



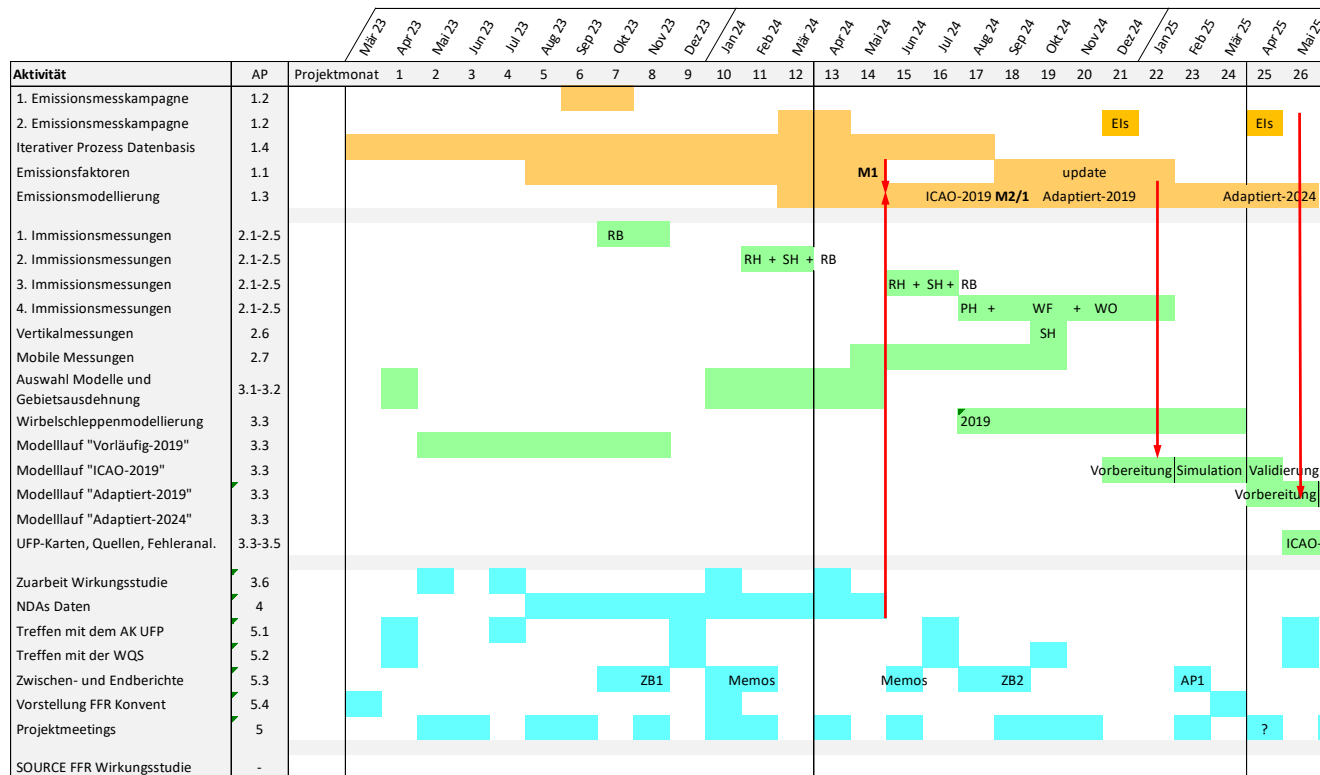
*SOURCE FFR measurements · modelling*

# AP<sub>1</sub>-Bericht: Bestimmung der UFP-Emissionen

Berichtszeitraum: April 2023 – Februar 2025



# Aktueller Zeitplan

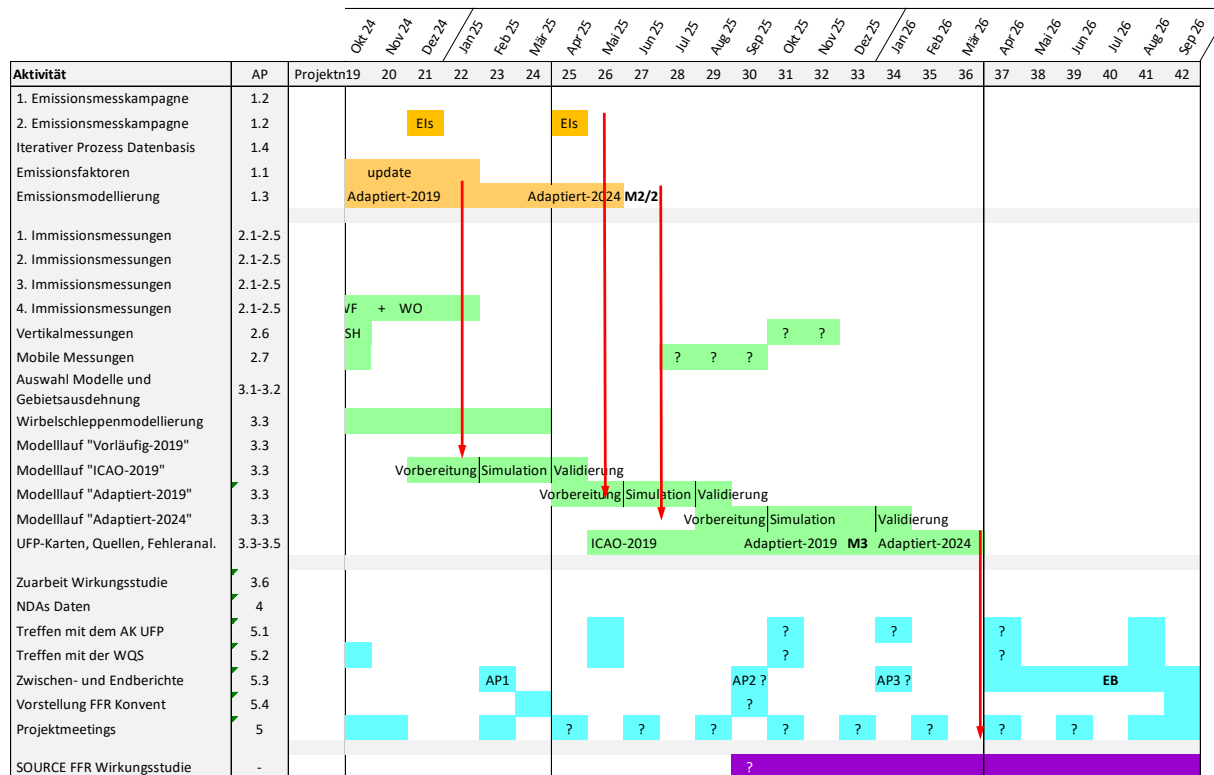


**Emissionsaktivitäten** **Projektmanagement**  
**Immissionsaktivitäten** **Wirkungsstudie**

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

# Aktueller Zeitplan



**Emissionsaktivitäten** **Projektmanagement**  
**Immissionsaktivitäten** **Wirkungsstudie**

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 AP<sub>1</sub>

---

- **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)

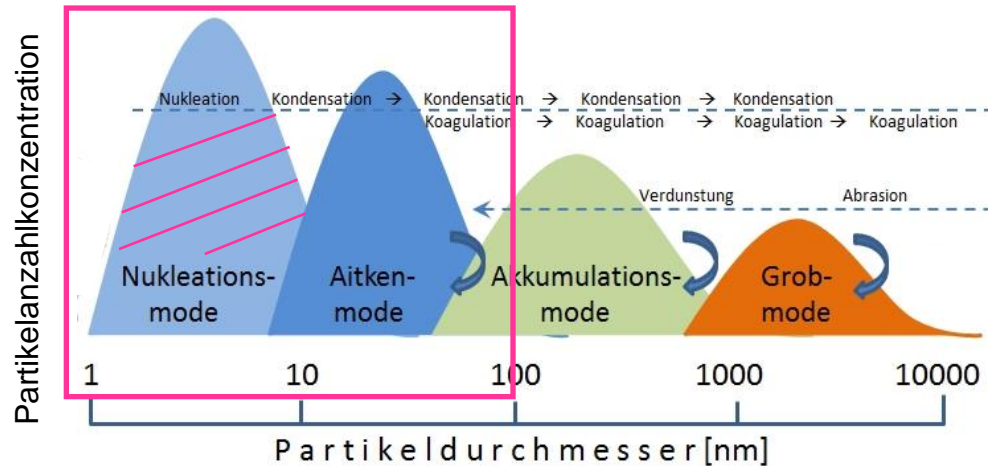
## AP1.1: Emissionsfaktoren – Ansatz

---

- Emissionsfaktoren sind die wichtigste Eingangsgrößen für die Ausbreitungsmodellierung
- Emissionen = Emissionsfaktoren x 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 and Hand von Messungen bestimmt

## AP1.1: Emissionsfaktoren – UFP

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

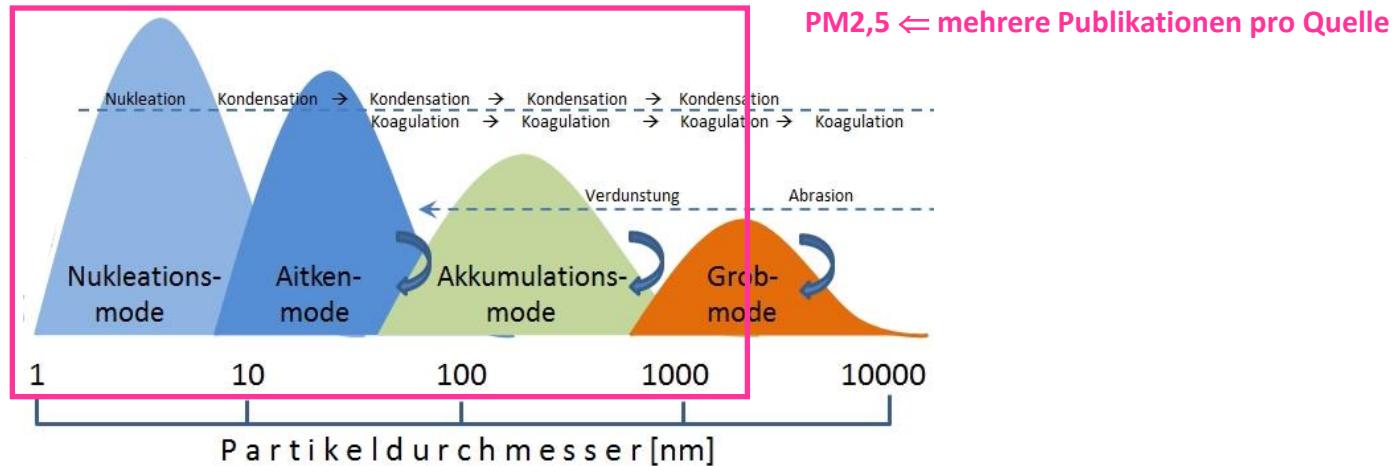


Anzahl der UFP?  
Aus regulatorischen Gründen  
gibt es sehr selten quellennahe  
UFP-Messungen!

©DWD

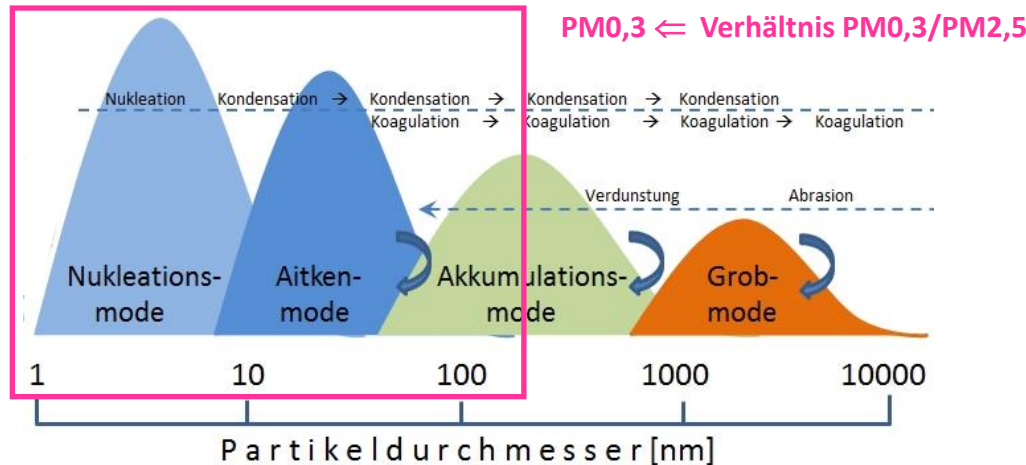
## AP1.1: Emissionsfaktoren – Literaturdaten

- Partikel-Emissionen einer Quelle sind oft nur als PM<sub>2,5</sub> (Partikelmasse) bekannt



## AP1.1: Emissionsfaktoren – Literaturdaten

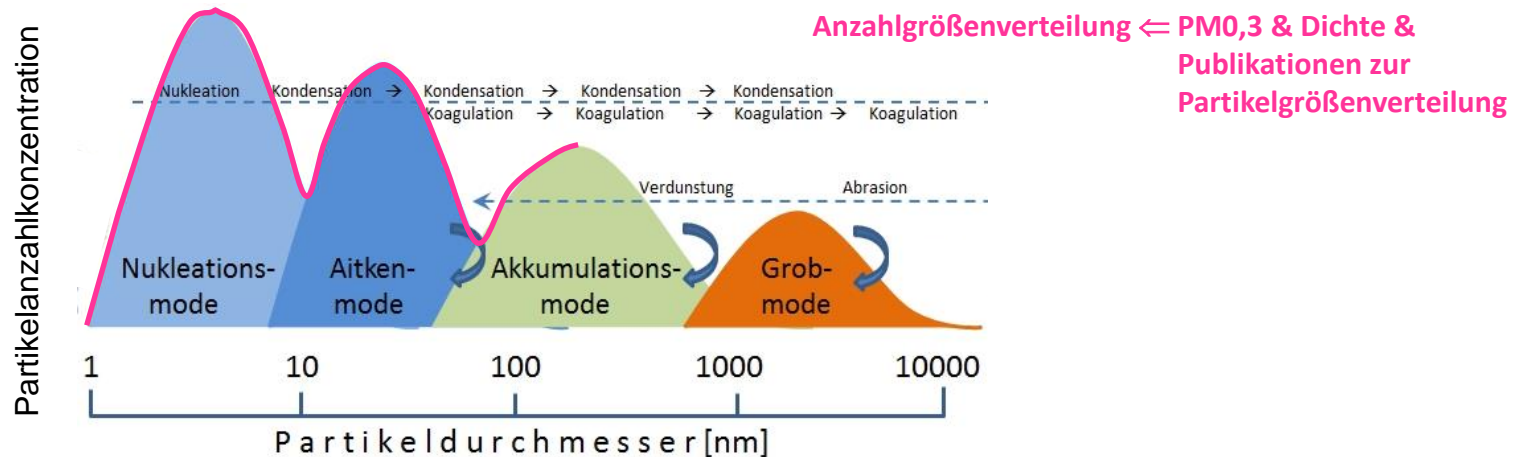
- Aus einigen Literaturquellen lässt sich das Massenverhältnis  $PM_{0,3}/PM_{2,5}$  bestimmen





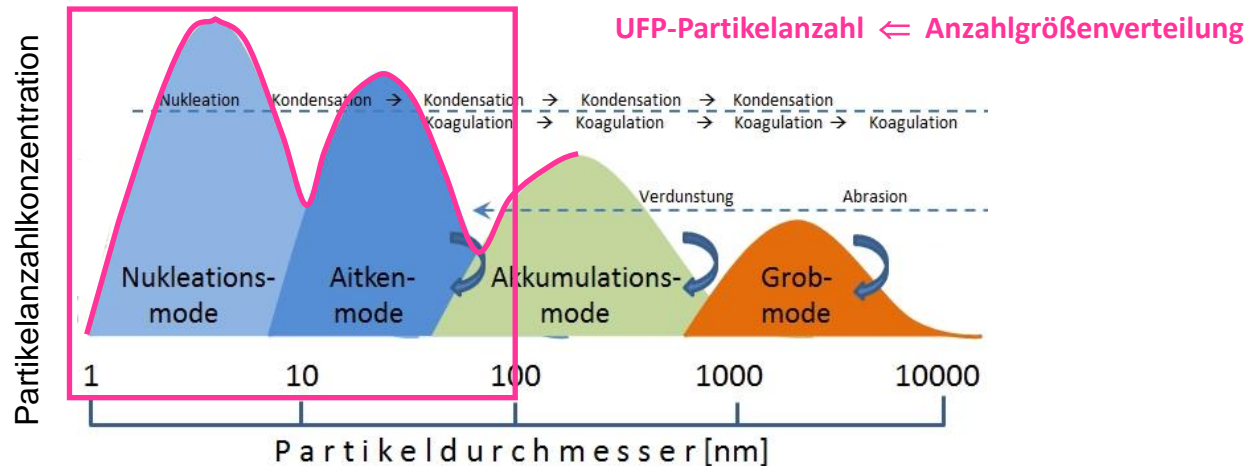
## AP1.1: Emissionsfaktoren – Literaturdaten

- 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:

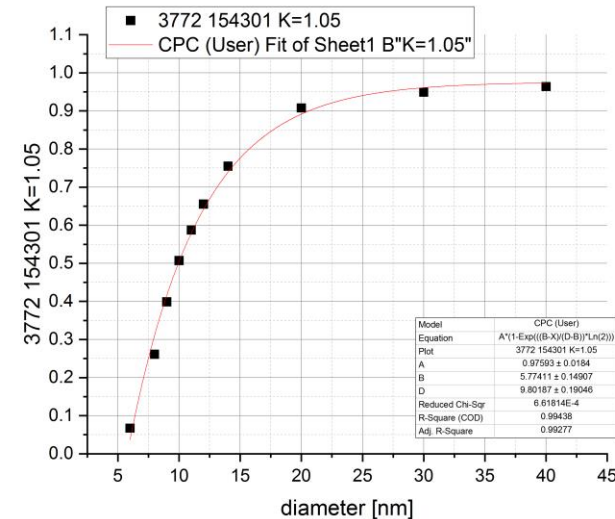
Kategorie (Beispiele)	Ratio tPN/PM <sub>2,5</sub> (10 <sup>24</sup> /kt)	Prozentsatz flüchtiger Partikel (%)
Kraftwerke	0,172	49
Industrie	0,137	47
Kleinere Verbrennungsanlagen	0,8647	74
Straßenverkehr	1,85	75
Schiffsverkehr	2,44	50
Landwirtschaftliche Viehzucht	0,000778	50

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

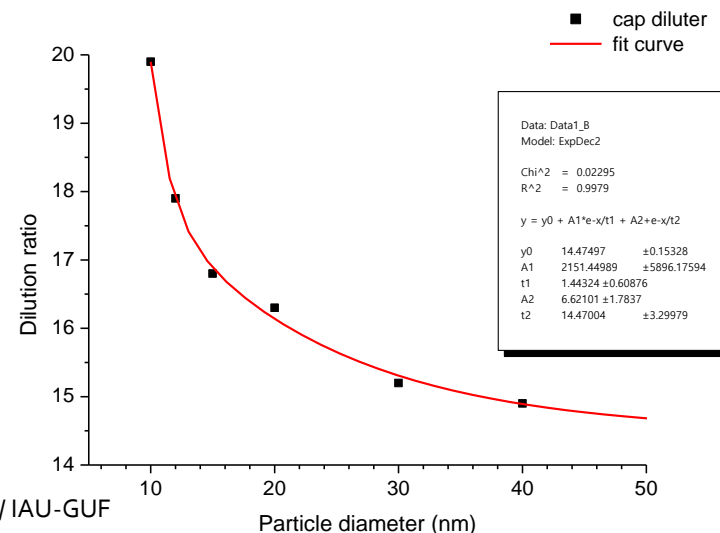
### 1. Kalibrierung des Referenzgeräts



## 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

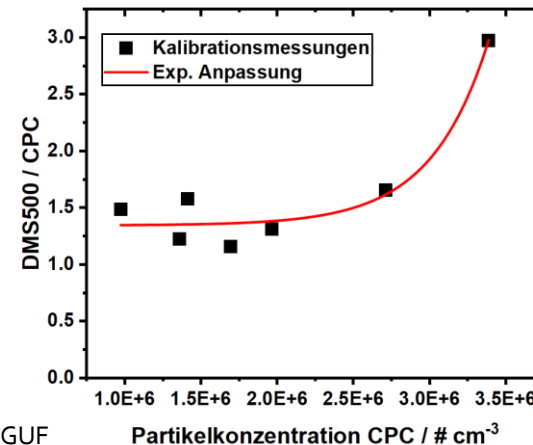
1. Kalibrierung des Referenzgeräts
2. Kalibrierung des Verdünnungsfaktors



## 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

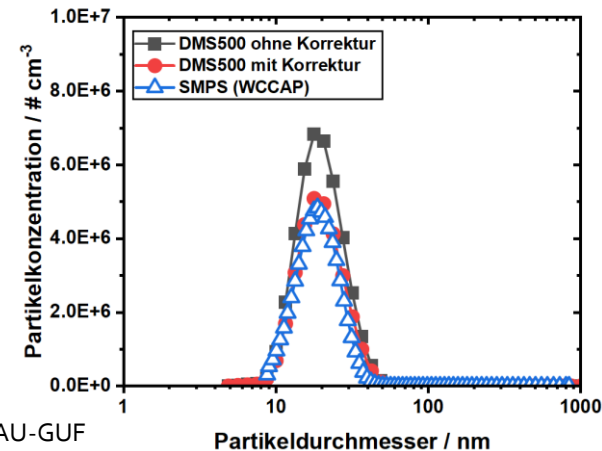
1. Kalibrierung des Referenzgeräts
2. Kalibrierung des Verdünnungsfaktors
3. Eigentliche Kalibrierung  $\Rightarrow$  Faktor 1,35



## AP1.2: Emissionsmessungen – Kalibrierung

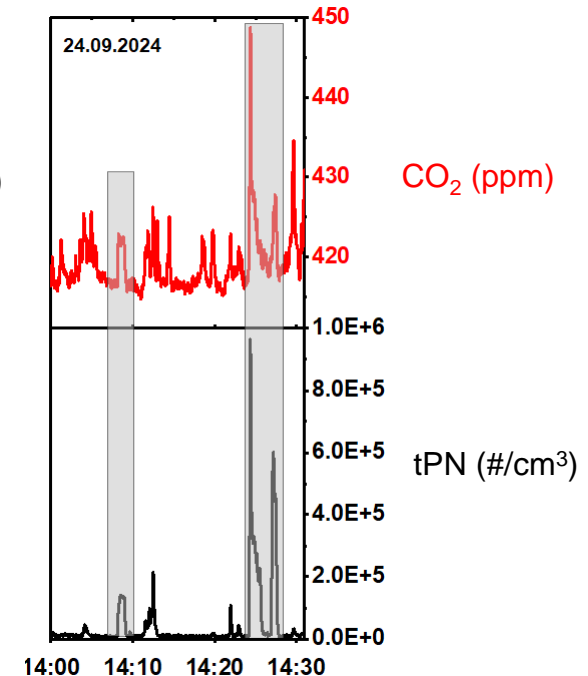
- Nur kalibrierte Messgeräte erlauben die Unsicherheiten in den späteren Daten zu quantifizieren
- Die zu erwartenden UFP-Konzentrationen waren aber zu hoch für eine Standard-Kalibrierung
- Schnelle Partikelmessgeräte (DMS500 & EEPS) wurden durch eine aufwendige 3-Schritte-Methode kalibriert

1. Kalibrierung des Referenzgeräts
2. Kalibrierung des Verdünnungsfaktors
3. Eigentliche Kalibrierung – stimmt!



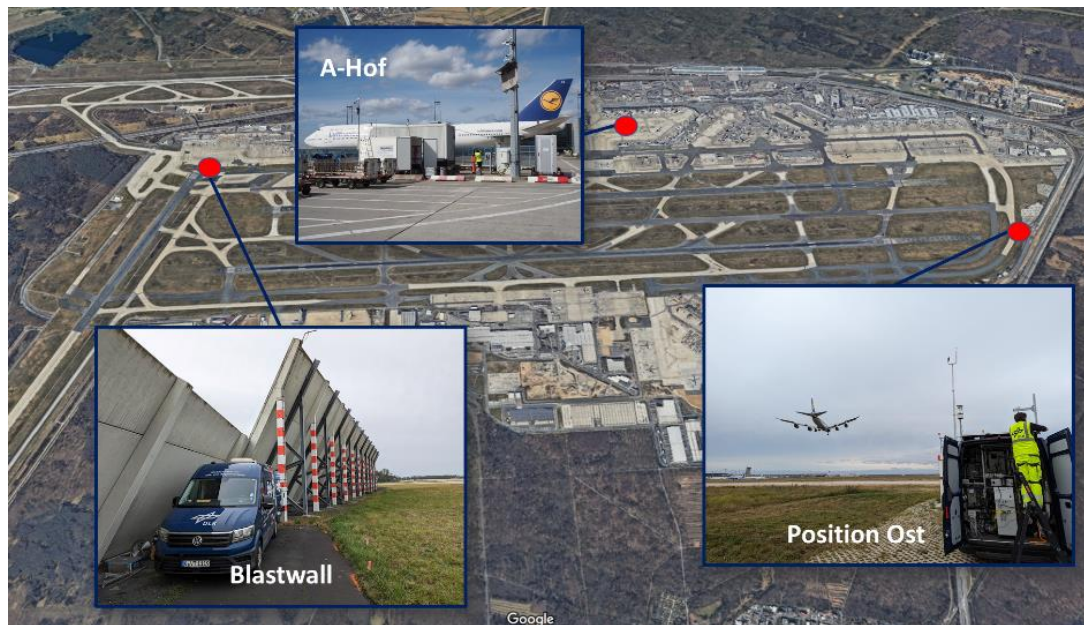
## AP1.2: Emissionsmessungen – Ansatz

- 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 verbranntem Kerosin
- Momentaner Kerosinverbrauch ist schwer zu erlangen, ein  $\Delta\text{CO}_2$ -Ansatz hilft, da das Verhältnis emittiertes  $\text{CO}_2$  pro verbranntem Kilogramm Kerosin konstant ist
- Zuordnung der gemessenen  $\text{CO}_2$  und Partikelanzahl-Werte zu einzelnen Flugzeugen ist mittels ADS-B Daten möglich





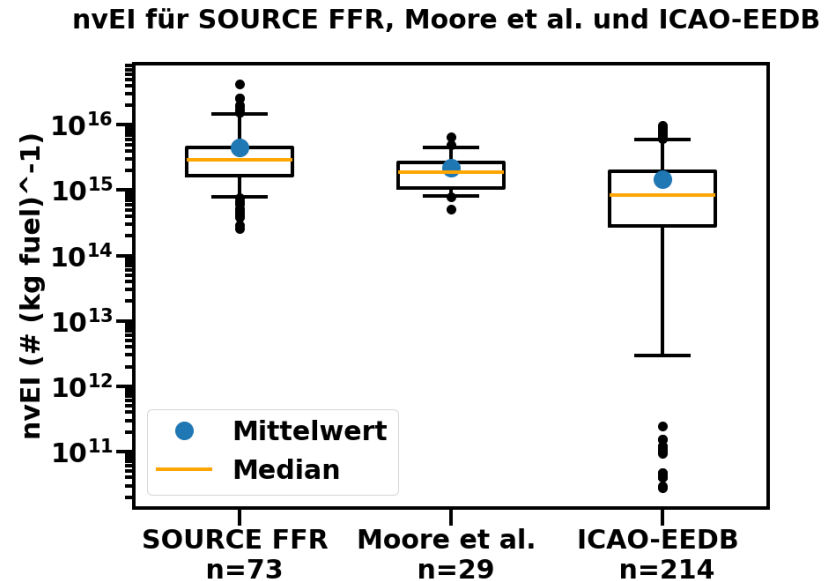
## AP1.2: Emissionsmessungen – Messungen



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

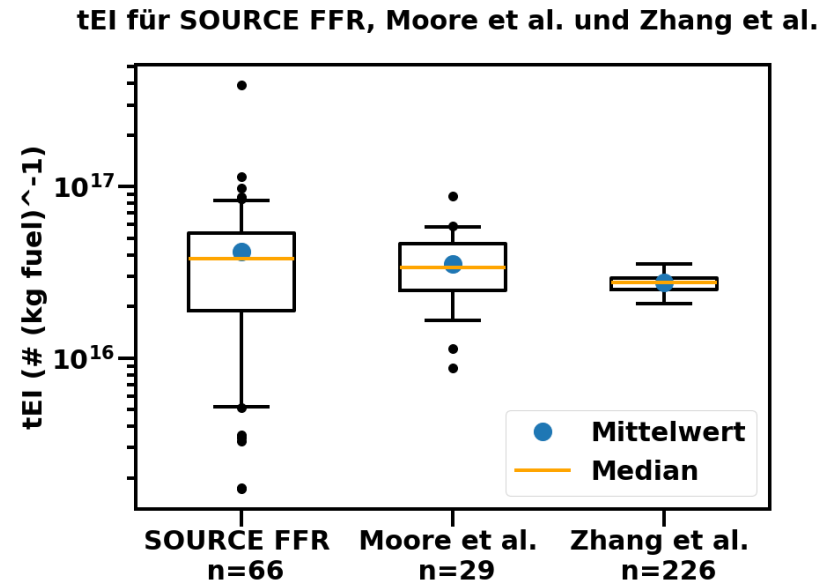
## AP1.2: Emissionsmessungen – nicht-flüchtige Partikel

- 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 Datenbank (EEDB) Werten.
- Die ICAO-Werte repräsentieren eine idealtypische Messanordnung.



## 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.



n = Anzahl der gemessenen /  
gerechneten Triebwerkstypen

## AP1.2: Emissionsmessungen – Partikelchemie

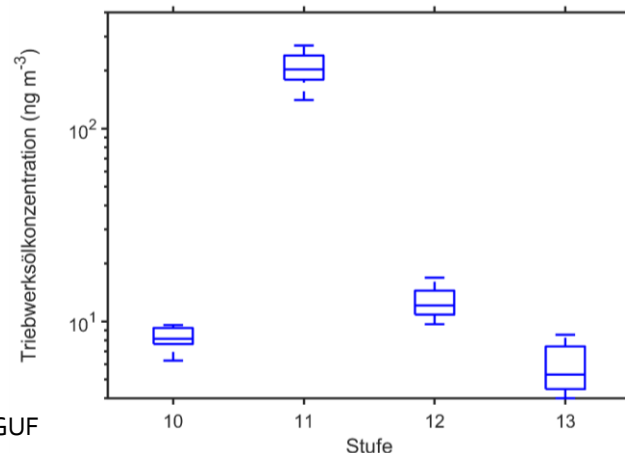
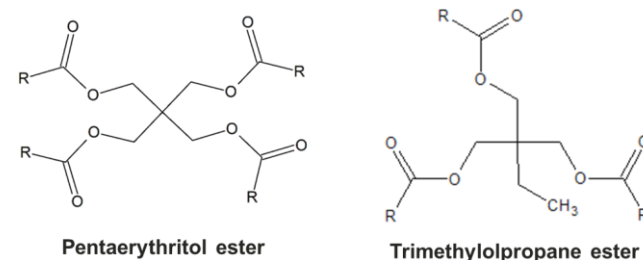
Ansatz: Filterprobenahme am Frankfurter Flughafen, Standort A-Hof mittels nanoMOUDI (Micro-Orifice Uniform Deposition Impactor)

- Der Sammler MOUDI 1 30/10 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



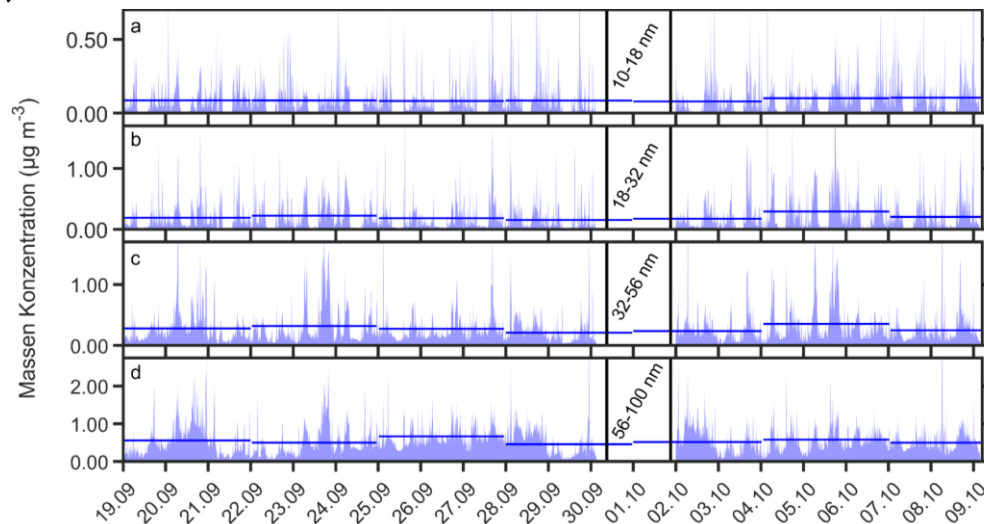
## AP1.2: Emissionsmessungen – Partikelchemie

- 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-g889, 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

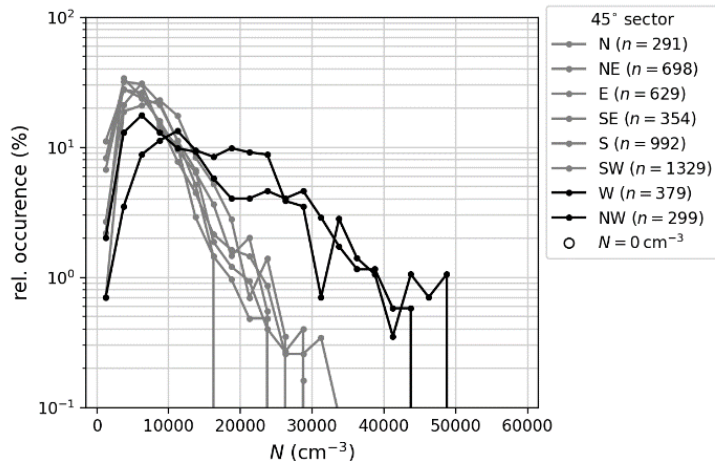
---

In das Ausbreitungsmodell gehen Emissionen von sehr vielen Quellen ein:

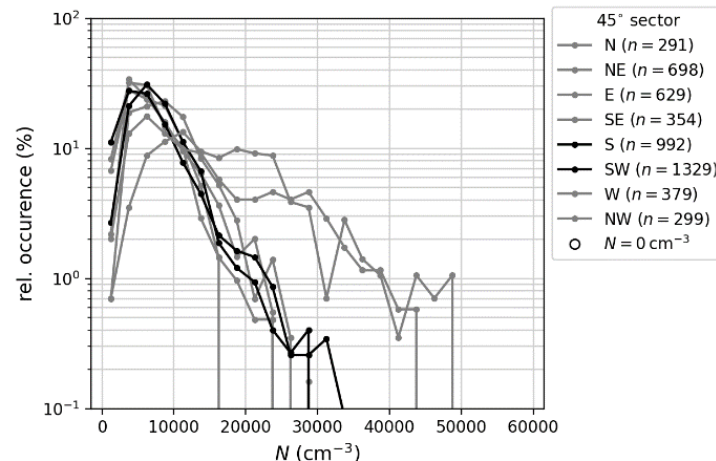
- 1721 Punktquellen
- 20617 Linienquellen
- 53536 Flächenquellen
- 1 Vertikalprofil als Randbedingung
- Plus die Flugzeugemissionen

# 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

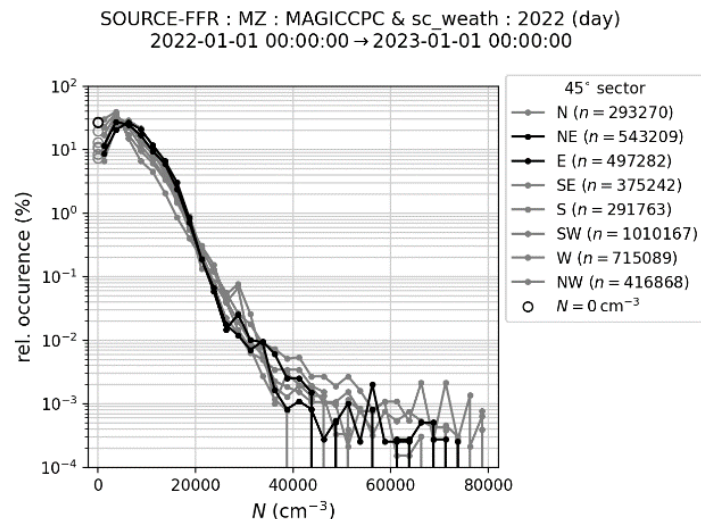


SOURCE-FFR : LN : N2...N6 & WIG&WIR\_corr : 2019 (day)  
 2019-01-01 00:00:00 → 2020-01-01 00:00:00



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. Wirbelschleppenmodellierung 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