



SOURCE FFR measurements · modelling

AP1-Bericht: Bestimmung der UFP-Emissionen

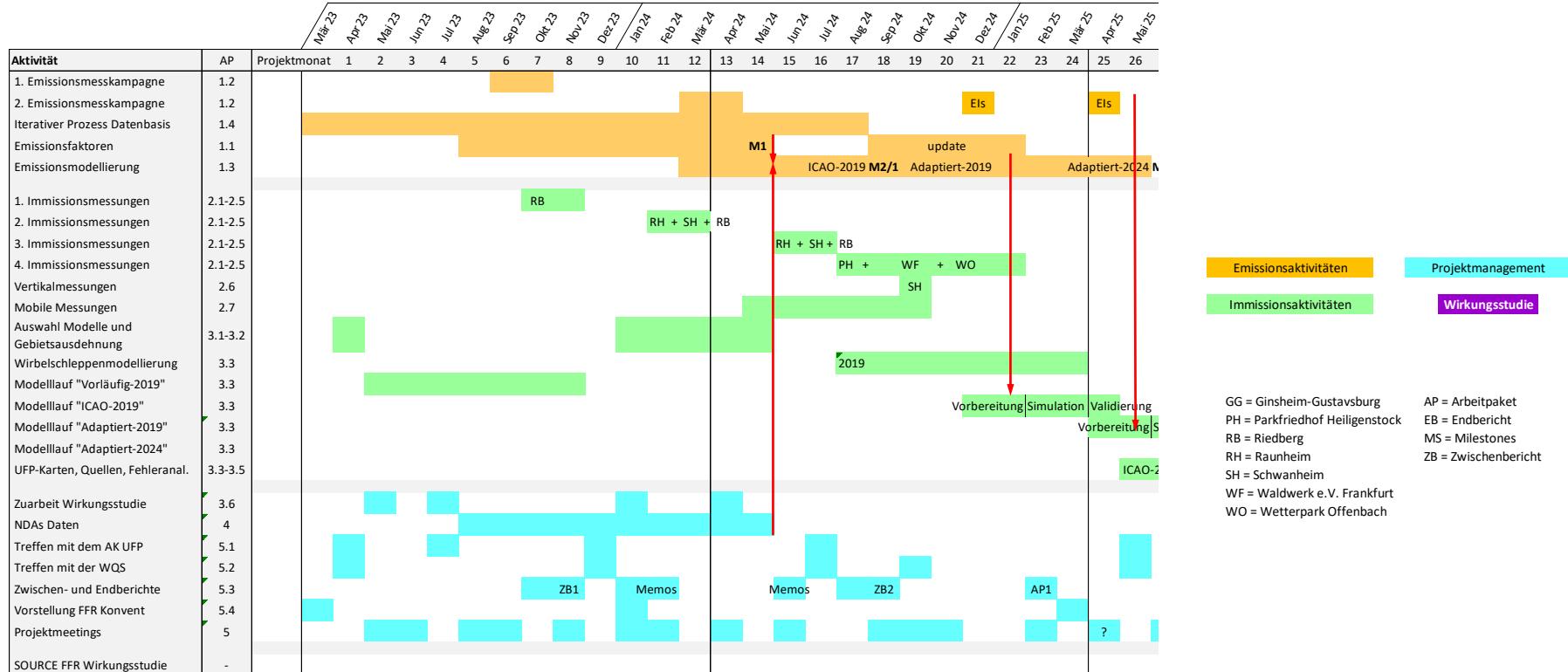
Berichtszeitraum: April 2023 – Februar 2025

28.05.2025 / Markus Hermann / TROPOS & Alexander Vogel / Florian Ungeheuer / IAU-GUF



SOURCE FFR
measurements · modelling

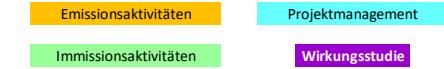
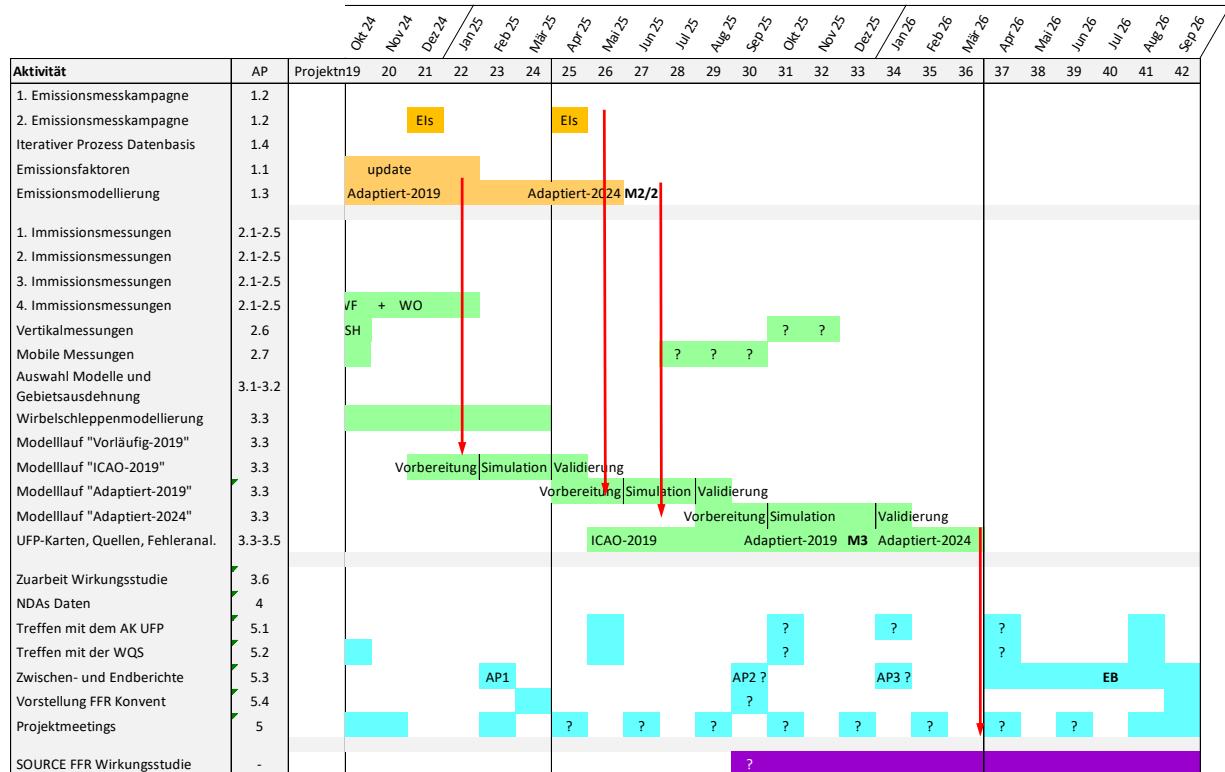
Aktueller Zeitplan



Aktueller Zeitplan



SOURCE FFR
measurements • modelling



GG = Ginsheim-Gustavsburg
PH = Parkfriedhof Heiligenstock
RB = Riedberg
RH = Raunheim
SH = Schwanheim
WF = Waldwerk e.V. Frankfurt
WO = Wetterpark Offenbach

AP = Arbeitspaket
EB = Endbericht
MS = Milestones
ZB = Zwischenbericht

Aufgaben des AP1

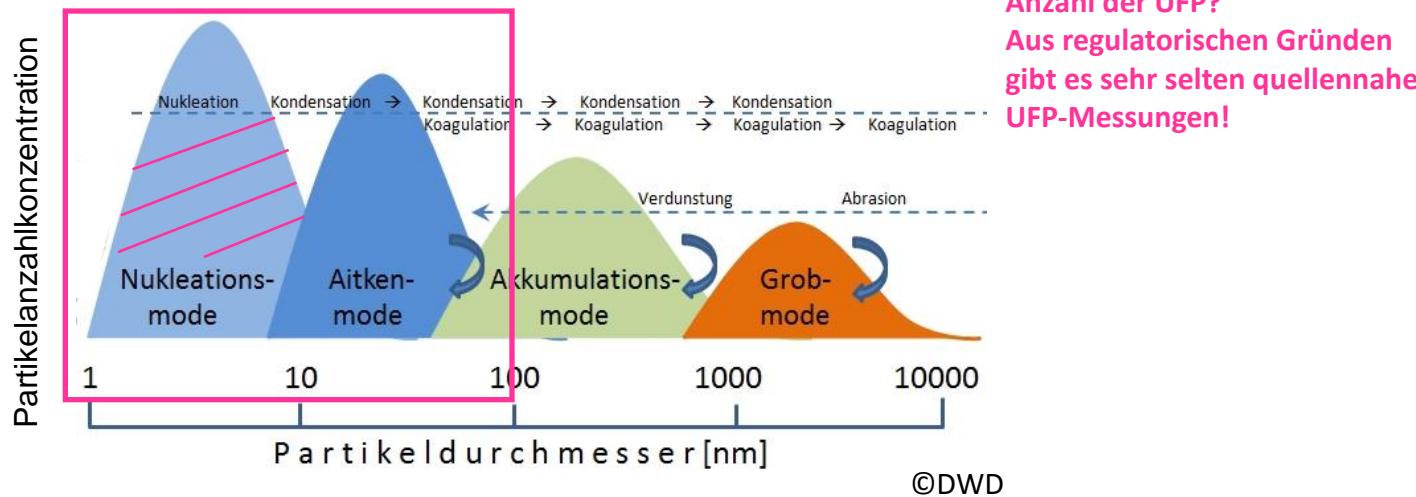
- **AP 1.1 (Kap 4):** Bestimmung von UFP-Emissionsfaktoren
- **AP 1.2 (Kap 5):** Bestimmung von flüchtigen und nicht-flüchtigen UFP-Emissionen durch Flugzeuge
- **AP 1.3 (Kap 6):** Erstellen eines leistungsbasierten UFP-Emissionsmodells bzgl. der relevanten UFP-Emissionen
- **AP 1.4:** Iterativer Prozess zur Datengewinnung (Projektmanagement)

AP1.1: Emissionsfaktoren – Ansatz

- Emissionsfaktoren sind die wichtigste Eingangsgrößen für die Ausbreitungsmodellierung
- Emissionen = **Emissionsfaktoren** \times **Aktivitätsdaten**
- **Aktivitätsdaten** (z. B. Anzahl der gefahrenen Kilometer) sind für die Quellen oft bekannt
- **Emissionsfaktoren** (z. B. Anzahl emittierte UFP pro gefahrenem Kilometer) sind dagegen teilweise schlecht charakterisiert und werden entweder aus Literaturdaten (Kataster oder wissenschaftliche Publikation) oder an Hand von Messungen bestimmt

AP1.1: Emissionsfaktoren – UFP

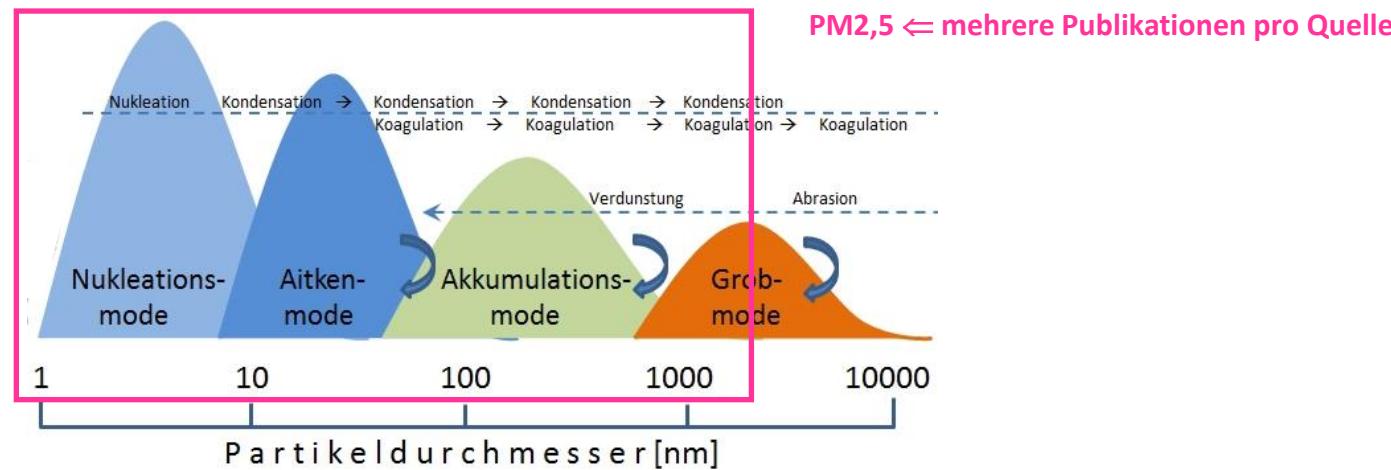
- Ultrafeine Partikel (UFP) = Partikel < 100 nm Durchmesser



©DWD

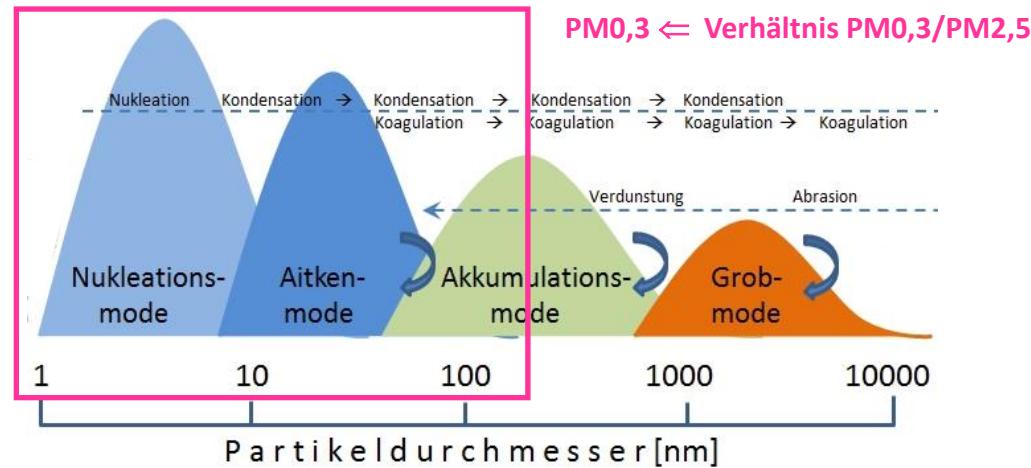
AP1.1: Emissionsfaktoren – Literaturdaten

- Partikel-Emissionen einer Quelle sind oft nur als PM_{2,5} (Partikelmasse) bekannt



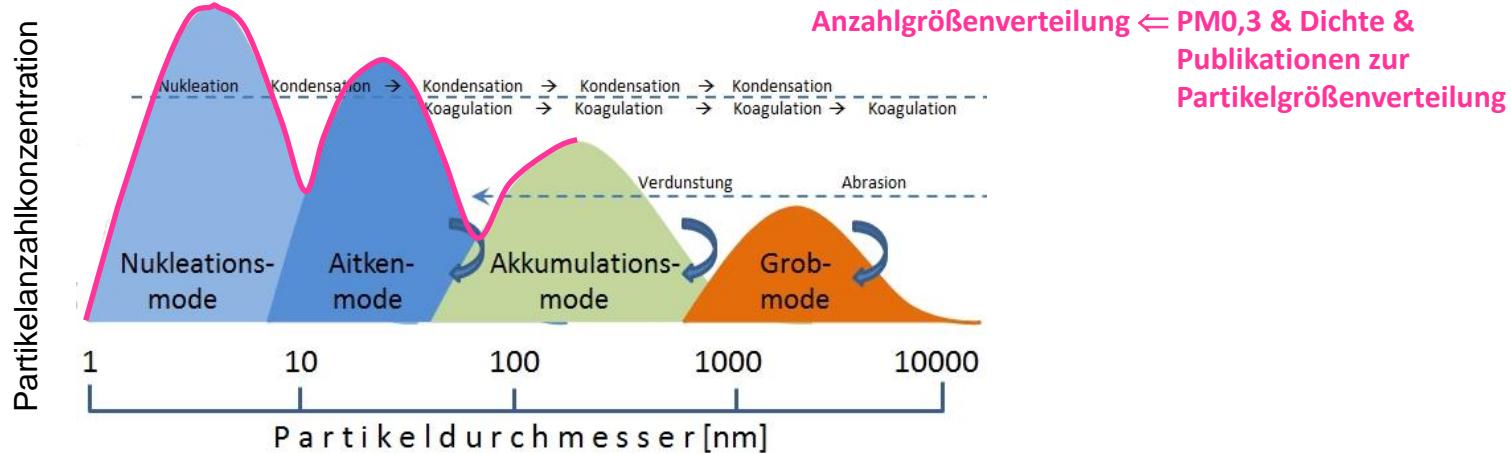
AP1.1: Emissionsfaktoren – Literaturdaten

- Aus einigen Literaturquellen lässt sich das Massenverhältnis $PM_{0,3}/PM_{2,5}$ bestimmen



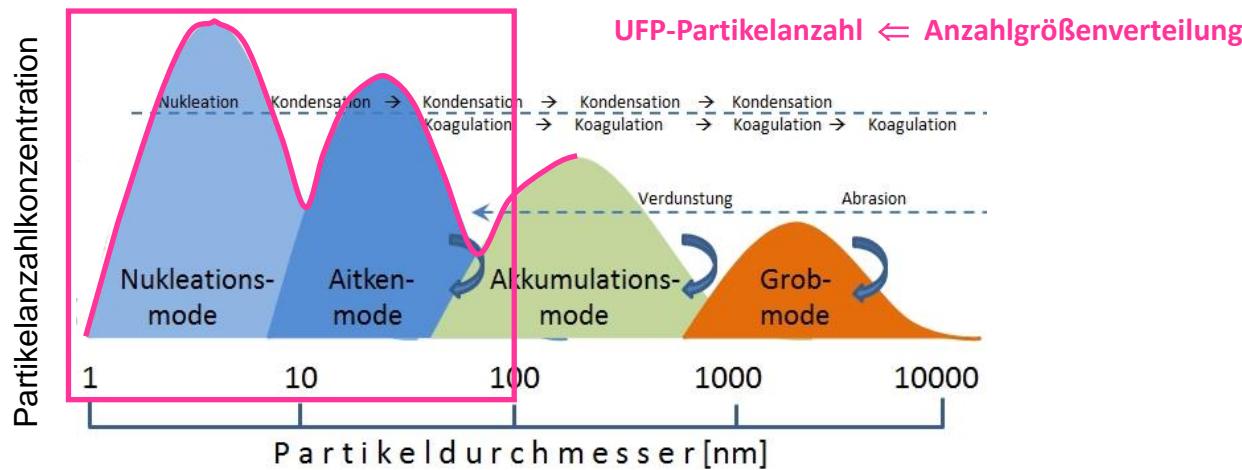
AP1.1: Emissionsfaktoren – Literaturdaten

- Andere Literaturquellen liefern die Partikeldichte oder die Partikelgrößenverteilung einer Quelle



AP1.1: Emissionsfaktoren – Literaturdaten

- Aus der Anzahlgrößenverteilung lässt sich die UFP-Partikelanzahl berechnen



AP1.1: Emissionsfaktoren – Ergebnisse

- Nach Sichtung von **mehr als 250** wissenschaftlicher Publikationen im Rahmen von EU-Projekten und angewandt auf SOURCE FFR ergeben sich UFP-Emissionsfaktoren:

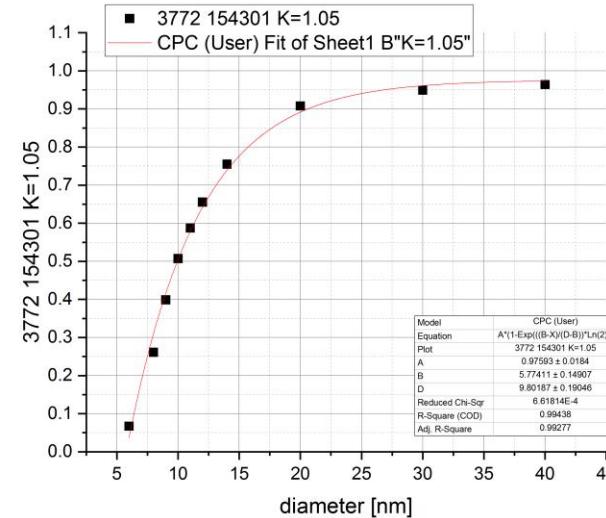
Kategorie (Beispiele)	Ratio tPN/PM _{2,5} ($10^{24}/\text{kt}$)	Prozentsatz flüchtiger Partikel (%)
Kraftwerke	0,172	49
Industrie	0,137	47
Kleinere Verbrennungsanlagen	0,8647	74
Straßenverkehr	1,85	75
Schiffsverkehr	2,44	50
Landwirtschaftliche Viehzucht	0,000778	50

tPN = total particle number

AP1.2: Emissionsmessungen – Kalibrierung

- Nur kalibrierte Messgeräte erlauben die Unsicherheiten in den späteren Daten zu quantifizieren
- Die zu erwartenden UFP-Konzentrationen waren aber zu hoch für eine Standard-Kalibrierung
- Schnelle Partikelmessgeräte (DMS500 & EEPS) wurden durch eine aufwendige 3-Schritte-Methode kalibriert

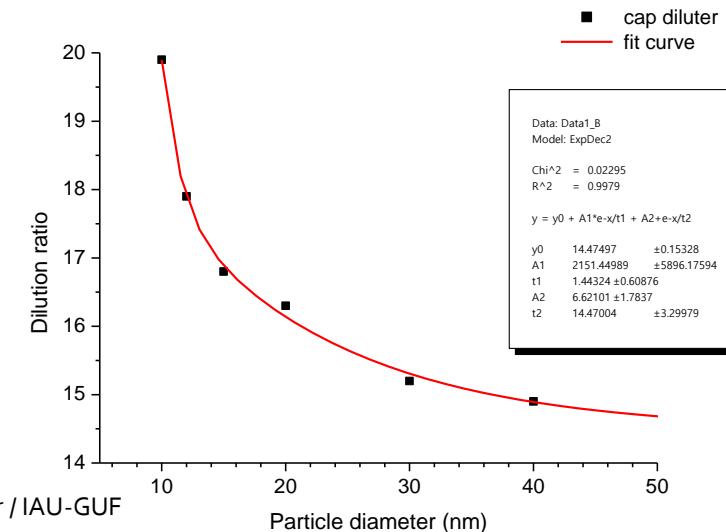
1. Kalibrierung des Referenzgeräts



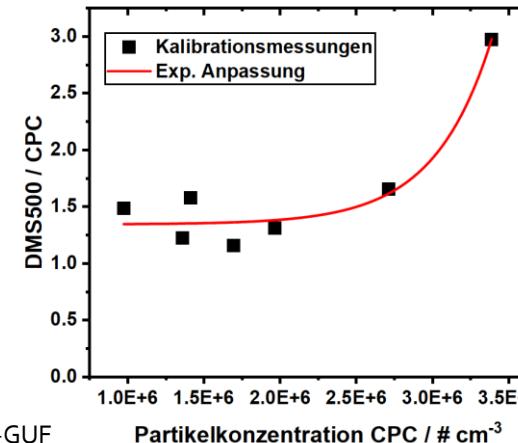
AP1.2: Emissionsmessungen – Kalibrierung

- Nur kalibrierte Messgeräte erlauben die Unsicherheiten in den späteren Daten zu quantifizieren
- Die zu erwartenden UFP-Konzentrationen waren aber zu hoch für eine Standard-Kalibrierung
- Schnelle Partikelmessgeräte (DMS500 & EEPS) wurden durch eine aufwendige 3-Schritte-Methode kalibriert

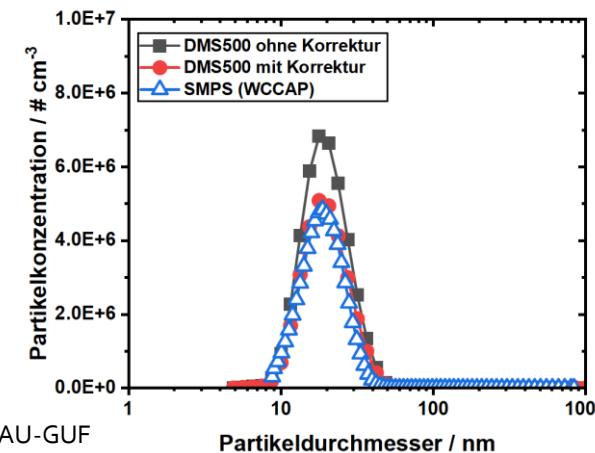
1. Kalibrierung des Referenzgeräts
2. Kalibrierung des Verdünnungsfaktors



AP1.2: Emissionsmessungen – Kalibrierung

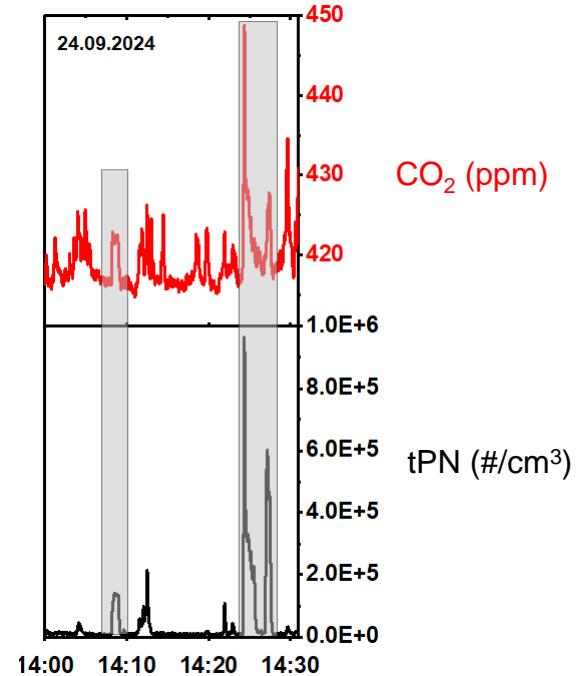
- Nur kalibrierte Messgeräte erlauben die Unsicherheiten in den späteren Daten zu quantifizieren
 - Die zu erwartenden UFP-Konzentrationen waren aber zu hoch für eine Standard-Kalibrierung
 - Schnelle Partikelmessgeräte (DMS500 & EEPS) wurden durch eine aufwendige 3-Schritte-Methode kalibriert
1. Kalibrierung des Referenzgeräts
 2. Kalibrierung des Verdünnungsfaktors
 3. Eigentliche Kalibrierung \Rightarrow Faktor 1,35
- 
- | Partikelkonzentration CPC / # cm ⁻³ | DMS500 / CPC (Kalibrationsmessungen) |
|--|--------------------------------------|
| 1.1E+6 | 1.45 |
| 1.4E+6 | 1.55 |
| 1.7E+6 | 1.25 |
| 2.0E+6 | 1.35 |
| 2.7E+6 | 1.65 |
| 3.5E+6 | 3.00 |

AP1.2: Emissionsmessungen – Kalibrierung

- Nur kalibrierte Messgeräte erlauben die Unsicherheiten in den späteren Daten zu quantifizieren
 - Die zu erwartenden UFP-Konzentrationen waren aber zu hoch für eine Standard-Kalibrierung
 - Schnelle Partikelmessgeräte (DMS500 & EEPS) wurden durch eine aufwendige 3-Schritte-Methode kalibriert
1. Kalibrierung des Referenzgeräts
 2. Kalibrierung des Verdünnungsfaktors
 3. Eigentliche Kalibrierung – stimmt!
- 

AP1.2: Emissionsmessungen – Ansatz

- Datenlage bei den Flugzeugemissionen ist eher schlecht, deswegen waren für diese Quelle Messungen nötig
- Gesucht ist die Anzahl der emittierten nicht-flüchtigen (nvPN) und aller Partikel (tPN) pro Kilogramm verbrannten Kerosin
- Momentaner Kerosinverbrauch ist schwer zu erlangen, ein ΔCO_2 -Ansatz hilft, da das Verhältnis emittiertes CO_2 pro verbranntem Kilogramm Kerosin konstant ist
- Zuordnung der gemessenen CO_2 und Partikelanzahl-Werte zu einzelnen Flugzeugen ist mittels ADS-B Daten möglich



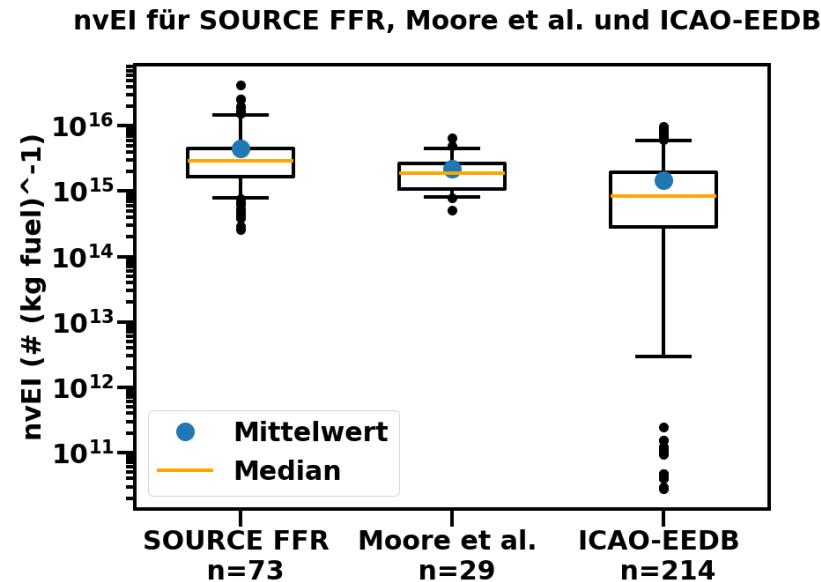
AP1.2: Emissionsmessungen – Messungen



- Blastwall Startbahn West: „transienter“ Lastzustand
- Station Frankfurt-Flughafen-Ost: Lastzustand „idle“
- Über 1600 Einzelereignisse
- Berechneten Emissions-
indizes finden Eingang in die
Ausbreitungsmodellierung

AP1.2: Emissionsmessungen – nicht-flüchtige Partikel

- Die unter Realbedingungen gemessene Emissionsindizes für nicht-flüchtige Partikel (nvEI) liegen in der Größenordnung einer anderen Messkampagne (Moore et al. 2017) und über den ICAO Engine Emissions Databank (EEDB) Werten.
- Die ICAO-Werte repräsentieren eine idealtypische Messanordnung.

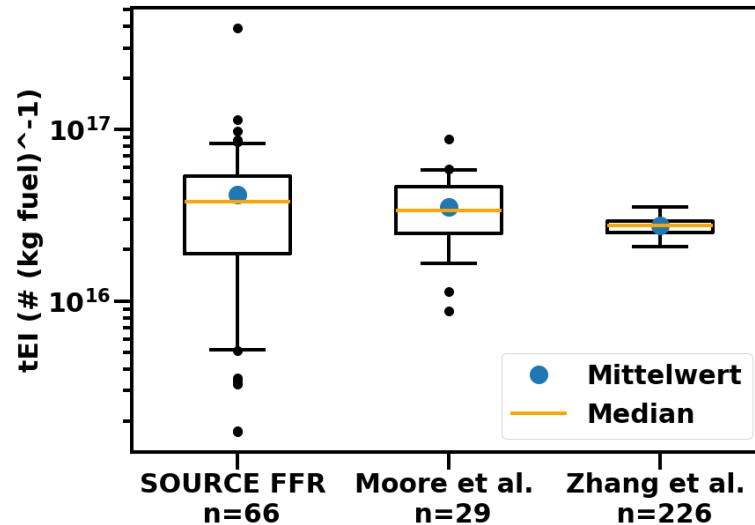


n = Anzahl der gemessenen
 Triebwerkstypen

AP1.2: Emissionsmessungen – alle Partikel

- Die unter Realbedingungen gemessene Emissionsindizes für alle Partikel (tEI) stimmen sehr gut mit den Werten der anderen Messkampagne (Moore et al., 2017) überein.
- In der ICAO-EEDB sind keine tEI-Werte erfasst. Deshalb wurden diese hier mit einer Berechnungsmethode nach Zhang et al. (2020) verglichen, die im Projekt Anwendung findet und die auf Messkampagnendaten basiert.

tEI für SOURCE FFR, Moore et al. und Zhang et al.



n = Anzahl der gemessenen /
 gerechneten Triebwerkstypen

AP1.2: Emissionsmessungen – Partikelchemie

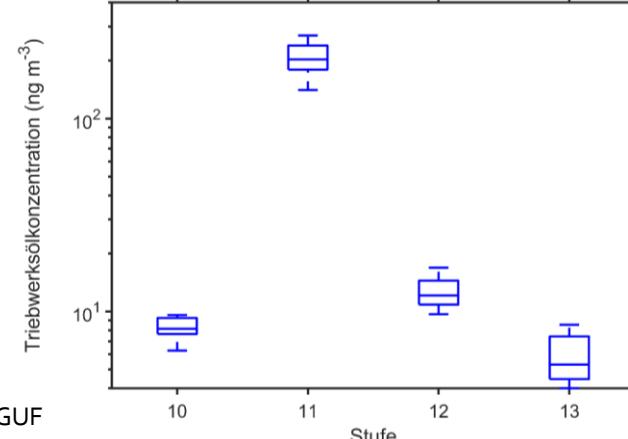
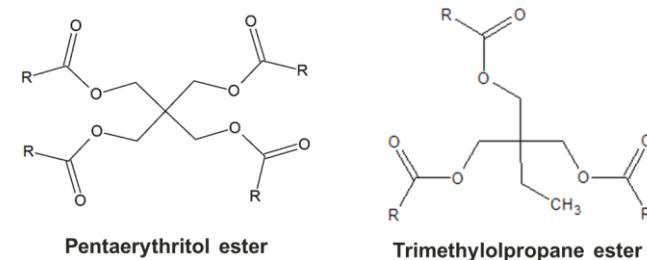
Ansatz: Filterprobenahme am Frankfurter Flughafen, Standort A-Hof mittels nanoMOUDI (Micro-Orifice Uniform Deposition Impactor)

- Der Sammler MOUDI 130/10 wurde im TROPOS-Messanhänger installiert
- Die Probenahme fand zwischen dem 19.09.–10.10.2023 statt
- Probengrößenbereiche: **56–100 nm, 32–56 nm, 18–32 nm, 10–18 nm**
- Sieben Probenahme-Perioden von je ca. 68–72 Stunden → 28 Filterproben



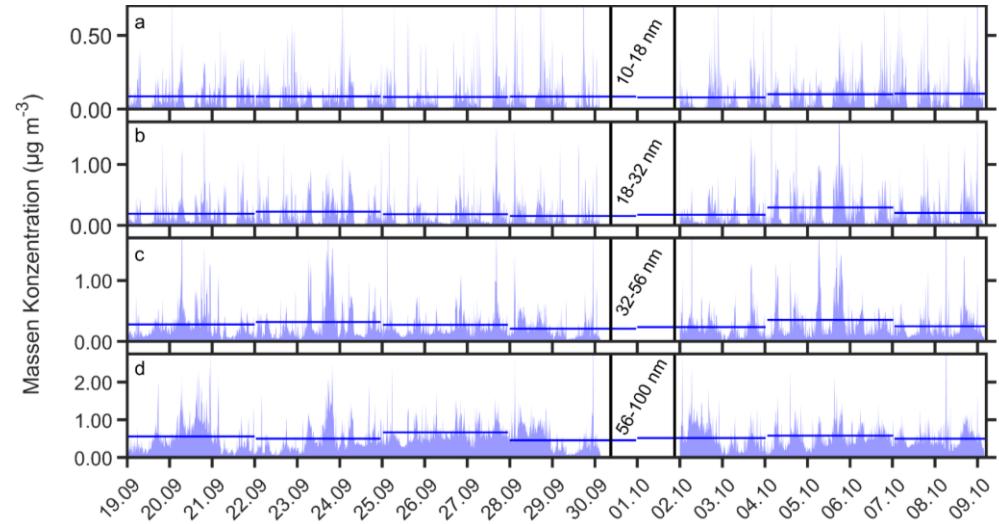
AP1.2: Emissionsmessungen – Partikelchemie

- Quantifizierung der $C_{25-38}H_{44-70}O_8$ und $C_{26-36}H_{48-68}O_6$
Jet Oil Ester mittels externer Kalibrierung ($C_{29}H_{52}O_8$)
- Vergleich der abgeschiedenen Masse
in jeder Größenklasse (in ng/m^3)
- Daten zur Triebwerksölkonzentration:
 - Verteilung innerhalb der 4 Größenfraktionen
 - Basierend auf jeweils 7 Probenahmen
 - Bestimmung des Öl-Massenanteils



AP1.2: Emissionsmessungen – Partikelchemie

- Daten zur Partikelgrößenverteilung (SMPS):
 - Bestimmung der Gesamtpartikelmasse
 - Klares Emissionsmuster erkennbar (a&b)
- Vorläufige Auswertung ergibt einen Massenanteil (nanoMoudi-Masse/ SMPS-Masse) der Triebwerksöle in den UFP-Partikeln auf dem Flughafen in der Größenordnung von 10 %.



AP1.3: Emissionsmodellierung - Ansatz

- Emissionen = **Emissionsfaktoren** x **Aktivitätsdaten**
- **Emissionsfaktoren (Emissionsindizes)** sind anhand von Literaturdaten bestimmt worden oder wurden gemessen
- Für die **Aktivitätsdaten** lagen verschiedene Informationsquellen vor
- Beispiel für ein Flugzeug:
UFP-Emissionen = **UFP-Emissionsindex (Partikel/kg Kerosin)** x **Treibstoffverbrauch (kg Kerosin/min)** x **Zeit in der Betriebsphase (z. B. take-off) (min)**
- Abschließend mussten diese Emissionen noch in Zeit und Raum zugeordnet werden (bei den Flugzeugen z. B. anhand Fraport- oder ADS-B-Daten)



AP1.3: Emissionsmodellierung - Datenbasis

- Industrie HLNUG (Landesamt Hessen),
GRETA (Datenbank des Umweltbundesamtes)
- Kleingewerbe HLNUG, GRETA
- Hausbrand oder Kleinverbraucher HLNUG, GRETA
- Kfz-Verkehr HBEFA (Handbuch Straßenverkehr), HLNUG,
BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen)
- Schienenverkehr HLNUG und DB Umweltzentrum
- Schiffsverkehr LFU (Landesamt Rheinland-Pfalz), GRETA



AP1.3: Emissionsmodellierung - Datenbasis

- Flugverkehr am Flughafen Frankfurt ICAO-EEDB, ICAO-9889, Fraport AG, eigene Messungen, Literatur, flightradar24, DLH, Condor
- Flughafenbetrieb am Boden Fraport AG, HBEFA, HGB
- Kleinflugplätze Internetrecherche, TRIWO (Flugplatz Betreiber), GRETA, Statistische Bundesamt, Bürgerinitiative
- Sonstige mobile Quellen GRETA
- Landwirtschaft HLNUG, GRETA
- Bäume und Wälder Datensatz aus EU-Projekten

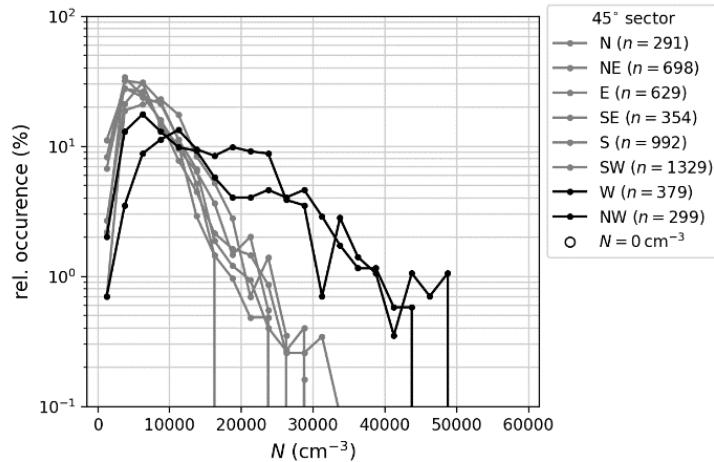
AP1.3: Emissionsmodellierung

In das Ausbreitungsmodell gehen Emissionen von sehr vielen Quellen ein:

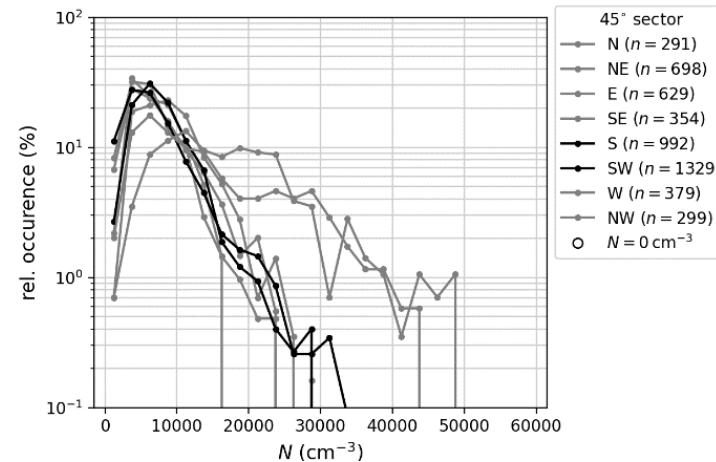
- 1721 Punktquellen
- 20617 Linienquellen
- 53536 Flächenquellen
- 1 Vertikalprofil als Randbedingung
- Plus die Flugzeugemissionen

Ausblick Immissionsmessdaten: Langen

SOURCE-FFR : LN : N2...N6 & WIG&WIR_corr : 2019 (day)
2019-01-01 00:00:00 → 2020-01-01 00:00:00

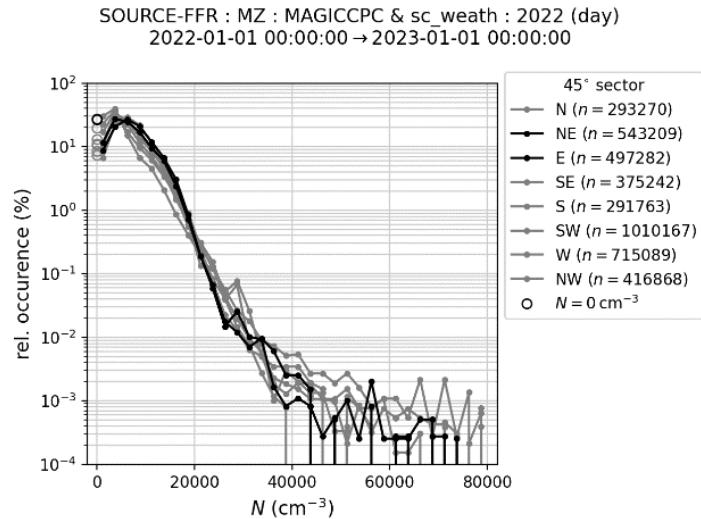


SOURCE-FFR : LN : N2...N6 & WIG&WIR_corr : 2019 (day)
2019-01-01 00:00:00 → 2020-01-01 00:00:00



UFP-Messungen des UBA für 2019, Windrichtungen Frankfurt Flughafen (links) und Flugplatz Egelsbach
(rechts) hervorgehoben

Ausblick Immissionsmessdaten: Mainz



Anzahlkonzentrationsmessungen (N_5) des
 MPI-C für 2022, Windrichtung Frankfurt
 Flughafen hervorgehoben

⇒ Wie sieht das das Ausbreitungsmodell?

Zusammenfassung

- Die Daten zur Bestimmung der UFP-Emissionen in SOURCE FFR measurements · modelling sind „alle“ erhoben und die Vorgehensweisen wie sie angewendet werden sind festgelegt und mit der WQS abgestimmt.
- Der dabei erreichte Detailgrad und die Vielzahl an Ansätzen (z. B. Wirbel-schleppenmodellierung oder die Messung aller und nicht-flüchtiger Partikel) übertrifft bisherige ähnliche Studien.
- Gemessene Partikelemissionsindizes der Flugzeuge liegen über den ICAO-Emissionsindizes, was aber für niedrige Lastzustände zu erwarten war.
- Alle erlangten UFP-Emissionen finden Eingang in die Ausbreitungsmodellierung, die letztendlich die UFP-Expositionskarten liefert und bis Ende 2025 erfolgt.



Vielen Dank