; Boon, N. A.; MacNee, W.* et al.: Adverse cardiovascular effects of air pollution. *Nat. Clin. Pract. Cardiovasc. Med.* 6 (2009), 36-44.
- [10] *Durga, M.; Nathiya, S.; Rajasekar, A.; Devasena, T.*: Effects of ultrafine petrol exhaust particles on cytotoxicity, oxidative stress generation, DNA damage and inflammation in human A549 lung cells and murine RAW 264.7 macrophages. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 38(2) (2014), S. 518-30.
- [11] *Lee, J. W.; Lee, H. J.; Lee, Y.-J.; Lim, Y.-B.; Sim, W. J.; Jang, J.-H.* et al.: Determination of Genotoxicity Attributed to Diesel Exhaust Particles in Normal Human Embryonic Lung Cell (WI-38) Line. *Biomolecules.* 11(2) (2021) 291.
- [12] *Walker, D. I.; Lane, K. J.; Liu, K.; Uppal, K.; Patton, A. P.; Durant, J. L.* et al.: Metabolomic assessment of exposure to near-highway ultrafine particles. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 29(4) (2019), S. 469-483.
- [13] *Calderon-Garciduenas, L.; Solt, A. C.; Henriquez-Roldan, C.; Torres-Jardon, R.; Nuse, B.* et al.: Long-term air pollution exposure is associated with neuroinflammation, an altered innate immune response, disruption of the blood-brain barrier, ultrafine particulate deposition, and accumulation of amyloid beta-42 and alpha-synuclein in children and young adults. *Toxicol. Pathol.* 36 (2008), S. 289-310.

¹⁾ Landing & Take Off (Landung- und Start)-Zyklus. Der LTO-Zyklus wird in 4 Phasen eingeteilt: Anflug und Landen (4 Minuten), Rollen (26 Minuten), Take off (0,7 Minuten), Steigflug (2,2 Minuten)

- [14] Regional Office for Europe – WHO Expert Consultation: Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs). Meeting report, Bonn, 29 September – 1 October 2015. Hrsg.: WHO Regional Office for Europe, Kopenhagen (2016).
- [15] Health Effects of Ultrafine Particles, Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting, Umwelt und Gesundheit 05. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (2018).
- [16] Habre, R.; Zhou, H.; Eckel, S. P.; Enebish, T.; Fruin, S.; Bastain, T. et al.: Short-term effects of airport-associated ultrafine particle exposure on lung function and inflammation in adults with asthma. *Environ. Int.* 118 (2018), S. 48-59. doi.org/10.1016/j.envint.2018.05.031.
- [17] Wing, S. E.; Larson T. V.; Hudda, N.; Boonyarattaphan, S.; Scott, F.; Ritz, B.: Preterm Birth among Infants Exposed to in Utero Ultrafine Particles from Aircraft Emissions. *Environmental Health Perspectives*, 128 (4) (2020) 47002.
- [18] Lammers, A.; Janssen, N. A. H.; Boere, A. J. F.; Berger, M.; Longo, C.; Vijverberg, S. J. H. et al.: Effects of short-term exposures to ultrafine particles near an airport in healthy subjects. *Environment International* 141 (2020) 105779. doi.org/10.1016/j.envint.2020.105779.
- [19] Rose, D.; Ditas, F.; Jacobi, S.: 3. Bericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikeln im Bereich des Flughafens Frankfurt Auswirkungen des reduzierten Flugbetriebs während der COVID-19-Pandemie. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2020).
- [20] Lorentz, H.; Schmidt, W.; Hellebrandt, P.; Ketzel, M.; Jakobs, H.; Janicke, U.: Einfluss eines Großflughafens auf zeitliche und räumliche Verteilungen der Außenluftkonzentrationen von Ultrafeinstaub < 100 nm, um die potentielle Belastung in der Nähe zu beschreiben – unter Einbeziehung weiterer Luftschadstoffe (Ruß, Stickoxide und Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀)). Hrsg. Umweltbundesamt, Abschlussbericht, Texte 14/2021.
- [21] Deutscher Fluglärmdienst e.V. (DFLD), www.dfld.de/DFLDindex.php
- [22] The Ecological Council: Luftverschmutzung an Flughäfen – Ultrafeine Partikeln, Lösungen und erfolgreiche Zusammenarbeit., 1. Ausgabe, ISBN: 978-87-92044-37-2 (2012).
- [23] Fleuti, E.: Ultrafeinstaubstudien Flughafen Zürich. Ultrafeinstaub Expertenanhörung, Frankfurt (2019).
- [24] Weber, K.; Fischer, C.; Kramer, T.; Pohl, T.: Bericht zur Vorstudie: Ultrafeine Partikeln im Umfeld des Düsseldorfer Flughafens. Hochschule Düsseldorf, Labor für Umweltmesstechnik. Im Auftrag für das Landesamt für Umwelt-, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalens (2019).
- [25] EMPA – Particulate Matter and Gas Phase Emission Measurement of Aircraft Engine Exhaust, Final Report (04/2012–11/) (2015).
- [26] Rindlisbacher, T.: UFP-Emissionen von Flugzeugen. Ultrafeinstaub Expertenanhörung, Frankfurt (2019).
- [27] Asbach, C.: Grundwissen Ultrafeinstaub – Allgemeine Einführung. Ultrafeinstaub Expertenanhörung, Frankfurt (2019).
- [28] Jones, A. M.; Harrison, R. M.; Barratt, B.; Fuller, G.: A large reduction in airborne particle number concentrations at the time of the introduction of “sulfur free” diesel and the London Low Emission Zone. *Atmospheric Environment* 50 (2012), S. 129-138.
- [29] Hemmings, B.: Entschwefelung des Kerosins. Ultrafeinstaub Expertenanhörung, Frankfurt (2019).
- [30] European Aviation Safety Agency (EASA), under contract number R. 2008.C11: Reduction of sulphur limits in aviation fuel standards (SULPHUR). *QinetiQ/09/01835 Issue 1.1* (2010).
- [31] Reichmuth, J.: Möglichkeiten zur Minderung von UFP: Optimierung im Bereich des Bodenverkehrs von Flughäfen. DLR. Expertenanhörung Ultrafeinstaub Frankfurt (2019).
- [32] Rose, D.; Jacobi, S.: 1. Zwischenbericht zur Untersuchung der regionalen Luftqualität auf ultrafeine Partikeln im Bereich des Flughafens Frankfurt. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, HLNUG (2018).



Dipl. Ing. Wolfgang Herrmann
Foto: Autor

Dr. Reinhard Kendlbacher

Dr. Josef Cyrys

Helmholtz Zentrum München, Institut für Epidemiologie, München.

Prof. Dr. Oswald Rottmann

Bürgerverein Freising, Freising.

Josef Cyrys und Oswald Rottmann teilen sich die Letzt-Autorschaft.