

## Gesamtstellungnahme der WQS – UFP zum Stu- diendesign Belastungsstudie (Version 2)

---

22.02.2022

### Autor\*innen der Stellungnahme

Emanuel Fleuti

Prof. Dr. Christian Hasse

Prof. Dr. Andreas Held

Dr. Bryan Hellack

Prof. Dr. Wolfgang Hoffmann

Dr. Stephan Nordmann

Prof. Dr. Erich Wichmann

Flughafen Zürich

Technische Universität Darmstadt

Technische Universität Berlin

Umweltbundesamt

Universität Greifswald

Umweltbundesamt

Helmholtz-Zentrum München

---

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Überblick</b>	<b>3</b>
<hr/>		
1.1	Überblick über den Bericht zum Studiendesign Belastungsstudie Frankfurt Flughafen und Region	3
1.2	Gegenstand des Studiendesigns	3
1.3	Hauptempfehlungen und -hinweise des Designs	4
1.3.1	Bisherige Messungen am Flughafen Frankfurt	4
1.3.2	Konzept Belastungsstudie	4
1.3.3	Bestimmung der Emissionen	5
1.3.4	Immissionsmessungen	6
1.3.5	Immissionsmodellierungen	7
1.3.6	Anforderungen an Iteration	8
1.3.7	Datenmanagementkonzept	8
<b>2</b>	<b>Gesamteindruck</b>	<b>9</b>
<hr/>		
<b>3</b>	<b>Bewertung und Empfehlungen</b>	<b>11</b>
<hr/>		
3.1	Bewertung der Darstellung und der vorgeschlagenen Methoden	11
3.1.1	Darstellung, Abbildungen, Grafiken	11
3.1.2	Messungen	12
3.1.3	Modellierung	14
3.1.4	Iteration – Konzeption der Wirkungsstudie	15
3.1.5	Datenmanagement	15
3.2	Hinweise und Empfehlungen der WQS an das FFR mit Blick auf nächste Schritte und eine Wirkungsstudie	16
<b>4</b>	<b>Abschließende Empfehlung der WQS</b>	<b>18</b>
<hr/>		

# 1 Überblick

---

## 1.1 Überblick über den Bericht zum Studiendesign Belastungsstudie Frankfurt Flughafen und Region

---

Der vorliegende Bericht zum Studiendesign (Curtius et al.: Detailliertes Konzept „Belastungsstudie Frankfurt Flughafen und Region“ vom 4.2.22) umfasst 56 Seiten, davon 7 Seiten mit einem ausführlichen Literaturverzeichnis.

Das Konzept wird in neun inhaltliche Kapitel gegliedert und beschreibt eine Vorgehensweise zur Erfassung der Exposition der Bürger\*innen gegenüber ultrafeiner Partikel (UFP) in der Region Flughafen Frankfurt/Main. Hierbei werden zunächst in den Kapiteln Einleitung und Zielstellung (Kapitel 1) sowie Stand der Forschung (Kapitel 2) das grundlegende Verständnis zu UFP erarbeitet um darauf aufbauend das Konzept der Belastungsstudie zu erläutern (Kapitel 3-9).

In der Einleitung wird kurz die fachlich-inhaltliche Begründung für eine Belastungsstudie UFP im Raum Flughafen/Frankfurt/Main rekapituliert und die Zielstellung und Struktur des vorliegenden verschriftlichten Konzepts skizziert. Demnach wird zunächst eine Belastungsstudie vorgeschlagen, in der die Belastung der Bürger\*innen gegenüber UFP in der Region ermittelt wird. Darauf aufbauend wird, zu einem späteren Zeitpunkt, eine Wirkungsstudie vorgesehen, wobei auf eine möglichst direkte Verzahnung zwecks Synergieeffekten hingewiesen wird. Insbesondere auch zu diesem Zwecke wird auf eine mögliche ergänzende Belastungsstudie hingewiesen, die sich aus dem iterativen Prozess von der vorgeschlagenen Belastungsstudie hin zur Wirkungsstudie ergeben kann.

## 1.2 Gegenstand des Studiendesigns

---

Das dargelegte Konzept beschreibt das Design einer Belastungsstudie und ist modular aufgebaut, so dass möglichst flexibel, je nach Fragestellung des Auftraggebers agiert werden kann. Dabei wird zwischen Basismodulen, also unabdingbaren Aufgaben und optionalen Aufgaben in Form von Ergänzungsmodulen unterschieden.

Des Weiteren wird zur Einordnung und Erarbeitung bestehender Fragestellungen und Aufgaben für eine solche Belastungsstudie zu UFP der aktuelle Stand des Wissens zu den als besonders zu beachtenden Aspekten Partikelanzahl- und -größenverteilung an Flughäfen, Atmosphärischer Transport und Innenraum, Chemische Zusammensetzung und Gesundheitseffekte von UFP dargestellt.

Gegenstand des Designs ist die Beschreibung von Basisaufgaben (Messungen oder Modellierung), die für eine Belastungsstudie unabdingbar sind (Basismodul), sowie optionalen Aufgaben, die aus wissenschaftlicher Sicht sinnvolle Ergänzungen darstellen (Ergänzungsmodul). Hierzu wird eine Projektdauer für die 1. Belastungsstudie von zweieinhalb Jahren (30 Projektmonate) unterstellt.

## 1.3 Hauptempfehlungen und -hinweise des Designs

---

### 1.3.1 Bisherige Messungen am Flughafen Frankfurt

Es sind bereits intensive Messungen in der Region Flughafen Frankfurt, insbesondere durch das HLNUG durchgeführt worden. Diese werden auf vier Seiten des Konzepts prägnant zusammengefasst.

Neben stationsgebundenen Messungen der Partikelanzahlkonzentration (gesamt und größen aufgelöst) und Partikelanzahlgrößenverteilungen durch HLNUG und UBA werden auch Messungen der Goethe-Universität Frankfurt zu UFP-Konzentrationen und zur chemischen Zusammensetzung von UFP-Proben sowie Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung vorgestellt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Berücksichtigung pandemiebedingter Auswirkungen in den jüngeren Messzeiträumen.

Darüber hinaus wurde am Flughafen Frankfurt bereits eine Ausbreitungsmodellierung durchgeführt, die entgegen bestehender Messungen am Flughafen Frankfurt und der internationalen Literatur zu UFP Immission durch Flughäfen einen geringen Zusatzbeitrag der UFP Anzahlkonzentration von 10 % zeigt<sup>1</sup>. Analog zu internationalen Studien an Flughäfen zeigen die bisherigen Messungen einen direkten, signifikanten Einfluss auf die Partikelanzahlgrößenverteilung (Erhöhung bis zu ~70 %) und chemische Zusammensetzung von UFP im Einflussbereich des Flughafens, insbesondere in der Einflugschneise aber auch bedingt durch den Flughafenbetrieb selbst. Insbesondere für Partikel < 30 nm sind Flughäfen eine signifikante Quelle. Belegt wurde dies durch chemische Inhaltsstoffanalytik mittels spezifischer molekularer Marker von beispielsweise Schmierölen aus dem Flugzeugbetrieb.

### 1.3.2 Konzept Belastungsstudie

Das Konzept zur Belastungsstudie folgt zwei übergeordneten Zielsetzungen, nämlich

1. der Erlangung eines quantitativen Verständnisses der UFP-Immissionen (Partikelanzahlkonzentration und Quellbeiträge) sowie
2. der Bereitstellung von Mess- und Modelldaten für eine UFP Wirkungsstudie.

Eine präzise Auswahl der Messgrößen und der Messzeiträume wurde getroffen (Tabelle 1 im vorgelegten Konzept). Dabei wird für die Immissionsmessungen eine modulare Erweiterung der Messungen, über das Basisprogramm hinaus, je nach Fragestellung empfohlen. Bei allen Messungen wird auf die benötigte hohe Qualität und Vergleichbarkeit hingewiesen. Soweit möglich sind genormte Referenz- oder Äquivalenzverfahren zu verwenden.

Hinsichtlich der UFP-Emissionen sollen neben bereits bestehenden Literaturdaten zu Quellgruppen wie Autoverkehr oder Hausbrand, zusätzlich Messungen zu UFP-Emissionen und Konzentrationen am Flughafen Frankfurt durchgeführt werden. Hierzu sind in-situ Messungen (Emission und Immissionen) in Kombination mit Modellierungen vorzusehen, wobei soweit möglich auf bereits vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden soll (z.B. bestehende Messstationen des HLNUG).

---

<sup>1</sup> Dies ist vermutlich in der Nichtberücksichtigung flüchtiger UFP begründet und verdeutlicht somit die Beachtung der flüchtigen UFP Anteile bei der ausstehenden Belastungsstudie sowohl bei den Messungen als auch der Modellierung - darüber hinaus auch für eine anschließende Wirkungsstudie.

Bei der Bestimmung der UFP-Konzentrationen sind, die Regionale Gesamt-UFP, Lokale Gesamt-UFP und Nahfeld-UFP Konzentration zu erfassen. Dies ermöglicht in Kombination über eine Punkt- und Situationsmessung hin zur Modellierung in die Fläche, die Ermittlung einer Bürgerbelastung im Außenbereich inklusive der flughafenspezifischen Quellbeiträge. Die vorgeschlagene Messkonzeption ist modular aufgebaut: Neben der Erfassung von Basisdaten für Emission und Immission werden zusätzlich Immissionsergänzungsmessungen vorgeschlagen. Diese Module sind fragenspezifisch auswähl- und durchführbar und unterstützen somit die Validierung der Modellierung und die spätere Wirkungsstudie.

Die Fokussierung des Konzeptes folgt der Leistungsbeschreibung, in der ein Schwerpunkt auf die Untersuchung des Flughafens Frankfurt gesetzt wird. Besonders sinnvoll ist die Unterscheidung von Basisaufgaben, die für die Belastungsstudie unabdingbar sind, sowie ergänzenden optionalen Aufgaben, die hinsichtlich der Messungen in Tabelle 1 des Konzepts dargestellt sowie bei der Erläuterung der Modellierungsmodule genannt ist.

### 1.3.3 Bestimmung der Emissionen

Die Bestimmung der Emissionen soll über Emissionsmessungen im Nahfeld des Flughafens in Kombination mit Nutzung vorhandener Literaturdaten erfolgen, um ein Emissionsinventar für die Emissionsmodellierungen bereitzustellen.

Grundsätzlich bestehen für den Flughafenbetrieb bereits UFP-Emissionsfaktoren, die genutzt und eingebracht werden sollen, so dass es nicht notwendig wird, gesonderte Emissionsfaktoren zu ermitteln. Es sind lediglich die realen Emissionen der Flugzeuge, und hier insbesondere die flüchtigen Partikel, zu ermitteln. Hierzu sind Messungen im Nahfeld (Roll-, Start- und Landebahn) mit vorgeschlagen. Eine Wahl der Standorte ist erfolgt. Die Bestimmung von CO<sub>2</sub> bzw. Delta CO<sub>2</sub> (Abgasfahne abzgl. Hintergrund) soll zur Ableitung von Emissionsfaktoren für flüchtige Partikel genutzt werden. Die Erfassung der flüchtigen und nicht-flüchtigen UFP Anzahlkonzentration soll nach entsprechenden Normen erfolgen. Bestehende Standorte sollen genutzt werden. Vorgehensweise, Technik und der Größenbereich sind hier klar definiert, werden allerdings von der WQS kritisch gesehen. Die Emissionsdaten aus der Zulassung sind als robust anzusehen, Messungen erscheinen daher nur für die sekundären Partikel relevant.

Es ist außerdem zu diskutieren, ob die UFP Messungen hinsichtlich zeitlicher Abdeckung repräsentativ sind, um Emissionsfaktoren verlässlich abzuleiten – hier sind Messungen von mindestens vier Wochen anzusetzen.

Die Emissionsmessungen beinhalten vor allem die Erfassung der UFP-Anzahlkonzentration, mit und ohne Denuder, um somit den flüchtigen und partikulären Anteil unterscheiden zu können. Bei flüchtigen Partikeln sind – nach Meinung der WQS - die Quellen nicht zuzuordnen, hier werden Tracer benötigt.

Das Konzept spricht die tatsächlich, realen Emissionen von Flugzeugen im Vergleich zu Werten aus den Datenbanken an, die anhand von Nahfeldmessungen nachkorrigiert werden sollen (Kap. 5.2). Diese Methodik erscheint nur bedingt zweckmäßig und sollte vom Konsortium diskutiert werden. Heute anerkannt ist das sog. „Performance Based Modelling“, das zuverlässig die realen Bedingungen bei Flugzeugen abbilden kann (Details dazu im ICAO Doc 9889, Kapitel 3).

Es wird vonseiten der WQS angeregt, zusätzlich auf vorhandene Datenbasen zu Emissionsfaktoren aus Triebwerken zu verweisen, die zum Vergleich der gefundenen Emissionsfaktoren herangezogen werden können (z. B. <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/einfluss-eines-grossflughafens-auf-zeitliche> (Abschnitt 3.6 Emissionen aus Triebwerken)).

#### 1.3.4 Immissionsmessungen

Für die Immissionsmessungen müssen zunächst entsprechend der Anforderungen der Ausbreitungsmodellierung geeignete Messstandorte für den lokalen und regionalen Hintergrund bestimmt werden. Zu diesem Zweck werden zunächst Kriterien und Vorschläge zur Standortwahl der Arealtypen 2 (Wohngebiete/Ein- und Abflugschneisen) und 3 (Regionaler Hintergrund) präsentiert. Besonders sinnvoll erscheint die vorgeschlagene Nutzung der bereits bestehenden Standorte (v.a. des HLNUG) und ggf. Ergänzung mit UFP-Messtechnik.

Die vorgeschlagenen zusätzlichen Standorte für jeweils 4-wöchige Messkampagnen in unterschiedlichen Jahreszeiten und für mindestens zweimonatige Messungen, um eine ausreichende Datengrundlage für die Immissionsmodellierungen zu gewährleisten, erscheinen angemessen und tragen den Vorgaben der Leistungsbeschreibung Rechnung.

Hinsichtlich der potenziellen Messstandorte (s. 19 oben) wird angeregt, dass ergänzende stationäre Messungen an verschiedenen Standorten gleichzeitig durchgeführt werden und nicht hintereinander. Ergänzende Stationen unterstützen die Repräsentativität (falls diese durch die bestehenden Stationen nicht gewährleistet wäre).

Für die Vergleichbarkeit und das Ableiten von Belastungsmustern und dem Dispersionsverhalten von UFP sind parallele Messungen zu bevorzugen - aufgrund der hohen räumlichen Variabilität (s.o.). Dazu könnten bspw. aus verschiedenen Gebieten Messgeräte zusammengezogen werden. Eine kurze Beschreibung der Messgeräte ggf. im Anhang wäre hilfreich (z. B. MPSS).

Innenraumkonzentrationen sollen im Rahmen der Belastungsstudie auf Grundlage der Außenluftkonzentrationen durch Verwendung von bereits in der Literatur existierenden Infiltrationsfaktoren abgeschätzt und berücksichtigt werden.

Messungen in Innenräumen werden mit Verweis auf den großen technischen und logistischen Aufwand nur zur exemplarischen Validierung optional im Rahmen der Wirkungsstudie vorgeschlagen. Diese Argumentation ist nachvollziehbar und schlüssig. Zusätzlich wird empfohlen die Innenraumexposition über bestehende Infiltrationsfaktoren zu ermitteln und ggfls. im Rahmen der Wirkungsstudie zu validieren (optional).

Anforderungen zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle werden hinsichtlich der Partikelmessungen sehr klar formuliert. Wünschenswert wäre eine ebenso klare Formulierung der Qualitätsstandards für die weiteren Messgrößen, die insbesondere für die Ausbreitungsmodellierung wichtig sind.

Als unabdingbare Messungen (Basismodul) werden die getrennte Bestimmung von Anzahlkonzentration und -größenverteilung flüchtiger und nicht-flüchtiger UFP, die Bestimmung der Massenkonzentration von Ruß und die chemische Charakterisierung von UFP hinsichtlich einzelner flughafenspezifischer

Markerverbindungen (Impaktorprobenahme und offline-Analyse) vorgeschlagen. Die beiden erstgenannten Messungen (6.3 und 6.4 im Konzept) sind gut begründet und unabdingbar.

Bei den Standardparametern für Messungen (Kapitel 6.2, Seite 20) wird angeregt, auch die atmosphärische Turbulenz zu messen und nicht nur die Windgeschwindigkeit und -richtung.

Die chemische Charakterisierung ist notwendig, um eine möglichst präzise Quellenzuordnung und damit den Flughafeneinfluss zu verifizieren. Zugleich kann sie bei der toxikologischen und auch epidemiologischen Bewertung im Rahmen der Wirkungsstudie helfen. Für die chemische Charakterisierung sind verschiedene Messtechniken (offline oder online) anwendbar. Eine Standardisierung/Normung besteht zurzeit für keines der Verfahren, jedoch wird die Sammlung und anschließende offline Markeranalyse als die etablierteste Methodik angesehen. Entsprechend wird empfohlen, die offline Methodik zu verwenden. Die Anwendung der aufwändigen online Methodik (Auswahl der Methode ist offen) wird lediglich während Intensivmesskampagnen an verschiedenen Standorten vorgeschlagen.

Optionale Messungen (Ergänzungsmodul) umfassen vertikale Messungen der UFP-Anzahlkonzentration (unter anderem zur Validierung der Immissionsmodellierung), mobile Messungen der UFP-Anzahlkonzentration zur Erfassung der lokalen Variabilität, die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> oder PM<sub>10</sub>, die hochzeitaufgelöste Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von PM<sub>1</sub> oder UFP, Messung von gasförmigen Partikelvorläufersubstanzen und Bestimmung der potentiellen Masenkonzentration und chemischen Zusammensetzung sekundärer Aerosolpartikel sowie die Bestimmung der Toxizität von luftgetragenen Partikeln (online) oder von gesammelten Partikelproben (offline).

Auf Seite 41 wird in der Zusammenfassung empfohlen, Emissionen von nicht-flüchtigen und flüchtigen Partikeln im Ausbreitungsmodell des Ergänzungsmodul zu berücksichtigen. Allerdings wird dies bereits im Basismodul (Seite 34) gefordert. Tatsächlich scheint es zweckmäßig, neue Erkenntnisse aus Emissionsmessungen oder weiteren Analyse nicht erst im Ergänzungsmodul, sondern bereits im Basismodul zu berücksichtigen.

### 1.3.5 Immissionsmodellierungen

Bei der Beschreibung von einfachen Modellen (Seite 32) und deren Anwendung an Flughäfen sollte hinsichtlich Zürich eine Klarstellung erfolgen (GRAL/LASPORT)<sup>2</sup>.

Der Aufwand für die Entwicklung eines Ausbreitungsmodells im Rahmen des Basismoduls wird auf Seite 34 des Konzepts als relativ gering eingeschätzt, dies sollte jedoch nicht unterschätzt werden. Die Aufteilung in flüchtige und nicht-flüchtige UFP und deren unterschiedliches Dispersionsverhalten in unterschiedlichen Größen wurde bisher noch nie richtig modelliert und dürfte daher eher einen größeren Aufwand bedingen.

Die Zusammenfassung der Anforderungen an die Erstellung der UFP-Immissionskarten erscheint zielführend.

---

<sup>2</sup> Der Einsatz von GRAL am Flughafen Zürich bspw. erfolgte durch Dritte ohne die notwendige Aviatikexpertise.

Die im Konzeptpapier gemachte Aussage zu Landnutzungs- (Land use regression) Modellen *„Ein Nachteil ist die begrenzte Vorhersagequalität der räumlichen Variabilität von UFP-Immissionen. Mit statistischen Modellen ist es nicht möglich den Flughafenbeitrag zu den UFP Immissionen zu ermitteln, es sei denn eine Referenzperiode ohne Flughafenbetrieb kann hinzugezogen werden.“* ist zu diskutieren.

Neben den von den Autoren selbst zitierten Arbeiten von Hoek (2017) und Gerling et al. (2021), ist auf die Arbeiten von Wolf et al. (2017) und Pilz et al. (2018) zu verweisen, die aufzeigen, wie gut Landnutzungsmodelle für die kleinräumige Bestimmung von UFP Belastungen durch den Kfz-Verkehr und deren Auswirkungen auf medizinische Parameter angewandt werden können.

Die Forderung, für den Einsatz von Landnutzungsmodellen neben Daten aus Zeiten mit normalem Flugverkehr auch Daten aus Zeiten ohne Flugverkehr zu verwenden, lässt sich durch die coronabedingte starke Einschränkung des Flugverkehrs seit 2020 zumindest näherungsweise erfüllen. In der COVID-19 Pandemie ging der Flugverkehr weltweit zurück, mit entsprechenden Auswirkungen auf die UFP Emission. Die UFP-Immissionsdaten dieses langen Zeitraums könnten genutzt werden, um den Beitrag des Flugverkehrs vom Beitrag des Kfz-Verkehrs zur UFP-Belastung abzuschätzen. Hierbei sollten nicht nur die Daten im Einzugsbereich des Frankfurter Flughafens, sondern auch die Daten von anderen Flughäfen genutzt werden, um die Abschätzung besser abzusichern.

### 1.3.6 Anforderungen an Iteration

Der dargestellte Prozess ist grundsätzlich richtig und sinnvoll. Er geht aber in keiner Weise auf konkrete Möglichkeiten für Wirkungsuntersuchungen ein – dies wurde von der WQS mehrfach angeregt<sup>3</sup>.

In der weiteren Beschreibung wird die Gruppe von Arbeitenden am Flughafen Frankfurt (sie werden zwar an wenigen Orten erwähnt, aber in der Iteration nicht mehr angesprochen) vermisst. Dies würde den Mitinbezug der Akteure am Flughafen Frankfurt bedingen, die bisher nicht in Erscheinung traten.

### 1.3.7 Datenmanagementkonzept

Die Ausführungen zum Datenmanagement sind in der vorliegenden Fassung sehr oberflächlich und in ihrer Aussagekraft hinsichtlich des konkreten Vorgehens und des Nutzens für das UFP Projekt deshalb begrenzt.

Abbildung 13 stellt entsprechend kein Datenmanagement Konzept da, sondern verweist lediglich auf übergeordnete Begrifflichkeiten und relevante datenbezogene Schritte innerhalb des Projektes.

Hier ist ein konkretes Konzept zur Speicherung und Herausgabe von Daten erforderlich. Im Minimum sollte der Umgang mit den Daten, die zum Aufstellen und Validieren der im ersten Teil des Konzeptes dargestellten Modelle im Detail geregelt werden. Die Übertragung der Daten in eine 2. Belastungs- sowie die Wirkungsstudie muss geklärt werden unter Darlegung/Einhaltung regulatorischer Randbedingungen.

---

<sup>3</sup> Das Konsortium hatte hierzu einige Vorschläge entwickelt: Schikowski/Schneider/Breitner, „Beispiele für mögliche Wirkungsstudien zur Erhebung von gesundheitlichen Auswirkungen ultrafeiner Partikel“, die auch von Mitgliedern der WQS kritisch gewürdigt wurden. Das FFR hat den AN jedoch gebeten, diese Vorschläge nicht in das vorliegende Konzept zu inkludieren.

Es sollten Lösungen gefunden und aktiv eingeplant werden, auch um entsprechende Ressourcen vorhalten zu können.

Es könnte im Datenmanagementkonzept auch ein Ansatz der Differenzierung nach Datentypen gewählt werden und damit z.B. personenbezogene Daten mit hoher Schutzwürdigkeit eine sehr kurze Aufbewahrungsdauer zugestanden werden, während andere Daten wie z.B. Immissionsmessdaten oder Meteodaten auch länger als 10 Jahre aufbewahrt werden sollten (Beispiele wie die APEX-Studien zeigen deren Nutzen auch noch längerer Zeit noch).

## 2 Gesamteindruck

---

Der Bericht ist detailliert und informativ. Die konsistente und transparente Darstellung erlaubt ein gutes Verständnis des Designs und sämtlicher angewandeter Methoden, Instrumente und Verfahren. Das Konsortium hat die in der Leistungsbeschreibung angesprochenen Untersuchungsleistungen adressiert. Die angewandten Methoden entsprechen *im Grundsätzlichen* dem Stand von Wissenschaft und Forschung. Die WQS sieht jedoch eine Lücke, insbesondere bei aviatischen Fragenstellungen (z.B. performance based modelling) – was zu Unsicherheiten über Machbarkeit und Zweckmäßigkeit diverser Ansätze führt (z.B. Nahbereichsmessung als Substitut für Emissionsfaktoren) – und bei der Berücksichtigung spezifischer Flughafenstudien. Hier scheinen neuere Informationen nicht eingeflossen zu sein. Ebenso werden die Ausführungen zum Datenmanagement und zu einer möglichen Wirkungsstudie (nur allgemeine Aussagen zum Prozess, keine Überlegungen zu studienrelevanten Dimensionen) als nicht hinreichend angesehen. Als Vorbereitung für die Wirkungsstudie wird aus Sicht der WQS ein Expositionsmodell benötigt, das dem Ergebnis aller drei der aufgeführten Studienstufen entspricht. Die angewandten Methoden zur Expositionsmodellierung in Hinblick auf die Belastung der Bevölkerung sowie deren Nutzung für Wirkungsstudien ist zu diskutieren.

Bei der Sichtung und Eirdnung der Ansätze ergeben sich im Einzelnen folgende Hinweise, Probleme und Fragestellungen.

- a. Der Beginn des Absatzes „Arealtyp 3“ Seite 18 ist etwas sinnentstellt. Betreffend Standorte ist auf Seite 17, 1. Zeile vermutlich Standort C gemeint
- b. Hinsichtlich flüchtiger UFP liegt zwischenzeitlich mindestens eine weitere Flughafenstudie vor (Flughafen Zürich AG, 2022). Bei den unter 2.2 aufgeführten Erkenntnissen ist zu konstatieren, dass die Studie am Flughafen Zürich eine Reihe von fehlerhaften Annahmen und Schlussfolgerungen umfasst.
- c. Auf Seite 10 wird der starke Abnahme-Konzentrationsgradienten von UFP aus der Studie Lorentz et al. (2019) mit Verweis auf fehlende Übereinstimmung bei anderen Flughäfen moniert. Fleuti et al. (2017) zeigten eben genau diese Beobachtung messtechnisch am Flughafen Zürich auf.
- d. Belastungsstudie wird aufgeteilt in 1. und 2. Belastungsstudie, als zusätzlich „sinnvolle Ergänzung“. Hierdurch wird der Eindruck erweckt, als könne der ausgeschriebene Leistungsumfang

- zum Studiendesign Belastungsstudie bereits mit der Konzeption der 1. Belastungsstudie erfüllt werden. Dies ist – mit Blick auf die Wirkungsstudie – jedoch nicht der Fall.
- e. Für den Prozess zur Entwicklung von **Wirkungsstudien** werden von der WQS konkrete Aussagen zu potenziell aussichtsreichen Studienansätzen vermisst. Beim iterativen Prozess gilt auch, dass die Immissionsmessungen und -modellierungen so gestaltet sein müssen, dass sie die für die Wirkungsstudien benötigten Expositionsquantifizierungen erlauben.
  - f. Zusammenfassend hätte man sich in Hinblick auf die Modellierung gewünscht, dass die so entscheidende Frage der Auswirkung der UFP-Exposition auf die menschliche Gesundheit nicht nur kurz (in Kap. 7.6) behandelt würde.
  - g. Unter 6.7. werden mobile Messungen mit z.B. Messfahrzeugen oder Messrucksäcken angeregt. Die Erfahrung z.B. am Flughafen Zürich zeigt jedoch stark räumlich und zeitlich **schwankende Immissionsmessungen** (über Faktor 5 innerhalb von einer Stunde oder innerhalb von 500 m Distanz) (Fleuti et al., 2017 und Seite 37 unten) - mobile bewegte Messungen sind aus wiss. Sicht problematisch, da sie kaum/nicht interpretierbar sind.
  - h. Handelt es sich bei der ersten Methode der Modellierung nicht vielmehr um eine Interpolation zwischen verschiedenen Messpunkten und nicht um eine Extrapolation?
  - i. Gibt es Erfahrungen, wie gut komplexe Modelle zwischen flüchtigen und nichtflüchtigen UFP unterscheiden können? Die CTM befinden sich diesbezüglich noch in den Kinderschuhen, so dass der Zeitaufwand ggf. deutlich unterschätzt wird. (Kapitel 7.1) Gibt es Referenzen, die die Qualität der Modellierung von flüchtigen und nichtflüchtigen bestätigen?
  - j. Die Tendenz im Modellierungskonzept ist relativ eindeutig hin zur **komplexen Modellierung** mit CTM. Die entscheidenden Punkte wie z. B. Kopplung des CTM mit einem mikro-skaligen Modell (z. B. PALM4U) werden allerdings nur angerissen. Sollte es auf eine solche Kombination hinauslaufen, ist von erheblichem Aufwand und hohen Kosten auszugehen, um eine solche Kopplung zu realisieren und zu validieren.
  - k. Insgesamt sollte in Kap. 7.1 bis 7.4 auch dargelegt werden, wie das Verhältnis von **Kosten zu Nutzen** für die Hauptfragestellung der Belastungsstudie – die Ermittlung der Belastung der Bürger\*innen gegenüber UFP in der Region – aussieht.
  - l. In Kap. 7.6 sollte auf Literatur in Hinblick auf den Einsatz von **LUR Modellen** hingewiesen werden. Ferner sollten konkrete Vorschläge zur Nutzung von LUR Modellen in Belastungsstudie und Wirkungsstudie gemacht werden.
  - m. In Kap. 8 sollte auf die gemeinsamen Überlegungen von WQS und Konsortium zu **Beispielen gesundheitlicher Wirkungen** hingewiesen werden.
  - n. Es ist mehrfach von Immissionsprognosen die Rede. Eine **Prognose** bezieht sich auf einen Zeitpunkt in der Zukunft. Es wird angeregt, von „Analyse der UFP Immissionssituation“ zu sprechen?
  - o. Es sollten Methoden der **Datenassimilation** in Betracht gezogen werden und durch die Kombination von Modell und Messung die Erstellung von Belastungskarten/Luftschadstoffanalysen ermöglicht werden. Diese Variante stellt in gewisser Weise auch eine Interpolation von Messungen

dar, nur dass das Konzentrationsfeld zwischen den Stützstellen mit physikalisch/chemischen Hintergrund aufgefüllt wird.

- p. Es fehlen nach wie vor konkrete Aussagen, welche **Zielauflösung** im Modellgebiet erreicht werden soll, bzw. welche Auflösung für eine verlässliche Expositionsberechnung notwendig wäre. Davon ausgehend sollte ein Modellierungskonzept erstellt werden, wie mit den unterschiedlichen Modellierungsansätzen diese Auflösung erreicht werden kann und welche Eingangsdaten dafür nötig sind (Emissionen, Meteorologie, Landnutzung, ...).
- q. Die Berücksichtigung der UFP **Innenraumkonzentration über Infiltrationsfaktoren** ist wenig belegt wenn auch wissenschaftlich hoch spannend. Aus regulatorischer Sicht tritt die Bedeutung privater Innenraumkonzentrationen von Schadstoffen und somit auch UFP zunächst in den Hintergrund. Der Nutzen ist mit dem Auftraggeber zu diskutieren.
- r. Bei den Messkampagnen erscheint es fraglich, ob der **Messzeitraum** ausreicht, insbesondere wenn eine grobe Unterscheidung auf Basis von Jahreszeiten vorgenommen wird. Es wäre zu überlegen ob definierte Wetter- bzw. Witterungslagen die typisch sind für die verschiedenen Jahreszeiten unterschieden werden könnten und sollten.
- s. Eine Spezifikation auf einen Messanhänger sollte formal vermieden werden und lediglich als mobile Messeinheit bezeichnet werden.
- t. Eine Definition des **Arealtyps 3** regionaler Hintergrund wäre im Vorfeld zu leisten
- u. Eine 1-minütige Zeitauflösung bei den Rußmessungen erscheint nicht zwingend erforderlich, wenn auch mit den genannten Geräten gut machbar.
- v. Die Nutzung des SP2 für Ruß (Messung erst ab ca. 50 nm) erscheint für das Basismodul diskutabel
- w. Bei der Quellzuordnung von PM ist die **Analyse von PM<sub>1</sub>** aus regulatorischer Sicht zu überdenken (kein existierender Grenzwert)
- x. Welche leichten UFP Sensoren sind im Abschnitt Extrapolation von Messwerten gemeint?
- y. HBEFA 4.2 ist mittlerweile verfügbar (Kap. 5.1 Seite 14)
- z. Soll bei den Emissionen im **Umland** bzw. dem großräumigen Eintrag von UFP in das Modellgebiet auf vorhandene E-Kataster zurückgegriffen werden?

## 3 Bewertung und Empfehlungen

---

### 3.1 Bewertung der Darstellung und der vorgeschlagenen Methoden

---

#### 3.1.1 Darstellung, Abbildungen, Grafiken

Es wird von der WQS als hilfreich erachtet, in Kapitel 1 anhand einer Skizze (oder Gant-Chart) die Zusammenhänge zwischen (1.) Belastungsstudie, Basis- und Optionale Aufgaben (evtl. 2.) Belastungsstudie und Wirkungsstudie aufzuzeigen.

Unter Absatz 2.4 zu den Gesundheitseffekten von UFP wird die Abhängigkeit von Partikelanzahl, -größe und -Oberflächeneigenschaften gelistet. Hier fehlen Aussagen zu Expositionszeiten und Inhalationsfähigkeiten.

Unter Kapitel 4 werden in Abbildung 6 diverse Zusammenhänge dargestellt. Die Abbildung wurde allerdings verändert und stellt unseres Erachtens falsche Zusammenhänge dar (Bsp.: eine Korrelation von „gesamte modellierte Konzentration“ zu „Nahfeld UFP Konzentration“ existiert so nicht; ebenfalls ist die Ableitung von Flughafenemissionen aus Nahfeld UFP-Konzentrationsmessungen nicht wissenschaftlich gesichert).

In Abbildung 6 (S.11) ist nicht erkennbar, wie groß die Rolle von Messwerten (Eingangswerte) hinsichtlich der Bestimmung der Auswirkungen ist. Nach den Pfeilen in der Grafik könnte durchaus aller Input aus Modellen stammen. Hier sollten die konkreten Messungen genauer bezeichnet werden (und auch eigene Pfeile erhalten). Es wäre auch hilfreich, wenn die Pfeile nummeriert oder in einer Legende anderweitig bezgl. ihrer jeweiligen Funktion voneinander abgegrenzt würden. Diese Unterscheidung ist wichtig, da die Messungen zur Validierung der Modelle verwendet werden sollen – was methodisch schwierig wäre, wenn sie gleichzeitig deren Basis wären (Gefahr des Zirkelschlusses, Self-fulfilling prophecy).

Tabelle 1 listet ein Modul „Basis Emissionen“ und beschreibt dann drei Messstationen Nahfeld Flughafen und eine als Referenz im Hintergrund. Dies kann nicht als Emissionsmessung angesehen werden.

Tabelle 1, Kästchen links oben: „evtl. SO<sub>2</sub>“ – Hier ist zu diskutieren, wovon die Notwendigkeit der Bestimmungen denn abhängt. Zu Messstation: Hier wäre eine Lokalisation der geplanten Messstationen hilfreich. Analog gilt dies auch für die Positionierung der Messstationen in Wohngebieten, Ein- und Abflugschneisen und den „urbanen Hintergrund“. Wie werden Wohngebiete, urbaner Hintergrund und regionaler Hintergrund definiert? Teilweise sind Positionen von Messstationen auf Abbildungen verzeichnet – diese sollten in der Tabelle referenziert werden.

Zu Abbildung 8: Für die Wirkungsstudie erscheint die 40 × 40 km Domäne ausreichend – da die flughafenbezogene Belastungssituation außerhalb dieser Region, falls überhaupt relevant, sich auf einzelne, verhältnismäßig kleine geografische Bereiche beschränken wird. Es sollte jedoch eine konsistente Definition der Untersuchungsregion verwendet werden – diese waren im ersten Teil des Konzeptes 25 km im Radius, hier sind es jetzt 20 km. Falls, wie die Autoren auf Seite 36 ausführen, der maximale Ausbreitungsradius von UFP aus Flughafenquellen 20 km beträgt, würde ein Radius von 20 km um den Flughafen die Studienregion angemessen repräsentieren.

Da für die Wirkungsstudie ausschließlich Bereiche mit einer zumindest möglichen relevanten Exposition durch flughafenbezogene UFPs relevant sind, sind die Ausführungen der Autoren zur Bevölkerungsdichte für die Festlegung des Radius unerheblich.

### 3.1.2 Messungen

Kritisch erscheinen die Methoden der Nahbereichsmessung auf dem Flughafenvorfeld als Substitut für Emissionsfaktoren und der Ansatz von mobilen, kurzzeitigen Immissionsmessungen mit Messfahrzeugen und -rucksäcken.

Bei den Immissionsmessungen erbringen gleichzeitige, örtlich verteilte Messkampagnen bessere Ergebnisse als sequenzielle Messungen.

In Hinblick auf das Ziel, Daten für eine Wirkungsstudie bereitzustellen, wäre es vor allem überlegenswert, den Aspekt der Toxizität von Partikelproben auch bereits in das Messprogramm des Basismoduls aufzunehmen.

Insbesondere beim online-Ansatz zur Erfassung der Toxizität luftgetragener Partikel sollten aber die Erfolgsaussichten durch Hinzuziehen externer Expertise vorab geprüft werden, denn das Verfahren ist aufwendig und teuer. Die Messung der chemischen Zusammensetzung von UFP (6.5) ist zwar wünschenswert, kann aber mit einem erhöhten Risiko hinsichtlich der Machbarkeit verbunden sein.

Alle Ergänzungsmessungen bzw. Ansätze erhöhen die Detailkenntnis und Aussagekraft der Studie und dienen vor allem der messtechnischen Validierung von Modelldaten bzw. in Folge als detailliertere Modelleingangsdaten. Gleichzeitig bedeuten sie jedoch einem erheblichen messtechnischen Mehraufwand. Sollten sich realistische Erfolgsaussichten ergeben, wäre es sinnvoll, parallel zu den vorgeschlagenen Messkampagnen in unmittelbarer Nähe zu den Messpunkten gleichzeitig epidemiologische Untersuchungen auf Kurzeffekte durchzuführen. Hierzu könnten die Probanden bei den Messpunkten exponiert und die körperlichen Reaktionen anschließend untersucht werden, wie dies z.B. in der mehrfach zitierten laufenden Studie von Karrasch und Nowak in München geschieht.

Hinsichtlich der Innenraumexposition (6.1) ist eine Validierung in Bezug auf die Wirkungsstudien unverzichtbar, da der mit Abstand größte Teil der Exposition der allgemeinen Bevölkerung in Innenräumen, v.a. der Wohnung und, bei Berufstätigen, am Arbeitsplatz zu erwarten ist. Da für typische Wohnungen offenbar wesentliche Modell-Parameter bereits ermittelt wurden, kann der Schwerpunkt in der Belastungsstudie auf regionaltypische Büro- und Funktionsgebäude gelegt werden (S. 19).

Ebenfalls unter dem Aspekt der Wirkungsstudie sollte auf die chemische Charakterisierung der UFP an wichtigen Standorten nicht verzichtet werden, wenn nicht aus anderen Quellen die Herkunft aus dem Flughafenbetrieb zweifelsfrei nachgewiesen werden kann. Die chemische Analyse sollte dann an den analogen geographischen Positionen und zeitlich parallel zu den Hauptmesskampagnen der Partikelanzahldichte durchgeführt werden, um die Ergebnisse den Quellen (Flughafen, Andere) möglichst zuverlässig zuordnen zu können. (Seite 23)<sup>4</sup>.

Zur Erfassung der Toxizität stehen sehr etablierte Lungenzellmodelle aber auch neuere Methoden wie das ALI – AIR/Liquid Interface System zur Verfügung (offline). Das ALI System kann darüber hinaus als online System im Rahmen der automatisierten Expositionsstationen eingesetzt werden (online). Sowohl die offline wie auch die online Ansätze bieten entsprechende Vor- und Nachteile wobei die offline Methoden und hier die Lungenzellmodelle die etablierteste Methodik darstellt. Letztere sicherlich auch, da ggfls. sensitive Primärzellen verwendet werden können. Prinzipiell lässt sich durch die Verknüpfung der Partikelcharakterisierung und der dazugehörigen Toxikologie das Verständnis um Wirkungsmechanismus, hier quellspezifisch für Flughafenimmissionen, verbessern.

---

<sup>4</sup> Im Hinblick auf die Wirkungsstudie ist zu prüfen, ob auch Mainz einbezogen werden sollte aufgrund dortiger (gesundheitlicher) Daten.

### 3.1.3 Modellierung

Den Autoren ist zuzustimmen, dass die Ausbreitungsmodellierung eine gute Grundlage für die UFP Wirkungsstudie darstellt. Ebenfalls richtig ist, dass neben den UFP weitere wichtige Luftschadstoffe berücksichtigt werden sollten (S. 12). Hier fehlt noch die Betrachtung des Fluglärms, der neben dem Schienenlärm und dem Verkehrslärm als möglicher Interaktionsfaktor und/oder Confounder der Feinstaubwirkung einbezogen werden sollte.

Im Hinblick auf die Expositionsmodellierung würde man auch eine detaillierte Diskussion dazu erwarten, welche Expositionsdaten für Fragestellungen zu Wirkungsuntersuchungen benötigt werden, also welche räumlich zeitliche Auflösung und welche zusätzlichen Parameter erforderlich sind. Dies setzt eine genauere Literaturlauswertung zur Identifizierung der Informationen voraus, die nach dem Stand des Wissens essenziell sind.

Bei der Untersuchung von Kurzzeiteffekten wird die zeitliche Veränderung der UFP-Konzentration auf Stundenebene mit entsprechenden zeitlichen Veränderungen der Gesundheitsparameter verglichen. Hierzu werden üblicherweise die Messdaten von kontinuierlichen Messstationen verwendet, Expositionsmodellierungen spielen dabei in der Literatur keine Rolle und es wäre zu begründen, weshalb man diese zusätzlich benötigt.

Für die Charakterisierung der Langzeitexposition gegenüber UFP reichen Jahresmittelwerte zu Anzahlkonzentrationen (z.T. in Größenklassen unterteilt) in der Regel aus. Bei der Modellierung erwiesen sich (z.B. bei Wolf et al. 2017) Daten zur Verkehrsdichte (auf dem 50m Raster), zu stationären Quellen (Hausbrand) sowie Angaben zum Anteil frischer und gealterter Aerosole als ausreichend für respektable Modellierungsergebnisse.

Die ferner von den Autoren des Konzepts angesprochene Berücksichtigung von verschiedenen Mikroumgebungen (Wohnungen, Arbeitsplatz, Outdoor-Aktivitäten) erweist sich in der Praxis mangels Datenverfügbarkeit nicht als machbar und spielt daher in der Wirkungsliteratur (außer in sehr aufwendigen Studien mit keiner Teilnehmerzahl) keine Rolle. Gleiches gilt für die Berücksichtigung verschiedener Innenraum-Umgebungen.

Auch potenzielle Erzeuger von UFPs, die zwar außerhalb des betrachteten Gebietes (Distanz 25 km vom Flughafen) liegen, dieses Gebiet jedoch von außen beeinflussen könnten (Bsp. Kohlekraftwerk Staudinger in Großkrotzenburg, 33 km Luftlinie entfernt) müssen bei der Ausbreitungsmodellierung berücksichtigt werden (S. 14 oben).

Bei der Entwicklung des Ausbreitungsmodells in der Belastungsstudie sollte darauf geachtet werden, dass die notwendigen Eingangsdaten zuverlässig und vollständig verfügbar sind (z.B. Flugplan, Flugzeugtypen, Kraftstoffarten, Betriebstypen wie Fracht und Personenflugverkehr, Wetterbedingungen, Verkehrsaufkommen etc.; S. 16)

Der Aussage der Autoren zur kompletten komplexen Modellierung flüchtiger und nicht flüchtiger Partikel ist zuzustimmen: Zur genauen Ermittlung der Bevölkerungsexposition ist eine numerische Modellierung der UFP Emissionen mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung erforderlich. Im Gegensatz zur

Annahme der Autoren sind bevölkerungsbezogene Informationen in hoher räumlicher Genauigkeit (Einzelwohndressen) in der Umgebung des Frankfurter Flughafens vorhanden. Diese räumliche Genauigkeit ist auch Zielgröße der Auflösung für das komplexe Immissionsmodell.

Die auf Seite 39 ausgeführten Überprüfungen des Ausbreitungsmodells, insbesondere der Vergleich der Modell Ergebnisse mit den verfügbaren Messdaten ist obligatorisch („muss“). Das gleiche gilt für die Fehleranalyse des Einflusses der Unsicherheit von einzelnen Modellprozessen beziehungsweise Parametern. Im Text ist hier noch ein „soll“ enthalten.

Wenn die sekundäre Partikelneubildung, wie es zu erwarten ist, einen relevanten Beitrag zur Exposition der Bevölkerung leistet, ist eine Modellentwicklung, die diese Expositionsquelle mit hoher geographischer Auflösung abbilden kann, keine „Ergänzung“, sondern notwendiger Bestandteil. Insgesamt ist für die Wirkungsstudie ein Modell erforderlich, dass die Anforderungen an das weiter entwickelte Ausbreitungsmodell (Seite 41 und S. 42 oben) vollumfänglich erfüllt.

Den Ausführungen der Autoren unter dem Punkt „Anforderungen an die Expositionsmodellierung“ (Seite 43 und S. 44 oben) ist zuzustimmen. Allerdings reicht eine räumliche Auflösung von 100 m nicht aus. Hier sind adressgenaue Interpolationen erforderlich – dazu Informationen über die Eigenschaften der Wohnung, die beispielsweise die Infiltration der Außenluft determinieren. Bei Kohorten- oder Fall-Kontrollstudien mit individuellen Informationen über die Teilnehmer gilt dies zusätzlich auch für den Arbeitsplatz.

#### 3.1.4 Iteration - Konzeption der Wirkungsstudie

Zur Konzeption der Wirkungsstudie beschränken sich die Autoren auf prozessuale Elemente. Zuzustimmen ist der frühzeitigen Einbeziehung der zu untersuchenden Personen Gruppen, sowie der lokalen und regionalen Informationsträger und Interessensvertreter einem transparenten und partizipativen Ansatz. Es finden sich keinerlei Ausführungen zu Zielerkrankungen für die Wirkungsstudie, möglichen Studientypen, Datenquellen o.ä. Auch wird nirgends Bezug genommen auf die grundsätzlichen Ausführungen zu epidemiologischen Designs.

#### 3.1.5 Datenmanagement

Das Datenmanagement sollte insgesamt einen deutlich höheren Stellenwert in allen angedachten Studien einnehmen. Die bisher zu generellen Ausführungen in diesem Bereich sind teilweise auch darauf zurückzuführen, dass die Anforderungen nicht ausreichend spezifiziert worden sind.

Insofern ist es hier wichtig, ein übergreifendes Konzept auf Basis eines besser definierten Lastenhefts zu entwickeln, dass eine niederschwellige Nachvollziehbarkeit aller Arbeiten über alle drei Studienphasen hinweg ermöglicht. Dieses sollte zur Dokumentation der einzelnen Schritte der Modellentwicklung bereits in der ersten Studienphase umgesetzt und eingeführt werden.

So ist es bspw. nicht sinnvoll, dass die relevanten Rohdaten bei den jeweils beteiligten Institutionen verbleiben. Stattdessen ist sowohl das Modell selbst als auch alle dafür verwendeten Rohdaten in einem klaren Governance- und Daten-Management-Konzept zu erfassen. Pauschale Aussagen wie „alle Beteiligten“, „jeder“, „öffentlich“ etc. sind wenig hilfreich. Stattdessen muss der Zugang zu den Projektergebnissen

nach Datenherkunft, -art und Nutzung differenziert und spezifiziert werden. Hier bestehen erhebliche Unterschiede zwischen öffentlich zugänglichen Modell-Eingangsdaten, im Projekt ermittelten Messwerten, für das Projekt erstellten Arbeitsanweisungen, SOPs und Qualitätssicherungsverfahren, sowie den personenbezogenen Angaben im Rahmen der Wirkungsstudie. Für die Wirkungsstudie kommen zusätzlich Datenschutz- und Ethik-Aspekte hinzu. Hier muss das übergreifende Datenmanagement den Umgang mit identifizierenden oder identifizierbaren Angaben gemäß EU-DSGVO regeln (TMF-Datenschutz-Richtlinien, Einbindung einer Treuhandstelle etc.).

Insbesondere bietet es sich an, hier auf die Erfahrung der öffentlich geförderten Technologie- und Methodenplattform für die Vernetzte Medizinische Forschung (TMF e.V.) zurückzugreifen und mit den dortigen Arbeitsgruppen für Datenschutz, Interoperabilität und Datenqualität eine Anbindung herzustellen. Auch das Netzwerk Universitätsmedizin (NUM) baut aktuell Infrastrukturen auf, die im Rahmen von Kooperationen genutzt werden können. Im Sinne der Transparenz und auch weiteren wissenschaftlichen Nutzung sollte eine langfristige Verfügbarkeit der Studiendaten sichergestellt werden, dazu gehört auch die Definition von geeigneten Metadaten. Die Frage nach der Speicherung großer Datenmengen stellt sich in vielen Fachdisziplinen. Die Herausforderungen im Datenschutz sollten aktiv adressiert werden, um entsprechend Kapazität in der Studie vorzuhalten.

Diese wichtigen Aspekte zum Datenmanagement fehlen in den bisherigen Ausführungen.

### 3.2 Hinweise und Empfehlungen der WQS an das FFR mit Blick auf nächste Schritte und eine Wirkungsstudie

---

Es wird empfohlen, im weiteren Verlauf der Bearbeitung vermehrt aviatisches Expertenwissen einzufordern.

Bei den ergänzenden Untersuchungen wird angeregt, auch den am Flughafen Frankfurt mehrheitlich verwendeten Flugtreibstoff auf seinen Schwefelgehalt zu untersuchen, da dieser eine große Rolle bei der Aerosolbildung spielt.

Der Vorschlag des Konsortiums, eine zweite Belastungsstudie zu planen, erscheint u.a. vor dem Hintergrund der notwendigen Validierung – und möglicherweise Korrektur – der initialen Modellparameter unverzichtbar.

Ein klares Konzept für Datenmanagement sollte ein zentraler Aspekt der weiteren Arbeiten sein, um einerseits eine langfristige wissenschaftliche Nutzbarkeit der Daten sicherzustellen, andererseits auch um die Verknüpfung der einzelnen Studienphasen sicherzustellen. Daher sollten von der Seite des Auftraggebers die Anforderungen genauer spezifiziert werden. Dazu gehören u.a.:

- Die Definition geeigneter Datenformate, d.h. Rohdaten, Metadaten und Auswertemethodik.
- Die Klassifizierung der Daten hinsichtlich des Datenschutzes. Es ist zu erwarten, dass die Nutzung der Daten unterschiedlichen Einschränkungen unterliegt.

- Ein Konzept zur langfristigen Speicherung der Daten. Dazu gehörte sowohl die Bereitstellung geeigneter öffentlich-zugänglicher Speicherkapazitäten als auch die Definition von geeigneten Identifikationsmechanismen wie z.B. ein digital object identifier (DOI). Hier sollten eindeutige Vorgaben von Seiten des Auftraggebers erfolgen.

Grundsätzlich bietet sich an, auf die Erfahrungen, Werkzeugen und Methoden der öffentlich-geförderten Projekte bzw. der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur (NFDI)-Konsortien zurückzugreifen.

Um die Wirkungsstudie sinnvoll durchführen zu können, ist eine valide Emissions- und Expositionsmodellierung erforderlich. Daher sind beide von den Autoren angeführte Module (1. und 2. Belastungsstudie sowie die "sinnvolle Ergänzung" (7.6) zwingend erforderlich (Seite 31).

Für die Vorbereitung der Wirkungsstudie ist ein stufenweises Vorgehen im Grunde nicht zielführend – stattdessen sind die Ziele aller drei Stufen der Belastungsstudie zu erreichen.

Ein Teil der Modellierung und ebenso der Validierung des komplexen Ausbreitungs- Emissions-, Immissions- bzw. Expositionsmodells kann allerdings zeitlich überlappend mit der ersten Phase der Wirkungsstudie erfolgen.

Zu den Anforderungen an das Basismodell ist aus epidemiologischer Sicht anzumerken: Räumlich ausgedehnte epidemiologische Untersuchungen sind nur zur Analyse von Auswirkungen der Langzeitexposition am Wohnort sinnvoll. Hierzu ist die zeitliche Auflösung von untergeordneter Bedeutung, und insbesondere werden keine Partikelkonzentrationen mit stündlicher Auflösung benötigt. Für Kurzzeiteffektstudien wird man hingegen nicht auf Modellrechnungen, sondern auf direkte Messungen von UFP mit z.B. stündlicher Auflösung zurückgreifen.

Die Modellierung der Langzeitexposition erfordert allerdings (wegen der kurzen Reichweite von UFP Emissionen) an den Orten wo viele Menschen leben, eine hohe räumliche Auflösung. Daher sollte insbesondere in Arealen mit UFP-Belastung aus dem Straßenverkehr eine horizontale Auflösung von 50 m angestrebt werden (ebenso im Bereich des Flughafens). In dünn besiedelten Arealen mit geringer Freisetzung von UFP aus dem Kfz-Verkehr hingegen reicht die vorgeschlagene Auflösung von 1000 m.

Im Hinblick auf die Expositionsmodellierung würde man eine detaillierte Diskussion dazu erwarten, welche Expositionsdaten für Fragestellungen zu Wirkungsuntersuchungen benötigt werden, also welche räumlich zeitliche Auflösung und welche zusätzlichen Parameter erforderlich sind. Dies setzt eine genauere Literaturlauswertung zur Identifizierung der Informationen voraus, die nach dem Stand des Wissens essenziell sind.

Die Durchführung toxikologischer Untersuchungen (Seite 27) wird für die Wirkungsstudie als weniger sinnvoll erachtet – weil Ergebnisse aus Lungenzellmodellen nur bedingt auf Gesundheitswirkungen beim Menschen übertragbar sind und v.a. Kurzzeiteffekte adressieren. Die Wirkungsstudie wird dagegen vorwiegend mittelfristige und Langzeiteffekte untersuchen. Effektiver als in die Belastungsstudie toxikologische Grundlagenforschung einzubeziehen wäre es, an repräsentativen Orten und in den relevanten Größenkategorien der Partikel deren chemische Zusammensetzung möglichst genau zu bestimmen. Zu deren Auswirkungen auf zelluläre Systeme sollten - soweit vorhanden - Literaturdaten herangezogen werden.

Die Verwendung ausschließlich des Basismodells für die Ausbreitungsrechnung ist für die Wirkungsstudie nicht ausreichend. Weder eine horizontale Auflösung im Bereich des Flughafens von 100 m, noch eine horizontale Auflösung im übrigen Untersuchungsgebiet von mindestens 1000 m ist auch nur annäherungsweise ausreichend für die Wirkungsstudie (Seite 34), demgegenüber ist eine hohe zeitliche Auflösung („stündlich“) für die Wirkungsstudie nicht erforderlich. Stattdessen reichen valide Tagesdurchschnittswerte aus, für Langzeiteffekte auch längere Zeiträume (Wochen oder Monate). Aus den Ausführungen der Autoren ist deshalb dringend ein komplexes Modell anzustreben, das u.a. die Geländerauigkeit durch Bebauung und Bewuchs in der Umgebung des Flughafens berücksichtigt. Hierbei ist zu beachten, dass als Studienregion ein Areal mit Radius 25 km um den Flughafen betrachtet werden soll. Daher ist es für die Wirkungsstudie erforderlich, in den größeren Abständen noch zwischen höher und niedriger gegenüber UFP aus Flughafenaktivitäten exponierten Personen in der Bevölkerung unterscheiden zu können.

*Hinweise auf mögliche Wirkungen:*

*Je nach Beschaffenheit der Oberfläche können unterschiedliche Effekte hervorgerufen werden. Durch redoxaktive Metalle oder organische Verbindungen (z.B. Chinone) können hoch reaktive Sauerstoff-Spezies katalytisch gebildet werden – diese führen zu oxidativem Stress, Entzündungsreaktionen und Atemwegssymptomen. UFP können die Zellmembran passieren und im Zellinneren Organellen (z.B. Mitochondrien) und die DNA schädigen. Im Bronchialbaum verhalten sich UFPs eher wie Aerosole (diffusionsgetriebenes Strömungsverhalten) und weniger wie größere Partikel (keine Sedimentation oder Trägheitsimpaktion). UFP durchdringen die Alveolarmembran des Lungenepithels und gelangen in den Blutkreislauf. Sie werden nicht nur inhaliert, sondern auch durch den Nervus olfactorius inkorporiert (Tierversuche an Mäusen), in tiefere Hirnareale transportiert (dort auch Bildung von reaktiven Sauerstoff Spezies) und können neurologische Entwicklungs- und Funktionsstörungen inklusive psychischen und Verhaltensstörungen auslösen. In menschlicher Kohorte: 12 % erhöhtes Risiko für bösartige Hirntumoren. Bei Menschen treten Nanopartikel innerhalb von Minuten bis Stunden im Blut und Urin auf und sind dort Monate nach Exposition noch nachweisbar.*

*Durch Flughafen UFP experimentell gezeigt: reduzierte forcierte Vitalkapazität der Lunge, verzögerte Repolarisation im EKG (verlängertes QTc Intervall)*

## 4 Abschließende Empfehlung der WQS

Zusammenfassend bewertet die WQS die Qualität der geleisteten Designarbeit und den finalen Bericht als prinzipiell zielführend, um die Fragestellung einer UFP-Bevölkerungsbelastung durch den Flughafen Frankfurt zu adressieren. Form und Darstellung sind übersichtlich, einige Grafiken sollten jedoch überarbeitet werden, um die dargestellten Sachverhalte klarer und stringenter zu zeigen.

Die formalen Anforderungen nach Leistungsbeschreibung wurden weitestgehend erfüllt. Die WQS möchte jedoch darauf hinweisen, dass sie eine Erfüllung der Leistungsbeschreibung und einen Erfolg der Studien in Anlehnung an das vorgestellte Design nur sieht, wenn die vorgeschlagenen Nachbesserungen und Änderungen adressiert werden.

Die WQS ist weiterhin der Meinung, dass eine zeitliche Trennung auch der ersten Belastungsstudie von der Wirkungsstudie nicht sinnvoll ist. In Anbetracht der gefallenen Entscheidung getrennter Studien jedoch befürwortet die WQS die nun leicht geänderte Struktur einer ersten Belastungsstudie gefolgt von einer zweiten, parallel zur Wirkungsstudie laufenden weiterführenden und ergänzenden Belastungsstudie. Das dargelegte modulare Konzept greift diesen Gedanken bereits auf, sollte aber in der Leistungsbeschreibung noch klarer und strukturierter aufgezeigt werden.

Spezifisch sollten die Arbeitspakete der Belastungsstudie 1 in ein Gesamtkonzept eingeordnet werden, aus dem ersichtlich wird, welche Schritte auf dem Weg zu dem wirkungsrelevanten Modell insgesamt erforderlich sind, und welche davon in der Belastungsstudie 1 bereits abgearbeitet werden. Die WQS empfiehlt, die Spezifikation dieses Konzeptes zusätzlich als Arbeitspaket in die Belastungsstudie 1 mit aufzunehmen – dadurch könnte sichergestellt werden, dass die späteren Auftragnehmer der Belastungsstudie 1 stringent i.S. aller Teile des Gesamtprojektes arbeiten und keine Arbeitspakete ins Leere laufen<sup>5</sup>.

Im Einzelnen wird für die vorgeschlagenen Modellierungen (Emission und Immission) darauf hingewiesen, sich möglichst auf die aktuellsten Methoden und Modelle zu fokussieren und ggfls. nachzubessern. Dies beinhaltet auch eine Klärung der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Modelle, insbesondere in Anlehnung an eine nachfolgende Wirkungsstudie, sowie die Verwendung aktueller aviatischer Datenbanken und Literatur.

Die messtechnische Erfassung/Ausarbeitung (Emission und Immission) wird durch den modularen Aufbau (Basis und Zusatzmessungen) und die aufgeführten Techniken als zielführend betrachtet.

Insbesondere die hohe Qualitätssicherung im Basismodul ist zu befürworten, um belastbare UFP-Messdaten zu erhalten, die letztlich auch der Validierung von Modellen sehr zugute kommen. Die WQS sieht hier lediglich, wie oben aufgelistet, leichten Nachbesserungs- und Präziserungsbedarf (u.a. QS weiterer Messparameter, Messdauer, Verwendung mobiler, kurzzeitiger Messung ist zu hinterfragen). Darüber hinaus möchte die WQS, wie durch das Konsortium auch geschehen, nochmals wertungsfrei auf den hohen wissenschaftlichen und explorativen Charakter der messtechnischen Zusatzmodule hinweisen. Je nach Frage- und Zielstellung des Auftraggebers ist zu überlegen, anstatt von Zusatzmessungen eine Ausweitung (räumlich und zeitliche Auflösung) der Basismessungen anzustreben. Es wird empfohlen, dies einmal vor dem Hintergrund von Kosten- Nutzenüberlegungen darzustellen und durchzuführen. Zur fundierten Kosten-/Nutzen-Abwägung der vorgeschlagenen Immissionsmessungen wären insbesondere für einige optionale Vorschläge (z.B. mobile Messungen) ausführlichere Angaben zu Aufwand/Machbarkeit

---

<sup>5</sup> Begründung: mit dem Umfang der aktuell konzipierten Modellierung in Belastungsstudie 1 kann die Wirkungsstudie nicht durchgeführt werden - dazu braucht es die beiden vom Konsortium angesprochenen weiteren Stufen.

und dem zu erwartenden Output notwendig, wie sie beispielsweise für die chemische UFP-Charakterisierung im Konzept zu finden sind. So sind beispielsweise die Interpretation mobiler Messungen oder der Vergleich sequenzieller Messungen an verschiedenen Standorten aufgrund der großen UFP-Dynamik sehr schwierig.

Im Falle von ergänzenden Untersuchungen wird jedoch angeregt, auch den am Flughafen Frankfurt mehrheitlich verwendeten Flugtreibstoff auf seinen Schwefelgehalt zu untersuchen, da dieser eine große Rolle bei der Aerosolbildung spielt.

Für die Wirkungsstudie ist die räumliche Auflösung wichtiger als die zeitliche. Das Modell, das für die Wirkungsstudie benötigt wird, muss die gesundheitlich relevanten, direkt oder indirekt (z.B. sekundäre Bildung, chemisch durch Alterung geänderte etc.) aus flughafenbezogenen Quellen stammenden UFP quantitativ adressgenau für alle Wohnhäuser und Arbeitsstätten im Untersuchungsgebiet zuordnen. Die Definition der Größe und genaue geographische Festlegung des Untersuchungsgebietes sollte ebenso Arbeitspaket der Belastungsstudie 1 sein. Bei der Festlegung sollte berücksichtigt werden, dass die Untersuchungs-Region nur Flächen umfasst, in denen (1) eine Exposition durch UFP aus Flughafenquellen stattfinden kann, die (2) quantitativ für die Wirkungsstudie relevant ist. Im Rahmen der Belastungsstudie 1 sollten externe UFP-Quellen identifiziert werden, deren Emissionen Teile des Untersuchungsgebietes erreichen können. Für diese sollte jeweils kurz dargelegt werden, wie deren Einfluss auf die Belastung der Bevölkerung von der durch die flughafenbezogenen UFP unterschieden werden kann.

Grundsätzlich sollte der Fluglärm als weitere gesundheitsrelevante flughafenbezogene Emission berücksichtigt werden, da diese in der Wirkungsstudie Confounder sein könnten oder Partner von Interaktionen. Hierzu sind auch möglichst genau räumlich aufgelöste Daten zur Lärmimmission aus weiteren Verkehrsmitteln berücksichtigt werden (Bahn, Straße).

Die weitere Belastungsstudie (Belastungsstudie 2, weitere Verbesserung des Ausbreitungsmodells) kann teilweise zeitlich parallel mit dem Beginn der Wirkungsstudie durchgeführt werden.

Für die zweite Belastungsstudie empfiehlt die WQS in jedem Falle eine Weiterführung der Messung aus der 1. Belastungsstudie (Basis) plus Zusatzmessung, die vor allem der Validierung und Verfeinerung der Methoden und Modelle dient.

Die vorgeschlagenen toxikologischen Untersuchungen sieht die WQS nicht als Basisuntersuchung in der ersten Belastungsstudie an, sondern empfiehlt diese im Zuge von Sondermessungen während der zweiten Belastungsstudie, um beispielsweise identifizierte UFP hot spots des spezifischen Flugverkehrs näher zu charakterisieren. Toxikologie i.S. von Experimenten, Zellkultur-Exposition etc. sind im Rahmen der Belastungsstudie verzichtbar. Eine toxikologische Bewertung der UFP, also die Berücksichtigung deren chemischer Zusammensetzung, ist dagegen unverzichtbar – das gilt auch im Hinblick auf die spätere Wirkungsstudie.

Während hinsichtlich der Zielsetzungen ein quantitatives Verständnis der UFP-Immissionen in der Rhein-Main-Region mit dem Studiendesign sehr gut erlangt werden kann, wird dem Ziel der Bereitstellung von Mess- und Modelldaten für eine Wirkungsstudie und auch im Datenmanagementkonzept nicht ausreichend Rechnung getragen. Hier empfiehlt die WQS eine detailliertere Ausarbeitung in Anlehnung an gängige Konzepte aus der Forschungslandschaft. Hierzu zählt auch eine Benennung von vorgesehenen

Speicherkapazitäten sowie Sicherstellungs- und Speicherroutinen. Dazu wären klare Vorgaben des Auftraggebers notwendig.

**Generelle Anmerkung:** Wir möchten den Auftraggeber nach wie vor darauf hinweisen, dass eine Spezifizierung seiner Ziele und Fragestellungen erfolgen sollte.

## 5 Literatur

---

- Gerling, Lars; Wiedensohler, Alfred; Weber, Stephan (2021): Statistical modelling of spatial and temporal variation in urban particle number size distribution at traffic and background sites. *Atmospheric Environment*, Volume 244, 117925, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117925>.
- Hoek, Gerard (2017): Methods for Assessing Long-Term Exposures to Outdoor Air Pollutants. *Current Environmental Health Reports*, 4, S. 450-462, <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0169-5>.
- ICAO (2021): ICAO Aircraft Engine Emissions Databank: ICAO <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. Letzter Zugriff: 22 Februar 2022.
- Karrasch, Stefan (o.J.): Akute gesundheitliche Effekte ultrafeiner Partikel. Bayerischer Projektverbund Ultrafeine Partikel. [https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigen/feinstaub/doc/ufp\\_projektverbund/akute\\_gesundheitl\\_effekt\\_tp5\\_bay\\_ufp.pdf](https://www.stmuv.bayern.de/themen/luftreinhaltung/verunreinigen/feinstaub/doc/ufp_projektverbund/akute_gesundheitl_effekt_tp5_bay_ufp.pdf). Letzter Zugriff: 22 Februar 2022.
- Karrasch, Stefan et al. (2021): Zwischenbericht zum Vorhaben Projekt 5: TLK01L-77231 „Akute gesundheitliche Effekte ultrafeiner Partikel“ für den Projektverbund BayUFP „Messung, Charakterisierung und Bewertung ultrafeiner Partikel“.
- Lorentz, Helmut et al. (2021): 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. UBA Texte 14/2021. FKZ 3716 52 200 0, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/einfluss-eines-grossflughafens-auf-zeitliche>. Letzter Zugriff: 22 Februar 2022.
- Pilz, Veronika et al. (2018): C-reactive protein (CRP) and long-term air pollution with a focus on ultrafine particles. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Volume 221, Issue 3, S. 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.016>.
- Wolf, Kathrin et al. (2017): Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany. *Science of the Total Environment*, Volume 579, 1 Feb 2017, S. 1531-1540, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.160>.
- Zurich Airport (2022): Ultrafine Particles – Study on Volatile and Non-Volatile Ultra-Fine Particles at Zurich Airport. Flughafen Zürich AG.
- Zurich Airport (o.J.): Ultrafine Particle Concentrations Zurich Approach Runway 14. Flughafen Zürich AG.
- Zurich Airport (o.J.): Ultrafine Particle Measurements at Zurich Airport. Flughafen Zürich AG.