



SOURCE FFR measurements · modelling

AP2-Bericht: UFP-Immissionsmessungen

Berichtszeitraum: April 2023 – Dezember 2025

Markus Hermann, Barbara Harm-Altstädter, Florian Ungeheuer & Alexander Vogel

22.04.2026

Aufgaben des AP2

- **AP 2.1 (Kap 4):** Messtandorte für UFP-Immissionsmessungen
- **AP 2.2 (Kap 5):** Qualitätssicherung der UFP-Immissionsmessungen
- **AP 2.3 (Kap 6):** Anzahlkonzentration und Partikelgrößenverteilung flüchtiger und nicht-flüchtiger Partikel
- **AP 2.4 (Kap 7):** Messung von Ruß
- **AP 2.5 (Kap 8/9):** Chemische Charakterisierung von UFP & Partikelmorphologie
- **AP 2.6 (Kap 10):** Vertikale UFP-Messungen
- **AP 2.7 (Kap 11):** Mobile Messungen im Umfeld stationärer Messstellen
- **AP 2.1 (Kap 12):** UFP-Immissionsdaten von dritten Anbietern

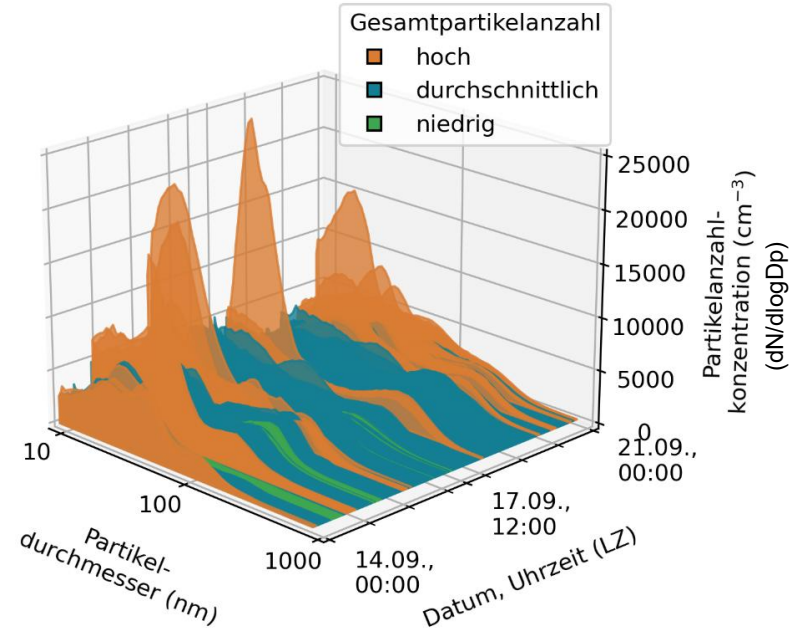
AP2.1: Messtandorte für UFP-Immissionsmessungen

- Messungen vor allem entlang der beiden Hauptwindrichtungen (**Südwest** und **Nordost**)
- Reichweite an Hand von Literaturdaten und vorläufiger Modellierung von ca. 15 km abgeschätzt
- Auswahl auch bestimmt durch Machbarkeit



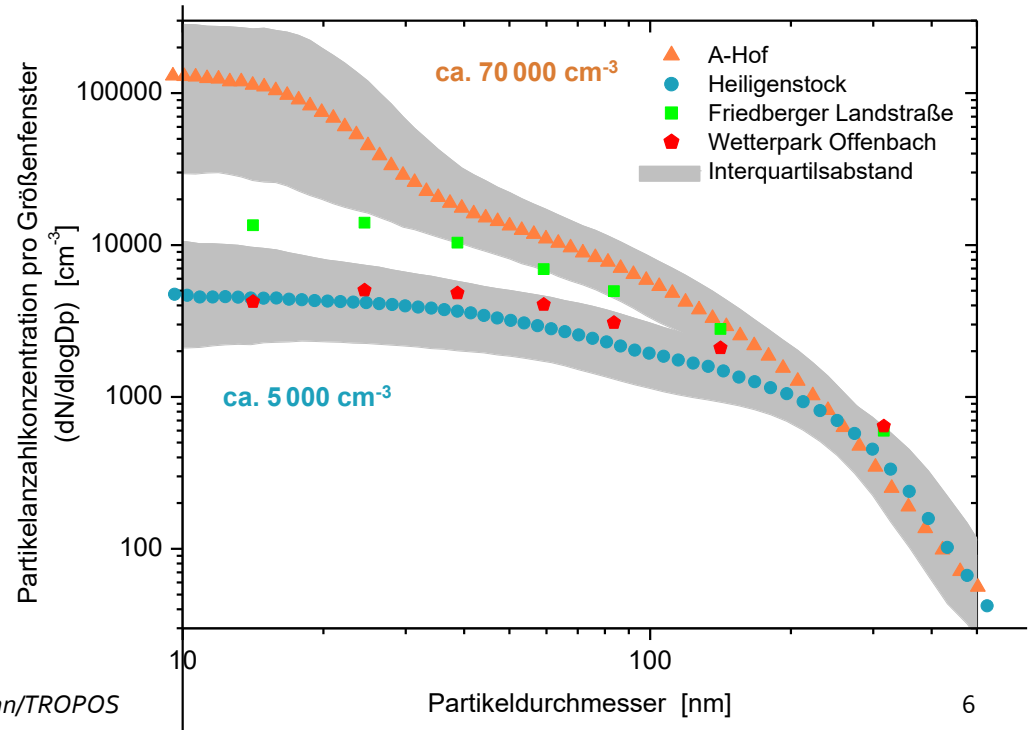
AP2.3: Anzahlkonzentration und Partikelgrößenverteilung aller und nicht-flüchtiger Partikel

- Partikelanzahlgrößenverteilungen von nicht-flüchtigen Partikeln und aller Partikel wurden gemessen
- Hohe Variation möglich (s. r.), Vergleich mit Modellierung von Stundenmittelwerte



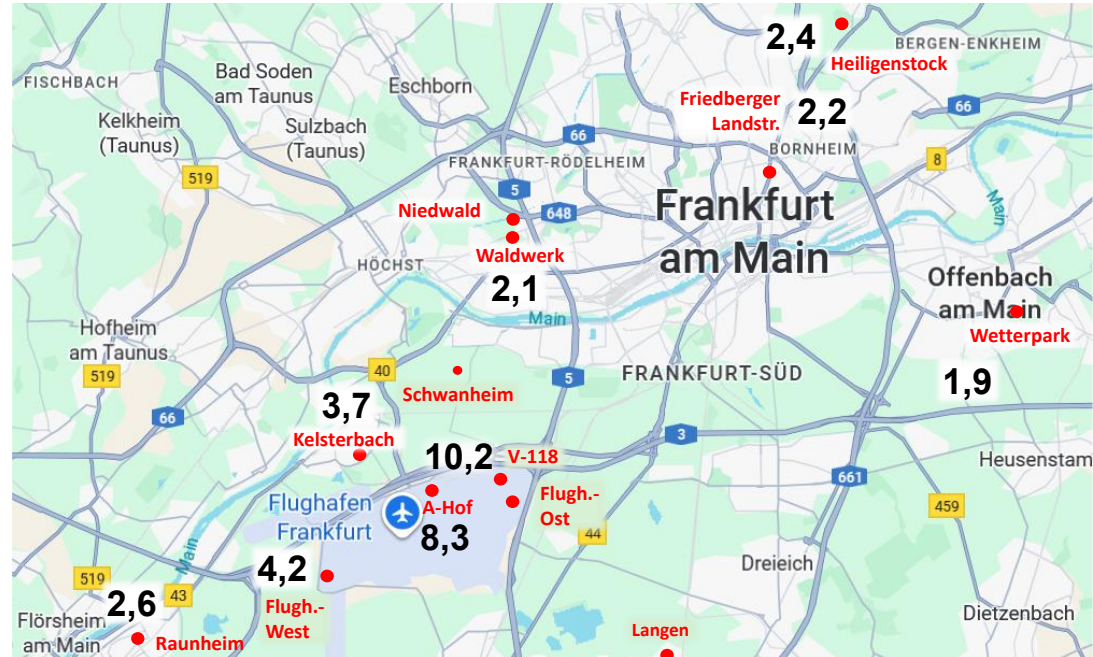
AP2.3: Partikelgrößenverteilung aller Partikel

- Flughafen Frankfurt ist eine große UFP-Quelle
- Unterhalb 100 nm deutliche Unterschiede zwischen Messungen auf dem Flughafen und dem städtischen Hintergrund sichtbar
- Oberhalb von 200 nm kaum Unterschiede, es dominiert der regionale Hintergrund



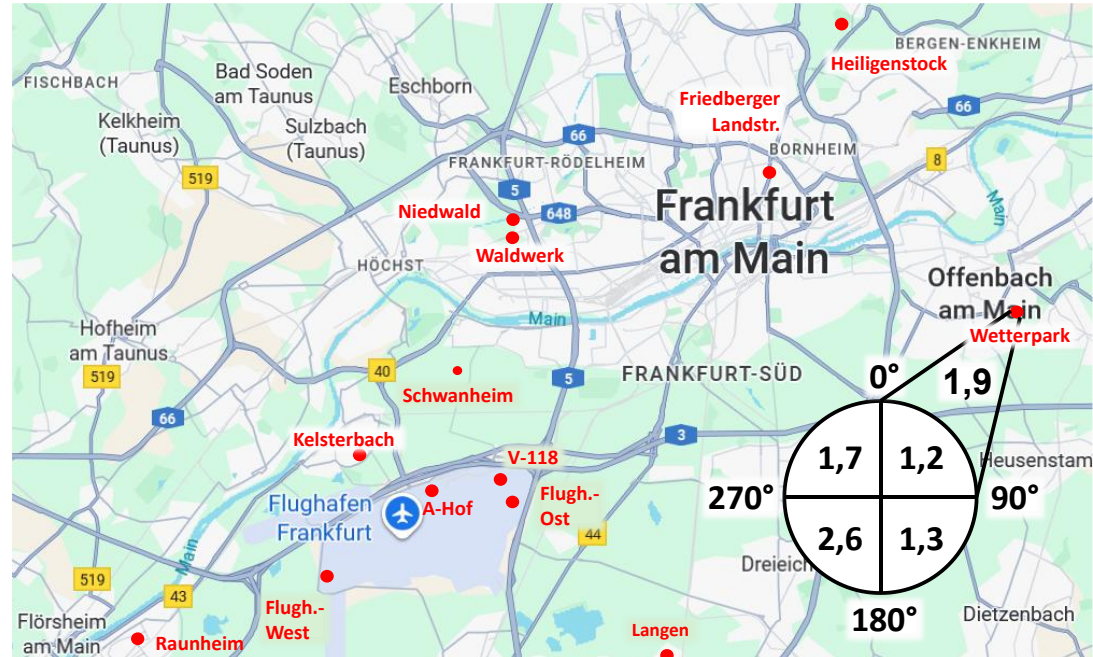
AP2.3: Verhältnis N_{10-20}/N_{30-50}

- Verhältnis N_{10-20}/N_{30-50} als Indikator für den Flugzeugeinfluss?
- Deutliche Gradienten in N_{10-20}/N_{30-50} sichtbar
- Einschränkungen durch: Partikelwachstum, Windrichtung und Nähe zu großen Straßen



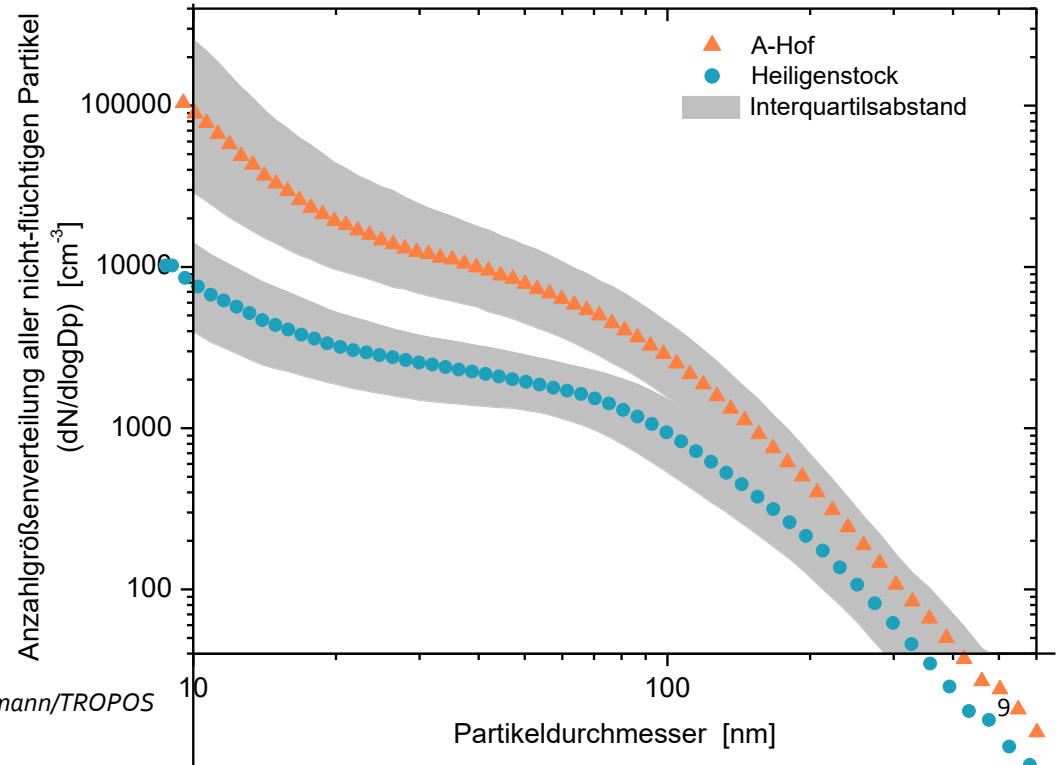
AP2.3: Verhältnis N_{10-20}/N_{30-50} Wetterpark Offenbach

- In 14,5 km Entfernung ist der Einfluss des Flughafens noch zu erkennen
- Vergleich der Tag- und Nachtwerte (Ansatz HLNUG)
 ⇒ ca. 10 % aller UFP am Wetterpark kommen vom Flughafen Frankfurt



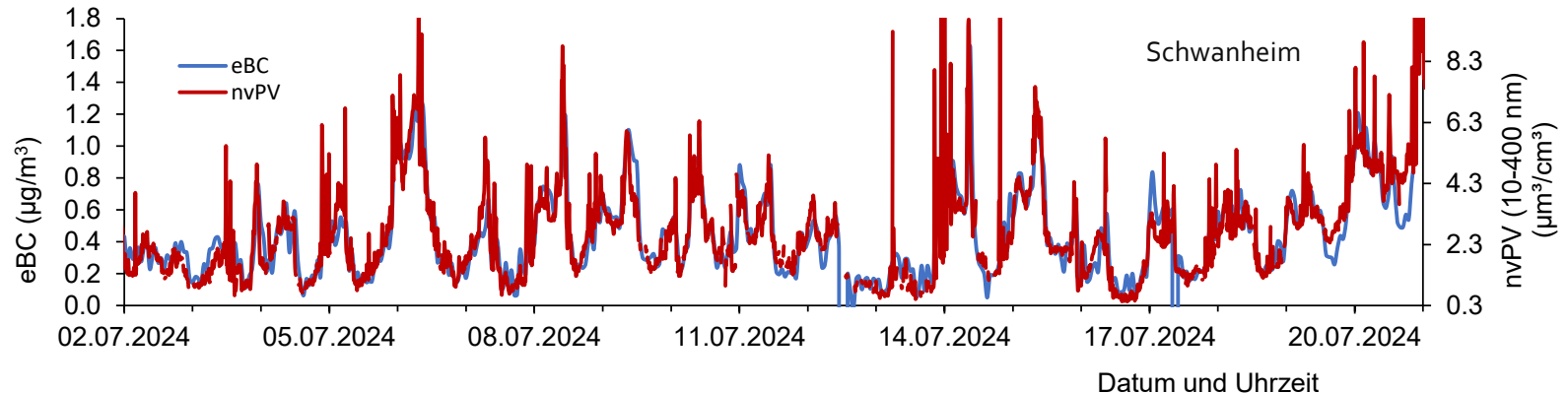
AP2.3: Partikelgrößenverteilung aller nicht-flüchtigen Partikel

- Nicht-flüchtige Partikel = alle Partikel die bei 300-350°C weitgehend ihren Durchmesser beibehalten (z. B. Ruß oder Mineralstaub)
- Auch für die nicht-flüchtigen Partikel gibt es unterhalb von ca. 100 nm Unterschiede



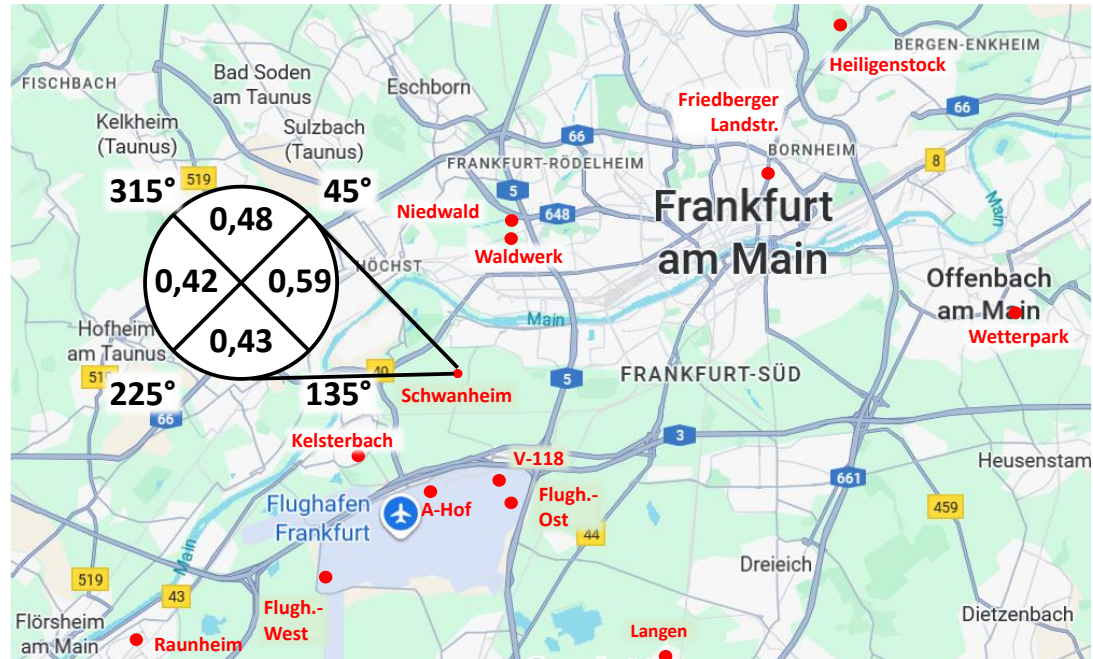
AP2.4: Messung von Ruß

- Ruß (eBC) wird nicht explizit modelliert, ist aber potentiell für die Wirkungsstudie wichtig
- Die Größenverteilung der nicht-flüchtigen Partikel wird aber modelliert
- Das Volumen der nicht-flüchtigen Partikel (nvPV) korreliert sehr gut mit der Rußmasse
- nvPV kann als Ersatzparameter für die Rußbelastung dienen, da er in der Fläche vorliegt



AP2.4: Messung von Ruß

- Gemessene Rußwerte sind nicht außergewöhnlich
- Aufteilung nach Windrichtung zeigt, dass der Flughafen Frankfurt max. eine lokale Quelle für die Rußmasse ist
- Tagesgang der Werte des östl. Windsektors für Schwanheim deutet auf den Kfz-Verkehr als wichtigere Quelle



AP2.5: Chemische Charakterisierung von UFP

- Gemessene Stoffklassen:
 - Turbinen-Schmieröl (Organische Ester und Additive)
 - Sulfat und Nitrat
 - Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
- Sämtliche Proben wurden mittels „Nano-MOUDI“-Kaskadenimpaktoren während der Immissionsmessungen gesammelt
- Gleichzeitige Probenahme an den Standorten Raunheim, Schwanheim, Riedberg während einer Winter- und Sommerkampagne in 2024

AP2.5: Chemische Charakterisierung von UFP & Partikelmorphologie - Standorte

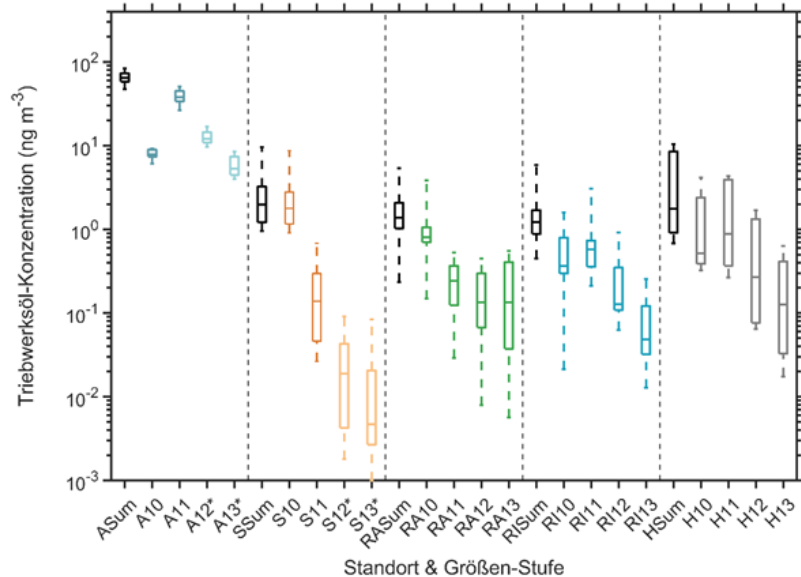
- Insgesamt fünf Messorte für die Partikelchemie
- Zwei Messorte für die Partikelmorphologie



AP2.5: Chemische Charakterisierung von UFP - Methodik

- Nach der Probenahme der Immissions-Kampagnen (~72 h) wurden die Filter (~200) am TROPOS für die nachfolgenden Analysen aufgeteilt.
 - Turbinen-Schmieröl (HPLC-HRMS, IAU-GUF)
 - Sulfat und Nitrat (Ionenchromatographie, TROPOS)
 - Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (GC-MS, TROPOS)

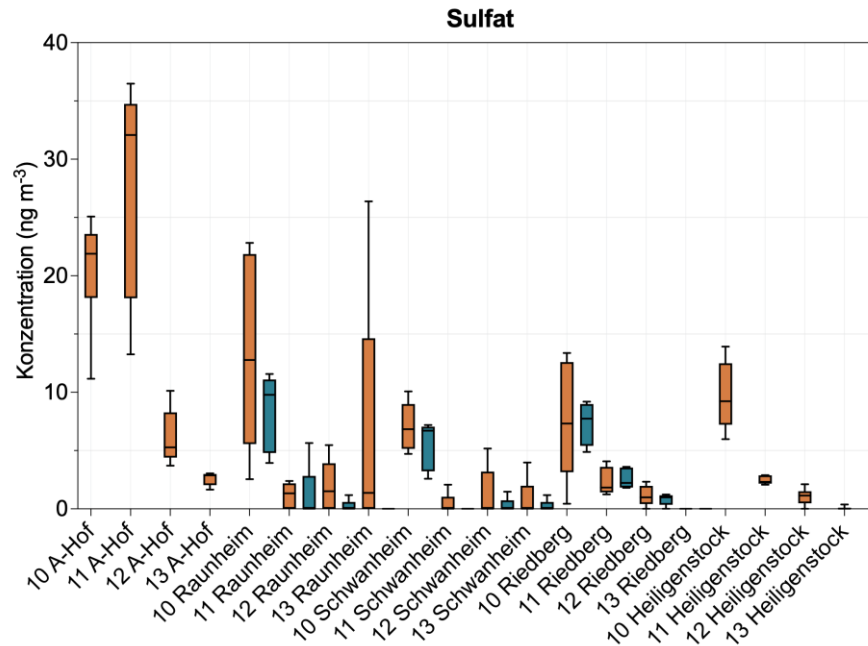
AP2.5: Ergebnisse Triebwerksöle in PM_{0.1}



V = Vorfeld, S = Schwanheim, RA = Raunheim, RI = Riedberg, H = Heiligenstock
 LOD: 6 - 30 pg/m³
 LOQ: 14 - 94 pg/m³ (nach DIN 32645)

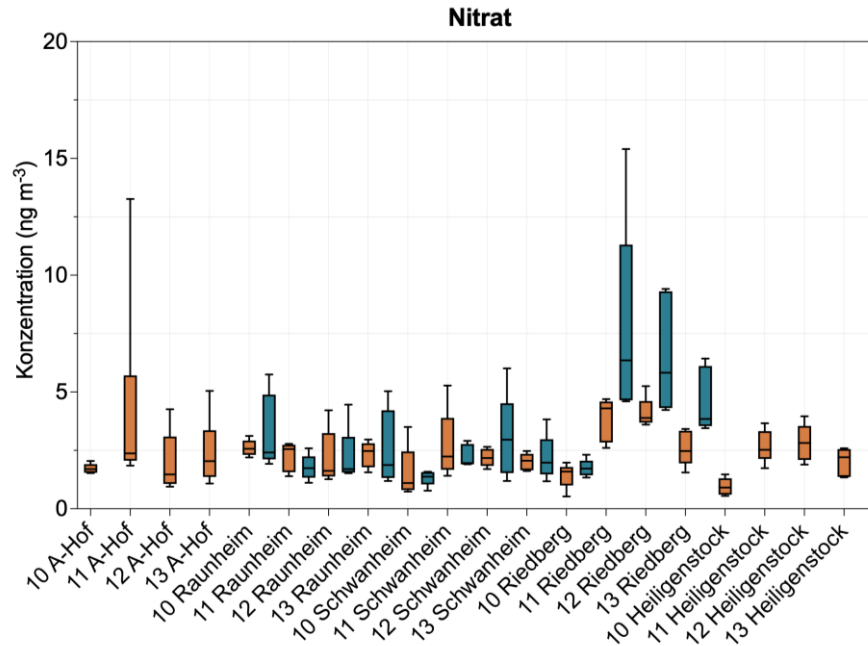
- Höchste Konzentration des Öls auf dem Vorfeld
- Circa eine Größenordnung Variabilität an den Immissionsstandorten (Log-Skala)
- Gleichzeitige Messungen in S, RA und RI
- Die Konzentrationen am Standort Parkfriedhof Heiligenstock (~ 15.5 km Entfernung) deutet auf eine weite Verbreitung der UFP in die Region
- Kein signifikanter Unterschied zwischen Sommer- und Winterproben

AP2.5: Ergebnisse Sulfat und Nitrat in PM_{0.1}



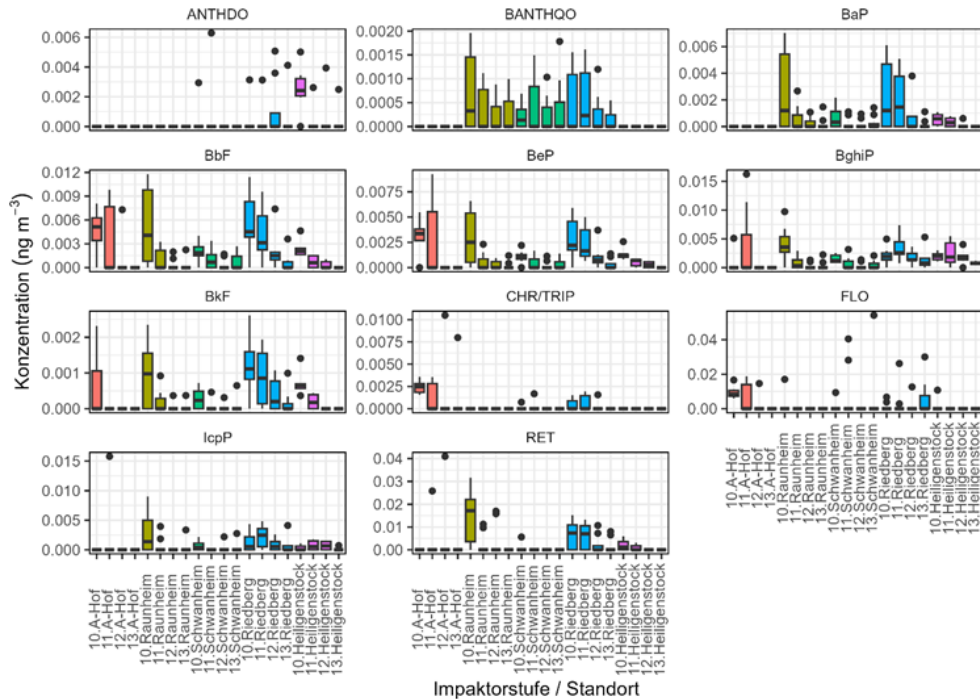
- Höchste Konzentration von Sulfat in der Größenfraktion 32-56 nm (Stufe 11) im A-Hof (bis zu ~35 ng/m³)
- Kein signifikanter Unterschied zwischen Sommer- und Winterproben

AP2.5: Ergebnisse Sulfat und Nitrat in PM_{0.1}



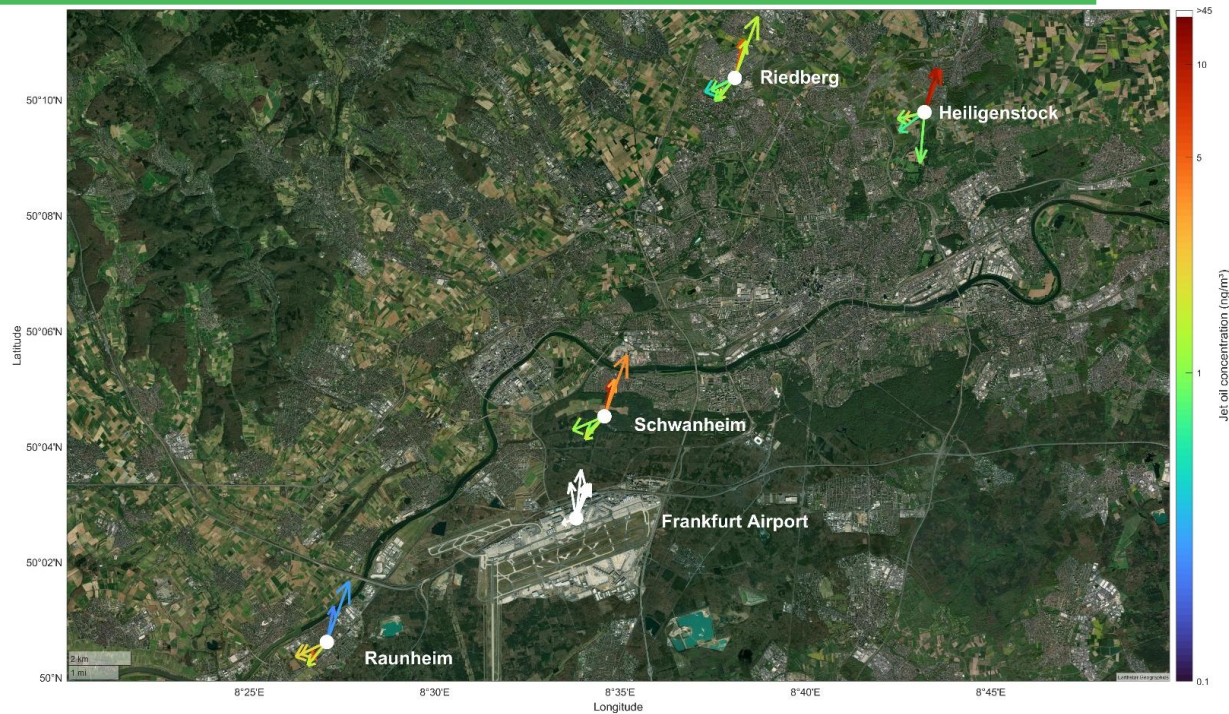
- Höchste Konzentration von Sulfat in der Größenfraktion 32-56 nm (Stufe 11) im A-Hof (bis zu ~35 ng/m³)
- Kein signifikanter Unterschied zwischen Sommer- und Winterproben
- Nitrat am Standort Riedberg im Winter deutlich erhöht, Nähe zu einer Hauptverkehrsstraße

AP2.5: Ergebnisse polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in PM_{0.1}



- Die PAK-Konzentration vieler Proben sind unterhalb der Bestimmungsgrenze
- Benzo[a]pyren (BaP) gilt als das am stärksten cancerogene PAK – Maximalwert bei ~0.01 ng/m³
- Erhöhte Messwerte in Raunheim und Riedberg sind vermutlich auf Holzfeuerung und Straßenverkehr zurückzuführen

AP2.5: Windrichtungsabhängigkeit Triebwerksöle



AP2.5: Windrichtungsabhängigkeit Sulfat



AP2.6: Vertikale UFP-Messungen – 1. Kampagne

- 1. Messkampagne mit UAS ALADINA (2024) in Schwanheim durchgeführt, 8 Messtage, ~100 Vertikalprofile bei etwa 14 h Flugdauer

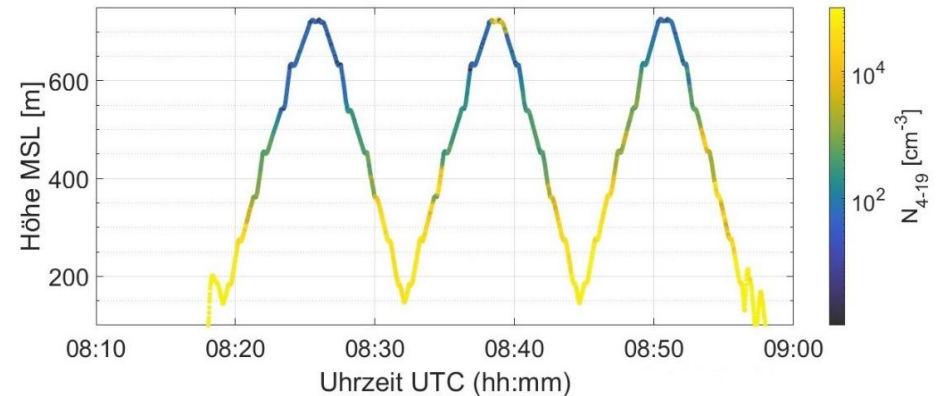
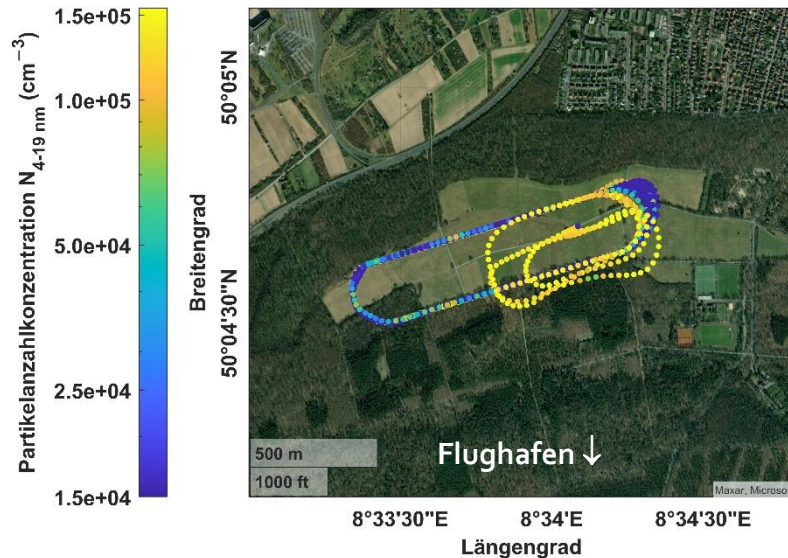
Datum	Bodenwind	Messzeitspanne in UTC (2 h lokal)	Anzahl Profile
11.10.2024	NW, schwach	10:35-11:02 UTC	3
12.10.2024	ONO, schwach	11:30-12:10 UTC	6
13.10.2024	W	08:20-08:30 UTC	1
14.10.2024	SO, schwach	13:30-14:08 UTC	6
16.10.2024	O / SO	Ab 10:43-16:02 UTC	21
17.10.2024	NO / O	Ab 09:10-15:10 UTC	24
18.10.2024	NO / O / OSO	Ab 09:14-16:35 UTC	30
19.10.2024	S / SSW	Ab 08:17-16:15 UTC	12



Fallbeispiele

- Fall 2: Eintrag von UFP aus Anflug
- Fall 3: Eintrag von UFP aus Abflug
- Fall 1: Ablufftahn des Flughafens

AP2.6: Vertikale UFP-Messungen - Daten



- Daten zur Vertikalverteilung der Flughafenemissionen
- Daten zur Validierung des Wirbelschleppenmodells

AP2.6: Vertikale UFP-Messungen – 2. Messkampagne

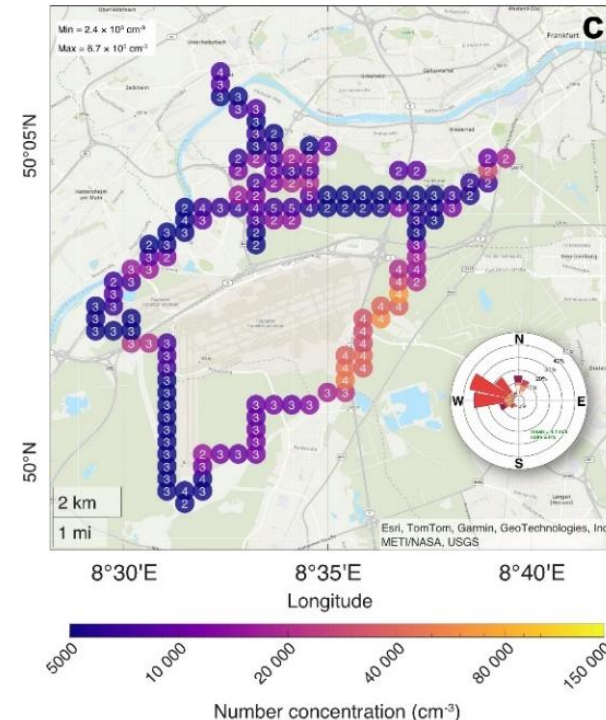
- 2. Messkampagne in Schwanheim für 29.9.-19.10.2025 geplant, beantragt und vorbereitet (inkl. Arbeiten vor Ort)
- Am 01.10.2025 Entzug der bereits erteilten Genehmigungen für Flugverkehrskontrollfreigaben
- Begründung: aktuell eine unregelmäßige Situation zwischen EU-Vorgaben und der umgesetzten deutschen Verordnungen von Drohnen im kontrollierten Luftraum
- Stand Frühjahr 2026 wird es keine weitere UAS-Kampagne im Rahmen von SOURCE FFR geben

AP2.7: Mobile Messungen im Umfeld stationärer Messstellen - Ziele

- Erfassung der räumlichen Verteilung der UFP-Konzentration um den Flughafen Frankfurt
- Kartierung der UFP-Konzentration in der Umgebung einer Messstelle um damit Abweichungen zwischen Messung und Modell zu erklären

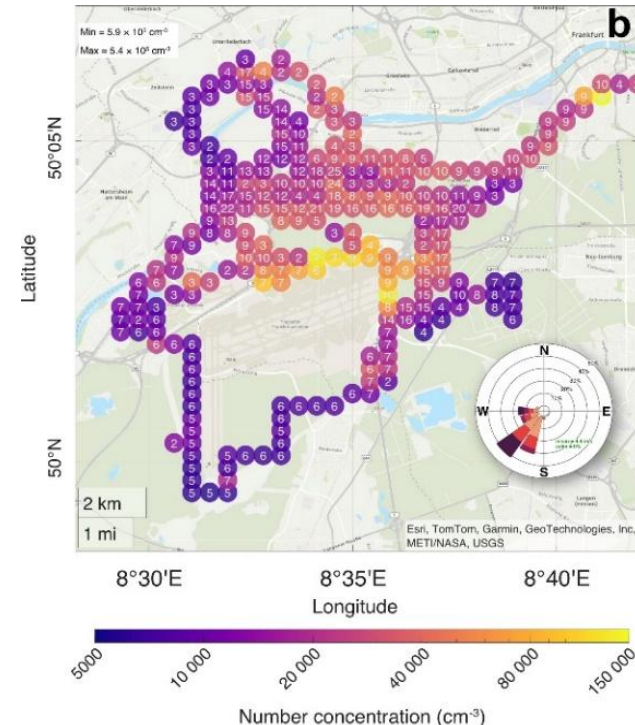
AP2.7: Mobile Messungen im Umfeld stationärer Messstellen - Ergebnisse

- Erfassung der räumlichen Verteilung der UFP-Konzentration um den Flughafen Frankfurt
- Auf der windabgewandten Seite werden jeweils deutlich höhere Konzentrationen gemessen
- Werte sind vergleichbar mit den Messungen an den festen Messstationen



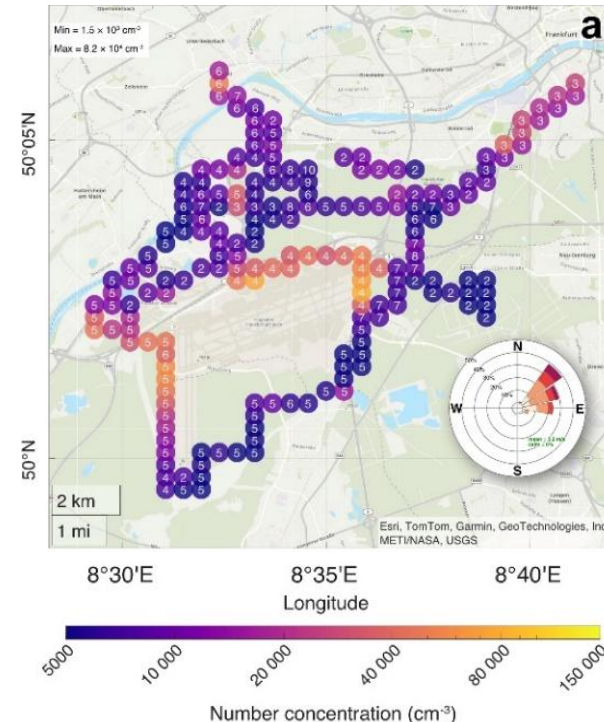
AP2.7: Mobile Messungen im Umfeld stationärer Messstellen - Ergebnisse

- Erfassung der räumlichen Verteilung der UFP-Konzentration um den Flughafen Frankfurt
- Auf der windabgewandten Seite werden jeweils deutlich höhere Konzentrationen gemessen
- Werte sind vergleichbar mit den Messungen an den festen Messstationen



AP2.7: Mobile Messungen im Umfeld stationärer Messstellen - Ergebnisse

- Erfassung der räumlichen Verteilung der UFP-Konzentration um den Flughafen Frankfurt
- Auf der windabgewandten Seite werden jeweils deutlich höhere Konzentrationen gemessen
- Werte sind vergleichbar mit den Messungen an den festen Messstationen



Zusammenfassung

- In 2024 wurden durch das Konsortium chemische und mikrophysikalische Messungen der submikrometer Partikel an sieben Messstandorten durchgeführt
- Partikelanzahlgrößenverteilungen aller Partikel und aller nicht-flüchtigen Partikel wurden gemessen und für die Modellierung aufbereitet
- Der Flughafen Frankfurt ist eine große Quelle für UFP
- Die Anzahlkonzentration der ganz kleinen Partikel (10-20 nm Durchmesser, N_{10-20}) ist auf dem Flughafen (im A-Hof) ca. 30 mal so hoch wie im städtischen Hintergrund

Zusammenfassung

- N_{10-20} auf dem Flughafengelände liegt ca. einen Faktor 10 über den Vergleichswerten an einer stark befahrenen Straße (Friedberger Landstraße)
- Einfluss des Flughafens auf die Partikelanzahlkonzentration ist auch noch in ca. 15 km sichtbar (Wetterpark Offenbach) und der Beitrag des Flughafens an allen dort gemessenen UFP kann mit ca. 10 % abgeschätzt werden
- Die Ergebnisse der Partikelanzahlmessungen werden durch die chemische Analyse der Triebwerksöle in den UFP bestätigt, auch in 15 km Entfernung lassen sich Triebwerksöle nachweisen

Zusammenfassung

- Bei PAKs und der Rußmasse ist der Flughafen Frankfurt wenn dann nur eine lokale Quelle
- Oberhalb von ca. 200 nm unterscheiden sich die Partikelanzahlkonzentrationen an verschiedenen Standorten wenig, es dominiert die regionale Hintergrundkonzentration
- Zusätzliche bodengebundene mobile Messungen (Fahrrad) lieferten UFP-Werte in der Fläche, die mit dem Ausbreitungsmodell verglichen werden können
- Zusätzliche vertikale Messungen mittels UAS dienen der Validierung der Ausbreitungsmodellierung und der Wirbelschleppenmodellierung

Vielen Dank

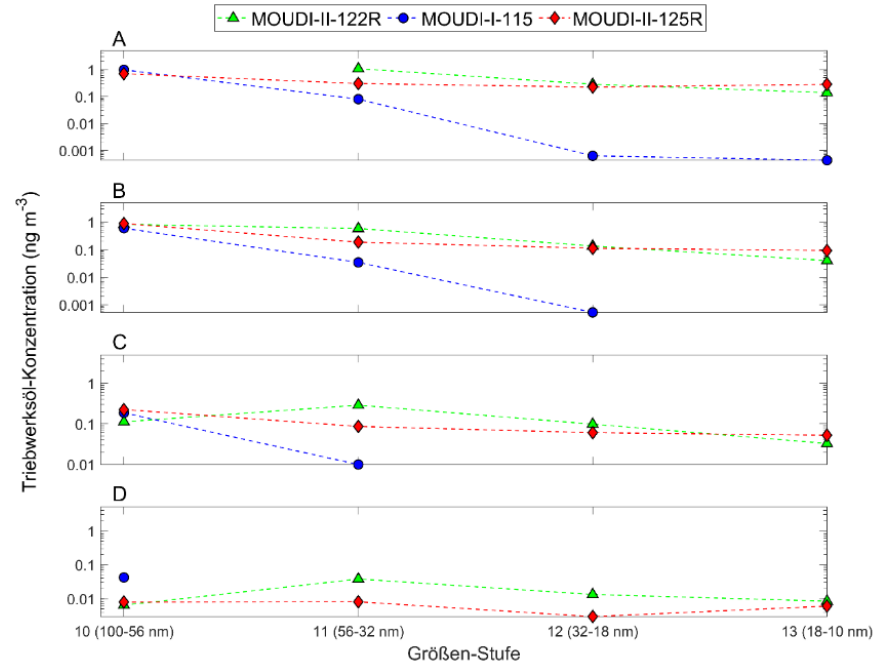
AP2.5: Vergleich der verwendeten Impaktoren

- Vergleich der Sammeleffizienz der Kaskadenimpaktoren
- Vier Sammelperioden am Campus Riedberg im Januar/Februar 2024
- Setup der drei Kaskadenimpaktoren im Messcontainer der Goethe Universität
- Sampling durch $\frac{1}{2}$ " Einlässe mit gleicher Länge



AP2.5: Vergleich der verwendeten Impaktoren

- Vergleich der Sammeleffizienz der Kaskadenimpaktoren
- Das Modell MOUDI-I-115 zeigt einen deutlichen Minderbefund für die Stufen 11-13 für Triebwerksöle. Vermutlich auf bauartbedingte Partikelverluste innerhalb des Sammlers zurückzuführen.
- Gute Übereinstimmung der MOUDI-II-Modelle



AP2.5: Vergleich der verwendeten Impaktoren

- Vergleich der Sammeleffizienz der Kaskadenimpaktoren
- Das Modell MOUDI-I-115 zeigt einen deutlichen Minderbefund für die Stufen 11-13 für Triebwerksöle. Vermutlich auf bauartbedingte Partikelverluste innerhalb des Sammlers zurückzuführen.
- Gute Übereinstimmung der MOUDI-II-Modelle



AP2.3: Verhältnis N_{10-20}/N_{30-50} Heiligenstock

- In 15,5 km Entfernung ist der Einfluss des Flughafens noch zu erkennen

