

Unsichtbare Winzlinge

Frankfurter Forschende haben eine neue Feinstaubquelle bei Flugzeugen entdeckt. Die Partikel sind besonders klein – und dadurch auch schwer zu untersuchen.

Sie sind so winzig, dass sie in die Atemwege gelangen können. Manche schaffen es sogar bis in die Lunge und die Blutbahn. Die Rede ist von Feinstaub, kleinen und kleinsten Teilchen in der Luft. Diese Partikel sind eine unsichtbare Gefahr für unsere Gesundheit und werden mit Krankheiten wie Schlaganfall, Herz- und Lungenerkrankungen sowie Krebs in Verbindung gebracht. Jedes Jahr, schätzt die Weltgesundheitsorganisation, sterben rund sieben Millionen Menschen frühzeitig wegen zu hoher Feinstaubbelastung. Feinstaub bildet sich zum Teil auf natürliche Weise, kann aber auch menschengemacht sein. Zum Beispiel, wenn Flugzeuge Kerosin verbrennen. Der Treibstoff enthält Schwefel und aromatische Verbindungen, aus denen sich Ruß bilden kann. Und zwar direkt während der Verbrennung, weswegen man hier von primärem Feinstaub spricht. Feinstaub entsteht aber auch nachfolgend, wenn gasförmige Verbindungen, die beim Verbrennungsprozess in die Atmosphäre gelangen, dort chemisch reagieren. Etwa Schwefeldioxid, das zu Schwefelsäure oxidiert. Oder Stickoxid, aus dem Salpetersäure durch Oxidation in der Atmosphäre entsteht. Diese Stoffe können dann auf Partikeln in der Luft kondensieren – es bildet sich sekundärer Feinstaub.



Fotos: Alexander Vogel/IAU

Prozess spielt die Flüchtigkeit als physikalisch-chemischer Faktor eine zentrale Rolle. Stoffe sind leichtflüchtig oder schwerflüchtig, je nachdem wie stark sie dazu tendieren, bei Erwärmung aus der flüssigen Phase in die Gasphase überzugehen. Natürlich geht es auch andersherum: Stoffe in der Gasphase gehen bei Abkühlung mehr oder weniger leicht in die flüssige Phase über, sie kondensieren. So etwas sei ja von Schornsteinen bekannt, so Vogel. „Hier kondensiert hauptsächlich Wasserdampf, also gasförmiges Wasser, aus dem Abgas auf kleine Partikel, was wir dann als Dampf Wolken sehen können. Das Wasser hat also während der Abkühlung des Abgases seinen Phasenzustand verändert, vom Gas hin zu einer Flüssigkeit in Dampf Wolken Tröpfchen.“ Ähnliches passiert bei den Kondensstreifen von Flugzeugen. Hier gefriert Wasserdampf wegen der niedrigen Temperaturen in Flughöhe, und es bildet sich ein deutlich sichtbarer Schweiß aus Eiskristallen.

Was mit dem Schmieröl von Flugzeugen passiert, ist etwas anderes. Hier kondensiert zwar auch ein Stoff, aber es ist nicht Wasser. Und das Ergebnis der Aggregatzustandsänderung bleibt auch unsichtbar. Der Unterschied zu den Schornsteinen und Kondensstreifen besteht darin, dass die Stoffe im Turbinenschmieröl viel schwerflüchtiger sind als Wasser. Es handelt sich um synthetische Ester. „Diese Ester werden bei den hohen Temperaturen in der Turbine noch als Gase freigesetzt. Wenn sie dann aber auf die kalte Umgebungsluft treffen, brauchen sie keine bereits existierenden Partikel, um auf deren Oberfläche zu kondensieren. Vielmehr bilden sie direkt neue ultrafeine Partikel.“ Das geht, weil die Übersättigung der Ester durch die Abkühlung so stark ist, dass die einzelnen Moleküle beim Aufeinandertreffen aneinander haften bleiben. Diesen rasend schnell ablaufenden Prozess nennt man Nukleation – und wer beim Kochen nicht aufpasst, erlebt ihn auch in der heimischen Küche: Fängt Öl in einer zu heißen Pfanne an zu qualmen, verdampft es aus der Pfanne heraus und nukleiert direkt in der kühleren Raumluft oberhalb der Pfanne.

Ultrafeine Partikel

Dem Schmieröl-Ultrafeinstaub auf die Spur zu kommen, war keine leichte Sache. Vogel und die Forschenden seiner Arbeitsgruppe Atmosphärische Umweltanalytik hatten dafür Feinstaubproben in der Nähe des Flughafens genommen, in Frankfurt-Schwanheim. Eine aufwändige Prozedur, denn sie konzentrierten sich speziell auf Partikel von 10 bis 18 Nanometern Durchmesser, weil

diese in Flughafennähe besonders häufig vorkommen. Zur Einordnung: 10 Nanometer sind umgerechnet 0,01 Mikrometer. Damit gehören diese Partikel zu den kleinsten in der Klasse der ultrafeinen Partikel, die bis 0,1 Mikrometer Durchmesser reicht. Eingesammelt wurden die Nanometer-Winzlinge mit einem speziellen Gerät, dem Kaskadenimpaktor. Der erlaubt es, Partikel unterschiedlicher Größe getrennt zu sammeln. Im Labor am Campus Riedberg extrahierten die Forschenden die Proben und maßen die darin enthaltenen organischen Spurenstoffe mit einem Flüssigchromatographen, der an ein hochauflösendes Massenspektrometer gekoppelt war. „Mit diesem Setup können wir wenige Picogramm – ein Millionstel von einem Millionstel Gramm – verschiedener organischer Moleküle gleichzeitig nachweisen. Es ist ein extrem empfindliches, selektives und umfassendes Messverfahren. Selektiv in dem Sinne, dass man nach einzelnen Molekülen schauen kann. Und umfassend, da man viele Tausend unterschiedliche organische Moleküle in einer Messung gleichzeitig erfassen kann.“

Aber wie ließ sich unter all dem gesammelten Feinstaub überhaupt das Turbinenschmieröl nachweisen? Dafür brauchte es dessen unverwechselbaren „molekularen Fingerabdruck“. Was die Suche danach erleichterte: Die im Schmieröl enthaltenen Ester stammen aus einer chemischen Synthese, weswegen sie weit weniger komplex aufgebaut sind als gewöhnliches Mineralöl für PKW-Verbrennungsmotoren. „Wir wissen bei den synthetischen Estern ganz genau, um welche Moleküle es sich handelt. Es sind Ester aus Fettsäuren verschiedener Kohlenstoffkettenlängen und den Alkoholen Pentaerythritol und Trimethylolpropan.“ So ließ sich der exakte Schmieröl-Fingerabdruck bestimmen – und der fand sich dann auch in den Feinstaubproben. Die Menge: wenige Nanogramm pro Kubikmeter Luft. Der Nachweis, dass die ultrafeinen Partikel in der Abluft des Flughafens auf Triebwerke zurückgehen, war damit erbracht. Aber vor Vogel und den Forschenden vom Institut für Atmosphäre und Umwelt liegt noch viel Arbeit. Als Nächstes wollen sie untersuchen, wie weit sich die ultrafeinen Partikel verbreiten, wie sie sich während des Transports chemisch verändern und wie sich schließlich der Schmieröl-Ultrafeinstaub auf den Menschen auswirkt. Sind die Partikel löslich? Falls ja, verteilen sie sich anders und wirken im Körper anders als ein Rußpartikel der gleichen Größe? Sind bestimmte Additive im Schmieröl ein Grund zur Sorge? Oder ist dessen Konzentration in der Außenluft so gering, dass davon keine Gesundheitsgefahr ausgeht? „Diese Fragen sind noch nicht beantwortet. Unabhängig davon sollten wir aber an das Vorsorgeprinzip denken: Wenn wir etwas nicht einschätzen können, muss die Emission möglichst vermieden werden. Aus dem verbesserten Prozessverständnis lassen sich

nun effektive Minderungsmaßnahmen ableiten.“ Wie viel Feinstaub jedoch überhaupt durch Turbinenschmieröl entsteht, lässt sich schwer sagen, da diese Form der Emission nicht erfasst wird. Der neue Standard der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO gibt nur die Messung von Anzahl und Masse der bei hohen Temperaturen nichtflüchtigen Partikel vor. Darunter fallen Ruß und anderen primäre Emissionen wie Metallabrieb. Das Schmieröl ist mit der ICAO-Methode jedoch nicht messbar, da es sich bei hohen Temperaturen noch in der Gasphase befindet.

Dringlich: Forschung an winzigen Teilchen in der Luft

Ein Grund mehr, die Untersuchungen in den nächsten Jahren weiterzuführen. Das Institut für Atmosphäre und Umwelt arbeitet dabei mit anderen Forschungsinstituten zusammen. Geplant ist zum Beispiel, die Schmieröle in Zukunft als Markerverbindungen zu nutzen. „So lassen sich ultrafeine Partikel vom Flughafen von anderen Partikelquellen unterscheiden“, so Vogel. Die weiteren Messungen werden dann dafür genutzt, ein



Mit dem Kaskadenimpaktor lassen sich Partikel unterschiedlicher Größe getrennt sammeln.

Modell zu validieren, das die Ausbreitung von Feinstaub im Umkreis vom 25 Kilometern rund um den Frankfurter Flughafen berechnet. Validierung bedeutet ganz grob, die Immissionsmessungen mit der Immissionsvorhersage des Modells abzugleichen. Das Projekt startet jetzt im April. Für Vogel ist die Forschung an den winzigen Teilchen in der Luft eine dringliche Sache: „Wenn man die chemische Komplexität des atmosphärischen Feinstaubes untersucht, kann einem recht schnell schwindelig werden. Was unsere Gesundheit angeht, wissen wir noch viel zu wenig, um die wirklichen Übeltäter zu identifizieren. Sicher ist, dass die Holzfeuerung aus lufthygienischer Sicht ein massives Problem darstellt.“ Genauso die Landwirtschaft, bei der sehr viel sekundärer Feinstaub entsteht. Auch der Straßenverkehr ist nach wie vor eine wichtige Partikelquelle, sowohl durch die Verbrennung von fossilem Kraftstoff als auch durch den Abrieb der Reifen und Bremsen. Zudem gibt es noch viel wissenschaftlichen Klärungsbedarf rund um die Teilchen. Dazu gehört nicht nur die Frage, wie gefährlich ultrafeine Partikel von Flugzeugen sind. Sondern auch, ob der Transport von organischen Schadstoffen wie Pestiziden über die Atmosphäre eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt. Oder inwiefern die Reaktion zwischen Stickoxiden und organischen Verbindungen zur Bildung von neuen Stoffen führt, deren Effekte auf die Gesundheit noch völlig unbekannt sind. Für die Forschenden am Institut für Atmosphäre und Umwelt gibt es also noch viel zu tun.

Andreas Lorenz-Meyer

Alternativen mit geringem Marktanteil

Um die Feinstaubemissionen des Luftverkehrs zu reduzieren, müssen schwefelärmere Treibstoffe zum Einsatz kommen. Und die gibt es auch schon: Treibstoff aus alten Speiseölen, das als »Sustainable Aviation Fuel« (SAF) beworben wird. Es ist in punkto Partikelbildung besser als herkömmliches, auf Erdöl basierendes Kerosin, denn es hat so gut wie keinen Schwefel und auch keine Aromaten. Was auch für Fischer-Tropsch-Fuels gilt, einem zweiten alternativen Flugzeugtreibstoff. Hier werden aus CO₂ und Wasserstoff unterschiedlich lange Kohlenwasserstoffe hergestellt. Es gibt auch bereits erste Pilotanlagen für die Herstellung. Jedoch wird aktuell immer noch hauptsächlich mit dem alten schwefelhaltigen Kerosin geflogen. Alternative Kraftstoffe haben derzeit einen Anteil von deutlich weniger als zwei Prozent (dem Ziel der Europäischen Union für 2025) am Gesamtverbrauch von Treibstoff im Flugverkehr.

Bisher wurde angenommen, dass Schwefel und aromatische Verbindungen die wichtigsten Emissionen für die Bildung von sekundärem Feinstaub bei Flugzeugen sind. Dieses Bild ist jedoch unvollständig, wie Alexander Vogel vom Institut für Atmosphäre und Umwelt an der Goethe-Universität Frankfurt herausgefunden hat. Eine von ihm geleitete Studie zeigte: Es gibt eine weitere Feinstaubquelle bei Flugzeugen, das Turbinenschmieröl. Beim Betrieb der Turbinen am Boden gelangt es in deren heißen Abgasstrahl – und bildet dann an der Luft ultrafeine Partikel. Bei dem

Feinstaubklassen

Mikrometer ist die Maßeinheit, die bei der Einteilung von Feinstaub allgemein verwendet wird. Zur Feinstaubklasse PM₁₀ (PM steht für particulate matter) gehören Partikel bis 10 Mikrometer Größe, umgerechnet 10 000 Nanometer. Und zur Feinstaubklasse PM_{2,5} solche bis 2,5 Mikrometer, umgerechnet 2 500 Nanometer. Die Klasse der ultrafeinen Partikel geht bis 0,1 Mikrometer, umgerechnet 100 Nanometer.

Link zur Studie

<https://www.nature.com/articles/s43247-022-00653-w>