



Dokumentation

Ultrafeinstaub

Studien zu Ursachen und Wirkung

Ultrafeinstaub

Studien zu Ursachen und Wirkung

Aktenzeichen:

WD 8 - 3000 - 076/18

Abschluss der Arbeit:

30.8.2018

Fachbereich:

WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Studien zur Ultrafeinstaub	10
3.	Untersuchungen zu (Ultra)Feinstaub und pflanzlichen Organismen	13
4.	Ausgewählte Projekte zu Ultrafeinstaub	14
5.	Quellenverzeichnis	14

1. Einleitung

Feinstaub ist ein Sammelbegriff für in der Luft schwebende Partikel unterschiedlicher Zusammensetzung und Herkunft. Entscheidend ist allein die Größe. Jedes Schwebepartikel unter zehn Mikrometern Durchmesser zählt zum Feinstaub. Feinstaubpartikel sind ihrer Größe nach in Kategorien eingeteilt: PM10 (unter 10 Mikrometer), PM2,5 (unter 2,5 Mikrometer) und Ultrafeinstaub(partikel) (UF bzw. UFP) (kleiner 0,1 Mikrometer). Die ultrafeinen Partikel sind 25- bis 100-mal kleiner als Feinstaubpartikel. Ultrafeinstaubpartikel können von der Lunge in das Blut aufgenommen werden.¹

„Die Feinstaubquellen sind teils natürlichen, überwiegend aber anthropogenen Ursprungs. Natürliche Quellen sind beispielsweise Vulkanausbrüche, Waldbrände, Meeressicht und Vegetation. Zu den anthropogenen Quellen zählen Verbrennungsprozesse in Motoren und Kraftwerken, Heizungsanlagen, Industrieanlagen sowie Verbrennung von Biomasse und Holz. Auch landwirtschaftliche Aktivitäten wie Ernte, Mäharbeiten oder Düngung sind Quellen von Feinstaub. Von den o.g. Quellen sind der Verkehr (Dieselruß, Reifen- und Bremsenabrieb) und jüngst die Holzfeuerungen (Kamin) Hauptursachen der Feinstaubbelastung.“² „Auch Pilzsporen oder Pflanzenfragmente zählen zum Feinstaub.“³

Die Belastung unserer Atemluft ist im Wesentlichen durch Verbrennungsprozesse dominiert, vor allem durch Kfz-Verkehr und Tabakrauch. „In der Natur gibt es keine scharfen Abgrenzungen der Fraktionen. Denn aus den Nanopartikeln, die durch Nukleation [Keimbildung] und Kondensation aus der Gasphase oder bei Verbrennungsvorgängen und chemischen Reaktionen entstehen, koagulieren die Feinstäube. Grobstäube (> 2,5 µm) in unserer Atemluft entstehen eher durch mechanische Zerkleinerung, Erosion, Aufwirbelung und Windverfrachtung von Erdkrustenbestandteilen, Sedimentstaub, Seesalz, Pollen, Pilzsporen etc. Der Massenanteil des Ultrafeinstaubes in unserer Atemluft beträgt nur etwa 0,7 %, macht aber ca. 73 % der Teilchenzahl aus. Die Lebenszeit der meisten UF-Teilchen beträgt nur Minuten, während sie nach ihrer Akkumulation zu Feinstaub eine Lebenszeit von Wochen haben. Etwa 61 % der Partikelmasse und 27 % der Partikelzahl findet sich im Bereich zwischen 100 und 500 nm. Je kleiner ein Teilchen, desto größer ist der Anteil der Oberflächenmoleküle an seiner Gesamtzahl. Diese Oberflächenmoleküle

1 0,1 µm (Mikrometer) = 100 nm (Nanometer), 1 µm = $1/1000$ mm

Ultrafeine Partikel liegen in der Größenordnung von Nanopartikeln. Wobei man in Wissenschaft und Industrie meist von Nanopartikeln spricht, wenn diese einen künstlichen Ursprung haben.

Umweltbundesamt (UBA) (2018). „Relation der Feinstaubpartikel“, <https://www.umweltbundesamt.de/bild/relation-der-feinstaubpartikel>

PM bedeutet partikuläre Materie. Ultrafeinstaub wird mit auch PM0,1 abgekürzt.

2 Deutscher Wetterdienst (DWD) (2015). Broschüre „Feinstaubmessung in Kurorten“, https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/medizin/broschuere_feinstaub.pdf?blob=publicationFile&v=2

3 Meier, Chr. Neue Zürcher Zeitung (NZZ) (2013). „Dreckige Luft als Gesundheitsrisiko“, <https://www.nzz.ch/wissen/wissenschaft/dreckige-luft-als-gesundheitsrisiko-1.18143918>

können am leichtesten mit Zellmembranen und anderen biologischen Strukturen in Kontakt treten.“⁴

Das Umweltbundesamt (UBA) sieht es als erwiesen an, „dass das Einatmen von Feinstaub negativ auf den Gesundheitszustand des Menschen wirkt. Dies ist nicht nur dann der Fall, wenn sich an der Oberfläche von Stäuben gefährliche Stoffe wie Schwermetalle oder Krebs erzeugende polzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) anlagern. Auch die Staubpartikel selbst stellen ein Gesundheitsrisiko dar: Je kleiner die Staubpartikel sind, desto größer ist das Risiko zu erkranken. Kleine Partikel dringen nämlich tiefer in die Atemwege ein als größere. Dadurch gelangen sie in Bereiche, von wo sie beim Ausatmen nicht wieder ausgeschieden werden. Sie sind deshalb besonders gesundheitsschädlich. Ultrafeine Partikel können zudem über die Lungenbläschen in die Blutbahn vordringen und sich über das Blut im Körper verteilen. In den Lungenbläschen sind Atmung und Blutkreislauf funktionell und anatomisch sehr eng miteinander verbunden. Deshalb können Störungen des einen Systems - wie etwa entzündliche Veränderungen im Atemtrakt - auch das andere System, also Herz oder Kreislauf, beeinträchtigen. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO)⁵ hat in Untersuchungen festgestellt, dass es keine Feinstaubkonzentration gibt, unterhalb derer keine schädigende Wirkung zu erwarten ist. Hierin unterscheidet sich Feinstaub von vielen anderen Schadstoffen wie Schwefeldioxid oder Stickstoffdioxid, für die man Werte angeben kann, unter denen keine schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Ge-

4 Neuberger, M. (2007). „Umweltepidemiologie und Toxikologie von Nanopartikeln (Ultrafeinstaub) und Feinstaub“, Gazsó A., Greßler S., Schiemer F. (eds) Nano. Springer, Vienna

Umweltbundesamt (UBA) (2013). „Aus welchen Quellen stammt Feinstaub?“ <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/aus-welchen-quellen-stammt-feinstaub>

5 Die WHO schätzt, dass etwa 5 % der Lungenkrebstodesfälle weltweit auf Feinstaub (PM) zurückzuführen sind. In europäischen Regionen beträgt dieser Anteil ca. 2-5 %: “It is estimated that approximately 3 % of cardiopulmonary and 5 % of lung cancer deaths are attributable to PM globally. In the European Region, this proportion is 1–3 % and 2–5 %, respectively, in various subregions (16).” In: World Health Organization (WHO) (2013). “Health effects of particulate matter”, http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf

In ihrem Factsheet aus dem Jahr 2018 spricht die WHO von 6 % vorzeitiger Todesfälle durch Lungenkrebs, der durch Luftverschmutzung verursacht wurde:

“Ambient (outdoor) air pollution in both cities and rural areas was estimated to cause 4.2 million premature deaths worldwide per year in 2016; this mortality is due to exposure to small particulate matter of 2.5 microns or less in diameter (PM2.5), which cause cardiovascular and respiratory disease, and cancers.” [...] “WHO estimates that in 2016, some 58 % of outdoor air pollution-related premature deaths were due to ischaemic heart disease and strokes, while 18 % of deaths were due to chronic obstructive pulmonary disease and acute lower respiratory infections respectively, and 6 % of deaths were due to lung cancer.” In: Cohen, A. J., et al. (2004). „Urban air pollution“ Kapitel 17, Seite 1422 in WHO “Comparative Quantification of Health Risks”, Volume 2, Kapitel “Environmental and occupational risk factors”, <http://www.who.int/publications/cra/chapters/volume2/1353-1434.pdf?ua=1> und <http://www.who.int/publications/cra/en/>

sundheit zu erwarten sind. Nicht nur kurzzeitig erhöhte Konzentrationen führen zu negativen gesundheitlichen Auswirkungen, gerade längerfristig vorliegende, geringere Konzentrationen wirken gesundheitsschädigend.“⁶

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) schreibt zusammenfassend zu Ultrafeinstäuben: „Da Stäube auch Gefahrstoffe enthalten können, stellen sie für unsere Gesundheit eine erhöhte Gefährdung dar. So lagern sich beispielsweise die als kanzerogen geltenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) und Schwermetalle, die bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehen, an Rußpartikel an. Während Staubpartikel > 2,5 µm beim Atmen durch die Nase bereits durch die Nasenschleimhäute gefiltert werden, gelangen diese beim Atmen durch den Mund nahezu ungehindert in den Rachenraum. Feine Staubpartikel gelangen sowohl über die Nase als auch über den Mund tiefer in den Atemtrakt bis in die Lungenperipherie. Dort können sie sich festsetzen und langfristig deponiert werden. Im Lungengewebe abgelagerte Partikel lösen abhängig von ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften Entzündungsreaktionen aus. Durch diesen permanenten Entzündungsreiz kann, auf lange Sicht gesehen, das Immunsystem geschwächt werden. Chronische Lungenerkrankungen wie Bronchitis, Asthma oder COPD (chronisch obstruktive Lungenerkrankung, engl.: chronic obstructive pulmonary disease) können dadurch begünstigt werden, das Risiko für Lungenkrebs steigt. Zudem steigt auch das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Herzinfarkt oder Schlaganfall.“

Ultrafeine Partikel können sogar in Bindegewebe, Lymphknoten und in die Blutbahn vordringen. Beispielsweise konnten bei Ratten ultrafeine Partikel in Leber, Herz und Gehirn nachgewiesen werden. Gegenstand aktueller Forschung ist, inwieweit ultrafeine Partikel auch in sekundäre lymphatische Organe* vordringen und sich dort in nennenswerter Konzentration anreichern können.“⁷

Ultrafeinstaubpartikel stehen wie Feinstaubpartikel auch unter Verdacht, Diabetes bzw. eine Insulininsolvenz auszulösen. „Eine frühere Studie des Helmholtz Zentrums München aus dem Jahr 2013 konnte belegen, dass Feinstaubbelastung das Risiko für Insulinresistenz im Kindesalter erhöht. Im Rahmen einer Metanalyse aus dem Jahr 2015 kamen dieselben Autoren zu dem Schluss,

6 Umweltbundesamt (UBA) (2013). „Warum ist Feinstaub schädlich für den Menschen?“, <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-ist-feinstaub-schaedlich-fuer-den-menschen>

Im Jahr 2013 hat die International Agency for Research on Cancer (IARC) der WHO Luftverschmutzung als ein Krebsverursacher deklariert und Partikelgemische als ein Bestandteil der Luftverschmutzung ausgewiesen: „...that it has classified outdoor air pollution as carcinogenic to humans (Group 1).“ [...] „...the carcinogenicity of various pollutants present in outdoor air pollution, especially particulate matter and transportation-related pollution.“ In: International Agency for Research on Cancer (IARC) (2013). “IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths”, https://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf

7 Deutscher Wetterdienst (DWD) (2015). Broschüre „Feinstaubmessung in Kurorten“, https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/medizin/broschuere_feinstaub.pdf?blob=publication-File&v=2 Seite 5

*Sekundäre lymphatische Organe sind für die spezifische Immunabwehr des Körpers verantwortlich.

dass eine Langzeit-Exposition gegenüber Luftschadstoffen und die Entwicklung von Typ-2-Diabetes mit einander assoziiert sind.“⁸

„Es sei zudem nachgewiesen worden, dass ultrafeine Partikel bis ins Gehirn und auch ins Blut ungeborener Kinder gelangen können. Die Partikel seien in der Lage, sogenannte Sauerstoffradikale freizusetzen, die die Zellen und ihre Funktion in unterschiedlichen Organen schädigen. Grundsätzlich sei davon auszugehen, dass die UFP die gleichen Auswirkungen auf Lunge, Herz-Kreislaufsystem, Stoffwechsel und das Gehirn haben können wie Feinstaub.“⁹

Das Handbuch für „Umweltmedizin“ liefert mit seinem Kapitel über „Umweltschadstoffe - Staub und Staubinhaltsstoffe/Nanopartikel und Ultrafeine Partikel“ eine umfangreiche Informations-sammlung mit Quellen, insbesondere über die Kinetik, innere Exposition und eine Beschreibung der einzelnen Wirkungen in human- und tierexperimentellen Untersuchungen: Wichmann, Schlipköter, Fülgraff – Handbuch Umweltmedizin – 54. Erg. Lfg. 6/15.

Die Übersichtsstudie “Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles”, vom Health Effects Institute (HEI), HEI Review Panel on Ultrafine Particles (2013). “Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles”, HEI Perspectives 3, Health Effects Institute, Boston, MA, <https://www.healtheffects.org/publication/understanding-health-effects-ambient-ultrafine-particles> beschreibt die gesundheitlichen Auswirkungen von ultrafeinen Umgebungsparti-keln und wertet experimentelle Studien zu Beobachtungen an Tieren und Menschen aus und zeigt mögliche zukünftige Forschungsthemen auf.

Einen ausführlichen Bericht über ultrafeine Partikel aus dem Jahr 2004 gibt es auch von der aust-ralischen Regierung: “Health Impacts of Ultrafine Particles - Desktop Literature Review and Analysis“, Australian Department of the Environment and Heritage (2004). <http://www.environment.gov.au/system/files/resources/00dbec61-f911-494b-bbc1-adc1038aa8c5/files/health-impacts.pdf>. Im Kapitel 5.3.2 „Toxicological Studies“ werden auch zahlreiche Studien zu Tierver-suchen (Animal Haemostasis, Animal Allergy Studies und Inflammatory Processes: Animal In-vivo and In-vitro Studies) erwähnt.

Eine neue und umfangreiche Literaturauswertung zu den gesundheitlichen Auswirkungen ultra-feiner Partikel und die Anwendbarkeit auf die nationalen Rahmenbedingungen ist in einem Be-richt für das Umweltbundesamt veröffentlicht worden: “Health Effects of Ultrafine Particles Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting”. Der Bericht enthält auch die Ergebnisse des Health Effects Institutes. Umweltbundesamt (UBA)

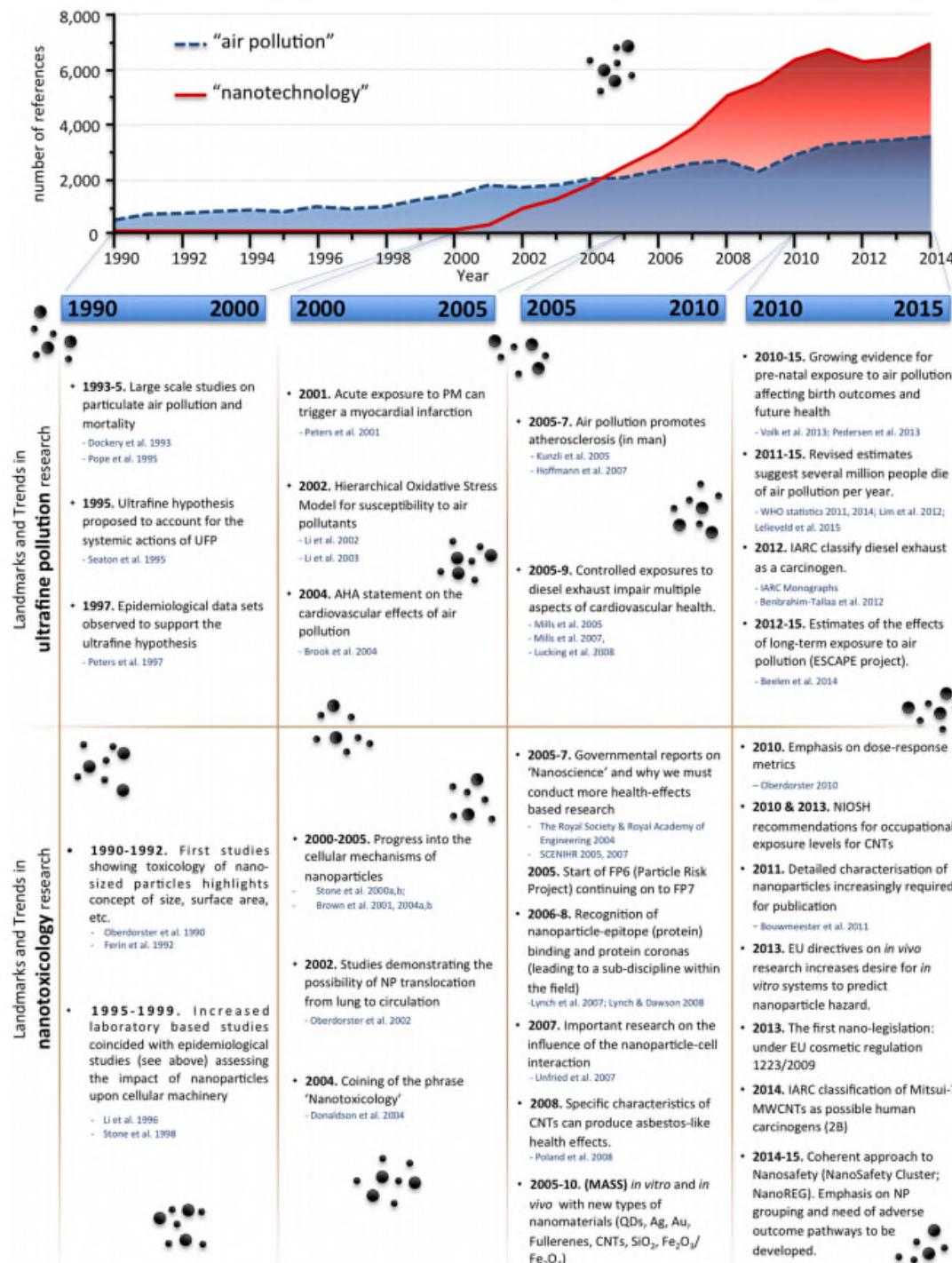
8 Helmholtz Zentrum München (2016). Diabetesforschung „Risikofaktor Luftverschmutzung“, <https://www.helmholtz-muenchen.de/aktuelles/uebersicht/pressemitteilungnews/article/35848/index.html>

9 Schubert, A., Süddeutsche Zeitung (SZ.de) (2017). „Luftverschmutzung durch Ultrafeinstaub“, <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/luftverschmutzung-da-liegt-was-in-der-luft-1.3752834>

Helmholtz Zentrum München (2015). „Feinstaub: ultrafeine Partikel beeinflussen Herzfunktion“, <https://www.helmholtz-muenchen.de/aktuelles/uebersicht/pressemitteilungnews/article/26522/index.html>

und das Schweizerische Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2018). "Health Effects of Ultrafine Particles Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting", Project number: 003777 7205 UKAGEP.

Der Artikel von Stone, V. et al. (2017). „Nanomaterials Versus Ambient Ultrafine Particles: An Opportunity to Exchange Toxicology Knowledge“, <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/EHP424> befasst sich mit der Auswertung von Untersuchungen zu Nanopartikeln und ultrafeinen Partikeln und der Verwendung von Forschungsergebnissen für die Forschung an ultrafeinen Partikeln. Die nachfolgende Grafik enthält eine Zeitachse, die die Entwicklung der Forschung an Feinstaub (PM) und Nanomaterialien (NMs) und ihrer Schwerpunkte über die letzten drei Jahrzehnte zeigt. Die Autoren fassen Forschungsaspekte zur gesundheitlichen Wirkung und toxikologischen Mechanismen der ultrafeinen und Nanopartikel zusammen und geben eine Aufstellung der unterschiedlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften.



Landmarks and Trends in nanotoxicology research

- 1990-1992. First studies showing toxicology of nano-sized particles highlights concept of size, surface area, etc.
 - Oberdorster et al. 1990
 - Ferin et al. 1992
- 1995-1999. Increased laboratory based studies coincided with epidemiological studies (see above) assessing the impact of nanoparticles upon cellular machinery
 - Li et al. 1996
 - Stone et al. 1998
- 2000-2005. Progress into the cellular mechanisms of nanoparticles
 - Stone et al. 2000a,h;
 - Brown et al. 2001, 2004a,b
- 2002. Studies demonstrating the possibility of NP translocation from lung to circulation
 - Oberdorster et al. 2002
- 2004. Coining of the phrase 'Nanotoxicology'
 - Donaldson et al. 2004
- 2005-7. Governmental reports on 'Nanoscience' and why we must conduct more health-effects based research
 - The Royal Society & Royal Academy of Engineering 2004
 - SCENIHR 2005, 2007
- 2005. Start of FP6 (Particle Risk Project) continuing on to FP7
- 2006-8. Recognition of nanoparticle-epitope (protein) binding and protein coronas (leading to a sub-discipline within the field)
 - Lynch et al. 2007; Lynch & Dawson 2008
- 2007. Important research on the influence of the nanoparticle-cell interaction
 - Unfried et al. 2007
- 2008. Specific characteristics of CNTs can produce asbestos-like health effects.
 - Poland et al. 2008
- 2005-10. [MASS] *in vitro* and *in vivo* with new types of nanomaterials (QDs, Ag, Au, Fullerenes, CNTs, SiO₂, Fe₂O₃/Fe₃O₄)
- 2010. Emphasis on dose-response metrics
 - Oberdorster 2010
- 2010 & 2013. NIOSH recommendations for occupational exposure levels for CNTs
- 2011. Detailed characterisation of nanoparticles increasingly required for publication
 - Bouwmeester et al. 2011
- 2013. EU directives on *in vitro* research increases desire for *in vitro* systems to predict nanoparticle hazard.
- 2013. The first nano-legislation: under EU cosmetic regulation 1223/2009
- 2014. IARC classification of Mitsui-7 MWCNTs as possible human carcinogens (2B)
- 2014-15. Coherent approach to Nanosafety (NanoSafety Cluster; NanoREG). Emphasis on NP grouping and need of adverse outcome pathways to be developed.

Figure 1. Time line showing the increased interest in particulate matter (PM) and nanomaterials (NMs) over the last three decades, highlighting key studies and research trends in both areas. Number of references per year (noncumulative) based on Pubmed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) search without further limits applied.

Die vorliegende Dokumentation liefert eine Auswahl von Studien, die zum einen die Ursache bzw. die Entstehung insbesondere von Ultrafeinstaubpartikeln behandeln und/oder zum anderen auf die Wirkung auf Organismen eingehen.

2. Studien zur Ultrafeinstaub

Baldauf, R.W., et al. (2016). Conference Report “Ultrafine Particle Metrics and Research Considerations: Review of the 2015 UFP Workshop”, Int. J. Environ. Res. Public Health 2016, 13, 1054, <https://europepmc.org/articles/PMC5129264;jsessionid=B43E884A9DC148482F31D372C17BE8F7>.¹⁰ Der Bericht liefert Hintergrundinformationen über UFP-Quellen, Luftqualität und gesundheitliche Auswirkungen und eine Zusammenfassung der interdisziplinären Inhalte des Workshops, dessen Schwerpunkte auf dem Stand der aktuellen Forschungsergebnisse, Messtechnik, UFP-Reduzierung und dem UFP-Monitoring liegen.

Birmili, W., Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V. für das Umweltbundesamt (UBA) (2006). Forschungsbericht „Räumlich-zeitliche Verteilung, Eigenschaften und Verhalten ultrafeiner Aerosolpartikel (>100nm) in der Atmosphäre, sowie die Entwicklung von Empfehlungen zu ihrer systematischen Überwachung in Deutschland“, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3114.pdf>. Die Übersichtsstudie beschreibt Eigenschaften, Vorkommen, Herkunft und Überwachungsmethoden ultrafeiner Partikel.

Birmili, W. et al. (2014). „Ultrafeine Aerosolpartikel in der Außenluft: Perspektiven zur Aufklärung ihrer Gesundheitseffekte“, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 74 (2014) Nr. 11/12 – Nov./Dez. Seite 492-500 oder https://www.researchgate.net/publication/279035406_Ultrafine_aerosol_particles_in_ambient_air_Perspectives_to_elucidate_their_health_effects. Der Autor bezeichnet den Wissensstand über die Auswirkungen ultrafeiner Partikel auf die Gesundheit der Bevölkerung als unzureichend, plädiert für laufende und zukünftige Forschungsansätze wie beispielsweise die Langzeitstudie NAKO (Nationale Kohorte an 200.000 Menschen in den kommenden 25 bis 30 Jahren) und Umweltmessungen ultrafeiner Partikel durch das GUAN-Messnetz (German Ultrafine Aerosol Network).

Eine Beschreibung des Forschungsnetzwerks GUAN liefert: „Long-term observations of tropospheric particle number size distributions and equivalent black carbon mass concentrations in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN)“, Birmili, W. et al. (2016). Earth Syst. Sci. Data, 8, 355–382, 2016 www.earth-syst-sci-data.net/8/355/2016/ und doi:10.5194/essd-8-355-2016 und <https://www.helmholtz-muenchen.de/epi/research/research-groups/environmental-exposure-assessment/projects/guan-german-ultrafine-aerosol-network/index.html>.

Weitere Beschreibungen zur Forschung im Rahmen des GUAN-Messnetzes finden sich in: Birmili, W. et al. (2016). „Atmospheric Aerosol Measurements in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN)“, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 75 (2016) Nr. 11/12 – Nov./Dez. Seite 479-488.

Chen, R., et al. (2016). “Beyond PM2.5: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution”, Biochimica et Biophysica Acta 1860 (2016) 2844–2855, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304411X16300307>

10 United States Environmental Protection Agency (EPA). Integrated Science Assessment for Particulate Matter: Final Report; EPA/600/6-08/139F; National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development: Research Triangle Park, NC, USA, 2009.

[rect.com/science/article/pii/S0304416516300745?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304416516300745?via%3Dihub). Die Autoren untersuchten ultrafeine Partikel und deren Zusammensetzung, Herkunft, typische Merkmale, oxidative Wirkungen, mögliche Expositionswegs und Gesundheitsrisiken.

Der Aufsatz von Hofman, J. et al. (2016). „Ultrafine particles in four European urban environments: Results from a new continuous long-term monitoring network“, Atmospheric Environment 136 (2016) 68e81, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016302783> beschreibt Langzeitmessungen ultrafeiner Partikel im europäischen Raum.

Kumar, P. et al. (2014). “Ultrafine particles in cities”, Environment International 66 (2014) 1–10, https://ac.els-cdn.com/S016041201400018X/1-s2.0-S016041201400018X-main.pdf?_tid=3799c4c6-b265-4211-99fc-4293cc2cb5e6&acd-nat=1535466105_9b3429f15d1869624a47ac42d9300220

Der Autor liefert einen Überblick über Ursachen von UFP-Emissionen und -Dispersionen und gibt Empfehlungen für eine nachhaltige Stadtentwicklung und Reduzierung der gesundheitlichen Risiken.

Lanzinger, S. et al. (2016). “Associations between ultrafine and fine particles and mortality in five central European cities - Results from the UFIREG study”, Environment International 88 (2016) 44–52, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412015301100?via%3Dihub>. Die Forscher fanden einen Zusammenhang zwischen ultrafeinen Partikeln und respiratorischer Mortalität (= Sterblichkeit, die auf Atemwegserkrankungen zurückgeht). Die Ergebnisse sind nach Aussagen der Forscher statistisch nicht ausreichend gesichert und weitere Langzeituntersuchungen müssten folgen.

Lanzinger, S. et al. (2016). “Ultrafine and fine particles and hospital admissions in Central Europe, results from the UFIREG study“, <https://www.atsjournals.org/doi/10.1164/rccm.201510-2042OC>. In dieser weiteren Studie verglichen die Forscher Krankenhausinweisungen mit Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen mit dem Anstieg der PM2.5-Konzentration in verschiedenen europäischen Großstädten. Die Einweisungen stiegen in Verbindung mit dem PM2.5-Anstieg. Die Studie ist Teil des UFIREG-Projekts “Ultrafine Particles – an evidence based contribution to the development of regional and European environmental and health policy”, das von 2011 bis 2014 den Zusammenhang von Kurzzeiteffekten durch Ultrafeinstaubpartikel auf die tägliche Anzahl an Krankenhausinweisungen und natürlichen Todesfällen, besonders in Bezug auf Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen in fünf europäischen Städten untersuchte.

Eine Zusammenfassung von Informationen zu ultrafeinen Partikeln findet sich in der Broschüre: “Ultrafine particles - too small to see, too big to ignore: What can regional and European environmental and health policy do?”, http://www.ufireg-central.eu/files/Downloads/UFIREG_Summary_for_Policymakers.pdf und im Flyer “Ultrafeine Partikel – Klein, fein und gemein”, https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/UFIREG_Zusammenfassung_web.pdf.

Paola, P. et al. (2015). “Are we forgetting the smallest, sub 10 nm combustion generated particles?”, Particle and Fibre Toxicology (2015) 12:34 DOI 10.1186/s12989-015-0107-3, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4628326/>. Dieser Artikel diskutiert die unterschiedlichen Eigenschaften von Partikelmasse und der Gesamtoberfläche der Partikel und der damit verbundenen unterschiedlichen biologischen Aktivität und fordert die Entwicklung mess-technischer Methoden, um verlässliche Ergebnisse über die biologische Wirksamkeit von Partikeln unterhalb 10 Nanometern zu erhalten.

Peters, A. et al. (2011). "Lessons from Air Pollution Epidemiology for Studies of Engineered Nanomaterials", J Occup Environ Med. 2011 Volume 53 (Number 6 Supplement), 8-13, doi:10.1097/JOM.0b013e31821ad5c0. Die Arbeit diskutiert Erkenntnisse aus epidemiologischen Studien zur Luftverschmutzung im Hinblick auf synthetisch hergestellte Nanopartikel und der Situation am Arbeitsplatz und kommt zu dem Schluss, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um die Wirkung ultrafeiner Partikel aus der Umwelt mit den synthetischen vergleichen zu können.

Rückerl, R. et al. (2007). "Ultrafine particles and platelet activation in patients with coronary heart disease – results from a prospective panel study", Particle and Fibre Toxicology 2007, 4:1 doi:10.1186/1743-8977-4-1, [https://particleandfibretoxicology.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-8977-4-1](https://particleandfibretotoxicology.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-8977-4-1). Die Autoren verglichen meteorologische Daten von verschiedenen Feinstaubverteilungen und Blutzellen- und Blutplasma-Werte von Herz-Kreislauf-Patienten im Hinblick auf eine mögliche thrombogene Wirkung. Die Ergebnisse weisen auf einen Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und kardiovaskulärer Morbidität und Mortalität bei empfindlichen Menschen hin.

Rückerl, R. et al. (2011). "Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence", Inhalation Toxicology, 2011; 23(10): 555–592, DOI: 10.3109/08958378.2011.593587, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/08958378.2011.593587>. Die Autoren werten Langzeit- und Kurzzeitstudien zu Luftverschmutzung und gesundheitlichen Wirkungen aus. Die Studien behandeln verschiedene Partikelfraktionen der Luft und ihre möglichen gesundheitlichen Folgen, insbesondere Sterblichkeit, Atemwegserkrankungen und Blutdruck. Die Ergebnisse der Studien weisen alle auf einen Zusammenhang hin, wobei die durchgeführten Untersuchungen zu ultrafeinen Partikeln den Autoren nicht umfassend genug sind und ihnen weiterer Forschungsbedarf notwendig erscheint.

Tierversuche an Mäusen: Allen, J.L., et al. (2014). "Early Postnatal Exposure to Ultrafine Particulate Matter Air Pollution: Persistent Ventriculomegaly, Neurochemical Disruption, and Glial Activation Preferentially in Male Mice", Environ Health Perspect; DOI:10.1289/ehp.1307984, <https://ehp.niehs.nih.gov/1307984/>. Die Forscher haben Mechanismen untersucht, die durch die Exposition gegenüber ultrafeinen, konzentrierten Umgebungspartikeln (CAPs) die Entwicklung des Zentralnervensystems (ZNS) negativ beeinflussen. Insbesondere untersuchten sie männliche und weibliche mit CAPs exponierte Mäuse. Ausgangspunkt war der Verdacht, dass Luftverschmutzung mit neurologischen und verhaltensbedingten Gesundheitseffekten bei Kindern und Erwachsenen einhergeht.

Ostro, B. et al. (2015). „Associations of Mortality with Long-Term Exposures to Fine and Ultrafine Particles, Species and Sources: Results from the California Teachers Study Cohort”, Environ Health Perspect; DOI:10.1289/ehp.1408565, <https://ehp.niehs.nih.gov/1408565/>: Die Autoren untersuchten Auswirkungen chronischer Feinstaubbelastung durch ultrafeine Partikel auf die Mortalität. Anhand eines Modells, Cox-Proportional-Hazards-Modell, schätzten die Forscher den Zusammenhang zwischen Schadstoffen und Ursache der kardiovaskulären, ischämischen Herzkrankheit (IHD) und der respiratorischen Mortalität ab. Das Modell soll zukünftige Forschungen zur relativen Toxizität von Partikelarten unterstützen.

Hennig F., et al. (2018). "Ultrafine and Fine Particle Number and Surface Area Concentrations and Daily Cause-Specific Mortality in the Ruhr Area, Germany, 2009–2014",

<https://ehp.niehs.nih.gov/ehp2054/>. Die Forscher untersuchten anhand von Modellstudien Zusammenhänge von großenabhängiger Partikelanzahlkonzentrationen (PNC) und lungenabgesiedelter Partikeloberflächenkonzentration (PSC) mit ursachenspezifischer täglicher Mortalität im Vergleich zu PM10.

Li, N. et al. (2016). „A work group report on ultrafine particles (American Academy of Allergy, Asthma & Immunology): Why ambient ultrafine and engineered nanoparticles should receive special attention for possible adverse health outcomes in human subjects”, J Allergy Clin Immunol 2016 Nr. 138 (2):386-96, doi: 10.1016/j.jaci.2016.02.023,
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4976002/>. Dieser Übersichtsartikel beschreibt Herkunft und Eigenschaften nanoskalierter Partikel und die Forschungsergebnisse über ihre biologische Wirkung.

Aung, N. et al. (2018). “Association between Ambient Air Pollution and Cardiac Morpho-Functional Phenotypes - Insights from the UK Biobank Population Imaging Study”, Circulation. 2018;138:00–00. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.118.034856, <https://www.ahajournals.org/doi/pdf/10.1161/CIRCULATIONAHA.118.034856>. Die Autoren untersuchten Anzeichen von Herz-Kreislauf-Erkrankungen in Abhängigkeit von der jährlichen mittleren PM2.5 und NO₂-Konzentration und fanden auch bei geringen Werten Nachweise für gesundheitliche Beeinträchtigungen.

3. Untersuchungen zu (Ultra)Feinstaub und pflanzlichen Organismen

Pflanzen können Partikel filtern. Einige Studien befassen sich mit der Thematik:

Pfanz, H., et al. (2007). „Die Wirkung von Holzgewächsen auf Stäube und die mögliche Rückwirkung der Stäube auf die Pflanzen“ In. Roloff A. (Hrsg), Urbane Gehölzverwendung im Klimawandel und aktuelle Fragen der Baumpflege. Forstwiss. Beitr. Tharandt/Contr. For. Sci. 54-62.

Pfanz, H. et al. (2006). „Das Staubfangvermögen von Vegetation“ Taspo 3, 12-15.

Pfanz, H. et al. (2006). „Phytoreduktion von Stäuben durch krautige Pflanzen und Holzgewächse“ Verhandlungen DGGL, Rostock, 14. -16. Juni 2006, 173 - 177.

Speak, A.F. et al. (2012). “Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city”, Atmospheric Environment Volume 61, December 2012, Pages 283-293, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012007157>.

Li, M. et al. (2015). “Assessing the Capacity of Plant Species to Accumulate Particulate Matter in Beijing, China”, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140664>.

Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP) (2012). „Feinstaubbindungsvermögen der für Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen“, <http://www.iasp.asp-berlin.de/bilder/feinstaub-2012.pdf>.

Burkhardt, J. et al. (2018). “Camouflaged as ‘degraded wax’: hygroscopic aerosols contribute to leaf desiccation, tree mortality, and forest decline”. Environmental Research Letters,

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad346> Die Autoren beschreiben in ihrem Artikel die Anfälligkeit von Bäumen gegen Feinstaub bei Trockenheit, s.a. <https://idw-online.de/de/news699442>.

Pozzer, A., (2017). "Impact of agricultural emission reductions on fine particulate matter and public health", Atmos. Chem. Phys., doi:10.5194/acp-2017-390, 201, www.atmos-chem-phys.net/17/12813/2017/. Weniger Dünger soll die Feinstaubbelastung reduzieren.

Paulot, F. et al. (2014). "Hidden cost of U.S. Agricultural exports: Particulate matter from ammonia emissions", Environ. Sci. Technol., 2014, 48 (2), pp 903–908, doi.org/10.1021/es4034793. Aus der Landwirtschaft freigesetztes Ammoniak soll ebenfalls gefährliche Feinstäube bilden.

4. Ausgewählte Projekte zu Ultrafeinstaub

Forschungen zum Vergleich der toxikologischen Wirkung von ultrafeinen und Nanopartikeln werden beispielsweise an der University of Rochester Medical Center School of Medicine and Dentistry durchgeführt. Eine Publikationsliste findet sich hier: <https://www.urmc.rochester.edu/profiles/display/138108>.

Schwerpunkte des Projekts des Cory-Slechta Labs der University of Rochester, Medical Center, "The Impact of Developmental Air Pollution (Ultrafine Particle) Exposure on the Brain", <https://www.urmc.rochester.edu/labs/cory-slechta/projects/the-impact-of-developmental-air-pollution-ultrafin.aspx> sind: Luftverschmutzung als Risikofaktor für Autismus und/oder Schizophrenie und geschlechterspezifische Unterschiede bei der Anfälligkeit des Gehirns auf Luftverschmutzung.

Die Arbeiten im Projekt des Elder Labs der Universität Rochester, Medical Center, „Air Pollution and Alzheimer's Disease“, <https://www.urmc.rochester.edu/labs/elder/projects/air-pollution-and-alzheimers-disease.aspx> sollen helfen, die Risikofaktoren, die zur Entstehung und Entwicklung der Neurodegeneration in der menschlichen Bevölkerung beitragen, besser zu verstehen.

Projekt „Health Effect ultrafine particles in Europe“ (UF&Health): Untersuchungen zur Sterblichkeit und Krankenhausaufenthalten in acht europäischen Städten des Instituts für Epidemiologie am Helmholtz Zentrum München, s.a. Stafoggia, M., et al. (2016). "Association between Short-term Exposure to Ultrafine Particles and Mortality in Eight European Urban Areas". Eur Respir J. 2016 Nr. 48 (3):674-82, doi: 10.1183/13993003.02108-2015.

5. Quellenverzeichnis

Aung, N. et al. (2018). "Association between Ambient Air Pollution and Cardiac Morpho-Functional Phenotypes - Insights from the UK Biobank Population Imaging Study", Circulation. 2018;138:00–00. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.118.034856, <https://www.ahajournals.org/doi/pdf/10.1161/CIRCULATIONAHA.118.034856>.

Australian Department of the Environment and Heritage (2004) "Health Impacts of Ultrafine Particles - Desktop Literature Review and Analysis", <http://www.environment.gov.au/system/files/resources/00dbec61-f911-494b-bbc1-adc1038aa8c5/files/health-impacts.pdf>

Baldauf, R.W., et al. (2016). Conference Report “Ultrafine Particle Metrics and Research Considerations: Review of the 2015 UFP Workshop”, Int. J. Environ. Res. Public Health 2016, 13, 1054, <https://europepmc.org/articles/PMC5129264;jsessionid=B43E884A9DC148482F31D372C17BE8F7>

Birmili, W. et al. (2014). „Ultrafeine Aerosolpartikel in der Außenluft: Perspektiven zur Aufklärung ihrer Gesundheitseffekte“, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 74 (2014) Nr. 11/12 – Nov./Dez. Seite 492-500 oder [https://www.researchgate.net/publication/279035406 Ultrafine aerosol particles in ambient air Perspectives to elucidate their health effects](https://www.researchgate.net/publication/279035406_Ultrafine_aerosol_particles_in_ambient_air_Perspectives_to_elucidate_their_health_effects)

Birmili, W. et al. (2016). „Atmospheric Aerosol Measurements in the German Ultrafine Aerosol Network (GUAN)“, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 75 (2016) Nr. 11/12 – Nov./Dez. 479-488

Birmili, W. 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 Syst. Sci. Data, 8, 355–382, 2016 www.earth-syst-sci-data.net/8/355/2016/ und doi:10.5194/essd-8-355-2016 und <https://www.helmholtz-muenchen.de/epi/research/research-groups/environmental-exposure-assessment/projects/guan-german-ultrafine-aerosol-network/index.html>

Birmili, W., Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V. für das Umweltbundesamt (UBA) (2006). Forschungsbericht „Räumlich-zeitliche Verteilung, Eigenschaften und Verhalten ultrafeiner Aerosolpartikel (>100nm) in der Atmosphäre, sowie die Entwicklung von Empfehlungen zu ihrer systematischen Überwachung in Deutschland“, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3114.pdf>

Burkhardt, J. et al. (2018). “Camouflaged as ‘degraded wax’: hygroscopic aerosols contribute to leaf desiccation, tree mortality, and forest decline”. Environmental Research Letters, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad346> und <https://idw-online.de/de/news699442>.

Chen, R., et al. (2016). “Beyond PM2.5: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution”, Biochimica et Biophysica Acta 1860 (2016) 2844–2855, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304416516300745?via%3Dihub>

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2015). Broschüre „Feinstaubmessung in Kurorten“, https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/medizin/broschuere_feinstaub.pdf?blob=publicationFile&v=2

Europäische Union “European Regional Development Fund” UFIREG-Projekt “Ultrafine Particles – an evidence based contribution to the development of regional and European environmental and health policy”, Broschüre: “Ultrafine particles - too small to see, too big to ignore: What can regional and European environmental and health policy do?”, http://www.ufireg-central.eu/files/Downloads/UFIREG_Summary_for_Policymakers.pdf Flyer: “Ultrafeine Partikel – Klein, fein und gemein”, https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/UFIREG_Zusammenfassung_web.pdf

Health Effects Institute (HEI), HEI Review Panel on Ultrafine Particles (2013). "Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles", HEI Perspectives 3, Health Effects Institute, Boston, MA, <https://www.healtheffects.org/publication/understanding-health-effects-ambient-ultrafine-particles>

Helmholtz Zentrum München (2015). „Feinstaub: ultrafeine Partikel beeinflussen Herzfunktion“, <https://www.helmholtz-muenchen.de/aktuelles/uebersicht/pressemitteilungnews/article/26522/index.html>

Helmholtz Zentrum München (2016). Diabetesforschung „Risikofaktor Luftverschmutzung“, <https://www.helmholtz-muenchen.de/aktuelles/uebersicht/pressemitteilungnews/article/35848/index.html>

Hennig F., et al. (2018). "Ultrafine and Fine Particle Number and Surface Area Concentrations and Daily Cause-Specific Mortality in the Ruhr Area, Germany, 2009–2014", <https://ehp.niehs.nih.gov/ehp2054/>

Hofman, J. et al. (2016). „Ultrafine particles in four European urban environments: Results from a new continuous long-term monitoring network“, Atmospheric Environment 136 (2016) 68e81, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016302783>

Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP) (2012). „Feinstaubbindungsvermögen der für Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen“, <http://www.iasp.asp-berlin.de/bilder/feinstaub-2012.pdf>.

Kumar, P. et al. (2014). "Ultrafine particles in cities", Environment International 66 (2014) 1–10, https://ac.els-cdn.com/S016041201400018X/1-s2.0-S016041201400018X-main.pdf?_tid=3799c4c6-b265-4211-99fc-4293cc2cb5e6&ac-dnat=1535466105_9b3429f15d1869624a47ac42d9300220

Lanzinger, S. et al. (2016). "Associations between ultrafine and fine particles and mortality in five central European cities - Results from the UFIREG study", Environment International 88 (2016) 44–52, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412015301100?via%3Di-hub>

Lanzinger, S. et al. (2016). "Ultrafine and fine particles and hospital admissions in Central Europe, results from the UFIREG study", <https://www.atsjournals.org/doi/10.1164/rccm.201510-2042OC>

Li, M. et al. (2015). "Assessing the Capacity of Plant Species to Accumulate Particulate Matter in Beijing, China", <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140664>.

Li, N. et al. (2016). „A work group report on ultrafine particles (American Academy of Allergy, Asthma & Immunology): Why ambient ultrafine and engineered nanoparticles should receive special attention for possible adverse health outcomes in human subjects“, J Allergy Clin Immunol 2016 Nr. 138 (2):386-96, doi: 10.1016/j.jaci.2016.02.023, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4976002/>.

Meier, Chr. Neue Zürcher Zeitung (NZZ) (2013). „Dreckige Luft als Gesundheitsrisiko“, <https://www.nzz.ch/wissen/wissenschaft/dreckige-luft-als-gesundheitsrisiko-1.18143918>

Neuberger, M. (2007). „Umweltepidemiologie und Toxikologie von Nanopartikeln (Ultrafeinstaub) und Feinstaub“, Gazsó A., Greßler S., Schiemer F. (eds) Nano. Springer, Vienna

Ostro, B. et al. (2015). „Associations of Mortality with Long-Term Exposures to Fine and Ultrafine Particles, Species and Sources: Results from the California Teachers Study Cohort“, Environ Health Perspect; DOI:10.1289/ehp.1408565, <https://ehp.niehs.nih.gov/1408565/>

Paola, P. et al. (2015). “Are we forgetting the smallest, sub 10 nm combustion generated particles?”, Particle and Fibre Toxicology (2015) 12:34 DOI 10.1186/s12989-015-0107-3, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4628326/>

Paulot, F. et al. (2014). “Hidden cost of U.S. Agricultural exports: Particulate matter from ammonia emissions”, Environ. Sci. Technol., 2014, 48 (2), 903–908, doi.org/10.1021/es4034793.

Peters, A. et al. (2011). “Lessons from Air Pollution Epidemiology for Studies of Engineered Nanomaterials”, J Occup Environ Med. 2011 Volume 53 (Number 6 Supplement), 8-13, doi:10.1097/JOM.0b013e31821ad5c0, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21654423>

Pfanz, H. et al. (2006). „Das Staubfangvermögen von Vegetation“ Taspo 3, 12-15

Pfanz, H. et al. (2006). „Phytoreduktion von Stäuben durch krautige Pflanzen und Holzgewächse“ Verhandlungen DGGL, Rostock, 14. -16. Juni 2006, 173 - 177

Pfanz, H., et al. (2007). „Die Wirkung von Holzgewächsen auf Stäube und die mögliche Rückwirkung der Stäube auf die Pflanzen“ In. Roloff A. (Hrsg) Urbane Gehölzverwendung im Klimawandel und aktuelle Fragen der Baumpflege. Forstwiss. Beitr. Tharandt/Contr. For. Sci. 54-62

Pozzer, A., (2017). “Impact of agricultural emission reductions on fine particulate matter and public health”, Atmos. Chem. Phys., doi:10.5194/acp-2017-390, 201, www.atmos-chem-phys.net/17/12813/2017/.

Rückerl, R. et al. (2007). ”Ultrafine particles and platelet activation in patients with coronary heart disease – results from a prospective panel study”, Particle and Fibre Toxicology 2007, 4:1 doi:10.1186/1743-8977-4-1, [https://particleandfibretoxicology.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-8977-4-1](https://particleandfibretotoxicology.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-8977-4-1)

Rückerl, R. et al. (2011). ”Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence”, Inhalation Toxicology, 2011; 23(10): 555–592, DOI: 10.3109/08958378.2011.593587, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/08958378.2011.593587>

Schubert, A., Süddeutsche Zeitung (SZ.de) (2017). „Luftverschmutzung durch Ultrafeinstaub“, <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/luftverschmutzung-da-liegt-was-in-der-luft-1.3752834>

Speak, A.F. et al. (2012). "Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city", Atmospheric Environment Volume 61, December 2012, 283-293, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012007157>.

Stone, V. et al. (2017). „Nanomaterials Versus Ambient Ultrafine Particles: An Opportunity to Exchange Toxicology Knowledge“, <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/EHP424>

Tierversuche an Mäusen: Allen, J.L., et al. (2014). "Early Postnatal Exposure to Ultrafine Particulate Matter Air Pollution: Persistent Ventriculomegaly, Neurochemical Disruption, and Glial Activation Preferentially in Male Mice", Environ Health Perspect; DOI:10.1289/ehp.1307984, <https://ehp.niehs.nih.gov/1307984/>

Umweltbundesamt (UBA) (2013). „Aus welchen Quellen stammt Feinstaub?“, <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/aus-welchen-quellen-stammt-feinstaub>

Umweltbundesamt (UBA) (2013). „Warum ist Feinstaub schädlich für den Menschen?“, <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-ist-feinstaub-schaedlich-fuer-den-menschen>

Umweltbundesamt (UBA) (2018). „Relation der Feinstaubpartikel“, <https://www.umweltbundesamt.de/bild/relation-der-feinstaubpartikel>

Umweltbundesamt (UBA) und das Schweizerische Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2018). "Health Effects of Ultrafine Particles Systematic literature search and the potential transferability of the results to the German setting", Project number: 003777 7205 UKAGEP

United States Environmental Protection Agency (EPA). Integrated Science Assessment for Particulate Matter: Final Report; EPA/600/6-08/139F; National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development: Research Triangle Park, NC, USA, 2009, <http://kill-carb.org/20100226-ross.pdf>

Wichmann, Schlipkötter, Fülgraff „Handbuch Umweltmedizin“, 54. Erg. Lfg. 6/15

Cohen, A. J., et al. (2004). „Urban air pollution“ Kapitel 17, Seite 1422 in WHO “Comparative Quantification of Health Risks”, Volume 2, Kapitel “Environmental and occupational risk factors”, <http://www.who.int/publications/cra/chapters/volume2/1353-1434.pdf?ua=1> und <http://www.who.int/publications/cra/en/>

International Agency for Research on Cancer (IARC) (2013). “IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths”, https://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf

World Health Organization (WHO) (2013). “Health effects of particulate matter”, http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf