

UFOPLAN 3716 52 200 0

Einfluss eines Großflughafens auf zeitliche und räumliche Verteilungen der Außenluftkonzentrationen von Ultrafeinstaub < 100 nm, um die potentielle Belastung in der Nähe zu beschreiben - unter Einbeziehung weiterer Luftschadstoffe (Ruß, Stickoxide und Feinstaub (PM-2,5 und PM-10))

1 Aufgabenstellung

Einträge von Luftschadstoffen stellen eine bedeutende Gefährdungsursache für die menschliche Gesundheit dar. Neben den bereits in der Luftqualitätsrichtlinie (EU-RL 2008/50/EC) geregelten Luftschadstoffen sind weitere Luftschadstoffe in der wissenschaftlichen Diskussion, die der menschlichen Gesundheit Schäden zufügen. Zu diesen Stoffen gehört einerseits Ruß, welcher in Langzeit Kohortenstudien einen Einfluss auf die Mortalität zeigte, andererseits Ultrafeinstaub (UFP), dem vielfältige negative Wirkungen inklusive auf das Gehirn zugeschrieben werden. Neuere Studien zeigen, dass in einigen Kilometern Entfernung von Flughäfen diese für die mehrfache Erhöhung der UFP-Konzentration in der Außenluft verantwortlich gemacht wurden. Erste orientierende Untersuchungen des UBA haben unterhalb der Einflugschneise kurzzeitig (< 30 sec) mehr als 1 Million Partikel pro Kubikzentimeter gemessen, bei Hintergrundwerten von 10.000 Partikeln pro Kubikzentimeter.

Ziel des Projektes ist es deshalb, den Einfluss eines Großflughafens auf erhöhte Konzentrationen der Luftschadstoffe Ultrafeinstaub, Ruß, NO₂, PM₁₀ und PM_{2,5} zu ermitteln. Der Schwerpunkt soll dabei auf Ultrafeinstaub gemessen in Partikelanzahl liegen.

Dazu soll durch Modellrechnungen die räumlich differenzierte Exposition der Bevölkerung in der Umgebung eines Großflughafens von bis zu ca. 30 km ermittelt werden. Dabei sollen verschiedene Modellansätze verwendet werden. Weitergehendes Ziel der Studie ist es, Empfehlungen für detailliertere Modellstudien mit erweiterten Modellansätzen abzugeben.

Zur Validierung der Modellrechnungen sollen die Ergebnisse mit vorhandenen Messungen verglichen und die verschiedenen Modellansätze bewertet werden. Für die Messungen kann auf langjährige Messreihen aus dem UFOPLAN-Projekt GUAN, z. B. in 5 km Entfernung vom Flughafen Frankfurt zurückgegriffen werden. Des Weiteren soll eine Empfehlung für Messstrategien abgegeben werden um den Anteil des Flughafens und der Flugzeuge an der Luftbelastung quantifizieren zu können.

Ein weiteres Ziel ist, die methodischen Grundlagen für Langzeitstudien zu liefern.

2 Leistungsumfang

Die nachfolgend beschriebenen Leistungen orientieren sich an Ihrer Ausschreibung und an den Erfahrungen der Projektpartner. Wir (LOH) beabsichtigen, die Leistungen in Kooperation mit den Unterauftragnehmern

1. Ingenieurbüro Janicke,
2. Universität zu Köln, Rheinisches Institut für Umweltforschung (RIU),
3. MUVEDA Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR sowie mit der
4. Aarhus University (Dänemark), Department of Environmental Science - Atmospheric modeling (Herr Dr. Matthias Ketzler)

zu erbringen.

Die angebotenen Leistungen sind so angelegt, dass am Ende des Forschungsvorhabens die o. g. Ziele erreicht sind.

Das Projekt gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete:

1. Arbeitspaket 1: Literaturstudie und Recherche
2. Arbeitspaket 2: Modellierung
3. Arbeitspaket 3: Validierung
4. Arbeitspaket 4: Berichtswesen

2.1 Arbeitspaket 1

Im Rahmen der Literaturstudie und Recherche werden weltweite, europaweite und deutschlandweite Messungen und Modellstudien gesichtet und beurteilt. Außerdem werden bereits dokumentierte entwickelte Modelle zur Beurteilung von Luftschadstoffen gesichtet. Dabei wird vor allem recherchiert, ob bereits Modellansätze oder Abschätzungen existieren, die den kurzzeitigen Einfluss auf die Luftqualität (Stunden, evtl. Minuten oder Sekunden) unterhalb der Einflugschneisen von Flugzeugen wiedergeben können. Der Schwerpunkt liegt dabei bei Flugzeugen mit einer Startmasse > 300 t sowie mit zertifizierten Triebwerken von mehr als 26.7 kN (ab 26.7 kN liegen für Jet-Triebwerke zertifizierte Emissionswerte vor). Hier bauen wir auf Untersuchungen von Ketzler, M. and Berkowicz, R. (2004), Kumar, P., Ketzler, M., Vardoulakis, S., Pirjola, L. and Britter, R., (2011) sowie am Flughafen Kopenhagen aus Winther et al. (2015) auf.

Es werden die aktuellen ICAO-Normen für Partikel- und Rußausstoß benutzt. Zur Abschätzung von UFP-Emissionsfaktoren für Flugzeugtriebwerke werden verschiedene Ansätze herangezogen (siehe hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 2.2.1).

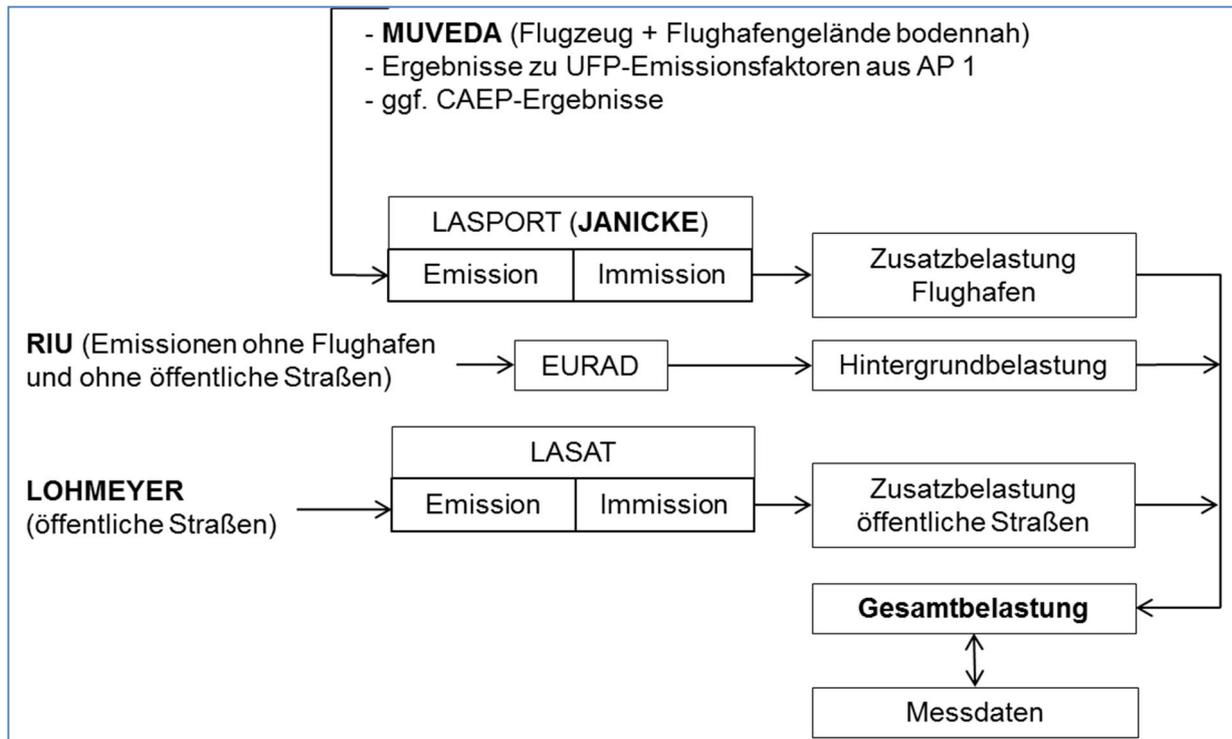
Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren werden anhand der Spannweiten der in der Literatur veröffentlichten Werte angegeben. Es werden auch Befragungen von Experten auf dem Gebiet der UFP (z. B. IfT Leipzig (Prof. Dr. Wiedensohler) oder LfULG Sachsen (Dr. Löschau)) durchgeführt. Bei größeren Unsicherheiten werden obere und untere Abschätzungen vorgenommen, die dann als Szenarien für die Ausbreitungsrechnungen verwendet werden können.

Diese Arbeiten werden maßgeblich durch Herrn Dr. Ketzler, durch LOH sowie durch RIU durchgeführt. Von Herrn Dr. Janicke werden neueste Erkenntnisse aus den verschiedenen Gremien der Umweltabteilung CAEP der ICAO einfließen, soweit sie öffentlich nutzbar sind.

2.2 Arbeitspaket 2

Der Arbeitsablauf sowie das Zusammenspiel der verschiedenen Datenquellen und Modelle ist schematisch in **Abbildung 1** dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Modellierung



2.2.1 Flughafenbezogene Emissionen

Die flughafenbezogenen Emissionen werden mit dem Modellsystem LASPORT behandelt. LASPORT (Janicke et al., 2007) ist das Standardsystem der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV). LASPORT wurde von der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) evaluiert (ICAO, 2010) und wird seit vielen Jahren an Europäischen Verkehrsflughäfen eingesetzt, unter anderem am hier zu behandelndem Flughafen Frankfurt am Main (siehe z. B. Umwelterklärung Flughafen Frankfurt 2014).

Mit LASPORT werden die Emissionen aus Flugverkehr (Haupttriebwerke), Hilfstriebwerken (APU), Bodenabfertigung (GPU/GSE) sowie luftseitigem Kfz-Verkehr bestimmt. Darüber hinaus können weitere Emissionsquellen unter Angabe der Emissionsdichte in LASPORT eingebunden werden. Die Emissionen werden in eine Ausbreitungsrechnung mit LASAT (siehe 2.2.2) überführt. Der Flugverkehr kann detailliert berücksichtigt werden, bei Bedarf mit einer zeitlichen Auflösung einzelner Start- und Landevorgänge bis hinunter zu 10 Sekunden (Monitor-Rechnung). Das typische Auswertintervall liegt zwischen einer Minute und einer Stunde, typische Betrachtungszeiträume zwischen einem Tag und einem Jahr. Die räumliche Auflösung beträgt typischerweise einige Dekameter bis einige 100 m, die Ausdehnung des Betrachtungsgebietes einige Kilometer bis einige 10 Kilometer. Die Projektanforderungen (ein Jahr stundenfein aufgelöst, räumliche Auflösung mindestens 100 m) können damit problemlos erfüllt werden.

Der Flughafen Frankfurt am Main setzt zur Simulation der flugverkehrsbedingten Immissionen LASPORT ein. Darüber hinaus werden die detaillierten Daten der bodennahen Emissionsquellen derzeit von der MUVEDA - Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR im Rahmen eines Emissionsinventars aufbereitet. Die Grundlage zur Erweiterung des Schadstoffspektrums um PM_{0,01}-Kennwerte zur Abschätzung der Anzahl ultrafeiner Partikel ist die im Arbeitspaket 1 durchgeführte Literaturrecherche.

Folgende Eingangsdaten für die LASPORT-Modellierung werden von MUVEDA (in Abstimmung mit dem Flughafen Frankfurt) zur Verfügung gestellt:

1. Flugtagebuch

Für die zu betrachtende Episode werden die realen Flugdaten der Fraport AG übernommen, aufbereitet und in LASPORT importiert. Die Daten des Flugtagebuches bilden ferner eine wichtige Grundlage um den räumlichen und zeitlichen Bezug weiterer Emissionsquellen (insbesondere Flugzeugabfertigung, GPU-Einsatz und Flugzeugschlepps) abzubilden. So werden die Daten des Flugtagebuches auch entsprechend den Anforderungen dieser Emissionsquellen ausgewertet und aufbereitet.

2. Verortung Emissionsquellen

Alle sich auf dem Flughafen Frankfurt befindlichen Emissionsquellen werden georeferenziert als Linien-, Flächen- und Punktquellen verortet und gemäß den Anforderung von LASPORT aufbereitet und importiert.

3. Meteorologische Daten

Für die zu betrachtende Episode im Jahr 2015 werden meteorologische Daten und Klimadaten der DWD-Messstation am Flughafen Frankfurt aufbereitet und in Form einer AKTerm und einer Temperaturganglinie in LASPORT importiert.

4. Flugverkehr

Über das Flugtagebuch werden von LASPORT mit Hilfe eines internen Emissionsmodells jedem Flugzeug spezifische Emissionskennwerte und Verweildauern in den einzelnen LTO-Phasen zugeordnet. Entsprechend werden hinsichtlich des APU-Betriebs und der Triebwerksprobe- und -prüfläufe flugzeug- und flughafenspezifische Kennwerte berücksichtigt.

5. Kfz-Verkehr auf Betriebs- und Vorfeldstraßen

Für die zu betrachtende Episode wird der Kfz-Verkehr auf den Betriebs- und Vorfeldstraßen prognostiziert und in LASPORT importiert. Es werden flughafenspezifische Emissionsfaktoren an LASPORT übergeben, die das Emissionsverhalten der Betriebs- und Vorfeldflotte zum Zeitpunkt der betrachteten Episode widerspiegeln.

6. Flugzeugabfertigung

Es werden ein für den Flughafen Frankfurt spezifisches Abfertigungsequipment und ein spezifischer Abfertigungsablauf berücksichtigt, welche in Abhängigkeit vom Abfertigungsort und der Flugzeuggröße differenzieren. Sich daraus ergebende Kennwerte werden so an LASPORT übergeben, dass eine Berechnung über das Flugtagebuch und eine Zuordnung zu Positionsbereichen möglich ist.

7. GPU

Es werden spezifische Kennwerte zur Berechnung der GPU-Emissionen an LASPORT übergeben. Wie bei der Flugzeugabfertigung erfolgt die Emissionsberechnung über das Flugtagebuch und eine Zuordnung zu den Positionsbereichen.

8. Schlepprouten

Es werden die Kenndaten zur Ermittlung der Emissionen der Flugzeugschlepper auf den Schlepprouten zwischen Positionsbereichen bzw. Werftbereichen ermittelt und als eigene Emissionsquelle in LASPORT implementiert.

9. Notstromersatzanlagen

Für die zu betrachtende Periode werden die Emissionen der Notstromersatzanlagen auf dem Flughafen Frankfurt entsprechend der Beschreibung in Kapitel 2.1.5 ermittelt und als Punktquellen in LASPORT importiert. Die zeitliche Auflösung wird durch einen Tages-, Wochen- und Jahresgang abgebildet.

10. Feuerungsanlagen

Neben zahlreichen kleinen Heizöl- und Gasfeuerungsanlagen tragen insbesondere das Heiz-/Kältewerk der Mainova und das Heizhaus Süd, die sich beide auf dem Flughafengelände befinden, zu den Emissionen dieser Emittentengruppe bei. Da zumindest das Heiz-/Kältewerk im Emissionskataster Industrie erfasst ist, wird die Einbindung dieser Emittentengruppe in das LASPORT-Projekt und die diesbezügliche Zuordnung dieser Quellen zu den flughafenspezifischen Emissionen nur optional angeboten.

11. Kfz-Verkehr auf Parkierungsanlagen

Berücksichtigt werden die Emissionen des Kfz-Verkehrs auf den Parkierungsanlagen, die zwar im öffentlichen Bereich liegen, deren Nutzung aber ausschließlich dem Flughafen zugeschrieben werden kann. Die Parkplätze werden als Flächenquelle in LASPORT berücksichtigt und die Parkhäuser als Volumenquelle. Für die zu betrachtende Episode werden spezifische Belegungsdaten von der FRAPORT AG zur Verfügung gestellt.

Die emissionsseitigen Datengrundlagen und Berechnungsmethoden von LASPORT sind konform mit dem ICAO-Dokument 9889 (*Airport Air Quality Manual*). Zertifizierungswerte von Flugzeugtriebwerken in Bezug auf PM existieren nicht, im Rahmen der Zertifizierung wird le-

diglich die sogenannte Rauchzahl (*Smoke Number*, SN) als Färbegrad eines Filtermaterials bestimmt. Ein in ICAO etabliertes Standardverfahren ist die sogenannte *First Order Approximation Version 3* (FOA3), mit der aus der Rauchzahl die Massenemission von nichtflüchtigem PM und mit Hilfe zusätzlicher empirischer Annahmen die effektive Massenemission von flüchtigem PM abgeschätzt wird. Die Datenbank von LASPORT enthält PM-Emissionswerte für Triebwerke auf der Basis von FOA3, für APU auf der Basis von ICAO 9889, für GSE auf der Basis von Auswertungen des Flughafens Zürich (die im Rahmen dieses Projektes nicht verwendet werden (siehe oben)) und für Kfz auf der Basis des Handbuchs HBEFA 3.2.

Im aktuellen Zyklus 11 des Umweltkomitees von ICAO (CAEP) werden für mögliche zukünftige Zertifizierungsanforderungen von Triebwerken in Bezug auf PM und UFP standardisierte Mess- und Modellierungsverfahren entwickelt und erprobt (ICAO, 2014). Soweit noch keine Messdaten öffentlich vorliegen, werden im Rahmen dieses Projektes aus den FOA3-Ergebnissen unter Annahme einer einmodigen Lognormalverteilung lastabhängige Anzahlmissionen von nichtflüchtigen UFP abgeschätzt. Diese und eventuell alternative, sich aus dem AP1 ergebende Emissionsabschätzungen werden in LASPORT übernommen, um die Anzahlmission und Anzahlkonzentration von UFP abzuschätzen.

2.2.2 Flughafenbedingte Immissionen (Ausbreitungsmodellierung)

Hierzu wird das Ausbreitungsmodul (LASAT, siehe Kap. 3.2.3) des Modells LASPORT verwendet. Die Ergebnisse aus den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Emissionsberechnungen gehen hier ein. Ergebnis sind die flughafenbedingten Zusatzbelastungen.

Eine Berücksichtigung der Emission von flüchtigen UFP und ihrer Entstehung oder Umwandlung im Laufe des atmosphärischen Transports ist modelltechnisch mit dem in LASPORT verwendeten Ausbreitungsmodell LASAT zwar ohne weiteres möglich (Vorgabe von Emissionen und situationsabhängigen Umsetzungsraten), ein Problem liegt jedoch in der mangelnden Verfügbarkeit detaillierter und gesicherter Eingangsdaten, zumal die Umsetzungsprozesse von einer Vielzahl weiterer Faktoren (Hintergrundbelastung, meteorologische Kenngrößen) abhängen können. Daher wird vorgeschlagen, in einem ersten Schritt dem Beitrag flüchtiger Komponenten durch einen empirisch begründeten Zuschlag auf die Emission der nichtflüchtigen UFP Rechnung zu tragen.

Die Dynamik der UFP-Bildung aus Vorläuferstoffen (Nukleation und Kondensation) sowie das Größenwachstum (Koagulation) werden eingehend diskutiert und die Bedeutung dieser Vorgänge im Vergleich zur Ausbreitung oder Deposition wird anhand von Zeitskalenanalysen bewertet (Ketzler et al. 2004; Kumar et al. 2011). Gegebenenfalls werden diese partikeldynamischen Prozesse in parametrisierter Form in der Ausbreitungsmodellierung berücksichtigt.

2.2.3 Zusatzbelastung des öffentlichen Straßenverkehrs

Die Berechnung der Emissionen des Straßenverkehrs erfolgt durch LOH für die relevanten Straßen (im Wesentlichen für die Autobahnen) auf Basis streckenspezifischer Verkehrsmengen und Schwerverkehrsanteile unter Verwendung der Emissionsfaktoren für Partikelanzahlen und der anderen zu betrachtenden Schadstoffe aus dem HBEFA 3.2. Die zeitliche Auflösung erfolgt je nach Datenlage auf Basis streckenspezifischer oder standardisierter Tagesganglinien stundenfein.

Die Ausbreitungsmodellierung der Straßenverkehrsemissionen erfolgt mit dem Modell LASAT (Janicke, 2013). LASAT (Lagrange Simulation von Aerosol-Transport) ist ein Modell zur Berechnung der Ausbreitung von Spurenstoffen in der Atmosphäre, das in einem Computerprogramm realisiert ist. LASAT ist ein Episodenmodell, d. h. es berechnet den zeitlichen Verlauf der Stoffkonzentration in einem vorgegebenen Rechengebiet.

Bei der Ausbreitungsrechnung wird für eine Gruppe repräsentativer Stoffteilchen der Transport und die turbulente Diffusion durch einen Zufallsprozess auf dem Computer simuliert (Lagrange-Simulation).

LASAT ist konform mit der VDI-Richtlinie 3945 Blatt 3 „Partikelmodelle“ (VDI, 2000) und ist Grundlage des Ausbreitungsmodells AUSTAL2000 der TA Luft (2002), das vom Ingenieurbüro Janicke im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurde. LASAT ist Bestandteil des Modellsystems LASPORT und weiterer international eingesetzter Modellsysteme (z. B. JRODOS).

2.2.4 Modellierung der Hintergrundbelastung

Für die Modellierung der Hintergrundbelastung wird durch RIU das EURAD Modellsystem (Europäisches Ausbreitungs und Depositions Modell) eingesetzt. Das EURAD Modell ist ein hoch komplexes 3-dimensionales Chemie Transport Modell bei dem die Methode des dynamischen Downscaling angewandt wird, um die atmosphärischen Vorgänge von der kontinentalen Skala bis zur urbanen Skala zu simulieren. In dem Modellsystem ist ebenfalls ein Verfahren zur Datenassimilation enthalten, um Beobachtungswerte bei der Erstellung der Anfangswerte zu integrieren. Das EURAD Modell ist Teil des Copernicus Atmosphärendienst (CAMS). Die Randbedingungen für das äußere Modellgebiet sind somit gewährleistet.

Das EURAD-Modell beschreibt die physikalischen, chemischen und dynamischen Prozesse, die für die chemische Produktion, den Transport und die Deposition atmosphärischer Spurenstoffe von Bedeutung sind. Als Ergebnis liefert das Modell die zeitliche Variation und die räumliche Verteilung atmosphärischer Spurenstoffe für ausgewählte Gebiete. Anthropogene und biogene Emissionen können in das System integriert werden und erlauben die Untersuchung der Auswirkungen von Emissionsszenarien auf die Konzentration atmosphärischer Spurenstoffe und deren Deposition. Das Modell ist bisher sowohl für den europäischen Raum wie im lokalen Bereich angewendet worden. Die Verbindung der verschiedenen Ska-

len erfolgt durch das so genannte Nesting-Verfahren, das immer wieder erfolgreich angewendet werden konnte. Vertikal erstreckt sich das Modell vom Boden bis ca. 16 km (100 hPa). Die vertikale Auflösung umfasst 23 Schichten, davon 15 Schichten unterhalb von 3000 m. Die horizontale Auflösung kann von einigen 100 km bis unter 1 km variieren.

Das EURAD Modellsystem besteht aus den 3 Hauptkomponenten:

1. WRF (Weather Research and Forecast Model) zur Bereitstellung der meteorologischen Größen (Skamarock et al., 2008; www.wrf-model.org).
2. EEM (EURAD Emission Modul) zur Bereitstellung der Emissionsdaten auf der Mesoskala.
3. EURAD-CTM (EURAD Chemie Transport Modell) zur Simulation des atmosphärischen Spurenstofftransports.

1. Meteorologisches Modell (WRF)

Das WRF Modell ist fester Bestandteil im EURAD Modell System. Es ist ein weltweit angewandtes 3-dimensionales Wetter-Vorhersage-Modell mit einer großen „Community“. Es wird sowohl als reines Wetter-Vorhersage-Modell also auch als meteorologischer Treiber für eine Vielzahl von Chemie-Transport-Modellen weltweit eingesetzt. Es liefert alle relevanten meteorologischen Größen in Skalen von einigen 100 km bis unter 1 km Gitterweite. Die meteorologischen Variablen liegen auf den gleichen Gitterpunkten wie im EURAD-CTM und sind somit massen- und impulserhaltend.

2. Emissionen (EEM)

Das EURAD Emissions-Modul EEM interpoliert weltweit vorhandene Emissionsdaten (EDGAR, EMEP, nationale und regionale Emissionskataster) auf die Gitterstruktur des EURAD-CTM.

3. EURAD-CTM (EURAD Chemie Transport Modell)

- Gasphasenchemie

Zur Behandlung der Gasphasenchemie wird im EURAD-CTM der Chemiemechanismus RACM-MIM (Geiger et al., 2003; Karl et al., 2004, Karl et al., 2006) verwendet. Dieser umfasst 158 chemische Reaktionen und 63 gasförmige Substanzen, von denen 42 in der Atmosphäre transportiert werden. Neben den primär emittierten gasförmigen anorganischen Verbindungen (NO_2 , NO , NH_3 , SO_2 , SO_4 , CO) und 16 organischen Verbindungen (teilweise gruppiert nach ihrer Reaktivität) werden damit auch photochemisch produzierte Folgeprodukte erfasst (O_3 , PAN, H_2O_2 , N_2O_5 , HONO, HNO_3 , HNO_4) also vor allem Bestandteile des photochemischen Smogs.

- Aerosolchemie

Im Aerosolbereich wird die neueste Version des Aerosoldynamikmodells MADE-SORGAM (MADOC: Modal Aerosol Dynamics Model with Organics and Clouds; Ackermann et al., 1998; Schell, 2000; Schell et al., 2001; Memmesheimer et al., 2004) verwendet. Im Rahmen der modalen Struktur von MADOC wird angenommen, dass das Aerosol aus verschiedenen Populationen (Moden) besteht, deren Größenverteilung durch eine Log-Normalverteilung angenähert werden kann. Zurzeit werden drei verschiedene Moden zur Beschreibung des atmosphärischen Aerosols verwendet (Aitken- und Akkumulationsmode; Grobpartikelmode). Das Modell liefert damit für jeden Gitterpunkt die Aerosolanzahl-Konzentration pro Mode und die Konzentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] verschiedener Aerosolspezies.

- Physikalische Parametrisierungen

- Photolyse Frequenzen: Strahlungstransport Modell mit delta-Eddington Technik.
- Trockene Deposition und Sedimentation: Widerstandsmodell nach Zhang et al., 2003.
- Wolken: EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modelling system (Roselle and Binkowski, 1999), Nasse Deposition.

1. Datenassimilation

Ein Kernpunkt des EURAD-Modell-System ist die Datenassimilation der relevanten atmosphärischen Spurenstoffe. Hierzu wurde ein komplexer 3-dimensionaler variationaler Datenassimilations-Ansatz (3-D Var) entwickelt (Strunk, 2006 und Elbern et al., 2007). Dieser Algorithmus ermöglicht es, Beobachtungsdaten während der Simulation zu integrieren. Ein Beobachtungsdatensatz des UBA liegt vor und wird täglich aktualisiert. Die Datenassimilation kann sowohl prognostisch wie diagnostisch eingesetzt werden. Ein 4-D Var-Ansatz der Assimilation mit Vorwärts- und Rückwärts-Integration steht ebenfalls zur Verfügung, kann aber wegen des enormen Rechenaufwandes nur für kurzzeitige Rechnungen eingesetzt werden.

2. Eingabedaten

Meteorologische Eingabedaten werden vom mesoskaligen meteorologischen Modell WRF erzeugt, das durch NCEP-GFS Daten getrieben wird. Die NCEP-GFS Daten stehen seit dem Jahr 2000 zur Verfügung und werden täglich aktualisiert. Neben meteorologischen Daten werden die Topographie und die Landnutzung in einer modelladäquaten Form benötigt. Die verfügbaren Daten für Landnutzung und Topographie wurden im Rahmen eines Updates des meteorologischen Modells verbessert (WRF USGS Daten:

Auflösung der Topographie: 30 Bogensekunden; 24 Klassen bei der Landnutzung bei einer Auflösung von ebenfalls 30 Bogensekunden).

Die Modellrechnungen mit EURAD erfolgen im vorliegenden Projekt in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Messdaten für die zu betrachtende Episode im Jahr 2015.

Die horizontale Modellauflösung wird dabei ausgehend von der regionalen Europäischen Skala schrittweise bis zur lokalen Skala um den Frankfurter Flughafen mit dem Nestfaktor 5 verfeinert. Dabei ist zu beachten, dass der Rechenaufwand in den Zeitrahmen des Projekts passt und eine Übergabe der EURAD Rechnungen an die nachfolgenden hochaufgelösten Modelle auf der kleineren Skala in etwa dem gleichen Nestfaktor entsprechen. Folgende Modellgebiete werden vorgeschlagen:

	Gebiet	Fläche (km)	horizontale Auflösung
Nestebene 0	Europa	6250 x 5500	62,5 km
Nestebene 1	Mitteleuropa	3325 x 2575	12,5 km
Nestebene 2	Rhein/Main	250 x 250	2,5 km
Nestebene 3	Frankfurt Flughafen	70 x 70	500 m

In allen Nestebenen werden in situ Beobachtungen der Luftschadstoffe NO, NO₂, NO_x, O₃, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ und Ruß, sowie verfügbare Beobachtungen der Partikelanzahl (PN) assimiliert. Bodenmessungen von NO, NO₂, O₃, SO₂, PM_{2.5} und PM₁₀ werden vom Umweltbundesamt und von der Europäischen Umweltbehörde (EEA) bereitgestellt.

Die Emissionen auf der Nestebene 0 (Europa) werden mit der EMEP Emissionsdatenbank (<http://www.emep.int/>) erstellt. Auf allen weiteren Nestebenen wird mit dem am UBA betriebenen Tool GRETA die Verteilung der nationalen Emissionsjahreswerte erstellt.

Die Simulationen mit dem EURAD-Modell erfordern einen hohen Aufwand an Rechenzeit und liefern ein erhebliches Datenvolumen. Daher ist die Beschaffung von Datenträgern erforderlich.

Das EURAD-Modell liefert alle relevanten oben beschriebene Konstituenten für die nachfolgenden mikroskaligen Modelle. Für den UFP Bereich liefert das EURAD-Modell die Anzahldichten und die Massen von Ammonium, Nitrat und Sulfat unterhalb von 100 nm.

Um die Emissionen des öffentlichen Straßenverkehrs in der Umgebung des Flughafens und des Flughafens selbst (siehe oben) in der Modellierung nicht doppelt zu berücksichtigen, werden diese Emissionsquellen im EURAD-Modellsystem nicht eingebunden.

2.2.5 Ermittlung der Gesamtbelastung

Die gemäß den Kapiteln 2.2.2 bis 2.2.4 bestimmten Hintergrund- und Zusatzbelastungen werden als Gesamtbelastung zusammen geführt und stehen somit zur Diskussion und Bewertung sowie für den Vergleich mit den Messdaten zu Verfügung.

Es wird vorgeschlagen, die Ausbreitungsrechnungen in AP2 für den Betrachtungszeitraum durchzuführen, der auch dem AP3 zugrunde liegt. Angesichts des in der Leistungsbeschreibung aufgeführten zusätzlichen Messstandortes am Flughafen Frankfurt seit September 2015 bietet es sich an, einen Zeitraum nach September 2015 zu wählen. Die Länge des Zeitraums ist in der Leistungsbeschreibung nicht näher spezifiziert und kann im Laufe des Projektes noch festgelegt werden, anbieten würde sich ein Zeitraum zwischen 1 und 6 Monaten, damit eine zeitlich und statistisch repräsentative Datengrundlage geschaffen wird.

Es wird vorgeschlagen, die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen auf der Basis von Stundenmitteln auszuweisen, wobei die Ergebnisse der drei Teilrechnungen (großes Gebiet mit EURAD, öffentlicher Kfz-Verkehr und weitere Quellen außerhalb des Flughafens mit LASAT, flughafengebundene Quellen mit LASPORT/LASAT) jeweils stundenweise zur Ermittlung der stundenweisen Gesamtbelastung addiert werden. Eine solche Aufteilung bzw. Addition ist zulässig, solange nichtlineare Umsetzungsprozesse vernachlässigt werden können. Die Stundenmittel der Gesamtbelastung werden dann im AP3 mit Messwerten verglichen und gegebenenfalls zu längeren Zeitmitteln (Tagesmittel, Monatsmittel) zusammengefasst.

Es wird angenommen, dass die geforderte räumliche Auflösung von mindestens 100 m nur im Nahbereich des Flughafens erforderlich ist. Emissionen in der Umgebung des Flughafens haben sich nach einem Transport über 10 km bis 20 km Entfernung bereits so homogen verteilt, dass hier unter Umständen auch eine gröbere Auflösung gewählt werden kann.

2.2.6 Statistische Datenanalyse

Optional wird die Auswertung mehrjähriger Messreihen für UFP an 2 Messstationen in der Umgebung des Flughafens in Kombination mit meteorologischen Parametern wie „Windrichtung“, „Windgeschwindigkeit“, „Niederschlagsmenge“, „Temperatur“ und „Globalstrahlung“ sowie der Emissionszeitreihen des Flughafens und des Straßenverkehrs angeboten. Dies erfolgt auf Basis der jeweiligen Tagesmittelwerte.

Ziel der Analyse ist es, Informationen über den Einfluss der Meteorologie sowie der Emittenten auf die Konzentration der UFP an den Messstationen zu erhalten. Dazu wird durch LOH mit Hilfe von Klassifikationsverfahren eine statistische Analyse mit dem Programm SYSTAT¹ durchgeführt. Hierbei verweisen wir auf unsere umfangreichen Erfahrungen aus anderen Projekten, z. B. Düring et al. (2006), Lohmeyer et al. (2006_a, 2006_b, 2007).

¹ http://www.systat.de/SYSTAT_Produktseite.html

Als Ergebnis liegen demnach Aussagen vor ob und wenn ja in welchem Maße sich Korrelationen zwischen den verschiedenen Einflussparametern und den UFP-Messdaten ableiten lassen.

Falls sich diese mit einer entsprechenden statistischen Sicherheit zeigen sollten, könnten diese in Folgeprojekten für die Erstellung statistischer Monitor- oder Prognosemodelle genutzt werden.

2.3 Arbeitspaket 3

Zur Validierung und Bewertung der Modellansätze werden die Ergebnisse der im Arbeitspaket 2 durchgeführten Modellierungen durch LOH mit vorliegenden Messwerten aus dem Untersuchungsgebiet verglichen. Dabei werden vor allem die Daten der langjährigen Messreihen der UBA-Messstation in Langen (ca. 5 km südöstlich des Frankfurter Flughafens) sowie die seit September 2015 gemessenen Daten der Messstation Raunheim (westlich des Flughafens) ausgewertet.

Des Weiteren wird eine Empfehlung für Messstrategien abgegeben um den Anteil des Flughafens und des Flugverkehrs an der Luftbelastung quantifizieren zu können.

Literatur

- Ackermann et al. (1998): Ackermann, I. J., H. Hass, M. Memmesheimer, A. Ebel, F.B. Binkowski, and U. Shankar: Modal Aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications. *Atmos. Environ.*, 32, 2891-2999, 1998.
- Düring et al. (2006): Entwicklung eines Prognosemodells für Feinstaubkonzentrationen an verschiedenen Messorten des Luftüberwachungssystems Sachsen-Anhalt (LÜSA). Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Radebeul. Projekt 70250-05-10, Juni 2006. Gutachten im Auftrag von: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Außenstelle Magdeburg.
- Elbern et al. (2007): Elbern, H., A. Strunk, H. Schmidt, and O. Talagrand, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1-59, 2007.
- Geiger et al. (2003): Geiger, H., I. Barnes, I. Bejan, T. Benter and M. Spittler, The tropospheric degradation of isoprene: an updated module for the regional atmospheric chemistry mechanism, *Atmospheric Environ.*, 37, 1503-1519, 2003.
- ICAO (2010): ICAO Environmental Report 2010. <http://www.icao.int>
- ICAO (2014): ICAO Environmental Report 2014. <http://www.icao.int>
- International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purposes, Cambridge, England. <http://www.harmo.org>
- Janicke, U., Fleuti, E., Fuller, I. (2007): LASPORT - A model system for airport related source systems based on a Lagrangian particle model. Proceedings of the 11th
- Janicke (2013): Dispersion Model LASAT Version 3.3 Referenz Book. Janicke Consulting, Überlingen, Juli 2013.
- Karl, M., T. Brauers, H.-P. Dorn, F. Holland, M. Komenda, D. Poppe, F. Rohrer, L. Rupp, A. Schaub, A. Wahner (2004): Kinetic Study of the OH-Isoprene and O₃-Isoprene Reaction in the Atmosphere Simulation Chamber, SAPHIR, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L05117, doi:10.1029/2003GL019189, 2004.
- Karl, M., H.-P. Dorn, F. Holland, R. Koppmann, D. Poppe, L. Rupp, A. Schaub, A. Wahner (2006): Product Study of the Reaction of OH Radicals with Isoprene in the Atmospheric Simulation Chamber SAPHIR, *J. Atmos. Chem.* 55, 167 – 187, DOI 10.1007/s10784-006-9034-x, 2006.
- Ketzel, M. and Berkowicz, R. (2004): Modelling the fate of ultrafine particles from exhaust pipe to rural background: an analysis of time scales for dilution, coagulation and deposition. *Atmospheric Environment* 38, 2639-2652.

- Kumar, P., Ketzel, M., Vardoulakis, S., Pirjola, L. and Britter, R. (2011): Dynamics and dispersion modelling of nanoparticles from road traffic in the urban atmospheric environment - a review. *Journal of Aerosol Science*, 42, 580-603.
- Lohmeyer (2006_a): Development of a PM10 concentration forecast model by multi regression summery for LUBW monitoring station Freudenstadt, EU-project MARQUIS EDC-11258, Mai 2006
- Lohmeyer (2006_b): Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PMx-Belastung an Straßen. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Radebeul in Zusammenarbeit mit IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH und Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften. Projekt 70227-05-10, November 2006. Sachstandsbericht im Auftrag von: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Lohmeyer (2007): ProFet-Modellanpassung und Erweiterung. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG, Radebeul. Projekt 70350-06-07, August 2007. Gutachten im Auftrag von: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Außenstelle Magdeburg.
- Memmesheimer, M., E. Friese, A. Ebel, H. J. Jakobs, H. Feldmann, C. Kessler, G. Piekorz (2004): Long-term simulations of particulate matter in Europe on different scales using sequential
- MUVEDA (2006): Ausbau Flughafen Frankfurt Main, Band C, G13.2 Luftschadstoffgutachten - Kfz-Verkehr und stationäre Quellen auf dem Flughafengelände. MUVEDA – Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR, Aachen 2006.
- TA Luft (2002): 1. Allg. Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). GMBI. 2002, Heft 25 – 29, S. 511 – 605.
- VDI (2000): Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Partikelmodell. Richtlinie VDI 3945, Blatt 3. September 2000. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- Winther et al. (2015): Emissions of NOx, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport. *Atmospheric Environment* 100 (2015) 218-229.