



**Faktenpapier**  
**Ultrafeine Partikel**

## Impressum

### Ultrafeine Partikel

#### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de/](http://www.lfu.bayern.de/)

#### Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Dr. Marina Maier, Dr. Martin Wegenke

#### Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

#### Stand:

Juni 2021

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 Wahlwerbenden 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. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.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

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Ultrafeine Partikel (UFP)</b>	<b>4</b>
<b>2 Entstehung ultrafeiner Partikel</b>	<b>5</b>
<b>3 UFP in der Außenluft in Deutschland</b>	<b>6</b>
<b>4 Gesundheitliche Wirkungen</b>	<b>7</b>
<b>5 Messverfahren</b>	<b>9</b>
<b>6 Grenzwerte</b>	<b>10</b>
<b>7 Offene Fragen</b>	<b>11</b>
<b>8 Literatur</b>	<b>12</b>

# 1 Ultrafeine Partikel (UFP)

Feste oder flüssige Schwebstoffe, die nicht schnell zu Boden sinken, sondern eine gewisse Zeit in der Luft verweilen, werden allgemein als Feinstaub bzw. Schwebstaub bezeichnet. Im Englischen wird dafür der Begriff *Particulate Matter* (PM) verwendet. Daher hat sich in der Fachliteratur die Abkürzung PM für Schwebstaubpartikel durchgesetzt. Um die Partikel zu charakterisieren, werden sie nach ihrem aerodynamischen Durchmesser in verschiedene Fraktionen eingeteilt (Abb. 1). Unter PM<sub>10</sub> versteht man alle Partikel im Größenbereich ≤ 10 µm. Eine Teilmenge der PM<sub>10</sub> sind die feineren Teilchen mit einer Größe ≤ 2,5 µm. Partikel mit einem Durchmesser von 0,1 µm (100 Nanometer) oder kleiner werden als ultrafeine Partikel (UFP) oder Ultrafeinstaub bezeichnet [1].

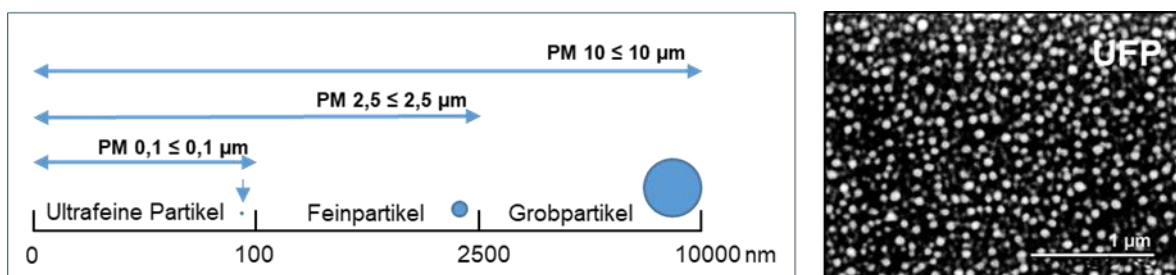


Abb. 1: Partikelfraktionen im Feinstaub (links, Skala nicht maßstabsgetreu), elektronenmikroskopische Aufnahme von ultrafeinen Partikeln (rechts)

Aufgrund ihrer geringen Größe weisen UFP eine vernachlässigbare Masse auf, tragen aber maßgeblich zur Gesamtanzahl der Teilchen in der Atmosphäre bei. UFP haben typischerweise einen Anteil von über 80 % an der Gesamtanzahl aller Partikel im Feinstaub [2]. Daher wird als Maß der UFP-Konzentration in der Regel nicht wie bei PM<sub>10</sub> bzw. PM<sub>2,5</sub> die Masse (µg/m<sup>3</sup>), sondern die Anzahl (Partikel/m<sup>3</sup>) herangezogen.

Eine weitere Bezugsgröße von UFP ist die Partikeloberfläche. Bei sehr geringer Masse haben die UFP eine extrem große reaktive Oberfläche, was die biologische und chemische Aktivität der Partikel erhöhen kann. So haben 100 nm-Partikel eine 100-fach größere Oberfläche als 10 µm-Partikel der gleichen Masse (Abb. 2).

	10 µm (Grob)	2,5 µm (Fein)	0,1 µm (Ultrafein)
<b>Gesamtmasse</b>	1	1	1
<b>Partikelanzahl</b>	1	64	1 000 000
<b>Partikeloberfläche</b>	1	0,0625	0,0001
<b>Gesamtoberfläche</b>	1	4	100

Abb. 2: Anzahl und Oberfläche von kugelförmigen Partikeln mit unterschiedlichen Durchmessern [nach 3]

## 2 Entstehung ultrafeiner Partikel

UFP können aus natürlichen Quellen sowie durch menschliche (anthropogene) Aktivitäten in die Atmosphäre gelangen (Abb. 3). Natürliche Quellen sind Vulkanausbrüche, Waldbrände und die Bodenerosion (z. B. Sahara-Sandstürme). Pflanzen setzen organische Verbindungen frei, aus denen in der Atmosphäre UFP gebildet werden können [4].

Bedeutende anthropogene Quellen sind der Verkehr (Kfz, Flugzeuge, Schiffe, Bahn) sowie Kraftwerke und Industrieanlagen. Auch Metall- und Bauindustrie sowie Landwirtschaft und private Haushalte tragen zu Partikelemissionen bzw. zur Partikelneubildung bei [5].

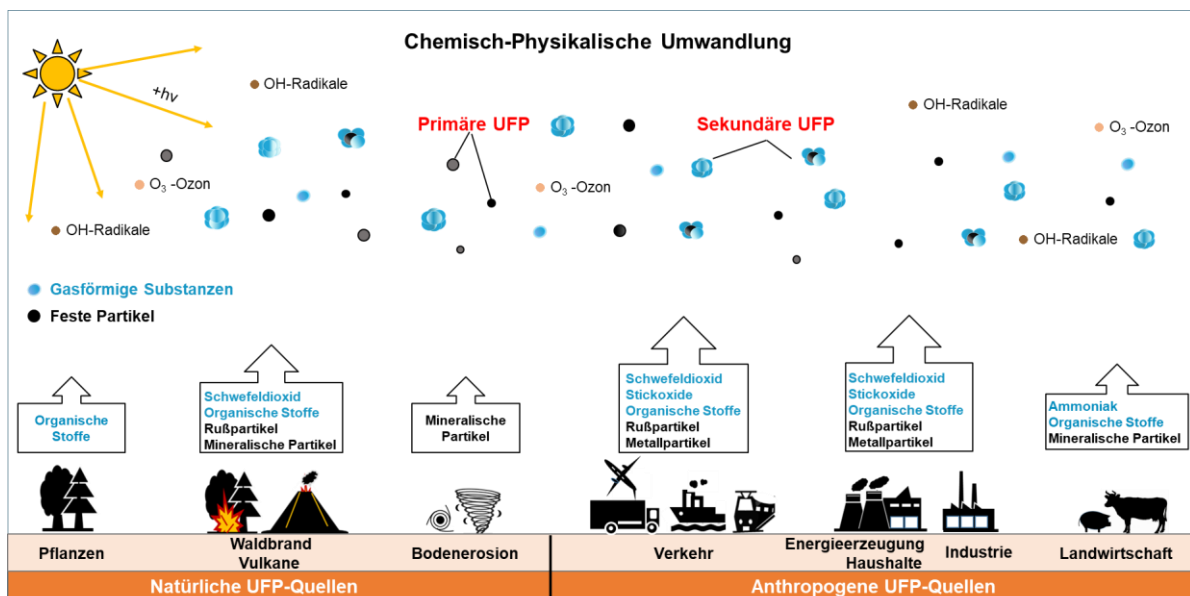


Abb. 3: Vereinfachte Darstellung der Entstehung von UFP aus natürlichen und anthropogenen Quellen

Nach der Entstehungsweise der Partikel kann zwischen primären und sekundären UFP unterschieden werden:

- Primäre UFP werden direkt als feste Teilchen in die Atmosphäre freigesetzt. Sie entstehen vor allem bei unvollständigen Verbrennungsprozessen (z. B. ultrafeine Rußpartikel aus Dieselmotoren, Flugzeugen, Kohlekraftwerken oder Vulkanen). Auch durch mechanischen Abrieb (Brems-, Reifen- oder Straßenabrieb) gelangen primäre UFP in die Umwelt.
- Sekundäre UFP werden erst in der Atmosphäre aus gasförmigen Vorläufersubstanzen wie Schwefeldioxid, Stickoxiden, Ammoniak oder leichtflüchtigen organischen Substanzen gebildet [6,7]. Durch chemische Reaktion mit OH-Radikalen oder Ozon entstehen aus den leichtflüchtigen Substanzen schwerflüchtige Verbindungen. Die Partikel entstehen entweder durch direkte Nukleation, d. h. mehrere Gasmoleküle verbinden sich durch chemische Reaktionen zu Teilchen, oder es lagern sich Gasmoleküle an bereits in der Luft vorhandene UFP an. Als Hauptquellen für Ammoniak werden landwirtschaftliche Nutzflächen und Massentierhaltungsanlagen angesehen. Schwefeldioxid entsteht hauptsächlich bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle oder Erdölprodukten. Stickoxide stammen überwiegend aus Straßenverkehr und Industrie [8,9]. Flüchtige organische Substanzen können bei verschiedenen industriellen Prozessen freigesetzt werden, sie werden aber auch natürlicherweise von Bäumen emittiert [10].

### 3 UFP in der Außenluft in Deutschland

Das Vorkommen von UFP in der Umgebungsluft wird von den Emissionsquellen der entsprechenden Region geprägt. Je nach Tageszeit, Wetterlage und Nähe des Messortes zu anthropogenen Quellen können Werte von mehr als 100 000 Partikeln/cm<sup>3</sup> erreicht werden. Daten aus mehr als 42 Städten weltweit zeigen, dass die durchschnittliche UFP-Außenluftbelastung in asiatischen Städten mit ca. 110 000 Partikeln/cm<sup>3</sup> fast viermal so groß ist wie in europäischen Städten (Mittelwert ca. 30 000 Partikel/cm<sup>3</sup>) [11].

Derzeit führen in Deutschland mehrere wissenschaftliche Institutionen und Behörden Langzeitmessungen von UFP zur Verbesserung der Datenlage durch [12]. Dabei werden die UFP-Anzahlkonzentrationen sowohl verkehrsnah als auch im städtischen und ländlichen Hintergrund erfasst [13]. Bis jetzt liegen Daten für Partikel im Größenbereich von 10 bis 100 nm vor.



Abb. 4: Standorte für UFP-Untersuchungen: Bergstation, ländlicher Hintergrund, Stadtverkehr

Die Partikelanzahl variierte zwischen 500 und 10 000 Partikeln/cm<sup>3</sup>. Die höchsten Werte wurden erwartungsgemäß an verkehrsnahen Stationen gemessen, die niedrigsten an alpinen Bergstationen [14] (Tab. 1).

Tab. 1: Mittlere UFP-Anzahlkonzentrationen (10 - 100 nm) an verschiedenen Messstandorten

Standort	Mittlere Anzahlkonzentration [Partikel/cm <sup>3</sup> ]
Verkehrsnah	8 940
Städtischer Hintergrund	5 050
Ländlicher Hintergrund	3 300
Hochgebirge	540

Tagesgänge mit einem klaren Anstieg der UFP-Anzahlkonzentrationen während der verkehrsreichen Stunden weisen auf den Kfz-Verkehr als wesentliche Quelle für UFP hin. Außerdem zeigt sich ein ausgeprägter Wochengang mit gegenüber den Werktagen deutlich niedrigeren Konzentrationen am Wochenende [15]. Der Einsatz von Dieselpartikelfiltern, Erneuerungen von Fahrzeugflotten und die Einführung der Umweltzonen in den letzten Jahren haben bereits jetzt zu einer generellen Abnahme der UFP-Anzahlkonzentrationen in deutschen Städten beigetragen [16,17].

Neben dem Straßenverkehr kommt dem Flugverkehr eine besondere Rolle als UFP-Quelle zu. Messungen an deutschen Flughäfen zeigen während der Betriebszeit mittlere UFP-Konzentrationen je nach Windrichtung zwischen ca. 13 000 und 31 000 Partikel/cm<sup>3</sup> [18]. Die durch den Flugbetrieb verursachten Emissionen können noch in bis zu 8 km Entfernung in Windrichtung zu einer deutlichen Erhöhung der UFP-Konzentration führen. Anders als bei den straßenverkehrsbezogenen Messstellen

unterscheiden sich die Tagesgänge am Wochenende und an Werktagen kaum. Die UFP-Konzentrationen steigen in den Betriebszeiten stark an und fallen in der Nacht ab.

Untersuchungen zur Freisetzung von UFP aus Kohlekraftwerken zeigen, dass in der Umgebung in 300 m Höhe Konzentrationen bis zu 60 000 Partikel/cm<sup>3</sup> erreicht werden können. Trotz Filteranlagen emittieren Kohlekraftwerke in der Summe für Deutschland mehr Ultrafeinstaub als der Verkehr [19].

Insgesamt liegen zum Vorkommen von UFP in der Außenluft derzeit noch keine ausreichenden repräsentativen Datensätze für Deutschland vor. In Bayern führte die Universität Augsburg im Auftrag des LfU und in Kooperation mit dem Helmholtz Zentrum München das Forschungsprojekt "Einfluss lokaler Quellen auf die räumliche und zeitliche Verteilung ultrafeiner Partikel" durch, um Erfahrungen mit der Messung und über die Herkunft von UFP zu sammeln [20]. Um die Datenlage zur physikalischen UFP-Charakterisierung zu verbessern, wurden zusätzliche Messstationen in Augsburg, München und Regensburg durch das LfU aufgebaut [21]. Außerdem wird derzeit geprüft, welche Messverfahren für die chemische Charakterisierung von UFP geeignet sind, da die chemische Zusammensetzung von UFP bedeutsam für die Risikoabschätzung sein könnte [22,23].

## 4 Gesundheitliche Wirkungen

Während zu den gesundheitlichen Auswirkungen von PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> relativ viele Erkenntnisse vorliegen, ist die Datenlage für UFP noch nicht ausreichend. Die meisten Erkenntnisse stammen aus Tierversuchen oder Kurzzeituntersuchungen beim Menschen. Zu den Wirkungen, die in der Wissenschaft mit UFP in Zusammenhang gebracht werden, zählen Entzündungsprozesse, oxidativer Stress, Effekte auf Atemwege und das Herz-Kreislaufsystem, neurologische Effekte sowie Wirkungen auf Fortpflanzung und Entwicklung [24]. Für die gesundheitliche Wirkung von UFP ist von wesentlicher Bedeutung, dass UFP im Verhältnis zu ihrer Masse eine sehr große Oberfläche haben. An UFP können sich daher mehr Schadstoffe anlagern als an größere Partikel mit der gleichen Masse. Das würde bedeuten, dass UFP - bezogen auf die Masse – eine höhere gesundheitliche Bedeutung haben könnten als größere Partikel [25].

Für das Verhalten von Partikeln im Atemtrakt gilt: Je kleiner Partikel sind, umso weiter können sie in die Lunge eindringen. UFP können bis zu den am Ende der Atemwege befindlichen Lungenbläschen (Alveolen) gelangen (Abb. 5). Aufgrund ihrer geringen Größe können sie - im Gegensatz zu den größeren Partikeln - den alveolären Reinigungsmechanismen entgehen, in die Blutbahn und auch in andere Organe gelangen und dort oxidativen Stress und Entzündungen hervorrufen [26].

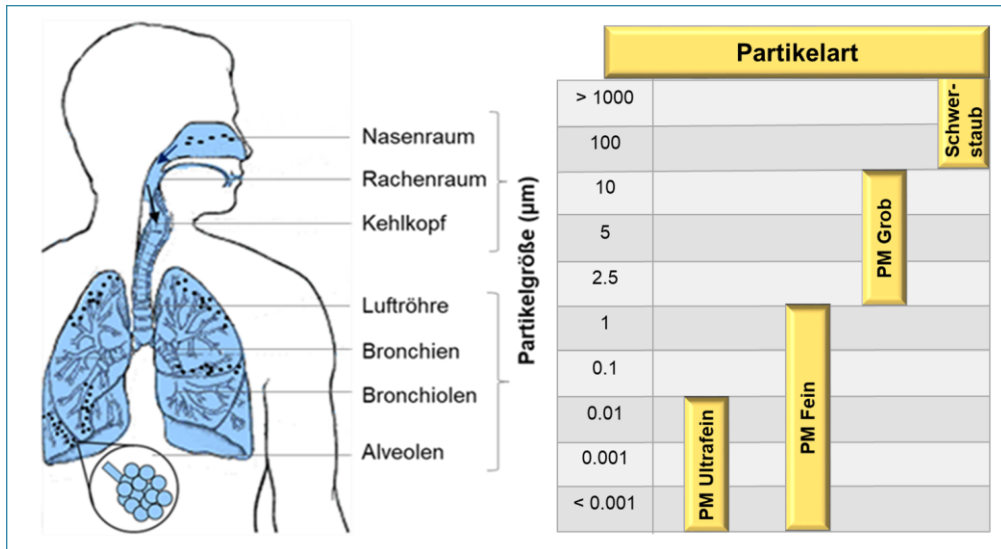


Abb. 5: Lungengängigkeit von Partikeln [modifiziert nach 27]

In der Forschung wird oxidativer Stress als ein zentraler Mechanismus der gesundheitschädlichen Wirkung von UFP diskutiert [28]. Er beruht auf der Bildung von reaktiven Sauerstoffverbindungen (*reactive oxygen species*, ROS) durch UFP. ROS entstehen auch durch normale biologische Prozesse und werden durch Antioxidantien unschädlich gemacht. UFP könnten das natürliche Gleichgewicht zwischen ROS und Antioxidantien stören, so dass reaktive Verbindungen nicht mehr ausreichend entgiftet werden können. In der Folge könnten sich Atemwegs- oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen entwickeln. Welche Bedeutung diese Beobachtungen im Labor für die menschliche Gesundheit tatsächlich haben, ist bisher nicht abschließend geklärt.

Vielfach ist auch nicht klar, in wieweit Effekte tatsächlich ausschließlich auf UFP zurückzuführen sind. Insbesondere bei epidemiologischen Untersuchungen besteht die Problematik, dass UFP immer gemeinsam mit anderen Luftschadstoffen auftreten und es daher schwierig ist, die Wirkungen der UFP von den Effekten anderer Schadstoffe (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, Stickoxide, Kohlenmonoxid) abzugrenzen. Im Rahmen eines Gutachtens für das UBA wurden 85 epidemiologische Studien hinsichtlich gesundheitlicher Effekte von UFP näher untersucht [29]. Dabei stand die Frage im Vordergrund, in wieweit die beobachteten Effekte ausschließlich auf UFP zurückzuführen sind. Das Gutachten kommt zu dem Ergebnis, dass lediglich für Kurzzeiteffekte auf entzündliche Prozesse sowie Herzfrequenz und Blutdruck ein Zusammenhang mit der Einwirkung von UFP hergestellt werden könne.

Die WHO stellt bisher dazu fest, dass es zwar wissenschaftliche Hinweise auf gesundheitsschädigende Wirkungen von UFP gibt, deren Evidenz reiche aber insgesamt noch nicht aus, gesetzliche Regulierung von UFP zu empfehlen [30]. Die Leopoldina sieht für UFP Forschungsbedarf insbesondere zu deren Wirkung, Gesundheitsbelastungen und Strategien ihrer Vermeidung [31]. Das bayerische Umweltministerium hat daher die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg beauftragt, einen UFP-Projektverbund zu koordinieren. Durch den Projektverbund soll dazu beigetragen werden, bestehende Forschungslücken zu schließen, damit eine Risikobewertung für ultrafeine Partikel vorgenommen werden kann.



## 5 Messverfahren

Aufgrund ihrer geringen Größe und Masse können UFP mit den für größere Partikel verwendeten Messverfahren nicht erfasst werden. Die derzeit zur Verfügung stehenden instrumentellen Techniken lassen nur eine sehr eingeschränkte Charakterisierung der UFP zu. Zahlreiche Forschungseinrichtungen arbeiten daran, neue automatische Messmethoden zur Charakterisierung der UFP zu entwickeln bzw. die vorhandenen Methoden zu optimieren. Derzeit basieren die wichtigsten standardisierten Messmethoden für UFP in der Umgebungsluft auf Messungen der Partikelanzahlkonzentration bzw. der Größenverteilung (Anzahl der Partikel in jeder Größenfraktion) [32,33].

Das Standardgerät zur Bestimmung der Partikelanzahl ist der Kondensationspartikelzähler (engl.: *Condensation Particle Counter, CPC*). Diese Technologie nutzt die temperaturgesteuerte Kondensation einer Flüssigkeit (z. B. Butanol) auf ultrafeinen Partikeln, die dadurch auf eine optisch erkennbare Größe anwachsen. Dafür wird die angesaugte Probenluft durch eine dampfgesättigte Kammer geleitet. In einer gekühlten Kondensationsstrecke schlägt sich der Dampf auf den Partikeln nieder. Durch die Kondensation wachsen die Partikel auf eine optisch erfassbare Größe, passieren unmittelbar danach einen Detektor und werden optisch gezählt.

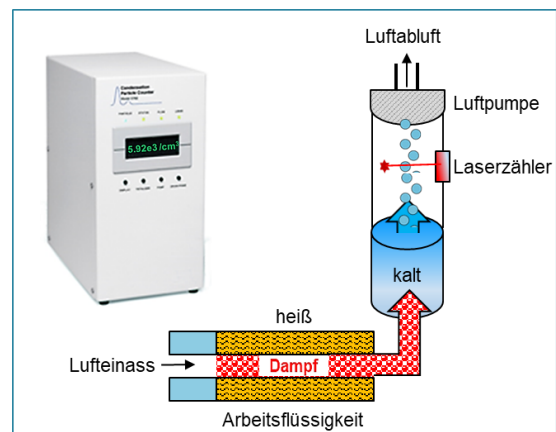


Abb. 6: Kondensationspartikelzähler (CPC) – Messprinzip

Das Standardinstrument zur Ermittlung der Größenverteilung der UFP ist das Mobilitätspartikelgrößenpektrometer (engl.: *Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS*). Es basiert auf dem physikalischen Prinzip, dass die Bewegung eines Partikels in einem elektrischen Feld grundsätzlich von der Partikelgröße abhängt. Die angesaugten Partikel werden in einem Partikel-Ladegerät elektrisch aufgeladen und dann anhand ihrer Mobilität in einem elektrischen Feld nach ihren Größen fraktioniert. SMPS kombiniert die Größenbestimmung mit der Zählung einzelner Partikel und gibt die Konzentrationen der UFP in diskreten Größenkanälen aus.

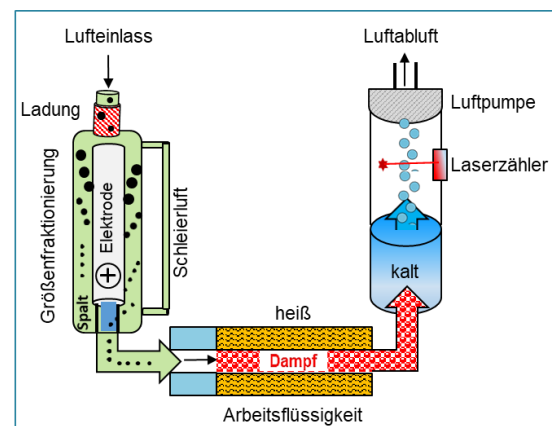


Abb. 7: Mobilitätspartikelgrößenpektrometer (SMPS) – Messprinzip

Neben den stationären Standardmesstechniken findet man zunehmend kostengünstige mobile Geräte, die auf ähnlichen Messprinzipien basieren. Diese Geräte können für schnelle und unkomplizierte Überblicksmessungen an verschiedenen Standorten eingesetzt werden. Sie sind aber nicht für den Dauerbetrieb geeignet und haben eine im Vergleich zu stationären Geräten etwas niedrigere Genauigkeit. Mobile Geräte lassen daher nur begrenzte Aussagen über die Luftqualität zu.



Abb. 8: Mobiler Partikelzähler

Andere Instrumente wie die sogenannten Impaktoren werden hauptsächlich zur Abscheidung von UFP aus der Luft eingesetzt. Die Partikel werden dabei in Größenklassen aufgeteilt und auf Membranen gesammelt. Die gesammelten Partikel können anschließend auf ihre Morphologie und chemische Zusammensetzung untersucht werden. Manche Geräte erlauben zusätzlich eine Messung der Partikelanzahlkonzentration für jede gesammelte Fraktion. Impaktoren werden oft unmittelbar an der Quelle eingesetzt, beispielsweise bei Motor-teststudien, Bremsenprüfständen oder Industrieanlagen.

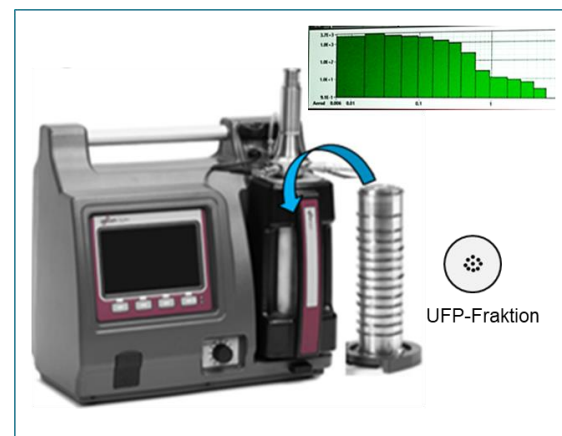


Abb. 9: Impaktor zur UFP-Probenahme

## 6 Grenzwerte

Für UFP gibt es derzeit weder einen Richt- noch einen Grenzwert zum Schutz der Gesundheit. Um solche Werte abzuleiten, müsste der Zusammenhang zwischen der auf den Menschen einwirkenden Menge an UFP und der daraus resultierenden Wirkung bekannt sein. Eine derartige Dosis-Wirkungsbeziehung kann mit den vorliegenden Daten aktuell nicht aufgestellt werden. Insbesondere zu Langzeitwirkungen von UFP reicht die Datenbasis nicht aus. Die Ableitung eines Richt- bzw. Grenzwerts wird außerdem durch den Umstand erschwert, dass die Belastung der Bevölkerung durch UFP nur unzureichend charakterisiert ist. Standardisierte Messverfahren für UFP kommen erst seit wenigen Jahren zum Einsatz, dementsprechend sind belastbare Studien erst seit kurzem verfügbar. Spezifische Grenzwerte für UFP sind bislang nur in den neuen Abgasnormen für Kraftfahrzeuge festgelegt. Die Normen Euro 5 und Euro 6 enthalten einen Emissionsgrenzwert von  $6 \times 10^{11}$  Feststoffpartikel pro Testzykluskilometer. Dieser Wert gilt für Partikel mit einem Durchmesser  $> 23$  nm [34]. Kleinere Partikel können wegen fehlender Messmethoden noch nicht in die Regelung einbezogen werden. Derzeit wird an der Entwicklung von Messverfahren gearbeitet, mit denen Partikel  $< 10$  nm routinemäßig erfasst werden können.

## 7 Offene Fragen

Nach den vorliegenden Erkenntnissen müssen UFP auf ihre Auswirkungen für die menschliche Gesundheit überprüft werden. Die vorhandenen Daten reichen nicht aus, um Grenzwerte zum Schutz der Gesundheit abzuleiten. Die Datenlage muss daher weiter verbessert werden. Offene Fragen gibt es insbesondere in folgenden Bereichen:

### Messtechnik:

Es ist festzulegen, welche Messgrößen im Hinblick auf die gesundheitlichen Wirkungen von UFP relevant sind (Partikelgesamtzahl, Anzahl/Größenverteilung oder Oberfläche, Jahresmittel- oder Kurzzeitwert).

### Routinemäßige Erfassung von UFP in der amtlichen Luftqualitätsüberwachung:

Mit diesen Messungen könnten Daten zur räumlichen Verbreitung von UFP und den zeitlichen Änderungen der UFP-Konzentrationen gewonnen werden. Diese Daten wären für die Durchführung von epidemiologischen Untersuchungen von erheblicher Bedeutung.

### Harmonisierung der Messverfahren:

In den bisher durchgeführten Untersuchungen wurden UFP auf sehr unterschiedliche Weise gemessen, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wesentlich erschwert. Es ist daher dringend notwendig, die Messverfahren zu harmonisieren und Referenzmessverfahren festzulegen.

### Identifizierung und Quantifizierung relevanter Quellen:

Quellenbezogene Informationen sind die Voraussetzung für wirkungsvolle Maßnahmen zur Reduzierung von UFP-Emissionen. Sie liefern darüber hinaus Erkenntnisse zur Exposition gegenüber UFP und sind damit auch für epidemiologische Untersuchungen von Bedeutung.

### Charakterisierung der UFP:

Für das Verständnis von Verhalten und Wirkungen der UFP sind möglichst vollständige Kenntnisse über ihre chemischen Eigenschaften erforderlich. Messverfahren zur chemischen Charakterisierung von UFP müssen daher entwickelt, optimiert und standardisiert werden.

### Durchführung von epidemiologischen Langzeitstudien:

Derzeit gibt es kaum Langzeitstudien zu UFP. Sie sind jedoch für die Bewertung der gesundheitlichen Wirkungen von erheblicher Bedeutung.

## 8 Literatur

- [1] VDI 2083 Blatt-Reinraumtechnik; Partikelreinheitsklassen der Luft (Cleanroom technology; Particulate air cleanliness classes). Beuth Verlag, **2013**.
- [2] Schulz H., Karrasch S., Böлке G., Cyrus J., Hornberg C., Pickford R., Schneider A., Witt C., Hoffmann B.: *Breathing: Ambient Air Pollution and Health – Part II*. Pneumologie, 73 (2019) 347.
- [3] Know H-S., Ryu M.H., Carlsten C.: *Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease*. Experimental & Molekular Medicine, 52 (2020) 318.
- [4] Schmid O., Stöger T., Wichmann H.E.: *Staub und Staubinhaltsstoffe/Nanopartikel und Ultrafeine Partikel*. Handbuch Umweltmedizin-54. Erg. Lfg. 6/15, **2016**.
- [5] Department for Environment, Food and Rural Affairs; Scottish Government; Welsh Government; and Department of the Environment in Northern Ireland, Studie „Ultrafine Particles (UFP) in the UK“, **2018**.
- [6] Kulmala, M., Pirjola L., Mäkelä J.M.: *Stable sulphate clusters as a source of new atmospheric particles*. Nature, 404 (2000) 66.
- [7] Birmili W., Wiedensohler A., Plass-Dulmer C., Berresheim H.: *Evolution of newly formed aerosol particles in the continental boundary layer: A case study including OH and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> measurements*. Geophys. Res. Lett., 27 (2000) 2205.
- [8] Asbach C., Alexander C., Clavaguera S. et al. *Review of measurement techniques and methods for assessing personal exposure to airborne nanomaterials in workplaces*. Science of the Total Environment, 603/604 (2017) 793.
- [9] Größ J., Hamed A., Sonntag A. et al. *Atmospheric new particle formation at the research station Melpitz, Germany: connection with gaseous precursors and meteorological parameters*. Atmospheric Chemistry Physics, 18 (2018) 1835
- [10] Umweltbundesamt, *Flüchtige organische Verbindungen*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheitsumwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen#fluechtige-organische-verbindungen-voc>
- [11] Kumar P., Morawska L., Birmili W., Paasonen P., Hu M., Kulmala M., Harrison R.M., Norford L., Britter R.: *Ultrafine particles in cities*. Environ Int, 66 (2014) 1.
- [12] TROPOS – Leibniz-Institut für Troposphärenforschung: *The German Ultrafine Aerosol Network (GUAN). Partners, scientific co-operation, publications, measurement data, measurement sites, instrumentation*, **2018**. Leipzig. <http://wiki.tropos.de/index.php/GUAN> und <https://doi.org/10.5072/guan>
- [13] Birmili W., Sun J., Weinhold K., Merkel M., Rasch F., Wiedensohler A., Bastian S., Löschau G., Schladitz A., Quass U., Kuhlbusch T.A.J., Kaminski H., Cyrus J., Pitz M., Gu J., Kusch T., Flentje H., Meinhardt F., Schwerin A., Bath O., Ries L., Gerwig H., Wirtz K., Weber S.: *Atmosphärische Aerosolmessungen im deutschen Ultrafeinen-Aerosol-Netzwerk (GUAN) - Teil III: Schwarzkohlemassen- und Partikelzahlenkonzentrationen 2009-2014*. Gefahrst. Reinh. Luft, 75(11/12) (2015) 479.
- [14] Birmili W., Pietsch A., Niemeyer T., Kura J., Hoffmann S., Daniels A., Zhao J., Sun J., Wehner B., Wiedensohler A.: *Vorkommen und Quellen ultrafeiner Partikel im Innenraum und in der Außenluft – Aktueller Kenntnisstand*, Gefahrstoffe 80 (2020) Nr.01-02.
- [15] Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, *Umweltzone Leipzig. Teil 5: Immissionssituation 2010-2015*, **2016**.
- [16] Löschau G, Hausmann A, Wolf U et al. *Umweltzone Leipzig – Abschlussbericht*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, (2017): <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/29757>
- [17] Umweltbundesamt (UBA): *Fragen und Antworten: Ultrafeine Partikel*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/feinstaub/fragen-antworten-ultrafeine-partikel>
- [18] Maron C., Schönfeld F.: *Zusammenhang von Ultrafeinstaubkonzentration und Flugverkehr*, Gefahrstoffe 80 (2020) Nr.8.
- [19] Junkermann W., Hacker J.M.: *Ultrafine Particles in the Lower Troposphere. Major Sources, Invisible Plumes, and Meteorological Transport Processes*. Bulletin of the American Meteorological Society, 99 (12) (2018) 2587.
- [20] [https://www.lfu.bayern.de/luft/luftreinhaltungplanung\\_verkehr/projekte/partikel\\_orientierend/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/luft/luftreinhaltungplanung_verkehr/projekte/partikel_orientierend/index.htm)
- [21] [https://www.lfu.bayern.de/luft/luftreinhaltungplanung\\_verkehr/projekte/partikel\\_kontinuierlich/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/luft/luftreinhaltungplanung_verkehr/projekte/partikel_kontinuierlich/index.htm)
- [22] Chemische Charakterisierung ultrafeiner Partikel - LfU Bayern. [https://www.lfu.bayern.de/analytik\\_stoffe/umweltueberwachung/ultrafeine\\_partikel/chemische\\_charakterisierung/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/umweltueberwachung/ultrafeine_partikel/chemische_charakterisierung/index.htm)
- [23] Ansätze zur Charakterisierung ultrafeiner Partikel aus dem Verkehr - LfU Bayern. [https://www.lfu.bayern.de/analytik\\_stoffe/umweltueberwachung/ultrafeine\\_partikel/aus\\_dem\\_verkehr/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/umweltueberwachung/ultrafeine_partikel/aus_dem_verkehr/index.htm)
- [24] Diaz E.: *Summary of health research on ultrafine particles*. Washington State Department of Health, DOH 334-454, **2019**. <https://www.doh.wa.gov/Portals/1/Documents/4000/334-454.pdf>
- [25] Health Effects Institute (HEI): *Understanding the health effects of ambient ultrafine particles*. HEI Perspectives 3, Health Effects Institute, Boston, Massachusetts, USA, **2013**. <https://www.healtheffects.org/publication/understanding-health-effects-ambient-ultrafine-particles>
- [26] Birmili W., Ruckerl R., Hoffmann B., Weinmayr G., Schins R., Kuhlbusch T. A. J., Vogel A., Weber K., Franck U., Cyrus J., Peters A.: *Ultrafeine Aerosolpartikel in der Außenluft: Perspektiven zur Aufklärung ihrer Gesundheitseffekte*. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 74 (2014) 492.

- 
- [http://wiki.tropos.de/images/2/25/Birmili\\_2014\\_GRdL.pdf](http://wiki.tropos.de/images/2/25/Birmili_2014_GRdL.pdf)
- [27] Ferrari L., Carugno M., Bollati V.: *Particulate matter exposure shapes DNA methylation through the lifespan*. *Clinical Epigenetics*, 11 (2019) 129.
- [28] Li N., Sioutas C., Cho A., Schmitz D., Misra C., Sempf J., Wang M., Oberley T., Froines J., Nel A.: *Ultrafine particulate pollutants induce oxidative stress and mitochondrial damage*. *Environmental Health Perspectives*, 111 (4) (2003) 455.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1241427/pdf/ehp0111-000455.pdf>
- [29] Ohlwein S., Kappeler R., Kutlar J.M., Künzli N., Hoffmann B.: *Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence*. *International Journal of Public Health* 64 (2019) 547. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00038-019-01202-7.pdf>
- [30] World Health Organization WHO Expert Consultation: *Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs)*, 2016. Meeting report Bonn, Germany 29 September-1 October 2015. [https://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0013/301720/Evidence-future-update-AQGs-mtg-report-Bonn-sept-oct-15.pdf](https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0013/301720/Evidence-future-update-AQGs-mtg-report-Bonn-sept-oct-15.pdf)
- [31] Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina: *Saubere Luft. Stickstoffoxide und Feinstaub in der Atemluft: Grundlagen und Empfehlungen*. Halle (Saale), 2019.
- [32] VDI Richtlinie 3867 Blatt 2: *Messen von Partikeln in der Außenluft. Charakterisierung von Prüfaerosolen - Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung – Kondensationspartikelzähler (CPC)*, 2008.
- [33] VDI Richtlinie 3867 Blatt 3: *Messen von Partikeln in der Außenluft - Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen –Elektrisches Mobilitätsspektrometer*. VDI, 2012.
- [34] EC (European Commission): *Commission regulation (EC) no. 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information*. Official Journal of the European Union, 2008. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2008/692/2019-09-01>