

Lufthygienischer Jahresbericht 2018

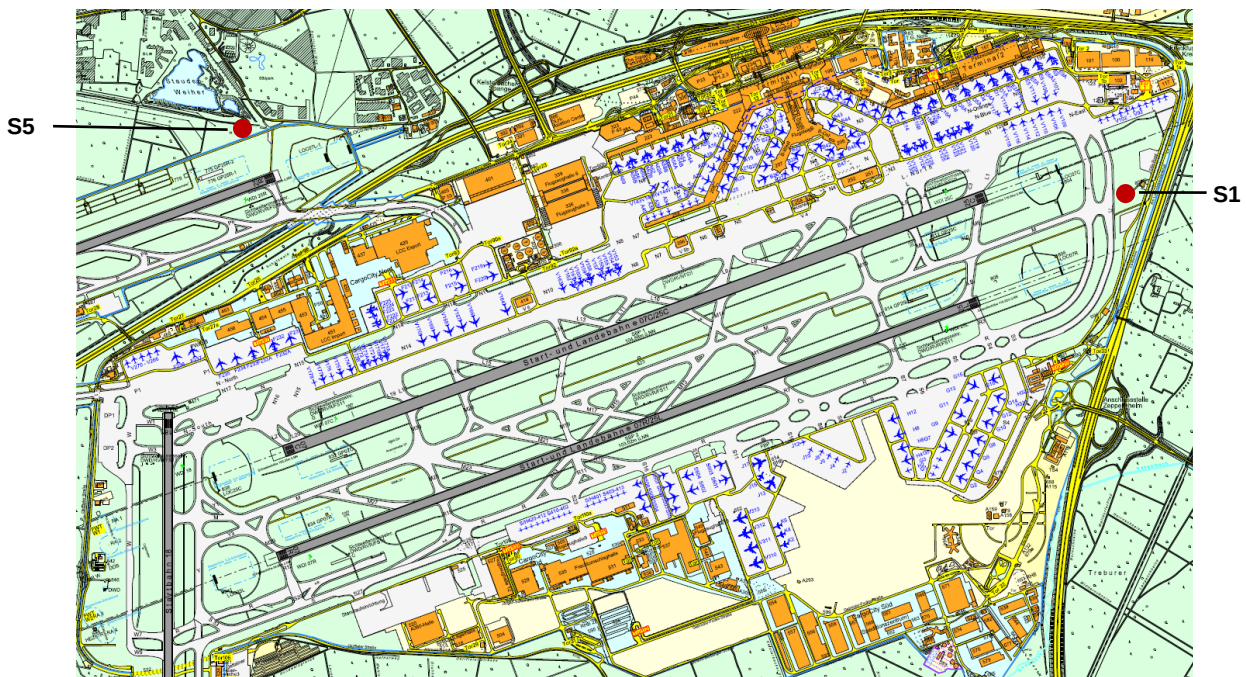
Bericht über die Ergebnisse der lufthygienischen Überwachung am Flughafen Frankfurt

Wie sich bereits in den vergangenen Jahren gezeigt hat, ist die Luftqualität am Flughafen Frankfurt weitgehend unabhängig von der Entwicklung des Flugverkehrs. Sie ist geprägt von allgemeinen Trends der Vorbelastung durch Umlandemissionen und insbesondere vom Verlauf der Witterung. Demzufolge lagen die Jahreskennwerte der Luftschadstoffe auch im Jahr 2018 wie in den vergangenen Jahren auf einem unauffälligen Niveau, das zwischen dem des städtischen Hintergrunds und dem an verkehrsexponierten Standorten einzuordnen ist.

Insofern gibt es bei den herkömmlichen, grenzwertgeregelten Schadstoffen keine neuen Erkenntnisse. Ein aktuelles Thema in der öffentlichen Diskussion bleiben die ultrafeinen Partikel, die wir auch in dieser Ausgabe des Jahresberichts zum Sonderthema gemacht haben. Noch immer ist diese komplexe Materie Gegenstand der Forschung, insbesondere was mögliche gesundheitliche Wirkungen angeht.

Gerade was den Beitrag von Flughäfen zur Konzentration von ultrafeinen Partikeln in ihrer Umgebung betrifft, haben sich in der letzten Zeit viele neue Erkenntnisse ergeben, auch mit Unterstützung von Fraport. In dieser Ausgabe des Lufthygienischen Jahresberichts stellen wir erste Ergebnisse von Modellrechnungen für ultrafeine Partikel aktuellen Messungen gegenüber. Auch wenn aus systematischen Gründen noch nicht die wünschenswerte Übereinstimmung zwischen Modell und Messung besteht, sind die vorliegenden Berechnungen erste Schritte zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge.

Standorte der Luftmessstationen im Jahr 2018



Jahresmittelwerte im Vergleich mit Luftqualitätswerten

		Messwert	Luftqualitätswert*
NO	S1	28	200 ¹
	S2		
	S5	10	
NO ₂	S1	43	40 ²
	S2		
	S5	29	
SO ₂	S1	2	50 ³
	S2		
CO	S1	0,3	- ⁴
	S2		
O ₃	S1	38	- ⁴
	S2		
PM10	S1	18	40 ²
	S2		
	S5	16	
PM2,5	S2		25 ²
Benzol	S1	0,6	5 ²
	S2		
Toluol	S1	1,0	30 ⁵
	S2		
m/p-Xylol	S1	0,4	30 ⁵
	S2		
Ethylbenzol	S1	0,2	20 ¹
	S2		
Benzo(a)pyren	S1	0,2	1 ²
	S2		
Arsen	S1	0,4	6 ²
Blei	S1	3,2	500 ²
Cadmium	S1	0,1	5 ²
Nickel	S1	1,8	20 ²

Messeinheit: µg/m³, für CO: mg/m³, für Benzo(a)pyren, Arsen, Blei, Cadmium und Nickel: ng/m³

PM10 = Partikel, die einen gröÙenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist, Definition für PM2,5 analog dazu

*Als Vergleichswerte wurden herangezogen:

¹ Immissionsvergleichswert des HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie)

² Grenzwert der 39. BImSchV; Arsen, Cadmium, Nickel und Benzo(a)pyren: Zielwert

³ Grenzwert der TA Luft 2002

⁴ Kein als Jahresmittel definierter Beurteilungswert in den einschlägigen Regelungen

⁵ Vorschlag des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI)

Das Format der tabellarischen und grafischen Darstellungen der Vorjahre wurde in diesem Berichts beibehalten, auch wenn von dem derzeit stillgelegten S2-Container keine Ergebnisse vorliegen. Sobald die Station wieder in Betrieb ist, werden deren Werte in gewohnter Weise dargestellt.

Die Verfügbarkeit der kontinuierlichen Messungen lag im Jahr 2018 bei weit über 99%. Auch bei der Passivsammlung der Kohlenwasserstoffe und den Staubinhaltsstoffen gab es keine Ausfälle.

Überschreitungshäufigkeit von Kurzzeit-Luftqualitätswerten

		Kurzzeit-Luftqualitätswert	Bezugsintervall	Anzahl gemessener Überschreitungen pro Jahr	Anzahl zulässiger* Überschreitungen pro Jahr
NO ₂	S1	200	1 Stunde	1	18
	S2				
	S5			0	
SO ₂	S1	350	1 Stunde	0	24
	S2				
CO	S1	10 ¹	8 Stunden	0	0
	S2				
O ₃	S1	180 ²	1 Stunde	4	0
	S2				
	S1	240 ³	1 Stunde	0	0
	S2				
	S1	120 ¹	8 Stunden	19 ⁴	25 ⁴
PM10	S1	50	24 Stunden	4	35
	S2				
	S5			4	

Messeinheit: µg/m³, für CO: mg/m³

* Als Vergleichswerte wurden die Kurzzeit-Luftqualitätswerte gemäß 39. BImSchV herangezogen (zum Begriff „zulässig“ siehe die Erläuterungen im Lufthygienischen Jahresbericht 2004 bzgl. der Exposition, die zur Anwendung von Grenzwerten vorauszusetzen ist):

¹ Höchstzulässiger Acht-Stunden-Mittelwert eines Tages aus stündlich gleitenden Acht-Stunden-Mittelwerten (bei Ozon: Zielwert)

² Schwelle für die Unterrichtung der Öffentlichkeit durch die zuständige Behörde bei Überschreitung in deren Messnetz

³ Schwelle für die Auslösung des Alarmsystems durch die zuständige Behörde bei Überschreitung in deren Messnetz

⁴ als Mittel über drei Jahre (2016, 2017, 2018)

Zur Beurteilung der Kurzzeitwerte für PM_{2,5}, Staubinhaltsstoffe, NO, Benzol, Toluol, m/p-Xylol, und Ethylbenzol liegen keine entsprechenden Luftqualitätswerte vor.

Das Jahr 2018 war geprägt durch häufige und anhaltende Nordostwetterlagen mit ungewöhnlich viel Sonnenschein, entsprechend wenig Niederschlag und höheren Temperaturen in nahezu allen Monaten. Besonders trocken und warm war der Sommer. Die Gesamtsonnenscheindauer war mit 2.116 Stunden um 27 % höher als im Langzeitmittel¹, die Niederschlagssumme entsprach mit 401 mm nur knapp zwei Dritteln der üblichen Menge. Lediglich im Februar war es deutlich, im März nur etwas kälter als gewöhnlich.

Trotz des warmen und trockenen Sommers wurde weder die Alarmschwelle für Ozon überschritten, noch waren Überschreitungen der Informationsschwelle besonders häufig: mit vier Stunden im Jahr 2018 sogar eine Stunde weniger als 2017. Dagegen trug das Berichtsjahr wieder zu einer Erhöhung der Kennzahl für den Langzeitzielwert bei (s. auch Fußnote 4 zur Tabelle). Dies stimmt mit der Erkenntnis überein, dass Spitzenwerte der Ozonkonzentration seltener werden aber das Konzentrationsniveau insgesamt kaum abnimmt und bei entsprechendem Witterungsverlauf wieder ansteigt.

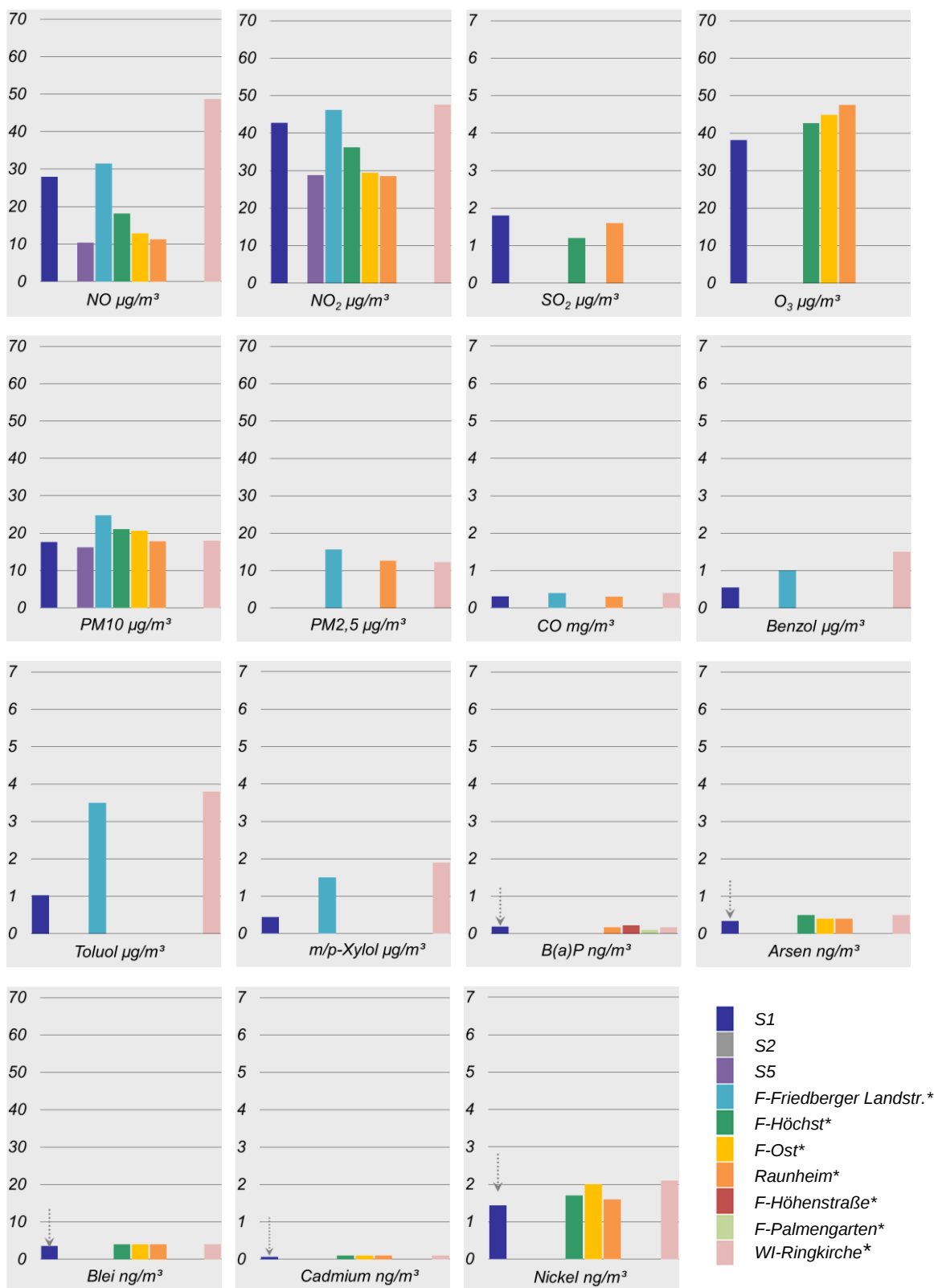
Die Schwelle für das PM₁₀-Tagesmittel wurde im Berichtsjahr an vier Tagen überschritten. Bis zu 35 Tage im Jahr wären selbst im bewohnten Umfeld zulässig gewesen.

Über dem Beurteilungswert lag wieder lediglich das Jahresmittel der NO₂-Konzentration an S1, mit 43 µg/m³. Eine sehr knappe Überschreitung der NO₂-Kurzzeitschwelle (201 µg/m³) war am Abend des 03.08.18 wieder bei nordöstlichen Windrichtungen – und damit flughafenunabhängig – zu verzeichnen.

Die Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit würden auch in diesem Jahr wieder weitestgehend eingehalten, wenn sie auf Flughäfen anwendbar wären (s. Anmerkung* unter der Tabelle). Die einzige Ausnahme stellt erneut der durch Kfz-Emissionen etwas erhöhte NO₂-Jahresmittelwert an S1 dar. Er ist vergleichbar mit dem Konzentrationsniveau an ebenfalls verkehrsexponierten, städtischen Standorten und stellt keine Besonderheit des Standorts Flughafen dar.

¹ 1981-2010 an der vom Deutschen Wetterdienst betriebenen Flugwetterwarte auf dem Flughafengelände

Jahresmittelwerte der Flughafenstationen und Vergleichswerte benachbarter Messstationen des HLNUG*



Keine Säule = Komponente nicht im Messprogramm der jeweiligen Station enthalten, F = Frankfurt am Main, WI = Wiesbaden, Staubinhalt: Balken = Vorjahreswerte 2017, Pfeile = aktuelle FRA-Werte 2018

*Quellen: Lufthygienischer Monatsbericht Dezember 2018 (gleitende Jahresmittel), HLNUG und Lufthygienischer Jahresbericht 2017, HLNUG (Staubinhalt), 2018 lag bis Redaktionsschluss noch nicht vor.

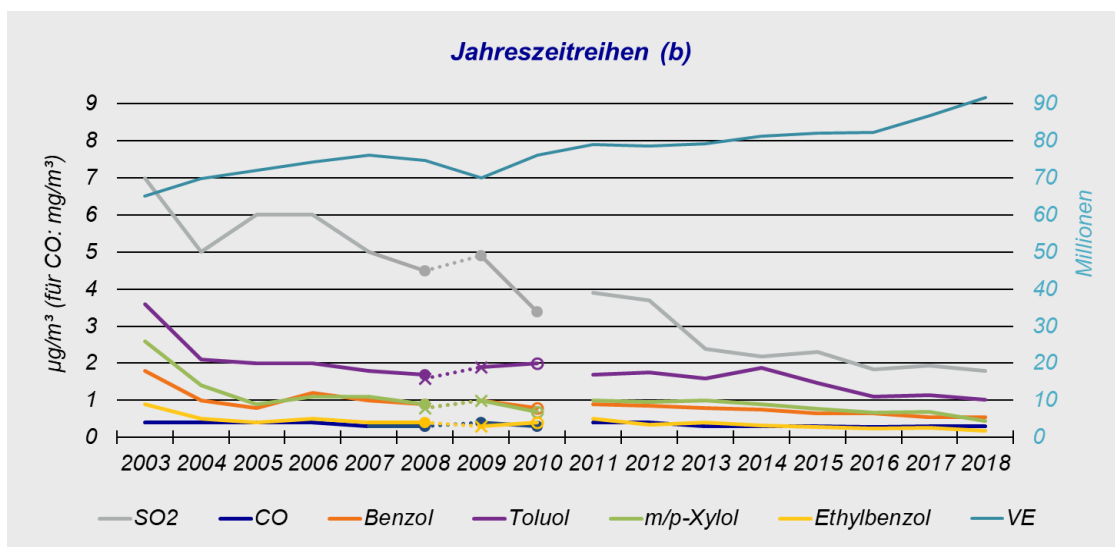
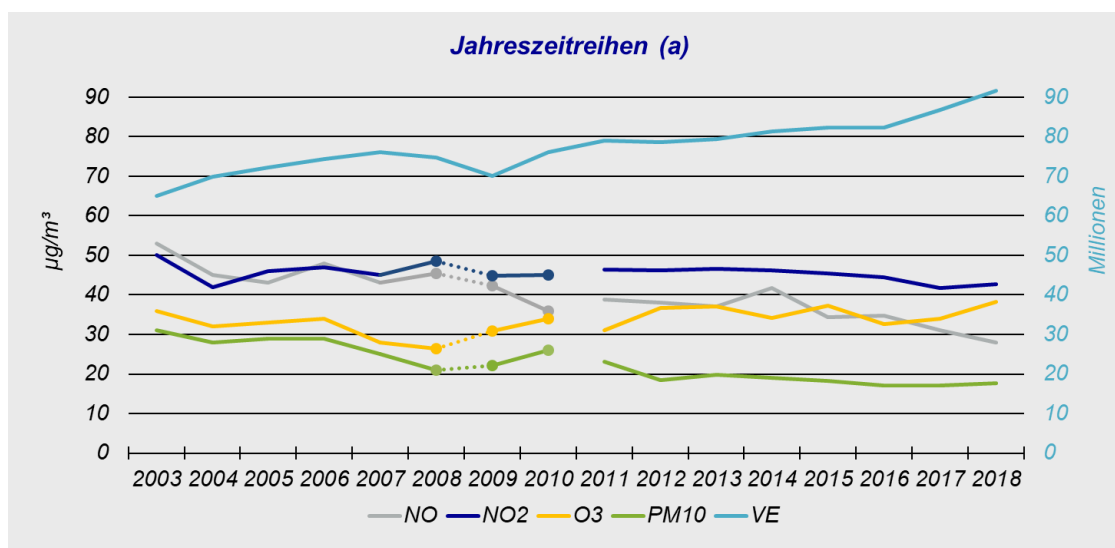
Vergleich der Fraport-Stationen mit benachbarten HLNUG-Stationen

Der Vergleich mit den Messergebnissen der HLNUG-Stationen fällt für das Jahr 2018 standortbedingt ähnlich aus wie für die vergangenen Jahre. An den verkehrsexponierten Stationen Frankfurt Friedberger Landstraße und Wiesbaden Ringkirche wurde der Grenzwert für das NO₂-Jahresmittel ebenfalls überschritten. Wie am Flughafen waren auch an den Vergleichsstationen die Ozonwerte 2018 höher als im Vorjahr.

Der Nickelwert am Flughafen lag 2018 (Pfeil) etwas höher als im Vorjahr (Balken). Ob dies auch bei den HLNUG-Stationen der Fall war, bleibt abzuwarten, da deren Messergebnisse der Staubinhaltsstoffe noch nicht veröffentlicht sind. An allen Standorten waren die vorliegenden Konzentrationen der Kohlenwasserstoffe sowie der Staubinhaltsstoffe B(a)P, Arsen, Blei, Cadmium und Nickel, wie bisher sehr gering im Verhältnis zu den jeweiligen Beurteilungswerten.

Entwicklung der Jahresmittel (Station S1) und Verkehrseinheiten (VE)

Bei angestiegener Ozonkonzentration hat die Konzentration von Stickstoffmonoxid weiter abgenommen und die NO₂-Konzentration ebenso wie die PM10-Konzentration wieder leicht zugenommen. Dies ist witterungsbedingt und unabhängig von der Entwicklung der Verkehrseinheiten, deren Anzahl auch im Jahr 2018 noch einmal deutlich angestiegen ist. Die Kohlenwasserstoffwerte liegen im Bereich der Bestimmungsgrenze.



1 VE = 1 Passagier mit Gepäck oder 100 kg Luftfracht bzw. Luftpost

Durchgezogene Linien: Messwerte eines Standorts, gepunktete Linien: kleinräumiger Standortwechsel 2008 / 2009, 2010 Verlegung um ca. 1000 m in nord-nordöstliche Richtung

Dicke Punkte: Korrektur bei Datenlücken am Standort, Kreuze: geringer Datenumfang am Standort ohne Korrektur, Kreise: Daten von zwei Standorten ohne Korrekturmöglichkeit

Ultrafeine Partikel (UFP) in Messung und Modell

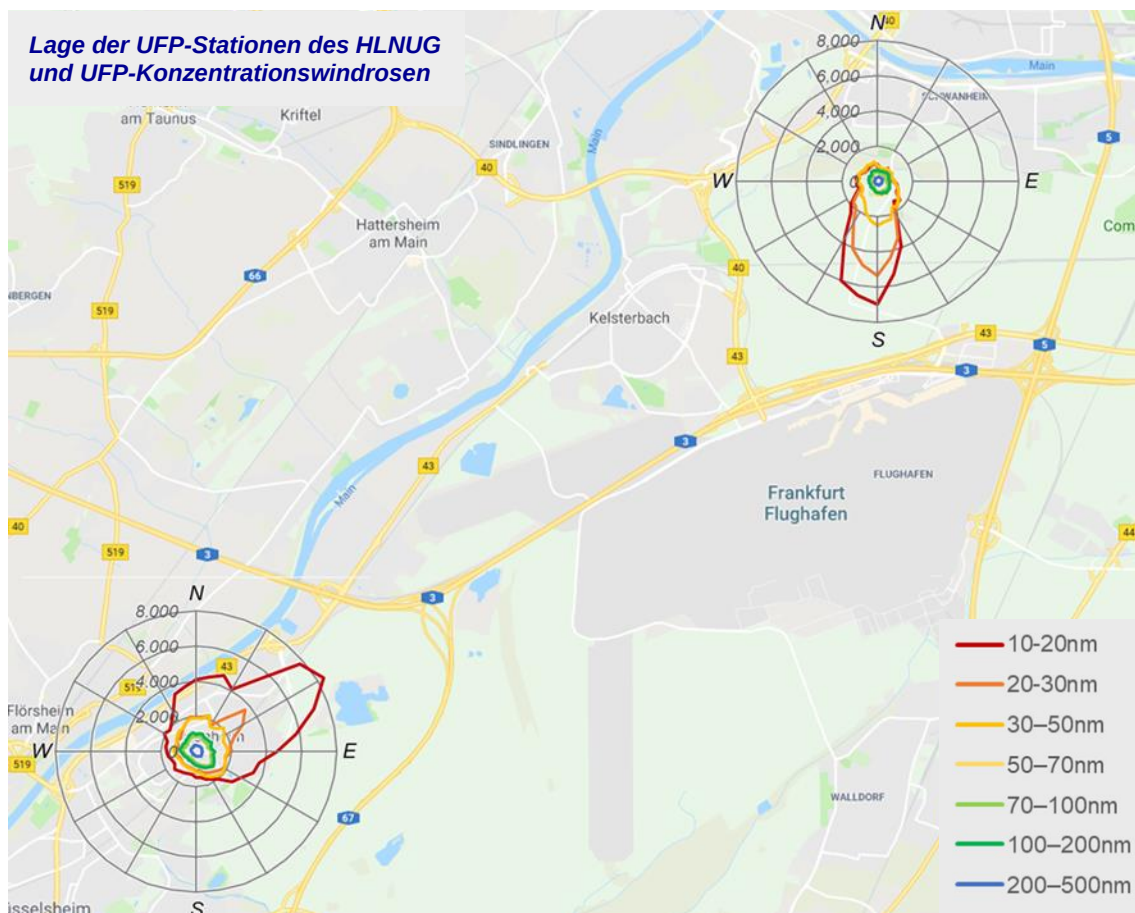
Bereits im letzten Jahresbericht hatten wir Messergebnisse der Partikelanzahl an der HLNUG-Station Raunheim dargestellt. Eine entsprechende Modellierung dieser Messgröße war noch nicht möglich, aber es gab Hinweise auf einen Zusammenhang mit Flugzeugemissionen aus den Modellergebnissen für andere Komponenten im Triebwerksabgas. Inzwischen liegen weitere, detaillierte UFP-Messergebnisse vor, und die Partikelanzahl kann mit dem Modell Lasport simuliert werden. Eine Übereinstimmung zwischen Mess- und Modellergebnissen ist allerdings vorerst noch nicht zu erwarten. Die UFP-Modellierung für Flugzeuge steht noch am Anfang und umfasst ausschließlich den nicht flüchtigen, stabilen, primär emittierten, Anteil. Demgegenüber werden bei den vorliegenden Messungen alle Partikel aus allen Quellen gezählt, also auch die flüchtigen, die sekundär während des Transports gebildet aber teilweise auch wieder abgebaut werden können.

HLNUG-Messungen in Raunheim und Schwanheim

Für das Jahr 2018 liegen nicht nur Messungen der Partikelanzahl vor, sondern auch deren Verteilung auf Größenklassen. Dazu ist eine spezielle Messausrüstung notwendig, die erst ab Herbst 2017 im Einsatz war. Bis dahin wurde lediglich die Gesamtzahl der Partikel gezählt. Beide Messsysteme erfassen auch Partikel oberhalb der für UFP definierten Grenze von 100 nm Durchmesser, wenn auch der Beitrag der größeren Partikel zur Anzahl gering ist. Die unteren Größenklassen sind für die folgenden Auswertungen von besonderer Bedeutung. Über die Information zur Größenverteilung hinaus steht mit dem Standort Frankfurt Schwanheim seit Oktober 2017 eine weitere, flughafennahe Station des HLNUG zur Verfügung.

Windrichtungsabhängigkeit der gemessenen Partikelanzahl

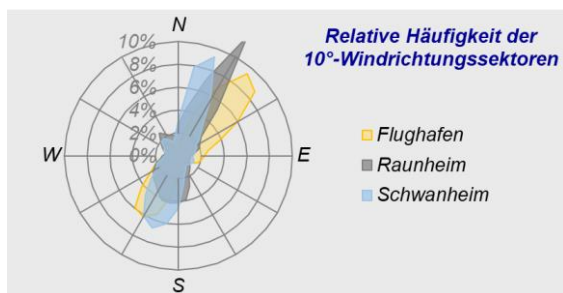
Die Konzentrationswindrosen in der unten abgebildeten Karte markieren die beiden Standorte Raunheim südwestlich und Schwanheim nördlich des Flughafens. Während die Station Raunheim charakteristisch für den städtischen Hintergrund ist, liegt die Station Schwanheim auf einem Sportgelände, umgeben von Wald.



Mittlere Partikelanzahl pro 10°-Windrichtungssektor an den HLNUG-Stationen Raunheim (links unten) und Schwanheim (rechts oben) 2018. Der äußere Kreis entspricht einer mittleren Anzahl von 8.000 Partikel pro ccm im jeweiligen Sektor. Die einzelnen Größenklassen sind durch Linien unterschiedlicher Farbe dargestellt. Rötliche bis gelbe Farbtöne sollen die besonders kleinen Partikel hervorheben. Kartenhintergrund: google maps

An beiden Standorten ergeben sich die höchsten Werte bei Wind aus Richtung Flughafen und zwar in der kleinsten Größenklasse von 10 bis 20 nm (rote Linie). Während in Raunheim die nächstgrößere Klasse 20 bis 30 nm (orange) nur noch eine geringe Anzahl aus dem entsprechenden Sektor beiträgt, ist die Richtungsabhängigkeit in Schwanheim in dieser Klasse noch sehr deutlich ausgeprägt und auch in der Klasse 30 bis 50 nm (gelb) noch vorhanden. Die Anzahl der noch größeren Partikel ist an beiden Standorten geringer und gleichmäßiger auf die Windrichtungen verteilt.

In Raunheim sind erhöhte Konzentrationen der sehr kleinen Partikel auch bei nördlicher Windrichtung zu verzeichnen, was bei den größeren nicht zu erkennen ist. Das Überwiegen dieser kleinsten Partikel spricht zumindest gegen Primäremissionen des Straßenverkehrs als Hauptquelle bei Wind aus den betreffenden Richtungen. Diese liegen in der Größe über 40 nm. Partikel unterhalb von 23 nm gehen daher bei der Kfz-Zertifizierungsmessung gar nicht erst ein.



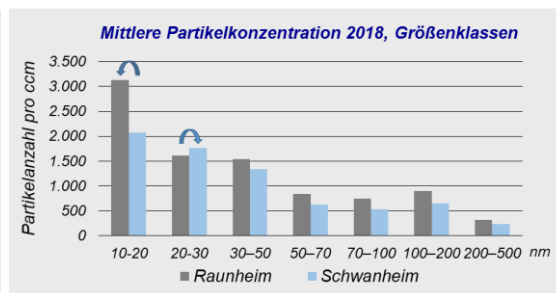
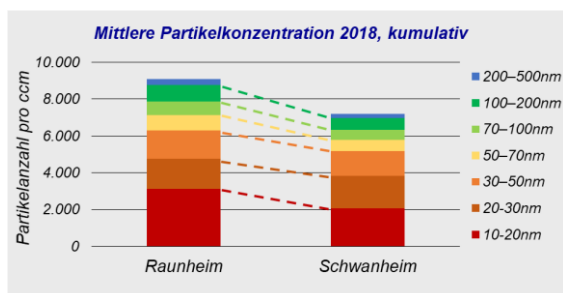
Die nebenstehende Abbildung zeigt als ergänzende Information die relativen Häufigkeitsverteilungen der Windrichtung im Jahr 2018 an den Standorten Flughafen, Raunheim und Schwanheim. Während die Messreihe des DWD am Flughafen vollständig ist, fehlen in Raunheim ca. 3% und in Schwanheim ca. 20% der Windmesswerte. Die Ausfälle waren allerdings jeweils über das Jahr verteilt, so dass die relativen Verteilungen davon kaum betroffen sein dürften.

Gemeinsam ist allen drei Standorten ein Maximum aus dem nordöstlichen Sektor, das in diesem Jahr stärker ausgeprägt war als sonst und mit der trockenen und warmen Witterung verknüpft war. Das zweite Maximum aus süd-südwestlicher Richtung fiel dagegen geringer aus, besonders in Raunheim. Auch im Vorjahr traten entsprechende Windrichtungen dort nicht so häufig auf wie am Flughafen. Eine sehr schmale Verteilungsspitze im Nordosten war ebenfalls bereits 2017 zu erkennen.

Sowohl in Raunheim als auch in Schwanheim sind andere Windrichtungen häufiger als die mit den höchsten UFP-Konzentrationen, was sich naturgemäß in den Jahresmittelwerten niederschlägt.

Vergleich der gemessenen Größenverteilungen in Raunheim und Schwanheim

Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung zwischen Raunheim und Schwanheim deuten sich bereits in den UFP-Windrosen an. In der folgenden Darstellung ist noch deutlicher zu erkennen, dass dies insbesondere die beiden unteren Größenklassen betrifft.

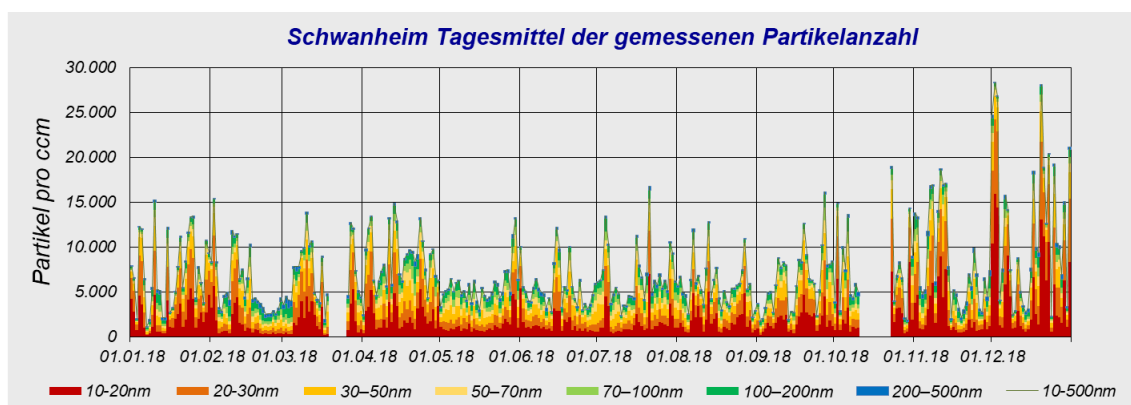
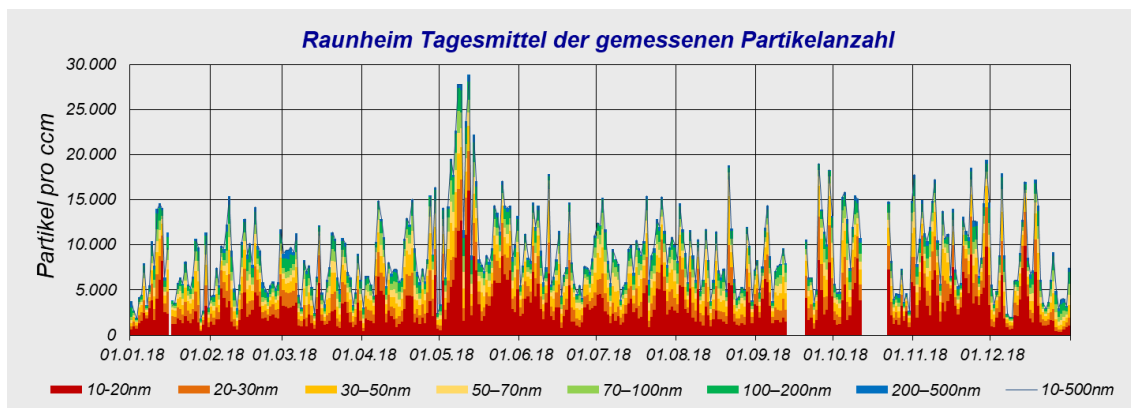


Größenverteilung der Partikel in Raunheim und Schwanheim 2018. Links: Summe über alle Größenklassen, rechts: Größenklassen separat dargestellt

Während die Anzahl größerer Partikel in Raunheim gleichmäßig lediglich etwas höher ist als in Schwanheim, besteht in der untersten Klasse eine beträchtliche Differenz. In der zweituntersten Klasse – und nur in dieser – kehrt sich das Verhältnis zwischen Raunheim und Schwanheim um. In Raunheim stellen also die kleinsten Partikel die stärkste Gruppe dar, die nur etwas größeren sind dort nicht so zahlreich wie in Schwanheim. An beiden Standorten machen die zwei unteren Größenklassen ungefähr die Hälfte der Gesamtpartikel im Jahresmittel aus.

Zeitlicher Verlauf der gemessenen Partikelanzahl

Wie angesichts der ausgeprägten und sehr unterschiedlichen UFP-Konzentrationswindrosen beider Standorte zu erwarten ist, besteht zwischen den entsprechenden Zeitreihen kein Zusammenhang. Wenn die Windrichtung an einer Station hohe UFP-Konzentrationen begünstigt, kann dies aufgrund der räumlichen Lage nicht gleichzeitig auch für die andere der Fall sein.

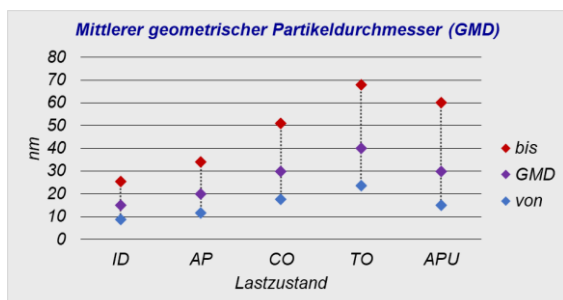


Zeitreihe der gemessenen Partikelkonzentration in Raunheim (oben) und Schwanheim (unten) 2018

Auch in der Darstellung der Zeitreihen sind die unterschiedlichen Größenklassen farblich markiert. Zu erkennen ist die große Variabilität der Tagesmittelwerte, wobei die zeitliche Struktur, insbesondere die Spitzenwerte, im Wesentlichen durch die kleineren Partikel geprägt ist. Ausfälle gab es in Raunheim lediglich an einigen Tagen im September und Oktober, sowie in Schwanheim im März und Oktober.

UFP-Modellierung mit LASPORT

Wie bereits erwähnt, ist es mit der aktuellen Lasport-Version 2.3 möglich, die Emission und den daraus resultierenden Immissionsbeitrag zur Anzahlkonzentration von nicht flüchtigen Partikeln zu simulieren. Die Partikel werden als stabil vorausgesetzt, d.h. es finden weder Neubildung noch Abbau während des Transports statt. Das Programmpaket enthält lastabhängige Emissionsindizes in Partikelanzahl pro kg Kerosin für die einzelnen Triebwerkstypen. Diese Angaben sind im Detail nicht ohne weiteres zugänglich, sondern wurden aus dem bereits zuvor integrierten Ansatz für die Partikelmasse (FOA3) und aus Literaturangaben über die Partikelgrößenverteilung hergeleitet. Demnach verhalten sich bei gegebener Partikelmassenemission die Partikelanzahlen gegenläufig zur Partikelgröße. Die Partikelanzahl ist also unmittelbar mit der Partikelgröße verknüpft. Die folgende Abbildung zeigt die in Lasport zugrunde gelegten Partikelgrößen für die vier Lastzustände im Start-Lande-Zyklus, sowie für Hilfstriebwerke.



Abkürzungen:

FOA3	First Order Approximation (s. Text)
GMD	Geometric Mean Diameter
ID	Idle, Leerlauf, Taxi, Rollen
AP	Approach, Sinkflug
CO	Climb-Out, Steigflug
TO	Take-Off, beschleunigtes Anrollen zum Starten
APU	Auxiliary Power Unit, Hilfstriebwerk

Charakteristische Durchmesser nichtflüchtiger Partikel im Modell Lasport. Die Angaben „von ... bis“ sind ein Maß für die Bandbreite innerhalb eines Lastzustands.

Der FOA3-Ansatz sieht drei Komponenten vor, die zur Partikelmasse beitragen:

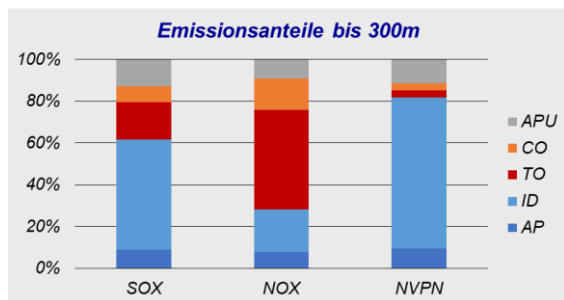
- nicht flüchtige (im Wesentlichen Ruß)
- flüchtige schwefelhaltige (SO_x)
- flüchtige organische (kohlenwasserstoffhaltige)

Das Verhalten der flüchtigen Komponenten hängt auch von den Umgebungsbedingungen ab. Deren Anzahl kann mit Lasport (noch) nicht simuliert werden. Lediglich der nicht flüchtige Anteil geht in die Modellierung der Partikelanzahl als NVPN ein (non-volatile particle number).

Modellierte Emissionsanteile der Lastzustände

Für das Jahr 2018 wurde eine Lasport-Rechnung durchgeführt, in der ausschließlich die Flugzeugemissionen im Start-Lande-Zyklus (LTO, Landing-Take-Off Cycle) sowie die Emissionen der Hilfstriebwerke enthalten sind. Die übrigen Flughafenquellen tragen nur sehr wenig zur Partikelanzahl bei, wie bereits bei einem Zwischenbericht des UBA-Projekts zur Modellierung des Flughafeneinflusses auf die UFP-Konzentration in der Umgebung festgestellt wurde.

Je nach Komponente unterscheidet sich der Anteil der einzelnen LTO-Phasen bzw. des APU-Betriebs an der Gesamtemission, die hier wie üblich bis zu einer Höhe von 300 m angegeben wird. Emissionsanteile aus größeren Höhen werden zwar im Modell berücksichtigt, tragen aber nur noch in geringem Maß zur Immissionskonzentration in Bodennähe bei und sind in dieser Hinsicht weniger relevant². Für den Vergleich der modellierten Emissionen wurden die drei Komponenten ausgewählt, die auch zum Immissionsvergleich zwischen Modell und Messung herangezogen werden.



Komponenten im Modell:

- | | |
|------|---|
| SOX | schwefelhaltige, flüchtige bzw. gasförmige Komponenten, im Wesentlichen SO ₂ |
| NOX | Stickstoffmonoxid (NO) und -dioxid (NO ₂) angegeben als NO ₂ -Äquivalent |
| NVPN | Non Volatile Particle Number, Anzahl nicht flüchtiger, primär emittierter Partikel |

Relative Verteilung der jährlichen Emissionsmengen 2018 auf die Lastzustände im Start-Lande-Zyklus bis 300 m Höhe sowie den APU-Betrieb im Modell

Der größte NVPN-Anteil ergibt sich im niedrigsten Lastzustand „Idle“, d.h. beim Rollen oder im Leerlauf der Flugzeuge (hellblau). Dies ist teilweise durch die relativ lange Emissionsdauer in diesem Lastzustand bedingt. Ein ähnlicher Effekt ist beim SOX zu erkennen. Dessen Emissionsrate ist proportional zum Treibstoffverbrauch und damit im niedrigen Lastzustand eher gering. So können auch hier hohe Emissionssummen nur über eine lange Emissionsdauer zustande kommen. Bei den NVPN wirkt sich zusätzlich eine höhere Emissionsrate im Zustand „Idle“ aus, die mit der gegenläufigen Beziehung zwischen Partikelgröße und -anzahl zusammenhängt.

Der zweitgrößte Anteil an den NVPN-Emissionen stammt aus dem APU-Betrieb. Auch hier wird von relativ großer Einsatzdauer ausgegangen. Allerdings sind die zugrunde liegenden Betriebsdaten nicht so gut belegt wie bei den Flugzeuggewegungen.

Räumliche Verteilung der modellierten NVPN-Konzentration

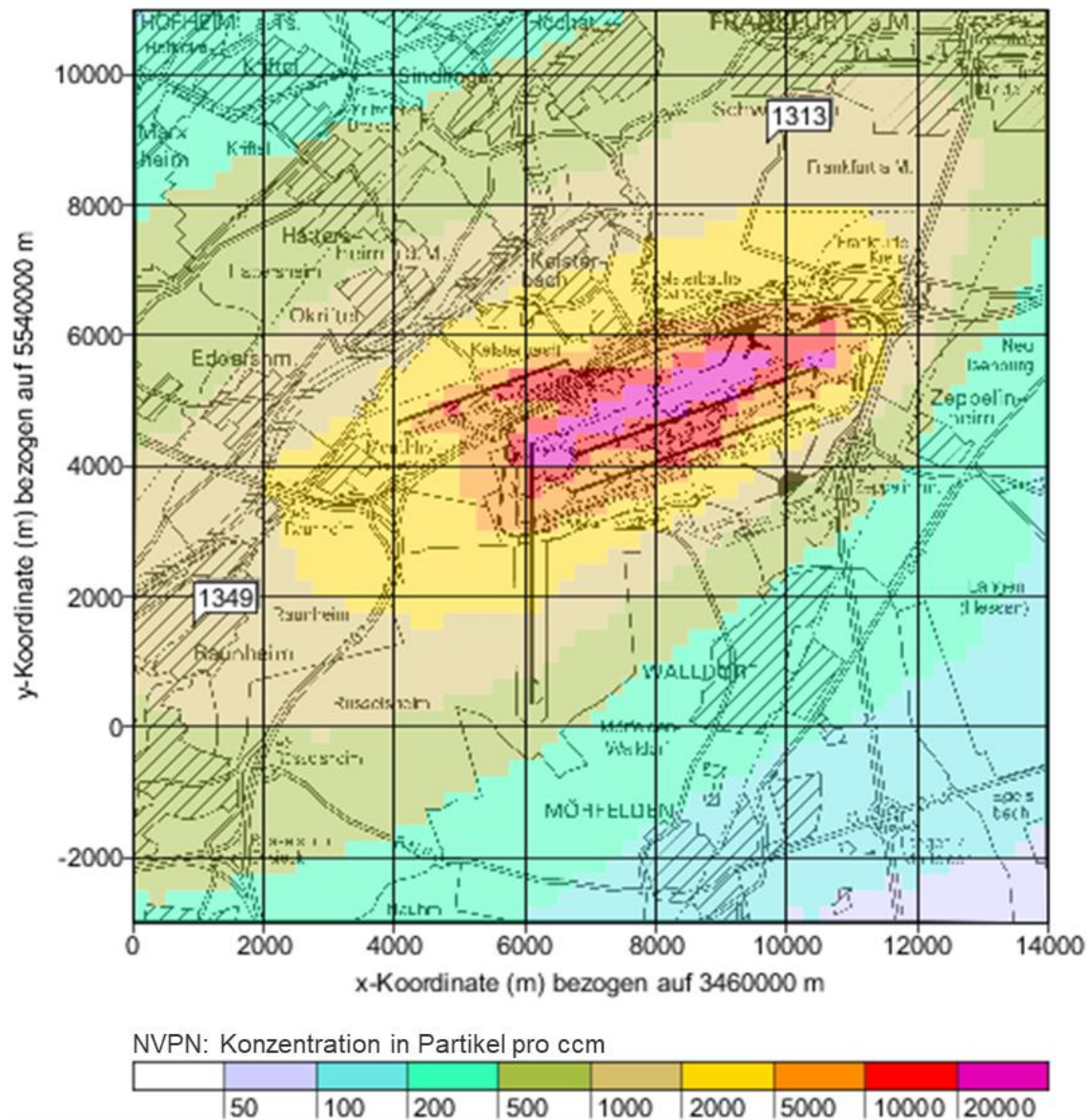
Die mit dem Modell berechneten Jahresmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration zeigen eine ähnliche räumliche Struktur wie die von anderen Komponenten des Triebwerksabgases. Das Maximum liegt im Vorfeldbereich. Entsprechend der Verteilung von häufigen, aber auch von lufthygienisch eher ungünstigen östlichen³ Windrichtungen erfolgt die Konzentrationsabnahme nach Südwest und Nordost nicht so schnell wie quer dazu nach Nordwest und Südost.

Im Jahresmittel ergeben sich in Raunheim 1.349 und in Schwanheim 1.313 Partikel pro ccm. Dies ist in beiden Fällen erheblich weniger als dort gemessen wurde, selbst wenn man nur die zwei unteren Größenklassen bis 30 nm zugrunde legen würde, die im Modell den größten Emissionsbeitrag leisten. Wie bereits

² S. auch 5. BImSchVwV zur Erstellung von Emissionskatastern. Die Modellrechnung für die Immission bezieht standardmäßig Emissionen bis zu einer Höhe von 3000 Fuß (914 m) ein.

³ Hochdrucklagen mit geringer atmosphärischer Durchmischung

erwähnt, war eine Übereinstimmung der absoluten Ergebnisse von Messung und Modell auch nicht zu erwarten. Im Folgenden werden die Ergebnisse auf gemeinsame Muster hin untersucht.

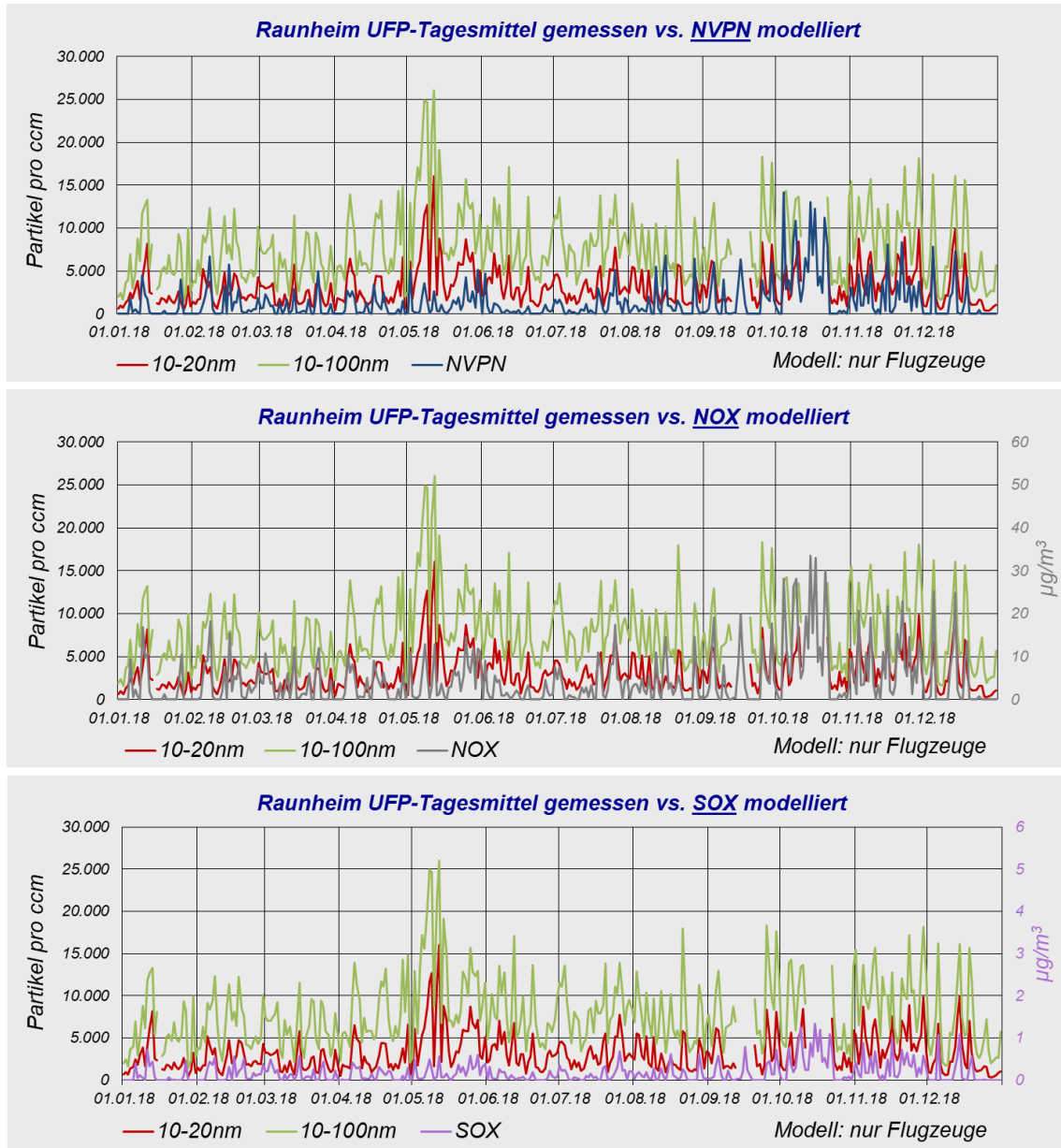


Mit Lasport berechnetes Feld der Anzahlkonzentration von nicht flüchtigen Partikeln aus Flugzeugemissionen im Jahresmittel 2018. Die in der Karte eingetragenen Zahlenwerte beziehen sich auf die Standorte Raunheim und Schwanheim. Terminal 3 im Südosten des Flughafens ist noch im Bau.

Vergleich der gemessenen UFP-Zeitreihen mit den modellierten Zeitreihen von NVPN, NOX und SOX

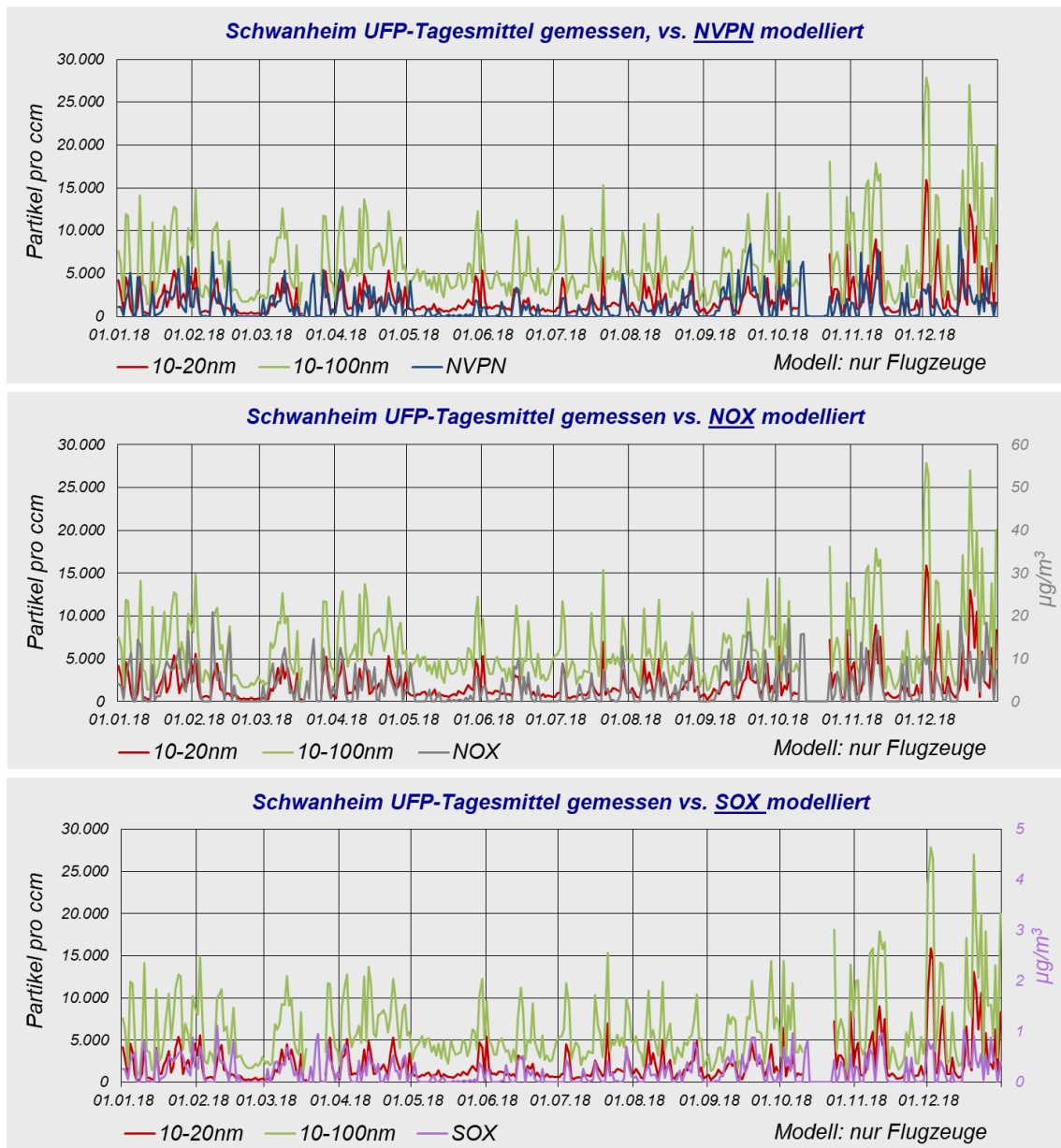
Im Lufthygienischen Jahresbericht 2017 wurden gemeinsame Muster der in Raunheim gemessenen UFP-Konzentration mit modellierten Komponenten des Triebwerkabgases beschrieben. Auch wenn einige Voraussetzungen für eine solide statistische Analyse nicht gegeben waren, so war ein Zusammenhang für NOX und etwas weniger stark für SOX zu erkennen. Die jetzt modellierbare NVPN-Konzentration sollte die größte Übereinstimmung mit dem Muster der gemessenen UFP-Konzentration aufweisen.

Bei den folgenden Zeitreihenvergleichen wird aus der Messung jeweils die kleinste Partikelklasse 10 bis 20 nm herangezogen, sowie die Summe aller UFP von 10 bis 100 nm. Die Reihenfolge der modellierten Komponenten richtet sich nach der zu erwartenden Übereinstimmung mit der UFP-Messung: NVPN, NOX, SOX.



Zeitreihen der Tagesmittel aus UFP-Messung und Modellwerten für Raunheim 2018. Die rechte Y-Achse gilt für die Modellwerte und ist jeweils optimiert für die hervorgehobene Komponente des Modells. Oben: NVPN, Mitte: NOX, unten: SOX

Auch im diesjährigen Zeitreihenvergleich ergeben sich gemeinsame Muster zwischen der UFP-Messung in Raunheim und allen dargestellten Modellkomponenten.



Zeitreihen der Tagesmittel aus UFP-Messung und Modellwerten für Schwanheim 2018. Die rechte Y-Achse gilt für die Modellwerte und ist jeweils optimiert für die hervorgehobene Komponente des Modells. Oben: NVPN, Mitte: NOX, unten: SOX

In Schwanheim sind ebenfalls Gemeinsamkeiten zwischen der Messreihe und den Modellreihen zu erkennen.

Korrelationen

Der subjektive Eindruck von gemeinsamen Mustern in den Zeitreihen von Messung und Modell soll quantitativ erhärtet werden. Wie im Vorjahr werden dazu die Tagesmittelwerte beider Zeitreihen mit Hilfe der linearen Regression ausgewertet. An dieser Stelle wird darauf verzichtet, die Regressionsdiagramme graphisch darzustellen. Hier werden lediglich die Korrelationsmaße der jeweiligen Beziehungen wiedergegeben.

Die zunächst rein rechnerischen Bestimmtheitsmaße (R^2) der Regression sind in der unten stehenden Tabelle jeweils für eine Beziehung Messintervall – Modellkomponente zusammengestellt. Dabei werden nur die drei unteren Größenklassen aufgeführt. Die schwächste Korrelation ist gelb und die stärkste dunkelgrün hinterlegt, mit entsprechenden Zwischenstufen.

Raunheim		Messung 10-20nm	Messung 20-30nm	Messung 30-50nm
Modell	NVPN	0,24	0,29	0,17
Modell	NOX	0,39	0,39	0,18
Modell	SOX	0,43	0,40	0,17

Schwanheim		Messung 10-20nm	Messung 20-30nm	Messung 30-50nm
Modell	NVPN	0,17	0,32	0,37
Modell	NOX	0,28	0,46	0,46
Modell	SOX	0,40	0,58	0,47

„Korrelation“ (Bestimmtheitsmaß R^2) der Tagesmittelwerte zwischen Messung und Modell für Raunheim (oben) und Schwanheim (unten) 2018. Drei verschiedene Größenklassen der Messung sind jeweils drei verschiedenen Modellkomponenten (nur Flugzeuge) gegenüber gestellt.

Auch diese Auswertung steht unter dem Vorbehalt der nur begrenzt gültigen statistischen Voraussetzungen. Einige Auffälligkeiten könnten jedoch auf kausale Zusammenhänge hinweisen:

- An beiden Standorten korreliert unerwarteter Weise die modellierte Partikelanzahl am schlechtesten von allen drei Modellkomponenten mit der gemessenen, und zwar im Prinzip über alle drei Größenklassen.
- Am besten korreliert das modellierte SOX mit den gemessenen UFP ebenfalls an beiden Standorten und im Prinzip über alle drei Größenklassen.
- In Raunheim korrelieren alle Modellkomponenten besonders schlecht mit den gemessenen Partikeln über 30 nm, dafür mit den kleinsten besser als in Schwanheim.
- In Schwanheim korrelieren alle Modellkomponenten noch deutlich besser mit den gemessenen Partikeln über 20 nm als mit den kleinsten.

Die einfachste Erklärung für die schlechte Korrelation der NVPN mit den gemessenen Partikelanzahlen wären Unzulänglichkeiten des Modells. Dagegen spricht, dass das Modell die wissenschaftlichen Erkenntnisse hinsichtlich der bisher simulierbaren Komponenten abbildet und entsprechend validiert ist. Die neu hinzugekommenen NVPN-Emissionsparameter wurden ebenfalls aus Ergebnissen von wissenschaftlichen Studien abgeleitet. Denkbar wäre eine Optimierung der Ergebnisse durch Modellierung mit Vorgabe einer höheren statistischen Genauigkeit. Dies würde erheblich mehr Rechenzeit in Anspruch nehmen, wobei es fraglich ist, ob sich die hier beschriebenen, teilweise doch sehr deutlichen Tendenzen ändern würden.

Vielmehr scheint sich hier der starke Einfluss der nicht modellierbaren, flüchtigen, sekundär gebildeten Partikel auf die Messergebnisse bemerkbar zu machen, die zunächst naturgemäß zum unteren Größenbereich gehören müssen.

Dies könnte erklären, dass gerade in Raunheim die kleinsten gemessenen Partikel noch relativ gut mit den als Vorläufer geltenden gasförmigen Komponenten NOX und insbesondere SOX im Modell korrelieren. Die Partikelbildung, bei der auch die Photochemie eine Rolle spielt, wird durch einen warmen, sonnenscheinreichen Sommer begünstigt. Im Verlauf von entsprechenden Wetterlagen herrschen nordöstliche Windrichtungen vor, wie sie in Raunheim zu den höchsten Konzentrationen der kleinsten Partikel führen. Dabei sind auch flughafenfremde Vorläuferquellen an der sekundären Partikelbildung beteiligt. Bei den größeren,

eher nicht flüchtigen Partikeln scheinen in Raunheim solche flughafenfremde und damit hier nicht modellierbare Einflüsse ausschlaggebend zu sein. Eine Korrelation mit Modellergebnissen ist dann auch kaum zu erwarten und hat sich als dem entsprechend gering herausgestellt.

In Schwanheim besteht dagegen ein stärkerer Zusammenhang zwischen den Modellkomponenten und den größeren gemessenen Partikeln als mit den kleinsten. Dies gilt auch für die nicht flüchtigen NVPN. Flughafenfremde Einflüsse tragen hier offenbar in geringerem Maß bei. Auch in Schwanheim ist von einem gewissen Anteil von sekundären Partikeln auszugehen, wenn auch möglicherweise einem geringeren als in Raunheim. Dafür sprechen die insgesamt kleineren Partikelanzahlen in der untersten Größenklasse und die etwas größeren Zahlen in der nächstgrößeren, bei der die Partikeldurchmesser im Modell für die primären Flugzeugemissionen beginnen.

Die beschriebenen Korrelationsergebnisse dürfen aus den bereits genannten Gründen nicht überinterpretiert werden. Sie legen jedoch nahe, dass ein beträchtlicher Anteil der gemessenen ultrafeinen Partikel in Raunheim und Schwanheim zwar mit dem Flughafen- bzw. Flugbetrieb verknüpft ist, aber nicht aus primären Triebwerksemissionen, d.h. nicht aus Ruß besteht. Dies hätte auch Konsequenzen für die Beurteilung ihrer Wirkung. Während die gesundheitsschädigende Wirkung von Ruß unbestritten ist, muss dies für andere, sekundär gebildete Partikel nicht oder nicht in gleichem Maß der Fall sein, insbesondere wenn es sich um lösliche Sekundärprodukte der gasförmigen Vorläufer Schwefeldioxid und Stickoxide handelt. Auch aus diesem Grund ist eine Bewertung der bisher vorliegenden Mess- und Modellergebnisse noch nicht möglich.

Ausblick

Mittlerweile liegen zahlreiche Erkenntnisse über den Einfluss von Flughäfen auf die UFP-Konzentration in der Umgebung vor. Der internationale Flughafenverband ACI (Airport Council International) hat im Jahr 2018 einen aktuellen Bericht darüber veröffentlicht. Im Hinblick auf den Flughafen Frankfurt werden die Messungen des HLNUG fortgesetzt und erweitert, um Aufschluss über die Struktur des Konzentrationsfelds zu bekommen und die Einflüsse verschiedener Emissionsquellen gegeneinander abzugrenzen.

Das Forschungsprojekt des Umweltbundesamts, das den Einfluss des Flughafens auf die UFP-Konzentration mit Hilfe von Modellrechnungen untersuchen soll, steht kurz vor dem Abschluss. Hier wurden erstmals die Methoden zur Modellierung nicht flüchtiger Partikel aus der Triebwerksemission angewendet, die inzwischen in das Modell Lasport integriert sind, mit dem auch für den vorliegenden Jahresbericht gearbeitet wurde.

Weiterhin offen sind die Fragen zum Anteil flüchtiger Partikel in der Modellierung und zur Unterscheidung zwischen flüchtigen und nicht flüchtigen Partikeln in der Messung, bzw. zu deren chemischer Zusammensetzung. Ungeklärt ist auch immer noch, ob und in welchem Maß von einer gesundheitlichen Wirkung ultrafeiner Partikel auszugehen ist, und welche ihrer Eigenschaften dafür maßgeblich ist.

Um bei der Beantwortung dieser Fragen voranzukommen, wurde beim Umwelt- und Nachbarschaftshaus (UNH) in Kelsterbach ein Arbeitskreis gebildet, der zunächst den noch bestehenden Forschungsbedarf ermitteln und dokumentieren soll. Unter anderem wirken darin Vertreter der Fachbehörde HLNUG mit. Auch Fraport engagiert sich in diesem Arbeitskreis und wird über die Entwicklung des Kenntnisstands berichten.

Weitere Informationen:

Fraport AG

www.fraport.de

<https://www.fraport.de/de/nachbarschaft-region/entwicklung-standort-fra-umwelt/luftqualitaet.html>

HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie)

www.hlnug.de

Modellrechnungen mit Lasport

<https://www.janicke.de/de/lasport.html>

Ableitung der von Triebwerken emittierten Partikelmasse nach FOA3 (ICAO Doc 9889)

https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf

ACI EUROPE: Ultrafine Particles at Airports. 2018

<https://www.aci-europe.org/component/downloads/downloads/5566.html>

UFP-Messungen Raunheim (Jacobi et al. 2016)

<https://www.hlnug.de/themen/luft/sonstige-berichte/ultrafeine-partikel.html>

UFP-Messungen Raunheim und Schwanheim (Rose, Jacobi 2018)

https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/sonstige_berichte/ufp/1._Zwischenbericht_HLNUG_Ultrafeinstaub_final_Korrigendum_20180619.pdf

UBA-UFP-Projekt UFOPLAN 3716 52 200 0

RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES

vom 21. Mai 2008

über Luftqualität und saubere Luft für Europa

<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>

DWD-Daten CDC

<https://cdc.dwd.de/portal/>