

Ultrafeine Partikel in der Umgebungsluft – Aktueller Wissensstand

Ultrafine particles in ambient air – current state of knowledge

ZUSAMMENFASSUNG

Ultrafeine Partikel (UFP) sind in den letzten Jahren zu einem häufig diskutierten Thema in der Luftreinhaltung geworden. Auch das Umweltbundesamt (UBA) erreichen aus Politik, Fachkreisen und der allgemeinen Öffentlichkeit zunehmend Fragen bezüglich der Bedeutung von UFP für Umwelt und Gesundheit. Der Artikel gibt einen Überblick zum aktuellen Stand des Wissens. Ausgehend von der Definition der UFP werden die Möglichkeiten ihrer Messung sowie die bislang nur eingeschränkt aussagekräftigen Erkenntnisse bezüglich ihrer gesundheitlichen Auswirkungen erläutert.

WOLFRAM BIRMILI,
KATRIN SÜRING,
KERSTIN BECKER,
HOLGER GERWIG,
KATHRIN SCHWIRN,
GUNTER LÖSCHAU,
DIETRICH PLASS,
MYRIAM TOBOLLIK

ABSTRACT

In recent years, ultrafine particles (UFP) have moved into the focus of discussions about air quality control. The German Environment Agency (UBA) increasingly receives requests from politics, experts, and the general public concerning the relevance of UFPs for the environment and health. This article summarizes the current state of knowledge, describing the definition of UFPs, the methods to measure them, as well as the relatively limited results concerning their health effects.

ULTRAFEINE PARTIKEL UND NANOMATERIALIEN

Als ultrafeine Partikel (UFP) beziehungsweise Ultrafeinstaub werden nach der gängigsten Definition luftgetragene Partikel mit einem Durchmesser zwischen 1 und 100 Nanometer (nm) bezeichnet (DIN 2006; ISO 2007; VDI 2009; EPA 2004). UFP bezeichnet die ultrafeine Teilfraktion der feinen Partikel, wobei sich letztere meist auf den Größenbereich < 1 Mikrometer, das heißt 1.000 nm beziehen. Dem Sprachgebrauch nach handelt es sich bei UFP um die vom Menschen unbeabsichtigt beziehungsweise die in der Atmosphäre natürlich erzeugten Partikel im Größenbereich < 100 nm. UFP sind demnach auch ein Teil des atmosphärischen Aerosols, welches per Definition aus dem Trägergas (Luft) und den darin befindlichen Partikeln

besteht. Die Schwelle von 100 nm für UFP wird dadurch motiviert, dass sich bei kleineren Partikeln aufgrund der Annäherung an molekulare und atomare Dimensionen die physikalischen und chemischen Eigenschaften zu ändern beginnen. Eine eindeutige wissenschaftliche Begründung für die Festlegung der Schwelle von 100 nm gibt es bislang jedoch nicht (EU 2011).

Daneben steht auch der Begriff Nanomaterial, oder umgangssprachlich auch „Nanopartikel“, der sich auf dieselbe Größendefinition (1–100 nm) wie für die UFP bezieht (ISO 2015; EU 2011). Im Gegensatz zu UFP betrachtet man bei Nanomaterialien meist technisch hergestellte Partikel mit besonderen, erwünschten Materialeigenschaften. Nanomaterialien sind ein wichtiges Thema im Umfeld industrieller Arbeitsplätze, aber auch für die allgemeine Exposition des Men-

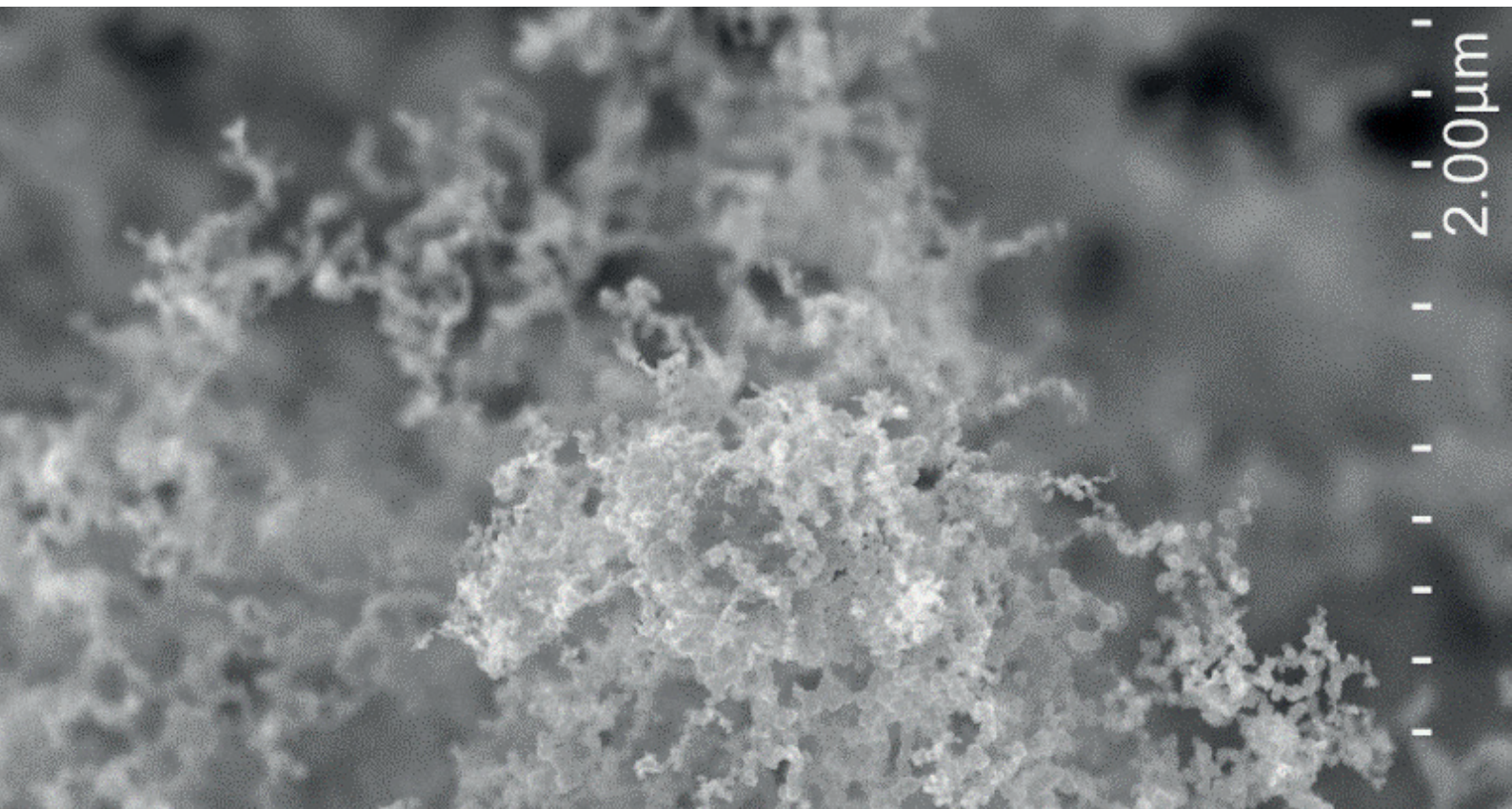


FOTO
Rußagglomerate, aufgebaut aus ultrafeinen Rußpartikeln.
Quelle: N. Dziurawitz, C. Thim, BAuA.

schen bei der alltäglichen Nutzung von zum Beispiel Kosmetika, die Nanomaterialien enthalten können.

MESSVERFAHREN FÜR ULTRAFEINE PARTIKEL

Aufgrund ihrer geringen Größe und Masse sind gravimetrische oder optische Messverfahren, welche für größere Fraktionen des Feinstaubes gängig sind, für die Messung von UFP ungeeignet. Die wichtigsten standardisierten Methoden zur Erfassung und Messung der Anzahlkonzentration von UFP in Luft sind partikelzählende Verfahren (VDI 2008) und die Größenklassifizierung anhand der elektrischen Mobilität (VDI 2012). Die Messung einer Partikelanzahlgrößenverteilung ermöglicht eine genaue Zuordnung der Partikelgrößen und die rechnerische Bestimmung einer UFP-Anzahlkonzentration

über beliebige Partikelgrößenintervalle. Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometer weisen eine Messunsicherheit bis zu etwa 10 Prozent im Bereich der Partikelanzahlkonzentration und bis auf wenige Prozent im Bereich des bestimmten Partikeldurchmessers auf (Wiedensohler et al. 2017). Unterhalb 10 nm treten beim jetzigen Stand der Technik größere Unsicherheiten auf. Ein Dauerbetrieb von Mobilitäts-Partikelgrößenspektrometern im Rahmen der Luftüberwachung erfordert regelmäßige Wartungen und Kalibrierungen unter Einsatz geschulten Personals. Zunehmend findet man kostengünstige mobile Messinstrumente, welche die Partikelanzahlkonzentration auf Basis einer Ionenstrommessung abschätzen, die jedoch mit einer verminderten Genauigkeit im Vergleich zu Kondensationspartikelzählern einhergeht (Asbach et al. 2017). Jenseits der genannten Echtzeit-Messinstrumente ist es prinzipiell möglich, wenn auch mit höhe-

rem technischem Aufwand verbunden, UFP chemisch zu untersuchen beziehungsweise elektronenmikroskopische Abbildungen anzufertigen.

VORKOMMEN VON ULTRAFEINEN PARTIKELN IN DER UMWELT

Generell liegen zu UFP weitaus weniger Messdaten aus der Umwelt vor als beispielsweise für die gesetzlich regulierten gasförmigen Schadstoffe und Feinstaubfraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$ (Kumar et al. 2014). Im Rahmen des deutschen Messnetzes für ultrafeine Aerosolpartikel (GUAN – German Ultrafine Aerosol Network) führen mehrere wissenschaftliche Institutionen und Behörden seit einigen Jahren in Deutschland Langzeitbeobachtungen von UFP durch (TROPOS 2018). Zu den gemessenen Parametern gehören die Partikelanzahlgrößenverteilung sowie die Massenkonzentration an Rußpartikeln. Insgesamt sind 17 über Deutschland verteilte Messstationen beteiligt (Birmili et al. 2015, 2016). Zwischen verkehrsnahen, städtischen und ländlichen Messstationen gibt es eine deutliche und konsistente Abnahme bezüglich der Anzahlkonzentration der UFP (ABBILDUNG 1). Der Langzeitmittelwert der UFP-Anzahlkonzentration reicht von Hintergrundwerten um 1.000 Partikel pro Kubikzentimeter (cm^3) an Bergstationen bis in den Bereich von 10.000 Partikeln pro cm^3 an verkehrsnahen Messstellen.

Beim Vergleich verschiedener Messergebnisse muss in jedem Fall beachtet werden, auf welches Partikelgrößenintervall sich eine Messung bezieht. Diese besteht aus einer unteren sowie einer oberen Nachweis-schwelle. In ABBILDUNG 1 sind dies zum Beispiel 20 bis 100 nm. Viele Studien berichten eine Partikelgesamtkonzentration, die auch Partikel > 100 nm mit einschließt.

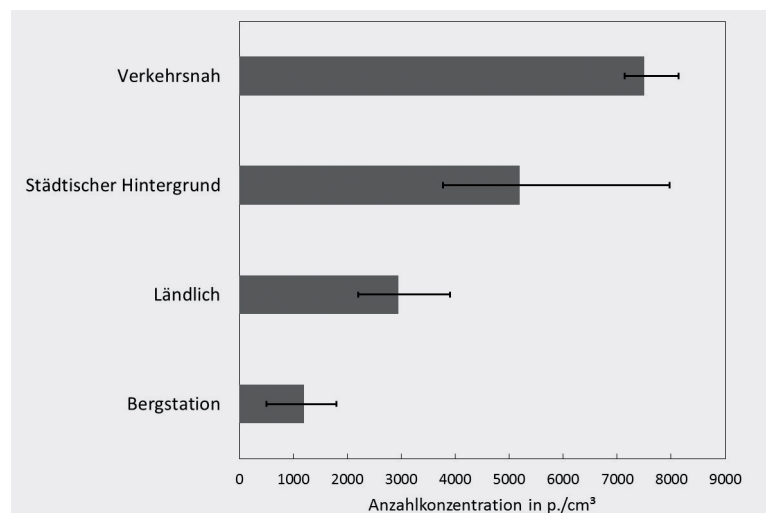
Trendanalysen der letzten Jahre zeigen eine Abnahme der Anzahlkonzentration der UFP in deutschen Städten (Löschau et al. 2017; Birmili et al. 2015). Dies wird als Ergebnis der

generellen Erneuerung der Fahrzeugflotte sowie zusätzlicher emissionsmindernder Maßnahmen, wie zum Beispiel den vermehrten Einsatz von Dieselpartikelfiltern, gedeutet.

QUELLEN VON ULTRAFEINEN PARTIKELN

Generell erzeugen alle unvollständigen Verbrennungsprozesse UFP. Hierbei handelt es sich meist um Rußpartikel, die einen Kern aus elementarem Kohlenstoff besitzen. Zu den wichtigsten Quellen von Rußpartikeln gehören Dieselmotoren (Burtscher 2005). Erhöhte UFP-Konzentrationen in der Außenluft gehen zumeist zurück auf Emissionen aus dem Verkehrssektor (Kfz-, Flug-, Schiffs- und Eisenbahnverkehr), den Energiesektor (Kraftwerke) und Industrieanlagen. Aber auch private Festbrennstoffheizungen, Biomasseverbrennung sowie Waldbrände und Feuerwerk erzeugen UFP. Des Weiteren entstehen UFP durch die Kondensation unver-

ABBILDUNG 1
Langjährige Mittelwerte der Anzahlkonzentration von ultrafeinen Partikeln in der Außenluft.



Die Darstellung berücksichtigt Mittelwerte von 2009 bis 2014 an 17 Messstellen in Deutschland (Birmili et al. 2015). Der Bereich der UFP bezieht sich auf den Größenbereich 20–100 nm. Die grauen Balken bezeichnen die Mittelwerte über die vier Stationstypen verkehrsnah (3 Messstellen), städtischer Hintergrund (7 Messstellen), ländlich (4 Messstellen) und Bergstationen (3 Messstellen), die Antennen den Maximalbereich der auftretenden Stationsmittelwerte.

brannter Treibstoffreste in den sich abkühlenden Abgasen.

Auch in der Atmosphäre selbst werden UFP gebildet, und zwar durch die Nukleation von Gasmolekülen, welche aus photochemischen Reaktionen unter dem Einfluss intensiver Sonneneinstrahlung stammen (Größ et al. 2018). Aufgrund ihrer unterschiedlichen Zeitverläufe und Partikelgrößenverteilungen lassen sich die Partikel aus Verbrennungsprozessen und aus der photochemischen Neubildung an städtischen Messstationen bezüglich ihrer Beiträge auf die UFP-Anzahlkonzentration zu einem gewissen Grad auseinanderhalten (Ma, Birmili 2015).

Auch im Innenraum sind UFP-Quellen zu finden: Verbrennungsprozesse wie Kerzenabbrand, Kaminfeuer, Ethanolöfen sowie heiße Oberflächen (Kochen, Backen, Toasten), Heimwerkerarbeiten (Löten, Kleben) und der Betrieb elektrischer Geräte (Fön, Laserdrucker, 3D-Drucker) führen nachweislich zur Freisetzung hoher Anzahlkonzentrationen von UFP. Hinzu kommen Reinigungsprozesse (Staubsaugen ohne HEPA-Filter, Anwendung von Sprühreinigern) sowie das Rauchen von Tabak, E-Zigaretten und Tabak-Ersatzprodukten. Einen Überblick über die Schadstoffquellen im Innenraum liefert Birmili et al. (2018).

Aufgrund der relativ schnell ablaufenden dynamischen Prozesse wie Koagulation und Diffusion zählt man die UFP zu der Gruppe der kurzlebigen Schadstoffe. Konzentrationen der UFP in Luft weisen häufig eine starke räumliche und zeitliche Variabilität auf, welche die Bestimmung einer mittleren und repräsentativen Konzentration erschwert.

GESUNDHEITSRELEVANZ ULTRAFEINER PARTIKEL

Die Aufnahme von Feinstaubpartikeln über die Atemwege kann negative gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen haben. Generell gilt: Je kleiner die Partikel sind, umso tiefer können sie in die Atemwege eindringen und umso geringer wird die Wahr-

scheinlichkeit, dass sie durch Abatmen die Atemwege wieder verlassen.

Ultrafeinstaub dringt in tiefe Zellebenen der Lunge vor, die sogenannte alveolare Region. Die UFP werden von Makrophagen, den natürlichen Reinigungszellen des Immunsystems, nicht immer erkannt und können so in die Lungenzellen, in das Blut oder das lymphatische System übergehen. Dadurch können sie systemische oder kardiovaskuläre Effekte erzeugen und andere Organe erreichen. UFP können dann zu oxidativem Stress und Entzündungen in den betroffenen Geweben bis hin zum Zelltod führen (Habre et al. 2018). Langfristig können sich Atemwegs- oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen entwickeln. Auch epigenetische Wirkungen, also Wirkungen, die zum Beispiel die Genregulation betreffen, sind möglich (Traboulsi et al. 2017).

Wenn die Partikel nicht wieder ausgeatmet werden, können sie sich auch in der Lunge ansammeln und dort für lange Zeit verbleiben. Dabei ist besonders zu bedenken, dass ultrafeine Partikel im Verhältnis zu ihrer Masse eine sehr große Oberfläche haben. Damit geht einher, dass größere Anteile an Schadstoffen wie Metalle oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe an den Partikeln haften können. In der Folge bedeutet dies, dass ultrafeine Partikel pro Masseneinheit toxischer wirken können als größere Partikel (HEI 2013). Andere Autoren argumentieren, dass die Oberfläche biopersistenter Partikel ein wichtiges Maß für die Gesundheitsrelevanz inhalierter Feinstäube sein könnte (Schmid, Stöger 2015). Biopersistente Partikel bezeichnen die Fraktion der im Körper schlecht löslichen und somit dort länger verbleibenden Partikel. Die an der Oberfläche zum Beispiel von Rußpartikeln anhaftenden Toxine stellen die für den Organismus hauptsächlich schädlichen Substanzen aus diesen Partikeln dar.

ERKENNTNISSE ZUR GESUNDHEITLICHEN WIRKUNG

In vielen epidemiologischen Studien, das sind bevölkerungsbezogene Beobachtungsstudien, wurden signifikante Zusammenhänge zwischen der Morbidität sowie der Mortalität und der Feinstaubbelastung (PM_{2,5} und PM₁₀) aufgezeigt (z. B. Rückerl et al. 2011). In etlichen Studien ergeben sich auch Hinweise darauf, dass Feinstaub für Krankheiten wie Asthma, die chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD), Diabetes, neurodegenerative Erkrankungen und Lungenkrebs eine Rolle spielen könnte. UFP sind per Definition auch Bestandteil der Feinstaubfraktionen PM_{2,5} und PM₁₀, sodass Ergebnisse bezüglich dieser Fraktionen auch Effekte des Ultrafeinstaubes durchaus mit einschließen. Die Frage, ob möglicherweise gerade die UFP-Fraktion für die beschriebenen Effekte verantwortlich ist oder darüber hinausgehende eigenständige Wirkungen aufweist, ist allerdings noch weitestgehend ungeklärt. Aufgrund dieser Einschränkung können die Zusammenhänge zwischen PM_{2,5} und PM₁₀ und den gesundheitlichen Effekten nicht direkt auf UFP übertragen werden.

Klinische Versuche können Kurzzeitwirkungen von UFP auf den Menschen abbilden. Hierbei wurden Effekte wie Lungenfunktionsstörungen, lokale Entzündungen, aber auch Herz-Kreislauf-Effekte beschrieben. Vom Versuchsaufbau her kann man zwischen Kammerversuchen und Versuchen in der natürlichen Umwelt unterscheiden. Allerdings sind beide Varianten mit Schwierigkeiten behaftet: Bei Kammerversuchen verbietet es sich aus ethischer Sicht, Probanden sehr hohen Konzentrationen auszusetzen oder empfindliche Menschen zu exponieren. Speziell bei den UFP ist es zudem technisch schwierig, eine exakte Partikelanzahlkonzentration in der Kammer einzustellen.

Bei Versuchen in der natürlichen Umwelt ist es generell schwierig, gesundheitliche Effekte nur auf UFP zurückzuführen. Werden gesundheitliche Effekte zum Beispiel nach

dem Aufenthalt im Straßenverkehr untersucht, ist es problematisch, die Effekte der UFP von anderen Schadstoffen abzugrenzen oder auch die Effekte einzelnen Staubfraktionen zuzuordnen (HEI 2013; Baldauf et al. 2016).

Zwar ist der Straßenverkehr eine bedeutende, jedoch nicht die einzige Quelle für UFP in der Außenluft. Auch der Flugverkehr trägt durch das Starten und Landen von Flugzeugen bekanntermaßen deutlich zu den Konzentrationen von UFP in der Nähe von Flughäfen bei (Hudda et al. 2014). Eine Pilotstudie in Los Angeles ergab, dass Spaziergänge in der Windfahne des Flughafens bei erwachsenen Personen mit Asthma zu signifikant erhöhten Entzündungsparametern führten. Die Lungenfunktion hingegen blieb unbeeinträchtigt (Habre et al. 2018). Die Erkenntnisse aus epidemiologischen Studien, die in anderen Settings, etwa dem Straßenverkehr, durchgeführt wurden, können jedoch nicht direkt auf den Flugverkehr übertragen werden, da die aus Triebwerken ausgestoßenen Partikel möglicherweise eine andere Zusammensetzung als die in Städten gemessenen Partikel und damit eine andere Toxizität und somit gesundheitliche Wirkung aufweisen. Eine abschließende Beurteilung ist somit bislang nicht möglich.

SCHWIERIGKEITEN BEI DER ABLEITUNG VON GRENZ- ODER RICHTWERTEN

Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es weder einen Richt- noch einen Grenzwert für UFP. Dies liegt vor allem daran, dass zum Zeitpunkt der Entwicklung und der letzten Aktualisierung der Luftqualitätsrichtlinien (engl. Air Quality Guidelines) seitens der Weltgesundheitsorganisation (WHO) im Jahr 2005 nur wenige Studien identifiziert werden konnten, die erste Hinweise zu Kurzzeiteffekten liefern (WHO 2006). Die Evidenz, also die wissenschaftliche Gewissheit, für einen Zusammenhang zwischen UFP-Exposition und gesundheitlichen Auswirkungen

gen aus umweltepidemiologischen Studien hat demnach nicht in ausreichendem Maße vorgelegen, um quantitative Aussagen über Richtwerte zum Schutz der Gesundheit vornehmen zu können. Insbesondere für potenzielle Langzeitwirkungen konnten zum damaligen Zeitpunkt keine umweltepidemiologischen Langzeit-Beobachtungsstudien identifiziert werden. Derzeit befinden sich die Luftqualitätsrichtlinien der WHO in einem Aktualisierungsprozess. Dabei wird erneut überprüft, ob nach derzeitigem Stand der Wissenschaft Empfehlungen für die Regulierung der UFP zum Schutz der Gesundheit ausgesprochen werden können.

Erst nach der Festlegung solcher Richtwerte mit Empfehlungscharakter seitens der WHO kann eine EU-weite Abstimmung zur Einführung von möglichen Grenzwerten angestoßen werden. Derzeit bestehen für die Außenluft EU-weit geltende Grenzwerte für die Feinstaubpartikel der Größenordnungen PM_{10} und $PM_{2,5}$. Hierbei sind die EU-Grenzwerte weniger streng formuliert als die Empfehlungen der WHO. Für den Innenraum bestehen generell keine Grenzwerte für Feinstaub oder andere Luftschadstoffe, weil der Innenraum gesetzlich als Privatsphäre klassifiziert ist. Beim Feinstaub wurde lediglich für die Feinstaubfraktion ($PM_{2,5}$) ein Leitwert vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte festgelegt ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als 24-Stunden Mittelwert; AIR 2018).

Bei der Betrachtung von negativen gesundheitlichen Wirkungen auf den Menschen wurde bei Feinstäuben in den letzten Jahrzehnten ein starker Fokus auf die Erforschung der Wirkung von Feinstäuben der Fraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$ gelegt. Die Entwicklung und Standardisierung der Messverfahren führte weltweit zu einer verbesserten Abdeckung mit Messstationen. UFP befinden sich im Vergleich dazu noch nicht so lange im Fokus der umweltepidemiologischen Forschung zur Gesundheit. Deshalb sind sowohl die Daten zur Immission als auch zur Exposition der Bevölkerung gegenüber UFP nicht in ausreichender Menge und standardisierter Qualität vorhanden. Dies

führt dazu, dass die für umweltepidemiologische Studien notwendigen Informationen zur Belastung gegenüber Ultrafeinstaub nur begrenzt vorliegen. Dies wiederum erschwert die Ableitung von Grenzwerten.

Umgekehrt führen fehlende Grenzwerte dazu, dass nur wenige Expositionsdaten routinemäßig erhoben werden. Derzeit würde es sich daher anbieten, bei einer Überarbeitung der EU-Luftqualitätsrichtlinie zunächst eine Monitoringverpflichtung für Partikelanzahlkonzentrationen festzulegen. Durch gesetzliche Vorgaben sollte sich zum einen die Datengrundlage wesentlich verbessern, außerdem würde dies zum anderen auch Aktivitäten im Bereich der Standardisierung der Messungen vorantreiben.

AKTUELLE ENTWICKLUNG

Die Anzahl und Qualität umweltepidemiologischer Untersuchungen zu den gesundheitlichen Effekten der UFP nimmt in den letzten Jahren stetig zu. Einige Übersichtsarbeiten haben den Wissensstand der letzten Jahre zusammengefasst (Rückerl 2011; Salomon 2012; HEI 2013).

Im Rahmen eines Sachverständigengutachtens für das Umweltbundesamt hat das Universitätsklinikum Düsseldorf unter der Leitung von Prof. Barbara Hoffmann eine systematische Literaturübersichtsarbeit durchgeführt (UBA 2018). In diesem Gutachten wird der aktuelle Stand der Erkenntnisse zu den gesundheitlichen Auswirkungen von UFP erfasst und die Qualität der identifizierten Studien bewertet. Im Fokus standen dabei ausschließlich epidemiologische Beobachtungsstudien. Toxikologische Untersuchungen wurden nicht berücksichtigt.

Durch die systematische Literaturrecherche wurden 85 relevante Studien ermittelt, von denen 75 Kurzzeiteffekte und 10 Langzeiteffekte betrachteten. Als problematisch stellte sich jedoch heraus, dass nur in einer der Langzeitstudien in den verwendeten Modellen für die Effekte andere Schadstoffe adjustiert wurden. In einer der

Langzeitstudien wurden Effekte auf die Mortalität untersucht, in vier Studien war die Morbidität der betrachtete Endpunkt und die restlichen fünf Studien fokussierten subklinische Endpunkte.

Das Gutachten schlussfolgert, dass trotz der Tatsache, dass seit der letzten Übersichtsarbeit des Health Effects Institutes viele Studien veröffentlicht und damit zahlreiche Hinweise auf Zusammenhänge zwischen einer UFP-Exposition und gesundheitlichen Effekten geliefert worden sind, die Studienlage immer noch keine konsistente Aussage über gesundheitliche Effekte von UFP erlaubt. Zudem gibt es derzeit nicht ausreichend Studien, welche die für die Berechnung notwendigen Modelle für weitere Luftschadstoffe wie Stickstoffdioxid (NO₂) oder größere Feinstaubpartikel (PM₁₀, PM_{2,5}) anpassen, wodurch der eigenständige Effekt der UFP über- oder unterschätzt werden kann. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass immer noch nicht-standardisierte Messtechnik zur Bestimmung der UFP-Exposition eingesetzt wird, was eine direkte Vergleichbarkeit der Studien unmöglich macht. Die Autorinnen und Autoren weisen auch darauf hin, dass mehr umwelt-epidemiologische Langzeitstudien unter Einsatz moderner sowie standardisierter Messmethoden benötigt werden.

FAZIT

Saubere Luft ist eine zentrale Voraussetzung für ein gesundes Leben. Je genauer und verlässlicher Messgeräte und Messtechnik werden, desto besser können wir die Luft auf die darin enthaltenen Schadstoffe untersuchen. UFP sind besonders kleine Partikel, die aufgrund ihrer geringen Größe leicht inhalierbar sind und natürliche Abwehrmechanismen des Körpers übergehen können. Zu den Risikofaktoren gehören die an den Oberflächen kleiner Rußpartikel anhaftenden Toxine, die durch das relativ große Oberfläche/Masse-Verhältnis der UFP besonders wirksam werden. Da die Messtechnik der

UFP erst in den letzten Jahren zunehmend standardisiert wurde, gibt es erst seit relativ kurzer Zeit belastbare Studienergebnisse. Informationen zur chemischen Zusammensetzung der UFP, die eine Voraussetzung zur besseren Ermittlung von Gesundheitseffekten wären, sind bislang kaum vorhanden. Insgesamt gibt es nur wenige umweltmedizinische beziehungsweise umwelt-epidemiologische Studien, welche die gesundheitlichen Effekte von UFP in ausreichendem Maß untersucht haben, weil entsprechende Studien logistisch und planerisch aufwendig sind. UFP treten nahezu immer gemeinsam mit anderen Luftschadstoffen auf, und eine statistische Trennung der entsprechenden Wirkungen hängt kritisch von der Qualität und vom Umfang der zugrundeliegenden Daten ab. Diese Aspekte führen zu den bestehenden Unsicherheiten und erschweren daher die Bewertung der gesundheitlichen Wirkung von UFP. Zur besseren Beurteilung der gesundheitlichen Wirkung insbesondere auch mit Hinblick auf die Ableitung von Grenz- und Richtwerten wären weitere umwelt-epidemiologische Langzeitstudien, die ein großes Spektrum an Luftschadstoffen und deren Wechselwirkungen berücksichtigen, notwendig. Mithilfe dieser könnte die langfristige, gegebenenfalls eigenständige Wirkung von UFP dargelegt werden und würde so eine Regulierung ermöglichen.

Die derzeitige Studienlage lässt dies aufgrund der uneinheitlichen Ergebnisse jedoch nicht zu. Das Umweltbundesamt wird die hier dargelegten Informationen als „Antworten auf häufig gestellte Fragen“ (FAQs) auf seiner Webseite www.umweltbundesamt.de veröffentlichen. Diese Inhalte werden aktualisiert, sobald neue Erkenntnisse zu Messungen beziehungsweise den Gesundheitswirkungen der UFP vorliegen. ●

LITERATUR

- AIR – Ausschuss für Innenraumrichtwerte (vormals Ad-hoc-Arbeitsgruppe) (2018): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheitskommissionen-arbeitsgruppen/ausschuss-fuer-innenraumrichtwerte-vormals-ad-hoc> (Zugriff am: 01.09.2018).
- Asbach C, Alexander C, Clavaguera S et al. (2017): Review of measurement techniques and methods for assessing personal exposure to airborne nanomaterials in workplaces. *Science of the Total Environment* 603/604: 793–806.
- Baldauf RW, Devlin RB, Gehr P et al. (2016): Ultrafine particle metrics and research considerations: review of the 2015 UFP Workshop. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13: 1054.
- Birmili W, Kolossa-Gehring M, Valtanen K et al. (2018): Schadstoffe im Innenraum – aktuelle Handlungsfelder. *Bundesgesundheitsblatt* 61: 656–666.
- Birmili W, Weinhold K, Rasch F et al. (2016): Long-term observations of tropospheric particle number size distributions and equivalent black carbon mass concentrations in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). *Earth System Science Data* 8: 355–382.
- Birmili W, Sun J, Weinhold K et al. (2015): Atmospheric aerosol measurements in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN) - Part III: Black Carbon mass and particle number concentrations 2009–2014. *Gefahrstoffe Reinhaltung Luft* 75(11/12): 479–488.
- Burtscher H (2005): Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review. *Journal of Aerosol Science* 36(7): 896–932.
- DIN (2006): DIN EN ISO 14644-3: Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche, Teil 3.
- EU – European Commission (2011): Recommendation on the definition of a nanomaterial (2011/696/EU). http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/faq/definition_en.htm (Zugriff am: 01.09.2018).
- Größ J, Hamed A, Sonntag A et al. (2018): Atmospheric new particle formation at the research station Melpitz, Germany: connection with gaseous precursors and meteorological parameters. *Atmospheric Chemistry Physics* 18: 1835–1861.
- Habre R, Zhou H, Eckel SP et al. (2018): Short-term effects of airport-associated ultrafine particle exposure on lung function and inflammation in adults with asthma. *Environment International* 118: 48–59.
- HEI – Health Effects Institute (2013): Understanding the health effects of ambient ultrafine particles. HEI Perspectives 3, Health Effects Institute, Boston, Massachusetts, USA.
- Hudda N, Gould T, Hartin K et al. (2014): Emissions from an international airport increase particle number concentrations 4-fold at 10 km downwind. *Environmental Science and Technology* 48: 6628e6635.
- ISO (2015): ISO/TS 80004-1: Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core terms.
- ISO (2007): ISO/TR 27628: Workplace atmospheres - Ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosols - Inhalation exposure characterization and assessment.
- Kumar P, Morawska L, Birmili W et al. (2014): Ultrafine particles in cities. *Environment International* 66: 1–10.
- Löschau G, Hausmann A, Wolf U et al. (2017): Umweltzone Leipzig – Abschlussbericht. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/29757> (Zugriff am: 01.09.2018).
- Ma N, Birmili W (2015): Estimating the contribution of photochemical particle formation to ultrafine particle number averages in an urban atmosphere. *Science of the Total Environment* 512: 154–166.
- Rückerl R, Schneider A, Breitner S et al. (2011): Health Effects of Particulate Air Pollution – A Review of Epidemiological Evidence. *Inhalation Toxicology* 23(10): 555–592.
- Schmid O, Stoeger T (2016): Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung. *Journal of Aerosol Science* 99: 133–143.
- Solomon PA (2012): An Overview of Ultrafine Particles in Ambient Air. *Journal of the Air and Waste Management Association*, Pittsburgh, PA, May 2012: 18–27.
- Traboulsi H, Guerrina N, Lu M et al. (2017): Inhaled pollutants: The molecular scene behind respiratory and systemic diseases associated with ultrafine particulate matter. *International Journal of Molecular Sciences* 18: 243.
- TROPOS – Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (2018): The German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). Partners, scientific co-operation, publications, measurement data, measurement sites, instrumentation. Leipzig. <http://wiki.tropos.de/index.php/GUAN> und <https://doi.org/10.5072/guan> (Zugriff jeweils am: 01.09.2018).
- UBA – Umweltbundesamt (2018): Health effects of ultrafine particles: systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting. *Umwelt und Gesundheit* 05. Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/health-effects-of-ultrafine-particles> (Zugriff am: 11.10.2018).
- US EPA – United States Environmental Protection Agency (2004): Air Quality Criteria for Particulate Matter (Final Report), Vol. 1, Washington, DC, EPA 600/P-99/002aF-bF. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=87903> (Zugriff am: 01.09.2018).

VDI (2012): VDI Richtlinie 3867 Blatt 3: Messen von Partikeln in der Außenluft - Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen –Elektrisches Mobilitätsspektrometer.

VDI (2009): VDI Richtlinie 3867 Blatt 1: Messen von Partikeln in der Außenluft. Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen – Grundlagen.

VDI (2008): VDI Richtlinie 3867 Blatt 2: Messen von Partikeln in der Außenluft. Charakterisierung von Prüfaerosolen - Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung - Kondensationspartikelzähler (CPC).

Wiedensohler A, Wiesner A, Weinhold K et al. (2018): Mobility particle size spectrometers: Calibration procedures and measurement uncertainties. *Aerosol Science and Technology* 52: 146–164.

WHO (2000): Air quality guidelines for Europe. Second Edition. World Health Organization – Regional Office for Europe, Copenhagen. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/pre2009/air-quality-guidelines.-global-update-2005.-particulate-matter,-ozone,-nitrogen-dioxide-and-sulfur-dioxide> (Zugriff am: 01.09.2018).

KONTAKT

Dr. Wolfram Birmili
Umweltbundesamt
Fachgebiet II 1.3 "Innenraumhygiene, gesundheitsbezogene Umweltbelastungen"
Corrensplatz 1
14195 Berlin
Email: wolfram.birmili[at]uba.de

[UBA]