



Chemische Charakterisierung von Ultrafeinstaub in der Abluftfahne eines Flughafens

Florian Ungeheuer (ungeheuer@iau.uni-frankfurt.de), Alexander L. Vogel (vogel@iau.uni-frankfurt.de)
 Institut für Atmosphäre und Umwelt, Goethe-Universität Frankfurt, Frankfurt am Main, Deutschland

Abstract

Große internationale Flughäfen sind seit einiger Zeit als Quelle von ultrafeinen Partikeln (UFPs) bekannt (1, 2). Die organisch-chemische Zusammensetzung von UFPs, die vom Frankfurter Flughafen stammen, wurde mittels Non-Target-Screening anhand von Filterproben analysiert. Die Probenahme erfolgte an einer Luftmessstation 4 km nördlich des Frankfurter Flughafens großenaufgelöst mit einem 13-stufigen Impaktorsystem (Nano-MOUDI). Die chemische Charakterisierung mittels hochauflösender-Massenspektrometrie im Größenbereich von 10-18 nm, 18-32 nm und 32-56 nm zeigte, dass die meisten der nachgewiesenen Verbindungen aus Triebwerksölen stammen, welche in Flugzeugturbinen eingesetzt werden. Eine quantitative Analyse ermöglichte die Bestimmung des Anteils dieser Verbindungen an der Partikelmasse. Darüber hinaus wurde das Potenzial synthetischer Triebwerksöle zur Partikel-Neubildung untersucht.

Einleitung

Als „Ultrafeine Partikel“ (UFPs) werden Aerosolpartikel mit einem Durchmesser kleiner 100 nm definiert. Verschiedene anthropogene Quellen im städtischen Umfeld wie Verkehr und Industrie setzen diese Partikel in hoher Anzahl frei, häufig resultierend aus Verbrennungsprozessen (3).

Inzwischen ist allgemein anerkannt, dass UFPs einen Einfluss auf die Luftqualität haben, weshalb die Umwelt- und Gesundheitsaspekte dieser Partikel immer mehr in den Fokus rücken. Die generelle Belastung durch Feinstaub wird unter anderem mit einer Vielzahl von Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen in Verbindung gebracht. Aktuelle Forschungsergebnisse implizieren eine Verringerung der durchschnittlichen Lebenserwartung um ~2,2 Jahre durch Luftverschmutzung (4). Als Konsequenz hat die Weltgesundheitsorganisation (WHO) den Grenzwert für die Jahresmittel-Konzentration von PM_{2,5} in der Luft gesenkt (5). Obwohl kein Grenzwert für UFPs festgelegt wurde empfiehlt der WHO-Bericht (5) schlussendlich ihre Überwachung, da UFPs sehr tief in Gewebe eindringen können, sodass selbst Stoffe ohne toxikologische Relevanz durch die Ausbildung von nanoskaligen Strukturen schädlich werden können (6, 7). Aufgrund zunehmender Relevanz hat die Europäische Union beschlossen, dass zukünftig Messungen von UFPs in allen EU-Mitgliedsstaaten als Teil ihrer lokalen Luftqualitäts-Strategien erforderlich sind (8).

Verschiedene Studien in den letzten Jahren haben gezeigt, dass Flughäfen starke Punktquellen von UFPs sind (1, 9–11). Diese Emissionen zeichnen sich durch hohe Anzahlkonzentrationen und mittlere Partikelgrößen kleiner als 30 nm aus (12,

13). Eine Folge der hohen Partikelkonzentrationen ist auch eine verstärkte räumliche Ausbreitung und Infiltration von Innenräumen in der Umgebung von Flughäfen (14, 15).

Die sehr geringe Masse von Flughafen-UFPs erschwert die chemische Analyse dieser Partikel, weshalb bislang nur wenige Studien diesbezüglich publiziert wurden. Wir haben die organische Zusammensetzung von UFP-Emissionen des Frankfurter Flughafens charakterisiert. Neben einer qualitativen Analyse mittels Non-Target-Screening konnten wir ebenfalls den Anteil der Triebwerksöle an der Partikelmasse bestimmen und die Fähigkeit der Triebwerksöle zur Partikel-Neubildung untersuchen.

Methoden

Zur chemischen Charakterisierung der UFPs wurden Aluminiumfilterproben an einer Luftmessstation 4 km nördlich des Flughafens Frankfurt am Main mit einem 13-stufigen Impaktorsystem (Nano-MOUDI; Model 115, MSP, Minneapolis, MN, USA) gesammelt (Abb. 1). Die Probenahme auf den drei untersten Stufen (10-18 nm; 18-32 nm; 32-56 nm) erfolgte durch Impaktion der Partikel auf Aluminiumfolien. Die Folien der oberen zehn Stufen wurden mit Silikon beschichtet, um zu verhindern, dass größere Partikel und Partikelfragmente die unteren Stufen erreichen. Die beprobten Filter wurden anschließend in Metallschalen bei -20 °C gelagert, um chemische Reaktionen und Evaporation von Verbindungen zu vermeiden. Blindwert-Proben im gleichen Größenbereich < 56 nm wurden ohne aktiven Volumenstrom gesammelt. Um die Flughafenemissionen zu charakterisieren, erfolgte die Probenahme nur während der Betriebszeiten (5:00 – 23:00 Uhr MEZ) und bei südlicher Windrichtung. Die gesammelten UFP-Proben decken die durchschnittlichen UFP Immissionen in der Abgasfahne des Flughafens ab, mit Beiträgen verschiedener Arten von Flugzeugtriebwerken, Kraftstoffen, Triebwerksölen und Betriebsbedingungen. Aufgrund der Größe des Flughafens und der Nähe zum Flughafen können die an dieser Station entnommenen Proben als repräsentativ für die Emissionen großer internationaler Flughäfen angesehen werden.

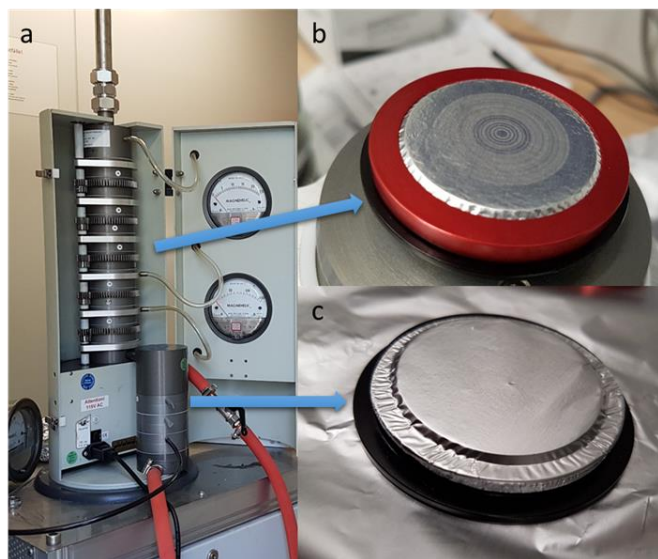


Abbildung 1: Der Nano-MOUDI-Probennehmer zur Sammlung von ultrafeinen Partikeln (UFPs) (a). Aluminiumfolien nach der Probennahme auf den zehn oberen Stufen (b) und auf den drei unteren Stufen (c; 32-56 nm).

Die chemische Charakterisierung von UFPs im Größenbereich von 10-18 nm, 18-32 nm und 32-56 nm erfolgte durch Ultra-Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (UHPLC, Vanquish Flex, Thermo Fisher Scientific), gefolgt von Elektrospray-Ionisation (HESI) und Detektion durch ein hochauflösendes Orbitrap-Massenspektrometer (HRMS, Q Exactive Focus Hybrid Quadrupole-Orbitrap, Thermo Fisher Scientific). Die Charakterisierung von Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern < 56 nm erfordert den Nachweis von organischen Molekülen im niedrigen Pikogramm-Bereich. Mittels Non-Target-Screening konnten wir chromatographische Peaks anhand der genauen Masse, des Isotopenmusters und des MS²-Fragmentierungsmusters identifizieren. Darüber hinaus können diese Fragmentierungsspektren mit Datenbanken abgeglichen werden, um die Molekül-Identifikation weiter zu verbessern. Basierend auf diesen Informationen können Molekülformeln berechnet und Verbindungen identifiziert werden. Diese Messungen führten zur Identifikation von Triebwerksölbestandteilen in UFPs.

Weiterhin wurde die Flüchtigkeit von UFPs aus Triebwerksöl anhand von Thermodenuder-Messungen und Analyse der Partikelgrößenverteilung der erzeugten Öl-UFPs bei zwei verschiedenen Temperaturen untersucht. Dazu wurden Ölpartikel erzeugt und diese abwechselnd durch ein beheiztes beziehungsweise unbeheiztes Rohr (Thermodenuder) geleitet. Die Größenverteilung der Partikel wurde mithilfe eines Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) gemessen, nachdem sie den Thermodenuder bei 20 °C oder 300 °C passiert hatten. Ein Vergleich der SMPS-Masse bei beiden Temperaturen ergab den verbleibenden Anteil des Öls bei der erhöhten Temperatur. Über eine Modellierung unter Berücksichtigung der Molekülstrukturen konnten die einzelnen Öl-Verbindungen in Flüchtigkeitssklassen unterteilt werden.

Um die Ergebnisse des Laborexperiments weiter zu untermauern und da die Relevanz der chemischen Zusammensetzung von UFPs für die menschliche Gesundheit vom Massenanteil der einzelnen Verbindungen abhängt, wurden die Öl-Bestandteile in den gesammelten UFPs quantifiziert. Dies geschah durch Standardaddition von authentischen Standards zu den nativen UFP-Filterextrakten. Zwei Amine, die als Stabilisatoren dienen, ein Organophosphat, das als Anti-verschleißmittel/Metaldeaktivator verwendet wird und zwei Estergrundstoffe wurden quantifiziert. Zusätzlich konnte durch die Charakterisierung des Nano-MOUDI Sammlers die Sammelverluste für jede Größenstufe bestimmt und die Ergebnisse entsprechend korrigiert werden. Messungen der Partikelgrößenverteilung in der Umgebung des Flughafens, die parallel zur Filterbeprobung durchgeführt wurden, ermöglichten die Bestimmung des Anteils der Triebwerksöle an der UFP-Masse.

Ergebnisse

Im Rahmen des Non-Target-Screenings konnte die Mehrzahl der nachgewiesenen Verbindungen homologen Reihen zweier verschiedener Arten von organischen Estern zugeordnet werden. Diese dienen als Basiskomponenten in Flugzeugschmierölen. Basierend auf fünf verschiedenen Triebwerkschmierölen verschiedener Hersteller wurden die entsprechenden Basisverbindungen und Additive in den UFPs anhand der übereinstimmenden Retentionszeit, der genauen Masse und des MS/MS-Fragmentierungsmusters einzelner organischer Moleküle identifiziert. Die erstellten molekularen Fingerabdrücke (Abb. 2a) zeigten ein charakteristisches Muster der Triebwerksöl-Bestandteile. Jeder Kreis stellt hierbei eine Verbindung dar, und die Farbgebung beschreibt die Zugehörigkeit zu einer molekularen Gruppe. Signale, denen keine Molekülformel zugeordnet werden konnte, werden als „other“ klassifiziert. Die Fläche der Kreise ist proportional zur gemessenen Signalintensität. In der Darstellung der Retentionszeit gegenüber dem Molekulargewicht sind die größten Signale den homologen Reihen von Pentaerythritolestern (Abb. 2a Reihe 1) (C₂₇₋₃₈H₄₈₋₇₀O₈; PEEs) und Trimethylolpropanestern (Abb. 2a Reihe 2) (C₂₇₋₃₄H₅₀₋₆₄O₆; TMPEs) zuzuordnen, die in Flugzeugschmierölen als Basisformulierung verwendet werden. Fragmente aus der Ionisierung (Abb. 2a Reihe 3) konnten ebenfalls detektiert werden.

Das Van Krevelen-Diagramm (Abb. 2b) beschreibt die verschiedenen Verbindungen hinsichtlich ihres Wasserstoff-zu-Kohlenstoff-Verhältnisses (H/C) und Sauerstoff-zu-Kohlenstoff-Verhältnisses (O/C). Verbindungen, die vor allem aromatische Strukturen aufweisen, haben ein H/C-Verhältnis von etwa 1. Trikesylphosphat, ein Additiv in synthetischem Triebwerksöl, enthält drei aromatische Kresol-Einheiten und erscheint somit in Abb. 2b als magentafarbener Kreis bei H/C=1 und O/C=0.2.

Die Darstellung des durchschnittlichen Oxidationszustands (avg. OSC) im Verhältnis zur Anzahl der Kohlenstoffatome (Abb. 2c) ist eine Möglichkeit, den Oxidationszustand kom-

plexer organischer Verbindungen zu charakterisieren (16). Hierbei konnten wir keine Hinweise für eine atmosphärische Oxidation von Triebwerksölemissionen finden. Die homologen Reihen der synthetischen Triebwerksöl-Ester konnten wir anhand der Darstellung des Kendrick-Massendefekt (CH_2)

gegenüber dem Molekulargewicht identifizieren (Abb. 2d). Verbindungen, die eine homologe Reihe bilden, werden hierbei als Horizontale dargestellt.

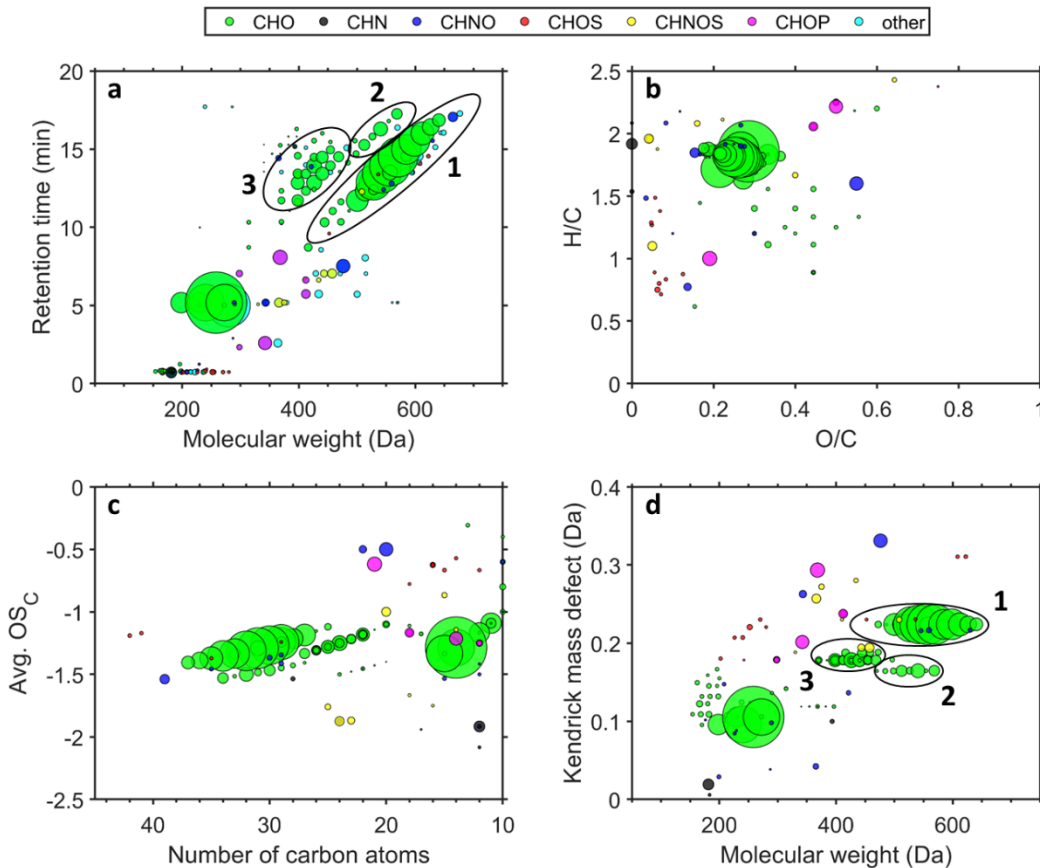


Abbildung 2. Molekulare Fingerabdrücke – Retentionszeit vs. Molekulargewicht (a), Van-Krevelen-Diagramm (b), Kroll-Diagramm (c), Kendrick-Massendefekt vs. Molekulargewicht (d) – von sechs gemittelten Flughafenproben im Größenbereich von 32–56 nm. Entnommen aus (17).

Weiterhin hat die Analyse des Musters der Signalintensitäten der einzelnen synthetischen Ester bekräftigt, dass Triebwerksölemissionen die Quelle der in den UFP-Proben nachgewiesenen Pentaerythritolester sind (Abb. 3). Auch Trimethylolpropanester wurden in den UFP-Proben nachgewiesen, im Vergleich zu den Pentaerythritolestern tragen diese jedoch wesentlich weniger zur chemischen Zusammensetzung der

UFPs bei. Auch verschiedene Additive (z. B. Trikresylphosphat $\text{C}_{21}\text{H}_{21}\text{O}_4\text{P}$) konnten nachgewiesen werden. Die Abwesenheit des schädlichen Tri-ortho-Isomers wurde durch gezieltes Screening bestätigt, während ein thermisches Umwandlungsprodukt von Ölen auf TMPE-Basis (Trimethylolpropanphosphat, TMP-P) identifiziert wurde.

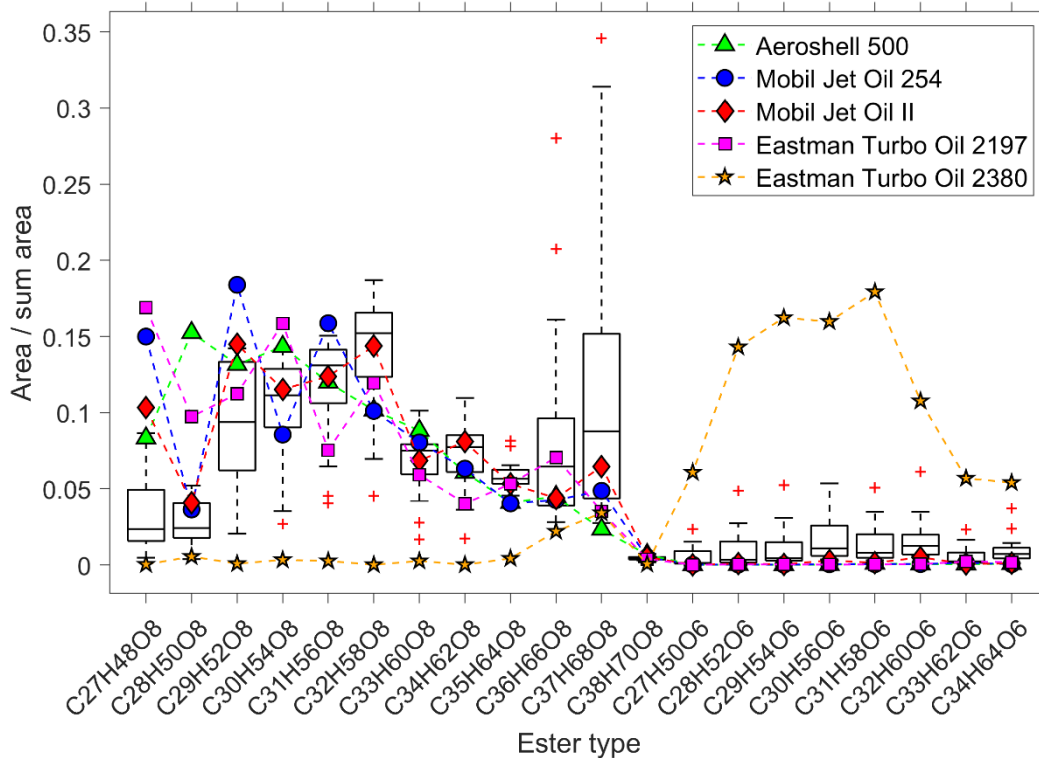


Abbildung 3. Vergleich der Verhältnisse der Pentaerythritol- und Trimethylpropanester innerhalb fünf verschiedener Triebwerksöle (farbige Symbole) mit der beobachteten Streuung in 22 UFP-Proben (Boxplots). Die Y-Achse zeigt das Verhältnis der Fläche jedes einzelnen Esters zur Gesamtfläche aller Ester. Entnommen aus (17).

Darüber hinaus wurde das Potenzial zur Partikelneubildung eines häufig verwendeten synthetischen Triebwerksöls anhand von Laborexperimenten untersucht. Thermodenuder-Messungen ermöglichten die Untersuchung von Triebwerksölen hinsichtlich ihrer Verteilung zwischen der Gas- und Partikelphase bei unterschiedlichen Temperaturen. Bei 300 °C war eine Verringerung des Massenanteils des Triebwerksöls um ~99% im Vergleich zum Versuch bei 20 °C festzustellen, was auf den flüchtigen Charakter der Öle hinweist. Bei 300 °C werden deutlich mehr Partikel mit einem mittleren Durchmesser von ~10 nm gebildet, was zu einem mehr als fünffachen Anstieg der Gesamtpartikelzahl im Vergleich zur 20 °C Messung führt. Bei einer Thermodenuder-Temperatur von 300 °C gehen Ölpartikel vollständig in die Gasphase über, demnach entsprechend auch bei den Betriebstemperaturen von Flugzeug-Turbofan-Triebwerken (>> 300 °C [18]). Die Durchmesser der neu gebildeten Ölpartikel im Laborexperiment lagen im gleichen Größenbereich wie die der gemessenen UFPs aus Richtung des Frankfurter Flughafens. Partikel, die aus Richtung des Frankfurter Stadtzentrums kamen, wiesen größere Durchmesser auf. Dies deutet daraufhin, dass die Nukleation von Triebwerksölen zur hohen Anzahlkonzentration von UFPs < 30 nm in der Nähe von Flughäfen beiträgt. Unterstützt wird

diese Interpretation durch eine quantitative Analyse der Triebwerksölbestandteile in UFPs mit Durchmessern < 56 nm. Die Ergebnisse zeigen, dass Flugzeugemissionen die Gesamtmasse der 10-18 nm großen Partikel stark beeinflussen, wobei der Anteil der Öle im Bereich von $21 \pm 11\%$ liegt. Weiterhin konnten wir zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen der hohen Partikelkonzentration in der Umgebung von Flughäfen und der Emission von Triebwerksölen besteht. Der Anteil des Triebwerksöls nimmt bei größeren Partikeln (18-56 nm) ab, was darauf hindeutet, dass diese Öle in den sich abkühlenden Abgasen von Flugzeugtriebwerken neue Partikel bilden (Abb. 4). Dementsprechend wurde die Flüchtigkeit der einzelnen Ester-Verbindungen analysiert, wodurch sie in verschiedene Flüchtigkeitsklassen eingeteilt werden konnten. Das Gas-zu-Partikel-Verhaltensverhalten von Verbindungen wird stark durch ihre Flüchtigkeit bestimmt. Die Hypothese, dass synthetische Ester eine schnelle Keimbildung in der Abgasfahne von Flugzeugtriebwerken auslösen können, wurde dadurch gestützt, dass die drei größten Pentaerythritolester eine sehr geringe Flüchtigkeit aufwiesen. Ester mit höherer Flüchtigkeit können dann auf diesen neu gebildeten Partikeln kondensieren und das Partikelwachstum fördern.

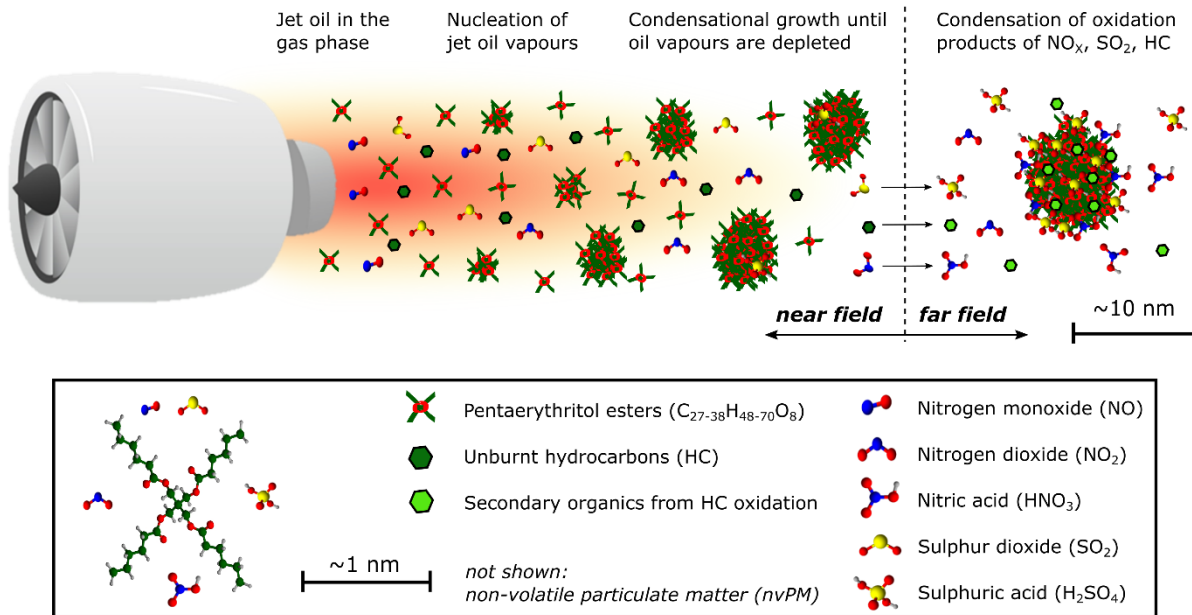


Abbildung 4: Darstellung der UFP-Bildung durch Nukleation und Wachstum von Öldämpfen. Entnommen aus (19).

Diskussion und Ausblick

Insgesamt konnte dank der durchgeführten Studien ein tieferer Einblick in die chemische Zusammensetzung von UFPs in der Abluffahne des Frankfurter Flughafens erhalten werden. Die hier vorgestellte Methode ermöglicht es Flugzeugemissionen anhand der chemischen Zusammensetzung von UFPs nachzuweisen und somit auch die Ausbreitung der Emissionen in der Region zu verfolgen.

Ein Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung und der Partikelbildung konnte gezeigt werden. Dies hat zur Folge, dass nun Emissionen von Triebwerksölen und die Ableitung möglicher Minderungsmaßnahmen mehr in den Fokus rücken. Gleichzeitig wird deutlich, dass nicht nur die Verbrennung von Kerosin zu einer Partikelbelastung führt, sondern weitere Quellen wie Triebwerksöle existieren. Bislang werden jedoch Öl-Emissionen in der Charakterisierung von Triebwerken nicht berücksichtigt. Die Freisetzung von Triebwerksölen und die daraus resultierende Partikelbelastung stellt daher einen weiteren Anknüpfungspunkt für Minderungsmaßnahmen dar, neben der Verminderung von Partikelemissionen durch eine Reduktion des Schwefel- und Aromatengehalts in Treibstoffen durch den Einsatz synthetisch hergestellter Treibstoffe. Dies ist insbesondere relevant für den Klimaeffekt des Flugverkehrs, da etwa $2/3$ des gesamten Strahlungsantriebs durch die Bildung von Kondensstreifen hervorgerufen wird (20). In diesem Zusammenhang konnte bereits gezeigt werden, dass emittierte Öl-Tröpfchen ebenfalls als Wolkenkondensationskeime fungieren können und somit möglicherweise den Effekt geringerer Rußemissionen aufheben (21).

Obwohl es deutliche Hinweise darauf gibt, dass die Nukleation gasförmiger Ölemissionen zur Bildung neuer Partikel führt, sind noch offene Fragen zu klären. In Emissionsfahnen könnten

nichtflüchtige Partikel die Keimbildung verhindern, indem sie Oberflächen für die Kondensation von Öldämpfen bieten. Frühere Studien beschreiben jedoch luftfahrtbedingte UFPs als flüchtig unter Hochvakuum (22), weshalb es wahrscheinlich ist, dass eine große Anzahl von Partikeln kleiner 20 nm , die in der Abluft von Flughäfen beobachtet werden (12; 13), durch Nukleation von Öldämpfen gebildet werden.

Um diese und weitere Fragen eingehend zu untersuchen, wurde kürzlich ein Projekt gestartet, bei dem die UFP-Emissionen und Immissionen des Frankfurter Flughafens noch umfassender untersucht werden sollen (SOURCE FFR; www.ultrafeinstaub-studie.de). Hierbei wird zwischen flüchtigen und nicht-flüchtigen Bestandteilen der Partikel unterschieden und diese einzeln charakterisiert, um ihre jeweiligen Anteile und Quellen zu ermitteln. Zusätzlich werden weitere Analysetechniken angewendet werden, um einen umfassenderen Überblick über die chemische Zusammensetzung zu erhalten. Schließlich sollte die ermittelte chemische Zusammensetzung der Aerosole genutzt werden, um potenzielle Gesundheitsgefahren im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber luftfahrtbedingten ultrafeinen Partikeln weiter zu bewerten, da die wissenschaftlichen Erkenntnisse in diesem Bereich noch gering sind. Entsprechend wird auch die Ausbreitung der Flughafenemissionen untersucht, um festzustellen, in welchen Regionen in der Nähe des Flughafens Menschen besonders exponiert sind.

Literatur

1. M. P. Keuken, M. Moerman, P. Zandveld, J. S. Henzing, G. Hoek, Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmos. Environ.* **104**, 132–142 (2015).
2. N. Hudda, S. A. Fruin, international airport impacts to air quality: size and related properties of large increases in ultrafine particle number concentrations. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 3362–3370 (2016).
3. J. Pekkanen, M. Kulmala, Exposure assessment of ultrafine particles in epidemiologic time-series studies. *Scand. J. Work Environ. Health* **30** Suppl 2, 9–18 (2004).
4. J. Lelieveld, K. Klingmüller, A. Pozzer, U. Pöschl, M. Fnais, A. Daiber, T. Münzel, Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. *Europ. Heart J.* **40**, 1590–1596 (2019).
5. WHO, *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide* (World Health Organization, European Centre for Environment and Health, 2021).
6. G. Oberdörster, E. Oberdörster, J. Oberdörster, Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ. Health Persp.* **113**, 823–839 (2005).
7. A. Nel, T. Xia, L. Mädler, N. Li, Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science (New York, N. Y.)* **311**, 622–627 (2006).
8. European parliament and council, Directive of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast).
9. M. Stafoggia, G. Cattani, F. Forastiere, A. Di Menno Bucchianico, A. Gaeta, C. Ancona, Particle number concentrations near the Rome-Ciampino city airport. *Atmos. Environ.* **147**, 264–273 (2016).
10. R. Habre, H. Zhou, S. P. Eckel, T. Enebish, S. Fruin, T. Bastain, E. Rappaport, F. Gilliland, Short-term effects of airport-associated ultrafine particle exposure on lung function and inflammation in adults with asthma. *Environ. Int.* **118**, 48–59 (2018).
11. I. Rivas, D. C. S. Beddows, F. Amato, D. C. Green, L. Järvi, C. Hueglin, C. Reche, H. Timonen, G. W. Fuller, J. V. Niemi, N. Pérez, M. Aurela, P. K. Hopke, A. Alastuey, M. Kulmala, R. M. Harrison, X. Querol, F. J. Kelly, Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities. *Environ. Int.* **135**, 105345 (2020).
12. B. Stacey, Measurement of ultrafine particles at airports: A review. *Atmos. Environ.* **198**, 463–477 (2019).
13. M. Pirhadi, A. Mousavi, M. H. Sowlat, N. A. H. Janssen, F. R. Cassee, C. Sioutas, Relative contributions of a major international airport activities and other urban sources to the particle number concentrations (PNCs) at a nearby monitoring site. *Environ. Pollut.* **260**, 114027 (2020).
14. N. Hudda, M. C. Simon, W. Zamore, J. L. Durant, Aviation-related impacts on ultrafine particle number concentrations outside and inside residences near an airport. *Environ. Sci. Technol.* **52**, 1765–1772 (2018).
15. N. Hudda, L. W. Durant, S. A. Fruin, J. L. Durant, Impacts of aviation emissions on near-airport residential air quality. *Environ. Sci. Technol.* **54**, 8580–8588 (2020).
16. J. H. Kroll, N. M. Donahue, J. L. Jimenez, S. H. Kessler, M. R. Canagaratna, K. R. Wilson, K. E. Altieri, L. R. Mazzoleni, A. S. Wozniak, H. Bluhm, E. R. Mysak, J. D. Smith, C. E. Kolb, D. R. Worsnop, Carbon oxidation state as a metric for describing the chemistry of atmospheric organic aerosol. *Nat. Chem.* **3**, 133–139 (2011).
17. F. Ungeheuer, D. van Pinxteren, A. L. Vogel, Identification and source attribution of organic compounds in ultrafine particles near Frankfurt International Airport. *Atmos. Chem. Phys.* **21**, 3763–3775 (2021).
18. A. F. El-Sayed, *Aircraft propulsion and gas turbine engines* (CRC Press Taylor & Francis Group, 2017).
19. F. Ungeheuer, L. Caudillo, F. Ditas, M. Simon, D. van Pinxteren, D. Kılıç, D. Rose, S. Jacobi, A. Kürten, J. Curtius, A. L. Vogel, Nucleation of jet engine oil vapours is a large source of aviation-related ultrafine particles. *Commun. Earth Environ.* **3** (2022).
20. D. S. Lee, D. W. Fahey, A. Skowron, M. R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S. J. Doherty, S. Freeman, P. M. Forster, J. Fuglestedt, A. Gettelman, R. R. de León, L. L. Lim, M. T. Lund, R. J. Millar, B. Owen, J. E. Penner, G. Pitari, M. J. Prather, R. Sausen, L. J. Wilcox, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmos. Environ.* **244**, 117834 (2021).
21. J. Ponsonby, L. King, B. J. Murray, M. E. J. Stettler, Jet aircraft lubrication oil droplets as contrail ice-forming particles. *Atmos. Chem. Phys.* **24**, 2045–2058 (2024).
22. M. Mazaheri, T. E. Bostrom, G. R. Johnson, L. Morawska, Composition and morphology of particle emissions from in-use aircraft during takeoff and landing. *Environ. Sci. Technol.* **47**, 5235–5242 (2013).

Korrespondenzadresse

Dr. Florian Ungeheuer
Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU)
Goethe Universität Frankfurt
Altenhöferallee 1
60438 Frankfurt am Main
E-Mail: ungeheuer@iau.uni-frankfurt.de