

# Lufthygienischer Jahresbericht 2017

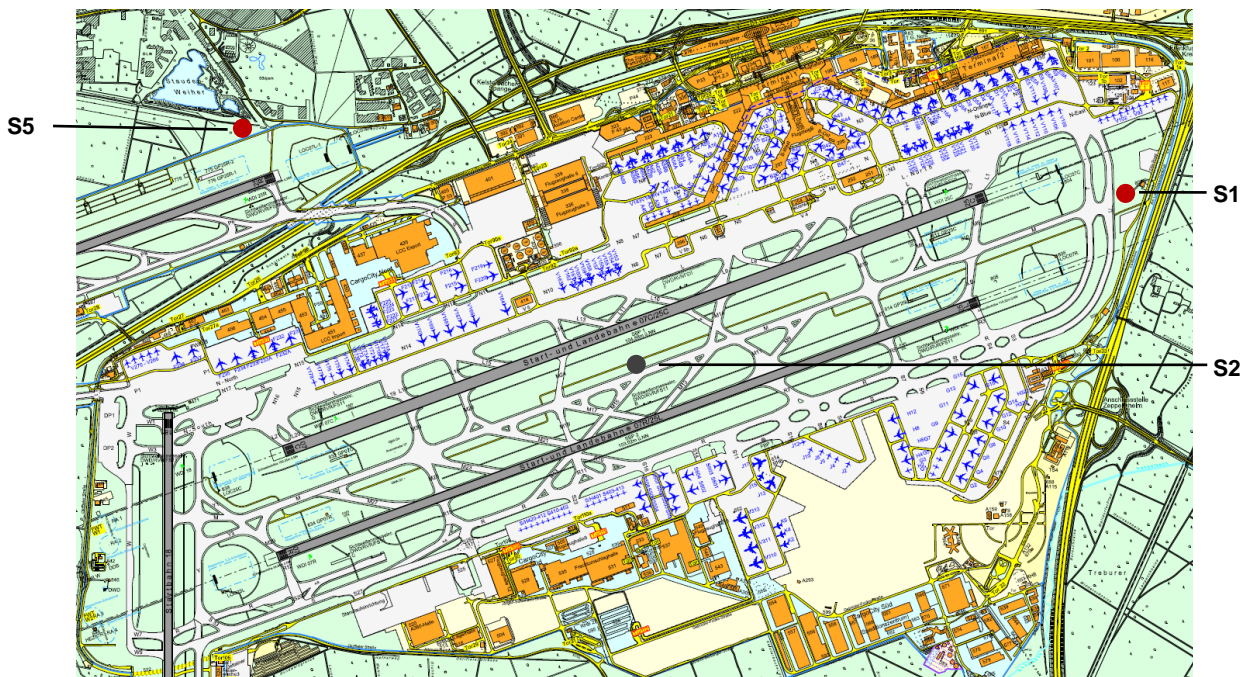
## Bericht über die Ergebnisse der lufthygienischen Überwachung am Flughafen Frankfurt

Für die Luftschadstoffmessungen auf dem Flughafen ergaben sich im Jahr 2017 einige Veränderungen. Nachdem - wie im Vorjahresbericht beschrieben - die ursprünglichen Untersuchungsziele im Wesentlichen erreicht waren, stand eine Weiterführung der Messungen grundsätzlich zur Diskussion. Der Status Quo der Luftqualität am Standort und dessen begrenzte Beeinflussung durch den Ausbau sowie der Realitätsgrad der eingesetzten Simulationsmodelle konnten zwar dokumentiert werden, dennoch erscheint eine Fortsetzung der Messreihe aus fachlicher Sicht wünschenswert. Der Standort ergänzt das behördliche Messnetz und ermöglicht die Beobachtung der zukünftigen Entwicklung, auch hinsichtlich einer weiteren Zunahme des Luftverkehrs. Derartige Aufgaben werden bereits vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), teils in Zusammenarbeit mit dem Umwelt- und Nachbarschaftshaus (UNH) in Kelsterbach, wahrgenommen. Daher wurde vereinbart, dass die Messeinrichtungen ab 01. September 2017 in das Eigentum des UNH übergehen und durch das HLNUG weiter betrieben werden. Die Ergebnisse stehen Fraport zur Verfügung, so dass wir sie weiterhin in unserem Lufthygienischen Jahresbericht darstellen können.

Aus technischen und organisatorischen Gründen musste die Station S2 im Start-Landebahnbahnsystem zum Jahresbeginn stillgelegt werden. Der neue Betreiber plant, sie an anderer Stelle auf dem Flughafen Gelände wieder in Betrieb zu nehmen.

Als Sonderthema des vorliegenden Jahresberichts haben wir die „ultrafeinen Partikel“ gewählt. Dieses Thema ist zwar noch Gegenstand der Forschung, wird aber in der Öffentlichkeit auch im Hinblick auf die Luftqualität im Umfeld von Flughäfen diskutiert.

### Standorte der Luftmessstationen im Jahr 2017



S2 Anfang 2017 stillgelegt

**Jahresmittelwerte im Vergleich mit Luftqualitätswerten**

		Messwert	Luftqualitätswert*
NO	S1	31	200 <sup>1</sup>
	S2		
	S5	13	
NO <sub>2</sub>	S1	42	40 <sup>2</sup>
	S2		
	S5	30	
SO <sub>2</sub>	S1	2	50 <sup>3</sup>
	S2		
CO	S1	0,3	- <sup>4</sup>
	S2		
O <sub>3</sub>	S1	34	- <sup>4</sup>
	S2		
PM10	S1	17	40 <sup>2</sup>
	S2		
	S5	16	
PM2,5	S2		25 <sup>2</sup>
Benzol	S1	0,5	5 <sup>2</sup>
	S2		
Toluol	S1	1,1	30 <sup>5</sup>
	S2		
m/p-Xylol	S1	0,7	30 <sup>5</sup>
	S2		
Ethylbenzol	S1	0,3	20 <sup>1</sup>
	S2		
Benzo(a)pyren	S1	0,2	1 <sup>2</sup>
	S2		
Arsen	S1	0,3	6 <sup>2</sup>
Blei	S1	3,5	500 <sup>2</sup>
Cadmium	S1	0,1	5 <sup>2</sup>
Nickel	S1	1,4	20 <sup>2</sup>

Messeinheit: µg/m<sup>3</sup>, für CO: mg/m<sup>3</sup>, für Benzo(a)pyren, Arsen, Blei, Cadmium und Nickel: ng/m<sup>3</sup>

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:

<sup>1</sup> Immissionsvergleichswert des HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie)

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

<sup>3</sup> Grenzwert der TA Luft 2002

<sup>4</sup> Kein als Jahresmittel definierter Beurteilungswert in den einschlägigen Regelungen

<sup>5</sup> Vorschlag des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI)

Das Format der tabellarischen und grafischen Darstellungen dieses Berichts wurde 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 kontinuierlichen Messungen waren im Jahr 2017 zu über 99% verfügbar, bis auf die PM10-Messung an S5 mit 98,5%. 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 <sub>2</sub>	S1	200	1 Stunde	0	18
	S2				
	S5				
SO <sub>2</sub>	S1	350	1 Stunde	0	24
	S2				
CO	S1	10 <sup>1</sup>	8 Stunden	0	0
	S2				
O <sub>3</sub>	S1	180 <sup>2</sup>	1 Stunde	5	0
	S2				
	S1	240 <sup>3</sup>	1 Stunde	0	0
	S2				
PM <sub>10</sub>	S1	50	24 Stunden	5	35
	S2				
	S5			4	

Messeinheit: µg/m<sup>3</sup>, für CO: mg/m<sup>3</sup>

\* Als Vergleichswerte wurden die Kurzzeit-Luftqualitätswerte gemäß 39. BImSchV herangezogen (zum Begriff „zulässig“ siehe die Erläuterungen im Lufthygienischen Jahresbericht 2004):

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

<sup>2</sup> Schwelle für die Unterrichtung der Öffentlichkeit durch die zuständige Behörde bei Überschreitung in deren Messnetz

<sup>3</sup> Schwelle für die Auslösung des Alarmsystems durch die zuständige Behörde bei Überschreitung in deren Messnetz

<sup>4</sup> als Mittel über drei Jahre (2015, 2016, 2017)

Zur Beurteilung der Kurzzeitwerte für PM<sub>2,5</sub>, Staubinhaltsstoffe, NO, Benzol, Toluol, m/p-Xylol, und Ethylbenzol liegen keine entsprechenden Luftqualitätswerte vor.

Bei insgesamt durchschnittlicher Sonnenscheindauer war das Jahr 2017 mit 11,3°C wie die Vorjahre um etwa 1 ° wärmer als im langfristigen Mittel<sup>1</sup>. Mehr Sonnenschein als gewöhnlich gab es lediglich im August und September. Die Niederschlagssumme über das Jahr war mit 665 mm etwas erhöht. Abgesehen vom Mai war das erste Halbjahr zu trocken. Das zweite Halbjahr war mit Ausnahme des Monats Oktober zu nass.

Bei den Konzentrationswerten gab es gegenüber dem Vorjahr nur geringe Veränderungen. Die Alarmschwelle für Ozon wurde nicht überschritten und die Informationsschwelle lediglich im Verlauf von fünf Stunden. Obwohl wie im Vorjahr nur 13 Tage mit einem gleitenden Achtstundenmittelwert über 120 µg/m<sup>3</sup> vorkamen, geht die Kennzahl für diesen Langzeitzielwert nur langsam zurück, da hier der hohe Wert von 29 Tagen aus 2015 noch eingeht.

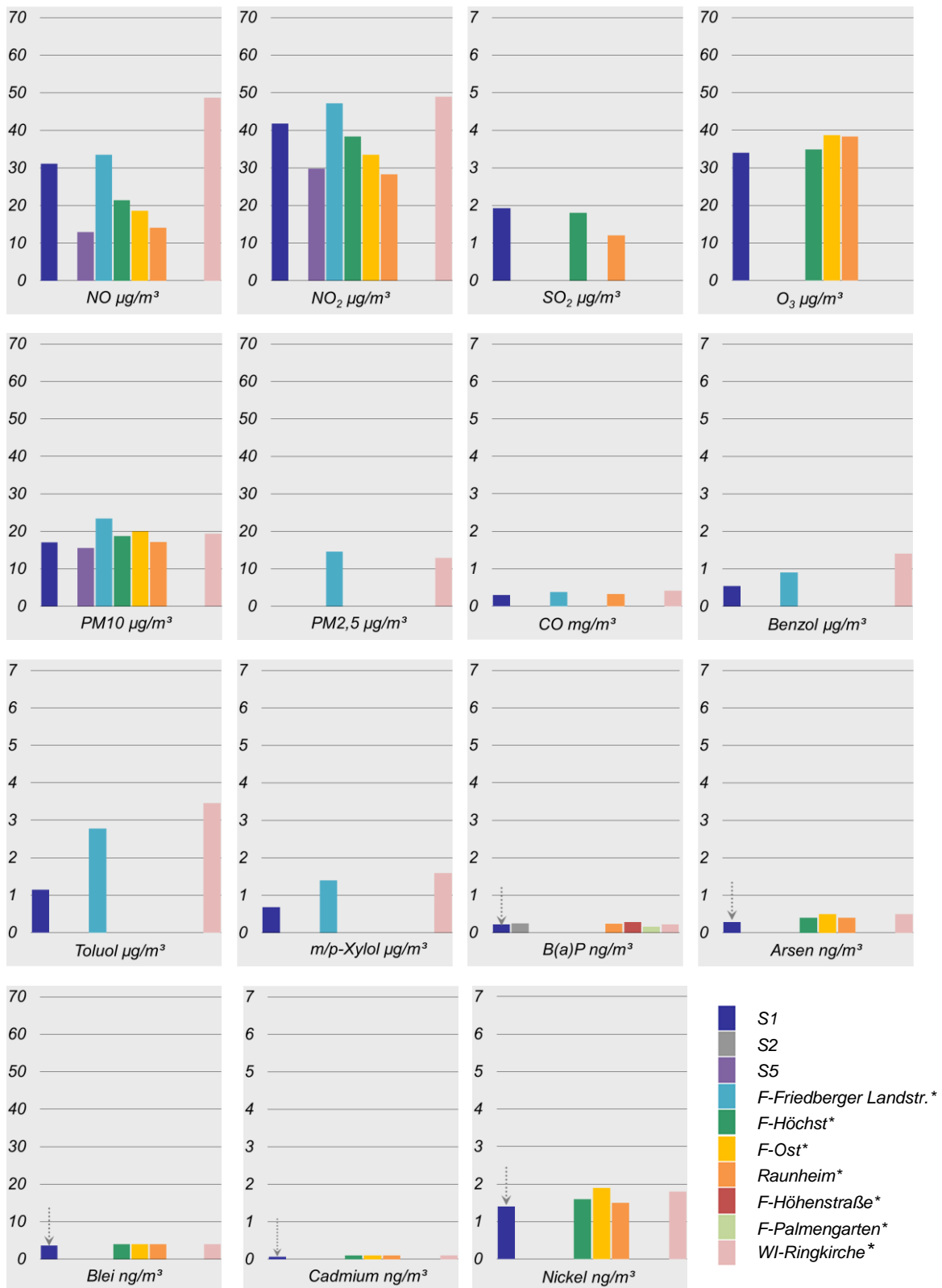
Die Schwelle für das PM<sub>10</sub>-Tagesmittel wurde im Berichtsjahr an fünf (S1) bzw. vier (S5) Tagen überschritten. Selbst im bewohnten Umfeld wäre dies bis zu 35 Tage im Jahr zulässig gewesen.

Über dem Beurteilungswert lag wieder lediglich das Jahresmittel der NO<sub>2</sub>-Konzentration an S1, mit 42 µg/m<sup>3</sup> allerdings weniger deutlich als im Jahr zuvor (45 µg/m<sup>3</sup>). Konzentrationen oberhalb der Kurzzeit-schwelle kamen im Berichtsjahr nicht vor.

Die Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit würden auch in diesem Jahr wieder weitestgehend eingehalten, wenn sie auf Flughäfen anwendbar wären. Die einzige Ausnahme stellt erneut der durch Kfz-Emissionen etwas erhöhte NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert an S1 dar. Er ist vergleichbar mit dem Konzentrationsniveau an ebenfalls verkehrsexponierten, städtischen Standorten und stellt keine Besonderheit des Standorts Flughafen dar.

<sup>1</sup> 1981-2010 an der vom Deutschen Wetterdienst betriebenen Flugwetterwarte im 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, Pfeile = aktuelle FRA-Werte

\*Quellen: Lufthygienischer Monatsbericht Dezember 2017 (gleitende Jahresmittel), HLNUG und Lufthygienischer Jahresbericht 2016 (Teil 2: Staub und Staubinhaltsstoffe), HLNUG. Teil 2 für 2017 lag bis Redaktionsschluss noch nicht vor.

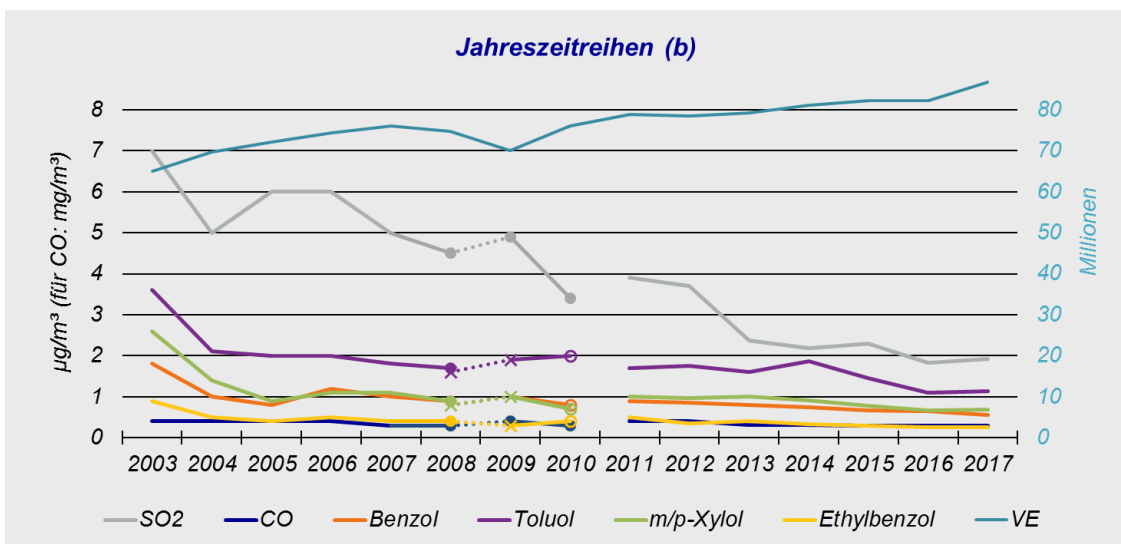
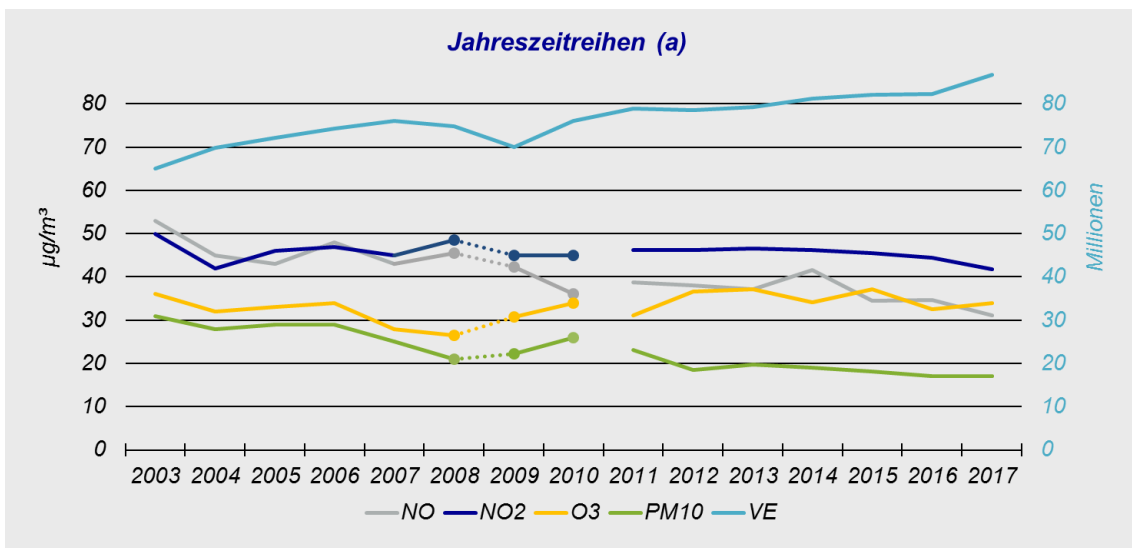
### Vergleich der Fraport-Stationen mit benachbarten HLNUG-Stationen

An den verkehrsexponierten HLNUG-Vergleichsstationen haben die Konzentrationen der Stickoxide und der BTX-Aromaten ebenso wie am Flughafen gegenüber dem Vorjahr geringfügig aber erkennbar abgenommen. Im Jahresmittel kamen keine NO<sub>2</sub>-Werte über 50 µg/m<sup>3</sup> vor, NO-Werte über 40 µg/m<sup>3</sup> nur noch an der Station Wiesbaden – Ringkirche. An den Standorten im städtischen Hintergrund ist dies weniger deutlich zu erkennen. Die Unterschiede im Konzentrationsniveau zwischen den Stationstypen haben sich damit verringert, wobei die Werte an der Flughafenstation S1 weiter in einem Bereich dazwischen liegen.

An allen Standorten waren die 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)

Der abnehmende Trend bei den Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen sowie die unveränderte Partikelkonzentration sind unabhängig von der Entwicklung der Verkehrseinheiten, deren Anzahl im Jahr 2017 deutlich angestiegen ist. Die Fortschreibung der Zeitreihe zeigt wieder das gegenläufige Verhalten von NO und Ozon, selbst bei den relativ kleinen Veränderungen.



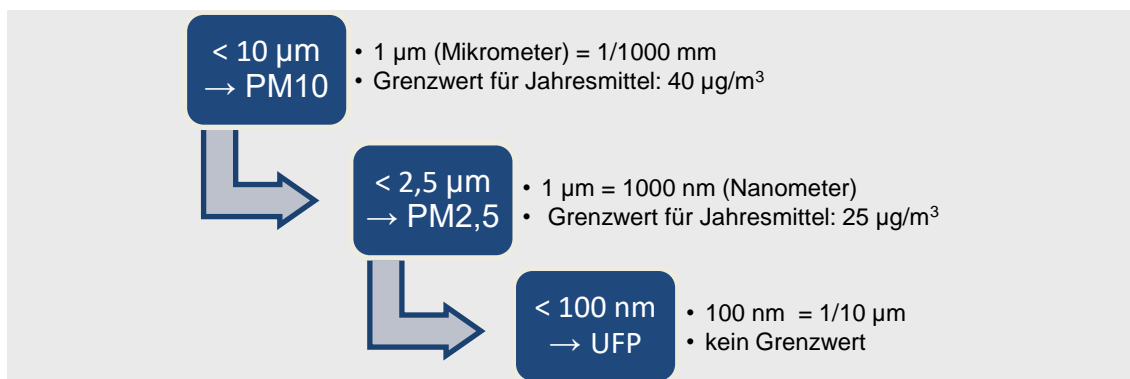
1 VE = 1 Passagier mit Gepäck oder 100 kg Luftfracht bzw. Luftpost  
 Durchgezogene Linien: Messwerte eines Standorts, gepunktete Linien: kleinräumiger Standortwechsel 2008 / 2009, 2010 Verlegung um ca. 1000 m in nord-nordöstliche Richtung  
 Dicke Punkte: Korrektur bei Datenlücken am Standort, Kreuze: geringer Datenumfang am Standort ohne Korrektur, Kreise: Daten von zwei Standorten ohne Korrekturmöglichkeit

## Sonderthema „ultrafeine Partikel“ (UFP)

Unser diesjähriges Sonderthema behandelt eine Partikelgruppe, die noch Gegenstand der Forschung ist und die daher im Rahmen der routinemäßigen Luftqualitätsüberwachung auch nicht zu bewerten ist. Ultrafeine Partikel können bei verschiedenen Prozessen direkt emittiert oder sekundär aus gasförmigen Komponenten gebildet werden. Sie entstehen insbesondere bei Verbrennungsprozessen. Im Innenraumbereich werden UFP z.B. beim Braten, Backen und durch brennende Kerzen freigesetzt. In der Außenluft kommen neben natürlichen Vorgängen vor allem Verbrennungsmotoren als Quellen in Betracht. Im Folgenden werden ausgewählte Aspekte im Hinblick auf Flugzeugemissionen dargestellt.

### Was versteht man unter ultrafeinen Partikeln?

Als „ultrafein“ werden Partikel mit einem Durchmesser unter 100 nm bezeichnet, unabhängig von ihren üblichen physikalischen oder chemischen Eigenschaften.



Einteilung von Partikeln in gebräuchliche Größenklassen

Sie tragen zur Partikelmasse bzw. zur Massenkonzentration kaum bei, stellen aber im Wesentlichen die Anzahl der Partikel. Die Massenkonzentration (µg/m<sup>3</sup>) ist daher kein geeignetes Maß, um das Auftreten ultrafeiner Partikel zu charakterisieren. Stattdessen wird die Konzentration üblicherweise als Anzahl von Partikeln pro Kubikzentimeter angegeben (1/ccm, #/ccm oder #/cm<sup>3</sup>).

### Wie sind UFP zu bewerten?

Die Erscheinungsform der UFP ist sehr vielfältig, und es ist noch nicht klar, welcher Parameter als Zielgröße für eine Bewertung geeignet ist. Dabei sind die wesentlichen Eigenschaften und Kenngrößen in der Regel auch eng mit dem jeweiligen Messkonzept verknüpft:

- chemische Zusammensetzung (Ruß, Metall, ...)
- Gesamtanzahlkonzentration (Partikel pro ccm)
- Anzahlkonzentration eines bestimmten Größenbereiches, Partikelgrößenverteilung
- Oberfläche
- Flüchtigkeit (Bildung und Abbau nicht stabiler Anteile hängt stark von äußeren Bedingungen ab)

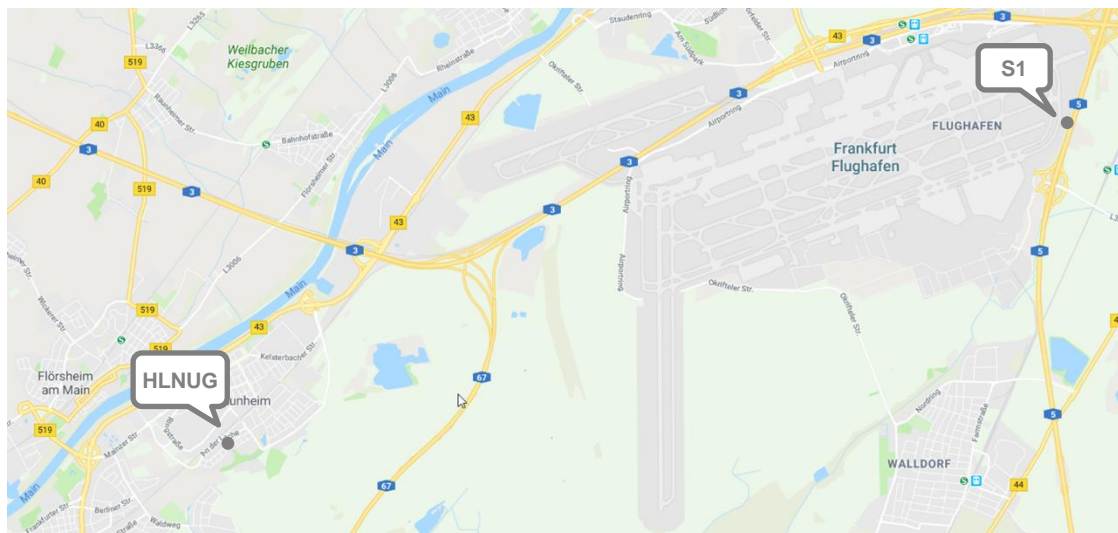
Nach der Modellvorstellung können zumindest unlösliche Partikel über den Atemtrakt umso tiefer in den menschlichen Körper gelangen, je kleiner sie sind, und so auch in entfernten Organen verschiedene schädliche Reaktionen hervorrufen. Es gibt allerdings bisher keine ausreichend belastbaren Erkenntnisse zu spezifischen Wirkungen der UFP in der realen Außenluft, die von der Wirkung anderer bekannter Schadstoffe abgrenzbar wären. Anlässlich der Überarbeitung der EU-Grenzwerte im Jahr 2013 sah die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hinsichtlich eines möglichen spezifischen Gesundheitsrisikos durch UFP „zunehmende, aber noch immer begrenzte Hinweise“. Daher bestand bisher keine Veranlassung für eine Grenzwertempfehlung. Angesichts der Komplexität des Gegenstands und immer noch unzureichender Erkenntnisse aus der Wirkungsforschung ist derzeit die Formulierung einer solchen, notwendigerweise konkreten Empfehlung auch nicht absehbar.

### Gibt es Erkenntnisse aus dem Flughafenbereich?

Bereits im Jahr 2012 veröffentlichte der internationale Flughafenverband ACI (Airports Council International) eine Dokumentation zum Thema Flughäfen und ultrafeine Partikel. Inzwischen gibt es eine Reihe von weiteren Untersuchungen an und um Flughäfen, die in einer aktualisierten Version des Berichts beschrieben werden. Die Veröffentlichung ist im ersten Halbjahr 2018 vorgesehen. Demnach liegen die von Flugzeugtriebwerken emittierten Partikel weitgehend im Größenbereich unter 30 nm. In Flughafennähe werden

erhöhte Konzentrationen beobachtet, wie sie auch an verkehrsexponierten Standorten vorkommen. Mit zunehmender Entfernung nimmt auch die UFP-Konzentration ab.

Ein spezielles UFP-Messprogramm im Hinblick auf den Flughafen Frankfurt wurde im Jahr 2015 vom HLNUG in Kooperation mit dem Umweltbundesamt (Außenstelle Langen) am Standort Raunheim aufgenommen<sup>2</sup>. Die Messergebnisse, Anzahlkonzentrationen der Partikel im Bereich von 3 – 1000 nm, werden im Internet als Halbstundenwerte zur Verfügung gestellt<sup>3</sup>. Die folgende Darstellung bezieht sich auf bereits veröffentlichte Angaben des HLNUG und eigene Auswertung der veröffentlichten Originaldaten aus dem Berichtsjahr 2017. Zusätzlich werden Vergleichswerte der Flughafenstation S1 herangezogen.



Standort Raunheim der UFP-Messung des HLNUG und S1 der Flughafenvergleichsdaten. Kartenhintergrund: google maps

### Wie hoch ist die UFP-Konzentration?

Konzentrationsangaben sind nicht nur abhängig vom Standort, sondern auch in hohem Maß von der zeitlichen Auflösung. Je nach Messfrequenz und Mittelungsintervall bei der Auswertung werden extreme Werte mehr oder weniger nivelliert. Unter sonst gleichen Bedingungen können auch unterschiedliche Messzeiträume, z.B. Jahreszeiten, zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Wie bereits erwähnt hängt im Fall der UFP außerdem die Messgröße selbst stark vom Messkonzept ab und umgekehrt. Aus diesen Gründen sind UFP-Messergebnisse oft nur schwer bzw. nur mit Einschränkungen vergleichbar.

Unter den oben angeführten Vorbehalten sind die Angaben in der folgenden Tabelle zu sehen, die einer Veröffentlichung des HLNUG entnommen wurden.

Standort	Merkmale	Messbereich (nm)	Mittelwert (1/cm <sup>3</sup> )	Median (1/cm <sup>3</sup> )	Max. 1h-Wert (1/cm <sup>3</sup> )	Mittelungsintervall
Raunheim	Städt. HG	3 – 1000	16.100	12.300	142.000	09/2015– 03/2016
Langen	Städt. HG	3 – 1000	12.200	10.500	67.000	2010 – 2013
Berlin	Städt. HG	4,5 – 1000	8.700	7.700	49.000	05/2014 – 08/2014
Dresden	Verkehr	5 – 800	14.923	-	-	2010 – 2013
Leipzig	Verkehr	5 – 800	16.321	-	-	2010 – 2013
Melpitz	Ländl. HG	5 – 800	5.651	-	-	2010 – 2013
HG = Hintergrund						

Vergleich von UFP-Konzentrationen nach Jacobi et al. 2016

<sup>2</sup> Ergebnisse einer weiteren HLNUG-Station in Frankfurt Schwanheim, nördlich des Flughafens, die seit Oktober 2017 in Betrieb ist, lagen bei Redaktionsschluss noch nicht vor.

<sup>3</sup> <https://www.hlnug.de/?id=9231&station=601>

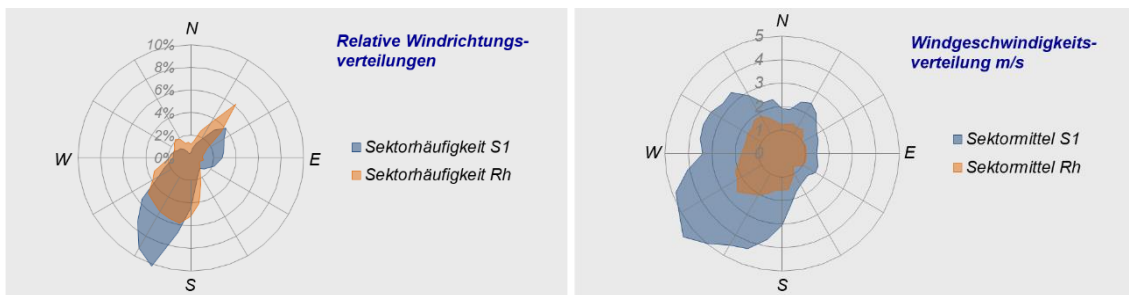
### Wie kann man einen Flughafeneinfluss in Messwerten erkennen?

Die erste Auswertung des HLNUG hatte gegenüber vergleichbaren Standorten im städtischen Hintergrund erhöhte UFP-Konzentrationen in Raunheim ergeben. Da Raunheim auch im Einflussbereich von Verkehrsquellen liegt (A67, A3, B43), ist dies allein noch kein eindeutiger Hinweis auf den Flughafen als UFP-Quelle. Der Tagesgang der UFP-Konzentration zeigte ein ähnliches Muster wie der von anderen Komponenten. Üblicherweise findet man Maxima während der morgendlichen und abendlichen Kfz-Verkehrsspitzen und niedrigere Konzentrationen über den Nachmittag bei meist besserer vertikaler Durchmischung der Atmosphäre mit entsprechender Verdünnung der Schadstoffe.

Wie bereits in früheren Jahresberichten dargestellt, können Flughafeneinflüsse auf die Schadstoffkonzentration im Umland nur mit detaillierten Auswertungen erkennbar gemacht werden. Hilfsmittel sind dabei Standortvergleiche, Vergleiche verschiedener Komponenten und Modellrechnungen.

### Standortvergleich Windrichtung und -geschwindigkeit

Für die weitere Analyse werden zunächst die Windrichtungshäufigkeiten und die mittleren Windgeschwindigkeiten der beiden Standorte Raunheim und Flughafen verglichen. Die richtungsabhängigen Häufigkeiten und Mittelwerte sind jeweils in 10°-Sektoren eingeteilt. Der Wert des 90°-Sektors (Ost = E) gilt z.B. für die Richtungen 86° bis 95°. Er wird in der Sektormitte bei 90° aufgetragen.



Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen (links) und Richtungsabhängigkeit der Windgeschwindigkeit (rechts) 2017, jeweils Raunheim (orange) und Flughafen S1 (blau)

Die Richtungsverteilung beider Standorte ist jeweils durch ein Maximum aus Süd-Südwest und ein zweites, schwächeres aus Nordost geprägt. Dabei sind die süd-südwestlichen Windrichtungen am Flughafen häufiger als in Raunheim. Für den Flughafen stellt dies eine charakteristische Verteilung dar, wie sie in den meisten Jahren vorherrscht. Aufgrund der freieren Anströmung sind die Windgeschwindigkeiten am Flughafen generell deutlich höher als in Raunheim. Entsprechend den damit verknüpften Großwetterlagen ist die mittlere Windgeschwindigkeit an beiden Standorten aus südwestlichen bis westlichen Richtungen deutlich höher als aus allen östlichen Richtungen.

Im Verlauf von Ostwetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten ist auch der vertikale Luftaustausch eingeschränkt, so dass sich Schadstoffe in Bodennähe anreichern können. Neben der Lage von Emissionsquellen kann dies die Konzentrationswindrose eines Schadstoffs beeinflussen. Häufig sind daher die Konzentrationen in den östlichen Sektoren erhöht.

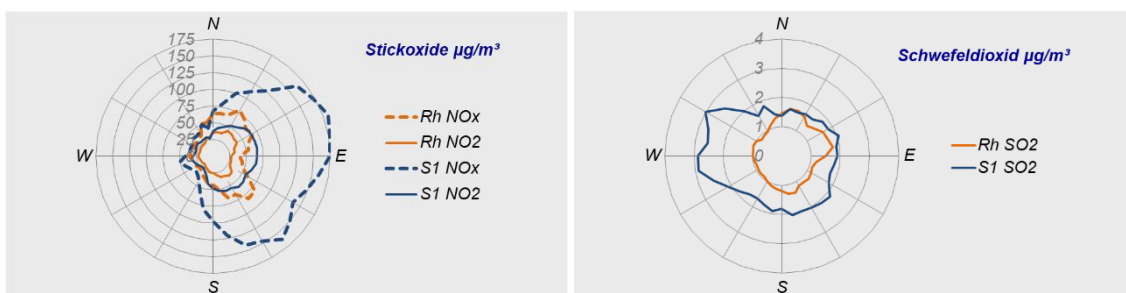
### Windrichtungsabhängigkeit von Stickoxiden und Schwefeldioxid

Deutlich erhöhte Stickoxidkonzentrationen bei östlichen gegenüber westlichen Windrichtungen finden sich auch in Raunheim und am Flughafen. Die stärkere Ausprägung der Konzentrationswindrosen in nordöstlicher und südöstlicher Richtung weist allerdings auch auf den Einfluss nahe gelegener Autobahnen hin: A67 und Mönchhofdreieck in Raunheim sowie A3/A5 und Frankfurter Kreuz in unmittelbarer Nähe des Flughafens. Eine solche Beeinflussung der Station S1 am Flughafen wurde bereits in früheren Untersuchungen festgestellt.

Der stärkere Autobahneinfluss an der Messstelle S1 ist hier zu erkennen an den insgesamt höheren Werten und dem größeren Verhältnis von  $\text{NO}_x$ <sup>4</sup> zu  $\text{NO}_2$ . Hohe  $\text{NO}$ -Anteile im Gesamt- $\text{NO}_x$  spiegeln Primäremissionen in Quellnähe wieder. Mit zunehmender Entfernung von der Quelle wird  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  oxidiert, so dass sich  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NO}_2$ -Werte angleichen.

<sup>4</sup> Die Stickoxidwerte ( $\text{NO}_x$ ) werden als  $\text{NO}_2$ -Äquivalent in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  angegeben. Dazu wurde  $\text{NO}$  mit dem Massenverhältnis 46:30 von  $\text{NO}_2$ : $\text{NO}$  umgerechnet.





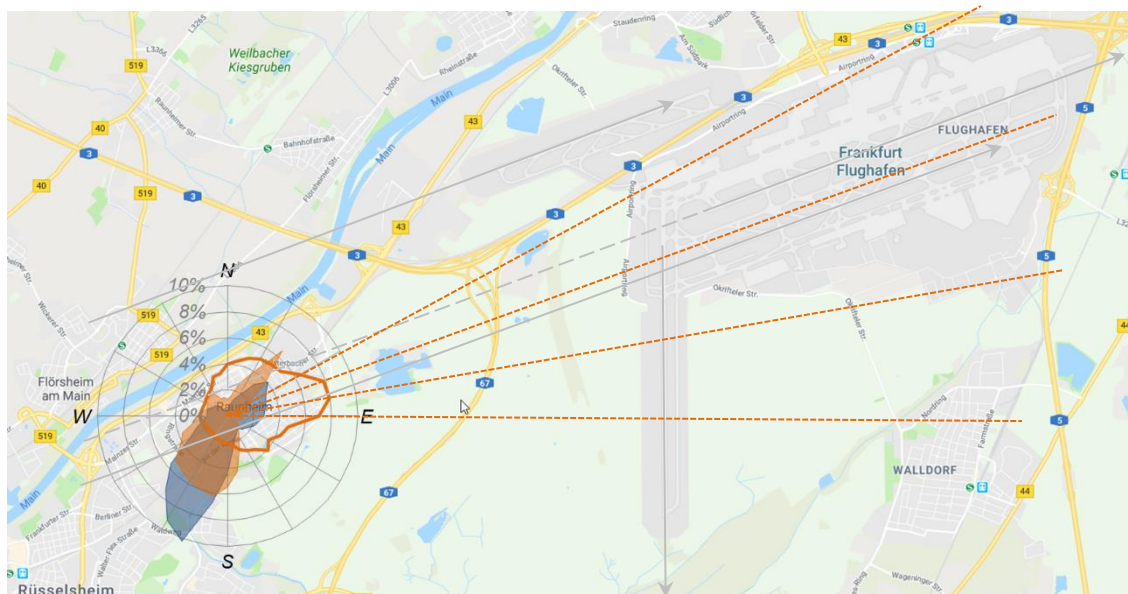
Konzentrationswindrosen der Stickoxide (links) und Schwefeldioxid (rechts) 2017, jeweils Raunheim (orange) und Flughafen S1 (blau)

Ein anderes Muster zeigt sich in der Windrichtungsabhängigkeit von  $\text{SO}_2$ . Die meisten heute gebräuchlichen Kraft- und Brennstoffe enthalten nur noch wenig Schwefel, so dass als wesentliche Quelle insbesondere der Straßenverkehr kaum in Betracht kommt. Wegen des höheren Schwefelgehalts des Flugzeugkraftstoffs Kerosin kann sich hier im Nahbereich ein Einfluss des Flugverkehrs niederschlagen. Auch wenn die Konzentrationswerte im unteren messbaren Bereich liegen, zeigt sich in beiden Messreihen jeweils ein mehr oder weniger ausgeprägtes Maximum aus Richtung Flughafen. An der Flughafenstation liegt es demnach abweichend zu den oben beschriebenen Befunden bei anderen Komponenten in den westlichen Sektoren. In Raunheim treten etwas höhere  $\text{SO}_2$ -Konzentrationen außer bei östlicher Richtung (Flughafen) auch bei nordöstlicher Richtung auf, was durch andere lokale Quellen verursacht sein dürfte. Auch Schiffsemissionen auf dem Main könnten dabei eine Rolle spielen. Für alle drei Sektoren gilt, dass die entsprechenden Häufigkeiten sehr gering sind. Daher ist die Belastbarkeit einer Verursacherzuordnung zusätzlich eingeschränkt.

Nach Modellrechnungen ist zwar am Flughafen selbst und auch in Raunheim noch von einem Beitrag des Flughafens auszugehen, der aber im Fall der Stickoxide wegen der dominierenden Einflüsse des Straßenverkehrs in den Ergebnissen nicht erkennbar ist. Auch der Flughafenbeitrag zur Schwefeldioxidkonzentration hat wegen des sehr niedrigen Konzentrationsniveaus kaum lufthygienische Bedeutung.

#### Windrichtungsabhängigkeit der UFP

Erwartungsgemäß ist auch die UFP-Konzentration in Raunheim bei Windrichtungen mit östlicher Komponente von Nord über Ost bis Südost höher als bei westlichen Windrichtungen. Eine Besonderheit stellt allerdings das stark ausgeprägte Maximum aus östlicher, leicht nach Ost-Nordost verschobener Richtung dar, das sich bei anderen, z.B. Kfz-typischen Schadstoffen nicht findet.



Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in Raunheim (orangefarbene Fläche) und am Flughafen (blaue Fläche) sowie Windrichtungsverteilung der UFP-Konzentration in Raunheim (orangefarbene Linie) 2017. Flugzeugbewegungen bei Betriebsrichtung 07 (Ostwind) sind durch graue Pfeile angedeutet. Die orangefarbenen, gestrichelten Linien markieren die Mittelachsen der  $10^\circ$ -Windrichtungssektoren mit besonders hohen UFP-Konzentrationen. Die UFP-Konzentration ist in % von 500.000 Partikeln pro ccm skaliert, d.h. der äußere 10%-Kreis entspricht 50.000 pro ccm und das maximal vorkommende Sektormittel am 8%-Kreis entspricht 40.000 pro ccm. Kartenhintergrund: google maps

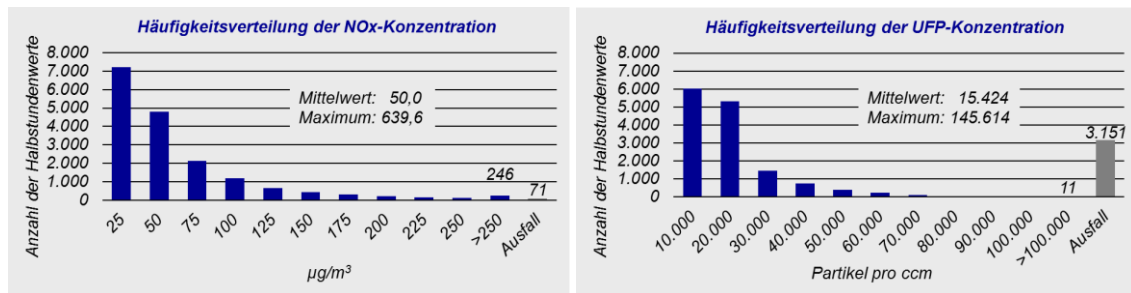
Die beiden betroffenen 10°-Sektoren mit der stärkeren nördlichen Komponente umfassen das Flughafen-vorfeld und den Bereich des Startbahnkopfs der Bahn 18W, wo sich in Modellrechnungen auch die höchsten Stickoxidbeiträge aus Flugzeugtriebwerken ergeben haben. Die beiden anderen Sektoren weisen in einen Bereich der schon eher südlich des Flughafens liegt. In dieser Richtung liegt noch ein Teil der Startbahn 18W aber auch die Autobahn A67. Rein geometrisch kommen ebenso Abschnitte des Landeanflugs auf die Südbahn in unmittelbarer Nähe der Station Raunheim in Betracht. Die Flughöhe beträgt hier allerdings über 300 m, sodass ein solcher Beitrag gering sein dürfte. Dies ergibt sich auch aus den Erläuterungen zur vertikalen Durchmischung weiter unten.

Für die Windrichtungen mit deutlich erhöhter UFP-Konzentration in Raunheim gilt ebenfalls, dass sie selten sind und mit geringen Windgeschwindigkeiten vorkommen, bei denen die Richtung stärker schwanken kann. Daher ist bei der beschriebenen Richtungsabhängigkeit von einer gewissen Bandbreite auszugehen. Dennoch legt die Abweichung von den Kfz-geprägten Schadstoffverteilungen einen Flughafeneinfluss auf die UFP-Konzentration in Raunheim bei entsprechender Windrichtung nahe.

### Einfluss der vertikalen Durchmischung auf die UFP-Konzentration

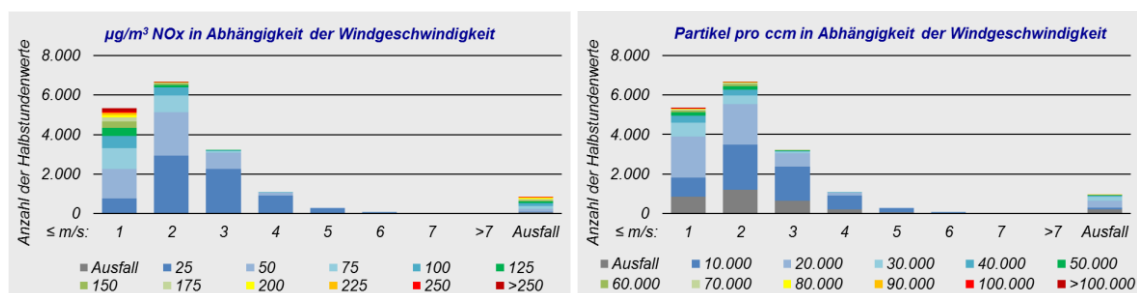
Gelegentlich wird die Vermutung geäußert, dass Flugzeuge auch beim Überflug bzw. Vorbeiflug aus größerer Höhe einen nennenswerten Beitrag zur Schadstoffkonzentration in Bodennähe leisten. Als Hinweis darauf werden erhöhte Konzentrationen bei höheren Windgeschwindigkeiten angeführt, die bei stärkerer Turbulenz auch zu einem verstärkten Austausch von oben nach unten führen. In diesem Rahmen kann nur indirekt geprüft werden, ob es in den vorliegenden Messwerten Anzeichen für einen solchen Effekt gibt. Dazu werden Häufigkeitsverteilungen der Konzentration in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit sowie von der Ausbreitungsklasse herangezogen. Ein Vergleich zwischen den NOx- und den UFP-Verteilungen soll zeigen, ob es entsprechende Auffälligkeiten bei UFP gibt, die beim Kfz-dominierten NOx nicht zu erkennen sind.

Dabei soll die Klasseneinteilung beider Komponenten in etwa vergleichbar sein, d.h. insbesondere gleich viele Klassen enthalten und das ganze Spektrum bis auf wenige Extremwerte abbilden. Auch soll der Bereich um den Mittelwert bzw. um die häufigsten Werte nicht zu stark aggregiert sein. Wegen der technisch sehr viel anspruchsvolleren Messmethode enthält die UFP-Messreihe erwartungsgemäß erheblich mehr Lücken als die NOx-Messreihe. Auch Ausfälle müssen berücksichtigt werden, damit das Bild nicht verzerrt wird.



Häufigkeitsverteilung der Halbstundenwerte von NOx (links) und UFP (rechts) in Raunheim 2017

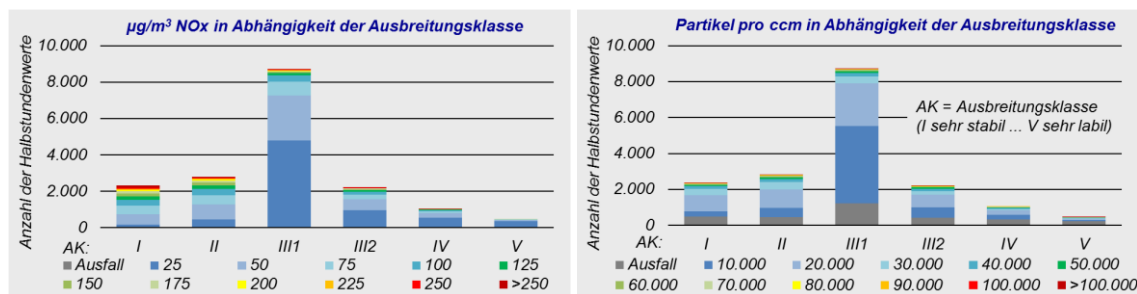
Die gewählte Klasseneinteilung stellt einen Kompromiss dar, der nicht alle Vorgaben vollständig erfüllen kann. Ein Unterschied zwischen beiden Verteilungen besteht darin, dass sehr hohe Werte oberhalb der höchsten aufgelösten Klasse beim NOx deutlich häufiger auftreten als bei den UFP. Dies ist auch in den folgenden, nach Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse differenzierten Verteilungen zu erkennen.



Verteilung der Halbstundenwerte von NOx (links) und UFP (rechts) in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit in Raunheim 2017

Die höchsten Werte finden sich für beide Komponenten in den zwei unteren Windgeschwindigkeitsklassen. Wenn sich die Ausfälle in der UFP-Messreihe nicht wider Erwarten systematisch in bestimmten Größenklassen häufen, dann besteht kein grundlegender Unterschied zwischen den beiden Verteilungen.

Das gleiche gilt für die Darstellung nach Ausbreitungsklassen. Stabile Schichtung behindert den Vertikal-austausch, so dass sich Schadstoffe aus Bodennähe anreichern können. Die höheren Werte finden sich daher in den stabileren Klassen, was beim NO<sub>x</sub> wegen der häufigeren sehr hohen Werte deutlicher zu sehen ist. Abgesehen davon und von der größeren Zahl der Ausfälle bei den UFP, sind die beiden Verteilungen sehr ähnlich.



Verteilung der Halbstundenwerte von NO<sub>x</sub> (links) und UFP (rechts) in Abhängigkeit der Ausbreitungsklasse in Raumheim 2017. Ermittlung der Ausbreitungsklassen in Anlehnung an VDI 3782 (2017) aus DWD-Daten WebWerdis

Die vorliegenden Auswertungen können das komplexe Zusammenwirken von Emissionsverhalten, Geometrie, Windrichtung, atmosphärischer Schichtung und den entsprechenden Häufigkeiten nur in einzelnen Aspekten abbilden. Dabei haben sich zumindest keine offensichtlichen Hinweise auf einen nennenswerten UFP-Beitrag aus größerer Höhe ergeben. Dies hätte auch den vorliegenden Erkenntnissen über die Ausbreitung von Flugzeugemissionen widersprochen. Der Transport erfolgt überwiegend horizontal, wenn auch aus einer Schicht relativ großer vertikaler Mächtigkeit. Hierzu tragen die unteren Segmente der Landeanflüge und der Startvorgänge bei, aber auch Triebwerksemissionen aus allen übrigen Bodenbewegungen, wobei durch größeren Austrittsimpuls und thermischen Auftrieb eine stärkere vertikale Anfangsdurchmischung entsteht als z.B. bei Emissionen des Straßenverkehrs, s. Lufthygienischer Jahresbericht 2011.

### Vergleich mit der Modellzeitreihe von SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub>

Zur Simulation des speziellen Quell- und Ausbreitungsverhalten von Flugzeugemissionen wird das Modell Lasport eingesetzt. Es berücksichtigt alle individuellen Flugzeugbewegungen sowie eine stundenfein aufgelöste Zeitreihe meteorologischer Daten. Näherungsweise geht auch der Einfluss von Wirbelschleppen ein.

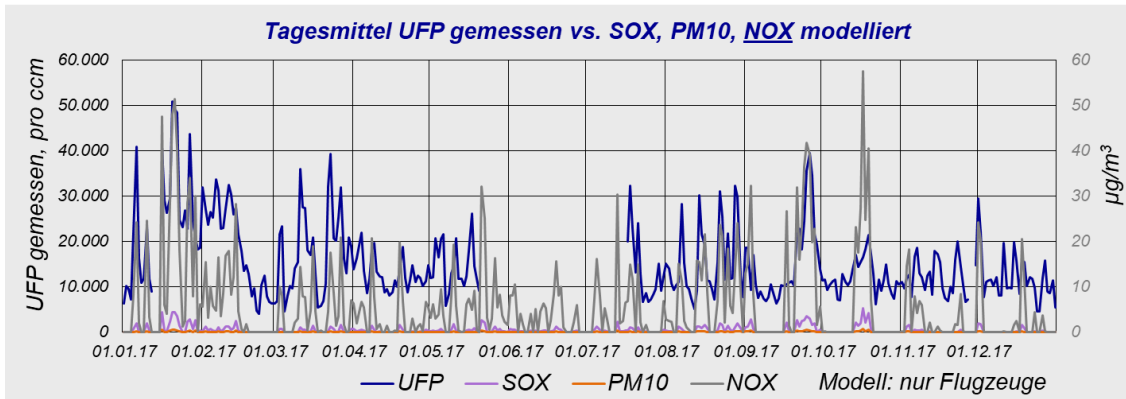
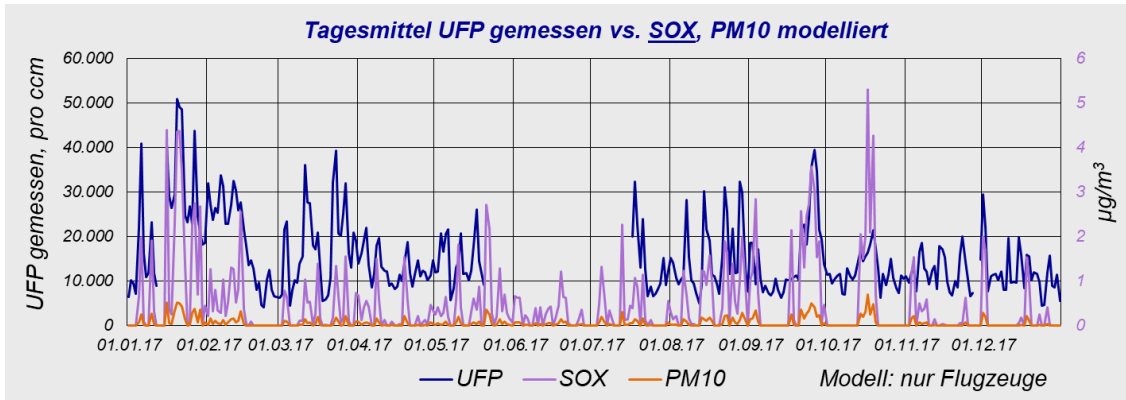
Das Modell ist derzeit noch nicht für ultrafeine Partikel ausgelegt, u.a. weil noch keine anerkannten Emissionsfaktoren für die Partikelanzahl im Triebwerksabgas zur Verfügung stehen. Wenn die gemessene UFP-Konzentration stark durch Flugzeuge geprägt ist, könnte sich aber deren zeitliches Muster auch in der modellierten Zeitreihe einer anderen Komponente der Flugzeugemission wiederfinden. Dies könnte z.B. bei SO<sub>2</sub> der Fall sein, das proportional zum verbrannten Kraftstoff emittiert wird. Ebenso ist ein Zusammenhang zwischen der Anzahlkonzentration der UFP mit der modellierten Massenkonzentration von PM<sub>10</sub> oder Stickoxiden denkbar, aber nicht notwendiger Weise vorauszusetzen.

In den nachfolgenden Grafiken sind jeweils Tagesmittel der gemessenen Partikel-Anzahlkonzentration (UFP) den Modellwerten aus Flugzeugemissionen dieser Komponenten gegenübergestellt:

- Schwefeloxide (SO<sub>x</sub>, entspricht im Wesentlichen Schwefeldioxid)
- Partikel-Massenkonzentration (PM<sub>10</sub>)
- Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

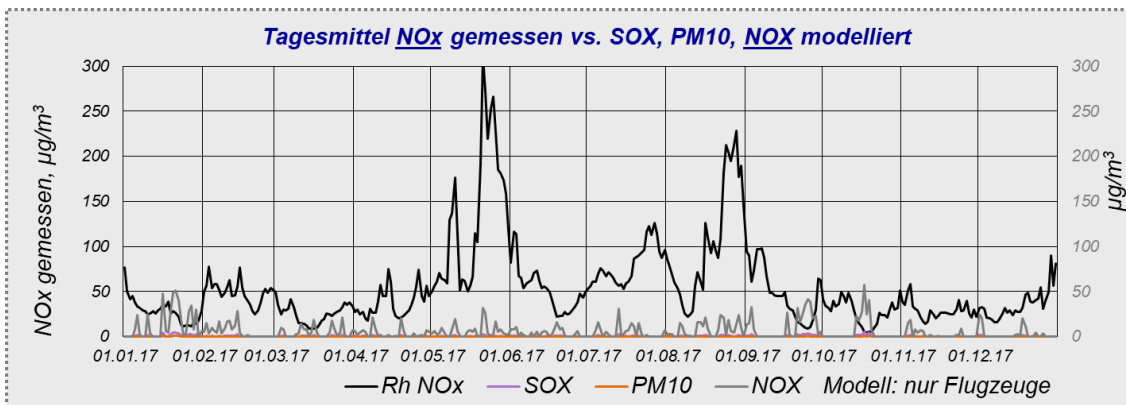
Bei den Modellwerten wurde die ursprüngliche Bezeichnung aus dem Modell beibehalten, um sie gegenüber gemessenen Werten deutlicher abzugrenzen. Messung und Modellwerte beziehen sich zeitgleich auf den Standort Raumheim.

Die UFP-Messreihe enthält eine größere Datenlücke im Sommer 2017. Sie setzt auf einem Basisniveau von ca. 10.000 pro ccm auf und variiert zumindest teilweise nach einem gemeinsamen zeitlichen Muster mit den simulierten Flugzeugbeiträgen an Schwefeloxiden, PM<sub>10</sub> und Stickoxiden. Allerdings kommen auch UFP-Spitzen ohne entsprechende erhöhte Modellwerte vor.



Zeitreihe der Tagesmittel aus UFP-Messung und Modellwerten anderer Komponenten für Raunheim 2017. Die rechte Y-Achse gilt für die Modellwerte und ist jeweils optimiert für die hervorgehobene Komponente des Modells. Oben: SOX (gilt auch für PM10, NOX außerhalb der Skala), unten: NOX (gilt auch für SOX und PM10)

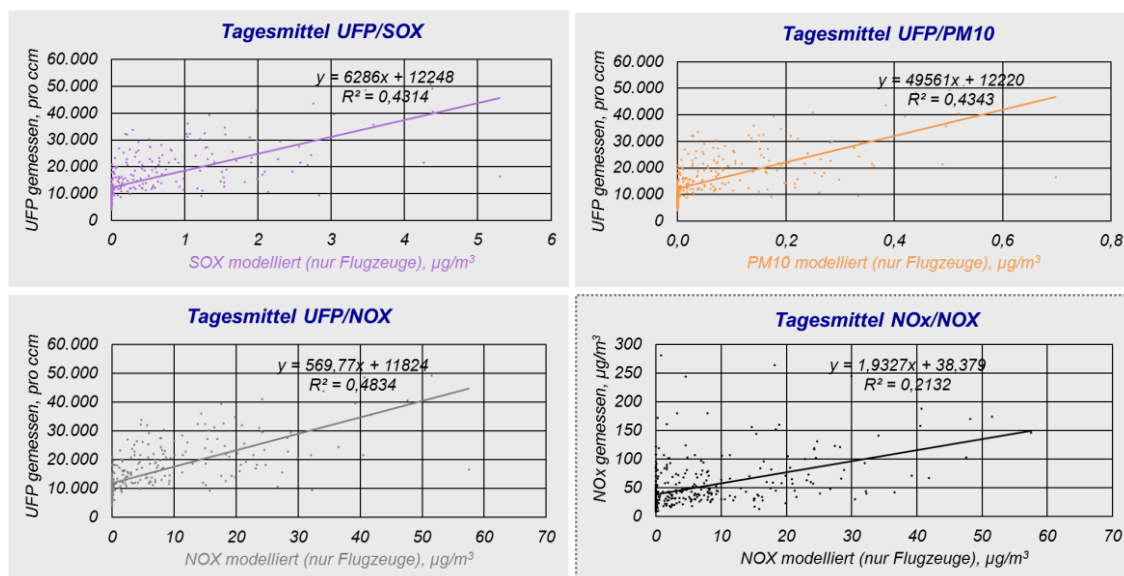
Vergleicht man den modellierten NOX-Beitrag von Flugzeugen nicht mit der UFP-Messung sondern mit der in Raunheim gemessenen NOx-Konzentration, dann ist ein solches gemeinsames Muster nicht zu erkennen.



Zeitreihe der Stickoxid-Tagesmittel aus Messung (NOx) und Modellwerten (NOX) für Raunheim. Hervorhebung des Diagramms, um zu verdeutlichen, dass hier anders als in den vorangegangenen beiden Diagrammen die gleiche Komponente gemessen und modelliert wurde. Die Modellwerte können allerdings nur den flugzeugbedingten Teil der gemessenen Gesamtimmersion abbilden.

Eine Beeinflussung der UFP-Messwerte in Raunheim durch Flugzeugemissionen scheint auch hier erkennbar zu sein, während die NOx-Messwerte - wie bereits erwähnt - stärker durch andere lokale Quellen bestimmt ist. Allerdings muss ein gemeinsames zeitliches Muster in Mess- und Modellergebnissen nicht zwangsläufig einen kausalen Zusammenhang bedeuten. Hier kann sich auch eine gemeinsame Abhängigkeit z.B. von der Witterung oder von übergeordneten Emissionsmustern (Tagesgängen) auswirken. Umgekehrt kann ein Zusammenhang dadurch undeutlicher werden, dass die Ausbreitungssituation im Modell nur eine Näherung der realen Verhältnisse im gesamten Modellgebiet darstellen kann, wobei es u.a. zu einem zeitlichen Versatz kommen könnte. Derartige Störeinflüsse werden durch die Wahl von Tagesmittelwerten gegenüber höher aufgelösten Daten reduziert, wenn auch nicht ganz ausgeschaltet.

Die folgenden „Korrelations“-Diagramme stellen auch keine echte Korrelationsanalyse dar, deren Signifikanz mit statistischen Methoden zu prüfen wäre. Dies würde einige Randbedingungen<sup>5</sup> voraussetzen, die hier nicht ohne weiteres zutreffen.



„Korrelation“ der Tagesmittelwerte zwischen Messung und Modell für Raunheim 2017. Oben links und rechts sowie unten links: UFP-Messung gegen jeweils eine andere modellierte Komponente. Unten rechts: NOx-Messung gegen NOx-Modell (NOx, Flugzeuge)

Auch in dieser orientierenden Darstellung drängt sich ein Zusammenhang mit der gemessenen UFP-Konzentration auf, der für alle drei Modell-Komponenten etwa gleich stark zu sein scheint, etwas zunehmend von SOx und PM10 zu NOx (s. die ersten drei von vier Teildiagrammen oben). Der Achsenabschnitt der Regressionsgeraden liegt in allen drei Fällen bei ca. 12.000 Partikeln pro ccm (y-Wert bei  $x = 0$ ). Demnach sind im Tagesmittel UFP-Messwerte (y) in dieser Höhe zu erwarten, wenn sich nach dem Modell keine Beiträge aus Flugzeugemissionen ergeben ( $x = 0$ , bei entsprechender Windrichtung). Es ist in etwa das Konzentrationsniveau, das auch für andere Standorte im städtischen Hintergrund ermittelt wurde, wenn auch immer noch etwas höher.

Erwartungsgemäß ist der Zusammenhang zwischen der gemessenen Stickoxid-Konzentration und deren modelliertem Anteil aus Flugzeugemissionen wesentlich unschärfer (s. viertes Teildiagramm oben). Die mehr oder weniger stark ausgeprägten Korrelationen der UFP-Messung mit den Modellergebnissen für bereits simulierbare Komponenten aus Flugzeugemissionen fügen sich gut in das Bild ein, das bereits aus der Analyse der Messergebnisse gewonnen wurde. Sie stellen daher auch eine Bestätigung des Modells dar.

### Fazit und Ausblick

Die Messungen des HLNUG/UBA legen einen Einfluss des Flughafens auf die UFP-Konzentration in Raunheim nahe, wenn auch nicht den einzigen. Die entsprechenden Windrichtungen sind relativ selten und normalerweise mit geringen Windgeschwindigkeiten verknüpft. Die höchsten UFP-Konzentrationen werden wie bei anderen Schadstoffkomponenten bei schwachem Wind und stabiler atmosphärischer Schichtung mit eingeschränktem Vertikalaustausch registriert. Hinweise für einen Beitrag aus größerer Höhe durch Vorbeiflug an der Station Raunheim haben sich nicht ergeben. Ein Vergleich mit modellierten Zeitreihen anderer Komponenten weist darauf hin, dass die zeitliche Struktur einer Beeinflussung durch den Flughafen zumindest näherungsweise im Modell abgebildet werden kann.

Das UFP-Konzentrationsniveau in Raunheim entspricht dem an anderen, typischerweise stärker verkehrsexponierten Standorten. Für eine Bewertung der lufthygienischen Relevanz gibt es in absehbarer Zeit keine belastbare Grundlage.

<sup>5</sup> Normalverteilung und Unabhängigkeit innerhalb der Stichprobe

In Zukunft wird es auch möglich sein, die Emission und Ausbreitung von ultrafeinen Partikeln durch den Flugverkehr mit Lasport zu modellieren. Eine Emissionsbegrenzung für die Zulassung von Triebwerken wird derzeit von der ICAO (International Civil Aviation Organization) erarbeitet. Zunächst wird dies für die massebezogene Konzentration aller Partikel der Fall sein, später auch für die Anzahlkonzentration der ultrafeinen Partikel.

Das Umweltbundesamt hat ein Forschungsprojekt aufgelegt, das den Einfluss des Flughafens Frankfurt auf die UFP-Konzentration in seiner Umgebung untersuchen soll. Dazu werden sowohl Modellrechnungen als auch vorhandene Messreihen herangezogen. Fraport unterstützt dieses Projekt im Rahmen des wissenschaftlichen Begleitkreises. Neue Erkenntnisse zum Thema werden auf der Fraport-Internetseite veröffentlicht.

### **Weitere Informationen:**

Fraport AG  
[www.fraport.de](http://www.fraport.de)

HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie)  
[www.hlnug.de](http://www.hlnug.de)

REVIHAAP  
[http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf)

ACI EUROPE: Ultrafine Particles at Airports. 2012  
<https://www.aci-europe.org/component/downloads/downloads/3440.html>

Jacobi et al. 2016  
<https://www.hlnug.de/themen/luft/sonstige-berichte/ultrafeine-partikel.html>

Bestimmung der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier  
VDI 3782 (2017) Blatt 6

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  
[http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/existing\\_leg.htm](http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/existing_leg.htm)

DWD-Daten WebWerdis  
<https://werdis.dwd.de>