



Abschlussbericht

„Chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel“

Projektlaufzeit:
01.12.2019 - 31.12.2023

UmweltProjekt

Impressum

Chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel - Abschlussbericht

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Bearbeitung:

Dr. Daniel Beck, Dr. Jürgen Diemer, Referat 72; Dr. Marina Maier, Dr. Marion Letzel, Referat 77

Durchführung laborspezifischer Projektarbeit erfolgt durch die angegebenen Projektpartner. Separate Autorenschaft der Kooperationspartner in diesem Zwischenbericht werden im Text gekennzeichnet.

Fachredaktion: LfU Referat 72 (Projektbetreuung; Vergabe der Labor- bzw. Forschungsarbeit) bzw. LfU Referat 77 (Bestimmung von 6PPD und 6PPD-Chinon im Feinstaub; Projektbetreuung)

Stand:

06/2024

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bavarn.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
1 Einleitung	5
2 Projektansatz – Vorgehensweise	5
2.1 Zusammenfassung des Wissensstandes zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel	5
2.2 Beauftragung von Untersuchungen zur chemischen Charakterisierung von UFP	5
2.3 Bereitstellung von Informationen für die Öffentlichkeit	6
2.4 Entwicklung einer Analysenmethode für 6PPD und 6PPD-Chinon im Feinstaub	7
3 Ergebnisse	7
3.1 Zusammenfassung des Wissensstandes zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel	7
3.1.1 Vorbemerkung	7
3.1.2 Review aktueller Fachliteratur	8
3.1.2.1 Untersuchungen zu UFP generell	8
3.1.2.2 Untersuchungen zu UFP im urbanen Umfeld	9
3.1.2.3 Untersuchungen zu Straßenverkehr, motorischen Emissionen, Bremsabrieb	11
3.1.2.4 Untersuchungen zu UFP an Flughäfen	14
3.1.2.5 Gesundheitliche Effekte von UFP	17
3.1.2.6 UFP in Innenräumen	18
3.2 Konzeption und Beauftragung von Untersuchungen zur chemischen Charakterisierung von UFP	19
3.2.1 Fachgespräche und Auswahl möglicher Kooperationspartner	19
3.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Forschungsk Kooperationen	20
3.3 Bereitstellung von Informationen für die Öffentlichkeit	21
4 Bestimmung von 6PPD und 6PPD-Chinon im Feinstaub	22
4.1 Problemstellung und Zielsetzung	22
4.1.1 Vorgehensweise	23
4.1.2 Ergebnisse	23
5 Ausblick	24
6 Literatur und Quellen	25
7 Anhang	28
7.1 Abkürzungen	28
7.2 Internetauftritt	29
7.3 Fachtagung	30

Kurzfassung

Ultrafeine Partikel (UFP, teilweise auch als $PM_{0,1}$ bezeichnet) stehen zunehmend im Interesse der Öffentlichkeit. Es ist bekannt, dass insbesondere bei Verbrennungsprozessen ultrafeine Partikel entstehen und es gibt Hinweise, dass erhöhte UFP-Konzentrationen Wirkungen auf die menschliche Gesundheit hervorrufen können. Wahrscheinlich sind diese durch UFP verursachten gesundheitlichen Effekte wie bei größeren Partikeln von der Morphologie und der chemischen Zusammensetzung abhängig.

Im Rahmen dieses Projektes wurde nach Sichtung nationaler und internationaler Fachliteratur der Kenntnisstand bezüglich der chemischen Charakterisierung ultrafeiner Partikel erfasst und bewertet. Es wurden Fachgespräche mit Experten verschiedener Fachbereiche geführt, die zunächst als Basis für die Auswahl möglicher Kooperationspartner dienten. Diese Gespräche erwiesen sich gerade während der durch die Corona-Pandemie eingeschränkten Möglichkeiten des Besuchs von Fachtagungen als sehr wertvoll, um den Stand der Messtechnik bzw. Emissionsminderungstechnik in den jeweiligen Fachbereichen beurteilen zu können und perspektivische Kooperationsmöglichkeiten sondieren zu können. Mehrere Gespräche zeigten den Aufwand und die Grenzen einer chemischen Untersuchung ultrafeiner Partikel deutlich auf. Weitere Fachgespräche erfolgten zu Emissions- und Immissionsmessungen, zu Flugzeugemissionen und aktuellen Entwicklungen in der Flugzeugtechnik und sowohl zu aktuellen verkehrsbezogenen Messungen des DLR als auch zu Triebwerksemissions- und Immissionsmessungen von UFP.

In der ersten Phase des Projekts wurde deutlich, dass zumindest im deutschsprachigen Raum kein routinefähiges Verfahren zur Charakterisierung von UFP existiert. Daher wurde nach mehreren Gesprächen mit potentiellen Kooperationspartnern eine Arbeitsgruppe der TU München beauftragt, eine Methode zu entwickeln, die nach Sammlung der UFP mit einem geeigneten Kaskadenimpaktor eine Messung mittel- bis schwerflüchtiger organischer Komponenten erlaubt.

Im Rahmen dieser Kooperation wurden verschiedene Methoden zur Charakterisierung der UFP-Fraktionen entwickelt und getestet:

- Thermodesorption gekoppelt mit Atmosphärendruck-Ionisation (SICRIT) und LC-HRMS
- Laserdesorption gekoppelt mit Atmosphärendruck-Ionisation (SICRIT) und LC-HRMS
- Raman-Spektroskopie
- SEM / EDX
- HPLC-MS und HPLC-Floureszenzspektroskopie

Für die Beschleunigung der Methodenentwicklung wurde neben dem bereits zu Beginn des Projektes vorhandenen Kaskadenimpaktor (ELPI+, Fa. DEKATI) ein weiterer Kaskadenimpaktor (DLPI+, Fa. DEKATI) erworben und der beauftragten Arbeitsgruppe für die Dauer des Projektes zur Verfügung gestellt.

Ein Kernbereich dieses Projektes war die Bereitstellung von Informationen für die Öffentlichkeit. Am 25.11.2021 wurde die Fachtagung „Luftqualität-Ultrafeine Partikel“ mit 120 Fachteilnehmern durchgeführt. Namhaften Referentinnen und Referenten aus der deutschsprachigen UFP-Community gaben einen Einblick in ihr Fachgebiet und den aktuellen Stand der Forschung zur Messung und Bewertung ultrafeiner Partikel. Die Vortragsfolien wurden mit einer kurzen Zusammenfassung gebündelt auf der Internetseite bereitgestellt, die mit Beginn dieses UFP-Projekts eingerichtet und seitdem weiterentwickelt wurde.

Die Begrenzung von UFP im Abgasstrom von Fahrzeugen ist mit der Einführung von Grenzwerten zur Partikelanzahl bereits Realität und auch der Anteil an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird künftig abnehmen. Daher nimmt die relative Bedeutung von Bremsen- und Reifenabriebemissionen zu. Messtechnische Hürden, insbesondere im Fall von Reifenabrieb, erschweren derzeit noch die Quantifizierung. Daher wurde in dem Projekt zudem ein Messverfahren für 6PPD/6PPD-Q als Marker für Reifenabrieb erprobt und validiert.

1 Einleitung

Ultrafeine Partikel (UFP) stellen die kleinste Fraktion des Feinstaubes $PM_{2.5}$ dar und kommen in der Luft in unterschiedlicher Konzentration, Größe, Morphologie und chemischer Zusammensetzung vor. UFP sind Aerosolpartikel mit einer Größe von unter 100 nm ($PM_{0.1}$) - kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts (ca. 380 - 720 nm). Sie weisen eine sehr geringe Masse, aber eine große spezifische Oberfläche auf (siehe Tabelle 1). Durch ihre zumeist apolare Oberfläche und ihre geringe Größe können sie nachweislich in das Lungengewebe und durch die Lipidschicht in Zellen gelangen^[1,2].

„Natürliche“ UFP werden in der Atmosphäre aus biogen entstandenen gasförmigen Vorläufersubstanzen gebildet und leisten als Nukleationskeime einen wesentlichen Beitrag zur Wolkenbildung^[3]. In dicht besiedelten Regionen dominieren allerdings anthropogen generierte ultrafeine Partikel^[4], die bei Verbrennungsprozessen als direkt emittierte Partikel, aber auch durch Photooxidation sowie unter Umständen durch direkte Kondensation gasförmiger Vorläufersubstanzen^[5] entstehen. Da es sich bei der Entstehung von UFP um hochdynamische Prozesse handelt, können vor allem in der Nähe von Partikelquellen zeitlich und örtlich hoch variable Konzentrationsverläufe mit ausgeprägten Konzentrationsspitzen auftreten.

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Oberfläche bzw. Partikelanzahl für eine vorgegebene Partikelmasse [6].

Partikeldurchmesser (μm)	Oberfläche (relativ)	Partikelanzahl (relativ)
10	1	1
1	10^2	10^3
0.1	10^4	10^6
0.01	10^6	10^9

Viele Fragen zur Wirkung dieser Partikel auf Mensch und Umwelt sind noch nicht geklärt. Eine aktuelle Arbeit weist darauf hin, dass Feinstaubfraktionen mit oxidativem Potenzial bei Inhalation oxidativen Stress in Gewebezellen auslösen kann. In der Folge können Entzündungsreaktionen entstehen und überproportional negative gesundheitliche Effekte induzieren.^[2] Es ist wahrscheinlich, dass durch UFP verursachte gesundheitliche Effekte wie bei größeren Partikeln von der Morphologie und der chemischen Zusammensetzung abhängig sind.^[7]

2 Projektansatz – Vorgehensweise

2.1 Zusammenfassung des Wissensstandes zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel

Basis aller Projektaktivitäten ist eine fortwährende Sichtung und Bewertung nationaler und internationaler Fachliteratur zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel. Der Kenntnisstand der „scientific community“ wird zusammengefasst und für Aktivitäten innerhalb des Projekts nutzbar gemacht. Die Kernpublikationen führender Arbeitsgruppen, veröffentlichte Ergebnisse und verwendete Methoden werden knapp zusammengefasst.

2.2 Beauftragung von Untersuchungen zur chemischen Charakterisierung von UFP

Grundlage der Auswahl möglicher Kooperationspartner ist die wissenschaftliche Kompetenz im Bereich der Partikelanalytik, d. h. die durch Publikationen und Tagungsbeiträge dokumentierte Expertise

des potentiellen Kooperationspartners und seiner Arbeitsgruppe bzw. seines Instituts. Die potentiellen Kooperationspartner werden um Besprechungen gebeten, bei denen sie ihre Forschungstätigkeit präsentieren, diskutieren und gemeinsam mit dem LfU Vorschläge für eine Forschungskoope-ration formulieren sollten. Neben der Auswahl von Projektpartnern dient dieses Vorgehen dazu, Einblicke in die aktuelle Forschung im Bereich der Partikelanalytik zu gewinnen. Die Kandidaten werden im Anschluss gebeten, dem LfU ihre Präsentationen zur Verfügung zu stellen.

Nach interner Abstimmung sollen potentielle Partner aufgefordert werden, einen Kurzvorschlag für eine wiss. Zusammenarbeit inkl. Zeitplan und Budgetvorstellung zu machen, auf dessen Basis eine Beauftragung erfolgen könnte. Dies bietet Möglichkeiten zur Förderung innovativer analytischer An-sätze. Dabei sind Kooperationsmöglichkeiten naturgemäß durch das im Projekt vorhandene Budget sowie den durch die Projektlaufzeit vorgegebenen Zeitrahmen limitiert. Bei der Auswahl potentieller Partner ist überdies zu beachten, dass das StMUV über den Projektverbund BayUFP „Messung, Cha-rakterisierung und Bewertung ultrafeiner Partikel“ (Koordination FAU Erlangen-Nürnberg) verschie-dene Arbeitsgruppen bereits direkt beauftragt und damit eine Reihe von Themenbereichen abdeckt.

In der ersten Phase des Projekts wurde deutlich, dass zumindest im deutschsprachigen Raum kein routinefähiges Verfahren zur Charakterisierung von UFP existiert. Daher wurde wegen spezifischer Expertise im Bereich der Entwicklung innovativer Analysemethoden eine Arbeitsgruppe der TU Mün-chen als Kooperationspartner für die Entwicklung einer Methode zur Messung mittel- bis schwerflüch-tige organischer Komponenten ausgewählt. Nach der Beauftragung einer sechsmonatigen Vorstudie folgte aufgrund vielversprechender erster Ergebnisse Anfang 2021 eine weitere Beauftragung dieser Arbeitsgruppe bis 31.12.2022.

Das Arbeitsprogramm umfasst zunächst weitere Methodenentwicklung, beginnend mit der Optimie-rung der bereits in der Vorstudie eingesetzten Thermodesorptions- und Laserdesorptionssysteme und ihrer Kopplung an die SICRIT-Atmosphärendruckionenquelle und das LC-HRMS-Gerät. Nach Ab-schluss der Methodenentwicklung sollen Vergleiche mit flüssiger Desorption der Probe von den zur Probensammlung eingesetzten Aluminiumfolie („ELPI-Plättchen“) und nachfolgender Messung mittels LC-HRMS erfolgen. Anschließend sind Untersuchungen an Realproben, die an verschiedenen rele-vanten Standorten gewonnen werden sollen, angedacht.

Für eine effizientere Gewinnung von UFP-Proben wurde ein zweites Probenahmesystem (Kaskaden-impaktor DLPI+) beschafft und der Arbeitsgruppe zur Verfügung gestellt, dessen Abscheideeigen-schaften mit dem bereits vorhandenen ELPI+ gut vergleichbar sind. Ein regelmäßiger Austausch zum aktuellen Forschungsstand ist geplant.

Weitere Kooperationen waren mit den im Projekt verfügbaren finanziellen Mitteln nicht möglich.

2.3 Bereitstellung von Informationen für die Öffentlichkeit

Zur Intensivierung des fachlichen Austausches der deutschsprachigen UFP-Community sowie zur Do-kumentation der Aktivitäten im Bereich UFP soll im Rahmen dieses Projekts eine Fachtagung zum Thema „Luftqualität-Ultrafeine Partikel“ organisiert werden. Im Vorfeld der Fachtagung soll eine Inter-netpräsenz zur Präsentation des Projekts „Chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel“ und zur Bereitstellung von Fachinformationen für die Öffentlichkeit erstellt werden. Als Termin war Dezember 2020 geplant, coronabedingt musste die Fachtagung allerdings verschoben werden und fand am 25.11.2021 als online-Veranstaltung mit 120 Teilnehmern statt. Tagungsprogramm und Vorträge wer-den auf der Webseite dieses Projekts ([„Fachtagung Luftqualität - Ultrafeine Partikel 25.11.2021 - LfU Bayern“](#)) als Paket zum Download zur Verfügung gestellt.

2.4 Entwicklung einer Analysenmethode für 6PPD und 6PPD-Chinon im Feinstaub

Der kürzlich identifizierte toxische Stoff 6PPD-Chinon (6PPD-Q) ist ein Transformationsprodukt des Antioxidationsmittels 6PPD (N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-Phenyl-p-Phenylendiamin), der bei der Herstellung von Reifengummi verwendet und mit dem Reifenabrieb in die Umgebung freigesetzt wird. Wegen fehlender Messmethoden sind derzeit nur begrenzt Informationen zu den Konzentrationen der PPD-Verbindungen in der Umwelt verfügbar. Im Rahmen dieses Projekts sollte daher eine Messmethode zur Bestimmung von 6PPD und 6PPD-Q entwickelt werden, die es erlaubt, das Vorkommen dieser Substanzen in Umweltproben zu bestimmen. Am LfU wurde daher ein Messverfahren für 6PPD/6PPD-Q als Marker von Reifenabrieb für Feinstaubproben (PM₁₀) erprobt und validiert. Ausführliche Informationen finden sich in Kapitel 4.

3 Ergebnisse

3.1 Zusammenfassung des Wissensstandes zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel

3.1.1 Vorbemerkung

Sowohl die Messung der Partikelfractionen PM₁₀ und PM_{2,5} als auch deren chemische Analyse auf die gemäß 39. BImSchV^[8] gesetzlich geregelten Inhaltsstoffe sind an vielen Umweltbehörden und Mesinstituten als Routineverfahren etabliert. Demgegenüber stellen Messungen ultrafeiner Partikel eine Herausforderung dar. Bereits die Messung der Partikelanzahl und Partikelgrößenverteilung unterscheidet sich hinsichtlich Bezugsmetrik und Instrumentation deutlich von der bei den Partikelfractionen PM₁₀ und PM_{2,5} etablierten Massenbestimmung. Allerdings steht mittlerweile für den Routineeinsatz geeignete Instrumentation zur Verfügung, und es ist zu erwarten, dass die hierfür eingesetzten CPC („condensation particle counter“) - und SMPS („scanning mobility particle sizer“) - Geräte in naher Zukunft zunehmend in Luftqualitätsmessnetzen der Umweltverwaltungen zum Einsatz kommen werden.^[7,9,10] Als Beispiel seien in diesem Zusammenhang die LfU-eigenen Messtationen in Regensburg, Augsburg und München-Nord genannt.

Für die Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung ultrafeiner Partikel kleiner 100 nm existieren dagegen bisher keine für den Routineeinsatz geeigneten Verfahren. Da UFP eine sehr geringe Masse aufweisen, ist eine chemische Analyse nur mit sehr empfindlichen und hochspezialisierten Analyseverfahren möglich. Schon die Gewinnung einer für eine Untersuchung ausreichenden Probenmenge stellt eine große Herausforderung dar. Dabei ist zu beachten, dass die für die Probenahme gewählte Technik einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben kann, da je nach Verfahren z. B. flüchtige Partikel entweder miterfasst oder diskriminiert werden. Für die Abtrennung ultrafeiner Partikelfractionen von den im hohen Massenüberschuss vorkommenden größeren Partikeln werden meist mehrstufige Impaktoren verwendet. Hier kann – je nach verwendeter Bauart – eine Trennung und Abscheidung von Partikeln bis in den Bereich um ca. 10 nm^[11] erreicht werden. Die Partikel werden dabei auf Metall- oder Kunststofffolien (e.g. Alufolie u. Polycarbonat) deponiert, die für eine anschließende chemische oder morphologische Untersuchung zur Verfügung stehen. Dabei können verschiedene unerwünschte Effekte auftreten:

- Verflüchtigung volatiler und semivolatiler Bestandteile
- Störung der Partikeltrennung durch Verschleppung größerer Partikel über mehrere Impaktorstufen („bounce-off“)
- Koagulation der Partikel zu größeren Agglomeraten (dies verhindert z. B. eine morphologische Charakterisierung mittels REM o. ä.)
- Alterungsprozesse (z. B. Oxidation funktioneller Gruppen), die die ursprüngliche chemische Zusammensetzung maskieren

Die beschriebenen Effekte sind insbesondere zu erwarten, wenn wegen unzureichender Empfindlichkeit der nachgeschalteten Analytik zu lange Sammelzeiten verwendet werden, um ausreichende Deposition auf den Abscheidefolien sicherzustellen. Daher ist die Anwendung hochempfindlicher und speziell für die Untersuchung ultrafeiner Partikel optimierter Techniken erforderlich.

Trotz dieser methodisch bedingten Limitierungen basieren bisherige Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung von UFP überwiegend auf mit Hilfe von Impaktoren separierten Partikeln.^[7,12,2,13] Auch die von der in diesem Projekt beauftragten Arbeitsgruppe entwickelten Messtechniken basieren auf der Untersuchung von im Impaktor abgeschiedenen ultrafeinen Partikel.

3.1.2 Review aktueller Fachliteratur

Im Folgenden ist eine Auswahl aktueller, relevanter Publikationen zu ultrafeinen Partikeln und ihrer chemischen Charakterisierung aufgeführt, die im Rahmen dieses Projekts gesichtet wurden:

3.1.2.1 Untersuchungen zu UFP generell

„Clean air in the Anthropocene“, 2017^[14]

Übersichtsartikel zum Thema Luftqualität, der neben Informationen zu verschiedenen Luftschadstoffen auch UFP, speziell den Prozess der Partikelneubildung, beschreibt. Das Paper liefert kompakt Wissen zu den Themen Atmosphärenchemie, UFP und Gesundheit und bietet einen guten Einstieg in die UFP-Thematik.

“Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease”, 2020^[15]

Übersichtsartikel, der grundlegende Eigenschaften ultrafeiner Partikel beschreibt. Der Prozess der Partikelneubildung und der Entfernung ultrafeiner Partikel aus der Atmosphäre ist verständlich erläutert. Der Unterschied zwischen kondensierbaren (flüchtigen) und auf Filtern erfassbaren (nichtflüchtigen) UFP, der insbesondere im bei Messungen im emittentennahen Bereich eine große Rolle spielt, ist erklärt. Der Artikel zitiert eine Arbeit, die UFP-Quellen an einer Straße in London quantifiziert und als Verursacher 65% KFZ-Auspuffemissionen, 18% städtischen Hintergrund, 5% Aufwirbelung, 2% Bremsstaub und 10% sonstige Quellen nennt (Anmerkung: da die zitierte Arbeit von 2011 war, ist wegen der mittlerweile stärkeren Verbreitung von Partikelfiltern davon auszugehen, dass der Anteil der Auspuffemissionen abgenommen hat). Gemäß den Autoren spielt der Schwefelgehalt des Kraftstoffs für Partikelemissionen eine wichtige Rolle. Der Artikel beschreibt überdies die Wirkungsweise von Dieselpartikelfiltern und zitiert eine chemische Analyse von UFP aus Auspuffemissionen von Euro 6 Benzin- und Diesel-KFZ. Die Methodik der Emissionsmessungen für ultrafeine Partikel wird kritisch beleuchtet. Auch die Verbrennung von Biomasse wird als Quelle für UFP beschrieben. Sehr guter Einstieg in die UFP-Thematik.

„Past, present, and future of ultrafine particle exposures in North America“, 2021^[16]

Übersichtsartikel, der Ergebnisse von an verschiedensten Messorten durchgeführten Studien ultrafeiner Partikel in den USA zusammenfasst. Die Konzentration ultrafeiner Partikel hat, ähnlich wie PM_{2,5}, einen fallenden Trend und nahm während der letzten Dekade im Mittel um 30% ab (ähnliche fallende Trends wurden bei Messungen des GUAN-Netzwerks festgestellt). Dieser Rückgang wird als Nebeneffekt der Emissionsminderungsmaßnahmen bei PM_{2,5} interpretiert.

„Molecular characterization of ultrafine particles using extractive electrospray time-of-flight mass spectrometry“, 2021^[17]

Dieser Artikel beschreibt die chemische Charakterisierung von künstlichen UFP in einer Wolkenkammer des CERN, die aus Oxidationsprodukten von Naphtalin und β -Caryophyllen erzeugt wurden. Dazu verwenden sie ein „extractive electrospray time-of-flight mass spectrometer“ (EESI-TOF). Diese hochspezialisierte Methode erlaubt Echtzeitmessungen von Partikeln mit einer Größe von 20 nm und erreicht dabei eine Empfindlichkeit von einigen hundert ng/m³. Es wurden Vergleichsmessungen zwischen dieser Methode und einem „iodide adduct chemical ionization mass spectrometer“ (FIGAERO-I-

CIMS) durchgeführt und ausführlich diskutiert. Interessante, allerdings sehr aufwendige Möglichkeit für die chemische Analyse organischer Inhaltsstoffe von UFP.

„Detailed Physicochemical Characterization of the Ambient Fine and Ultrafine Particulate Mixture at a Construction Site“, 2021^[18]

Auch die Morphologie kann für eine realistische Einschätzung der Gefährlichkeit essentiell sein. An einer Baustelle (Abriss und Neubau des „Steidle Buildings“ an der Pennsylvania State University), die ca. 300 m von der nächsten größeren Straße entfernt liegt, wurden Masse, Anzahl, Größenverteilung, Form und chemische Zusammensetzung von PM inklusive der UFP-Fraktion untersucht. Für die Morphologie wurde Elektronenmikroskopie (TEM) und für die elementare Zusammensetzung energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) verwendet. Die Sammlung erfolgte über einen 9-stufigen Kaskadenimpaktor. Während des Messzeitraums wurde in ca. 20 m Entfernung zur Baustelle eine mittlere PM₁₀-Konzentration von 167 µg/m³ (als Summe der Impaktorstufen 0-4 µm) und eine mittlere Partikelanzahl-Konzentration von 16232 Partikel/cm³ gemessen, wobei ca. 90 % der Partikelanzahl auf UFP zurückzuführen ist. 72,2 % der Partikel traten im 2-dimensionalen Raum kreisförmig auf. Die Hauptelemente waren Kohlenstoff (40,8 %), Sauerstoff (26,4 %), Silizium (7,6 %), Schwefel (5,1 %) und Calcium (5,1 %). Arbeitsfahrzeuge, die im Verlauf der Bauarbeiten benutzt wurden, trugen den Hauptanteil am Ausstoß von Schwefel, Magnesium und Zink. Der Abriss selbst verursachte die Hauptemission von Silizium, Aluminium und Cobalt. Die Autoren beobachteten bei den mikroskopischen Untersuchungen das Auftreten von UFP auf verschiedenen Impaktorstufen und führten dies auf Zerfall größerer Partikel während der Sammlung zurück.

„Characterization of ultrafine particles and the occurrence of new particle formation events in an urban and coastal site of the Mediterranean area“, 2023^[19]

In dieser Studie werden Partikel-Neubildungsereignisse an zwei verschiedenen Messorten in Süditalien untersucht. Neben Parametern wie niedriger Luftfeuchtigkeit und hoher Sonneneinstrahlung scheint die SO₂-Konzentration einen deutlichen Einfluss auf die Partikelneubildung zu haben.

3.1.2.2 Untersuchungen zu UFP im urbanen Umfeld

„Rapid growth of new atmospheric particles by nitric acid and ammonia condensation“, 2020^[5]

Diese Publikation beschreibt die Neubildung ultrafeiner Partikel aus Gasen speziell im städtischen Umfeld. Bei der Initialkondensation und dem Anwachsen wenige Nanometer großer Partikel spielen v. a. Schwefel- und Stickstoffkomponenten eine Rolle, die in Städten in hohen Konzentrationen vorliegen. Die Autoren belegten anhand von Klimakammerexperimenten, dass unter diesen Bedingungen das Anwachsen der Partikel, z. T. durch direkte Kondensation, schneller erfolgen kann als die Anlagerung der Partikel an existierende größere Partikel, die als konkurrierende „Abbaureaktion“ wirkt. Da SO₂ in der Atmosphäre global reduziert wurde und wird, wird die Wichtigkeit von Stickoxiden in diesen Prozessen wachsen. Eine populärwissenschaftliche Ausführung des Sachverhaltes kann in Physik in unserer Zeit („Wachsen oder sterben – Partikelbildung in Städten“, ^[20]) oder Spektrum der Wissenschaft („Wie Stadtgase zu Feinstaub kondensieren“, 16.09.2020) nachgelesen werden und ist für die öffentliche Diskussion bestens geeignet.

„Quantifying high-resolution spatial variations and local source impacts of urban ultrafine particle concentrations“, 2019^[9]

Der Artikel beschreibt eine Untersuchung der räumlichen Verteilung von UFP sowie von PM_{2,5}, CO und NO₂ im Raum Pittsburg. Die 32 Messorte wurden in Abhängigkeit ihrer Nähe zum Straßenverkehr, Industrie oder Restaurants ausgewählt. Dabei wurde im Vergleich zu PM_{2,5}, NO₂ oder Ozon eine stark heterogene Verteilung von UFP (d. h. eine deutlich höhere räumliche Variabilität) nachgewiesen. Die Autoren betonen eine höhere Exposition der Bevölkerung, die in räumlicher Nähe zu den Quellen wohnt.

„Spatial variations in urban air pollution: impacts of diesel bus traffic and restaurant cooking at small scales“, 2021 ^[21]

Der Artikel scheint eine Ergänzung der Studie „Quantifying high-resolution spatial variations and local source impacts of urban ultrafine particle concentrations“ zu sein und beschreibt Messungen an fünf Messorten in Pittsburg, an denen verschiedene Luftschadstoffe (NO₂, CO, O₃, SO₂, CO₂, PM_{2.5}, BC im PM_{2.5} sowie UFP) zum Teil unter Verwendung von low-cost-Sensoren erfasst wurden. Die Autoren diskutieren die Variabilität der untersuchten Komponenten, wobei BC und UFP eine deutlich höhere räumliche und zeitliche Variabilität als andere Luftschadstoffe aufweisen. Auftretende Peaks werden auf den Einfluss von Verkehr und anderen Quellen (z.B. Kochaktivität in Restaurants) zurückgeführt.

„Influence of Local Sources and Meteorological Parameters on the Spatial and Temporal Distribution of Ultrafine Particles in Augsburg, Germany“, 2021 ^[22]

Zur Untersuchung der räumlichen Verteilung ultrafeiner Partikel in Augsburg erfolgten an sechs Messorten temporäre Messungen von Partikelanzahlkonzentrationen (die durch UFP dominiert sind) sowie teilweise weiterer Luftschadstoffe (PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x). Als Referenz diente eine dauerhaft betriebene Messstation auf dem Campus der Hochschule Augsburg. Mittels statistischer Methoden wurden Korrelationen zwischen den Messorten sowie mit anderen Luftschadstoffen untersucht. Insbesondere die Messorte mit hoher Verkehrsbelastung wiesen einen deutlichen Tagesgang auf, der stark mit dem Verkehrsaufkommen korreliert ist und an diesen Messorten auf den Straßenverkehr als dominierende Quelle für erhöhte Partikelanzahlen hindeutet. Auch in dieser Publikation wurde auf die hohe räumliche und zeitliche Variabilität hingewiesen.

„Vertical and horizontal distribution of regional new particle formation events in Madrid“, 2018 ^[23]

Diese Publikation befasst sich ebenfalls mit der Neubildung ultrafeiner Partikel. An mehreren Messstationen in Madrid und zusätzlich an Fesselballonen wurde Messequipment (SMPS) betrieben, um vertikale Gradienten erfassen zu können. Einige erhöhte Messsignale wurden mit dem ca. 12 km entfernten Flughafen in Verbindung gebracht.

„Chemical composition of ultrafine aerosol particles in central Amazonia during the wet season“, 2019 ^[24]

Da UFP auch durch natürliche Prozesse entstehen, ist eine Betrachtung der chemischen Zusammensetzung für den Vergleich mit anthropogenen Quellen nützlich. Dieser Artikel beschreibt Messungen in der Amazonasregion. Die chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel erfolgte mit TDCIMS („thermal desorption chemical ionization mass spectrometry“), bei der UFP elektrisch geladen und auf einem Platinfilament abgeschieden werden. Nach einer Sammelzeit von 30 - 60 min, die etwa 10 – 100 ng gesammelter Partikelmasse entspricht, wird das Filament aufgeheizt und die desorbierten Aerosolbestandteile mittels Atmosphärendruckionisation/Massenspektrometrie untersucht. Im Massenspektrum wurde 3-Methylfuran als Abbauprodukt von Isoprenepoxydiol als ein Hauptkennstoff (Tracer) erkannt und die Oxidation von Isopren-Einheiten im Zusammenhang mit UFP-Bildung betont. Es kann nachgewiesen werden, dass ein anthropogener Einfluss zu höheren Konzentrationen an UFP führt (Luftmassen aus Manaus). Die natürlichen Quellen fördern in Zusammenspiel mit anthropogenen Quellen die UFP-Bildung.

„Contribution of industrial and traffic emissions to ultrafine, fine, coarse particles in the vicinity of industrial areas in Japan“, 2021 ^[25]

Interessanter Artikel zur Quellenzuordnung von Partikeln verschiedener Größenklassen (UFP, PM_{2.5}, PM₁₀-PM_{2.5}) durch eine aufwendige Untersuchung der verschiedenen Feinstaubfraktionen im industriellen Komplex „Keihin Industrial Area“ Kawasaki City (Japan) und deren Auswertung mittels positiver Matrixfaktorisierung (PMF). Ein Teil der Messungen erfolgte mittels Aerosolmassenspektrometrie mit hoher Zeitauflösung an einer vielbefahrenen Kreuzung im untersuchten Gebiet, gleichzeitig wurden dort verschiedene PM-Fraktionen mittels nano-MOUDI-Kaskadenimpaktoren gesammelt. Die Konzentration von PM_{2.5} war im Winter höher als im Sommer, und auch Hauptbestandteile der mittels Aerosolmassenspektrometer untersuchten Fraktion PM₁ zeigten dieses Verhalten. Die Autoren versuch-

ten, die Emissionen durch ihre chemische Zusammensetzung als charakteristisches „Pattern“ den verschiedenen Quellen zuzuordnen. Spitzenwerte verschiedener Metalle (Fe, Mn, V, Cu, Ni, Zn) traten bei Wind aus dem südlich gelegenen Industriegebiet auf und wurden auf Industrieemissionen (Stahlproduktion) zurückgeführt. Erhöhte Sulfatwerte wurden bei Wind aus Richtung eines Ölkraftwerkes gemessen. Die Autoren konnten an diesem stark industriell geprägten Messort im Winter 30 % des $PM_{0.1}$ dem Straßenverkehr zuordnen, wobei die „non-tailpipe emissions“ dominierten. Ca. ein Drittel der UFP kann aber auch in diesen Messungen nicht zugeordnet werden. Auffällig ist, dass ein großer Verkehrsflughafen (Tokio-Haneda) in der Nähe des Messorts (ca. 5 km entfernt) liegt, in der Publikation allerdings nicht erwähnt oder als Quelle in Betracht gezogen wird. Die Autoren weisen darauf hin, dass durch deutliche Erfolge bei der Reduzierung motorischer Emissionen von Kraftfahrzeugen nun andere Emissionsquellen in den Vordergrund treten.

„Characteristics of Chemical Components in Fine Particles ($PM_{2.5}$) and Ultrafine Particles ($PM_{0.1}$) in Hanoi, Vietnam: a Case Study in Two Seasons with Different Humidity“, 2021^[26]

Publikation zum Einfluss meteorologischer Bedingungen auf die Bildung von $PM_{2.5}$ und UFP in Regen und Trockenzeit. Die Probenahmen erfolgten im dritten Stock eines Universitätsgebäudes in Hanoi in direkter Umgebung mehrerer sehr stark befahrener Straßen; $PM_{0.1}$ wurde auf der untersten Stufe eines fünfstufigen Impaktors gesammelt. EC und OC wurde mittels TOC-Analysator, lösliche Ionen mittels Ionenchromatographie bestimmt. Als Hauptkomponenten fanden die Autoren größenunabhängig OC („organic carbon“) und EC („elemental carbon“), wobei in UFP diese bis zu 80 % ausmachen. SOC („secondary organic compounds“) machen dabei 36 - 42 % der OC aus. Es konnte dabei auch nachgewiesen werden, dass Nitrate und Sulfate im Prozess der photochemischen Reaktionen essentiell für die Bildung von wasserlöslichen organischen Verbindungen sind. Während die Konzentration von $PM_{2.5}$ im Winter höher als im Sommer war, zeigten UFP eine geringere Variation zwischen Sommer und Winter; die UFP-Konzentration war aber generell sehr hoch. Während Regenereignissen verringerte sich die UFP-Konzentration deutlich und stieg bei Trockenheit deutlich. Das Verhältnis von OC zu EC variierte für beide Größenfraktionen von Sommer zu Winter kaum. Ruß-Kohlenstoff ist als EC dominant in UFP. Die Ergebnisse bestätigen die bisherigen Erkenntnisse zu Feinstaub und UFP.

„Chemical characterization and source apportionment of size-segregated aerosol in the port-city of Venice (Italy)“, 2021^[27]

Diese Publikation beschreibt eine Messkampagne auf der Insel Sacca Fisola in Venedig, bei der verschiedene Partikelfraktionen mit Hilfe eines MOUDI-Kaskadenimpaktors gesammelt und analysiert wurden. Gemessen wurden EC und OC (thermooptisches Verfahren, EUSAAR2 Protokoll), lösliche Ionen (Ionenchromatographie) und verschiedene Metalle (ICPMS) sowie die Masse der verschiedenen Fraktionen (Mikrowaage). Für die Auswertung kamen verschiedene Methoden, unter anderem positive Matrixfaktorisierung (PMF) zum Einsatz. Dabei wurden die untersuchten Komponenten den verschiedenen Faktoren Seesalz, Mineralstaub, sekundären anorganischem Aerosol, Elementoxide, primärem anthropogenem Aerosol und organischem Aerosol zugeordnet. Durch die Summe dieser Faktoren konnten 60% der ultrafeinen Partikelfraktion erklärt werden. Aus der Ergebnissen wurde geschlossen, dass ultrafeine Partikel überwiegend durch anthropogene Aktivitäten (z.B. Schiffsverkehr) entstehen.

3.1.2.3 Untersuchungen zu Straßenverkehr, motorischen Emissionen, Bremsabrieb

„On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes“, 2011^[10]

In dieser vielzitierten Publikation wurde anhand von Prüfstandmessungen (Dynamometer) nachgewiesen, dass bei Bremsvorgängen neben größeren Partikeln auch in großer Anzahl ultrafeiner Partikel entstehen. Für die getesteten Bremsen ergaben sich deutliche UFP-Emissionen, insbesondere sobald die Bremse ca. 300 °C erreicht - zu dem Zeitpunkt beginnen organische Bestandteile der Bremsbeläge (z. B. Polyphenole) zu verbrennen/verkohlen. Für die Untersuchungen wurden „low-metallic“ Bremscheiben eingesetzt, der Abrieb wurde gesammelt und die Partikelgrößenverteilung gemessen. Sowohl Bremsabrieb als auch Bremscheibe wurden chemisch und mikroskopisch untersucht. Der morphologische Unterschied zwischen scharfkantigen Partikeln mit erhöhtem Metallanteil und weichen runden Formen bei Rußpartikeln wird in dieser Publikation besonders deutlich.

„Brake wear particle emissions: a review“, 2015^[28]

Übersichtsartikel von Autoren des EC-JRC, der die Thematik Partikelemissionen bei Bremsvorgängen breit behandelt und wichtige Publikationen zitiert und eine detaillierte Darstellung des Aufbaus von Kfz-Bremsen sowie der in den Bremsbelägen enthaltenen Stoffe (mögliche Quellen für UFP) umfasst. Die Autoren zitieren Literatur zur Größenverteilung der bei Bremsbetätigung emittierten Partikel: überwiegend (ca. 50 - 90%) PM_{10} , davon bis zu 33% $PM_{0.1}$ – wobei die Angaben stark schwanken und die Größenverteilung vermutlich stark abhängig von den Bedingungen des untersuchten Bremsvorgangs ist. Neben der Betrachtung von Größen-, Massenverteilung und Partikelanzahl widmet sich ein Kapitel der chemischen Zusammensetzung von Partikeln aus Bremsen und Bremsabrieb. Zusätzlich werden Emissionsfaktoren abgeleitet.

„Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire - road interface“, 2011^[29]

Die Bildung ultrafeiner Partikel aus Fahrbahn-/Reifenabrieb wurde unter Realbedingungen auf einer Teststrecke untersucht. Während im normalen Fahrbetrieb keine erhöhten UFP-Konzentrationen detektiert wurden, sind sie bei Fahrmanövern, bei denen Reifenschlupf auftritt, deutlich erhöht. Das Maximum der Partikelgrößenverteilung lag dann zwischen 30 - 60 nm. Bei Vollbremsungen traten zusätzlich sehr kleine (um 10 nm) Partikel auf (UFP-Bildung aus Bremsabrieb bei hoher Temperatur der Reibflächen).

„Brake Wear Particle Emissions of a Passenger Car Measured on a Chassis Dynamometer“, 2019^[30]

Die Autoren untersuchen anhand von Prüfstandmessungen die Bremsemissionen eines neuartigen Belagmaterials, das im von der EU geförderten Projekt „LOBRASYS“ entwickelt wurde. Der Fokus wurde gezielt auf den Einfluss verschiedener Messparameter (Temperatur und Kühlung der Bremscheibe, Geschwindigkeiten etc.) und auf die Versuchsanordnung (geschlossen, halboffen) gerichtet. Es wurde gezeigt, dass auch ohne Betätigung der Bremse durch die anliegenden Bremsbeläge (wenn auch in geringem Umfang) Partikel generiert werden. Ein Emissionsfaktor für Bremsabrieb wurde abgeleitet.

„Partikel in PKW-Emission und Immission“, 2020^[31]

Aktuelle Veröffentlichung des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Kooperation mit TROPOS und TU Dresden zum motorischen Emissionsverhalten moderner Benzin- und DieselPKW. Es wurden fünf Fahrzeuge (drei Euro-5, ein Euro 6c, ein Euro 6 d-Temp) auf einem Abgasrollenprüfstand (Simulation realistischer Lastzyklen) vermessen. Neben klassischer Schadgase (NO_x , CO, CO_2 , HC) wurden Partikelmasse, Rußmassenkonzentration, Partikelanzahlen und Partikelgrößenverteilung untersucht. Um realistische Daten zu erhalten (d. h. Kondensationseffekte und Artefakte zu verhindern), erfolgten die Messungen nach gezielter Verdünnung des Abgasstroms in einer temperierten Klimakammer. Aufgrund der Versuchsanordnung wurden bei den Klimakammerversuchen im WLTP-Zyklus neben den motorischen Emissionen auch Emissionen aus Brems- und Reifenabrieb erfasst, die (abhängig von der Temperatur, bei der die Versuche durchgeführt wurden) einen wesentlichen Beitrag leisteten. Eine Übertragbarkeit der Prüfstandversuche auf die an den Verkehrsmessstationen vorliegenden Verhältnisse wird diskutiert.

„Particulate emissions of a modern diesel passenger car under laboratory and real-world transient driving conditions“, 2020^[32]

Es wurden Partikelemissionen eines der Euro 5b-Norm entsprechenden Dieselfahrzeugs in Anzahl und Größenverteilung gemessen. Dabei wurde sowohl auf dem Prüfstand als auch im Straßenverkehr Proben genommen. Dabei richtete sich der Blick auf Fahrverhalten und Schmierstoffe als Verursacher, wobei auch die unterschiedliche Flüchtigkeit eine Rolle spielt. Um für eine Charakterisierung der Partikel ausreichend Material zu erhalten, wurde der nachgeschaltete Dieselpartikelfilter bei den meisten Messungen umgangen („bypass“). Bei Beschleunigung und konstantem Fahren ergaben sich Partikel, die hauptsächlich aus Ruß bestehen und mit einer Größe von ca. 50 nm deutlich im UFP-Spektrum liegen. Diese Partikel sind unabhängig von den eingesetzten Schmierstoffen. Dagegen geht die Partikelbildung im Schiebetrieb (beim Motorbremsvorgang), da dort keine Einspritzung in den Motor stattgefunden hat, auf die Schmierstoffe zurück. Es kann festgehalten werden, dass für die Partikelanzahlen Labor- und Straßenverkehrsergebnisse gut korrelieren.

„On black carbon emission from automotive disc brakes“, 2020^[33]

Der Artikel beschreibt BC (Black Carbon) - Messungen an einem Bremsenprüfstand. Abhängig von der Art des Bremsbelags treten unterschiedlich hohe BC- Emissionen auf. BC zeigt eine gute Korrelation mit PM₁. UFP wurden nicht speziell untersucht.

„Chemistry and sources of PM_{2,5} and volatile organic compounds breathed inside urban commuting and tourist buses“, 2020^[34]

Der Artikel beschäftigt sich nicht gezielt mit UFP, sondern mit der allgemeinen Exposition von Pendlern gegenüber Luftschadstoffen in öffentlichen Verkehrsmitteln. Es wurden PM_{2,5}, partikelgebundene Metalle und flüchtige organische Komponenten in der Innenraumluft von Pendelbussen analysiert. Die Untersuchung zeigt auf, dass die Feinstaub-Partikel von Organik dominiert werden, aber auch einen großen anorganischen Teil wie Sulfat, Kalium, Calcium usw. enthalten. Die organischen Beiträge sind bei Diesel höher als bei anderen Antriebsformen. Die Autoren verweisen auch auf den Beitrag der Bremsabriebe in Form von Kupfer und Antimon. Die Autoren unterscheiden sechs verschiedene Ursachen: Aufwirbelung von Straßenstaub, Metallbestandteile aus Bremsenabrieb und anderen Metallteilen, Staub aus der städtischen Umgebung, gebildetes Sulfat („secondary particle formation“), Abgase und Innenraumquellen. Typische chemische Verbindungen, die detektiert wurden, sind 2-Methyl-Pentan, Toluol, Isomere des Xylols und *n*-Pentan.

„Efficient Removal of Ultrafine Particles from Diesel Exhaust by Selected Tree Species: Implications for Roadside Planting for Improving the Quality of Urban Air“, 2019^[35]

In Windkanalversuchen wurde die Entfernung ultrafeiner Partikel („removal efficiency“) durch Deposition auf verschiedenen Pflanzen- und Blattoberflächen untersucht. Standardisiert wurden verschiedene Pflanzenarten mit Dieselabgasen in Kontakt gebracht. Die Blätter wurden im Anschluss auf Ferroelektrika (Magnetometrie), Metalle (ICP-MS) und deren Morphologie (Elektronenmikroskopie) untersucht. Die UFP werden (zumindest unter den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bedingungen) effizient durch Oberflächendeposition aus der Luft gefiltert, so dass die Luftqualität steigt. Diese Publikation zeichnet Möglichkeiten, mit Baumpflanzungen am Straßenrand (z. B. Birke, Eibe und Holunder) UFP Belastungen aus Dieselfahrzeugen für umliegende Gebiete zu verringern (vgl.: in Stuttgart wurde versucht, über Mooswände Feinstaubkonzentrationen zu senken).

„Effects of reinforcing fibers on airborne particle emissions from brake pads“, 2021^[36]

Die Publikation beschäftigt sich mit der Auswirkung der Zusammensetzung von Bremsbelägen auf die Partikelemission bei Bremsvorgängen. Dazu wurden mehrere verstärkende Fasertypen, die in Bremsbelagsmischungen verwendet werden, untersucht: Stahl-, Mineral-, Cellulose- und Aramid-Fasern. Elektronenmikroskopische Bilder der Fasertypen wurden aufgenommen und von jedem Typ wurden entsprechende Bremsbeläge hergestellt, mit denen auf einem Bremsenprüfstand das Brems-, Verschleiß- und Emissionsverhalten getestet wurde. Es erfolgte eine gravimetrische Bestimmung des Abriebs und eine Messung der bei den Bremsvorgängen entstehenden Partikelanzahlen und Massenkonzentrationen. Dabei zeigte sich eine Abnahme von PM-Emissionen in der Reihenfolge Stahl-, Mineral-, Cellulose- und Aramid-Fasern um ca. Faktor 3-4, wobei die Emissionen bei Stahlfasern durch seine Adhäsionskräfte an die metallische Phase der Bremse am größten, bei Aramid-Fasern am kleinsten waren. Die überwiegende Anzahl der emittierten Partikel sind keine UFP, sondern zählen zu größeren Fraktionen. Zusätzlich wurde die Oberflächenbeschaffenheit der Beläge vor und nach den Tests untersucht. Die erheblichen Unterschiede zeigen, dass die Optimierung von Belagmaterialien auf niedrige Partikelemission erhebliches Minderungspotential bieten könnte. Wegen der Euro 7-Norm und der zunehmenden Bedeutung der Elektromobilität wird eine Betrachtung der „non-tailpipe emissions“ immer wichtiger.

„Particle number emission factors from diesel trucks at a traffic intersection: Long-term trend and relation to particle mass-based emission regulation“, 2020^[37]

Veröffentlichung von Ergebnissen des Langzeitmonitorings (2004-2017) von Partikelanzahlkonzentrationen und anderer Schadstoffe an stark verkehrsbelasteten Messorten in Japan. Für die Sammlung der Partikelfractionen wurden DLPI- und nano-MOUDI-Kaskadenimpaktoren verwendet. Die Messungen zeigen, dass durch eine Verschärfung der Emissionsvorschriften, die den Einsatz von Oxidationskatalysatoren, Dieselpartikelfiltern und Stickoxid-Katalysatoren erforderten, die Partikelemission von LKW von 10¹⁶ Partikel pro Fahrzeug und km auf 1,4 x 10¹⁴ Partikel pro Fahrzeug und km deutlich re-

duziert werden konnte. Die Autoren hatten einen noch stärkeren Rückgang insbesondere von ultrafeinen Partikeln erwartet und diskutieren die Möglichkeit, dass es in Straßenschluchten zur verstärkten Neubildung ultrafeiner Partikel aus Vorläufersubstanzen kommen könnte.

„Characterization of ultrafine particles from hardfacing coated brake rotors“, 2023^[38]

Bei dieser materialwissenschaftlichen Untersuchung werden hartbeschichtete und konventionelle Grauguß-Bremsscheiben hinsichtlich ihres Abriebverhaltens und ihrer Partikelemissionen verglichen. Die größen aufgelöste Bestimmung der UFP erfolgte mittels SMPS, UFP-Fractionen wurden mittels ELPI+ gewonnen und im Anschluss mittels REM/EDX bezüglich Morphologie und Elementzusammensetzung untersucht. Dabei wurden erhebliche Unterschiede bezüglich der Anzahl und Morphologie der als Bremsabrieb emittierten Partikel festgestellt.

3.1.2.4 Untersuchungen zu UFP an Flughäfen

„Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review“, 2014^[39]

Übersichtsartikel zum Thema Luftqualität an Flughäfen, der sehr viele Publikationen zu verschiedensten Aspekten zitiert und breite Hintergrundinformationen zum Einstieg in die Thematik bietet.

„Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large International Airport“, 2011^[40]

Der Artikel beschreibt am Flughafen Los Angeles durchgeführte Messungen von Partikelanzahlen, Partikelgrößenverteilungen sowie verschiedener Inhaltsstoffe (BC, PAH, VOC). Die messtechnische Erfassung von Startvorgängen erfolgte auf dem Flughafengelände an der Strahlschutzwand (ca. 140 m Entfernung zur Startposition) sowie entlang eines Transekts bis 610 m Entfernung zur Startposition. Während des Startvorgangs wurden bis 10^7 Partikel pro cm^{-3} gemessen, ca. Faktor 100 über dem Flughafenhintergrundwert. Das Maximum der Partikelgrößenverteilung lag bei 14 nm. Die Messergebnisse für $\text{PM}_{2,5}$, PAH und VOC wurden mit einer Messstation im städtischen Hintergrund verglichen und waren z. T. bis Faktor 2 erhöht, teilweise aber auch niedriger.

„Composition and Morphology of Particle Emissions from in-use Aircraft during Takeoff and Landing“, 2013^[41]

Am Flughafen Brisbane wurden Feinstaubpartikel gesammelt und chemisch sowie morphologisch charakterisiert. Mittels Transmissionselektronenmikroskopie wurde die Morphologie der verschiedenen Partikel bestimmt. Dabei wurden überwiegend sphärische Teilchen zwischen 5 - 100 nm beobachtet, die von den Autoren als „dried droplets“ - getrocknete Tröpfchen – bezeichnet wurden. Mittels EDX wurde die Elementzusammensetzung einzelner Partikel untersucht, wesentliche Bestandteile sind C, O, S sowie Cl. Der Artikel führt Beispiele für morphologisch und chemisch völlig unterschiedliche Partikel auf. Mit der PIXE-Technik („particle-induced X-ray-emission“) wurde die Elementzusammensetzung von als PM_1 gesammelten Teilchen bestimmt (die natürlich von UFP abweichen kann). Als Hauptelemente wurden Si, Cl, Fe und S detektiert.

„A study of extractive and remote-sensing sampling and measurement of emissions from military aircraft engines“, 2010^[42]

Aufwendige Untersuchung der Emissionen typischer Turbinen militärischer Fluggeräte (C-130 Transportflugzeug, B-52 Bomber, Blackhawk Helikopter) mittels klassischer sowie „optical remote sensing (ORS)“ Techniken. Die Abhängigkeit der gemessenen Partikelanzahlen, die hierfür auf Kraftstoffverbrauch normiert wurden (Partikel pro kg Kraftstoff), vom Triebwerkstyp und Lastzustand wurde untersucht. Auch die durchschnittliche Größe der emittierten Partikel zeigte eine signifikante Abhängigkeit vom Triebwerkstyp und Lastzustand und lag zwischen 20 und 85 nm, mit der Tendenz zu größeren Partikeln bei höherer Triebwerkslast. Die Zusammensetzung der Partikel ist durch hohen Kohlenstoff- und Sulfatanteil und geringen Metallanteil charakterisiert (Anmerkung: in der Publikation wird der durchschnittliche Schwefelgehalt in Kerosin mit 600 mg/kg mit Maximalwerten von 3000 mg/kg angegeben). Die auf Kraftstoffverbrauch normierten Partikelanzahlen lagen im Bereich von $1,1 \times 10^{14}$ Partikel/kg Treibstoff (T701C Hubschraubertriebwerk im Leerlauf) bis $1,8 \times 10^{16}$ Partikel/kg Treibstoff (T56

Turboprop-Triebwerk im Leerlauf). Massenbezogene Emissionsfaktoren lagen zwischen 0,12 g Partikelmasse/kg Treibstoff (T701C Hubschraubertriebwerk im Leerlauf) bis 3,5 g Partikelmasse/kg Treibstoff (T56 Turboprop-Triebwerk bei Vollast).

„Influence of Jet Fuel Composition on Aircraft Engine Emissions: A Synthesis of Aerosol Emissions Data from the NASA APEX, AAFEX, and ACCESS Missions“, 2015^[43]

Diese Publikation fasst eine Reihe sehr aufwendiger Emissionsmessungen der NASA an einer mit CFM56-2-C1 –Triebwerken ausgestatteten DC-8 zusammen. Dabei wurden 15 verschiedene Flugkraftstoffe, inklusive biobasierter und synthetischer Treibstoffe sowie Mischungen mit konventionellem Flugkraftstoff unter verschiedenen Lastzuständen und Betriebsbedingungen getestet. Der Einfluss der Kraftstoffqualität ist erheblich: Eine Umstellung auf nahezu schwefelfreie Kraftstoffe kann die spezifische Partikelemission (Partikelanzahl pro kg Treibstoff) etwa um den Faktor 10 reduzieren, bei hoher Triebwerkslast eher noch stärker. Auch der Aromatengehalt, insbesondere der Gehalt an Naphtalenen, wirkte sich bei den Tests deutlich aus, und zwar insbesondere auf die Bildung nichtflüchtiger Partikel.

Die Ergebnisse legen nahe, dass die Verwendung von Flugkraftstoffen höherer Qualität kurzfristig oder der Einsatz alternativer Kraftstoffe mittelfristig eine praktikable Möglichkeit wäre, um deutliche Emissionsminderungen zu erzielen. Langfristig soll der Einsatz synthetischer oder biobasierter Flugkraftstoffe, die nahezu frei von schwefelhaltigen oder aromatischen Bestandteilen sind, die Klimabilanz des Luftverkehrs verbessern. Ihr Einsatz wird zudem eine spürbare Reduktion der Emission von ultrafeinen Partikeln bewirken.

“Take-off engine particle emission indices for in-service aircraft at Los Angeles International Airport”, 2017^[44]

Die Autoren untersuchten die beim Start auftretenden Triebwerksemissionen und verglichen die dabei erhaltenen Daten mit den Flugzeug- und Triebwerkstypen sowie den bei der Triebwerkszertifizierung erhobenen Emissionsdaten. Partikel- und Rußemissionen variierten dabei in Abhängigkeit des Triebwerkstyps erheblich.

„Evaluation of ultrafine particle concentrations and size distributions at London Heathrow Airport“, 2020^[45]

Auswertung einer im Jahr 2016 am Flughafen Heathrow durchgeführten UFP-Messkampagne im Vergleich mit Messstationen im ländlichen Hintergrund, städtischen Hintergrund und innerstädtisch mit hoher Verkehrsbelastung (Marylebone Road). Dabei war die Partikelkonzentration geringer als an Stellen mit hohem Verkehrsaufkommen (Marylebone Road), aber höher als im städtischen Hintergrund und ländlichen Gebieten. Das Maximum der Größenverteilung liegt im Umfeld des Flughafens deutlich niedriger (bei ca. 20 nm) als an den Messstationen in London (ca. 30 nm) bzw. im ländlichen Hintergrund (ca. 40 nm). Eine Analyse der Windrichtungsverteilung ergab einen erhöhten Beitrag startender Flugzeuge.

„Influence of Aviation Emission on the Particle Number Concentration near Zurich Airport“, 2020^[46]

Modellierung der Partikelanzahlen im Bereich des Flughafens Zürich sowie umliegender Ortschaften und Vergleich mit UFP-Messungen in diesem Bereich. Zur Erstellung des Modells wurden Trajektorien der Flugzeuge in der Luft und auf dem Flughafen (Start, Landung, Taxiing) erfasst und mit Emissionsdaten aus anderen Publikationen kombiniert. Für den Flughafen Zürich wird von einer Gesamtemission von 10^{24} Partikeln pro Jahr ausgegangen, davon etwa $3,2 \times 10^{22}$ nichtflüchtige Partikel. Die Autoren gehen von einem deutlichen Einfluss des Schwefelgehalts des verwendeten Kerosins aus.

„Identification of jet lubrication oil as major component of aircraft exhaust nanoparticles“, 2019^[47]

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der chemischen Zusammensetzung ultrafeiner Partikel aus dem Flugverkehr. Am Flughafen Tokio-Narita wurden in 140 m Entfernung zur Startbahn Partikelanzahlkonzentrationen und Größenverteilungen von UFP erfasst. Während Starts und Landungen und bei Wind aus Richtung der Startbahn wurden Spitzen der Partikelanzahlkonzentrationen bis 10^6 Partikel/cm³ festgestellt, bei Hintergrundkonzentrationen im Bereich 10^4 Partikel/cm³.

Die Partikel wurden mittels dreier parallel betriebener Kaskadenimpaktoren (NanoMOUDI) größenfraktioniert auf verschiedenen Substraten (Aluminiumfolie, Polycarbonat, Goldfolie) gesammelt. Die abgetrennten Partikel wurden auf EC/OC, Elemente (mittels PIXE, „particle-induced X-ray-emission“) und mittels Thermodesorption-GC-MS analysiert. Die Partikelmasse betrug 4 - 10 µg, bei Sammelzeiten von bis zu 56 h. Auf den unteren Stufen des Impaktors (entsprechend 10 - 32 nm Partikelgröße) wurde bei Probenahmen während der Betriebszeiten des Flughafens etwa folgende Zusammensetzung beobachtet: Organisch gebundener Kohlenstoff 60 - 80%, Schwefel bis ca. 10%, Rest 10 - 30 %. Eine genauere Analyse des organisch gebundenen Kohlenstoffs im direkten Vergleich mit Treibstoff- und Schmierstoffproben ergab dasselbe Muster an Pentaerithritolestern (Hauptkomponenten von Turbinenschmierstoffen).

Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass etwa die Hälfte der Partikelmasse kleiner 30 nm, die mit Thermodesorption-GC-MS analysiert wurde, aus chemisch unveränderten Schmierstoffbestandteilen stammt, und weisen darauf hin, dass technische Lösungen zur Reduzierung des Ölverbrauchs der Triebwerke die Partikelemissionen stark reduzieren könnten.

„Identification and Source Attribution of Organic Compounds in Ultrafine Particles near Frankfurt International Airport“, 2020^[12]

Veröffentlichung der Arbeitsgruppe von Prof. Vogel (Uni Frankfurt) in Kooperation mit Dr. van Pinxteren (TROPOS) zu aktuellen, an einer Messstation des HLNUG (4 km Entfernung zum Flughafen Frankfurt) durchgeführten Messungen zur chemischen Charakterisierung von UFP. Die Probenahmen erfolgten mittels Kaskadenimpaktor (NanoMOUDI) hauptsächlich bei Wind aus Richtung des Flughafens und außerhalb der Zeiten des Nachtflugverbots. Die Sammelzeit betrug bis zu 53 h. Als Messmethode wurde LC-HRMS (Orbitrap-Massenspektrometer) eingesetzt. In den gesammelten UFP wurden Pentaerithritolester und Trimethylolpropanester als Hauptbestandteile sowie das Additiv Trikresylphosphat und einige spezifische Amine gefunden und durch Vergleich mit gebräuchlichen Turbinenschmierölen eindeutig identifiziert. Diese Verbindungen scheinen als sehr spezifische Tracer für UFP, die aus dem Flugverkehr stammen, geeignet.

Diese Arbeit ähnelt in ihrer Methodik und in ihren Ergebnissen sehr den Untersuchungen von Fushimi *et al.* („Identification of jet lubrication oil as major component of aircraft exhaust nanoparticles“).

„Nucleation of jet engine oil vapours is a large source of aviation-related ultrafine particles“, 2022^[48]

Eine weitere Veröffentlichung der Arbeitsgruppe von Prof. Vogel (Uni Frankfurt) in Kooperation mit TROPOS und HLNUG zu Turbinenschmierstoffen als Quelle volatiler ultrafeiner Partikel im Umfeld eines Flughafens. In der Partikelfraktion 10-21 nm wurde ein Massenanteil von 21% Turbinenschmierstoff an der Gesamt-UFP-Masse gefunden. Die Autoren führten zudem Laborversuche durch, die zeigten, dass Turbinenschmierstoffe aufgrund ihrer Schwerflüchtigkeit als Kondensationskeim volatiler ultrafeiner Partikel wirken. Diese Schwerflüchtigkeit erlaubt auch eine für die Quantifizierung ausreichende Abscheidung auf den unteren Stufen des verwendeten nano-MOUDI-Niederdruckimpaktors. Andererseits werden UFP aus Turbinenschmierstoffen wohl bei Partikelemissionsmessungen, die auf nichtflüchtige Partikel abzielen, nicht erfasst. Die Autoren diskutieren zudem verschiedene Quellen ultrafeiner Partikel aus Flugzeugturbinen: Während der Aromatengehalt des Treibstoffs überwiegend die Bildung nichtflüchtiger („Ruß“)-Partikel beeinflusst, werden flüchtige Partikel durch kondensierte schwefelhaltige Substanzen, aber auch durch Schmierstoffdämpfe erzeugt. Ein reduzierter Aromaten- und Schwefelgehalt der künftigen „sustainable aviation fuels“ (SAF, nachhaltige Flugtreibstoffe) würde diese Quelle nicht adressieren.

Die Autoren schlagen vor, die toxikologischen Eigenschaften von aus Turbinenschmierstoffen generierten UFP zu untersuchen.

„Auswirkungen des reduzierten Flugbetriebs während der Corona-Pandemie auf die Konzentration von ultrafeinen Partikeln“, 2021^[49]

Die Ultrafeinstaub-Belastung im Umland des Flughafens München ist Thema dieses Artikels, der von der Bürgerinitiative Freising in Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum München verfasst wurde. Veröffentlicht wurden Messungen von Partikelanzahlkonzentrationen, die mit stationär eingesetzten Handgeräten vom Typ Discmini (Fa. Testo) erfolgten. Die Geräte liefern zusätzlich eine Abschätzung

der mittleren Partikelgröße. Ihre Eignung für Dauermessungen, insbesondere bei ungünstigen meteorologischen Bedingungen (hohe bzw. kondensierende Luftfeuchtigkeit) ist allerdings umstritten. Das Messgebiet um den Münchner Flughafen und die Lage der Messpunkte wird detailliert dargestellt. Es erfolgt eine windrichtungsabhängige Auswertung der Messergebnisse, die sich an die im Umfeld des Flughafens Frankfurt vom HLNUG durchgeführte Auswertung anlehnt. Während des Untersuchungszeitraums von Juni bis August 2020 war die Anzahl der Flugbewegungen aufgrund der Auswirkungen der Corona-Pandemie gegenüber dem Vorjahreszeitraum deutlich reduziert. Dennoch stellen die Autoren an den verschiedenen Messorten eine Erhöhung der Partikelanzahlen bei „Wind vom Flughafen“ um das ca. 1,5 fache sowie eine Abnahme der mittleren Partikelgröße fest. Bei der Auswertung wurden die gemessenen Partikelanzahlen mit der Anzahl der täglichen Flugbewegungen und dem Kerosinverbrauch (abgerufen beim Deutschen Fluglärmdienst) korreliert. Zur Minderung der UFP-Emissionen wird die Entschwefelung von Kerosin und der Einsatz elektrischer Bodenfahrzeuge/Schlepper vorgeschlagen.

„Distinct Ultrafine Particle Profiles Associated with Aircraft and Roadway Traffic“, 2021^[50]

Die Publikation beschreibt eine Straßenmesskampagne im Umfeld des Flughafens in Seattle mit dem Ziel, UFP-Beiträge aus dem Straßenverkehr von UFP-Beiträgen des Flughafens zu unterscheiden. Die Messfahrten erfolgten zwischen Februar 2018 und März 2019 mit Hilfe eines zum Messfahrzeug umgebauten PKW. Die Autoren verwendeten die Windverhältnisse und die Partikelgröße zur Differenzierung der UFP-Beiträge des Straßenverkehrs von denen des Flugverkehrs. Der Emissionsfaktor des Flugverkehrs wurde in dieser Studie mit $2,9 \times 10^{14}$ Partikel/kg Treibstoff abgeschätzt, wobei Landungen einen höheren Beitrag lieferten als Startvorgänge. Die Autoren machen hierfür u.a. Wirbelschleppen verantwortlich.

„Ultrafine particle levels measured on board short-haul commercial passenger jet aircraft“, 2021^[51]

Kurze Studie mit Ergebnissen der Messungen ultrafeiner Partikel im Cockpit bei verschiedenen Kurzstreckenflügen. Konzentrationsspitzen erreichten nahezu 100000 Partikel/cm³ und traten bei Lastwechseln und vor allem beim Start der Hilfsturbine (APU) auf. Teilweise wurde Ölgeruch wahrgenommen. Die Entstehung ultrafeiner Partikel aus hocherhitzten Bestandteilen des Triebwerksschmieröls und deren Eintritt in die Zapfluft wird diskutiert.

3.1.2.5 Gesundheitliche Effekte von UFP

Da gesundheitliche Effekte im Projektverbund BayUFP im Fokus stehen, wird hier nur kurz auf die im Rahmen des Projekts geprüften Publikationen eingegangen.

„Toxicity of aged gasoline exhaust particles to normal and diseased airway epithelia“, 2015^[52]

In sehr aufwendigen Untersuchungen wird die Wirkung von verdünnten und gealterten Abgasen eines Euro 5-Benzinmotors auf humane Epithelzellen untersucht. Eine beleuchtete Klimakammer simuliert dabei die atmosphärische Alterung, ein Aerosol-Anreicherungssystem variiert die Partikelanzahl ohne die Partikelchemie zu verändern und eine Aerosol-Depositions-Kammer lagert die Nanopartikel auf „air-liquid interface“-Kulturen ab. Dabei wurden verschiedene Varianten humaner Epithelzellen verwendet (z. B. ausdifferenziert oder proliferierend). Es kann gezeigt werden, dass selbst kurze Exposition mit Partikeln aus diesem Versuchsaufbau die Zellen schädigen und diese für anschließende Gefährdungen deutlich verwundbarer werden.

„Non-volatile particle emissions from aircraft turbine engines at ground-idle induce oxidative stress in bronchial cells“, 2019^[53]

Diese Publikation beschreibt die Exposition humaner Lungeneithelzellen gegenüber Emissionen der Flugzeugturbine CFM56-7B26 turbofan, des in der zivilen Luftfahrt am weitesten verbreiteten Triebwerks. Die Turbine wurde in unterschiedlichen Lastzuständen und mit verschiedenen Treibstoffen, d. h. mit konventionellem Jet A-1 sowie einer Mischung aus Jet A-1 und 32% synth. Treibstoff („hydro-processed esters and fatty acids“, „HEFA“) betrieben. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit diesem Triebwerkstyp bei beiden Kraftstoffen bei geringer Last weniger, aber deutlich kleinere Partikel (< 20 nm) gebildet werden, dass die Partikelemission der Jet A-1/HEFA-Mischung vor allem bei geringer Last deutlich (ca. Faktor 3) geringer ist, und dass bereits eine Kurzzeitexposition die Zellen schädigt, wobei konventioneller Treibstoff bei geringer Last die stärksten Effekte auslöste. Diese stärkere

Reaktion bei niedrigeren Massenkonzentrationen legt nahe, dass sich negative Effekte nicht alleine anhand der Massenkonzentration abschätzen lassen.

„Before the First Breath: Prenatal Ultrafine Particulate Exposure and Incident Asthma“, 2021^[54]

In diesem Editorial wird auf die Effekte ultrafeiner Partikel *in utero* eingegangen und auf eine Kohortenstudie hingewiesen, die ein erhöhtes Asthmarisiko des ungeborenen Kindes bei Exposition der werdenden Mutter gegenüber UFP aufzeigt. In der zitierten Studie konnten geschlechterspezifische Unterschiede aufgezeigt werden. Nebenthemen wie Rauchen und soziale Ungleichheit als Begünstiger einer UFP-Exposition werden ebenfalls angesprochen.

„Ultrafine particles, blood pressure and adult hypertension: a population-based survey in Northeast China“, 2021^[55]

Die Autoren dieser Publikation stellen einen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber UFP und erhöhtem Blutdruck her. Es wurden verschiedene Arten von Blutdrucks (systolisch, diastolisch, durchschnittlicher Arteriendruck und Pulsdruck) gemessen und mit modellierten UFP-Konzentrationen korreliert. Allerdings erscheint es schwierig, die z.T. deutlich stärkeren individuellen Effekte (wie z.B. Rauchen) zu korrigieren.

„Long-Term Exposure to Ultrafine Particles and Particulate Matter Constituents and the Risk of Amyotrophic Lateral Sclerosis“, 2021^[56]

Diese Kurzpublikation beschreibt eine Kohortenstudie, an der 1636 Patienten und 4024 Kontrollprobanden beteiligt waren, die einen Zusammenhang zwischen amyotropher Lateralsklerose (ALS), einer Nervenkrankheit, und einer Exposition gegenüber verschiedenen Luftschadstoffen, darunter UFP, untersucht. Es besteht eine schwache Korrelation zwischen NO₂ und ALS sowie zwischen Si in PM₁₀ und ALS.

„Chemical Composition and Toxicity of PM₁₀ and PM_{0.1} Samples near Open-Pit Mines and Coal Power Stations“, 2022^[57]

Die Autoren beschreiben die Exposition menschlicher MRC-5 Fibroblasten gegenüber PM₁₀ und PM_{0.1} – Partikeln, die in der Umgebung von Kohleminen und eines Kohlekraftwerks in Schneeproben gesammelt worden waren. Die Effekte der UFP-Fraktion waren stärker ausgeprägt als die der größeren Partikelfraktion und PM_{0.1}-Proben zeigten im Vergleich mit PM₁₀-Proben erhöhte Genotoxizität.

„Air Pollution, Ultrafine Particles, and Your Brain: Are Combustion Nanoparticle Emissions and Engineered Nanoparticles Causing Preventable Fatal Neurodegenerative Diseases and Common Neuropsychiatric Outcomes?“, 2022^[58]

Diese Studie aus Mexico City diskutiert eine Korrelation zwischen erhöhter Exposition gegenüber PM und UFP und dem Auftreten von Krankheiten wie Alzheimer und Parkinson.

„Road tunnel-derived coarse, fine and ultrafine particulate matter: physical and chemical characterization and pro-inflammatory responses in human bronchial epithelial cells“, 2022^[59]

In zwei verschiedenen Straßentunneln mittels Kaskadenimpaktor gewonnene Staubproben wurden bezüglich ihres Gehalts an EC, OC, Endotoxine und ihres oxidativen Potentials charakterisiert und ihre Wirkung auf humane Epithelzellen untersucht. Die Feinstaubfraktion 0,18 µm – 2,5 µm zeigte dabei deutlich stärkere Effekte sowohl als die gröbere Fraktion 2,5 µm – 10 µm als auch die UFP-Fraktion (kleiner 0,18 µm).

3.1.2.6 UFP in Innenräumen

„Fine and ultrafine particle removal efficiency of new residential HVAC filters“, 2019^[60]

Hier wurde getestet, wie gut handelsübliche HVAC-Filter für Häuser (Heizen, Lüften, Klimatisieren) PM_{2,5} und UFP filtern können. Dabei reichen die Ergebnisse von lediglich 16% bis 97% für UFP.

3.2 Konzeption und Beauftragung von Untersuchungen zur chemischen Charakterisierung von UFP

3.2.1 Fachgespräche und Auswahl möglicher Kooperationspartner

Nach vorausgehenden umfangreichen Literatur- und Internetrecherchen wurden zunächst Kompetenzprofile potentieller Kooperationspartner aus dem deutschsprachigen Raum erstellt. Es bestätigte sich, dass vergleichsweise wenige Arbeitsgruppen Expertise bezüglich der chemischen Charakterisierung ultrafeiner Partikel besitzen. Bei einer ersten Kontaktaufnahme zeigte sich, dass einzelne Akteure aus verschiedenen Gründen derzeit nicht für eine Zusammenarbeit in Frage kommen. Im Anschluss wurden mit Akteuren, die sich aufgeschlossen gegenüber einer Kooperation zeigten und bereit waren, ihre Forschungstätigkeit vorzustellen, ausführliche Gespräche geführt. Auch nach abgeschlossener Auswahl eines Kooperationspartners fanden weitere Fachgespräche statt, um einen Einblick in die betreffenden Bereiche Emissions- und Immissionsmessungen sowie Luftfahrttechnik zu erhalten. Die insgesamt acht Fachgespräche erfolgten in Form von Videokonferenzen, z.T. mit größerem Teilnehmerkreis von bis zu 20 Personen.

An dieser Stelle sollen lediglich Informationen zur UFP-Problematik im Flugverkehr sowie zu generellen Umweltauswirkungen des Luftverkehrs aufgeführt werden, die aus einem Gespräch mit einem Komponentenhersteller für Flugzeugturbinen sowie einem Gespräch mit Vertretern des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) stammen.

Dabei war es möglich, sowohl kurzfristig als auch langfristig wirksame Maßnahmen zur Reduktion von Flugzeugemissionen zu diskutieren. Es wurden bereits erreichte Erfolge bei der Emissionsminderung dargestellt und intensiv auf zukünftige Möglichkeiten insbesondere der Reduktion von CO₂, aber auch anderer klimawirksamer Stoffe (z.B. Stickoxide, Wasserdampf, Partikel, die zur Kondensstreifenbildung führen), eingegangen. Genannt wurde die Evolution bestehender Triebwerke mit dem Ziel einer Effizienzsteigerung, der Einsatz von Bio- bzw. Synthetiktreibstoffen, aber auch der Einsatz von Wasserstoff sowie batterieelektrischer Antriebe. Es wurde deutlich, dass auch langfristig der Einsatz von mittels erneuerbarer Energie erzeugten synthetischen Treibstoffen („synthetic aviation fuels“, SAF) die höchste Aussicht auf Realisierung hat, da Alternativen wie flüssiger Wasserstoff oder elektrische Antriebe zumindest für Langstreckenflüge keine ausreichende Energiedichte bieten. SAF seien derzeit Faktor 7 teurer als Kerosin, bei Realisierung aller Skaleneffekte wäre es künftig möglicherweise noch Faktor 2-3. SAF verbrennen reiner und generieren weniger Ruß und als Kondensationskeime wirkende UFP. Zur häufig diskutierten Reduktion des Schwefelgehalts im Kerosin zur Minimierung der UFP-Entstehung in Triebwerken wurde angemerkt, dass hoher Schwefelgehalt für Triebwerke ungünstig (da korrosiv) sei und aus Sicht der Triebwerkshersteller eine Reduzierung des Schwefelgehalts begrüßt würde.

Wasserstoff- und batterieelektrische Antriebe wären höchstens im Kurz- bzw. Mittelstreckenbereich eine Alternative, aber dem steht (besonders im Fall von Wasserstoff) der hohe Infrastrukturaufwand an den Flughäfen entgegen. Das Design aktueller Passagierflugzeuge wurde thematisiert, da bei Flugzeugen für den Kurz- bzw. Mittelstreckenbereich durch geänderte konstruktive Auslegung auf niedrigere Reisegeschwindigkeiten der Energiebedarf deutlich reduziert werden könnte. Dies hätte allerdings andere Nachteile: bei niedriger Reisegeschwindigkeit wären im Linienverkehr weniger Flüge pro Tag möglich, die hierfür eingesetzten effizienteren Turboproptriebwerke haben erhöhte Lärmemissionen.

Bezüglich der Emission ultrafeiner Partikel aus Triebwerken kann die frei zugängliche ICAO Aircraft Engine Emissions Databank, in der die unter Standardbedingungen erhobenen Triebwerksemissionen nichtflüchtiger Partikel enthalten sind, erste Orientierung liefern. Das Thema ist allerdings komplex, da verschiedenste Parameter Einfluss auf die Emissionen haben (genannt wurden Triebwerkstyp, Lastzustand, Lufttemperatur, Wartungszustand des Triebwerks, Aromatengehalt und Schwefelgehalt des Kraftstoffs) und die Durchführung von Messkampagnen zu Triebwerksemissionen hohen Aufwand erfordern und sehr kostenintensiv sind.

Alternative Kraftstoffe (schwefelarm und aromatenarm) reduzieren die Anzahl der UFP, damit Kondensstreifenbildung und damit sekundäre Klimaeffekte des Luftverkehrs. Während der Aromatengehalt hohen Einfluss auf die Bildung nichtvolatiler Partikel (im Wesentlichen Rußpartikel) hat, beeinflusst der Schwefelgehalt überwiegend die Bildung volatiler UFP. Im Vergleich zum für verschiedene

Messungen verwendeten Referenzkraftstoff (Jet A1 fuel) mit einem Aromatengehalt von 14-15% und 0,002% Schwefel halbiert der damit verglichene „Multiblend“-Kraftstoff mit niedrigerem Aromatenanteil (9%) die im Triebwerk entstehende Partikelzahl etwa. Die Treibstoffspezifikation fordert derzeit einen Aromatengehalt von mindestens 8%. Allerdings könnten aktuelle Flugzeugtriebwerke aus technischer Sicht auch aromatenfrei betrieben werden, lediglich bei sehr alten Triebwerken wäre dies problematisch. In einem künftigen Projekt soll ein Airbus A350 mit aromatenfreiem Kraftstoff (außerhalb der Spezifikationen) betrieben werden, was zu interessanten Ergebnissen führen könnte.

Verschiedene Triebwerke haben deutlich unterschiedliche Abhängigkeiten der Partikelanzahl vom Lastzustand. Das Maximum der Partikelanzahl bei nichtvolatilen Partikeln liegt bei etwa 30 nm, volatile Partikel sind im Mittel kleiner. Daher ist die 30 nm-Fraktion ein guter Indikator für die Triebwerksemissionen.

Während der Diskussion wurde deutlich, dass viele Schwierigkeiten auf die unterschiedlichen Metriken im Emissionsbereich und Immissionsbereich zurückzuführen sind. Während bei Emissionsmessungen nichtvolatile Partikel gemessen werden, wird bei Umweltmessungen die UFP-Gesamtfraktion, die flüchtige und nichtflüchtige Partikel enthält, erfasst. In dieser Gesamtfraktion würde sich eine Reduzierung des Schwefelgehalts im Kerosin stärker auswirken als bei den nichtvolatilen Partikeln. Auch die Immissionsmodellierung wird durch den Umstand, dass von der dominierenden Quelle nur die nichtvolatile Partikelemission bekannt ist, deutlich erschwert.

Die Gespräche lieferten wertvolle Informationen zu UFP-Emissionen von Triebwerken, gaben aber auch einen interessanten Einblick in die riesigen Herausforderungen, vor denen die Luftfahrtbranche in den nächsten Jahrzehnten im Hinblick auf Klimaneutralität und (Lärm-)Emissionsminderung stehen wird.

3.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Forschungsk Kooperationen

Die beauftragte Arbeitsgruppe arbeitete in ihrer Kooperation mit dem LfU an der Entwicklung einer neuen massenspektrometrischen Methode zur Charakterisierung von mittel- bis schwerflüchtigen UFP-Inhaltsstoffen. Nach der Sammlung ultrafeiner Partikel auf den Folien eines mehrstufigen Impaktors wurden die Analyten mittels Thermodesorption oder Laserdesorption verflüchtigt. Die Ionisierung erfolgte mit einer neuartigen Ionenquelle (Sicrit) unter Atmosphärendruck, die Messung mittels hochauflösender Massenspektrometrie (Orbitrap). Die Sicrit-Ionenquelle ionisiert die enthaltenen Stoffe vergleichsweise sanft, d. h. unter weitgehendem Erhalt der Molekülstruktur, was eine nachfolgende Identifizierung auch von unbekanntem Substanzen ermöglicht („non-target-Analysen“). Es wurden sowohl Tests mit Thermodesorption als auch Laserdesorption durchgeführt, wobei beide Methoden grundsätzlich geeignet scheinen (d. h. Signale liefern).

Die getestete Thermodesorptionsapparatur ermöglicht wegen ihrer hohen Leistung hohe Temperaturen und erlaubt damit eine Verdampfung vergleichsweise schwerflüchtiger Moleküle. Die Thermodesorption zeichnet sich auch bei größeren Molekülmassen durch eine hohe Desorptionseffizienz und eine hohe Reproduzierbarkeit der Desorption aus. Der Aufbau ist vergleichsweise einfach und robust. Als nachteilig erwies sich die hohe thermische Trägheit der Apparatur, die zu vergleichsweise langen Abkühlzeiten zwischen den Messungen führt, sowie das starke Aufheizen des für den Transfer des Aerosols zur Ionenquelle des Massenspektrometers verwendeten Stickstoffstroms. Letzteres führt zu einem Aufheizen von Komponenten der Ionenquelle und des Massenspektrometers, was wiederum zu einem während der Messung veränderlichen Untergrundsignal führt. Mit Thermodesorption konnten jedoch reproduzierbare Messungen an Testsubstanzen (PAK) mit einer Sensitivität bis in den ng-Bereich durchgeführt werden.

Wegen der beschriebenen Probleme erfolgte parallel die Entwicklung eines Laserdesorptionsverfahrens. Hierzu wurde ein kommerziell erhältlicher Lasergravierer mit einer das Aerosol aufnehmenden, in der Werkstatt des Instituts angefertigten Doppeldüse ausgestattet. Die x-y-Mechanik des Geräts erlaubt ein programmgesteuertes Abrastern von Bereichen der ELPI-Plättchen. Dies bietet den großen Vorteil, dass die Plättchen vorher nicht geteilt werden müssen, aber dennoch nicht abgerasterte Bereiche für weitere Analysen mit anderen Techniken unverändert erhalten bleiben. Die Anregungswellenlänge von 10,6 µm ermöglicht eine schonende Desorption und vermeidet Fragmentierung der Analy-

ten durch kurzwelliges Licht. Mit dem beschriebenen Aufbau ist es möglich, alle Partikelfractionen eines Kaskadenimpaktors mit einer Messdauer von lediglich 3 Minuten pro ELPI-Plättchen und einer Gesamtmessdauer von 45 Minuten zu analysieren. Nachteilig erscheint, dass die Laserdesorption schwerer flüchtige Komponenten möglicherweise nicht quantitativ erfasst. Zudem ist die erreichte Temperatur aufgrund der Anregungswellenlänge wahrscheinlich abhängig von der Absorbanz der Probe und damit von der Aerosolzusammensetzung, was eine quantitative Messung erschwert. Vorteilhaft ist jedoch die Möglichkeit, an einem nicht desorbierten Teil des ELPI-Plättchens weitere Untersuchungen durchführen zu können. Die Arbeitsgruppe konnte zeigen, dass nicht desorbierte Impaktionsspots mittels RAMAN-Spektroskopie untersucht werden können, um z.B. Verbindungen wie Ammoniumnitrat, aber insbesondere Rußpartikel unterschiedlicher Beschaffenheit zu analysieren. Dies erlaubt es, neben der massenspektroskopischen Analyse durch LD-SICRIT-MS auch Raman-Spektroskopie als orthogonale Analysemethode anzuwenden und qualitative Aussagen über die Zusammensetzung der organisch-chemischen und elementaren Bestandteile zu treffen. Zur Interpretation der Messdaten bieten sich chemometrische Verfahren wie z.B. die hierarchische Clusteranalyse an.

Ausgewählte ELPI-Plättchen wurden zusätzlich mit Rasterelektronenmikroskopie und energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht, um morphologische und elementanalytische Informationen zu gewinnen. Insbesondere die Morphologie kann Erkenntnisse zur der Bestimmung der Aerosolquelle liefern. Da die Analysen sehr zeitintensiv sind, wurden sie für die Messung von nach der Messung mittels LD-SICRIT-MS zurückgestellten Aliquoten eingesetzt. Zusätzlich wurden organische Aerosolkomponenten nach Extraktion mittels HPLC-Fluoreszenzspektroskopie und HPLC-MS untersucht. Diese Verfahren erlauben eine quantitative Analyse und können als Referenzmesstechnik dienen.

Im Ausblick nennt die Arbeitsgruppe weitere Möglichkeiten der Methodenoptimierung: Eine Abscheidung der Aerosolpartikel auf einem alternativen Substratmaterial, das die Laserleistung besser absorbiert, erscheint für eine Ausdehnung des Anwendungsbereiches in Richtung schwerflüchtigerer Komponenten sinnvoll. Die Kombination einer RAMAN-Messsonde mit der Laserdesorption im selben Gerät könnte die Automatisierung weiter verbessern.

Langfristig könnte die Methode das Potenzial besitzen, die Messung organischer Komponenten teilweise zu automatisieren und die Identifizierung von Substanzen mittels Spektrenbibliotheken zu vereinfachen. Dies würde eine Kooperation verschiedenerer Akteure dieses Fachgebiets voraussetzen.

3.3 Bereitstellung von Informationen für die Öffentlichkeit

Die Internetpräsenz des Projekts „Chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel“

[Chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel - LfU Bayern](#)

ging am 24.11.2020 online und wurde in Folge mehrfach ergänzt und aktualisiert. Im Juni 2021 wurde entschieden, die zunächst für den 02./03.12.2020 geplante und wegen der Corona-Pandemie verschobene Fachtagung „Luftqualität-Ultrafeine Partikel“ im Spätherbst 2021 durchzuführen. Wegen der zu Beginn der kälteren Jahreszeit erwarteten steigenden Infektionszahlen wurde die Fachtagung als eintägige online-Veranstaltung auf der technischen Basis des Videokonferenzsystems Webex geplant.

Die online-Fachtagung „Luftqualität - Ultrafeine Partikel“ mit namhaften Referenten aus der deutschsprachigen UFP-Community wurde erfolgreich am 25.11.2021 durchgeführt. 120 Teilnehmer, die sich überwiegend aus Fachpublikum aus Landesbehörden und dem akademischen Bereich zusammensetzten, wurden über verschiedene Aspekte der UFP-Thematik informiert. Eine kurze Zusammenfassung der Fachtagung ist zusammen mit den Vortragsfolien auf der Internetseite des UFP-Projekts verfügbar.

4 Bestimmung von 6PPD und 6PPD-Chinon im Feinstaub

4.1 Problemstellung und Zielsetzung

Reifenabrieb gilt nachweislich als Mitverursacher für Feinstaubbelastungen in den Städten, ist u. a. verantwortlich für nanopartikulären Ruß und laut einer Studie der Weltnaturschutzunion (IUCN) eine der größten Quellen für Mikroplastik in der Umwelt [61,62]. Wegen seiner hohen Umweltrelevanz ist im Zusammenhang mit Reifenabrieb die Substanz 6PPD (N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-Phenyl-p-Phenylendiamin) kürzlich verstärkt ins Blickfeld geraten. 6PPD wird weltweit als Antioxidationsmittel bei der Reifenproduktion verwendet. Speziell wird diese Substanz eingesetzt, um die Haltbarkeit von Gummi zu verbessern und damit die Auswirkungen chemischer und mechanischer Zersetzung zu reduzieren [63].

Die Freisetzung von 6PPD mit Reifenabriebpartikeln kann für die Umwelt zum Problem werden, wie eine im Januar 2021 erschienene US-amerikanische Studie erläutert [64]. Durch Oxidation mit Ozon (O₃) wird das 6PPD schnell in seine Chinon-Verbindung (6PPD-Q) umgewandelt (Abbildung 1). Dieses Chinon kann toxisch für einige aquatische Organismen sein und wurde vor allem mit einem massiven Sterben von Silberlachsen in städtischen Bächen nach Starkregenereignissen in Verbindung gebracht. Es wurde dabei festgestellt, dass der Straßenabfluss ein bedeutender Transportweg für 6PPD/6PPD-Q in die städtische aquatische Umwelt ist. Die letale Konzentration (LC₅₀) für Silberlachse lag hier bei sehr niedrigen 95 ng/l.

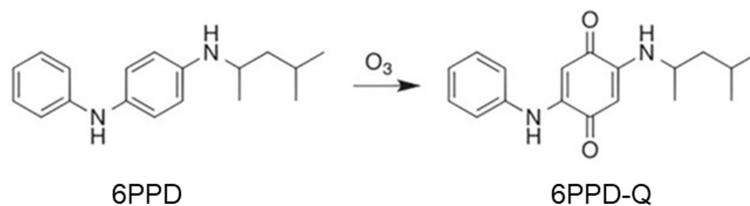


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der Oxidation von 6PPD mit Ozon zu 6PPD-Q.

Der Gehalt von 6PPD in Reifen liegt typischerweise im Bereich von 0,4 bis 2 Gew.-% [65]. Die geschätzte Masse an freigesetzten Reifenpartikel beträgt jährlich 1 327 000 t in der Europäischen Union, 1 120 000 t in den Vereinigten Staaten und 133 000 t in Deutschland [66]. Es ist daher zu erwarten, dass 6PPD-Chinon in der Umwelt weit verbreitet ist. Seine Toxizität für Menschen und andere Organismen ist dabei größtenteils unbekannt. Angesichts der andauernden Produktion und Nutzung von Reifen mit 6PPD trägt die Untersuchung des Vorkommens und Verhaltens von 6PPD/6PPD-Q in der Umwelt dazu bei, die ökotoxikologischen Auswirkungen verstehen zu können.

Aktuelle Studien konzentrieren sich hauptsächlich auf das Vorkommen von 6PPD/6PPD-Q in Gewässern, während die verfügbaren Informationen über die Atmosphäre wegen der fehlenden Messmethoden begrenzt sind (Tabelle 2).

Tabelle 2: Bereiche der 6PPD-Q-Konzentrationen in Luftproben (PM_{2,5}).

Standort	Konzentrationsbereich (pg/m ³)	Literatur
Hong Kong	0,5-13,8	Cao et al. (2022) [67]
China	01-84	Zhang et al. (2022) [68]
Brasilia	1,75	Johannessen et al. (2022) [65]
China	72050	Wang et al. (2022) [69]

Für Deutschland liegen derzeit kaum Daten vor. Aktuelle Forschungsbemühungen konzentrieren sich auf die Entwicklung von analytischen Verfahren zur Bestimmung der PPDs-Substanzen in Feinstaubproben. Dabei ist zu beachten, dass diese Analysen sehr anspruchsvoll sind, da diese Verbindungen

in der Luft in sehr geringen Konzentrationen vorhanden sind. Die Probenahme und die anschließende Extraktion der PPDs sind kritische Schritte in deren Analytik.

In dieser Arbeit sollte die entsprechende Analytik am LfU etabliert werden, um in weiteren Untersuchungen neue Erkenntnisse über die Relevanz von Reifenabrieb in der Umwelt zu erlangen.

4.1.1 Vorgehensweise

Analytische Techniken

Es wurden zwei gängige Messverfahren (GC-MS und LC-HRMS), die in der Umweltanalytik zur Bestimmung von 6PPD/ 6PPD-Q verwendet werden könnten, auf Eignung für die Feinstaubproben (PM_{10}) geprüft. Für die Entwicklung der Analysenmethode kamen mit unterschiedlichen Mengen 6PPD und 6PPD-Chinon dotierte unbeprobte Quarzfaserfilter sowie an der Luftüberwachungsstation München-Stachus exponierte Quarzfaserfilter zum Einsatz, auf denen über einen Zeitraum von 24 h Feinstaub (PM_{10}) gesammelt worden war.

Bei der Analyse der Filterproben muss 6PPD und 6PPD-Q möglichst vollständig aus dem Feststoff extrahiert werden. Dafür wurden verschiedene Extraktionsverfahren und verschiedene Lösungsmittel getestet.

4.1.2 Ergebnisse

Filterproben (PM_{10})

Die besten Wiederfindungsraten wurden in nach Erhitzen unter Rückfluss (50 ml ACN, 1h) erhaltenen Extrakten erzielt (Abbildung 2). Für das 6PPD liegt die Wiederfindung bei 87%, für 6PPD-Q bei 102%. Der größte Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass die Extrakte ohne Einengen am Rotationsverdampfer gemessen werden können und somit keine Degradation der Analyten erfolgt. Vor der Messung wurden die Extrakte mit einer Zentrifuge (Sigma 3-30KS) bei 20 °C und 20 000 rpm für 20 Minuten zentrifugiert.

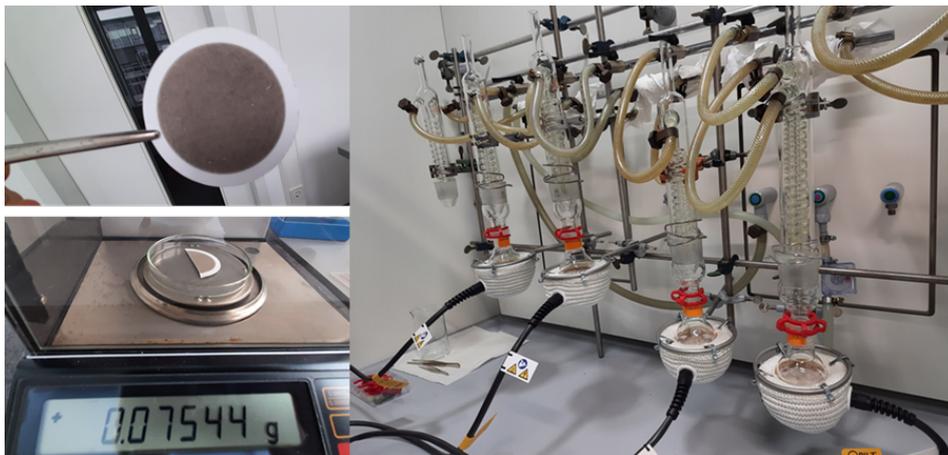


Abbildung 2: Verfahren zur Extraktion von 6PPD/6PPD-Q.

Die Linearität der Methode wurde durch eine 10-Punkt-Kalibration mit einem Korrelationskoeffizienten von $\sim 0,99$ für beide Analyten bestätigt (Abbildung 3). Die Kalibrierung wurde im Bereich von 1 bis 100 ng/l durchgeführt.

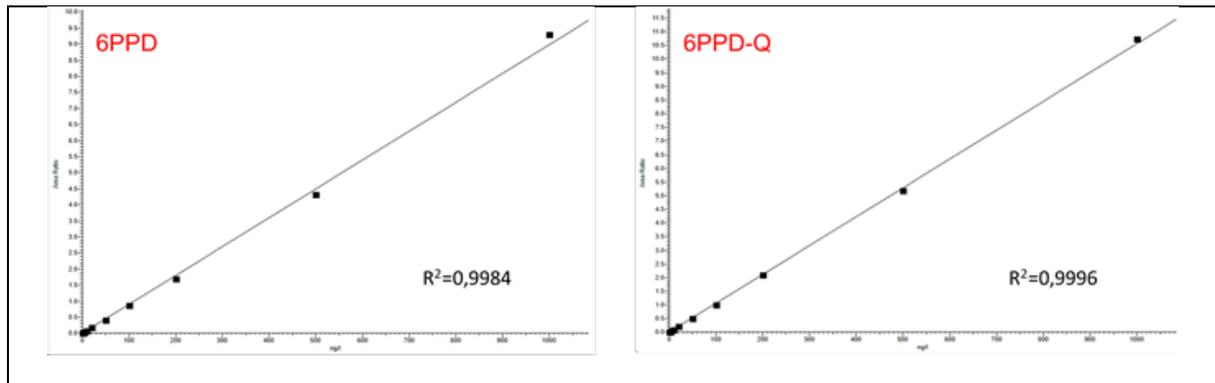


Abbildung 3: 10-Punkt-Kalibration für 6PPD und 6PPD-Q.

Validierung mit 6PPD-Referenzmaterial (RM)

Zur Validierung des Messverfahrens wurde ein Gummi-Referenzmaterial (Synthetische „Lauffläche“, Fa. Evonik) mit bekanntem Gehalt von 6PPD (0,852 Gew.-%) gemessen. Für die LC-HRMS-Analyse wurde das RM mit einer Biopsiestanze (1,5 mm) ausgestanzt und mit Acetonitril extrahiert.

Die Wiederfindung von 6PPD in der Extraktionslösung lag bei 108%. Die Richtigkeit der entwickelten Messmethode wurde damit bestätigt. Die Methode ist einsatzbereit für orientierende Messungen an verkehrsbelasteten Standorten. Im Rahmen dieses Projekts waren diese Messungen zeitlich nicht mehr möglich. Grundsätzlich sind 6PPD und 6PPD-Q als Marker für Reifenabrieb nutzbar. Das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Analysenverfahren bietet die Möglichkeit, den Verbleib des Reifenabriebs analytisch zu verfolgen und die Menge der Reifenabriebpartikel in einatembaren Staubfraktionen zu ermitteln.

5 Ausblick

Zum besseren Verständnis der Gesundheits- und Umwelrelevanz von UFP sind spezielle und koordinierte epidemiologische und toxikologische Studien sowie die weitere Entwicklung der Messverfahren zur chemischen Charakterisierung der Partikel erforderlich. Mit Hilfe des in diesem Projekt entwickelten und validierten Messverfahren für 6PPD/6PPD-Q als Marker für Reifenabrieb können Untersuchungen zum Verbleib von Reifenabrieb in der Umwelt durchgeführt werden, um zu verstehen, welche ökologischen und toxikologischen Effekte von Reifenabrieb ausgehen können.

6 Literatur und Quellen

- [1] Z. Leni, L. E. Cassagnes, K. R. Daellenbach, I. El Haddad, A. Vlachou, G. Uzu, A. S. H. Prévôt, J.-L. Jaffrezo, N. Baumlin, M. Salathe et al., *PloS one* **2020**, *15*, e0233425.
- [2] K. R. Daellenbach, G. Uzu, J. Jiang, L.-E. Cassagnes, Z. Leni, A. Vlachou, G. Stefenelli, F. Canonaco, S. Weber, A. Segers et al., *Nature* **2020**, *587*, 414.
- [3] N. Ma, C. Zhao, J. Tao, Z. Wu, S. Kecorius, Z. Wang, J. Größ, H. Liu, Y. Bian, Y. Kuang et al., *Atmos. Chem. Phys.* **2016**, *16*, 8593.
- [4] W. Junkermann, J. M. Hacker, *Bulletin of the American Meteorological Society* **2018**, *99*, 2587.
- [5] M. Wang, W. Kong, R. Marten, X.-C. He, D. Chen, J. Pfeifer, A. Heitto, J. Kontkanen, L. Dada, A. Kürten et al., *Nature* **2020**, *581*, 184.
- [6] L. M. Brown (Hrsg.) *Ultrafine particles in the atmosphere*, Imperial College Press, London, **2003**.
- [7] L. Morawska, *Thinking outside the box. How to use the existing science on ultrafine particles to protect against them?*, Vortrag gehalten auf 7th International Symposium on Ultrafine Particles, Air Quality and Climate (2019), Brüssel, Belgien, 15.–16. Mai 2019, **2019**.
- [8] *Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen - 39. BImSchV)*. 39. BImSchV.
- [9] P. K. Saha, N. Zimmerman, C. Malings, A. Haurlyiuk, Z. Li, L. Snell, R. Subramanian, E. Lipsky, J. S. Apte, A. L. Robinson et al., *The Science of the total environment* **2019**, *655*, 473.
- [10] J. Kukutschová, P. Moravec, V. Tomášek, V. Matějka, J. Smolík, J. Schwarz, J. Seidlerová, K. Safářová, P. Filip, *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* **2011**, *159*, 998.
- [11] A. Järvinen, M. Aitomaa, A. Rostedt, J. Keskinen, J. Yli-Ojanperä, *Journal of Aerosol Science* **2014**, *69*, 150.
- [12] 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.* **2020**, *21*, 3763–3775.
- [13] I. T. Kero, R. B. Jørgensen, *International journal of environmental research and public health* **2016**, *13*.
- [14] J. Lelieveld, *Faraday discussions* **2017**, *200*, 693.
- [15] H.-S. Kwon, M. H. Ryu, C. Carlsten, *Exp Mol Med* **2020**, *52*, 318.
- [16] A. A. Presto, P. K. Saha, A. L. Robinson, *Atmospheric Environment: X* **2021**, *10*, 100109.
- [17] M. Surdu, V. Pospisilova, M. Xiao, M. Wang, B. Mentler, M. Simon, D. Stolzenburg, C. R. Hoyle, D. M. Bell, C. P. Lee et al., *Environmental science: atmospheres* **2021**, *1*, 434.
- [18] F. Ilçi, M. Li, J. Gernand, *Aerosol Sci Eng* **2021**, *5*, 344.
- [19] Y. Lyu, A. Sinha, U. Olofsson, S. Gialanella, J. Wahlström, *Friction* **2023**, *11*, 125.
- [20] A. Kürten, J. Curtius, **2020**.
- [21] R. Song, A. A. Presto, P. Saha, N. Zimmerman, A. Ellis, R. Subramanian, *Air Qual Atmos Health* **2021**.
- [22] E. Giemsa, J. Soentgen, T. Kusch, C. Beck, C. Münkel, J. Cyrus, M. Pitz, *Front. Environ. Sci.* **2021**, *8*.
- [23] C. Carnerero, N. Pérez, C. Reche, M. Ealo, G. Titos, H.-K. Lee, H.-R. Eun, Y.-H. Park, L. Dada, P. Paasonen et al., *Atmospheric Chemistry and Physics* **2018**, *18*(22), 16601.
- [24] H. S. Glicker, M. J. Lawler, J. Ortega, S. S. de Sá, S. T. Martin, P. Artaxo, O. Vega Bustillos, R. de Souza, J. Tota, A. Carlton et al., *Atmos. Chem. Phys.* **2019**, *19*, 13053.
- [25] Y. Fujitani, K. Takahashi, K. Saitoh, A. Fushimi, S. Hasegawa, Y. Kondo, K. Tanabe, A. Takami, S. Kobayashi, *Environmental Advances* **2021**, *5*, 100101.
- [26] T. T. Huyen, R. Yamaguchi, Y. Kurotsuchi, K. Sekiguchi, N. T. Dung, N. T. T. Thuy, L. B. Thuy, *Water Air Soil Pollut* **2021**, *232*.
- [27] E. Gregoris, E. Morabito, E. Barbaro, M. Feltracco, G. Toscano, E. Merico, F. M. Grasso, D. Cesari, M. Conte, D. Contini et al., *Atmospheric Pollution Research* **2021**, *12*, 261.
- [28] T. Grigoratos, G. Martini, *Environmental science and pollution research international* **2015**, *22*, 2491.
- [29] M. Mathissen, V. Scheer, R. Vogt, T. Benter, *Atmospheric Environment* **2011**, *45*, 6172.
- [30] M. Mathissen, T. Grigoratos, T. Lahde, R. Vogt, *Atmosphere* **2019**, *10*, 556.

- [31] Kay Weinhold, Bader Al Malkawi, Maximilian Dobberkau, Max Kulpe, Tilo Roß, Frank Atzler, Alfred Wiedensohler, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Technische Universität TU Dresden, *Partikel in PKW-Emission und Immission*.
- [32] H. Wihersaari, L. Pirjola, P. Karjalainen, E. Saukko, H. Kuuluvainen, K. Kulmala, J. Keskinen, T. Rönkkö, *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* **2020**, 265, 114948.
- [33] Y. Lyu, U. Olofsson, *Journal of Aerosol Science* **2020**, 148, 105610.
- [34] A. Fernández-Iriarte, F. Amato, N. Moreno, A. Pacitto, C. Reche, E. Marco, J. O. Grimalt, X. Querol, T. Moreno, *Atmospheric Environment* **2020**, 223, 117234.
- [35] H. Wang, B. A. Maher, I. am Ahmed, B. Davison, *Environmental science & technology* **2019**, 53, 6906.
- [36] W. Song, J. Park, J. Choi, J. Lee, H. Jang, *Wear* **2021**, 484-485, 203996.
- [37] Y. Fujitani, K. Takahashi, A. Fushimi, S. Hasegawa, Y. Kondo, K. Tanabe, S. Kobayashi, *Atmospheric Environment: X* **2020**, 5, 100055.
- [38] A. Dinoi, D. Gulli, K. Weinhold, I. Ammoscato, C. R. Calidonna, A. Wiedensohler, D. Contini, *Atmos. Chem. Phys.* **2023**, 23, 2167.
- [39] M. Masiol, R. M. Harrison, *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)* **2014**, 95, 409.
- [40] Y. Zhu, E. Fanning, R. C. Yu, Q. Zhang, J. R. Froines, *Atmospheric Environment* **2011**, 45, 6526.
- [41] M. Mazaheri, T. E. Bostrom, G. R. Johnson, L. Morawska, *Environmental science & technology* **2013**, 47, 5235.
- [42] M.-D. Cheng, E. Corporan, *Atmospheric Environment* **2010**, 44, 4867.
- [43] R. H. Moore, M. Shook, A. Beyersdorf, C. Corr, S. Herndon, W. B. Knighton, R. Miake-Lye, K. L. Thornhill, E. L. Winstead, Z. Yu et al., *Energy Fuels* **2015**, 29, 2591.
- [44] R. H. Moore, M. A. Shook, L. D. Ziemba, J. P. DiGangi, E. L. Winstead, B. Rauch, T. Jurkat, K. L. Thornhill, E. C. Crosbie, C. Robinson et al., *Scientific data* **2017**, 4, 170198.
- [45] B. Stacey, R. M. Harrison, F. Pope, *Atmospheric Environment* **2020**, 222, 117148.
- [46] X. Zhang, M. Karl, L. Zhang, J. Wang, *Environmental science & technology* **2020**, 54, 14161.
- [47] A. Fushimi, K. Saitoh, Y. Fujitani, N. Takegawa, *Atmos. Chem. Phys.* **2019**, 19, 6389.
- [48] F. Ungeheuer, L. Caudillo, F. Ditas, M. Simon, D. van Pinxteren, D. Kılıç, D. Rose, S. Jacobi, A. Kürten, J. Curtius et al., *Commun Earth Environ* **2022**, 3.
- [49] Herrmann, W., Kendlbacher, R., Cyrus, J., Rottmann, O., *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* **2021**, 81, 458.
- [50] E. Austin, J. Xiang, T. R. Gould, J. H. Shirai, S. Yun, M. G. Yost, T. V. Larson, E. Seto, *Environmental science & technology* **2021**.
- [51] S. Michaelis, T. Loraine, C. V. Howard, *Environmental health : a global access science source* **2021**, 20, 89.
- [52] L. Künzi, M. Krapf, N. Daher, J. Dommen, N. Jeannet, S. Schneider, S. Platt, J. G. Slowik, N. Baumlin, M. Salathe et al., *Scientific reports* **2015**, 5, 11801.
- [53] H. R. Jonsdottir, M. Delaval, Z. Leni, A. Keller, B. T. Brem, F. Siegerist, D. Schönenberger, L. Durdina, M. Elser, H. Burtscher et al., *Communications biology* **2019**, 2, 90.
- [54] P. I. Beamer, N. Lothrop, *American journal of respiratory and critical care medicine* **2021**, 204, 747.
- [55] L.-Z. Lin, M. Gao, X. Xiao, L. D. Knibbs, L. Morawska, S. C. Dharmage, J. Heinrich, B. Jalaludin, S. Lin, Y. Guo et al., *Environ. Res. Lett.* **2021**, 16, 94041.
- [56] Z. Yu, S. Peters, L. van Boxmeer, G. S. Downward, G. Hoek, M.-A. Kioumourtoglou, M. G. Weisskopf, J. Hansen, L. H. van den Berg, R. C. H. Vermeulen, *Environmental health perspectives* **2021**, 129, 97702.
- [57] A. Larionov, V. Volobaev, A. Zverev, E. Vdovina, S. Bach, E. Schetnikova, T. Leshukov, K. Legoshchin, G. Eremeeva, *Life (Basel, Switzerland)* **2022**, 12.
- [58] L. Calderón-Garcidueñas, A. Ayala, *Environmental science & technology* **2022**, 56, 6847.
- [59] T. Skuland, V. S. Grytting, M. Låg, R. B. Jørgensen, B. Snilsberg, D. L. A. C. Leseman, A. Kubátová, J. Emond, F. R. Cassee, J. A. Holme et al., *Particle and fibre toxicology* **2022**, 19, 45.
- [60] T. Fazli, Y. Zeng, B. Stephens, *Indoor air* **2019**, 29, 656.
- [61] Y. Ren, W. Li, Q. Jia, Y. Zhao, C. Qu, L. Liu, J. Liu, C. Wu, *Journal of Hazardous Materials* **2024**, 465, 133089.
- [62] J. Boucher, D. Friot, Damien (2017): Primary Microplastics in the Oceans: a Global Evaluation of Sources. Hg. v. *International Union for Conservation of Nature (IUCN)*. Gland, Switzerland, **2017**.

- [63] S. Varshney, A.H. Gora, P. Siriyappagouder, V. Kiron, P. A. Olsvik, *Journal of Hazardous Materials* **2022**, 424, 127623
- [64] Z. Tian, H. Zhao, K. T. Peter, M. Gonzalez, J. Wetzel et.al, *Science* **2021**, 371, 185.
- [65] C. Johanessen, P. Helm, B. Lashuk, V. Yargeau, C.D. Metcalfe, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **2022**, 287, 117659.
- [66] S. Wagner, T. Hüffer, P. Klöckner, M. Wehrhahn, T. Hofmann, T. Reemtsma, *Water Research* **2018**, 139, 83-100.
- [67] G. Cao, W. Wang, J. Zhang, P. Wu, Air, *Environ. Sci. Technol.* **2022** 56, 4142–4150.
- [68] Y. Zhang, C. Xu, W. Zhang, Z. Qi, Z., Y. Song, *Environ. Sci. Technol.* **2022**, 56, 6914–6921.
- [69] W. Wang, G. Cao, J. Zhang, P Wu, *Sci. Technol.* **2022**, 56, 10629–10637

7 Anhang

7.1 Abkürzungen

AFM	Atomic Force Microscopy
ALS	Amyotrophe Lateralsklerose
CMA	Comprehensive Meta-Analysis
CPC	Condensation Particle Counter
DEMC	Differential Electrical Mobility Classifier
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMA	Differential Mobility Analyser
EC	Elemental Carbon
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
EESI	Extractive Electrospray Ionization
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor
EPA	Environmental Protection Agency
GC-MS	Gas Chromatography–Mass Spectrometry
GUAN	German Ultrafine Aerosol Network
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
HR	High Resolution
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
ICI-MS	Iodide-Adduct Chemical-Ionization Mass Spectrometer
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ISO	Internationale Organisation für Normung
LC-HRMS	Liquid Chromatography–High Resolution Mass Spectrometry
MAAP	Mehrwinkel-Absorptionsphotometer
MORE	Munich Mobility Research Campus
MOUDI	Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor
NIST	National Institute of Standards and Technology
OC	Organic Carbon
ORS	Optical Remote Sensing
PAH	Pulmonal Arterielle Hypertonie
PIXE	Particle-induced X-ray emission
PM	Particulate Matter
PPD/PPD-Q	N'-Phenyl-p-Phenylendiamin/-Chinon
REM	Rasterelektronenmikroskop
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SAF	Synthetic Aviation Fuels
SEM	Scanning Electron Microscope
SICRIT	Soft Ionization by Chemical Reaction In Transfer
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
TOF	Time of Flight
VOC	Volatile Organic Compounds
WLTP	Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure

7.2 Internetauftritt

Startseite Wir Kontakt Impressum Datenschutz Barrierefreiheit Ausschreibungen Stellenangebote 

Bayerisches Landesamt für Umwelt



Themen **Wirtschaft** Kommunen Bürger Presse Veranstaltungen Publikationen Daten

Abfall Altlasten Analytik/Stoffe Boden Energie Geologie Klima Lärm Luft Natur Strahlung Wasser

Startseite >> Analytik und Stoffe >> Innovative Analysen >> Ultrafeine Partikel

analytik

Übersicht Analytik Stoffe

Innovative Analysen

- Non-Target-Analytik
- Projekt "RISK-IDENT"
- DNA-Verfahren
- Microbial Source Tracking
- Analytik von Chrom (VI)
- Ultrafeine Partikel**
- Chemische Charakterisierung Aus dem Verkehr
- Fachtagung Ultrafeine Partikel 2021

Chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel

Als **ultrafeine Partikel (UFP)** beziehungsweise Ultrafeinstaub wird die Feinstaubfraktion mit einer Partikelgröße kleiner 100 nm (1 Nanometer = 1 Millionstel Millimeter) bezeichnet. Diese Partikel entstehen zum Beispiel durch Abriebe und Verbrennungsprozesse. Sie können aber auch in der Atmosphäre natürlicherweise aus gasförmigen Vorläufersubstanzen gebildet werden. Viele Fragen zur Wirkung dieser Partikel auf Mensch und Umwelt sind noch nicht geklärt.

UFP weisen eine sehr geringe Masse auf. Daher ist eine Untersuchung ihrer Zusammensetzung nur mit sehr empfindlichen und hochspezialisierten Analyseverfahren möglich. Schon die Gewinnung einer für eine Untersuchung ausreichenden Probenmenge stellt eine große Herausforderung dar. Bisher existieren kaum Analysemethoden, die geeignet sind, die chemische Zusammensetzung der Partikelfraktion kleiner 100 nm hinreichend zu charakterisieren.

[Dokumente zur Fachtagung - ZIP](#)

glossar

UFP (ultrafeine Partikel)

Bezeichnet die Feinstaubfraktion mit einer Partikelgröße kleiner 100 nm (1 Nanometer = 1 Millionstel Millimeter). UFP sind von besonderem Interesse, da sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Partikeln ändern, je kleiner sie sind. Dabei ist v. a. der Entstehungsprozess für deren chemischen Zusammensetzung entscheidend.

Startseite >> Analytik und Stoffe >> Innovative Analysen >> Ultrafeine Partikel >> Chemische Charakterisierung

analytik

Übersicht Analytik Stoffe

Innovative Analysen

- Non-Target-Analytik
- Projekt "RISK-IDENT"
- DNA-Verfahren
- Microbial Source Tracking
- Analytik von Chrom (VI)
- Ultrafeine Partikel**
- Chemische Charakterisierung Aus dem Verkehr**
- Fachtagung Ultrafeine Partikel 2021

Chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel

Im Rahmen des Projekts "Chemische Charakterisierung **ultrafeiner Partikel (UFP)**" bewertet das LTU den aktuellen Stand des Wissens auf nationaler und internationaler Ebene und fordert die Entwicklung neuer innovativer Techniken zur Analyse von UFP. Potentiell geeignete Techniken sind die Elektronenmikroskopie zur Charakterisierung der Morphologie (scharfkantige oder weiche Oberfläche der Teilchen), SP-ICP-MS (single-particle-inductively-coupled plasma mass spectrometry) zur Detektion von kleinsten Spuren von Metallen und GC/MS beziehungsweise LC/MS zur Quantifizierung organischer Aerosolkomponenten. Das LTU sammelt mit Hilfe eines mehrstufigen Impaktors großfraktioniert ultrafeine Partikel für die Analyse auf Polycarbonat- beziehungsweise Aluminiumfolien. Diese Folien werden einzeln untersucht, um spezifische Informationen zur Zusammensetzung separater Größenfraktionen zu erhalten.

In Kooperation mit renommierten Universitäten und Instituten wird versucht, hochspezialisierte Analysemethoden für detaillierte Quellenanalyse einzusetzen - also der Zuweisung von UFP zu bestimmten Emissionsereignissen oder Verursachern. Diese Informationen sind wichtig für die Bewertung der Wirkung ultrafeiner Partikel.

glossar

UFP (ultrafeine Partikel)

Bezeichnet die Feinstaubfraktion mit einer Partikelgröße kleiner 100 nm (1 Nanometer = 1 Millionstel Millimeter). UFP sind von besonderem Interesse, da sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Partikeln ändern, je kleiner sie sind. Dabei ist v. a. der Entstehungsprozess für deren chemischen Zusammensetzung entscheidend.



Abbildung 1: Impaktoreinheit mit Computereinheit und Elektromerleiaste. Die Bodenplatte wird mit den einzelnen Impaktorstufen in den Mantel und mit der Chargeinheit eingesetzt.



Abbildung 2: Bauteile der einzelnen Impaktorstufen. Links: Düsenplatten mit unterschiedlicher Bohrung, Isolationsringe (Bege) mit Ringsätzen und Folienhalterungen (rechts unten).

Weiterführende Informationen

Links

- [Ultrafeine Partikel im Bereich der Luftreinhaltung](#)
- [Luftqualität: Werte und Trends](#)
- [Nanopartikel in der Umwelt](#)
- [Ultrafeinstaub](#)
- [Ansätze zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel aus dem Verkehr](#)

7.3 Fachtagung

Luftqualität - Ultrafeine Partikel

Donnerstag, 25. November 2021

Online-Veranstaltung mit Webex

Zum Thema

Was sind UFP?

UFP bzw. Ultrafeine Partikel (ultra fine particles) sind Feinstäube mit einem Durchmesser von unter 100 Nanometer (nm). Im Gegensatz zu Feinstäuben mit größerem Durchmesser steht die UFP-Umweltforschung noch am Anfang ihrer Entwicklung. Das Bayerische Landesamt für Umwelt bietet mit dieser Fachtagung zu UFP die Möglichkeit, sich über den aktuellen Wissens- und Bewertungsstand zu informieren. Dabei stehen folgende Themen im Fokus:

Welche bisherigen und neuen Erkenntnisse sind vorhanden?

Welche methodischen Weiterentwicklungen gibt es, inklusive möglicher Monitoring-Strategien?

Welche Quellen und generellen Auswirkungen haben UFP? Welche Handlungsoptionen bieten sich?

Aufbau von UFP-Messstationen in Bayern

Aufgrund der wachsenden Bedeutung ultrafeiner Partikel, hat das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) mit Unterstützung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) in Augsburg, München und Regensburg eigene UFP-Messstationen errichtet. In Zusammenarbeit mit Wissenschaft und Forschung entwickelt und erweitert das Landesamt seine Kompetenz und Kenntnisse im Umgang mit diesen vermutlich gesundheitsrelevanten Partikeln und wird damit seiner gesellschaftlichen Verantwortung gerecht.

Programm

Uhrzeit	Programmpunkt
09:00	Begrüßung Grußwort (Videobotschaft) Thorsten Glauber MdL Bayerischer Staatsminister für Umwelt und Verbraucherschutz
	Umweltrelevanz Moderation LMR Peter Frei, StMUV
09:15	UFP – Quellen, Transportprozesse, Entstehung Prof. Dr. Mira Pöhlker, TROPOS Leipzig
10:00	Das GUAN-Netzwerk – wo stehen wir? Prof. Dr. Alfred Wiedensohler, TROPOS Leipzig
10:30	Brauchen wir Regelungen für UFP? Dr. Bryan Hellack, Umweltbundesamt
11:00	Kaffeepause
	UFP-Messungen Moderation Dr. Roland Fischer, LfU
11:15	Einfluss lokaler Quellen Esther Giemsa, Universität Augsburg
11:45	UFP-Messungen im Umfeld eines Flughafens Prof. Dr. Anke Nölscher, Universität Bayreuth
12:15	Mittagspause
	Chemische Charakterisierung Moderation Dr. Werner Reifenhäuser, LfU
13:00	Möglichkeiten und Grenzen der chemischen Charakterisierung von UFP Prof. Dr. Ralf Zimmermann, Universität Rostock
13:15	Charakterisierung von UFP aus Verbrennungsprozessen Prof. Dr. Christoph Haisch, TU München
	Gesundheitliche Wirkung Moderation Prof. Dr. Hans Drexler, Universität Erlangen
14:15	Aktueller Stand der UFP Risikoforschung PD Dr. Stefan Karrasch, LMU München
15:00	Epidemiologie des Ultrafeinstaubes Prof. Dr. Annette Peters, Helmholtz Zentrum München
15:30	Kaffeepause
	UFP Strategie Bayern Moderation LMR Peter Frei, StMUV
15:45	UFP - Messungen in Bayern Dr. Roland Fischer, LfU
16:10	Umsetzung der UFP Strategie Bayern Dr. Reinhard Zeitler, StMUV
16:30	Abschlussdiskussion, Ende der Veranstaltung